

**A
SZÉLENERGIA
HASZNOSÍTÁSA**



ÚJTECHNIKA

LEDÁCS KISS ALADÁR
A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁSA

ÚJ TECHNICA

ALYTRONKASAN AYONKATISKE A

LEDÁCS KISS ALADÁR

A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁSA

TÖRTÉNELMI VILÁGKÉP
ALKALMAZÁSOK A
MEGÚJULÓ ÉS SZÉLENERGIAK
HASZNÁLATÁNAK A HATÉKONYSÁG
NÖVELÉSÉRE ÉS SZÉLESÍTÉSÉRE

1963



MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, BUDAPEST.

1963

Ez a könyv bebizonyította, hogy lehet a szélenergiát hazánkban is — úgy a mezőgazdaságban, mint az országos hálózatban — hasznosítani, és arra konkrét megoldásokat is javasol. Minden energetikai szakember haszonnal olvashatja.

Lektorálta:

DR. BLAHÓ MIKLÓS

A KÖNYV ÖSSZEVONT TARTALMA:

TÖRTÉNELMI VISSZAPILLANTÁS
A SZÉLENERGIA FIZIKÁJA
SZÉLERŐGÉPEK ÉS SZÉLERŐMŰVEK
OLCSÓ ENERGIA A MEZŐGAZDASÁGNAK
MÉRETEZÉS ÉS GAZDASÁGOSSÁG

ETO: 521.548

MŰ 131-1-6366

Felelős kiadó: Solt Sándor

Felelős szerkesztő: Zatskó Béla — Műszaki szerkesztő: Harkai József

Azonossági szám: 40 634 — Ívterjedelem: 8,8 (A5) — Ábrák száma: 53

Példányszám: 1100

63.2435 Egyetemí Nyomda, Budapest

ELŐSZÓ

Az a megállapítás, hogy energiaszegény országunk egyik jelentős természeti energiaforrásának, a szélenergiának hasznosítása különös figyelmet érdemel, látszólag magától értődik. Voltak is időnként ilyen irányú kezdeményezések, amelyek azonban — minthogy a döntő szót nem mindig olyanok mondták ki, akik ebben a tárgykörben alapos szakképzettséggel rendelkeztek — nemcsak hogy haladást nem jelentettek, sőt, hosszú időre elvágták az útját az újabb kezdeményezésnek.

Már a két világháború közt felmerült az a gondolat, hogy az ország energiahelyzetén a szélenergia hasznosításával kellene segíteni. Az akkori kormányzat e kérdés tanulmányozásával a József Műegyetem Mezőgazdasági és Gép-tani Tanszékét bízta meg, amely Orosházán, Balatonföldváron és a Kékestetőn végeztetett szélméréseket. Bár e mérések mai tudomásunk szerint kedvező eredményeket adtak, a tanszék véleménye mégis kedvezőtlen volt, kimondván, hogy Magyarországon nincs hasznosításra érdemes szél erő.

A második világháború után a rohamos ipari fejlődés elősegítése végett újra számot kellett vetni az ország energiahelyzetével; akkor az érdeklődés ismét a természeti energiák, köztük a szélenergia hasznosítása felé fordult. Ekkor került sor a Martonvásár—Erdőháti szélmotor kísérletekre, amelyekből azt a véleményt szűrték le, hogy érdemes a kérdéssel foglalkozni, de ehhez fejlettebb eszközök kellenének. Ennek ellenére a kezdeményezés ismét megrekedt.

Az Egyesült Nemzetek Szövetsége által rendezett energia-konferenciák közül az 1954-ben Rio de Janeiróban megtartott konferencia foglalkozott először a szélenergia hasznosításával. E konferenciára öt nemzettől érkezett be olyan

dolgozat, amely a tárgyhoz megfelelő készséggel szólt hozzá. Az ezekről kiadott hivatalos közleményt feldolgozva, előadást tartottam az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesületben, amelynek vitája folyamán DÓRY BÉLA mérnök egy szélenergia munkabizottság felállítását javasolta. A bizottság a szélenergia hasznosításának néhány lelkes hívéből meg is alakult, s tevékenységének egyik eredménye az volt, hogy az Országos Meteorológiai Intézet újabb mérőhelyeit már az energiamérés szempontjából is megfelelően telepítette. Néhány újabb mérés alapján sikerült is bebizonyítanunk, hogy igenis van nálunk elegendő mennyiségű hasznosítható szélenergia.

Tisztáztuk ezenkívül azt is, hogy milyen rendszerű és nagyságú szélkerekeket volna előnyös építeni. Az illetékes szervek megbízása alapján kidolgoztam egy 200 kW-os szélerőmű tervtanulmányát, amely a szóban levő szélerőmű szerkezeti megoldását, méreteit, költségeit és teljesítményadatait tartalmazta. (E tervtanulmány elkészítésében, az erőmű villamos berendezésének megválasztásában bizottságunk egyik tagja: GOHÉR MIHÁLY, a villamosgépek ismert szakértője volt segítségemre.) A tervtanulmány alapján a bizottság javasolta egy ilyen szélerőmű megépítését. A szükséges költségeket még 1959-ben meg is szavazták, az építés szervezését pedig az Erőmű Tervező Intézet vállalta. Az ütemterv szerint az erőműnek már üzemben kellene lennie; de váratlan ügyintézési nehézségek következtek be, így a megvalósítás időpontja — sajnos — még mindig bizonytalan.

Az eddigi tapasztalatok azt mutatták, hogy műszaki szakembereink — kellő magyar szakirodalom híján — teljesen tájékozatlanok a szélerőmű működését és gazdaságosságát illetően, így jelentőségét sem tudják helyesen megítélni. Ez magyarázza a kellő felkészültség hiányát és az ebből származó nehézségeket is. Ezt a hiányt kívánja pótolni ez a mű.

Mind a könyv megírásának munkájában, mind a szélenergia hasznosítása érdekében folytatott tevékenységemben mindig számíthattam Dr. BLAHÓ MIKLÓS műszaki egyetemi docens tanácsaira, akinek nagy szakmabeli tudása és lelkes támogatása megkönnyítette számomra a helyes út

kiválasztását. A szélerőművek villamos gépei problémáinak megoldásában GOHÉR MIHÁLY műszaki tanácsos volt a készséges támaszom. Sokat köszönhetek az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület kebelében működő Szélerőenergia Munkabizottság lelkes támogatásának is. Külön ki kell emelnem TEŐKE GÉZA nehézipari minisztériumi főmérnöknek, a szélerőenergia-hasznosítás lelkes hívének pártfogását. Végül ezúttal mondok hálás köszönetet mindazoknak, akik munkámban segítséget nyújtottak. Segítségük az ország energiaellátásának is javára válik.

Budapest, 1963. január hó

LEDÁCS KISS ALADÁR

kiadásában. A szerzőknek számos egyéb problémájuk
 megoldásában GÖTTSCHE LOWE MIHÁLY művészi lendülete volt
 a legértékesebb. Sokat beszéltek az életrajzokról,
 kedveltek tudományos íggyelést kedveltek művészi
 művészetéről, illetve életrajzokról is. Külön ki kell
 emelnem TÖRKÉ ÉNA vezetését miniszteri tanács-
 adónak, a szerkesztésben is sokat tudott segíteni.
 Végül ezúttal mindenki kellesz köszönetet mondhatunk, akik
 munkájukkal segítek a kiadásban. Segítettek az ország
 elterjedésében és a jövőre várjuk.

Budapest, 1983. január hó

LENYÁCS KISS ALADÁR

A világ készlete és termelése földi energiahordozókból
az 1980. évtől:

Földrajzi név: Földrajzi név: Földrajzi név:

BEVEZETÉS

A fejlődő emberi társadalmak rohamosan növekvő energiaszükségletét fedezni: ez ma az emberiség egyik legfontosabb problémája. A világ energiaszükséglete olyan gyorsan növekszik, hogy a szakemberek úgyszólván évről évre kénytelenek újabb energiamérlegeket felállítani, amelyek folyton változó képet festenek; közben újabb energiaforrásokat fedeznek fel, és a fogyasztás is gyorsabban emelkedik, mint ahogyan előirányozták. Az általános helyzet azt a benyomást kelti, hogy miután a földi energiahordozók készlete folyton növekvő mértékben csökken, a világ energiaszükséglete pedig állandóan növekszik — belátható időn belül nem lesz miből kielégíteni az energiaigényeket, ha nem igyekszünk a természeti energiaforrásokat fokozottan kihasználni. Természeti energiaforrásaink sohasem fogynak, amíg a Nap — természeti energiánk folytonos megújulásának egyetlen erőforrása — küldi Földünkre sugarait.

Ma még azonban a Föld országai legnagyobb részét földi energiahordozók felhasználásával elégítik ki energiaszükségletüket. Hogy ez így meddig lesz lehetséges, az alanti számokból jól megítélhető.

A világ energiaszükséglete egy évszázad alatt kilókalóriákban kifejezve a következőképpen alakult:

1860-ban 3000, 1953-ban 23 200, 1960-ban 30 700 trillió kilókalória volt és 1965-ben 38 000 trillió kilókalória a várható.

A világ készlete és termelése földi energiahordozókból az 1960. évben:

	Felmért:	További becsült:	Évi kitermelés:
	készlet		
feketeszén	3,6 billió t*	1,8 billió t	0,0017 billió t
barnaszén	1,2 billió t	0,9 billió t	0,0006 billió t
kőolaj	40 milliárd t	160 milliárd t	1 milliárd t
földgáz	25 milliárd t	125 milliárd t	0,4 milliárd t

Ha a világ energiaszükséglete állandóan az 1960. évi szinten maradna, akkor a feketeszén 3100 évre, a barnaszén 3500 évre, a kőolaj 200 évre és a földgáz 375 évre lenne elegendő, feltéve, hogy a becslés szerinti mennyiségek valóságnak bizonyulnak. A világ energiaszükséglete azonban állandóan növekszik. Ez a növekedés a jelenlegi viszonyok szerint közepesen évi 5%-osnak vehető, a szükséglet tehát 1980-ban óvatos becsléssel 1960-hoz képest 1,7 szerez és 2000-ben 3,5 szörös lesz. Ha számításba vesszük, hogy a világ kőolajfogyasztása sokkal rohamosabban nő, mint a szilárd tüzelőanyagoké, akkor láthatjuk, hogy a kőolajkészlet még 50 évre sem lesz elegendő. Ezért a robbanómotorok üzeméhez nélkülözhetetlen energiahordozókat szénből kell majd előállítani, így a barnaszénkészletek még rohamosabb csökkenése várható, mivel 1 kg szintetikus benzin előállításához összesen 6 kg barnaszén szükséges. Mindezt tekintetbe véve, a világ készlete földi energiahordozókból annyira véges, hogy máris indokolt a természeti energiaforrásokat jobban kihasználni.

A földi energiahordozók nem egyenletesen oszlanak meg a világ országaiban. Egyes országoknak sokszáz évre való készletük van (USA, Szovjetunió, Kína), míg mások máris hiányt szenvednek. Ez utóbbiakhoz tartozik —

* Az alábbiakban a „kg” jelölés mindenkor a tömegegységet (ill. a t ennek az ezerszeresét) jelenti, míg az erókilogramm jelölésére — az MSZ 4900-55 szabvány előírásainak megfelelően — a „kp” (kilopond) jelet használjuk.

sajnos — hazánk is; az 1960. évi adatok szerint Magyarország összes

kőszén és barnaszén készlete 2000 mill. t,
évi termelése 28 mill. t,

szénhidrogén (kőolaj + gáz) készlete 50 mill. t, évi termelése 1,5 mill. t.

Ha tehát az ország energiaszükséglete az 1960. év szintjén maradna, akkor a szénkészlet 72 évre, a szénhidrogénkészlet pedig 33 évre volna elegendő. Mivel azonban nálunk is majdnem azonos arányban nő az energiaszükséglet mint a világ átlagos fogyasztása, számítanunk kell arra, hogy földi energiaforrásaink még ebben az évszázadban elfogynak. Hogy csökkentsük készleteink fogyását, máris vásárlunk a szomszédos népi demokráciáktól villamosenergiát, kőolajat, földgázt, sőt kőszént is. A természeti energiaforrások kihasználása tehát nagyon is időszerű nálunk.

Hazánk a következő természeti energiaforrásokkal rendelkezik:

a) *Közvetlen napsugárzás.* Hazánk területén a közvetlen napsugárzás energiája évi kb. 1400 kWh/m^2 -t tesz ki. Az ország $90\,000 \text{ km}^2$ területére tehát évente $90\,000 \cdot 1382 \cdot 10^6 \approx 100$ billió kWh energiát sugároz a nap. Ez bőségesnek látszik, azonban — sajnos — nagyon kicsi: óránként $1400/8760 = 0,16 \text{ kW/m}^2$ az átlagos intenzitása. A napsugárzás közvetlen kihasználásához tehát óriási területeket kell besugároztatni, hogy abból jelentős energiamennyiséget termelhessünk, annál is inkább, mivel a tükörreflektorokkal dolgozó gőzelektromos naperőgépek hatásfoka mindössze kb. 5%. Egy effektív kilowattnyi állandó teljesítményhez tehát egy alkalmas napsugárzású területen 126 m^2 területű besugárzott tükörfelületre volna szükség. El lehet tehát képzelni, mily óriási berendezésekre és beruházásokra volna szükség egy nagyobb teljesítményű naperőműhöz, a mi éghajlatunk alatt. Még az újabb, 16% hatásfokkal dolgozó napelemekkel sem lehet nálunk elfogadható eredményeket elérni a napsugárzás közvetlen hasznosítása terén, annál kevésbé, mert a

napsugárzás reggel nulláról kiindulva, délig fokozatosan erősödik, majd estére megint nullára csökken. Felhős napokon nincs ilyen energia; ezenkívül a sugárzás csak a nyári hónapokban számottevő, télen jelentéktelen, holott éppen ősztől — tavaszig volna az energiára a legnagyobb szükség, és borús napokon inkább, mint derűseken.

b) A *biogáz* istállótrágyából és más mezőgazdasági hulladékokból zárt edényben erjesztéssel fejlesztett nagy kalóriatartalmú (5200 kcal/m^3) éghető gáz, amely tehát évről évre megújuló mennyiségű alapanyagokból termelhető, és így a természeti energiák közé sorolható. Ugyanúgy használható fel, mint bármely más ipari, vagy háztartási gázféleség (pl. világítógáz). Ha minden állati trágyát és mezőgazdasági hulladékot biogáz termelésére fordítanánk, kb. 2500 millió m^3 gázt lehetne évenként termelni, kb. 13 billió kcal hőértékben. Ez az 1960. évi 130 billio kcal évi energiaszükségletünknek kereken a 10%-át teszi ki, tehát nem volna egészen jelentéktelen. De a feltételezett mennyiségű mezőgazdasági növényi hulladék nem áll rendelkezésre, mert ennek nagyobb részét — a szalmát és kukoricaszárat — sokkal jobban hasznosítják a szalmacellulóz gyárak. Így a biogáz jelentősége a hozzávaló nyersanyag híján az ország energiaellátásában egészen elenyészik.

c) *Vízenergia*. Ebben egészen szegények vagyunk. Az 1955. július 4-én megtartott Vízenergia Ankét adatai szerint, ha Magyarországon minden lehetséges vízerőművet megépítenénk, összesen 457,8 MW teljesítményt nyernénk, amelyből évi 2982 millió kWh-t lehetne kitermelni. Ez hőenergiára átszámítva kereken 2,4 billió kcal-t jelent, azaz 1960. évi egész energiaszükségletünk 1,85%-át. A vízerőművek építésének fajlagos beruházási költsége igen magas, kb. háromszorosa a hőerőművének. Emiatt a vízerőművek építését nálunk elsősorban öntözési-csatornázási szempontok alapján kell megítélni. Az ország energiaszükségletében tehát alig nyújthat segítséget.

d) *Szélenergia*. Jelentősége, nagysága évtizedek óta vita tárgyát képezi. Noha nagyságban a közvetlen

napsugárzás energiamennyisége után következik, ebből jelentőségét mégsem lehet megítélni, mivel csak a föld felszínéről szélkerekekkel elérhető légrétegek mozgási energiája hasznosítható. Azonban, amint a következő fejezetben látni fogjuk, még az elérhető légrétegek energiája is oly óriási, hogy a belőle kitermelhető energiamennyiség komoly tényezője lehet az ország energiaellátásának. Számot kell azonban vetnünk azzal a tényvel, hogy a szélergia hasznosításának merőben más a technikája, mint jelenlegi megszokott energiatermelésünké. Jelen könyv feladata ennek az új energiatermelési technikának az ismertetése és alkalmazásának népszerűsítése is, mivel a szélergia hasznosítása földi energiahordozókban szegény országunknak létérdeke.

Figyelmén kívül hagytuk az eddigiekben az atomenergia hasznosításának lehetőségeit. Ezt azért tettük, mivel ebben a kérdésben — véleményünk szerint — még nem érkezett el a döntés ideje.

A *Civil Engineering* 1958. júniusi számában (a 649. oldalon) megjelent „Wind Power Generation” című cikk bevezetésében a következőket mondja: „Annak ellenére, hogy magenergiából is egyre több villamosenergiát termelünk, mind nagyobbodó erőművekben, mégis nyomós érvek szólnak a szélergia hasznosítása mellett. A szélergia átalakításának költségei ui. lényegesen olcsóbbak lehetnek, mint a hőenergiáéi, akár szénből, akár olajból, vagy magenergiából állították azt elő.”

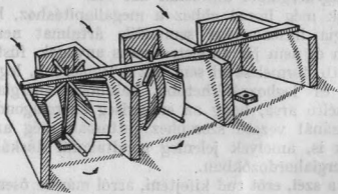
Tegyük még hozzá ehhez a megállapításhoz, hogy a szélergia hasznosítása semmiféle ártalmat nem rejt magában és nem jár az életre káros anyagok, füstgázok, korom stb. termelésével sem. Ez a legolcsóbb, leghigiénikusabb és leghozzáférhetőbb hatalmas energiatárolás, tehát méltó arra, hogy az emberiség energiagondjainak megoldásánál vezető szerephez juttassák még azok az országok is, amelyek jelenleg gondtalanul dúskálnak a földi energiahordozókban.

Hogy a szél, erőt tud kifejteni, arról már az ősember is fogalmat alkotott magának, amikor látta, hogy a szélvihar fákat csavar ki tövestől, erdőket tarol le, homok-

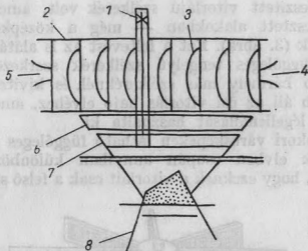
hegyeket hord el, és a vizeken hatalmas hullámokat kelt, amelyek harsogva törnek meg a partok szikláin. A szél energiáját a legrégebb időkben csak hajók és dereglyék hajtására használták fel. Vitorlákat már a primitív ősember is használtak vízi járműveik hajtására, ugyanúgy, ahogy a ma élő vízpartlakó primitív emberek is. Amikor azután — bizonytalanul régi időkben — 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 vitorlát: kifeszítették, bevonták, ahogy a szél ereje megkívánta.

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

A legősibb szélmalomok romjait *Sven Hedin* svéd kutató expedíciója az Irán—Afgán határ közelében Neh-ben fedezte fel. Az itteni szélviszonyok különösen kedvezőek voltak a szélérőművek felállítására szempontjából, mert itt jóformán állandó északi szél fúj. Ennek megfelelően



1. ábra. Ősrégi szélmalom rekonstruált rajza
(Neh, Irán)



2. ábra. Egy arab szélmalom vázlatja i.e. 1271-ből
 1 függőleges szélkeréktengely; 2 küllők; 3 vitorlák
 (a küllőkre kifeszítve); 4 a szél beáramlása a vitor-
 lákra; 5 a szél távozása; 6 a szélkerék tengelyére
 ékelt malomkő; 7 álló malomkő; 8 állvány

a szélerőműveket is erre az állandó egy irányú 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. ábrán látható.

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.

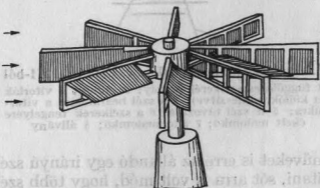
A szélerőmű valószínűleg vizet emelt, öntözéses földműveléshez.

Egy hasonló függőleges tengelyű szélerőművet ír le és vonalas vázlatot is ad róla az ókori arab tudós: *Diszmasghi*, i. e. 1271-ben (2. ábra). A szélkerék az alatta elhelyezett, közvetlenül a szélkerék tengelyére erősített malomkövet hajtotta.

Ebből a két adatból arra következtethetünk, hogy a szélerőmű legősibb formája a függőleges tengelyű és

küllőkre feszített vitorlájú szélkerék volt, amellyel — továbbfejlesztett alakokban — még a középkorban is találkozunk (3. ábra). 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

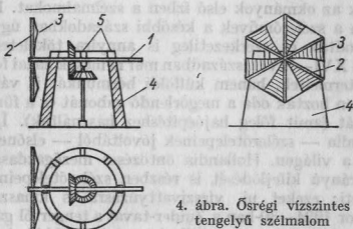


3. ábra. Függőleges tengelyű ősi szélkerék lobogószerű vitorlákkal

mentén erősítik a lapátokra, és így a szél csak az egyik oldalon feszíti a vitorlát a lapát farácsára, míg a másik oldalon az zászló módjára lebeg. Itt tehát nincs szükség árnyékoló falakra, a szélkerék szabadon emelkedik ki a házak teteje fölé és bármely irányú szélben forgásba jön.

A szárnylapátos, vízszintes tengelyű szélkerék már a későbbi fejlődés terméke lehetett. Legősibb alakja valószínűleg az a szélmalom, amelyből a görög szigeteken és Kisázsiaiban ma is szép számmal találunk működő példányokat. A vízszintes tengely széloldali végére erősített küllőkön háromszögű vitorlák feszülnek. A malom maga kör alakú falépítmény, amelynek felső peremén minden irányban bevájások vannak csapágyazás számára. A szélkerék tengelyét azután mindig abba a két egymással szemközti csapágyba helyezik, amely a szél irányában

fekszik. Ha a szél iránya tartósan megváltozik, a szélkerekeket tengelyestől kiemelik ágyazásából és másik két csapágyba helyezik át (4. ábra). 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 oly szélmérőre, amelynek szélkereke könnyen beállítható a szélirányba. Ez többféle módon is elérhető; így fejlődött ki Németalföldön a „hollandi” (5. ábra) és Németországban a



4. ábra. Ősrégi vízszintes tengelyű szélmalom

Bock-malom (6. ábra). Előbbinek csak a kúp alakú teteje forgatható el a szélkerékkel együtt a szél irányába, míg utóbbinak az egész torony alakú épülettete (szélkerékessel).

A függőleges tengelyű szélkerék bármily irányú szélkerékben 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 előbbit, hogy ezekből ma már egy darab sem maradt fenn, míg a régi, szárnylapátos, vízszintes tengelyű szélmalomból még mindig sok ezer van üzemképes állapotban. A magyarázat igen egyszerű. Ugyanazon lapátméreték és lapátkörátmérő mellett a vízszintes tengelyű, szárnylapátos szélkerék kb. tízszer akkora teljesítményt ad, mint a

függőleges tengelyű. Ezt a hatalmas teljesítménykülönbséget még mérőeszközök nélkül is könnyen megállapíthatták, és azért döntöttek a vízszintes tengelyű csavarlapátos (repeller) szerkezetű szélmalom javára.

Az észak-európai szélmalomok létezését igazoló legrégibb okmány a 9. században kelt. Angliában a Croylandi apátságban i. u. 806-ban adományoztak egy szélmalmot. Franciaországban 1105-ben egy szélmalom építési terveit nyújtották be az egyik kolostornak. Németalföldön a 13. század vége felé és Németországban a 14. században említik az okmányok első ízben a szélmalomokat. Hollandiában a szélerőművek a későbbi századokban úgy megszaporodtak és szerkezetileg is annyira tökéletesedtek, hogy a XVI—XVII. században már nemcsak hazai fogyasztásra termeltek, hanem külföldi bémunkát is vállaltak. Hajókon hozták oda a megőrlendő gabonát és a fűrészelni való fát (amit főleg hajóépítéshez használtak). Így lett Hollandia — szélerőtelepeinek jóvoltából — elsőnek ipari állam a világon. Hollandia öntözéses mezőgazdaságának nagyarányú kifejlődését is részben szélerőtelepeinek köszönheti; ezeket ui. vízszivattyúzásra is kihasználták. (Amikor 1924—30-ban a Zuider-tavat a tengertől gátakkal zárták el és vízmentesítették, hogy termőfölddé alakítsák, a víz átszivattyúzásához a tóból a tengerbe sok szélerőtelepet is felhasználtak. Így sikerült a vízmentesítést a legolcsóbban végrehajtani, amely végeredményben 2100 km² kitűnő termőfölddel növelte meg Hollandia területét.)

A szélmalomok használatát a Kelettől vette át Európa, valószínűleg a keleten járt hajósok révén; ezért először valószínűleg a tengerpartok mentén épültek szélmalomok, ahol a széljárás is kedvezőbb, mint a szárazföld belsőbb területein. Magyarországon, távol a tengerpartoktól, valószínűleg a XV. században terjedhettek el, amire azonban okmányszerű adataink nincsenek.

A középkorban használt különféle rendszerű szélmalomokról *Faustus Verantius* 1595-ben írt könyve, a *Machinae Novae* nyújt felvilágosítást. A könyvben az 1. ábránkon látható ősi szélmalom a „*molae turris quadratae*” néven (négyszegletes tornyú szélmalom), a 3. ábránkon

látható lobogó vitorlájú szélmalom pedig „*molae cum valvis versatilibus*” (lengővitorlás szélmalom) néven szerepel. Leír turbinalapátos függőleges tengelyű szélmalomokat is, amelyek akkor még használatban voltak.

Verantius műve alapján feltehető, hogy a szélmalom már akkor általánosan ismert szerkezet volt és annyi volt belőle, hogy Európa gabonatermését nagyobbrészt ezek örölték fel.

A szélmalomok száma Európában a múlt század utolsó negyedéig állandóan szaporodott. Emellett még technikailag is tökéletesedtek, mivel a múlt század folyamán beállott nagyarányú technikai fejlődés a szélmalomokra is kiterjedt. A szélerőművek mégis állandóan azzal a hátránnyal küzdtek, hogy csak akkor dolgozhattak, amikor a szél fújt. Hiába teremtett a technikai fejlődés eszközöket a szélcsendek áthidalására (könnyen és gyorsan üzembehelyezhető dieselmotort, szélerős időkben fel-tölthető akkumulátortelep) ezek nagymértékben megnövelték a beruházás tőkáját, és mintegy háromszorosra drágították a termelt energia árát. A szélerőtelepek csak akkor dolgoznak olcsón, ha a termelt energiát azonnal, tárolás nélkül hasznosítani lehet. A múlt század második felében indult meg a gőzturbinák és a dieselmotorok rohamos tökéletesítése, nagyarányú hőerőtelepek létesítése, melyek olcsón termeltek energiát, mert az üzemükhöz szükséges tüzelőanyagok, szén és ásványolaj, bőven és olcsón állottak rendelkezésre. A termelt elektromos energia elosztására országos hálózatokat létesítettek, amelyekről kis és nagy üzemek egyaránt olcsón kaphattak vilamos energiát. A szélmalomok, amelyekkel eddig olcsón örölték a gabonát és szivattyúzták a vizet a mezőgazdaság részére, egymásután tértek át a motoros, főleg a vásárolt árammal vitt üzemre, mert azzal bármely időben dolgozhattak. Németországban pl. az 1895-ben még üzemben volt kb. 18 200 szélerőműből 1913-ban már csak 13 405 létezett, közülük 11 366 dolgozott tisztán szélenergiával, míg a többi más energiaforrást is igénybe vett. Ez idő alatt Északnyugat-Európában közel 20 000 nagy szélmalom szüntette be üzemét; ezek a századfordulón még

Hollandiának, Dániának és az északnémet síkságnak majdnem az egész gabonatermését felőrölték.

Ugyanez a folyamat játszódott le Magyarországon is, úgyhogy a század elején a szélmalom a Kis- és Nagykunságban és Szeged környékén — egykori hazájában — már látványosság számba ment (5. ábra).

Az első világháború után még nagyobb arányokban épültek ki az országos energia-elosztó hálózatok, és ugyanilyen arányban, rohamosan szüntették be üzemüket a szélmalomok. 1933-ban a Németországban még működő szélmalomok számát csak 4—5000-re becsülték.

Sok jó gazdasági szakemberben keltett aggodalmat a szélmalomok ilyen rohamos pusztulása, mert látták, hogy velük egy olcsó energiaforrás megy veszendőbe, amely nem fogyaszt tüzelőanyagot. Kiváló szakemberek úgy vélekedtek, hogy ez a folyamat a szélerőművek korszerűsítésével talán még megállítható, sőt esetleg vissza is fordítható. Némi állami támogatás is jelentkezett. Dánia 1891 óta viszonylag jelentékeny összegeket áldozott olyan kutatómunkákra, melyek a széleenergia kihasználás fejlesztését szolgálják. Askov mellett 1897-ben egy kísérleti szélmalomot is építettek, amelynek üzemi eredményeiről *La Cour*, a kísérletek vezetője „Die Windkraft und ihre Anwendung zum Antrieb von Elektrizitätswerken” (A széleenergia és felhasználása villamosenergia termelésére) c. könyvében számolt be (1905). Ez volt az első kísérleti szélmalom, amely széleenergiával elektromosságot termelt, és az így termelt elektromossággal munkagépeket hajtott.

Mint érdekességet említjük meg, hogy *Nansen* 1893. évi északi-sarki expedícióján *Fram* nevű hajóját egy *La Cour*-rendszerű kis szélerőművel is felszerelték, amely a hajó fedélzetén foglalt helyet. A négylapátos szélkerék átmérője 7,6 m volt és feladata: a hajó villanyvilágításának az ellátása. A szélkerék 15 hónapig zavartalanul működött és megbecsülhetetlen szolgálatot tett; nappalá varázsolta az expedíció számára a féleves sarki éjszakát.

Az 1914—18-as világháború folyamán a repülőgépek rohamosan fokozódó jelentőséghez jutottak; hadi érdekek idegfeszítő versenyt diktáltak a szembenálló országoknak a repülőgéptechnika fejlesztésére. A repülés áramlástani problémáit hihetetlenül rövid idő alatt tisztázták, ami a szélenergia hasznosításának kérdésében is gyors fejlődést idézett elő. A göttingeni Áramlástani Kísérleti Intézet elméleti és kísérleti alapon állapította meg a propeller szárnylapátjainak legjobb kialakítását. A világháború után *Bilau* kísérletezett azzal, hogy ezeket az eredményeket a szélkerekek szárnylapátjainak kialakítására is alkalmazza; így módon igen jó eredményeket ért el. A szélmalomok szárnylapátjait megfelelőbben, áramvonalasan alakította ki, oly módon, hogy a szárnylapátok elülső élére áramvonal alakú borítást tett (amit ő *Ventikante*-nak nevezett el); így a meglevő szélmalomok teljesítményét jelentékeny mértékben meg tudta növelni. A szélkerék szárnylapátjainak áramvonalasabb kiképzése által elért jó eredmények *Bilau*-t arra serkentették, hogy továbbhaladjon ezen az úton. El is jutott egészen addig, hogy a szárnylapátokat végül is teljesen propellerlapátszerűen képezte ki (1920—24). Úgy találta, hogy ezáltal gyorsabb járású lett a szélkerék, és egyúttal hatásfoka is javult. A göttingai áramlástani kísérleteket, amelyek ehhez a munkához az elméleti alapot szolgáltatották, *Prandtl* és *Betz* végezték, akik e vizsgálatokról könyvet is írtak, azonban csak *Betz* foglalkozott a szélenergia hasznosításával részletesebben, a kísérletekkel kapcsolatban „*Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*” (1926) c. könyvében (Szélenergia és hasznosítása szélmalomok útján).

La Cour, *Bilau* és *Betz* munkássága műszaki és nemzetgazdasági viszonylatban általános érdeklődést keltett. A meteorológusok figyelme a szél természetrajzának tanulmányozása felé fordult és elkezdtek az egyes országok szélkataszterét felvételezni. Tudományos vizsgálatok alá vették a régebbi és újabb szélkerék-tanulmányokat. Így vetődött fel, hogy ezek közül esetleg a függőleges tengelyű szélkerekek is szóba jöhetnének energiatermelési

célokra, mint pl. a Jackson-féle szélkerék, a Just-féle szélturbina és a Savonius-rotor, noha ezek hatásfoka lényegesen rosszabb, mint a csavarlapátos szélkeréké. De a szélerőművek tervezése és építése mégsem fejlődött olyan mértékben, hogy korábbi életterét visszahódította volna, mert még mindig nem tudta felvenni a versenyt az Európa viszonylag sűrű energiahálózatáról minden időben készen kapható energiával és a bármikor könnyen üzembehelyezhető benzin- és dieselmotorokkal. A világnak azonban még számos olyan területe volt, ahol a hálózati és szállítási viszonyok fejletlensége folytán a széleenergia volt az egyetlen, amelyre erőforrásként számítani lehetett. A korszerűsített szélerőműveket ezek az országok kezdték vásárolni, és míg Európában állandóan fogyott a szélerőművek száma, ugyanakkor az energiaellátásban elmaradott földrészeken és országokban rohamosan nőtt. Ilyen területek voltak: Dél-Afrika, Dél-Amerika és Ausztrália, továbbá a Szovjetunió távoleső területei. Arra, hogy milyen gyorsan terjedtek el az ilyen területeken a szélerőművek, jellemző az a tény, hogy pl. a Dél-Afrikai Unió farmjain 1937-ben 77 000 kis vízszivattyúzó szélerőművet számoltak össze.

E területek igényeinek kielégítésére az USA-ban, Angliában és Németországban kis szélerőművek több típusát fejlesztették ki.

A kezdeményező az USA volt, ahol a Chicagói világkiállításon 1876-ban egy fémszerkezetű, soklapátos, lassújárású szélerőművontta magára a közfigyelmet, amely vizet szivattyúzott. A nagy érdeklődés lehetővé tette, hogy sorozatgyártásban állítsák elő, és így olcsó is volt. Szerkezete hasonló volt a 7. ábrán látható soklapátos szélerőművéhez. Habár ez a szélkerék áramlástanilag messze elmarad a tökéletestől és vízszivattyúval való terhelése sem arányos a mindenkori teljesítményével, mégis gyorsan elterjedt, mert nagy lapátfelületei miatt már gyenge (2,5 m/s sebességű) szélnél is megindul, és erősebb szél sem rongálja meg, mert 7–8 m/s sebességű szélnél automatikusan oldalt fordul és ekkor élével áll a szél felé, úgyhogy a szél nem tehet benne kárt.

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

Németországnak nem volt sehol sem olyan piaca, aho — úgy mint Anglia és az USA — kormányzati segédlettel árusíthatta volna gépeit, ezért a német gyárak a szélerő művek minőségére, korszerűségére és üzembiztonságára fektették a fősúlyt. Csak sorozatban gyártottak, és így kiválót nyújtanak, de ezzel arányos árban.

A német szélerőművek nagyrészt három-szárnylapátos, gyorsjáratú rendszerűek és állandó fordulatszámmal járnak. A fordulatszámot a szárnylapátok automatikus elforgatásával szabályozzák.

A Szovjetunió a saját távolfekvő területeinek energia-ellátására a D-5 és D-8 rendszerű soklapátos, lassújárású szélerőműveket, a D-2 kétlapátos és a D-12 és D-18 rendszerű háromlapátos, gyorsjárású szélerőműveket fejlesztette ki, amelyekből a szovjet gyárak 1943-tól kezdve évenként átlag 28 500 db-ot (összesen 120 000 kW teljesítménnyel) gyártottak és állítottak fel az Unió távolesó területein. Újabban a gyártott szélerőművek számát évi 42 000-re emelték.

Egészen 1931-ig nem építettek 50 LE-nél nagyobb teljesítményű szélerőművet. Hollandiában voltak ugyan a régi szélmalmok között elvétve 50 LE teljesítményűek is, de az újabb, korszerű szélmalmokat ennek ellenére sem merték 30 LE-nél nagyobb teljesítményűre építeni. Ez a teljesítmény mezőgazdasági szélerőművek céljára elegendőnek mutatkozott, és kellő tapasztalatok hiányában nem merték ezt a teljesítményt túllépni.

Ennek a századnak az elején kezdtek foglalkozni a szakemberek a szélerő nagyüzemi hasznosításával. Az első ilyen kísérlet a Szovjetunióban történt a Krimben, Balaklavában, 1931 májusában üzembehelyezett 100 kW-os szélerőművel (8. ábra), amely a termelt villamos áramot a szevasztopoli hőerőmű hálózatába táplálta be. Ez a szélerőmű 10 éven át, egészen a második világháború kitöréséig működött, és ez szolgáltatta a legelső bizonyítékát annak, hogy a szélerőmű járatható valamely erő-

művel párhuzamosan és annak az elosztóhálózatába betáplálhat. Az itt szerzett tapasztalatok alapján dolgozta ki 1931-ben *G. H. Szabinyin* szovjet tudós a szélerőművek szinkron üzemeltetésének elméletét. Rá 10 évre (1940—1943-ban) Weimarban a német szakemberek ugyannerre az eredményre jutottak. Hasonló kísérleteket folytattak 1940—1943-ban az USA-ban és 1950—51-ben Dániában (Egersborg mellett) is. Ezek a kísérletek kitűnő eredményekkel jártak, annak ellenére, hogy a szél egyenetlensége miatt a külső szakértők véleménye a párhuzamos üzem megoldásának lehetőségét illetően egyáltalán nem volt kedvező. A német kísérletek alapján *M. Kloss* 1942-ben dolgozta ki a szélerőművek párhuzamos üzemének elméletét és bebizonyította, hogy még szinkron generátorokkal is lehet periódustartó hálózatokkal, nagyon stabilis párhuzamos üzemet vinni. Sikeres párhuzamos üzemeltetési kísérleteket folytattak más helyeken is, mint: Haslev, Büsum, Uhingen (Németország), St. Cyr (Franciaország), St. Albans (Anglia).

E kísérletekkel véglegesen lefektették a szélerő nagyüzemi hasznosításának alapjait. Ahhoz ui., hogy a szélerőt nagyüzemi módon lehessen hasznosítani, mulhatatlanul szükséges, hogy a szélerőmű egy villamos elosztóhálózatra szinkron periódusú áramot ugyanúgy betáplálhasson, mint bármely más erőmű (pl. hő- vagy víz-erőmű), hogy a termelt energiát azonnal hasznosítani lehessen, és ne drágítsa azt meg egy esetleges energiaátvitel, vagy energiaátalakítás többletköltsége.

Így tehát most már csak nagyteljesítményű szélerőművekre volt szükség. A balaklavai szovjet szélerőmű még nem volt ilyennek tekinthető, csupán az előfutárja lehetett egy nagyobb szélerőműnek. Az ezzel szerzett tapasztalatok alapján terveztek is a Szovjetunióban egy 10 000 kW teljesítményű szélerőművet, amely azonban a világháború kitörése miatt nem került kivitelre. Az USA-ban *P. C. Putnam* kísérletezett egy általa szerkesztett 1000 kW teljesítményű szélerőművel, mely 1941 óta működött és a termelt villamosenergiát országos hálózatba táplálta (9. ábra). A berendezésben azonban

5. ábra.
„Hollandi”
szélmalom
a
Nagyalföldön



6. ábra. Német „Bock” malom





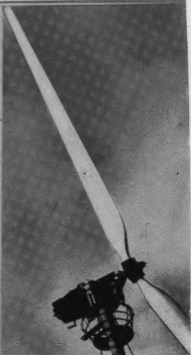
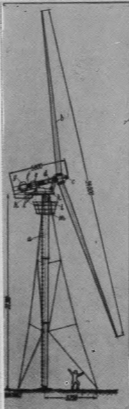
7. ábra. Amerikai rendszerű soklapátos, lassújárású szélmotor, főleg vízszivattyúzásra

8. ábra. A Krim-ben (Balaklavában) 1931-ben felállított 100 kW-os szovjet szélérőmű

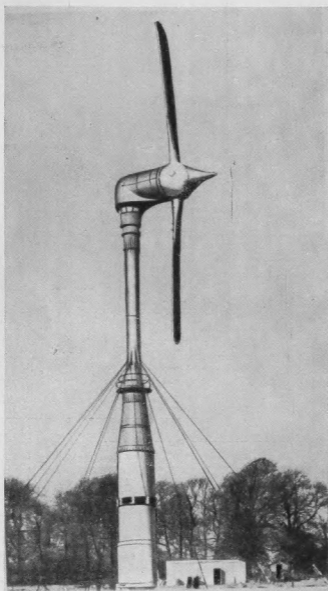


9. ábra. 1000 kW teljesítményű amerikai szélérőmű „Smith — Putnam szélturbina”

10. ábra. 100 kW teljesítményű
kísérleti szélérőmű az NSzK-ban



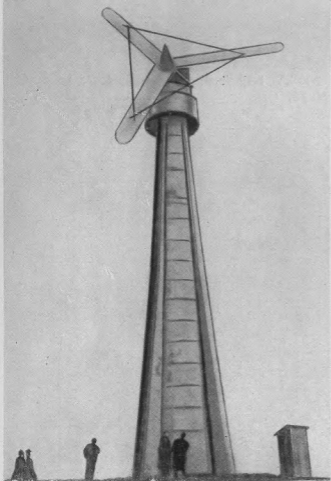
11. ábra. 130 kW
teljesítményű
Neyrpic D-21 típusú
szélérőmű. Cherbourg,
Franciaország



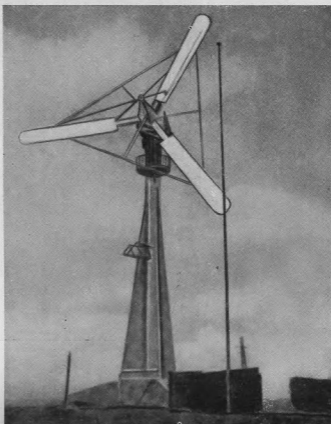
12. ábra. 100 kW teljesítményű Andreau rendszerű szélérőmű. Southampton, Anglia

13. ábra. 100 kW teljesítményű szélérőmű. Costa Head, Orkney szigetek, Anglia





14. ábra. 45 kW teljesítményű fix szárnylapátos kísérleti szélérőmű. Bogö, Dánia



15. ábra.
200 kW
teljesítményű
fix szárny-
lapátos kísérleti
szélérőmű.
Gedser, Dánia

gyakran jelentkeztek hibák, az sokszor volt üzemen kívül, és végül is 1945-ben egyik szárnylapátjának leválása miatt összetört. A kísérleteket nem folytatták.

Nyugat-Németországban 1949-ben alakult meg a „Szélenergia Tanulmányi Társaság” (Studiengesellschaft Windkraft, Stuttgart).

Ennek első munkája egy 100 kW teljesítményű, kísérleti szélérőmű megépítése volt, amelyet dr. Ing. Hütter tervezett (10. ábra). Ez az erőmű azóta állandó kísérleti üzemben van.

Franciaországban a „Francia Villamossági Társaság” (Électricité de France) végez St. Cyr-ben szélenergia kutató munkát. Terveztek egy 130 kW-os szélérőművet, amely a „Neyrpic D-21” típusjelzést kapta, és amelyet 1959-ben Cherbourg-tól délre állítottak fel. Azóta állandóan dolgozik, és már több erős vihart károsodás nélkül állt ki (11. ábra).

Anglia az energiagazdálkodás terén igen nehéz helyzetben van, mert szénbányászata válságba jutott és vízierő jelentéktelenek. A Calder-Hall-ban felépített atomerőmű üzeme energiatermelés tekintetében nem váltotta be a hozzáfűzött reményeket, ezért 1961 tavaszán leállították. Nagyarányú szélenergia felméréseket végeztetett egyik kutatóintézete, az Electric Research Association (ERA) útján, és kiderült, hogy oly bőségesen rendelkezik szélenergiával, hogy annak hasznosítása nagy segítséget jelentene energiaproblémáinak megoldásában. Az ez irányú munka tehát tovább folyik. 1953-ban a jó széljárású nyugati partokon, St. Albans-ban egy 100 kW-os Andreau rendszerű szélérőművet állítottak fel, amelyet az Enfield Cables Co (Southampton) épített (12. ábra). Az erőmű főleg rossz hatásfoka miatt nem vált be, ezért a kísérletezést abbahagyták és eladták Algériának. Lényegesen jobb eredményeket ért el a John Brown gyár egy 1950-ben épített 100 kW-os szélgéppel, amelyet az Orkney szigeteken Costa Head-ben állítottak fel (13. ábra). Ez a gép is üzemzavar nélkül működik felállítás óta. Az említett (ERA) kutatóegyesület egy 3750 kW teljesítményű szélérőműről tanulmánytervet készített, de ez kiforrat-

lannak és költségesnek mutatkozott. Mindazáltal tovább fáradoznak 4—5000 kW-os szélerőművek kifejlesztésén.

Újabban a Szovjetunióban is felmerült a nagyobb szélerőművek építésének a szükségessége, amit egyelőre úgy oldottak meg, hogy a már alaposan kikísérletezett és bevált 30 kW-os egységekből annyit építenek össze, amennyire szükség van. Így nemrégén egy 400 kW-os szélerőmű telepet létesítettek, 12 db 34 kW-os szélerőműből, amelyek egyenáramot szállítanak egy központosan elhelyezett motorgenerátornak, amely hálózati periódusú váltakozóáramot termel.

A felsorolt szélerőművek mind olyanok, amelyeknek fordulatszámát a szárnylapátok elállításával szabályozzák. A szárnylapátok elállítását egy bonyolult és költséges berendezés a terhelés függvényében önműködően végzi. Ez a szabályozási rendszer tehát a hő- és vízerőgépek szabályozási rendszerét követi mind elvileg, mind kivitelben. Amíg azonban a hő- és vízerőművek tárolható energiaforrással dolgoznak, amiből a terhelés jelentkezésekor szükség szerint fogyaszthatnak, addig a szél energiája nem tárolható közvetlenül, tehát ha jelentkezősekor nem hasznosítjuk azonnal teljes mennyiségében, úgy kihasználatlanul száguld tovább. A szélerőmű szabályozását tehát nem a terhelés, hanem a szélenergia bármikori jelentkezése alapján kell megvalósítani. Evégből oly terhelésről kell gondoskodni, amely a szélből termelt energiát bármely időben azonnal és teljes mennyiségben hasznosítja is. Ilyen természetű terhelési mód több is van: betáplálás erőátviteli hálózatba, vízszivattyúzás, elektromos vízbontás, vegyületek, fémek előállítása elektrolízissel stb.; mindezekről még részletesebben fogunk beszélni. Egy ilyen szélerőműhöz nem kellenek állítható szárnylapátok, ezért jóval egyszerűbb, olcsóbb és üzembiztosabb.

Az állítható szárnylapát nagymértékben hátráltatta a szélerőművek fejlődését; sőt valósággal zsákutcába juttatta, nagy beruházásokat igényel, rosszabb a hatásfok és konstrukciója a szélkerék méreteit is szűkebb korlátok közé szorítja.

Dániában a Sydørtjaellands Elektricitets Aktieselskab (SEAS) erőművek mérnöke *J. Juul* ismerte fel először és szerkesztett elsőnek villamosenergiát termelő szél-erőműveket fix, nem állítható szárnylapátokkal. Előbb egy meglevő 12 kW-os szél-erőművet alakítottak át fix lapátosra (Vester-Egersborgban). Ennek a tapasztalatai alapján 1952-ben egy 45 kW-os szél-erőművet építettek Bogö-ben (14. ábra), majd 1958-ban egy 200 kW-osat Gedser-ben (15. ábra), amely már gazdaságosság tekintetében is igen kedvező eredményeket mutatott fel. A 12 kW-os szél-erőművet már leszerelték, de a 45 és 200 kW-os szél-erőművek még ma is dolgoznak, hogy alapjául szolgálhassanak a továbbfejlődésnek.

A fix szárnylapátos szélkerék ezzel új utat tört a szél-erőművek továbbfejlesztésének útján. Anglia is csatlakozott a dán kezdeményezéshez. Dowset Holdings Ltd. Cranfieldben már fix szárnylapátos szél-erőműveket tervez és épít. 10 kW-tal kezdte, utána 25 kW-osat épített és most egy 250 kW-ason dolgozik.

A szél-erőművek tehát ma már együtthaladnak a korszerű technikával, és lehetséges, hogy belátható időn belül visszaszerzik az energiatermelésben a gőzgépek elterjedése előtti régi, uralkodó helyzetüket, amikor még Európa legfontosabb energiaforrását képezték. A korszerű szél-erőmű már túljutott a kísérleti állapoton. Tervezhető, számítható, tehát csak gazdaságosságának és üzembiztonságának továbbfejlesztésén kell még dolgozni. Jövője pedig beláthatatlan, mert könnyen hozzáférhető és hatalmas természeti energiát olcsón hasznosít.

Írlandban a Nyugat-Írlandi Életről: ABBECSKÉP
 (SEAS) erőművet építték. A Jami imre és családja
 és az észak-ír lakosság világhíresen híres, és az észak-ír
 nyelvet is, nem beszélve az észak-ír nyelvről. Ebből egy
 nagy részét az észak-ír nyelvet alkották az észak-ír
 (Vester-Egyszerűség). Kérek a tapasztaltak alapján
 1952-ben egy 45 kW-os erőművet építettek. Ebből
 (16. ábra) majd 1958-ban egy 200 kW-os erőművet
 (16. ábra) amely már gazdaságosabb körülményben is
 igen kedvező eredményeket mutatott. A 12 kW-os
 erőművet már lezárították, de a 45 és 200 kW-os erő-
 művet még ma is dolgoztatják, hogy alapján az észak-
 Írlandban a továbbfejlesztés.

Az észak-ír erőművet az észak-ír státusz a szék-
 erőművet továbbfejlesztették. Az észak-ír státusz
 között a hálózati rendszerben. Power Holding Ltd.
 Észak-Írlandban már az észak-ír erőművet az észak-ír
 rész és egy 10 kW-os erőművet, majd 25 kW-os erőművet
 és most egy 200 kW-os erőművet.

A szék-erőművet tehát ma már együttesen a köz-
 sassal összekapcsolják, és lehetőségek, hogy belátnak, hogy
 belüli világosság az energiaforrásban a központi
 elterjedés előtt, majd az észak-ír erőművet az észak-ír
 Kínos kapacitású energiaforrásra építik. A köz-
 sassal való kapcsolat már feljuttat a hálózati állapotban. Az
 erőművet, amelynek lehet csak gazdaságosnak és
 üzemeltetésének továbbfejlesztésén kell még dolgozni.
 Jövőre pedig lehetőségek, mert könnyen hozzáférhető
 és hatékony üzemeltetésű erőművet lehet építeni.

1. A SZÉLENERGIA FIZIKÁJA

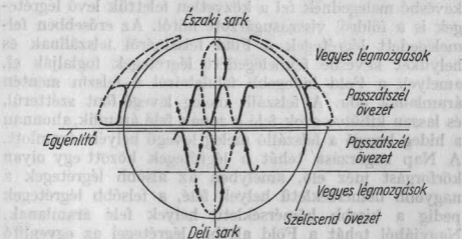
A szél a földünket körülvevő légrétegek mozgása, amelyet a Földre ható külső energiák, és pedig túlnyomórészt a Napról érkező sugárzási energiák, ezekből is főleg a hősugarak idéznek elő. Mivel a Nap sugárzási energiái Földünkre eléggé állandó és egyenletes mennyiségben érkeznek, az általuk felidézett légmozgás, a szél is egyenletes lenne, ha a Föld felszínének anyagi és alaki egyenlőtlenségei ezt nem zavarnák. Enélkül a Föld felszínén levő légrétegek éppen olyan állandó és szabályos áramlásban volnának, mint amilyen állandósággal és szabályszerűséggel a napsugarak a Földre érkeznek.

A Nap hősugaraival úgy idézik elő a légrétegek mozgását, hogy a légrétegeken több-kevesebb veszteséggel áthatolva a Föld felületét egyes helyeken erősebben, más helyeken gyengébben melegítik fel; ezzel arányosan jobban, vagy kevésbé melegednek fel a közvetlen felettük levő légrétegek is a földről visszasugárzott hőtől. Az erősebben felmelegedett légrétegek a Föld felszínéről felszállnak és helyüket kevésbé felmelegedett légrétegek foglalják el, amelyek a Föld hidegebb felületeiről a felszín mentén áramlanak oda. A felszállt meleg levegő fönt szétterül, és lassan kihűlve azok felé a zónák felé áramlik, ahonnan a hideg levegő a felszálló meleg levegő helyébe áramlott. A Nap sugárzása tehát a légrétegek között egy olyan körforgást idéz elő, amelyben az alsóbb légrétegek a nagyobb hőmérsékletű helyek felé, a felsőbb légrétegek pedig a kisebb hőmérsékletű helyek felé áramlanak. Nagyjából tehát a Föld alsóbb légrétegei az egyenlítő felé, míg felsőbb légrétegei a sarkok felé haladnak folya-

matosan; tehát lent a sarkok felől és fönt a sarkok felé fúj a szél.

Ezt a légáramlást azonban a Föld forgása is befolyásolja, minek következtében az alsó légrétegekben a sarkokról jövő szél nyugati irányban terelődik el, de a sarkokra visszaáramló felső légrétegek iránya is nyugat felé tolik, tehát nem ugyanazon irányban tér vissza a sarkokhoz. A levegő körforgása eszerint két óriási csavarvonalat alkot a Föld felületén, egyet az északi és egyet a déli féltekén, amelyek felszálló ívei az egyenlítőn és leszálló ívei a sarkok közelében vannak.

Az ilyen módon keletkező légmozgásnak az alsó rétegeit *passzát szélnek* nevezzük. Ha a keringés pályájához képest nem lenne a Föld tengelye ferde, úgy az északi félgömb passzát szele állandóan északkeleti és a déli félgömbé délkeleti volna. Az egyenlítőtől a felső rétegekben a sarkok felé áramló levegő azonban már a 30—40° szélességi fokokhoz érve annyira lehűl, hogy jelentékeny része leszáll és egyesül az egyenlítő felé áramló hidegebb alsó légrétegekkel. Ezáltal az egyenlítő és a 30° szélességi fokok között sokkal élénkebb passzát légáramlás áll elő, mint tovább a sarkok felé (16. ábra). Ezt a sávot tehát erős passzát szelek uralják, ezért passzát zónának nevezik. Az egyenlítő mentén $\pm 5^\circ$ szélességben



16. ábra. A légmozgások kialakulása a Föld felületén

túlnyomóan a felszálló légtömegek uralkodnak, az erős napsugárzás hatása következtében, ez tehát szélsendővezet. A mérsékelt égövek alatt már annyira gyengül a passzát hatása, hogy csak ritkán érvényesül, helyette egyéb hatások kerülnek előtérbe, amelyek a Föld felületének alaki és anyagi tulajdonságaival függnek össze.

Mondottuk, hogy a légmozgásokat a földfelület egyenlőtlen felmelegedései idézik elő. Ugyanolyan napsugárzás hatása alatt leggyorsabban és legnagyobb mértékben a növényi takaró nélküli földfelszín melegszik fel (ill. hűl le, ha nem kap sugárzást), tehát a sivatagos, sziklás, sztyeppés területek. Növényi takaróval jól fedett térségek sokat nyelnek el a napsugarakból és csak keveset vernek vissza. Ezt a meleget azonban a növények lekötik és feldolgozzák, tehát nem hó alakjában tárolják. A víztömegek viszont nemcsak elnyelik a hő nagy részét, hanem, mint meleget óriási mennyiségben tárolják (hiszen a víz fajhője nagy). Ezért a hidegebb év-, és napszakokban a vízfelületek a melegebbek és a szárazfölkök a hűvösebbek, viszont a melegebb év- és napszakokban a helyzet fordított. Ez a jelentős hőmérsékletkülönbség nagyterületű szárazfölkök és vízfelületek között szintén légmozgást idéz elő, amelyet *monszun*nak neveznek. A monszun napsütéskor (nappal) vízfelületekről a szárazföld felé fúj, és éjjel fordítva. Ugyanígy melegebb évszakban a szárazfölkök felé téríti el a szélirányt és a hidegebb évszakban fordítva. Feldarabolt, szaggatott területeken ebből csak kisebb helyi szelek fejlődnek ki, de Oceánnal szomszédos, egységes térségű földfelületeken erőteljesen monszun jellegű széljárás alakul ki, mint pl. Indiában.

Olyan erősen szaggatott felületű világrészben, mint pl. Európa, sem a passzát, sem a monszun nem válhat uralkodóvá, hanem egyes vidékekre jellemző széljárások fejlődnek ki. Ilyen jellemző szelek pl. Erdélyben a nemere, az Adriai-partok mentén a bóra és a sirokkó, a francia Provence-ban a mistral stb. De ezek csak egyes időszakokban érvényesülnek, míg Európa és vele együtt az északi és déli mérsékelt égövek széljárásán is túlnyomóan a nagyarányú légörvénylesek uralkodnak. Ezek vagy az

óramutatóval egyező irányban keringenek és akkor ciklon a nevük, vagy pedig ellenkező irányban és akkor anticiklonnak hívjuk őket.

A ciklonok és anticiklonok kialakulásának köszönhető a mérsékelt égövek széljárásának állandótlansága, ami úgy a szélesebb, mint a szélirány gyakori változásában nyilvánul meg. E jelenségek törvényszerűségei elsősorban a meteorológusokat érdeklik. Minket csak az érdekel, hogy végső összegében ez az állandótlan irányú és erősségű széljárás is ugyanolyan hatalmas energiákat tartalmaz, mintha az egyenetlesebb passzát szélzóna volna a helyében.

De nem csak az előttünk még pontosan nem ismert okokból vízszintes síkban mozgó légörvénylesek léteznek, hanem a földfelszín egyenetlenségei is idéznek elő légörvényeket. Mindenesetre igen nagy különbség van a két jelenség között, mert míg a ciklonok és anticiklonok függőleges tengelyűek és óriási területeket boríthatnak el, egészen világrész-nagyságrendig, addig a talajegyenlőtlenségekből előálló gördülő örvénylesek vízszintes tengelyűek és legfeljebb 4—500 m magasságig hatolhatnak fel a talajszint fölött, tehát az előbbi légörvénylesek képest igen kisméretűek. Ezek a talaj mentén gördülő örvénylesek annál nagyobbak, minél egyenetlenebb a felszín és minél nagyobb a szél sebessége. Ezért hegyes-völgyes vidéken az alsó légrétegek áramlása nagyon örvénylős, és a gördülő légörvények ezeken a helyeken hatolhatnak fel a legnagyobb magasságba. A sík vidékek felszíni légrétegeinek áramlását csak viszonylag alacsony tárgyak, fák, épületek stb. zavarják, és így viszonylag elég alacsonyan található nyugodtan, közel laminárisan áramló légrétegeket. A legzavartalanabbul a hatalmas vízfelületek, óceánok, tengerek, nagy tavak fölött alakulhat ki természetes széljárás. Ezért ezeknek a nagyvizeknek a partvidékei képezik a világ legkedvezőbb széljárású helyeit.

A talajszint fölött áramló levegő alsó rétegei a talajon sűrűlve lefékeződnek. A keletkezett gördülő légörvénylesek a lefékeződés jelenségei. A legalul gördülő legnagyobb

légörvények a fölöttük levő legközelebbi légrétegekben már kisebb légörvényléseket idéznek elő, ezek följebb még kisebbeket, míg végül az örvénylések elhalnak és párhuzamos, *lamináris* rétegáramlás áll elő.

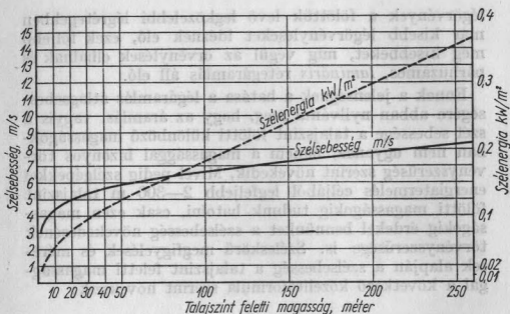
Ennek a jelenségnek a hatása a légáramlás átlagsebességére abban nyilvánul meg, hogy az áramlás, vagyis a szél sebessége a talajszint fölötti különböző magasságokban nem ugyanaz, hanem a magassággal bizonyos törvényszerűség szerint növekedik. Mivel pedig szélgépekkel energiatermelés céljából legfeljebb 2—300 m talajszint fölötti magasságokig tudunk hatolni, csak ezen magasságokig érdekel bennünket a szélesebesség növekedésének törvényszerűsége is. Széleskörű megfigyelések és mérések alapján a szélesebesség a talajszint feletti magassággal a következő közelítőformula szerint növekszik:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt[5]{\frac{h_2}{h_1}},$$

ami azt mondja, hogy a szélesebességek magasság szerinti változása a talajszint feletti magasságok ötödik gyökével arányos.

Nauenben (Németország) évek méréseinek átlagából a 17. ábrán látható diagramot készítették. Erről a diagramról a szélesebességek növekedése a talajszint feletti magasság arányában jól leolvasható. Mivel sík vidéken készítették, hasonlóan sík vidékeken, tehát nálunk az Alföldön is jó megközelítő arányszámokat szolgáltat.

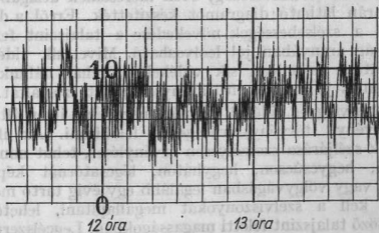
Hegyes-völgyes vidékek számára nem lehet ilyen általános érvényű törvényszerűségeket felállítani. Az ilyen vidékek széljárása szeszélyesen örvényléeses, tehát minden ponton, hegycsúcson, hegyháton, légcatornát képező hágón, vagy völgyvágásban legalább egy évig tartó mérésekkel kell a szélviszonyokat megállapítani, lehetőleg különböző talajszint feletti magasságokban. Legcélszerűbb 25 és 35 m magasságokban mérni, mivel ennél alacsonyabban még nagyon örvényléeses a légáramlás.



17. ábra. A szél évi közepessége különböző magasságokban, Nauen-ben (Berlin)

A légörvénylések a szélmerések során szapora léglökésekben nyilvánulnak meg, mint ahogy az a 18. ábrán látható.

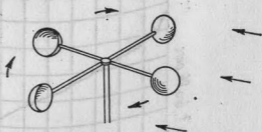
A léglökésekből megállapítható átlag szélsebesség adja a szélben rejlő energia kiszámításának alapját. A szél



18. ábra. Szélsebesség-diagram, a talajszint fölött 12 méter magasban mérve. Martonvásár—Erdőhát, 1954. július 20-án

sebességének az átlagolása az ilyenféle széllokéseket regisztráló diagramból meglehetősen pontatlan és nehézkes eljárás. A szél átlagsebességének megállapítására olyan készülékek a legalkalmasabbak, amelyek szélutakat mérnek. E készülékek legfontosabb része a szélkerék, amely a légáramban forogva egy írókészüléket mozgat; utóbbi egy papírszalagra jegyzi fel a szél által megtett utat, kilométerekben (az időbeosztással ellátott szalagot óramű továbbítja). Egy telepített műszer szélkerékének működése nem függhet a széliránytól; tengelye tehát függőleges és fordulatszáma a szélesebséggel minél pontosabban arányos legyen. Ilyen a kanalas szélkerék, amelyet feltalálójáról *Robinson* keréknek hívnak.

Ez egy függőleges tengely felső végén rögzített küllőkeresztből és ezekre erősített félgömbcsészékből áll,

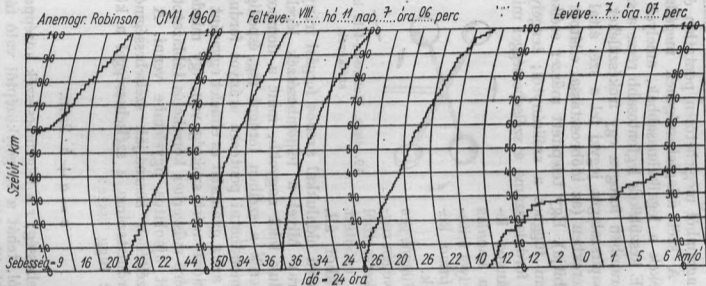


19. ábra. Robinson-féle kanalas szélkerék

amelyek homorú oldalukkal azonos forgási irányba néznek (19. ábra). Mivel a félgömbcsészék légellenállása homorú oldaluk felől nagyobb, mint a domború oldal felől, a szélkerék a szélben forogni fog, és pedig a szél sebességével mondhatni pontosan arányos fordulatszámmal — amint azt a gyakorlat és elmélet egyaránt igazolta. Némi korrekcióra azért szükség van, így minden ilyen szélesebségmérő műszerhez korrekciós táblázatot is mellékelnek, amit ajánlatos figyelembe venni. A kanalas szélkereket széltében használják szélesebségmérő műszerekhez; fordulatszáma a szélesebséggel a következő képlet szerint függ össze:

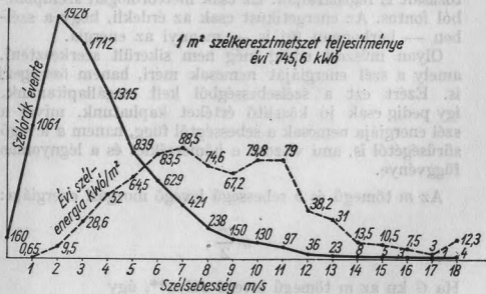
$$v = a + b \cdot 2\pi n,$$

ahol v a szélesebség; r a félgömbcsészék középpontjának a forgásponttól, tehát a tengelyközeptől való távolsága; a és b kísérleti állandók, amelyeket a műszer hitelesíté-



20. ábra. Szélútmérő műszer diagramja

sekor kell megállapítani; a az a legkisebb szélsébség, amelynél a szélkerék megindul (kb. 0,5 m/s), b pedig egy tapasztalati szorzószám. Mint a képletből is látható, v és n valóban egyenes arányban vannak. A *Robinson* szélkerékkel felszerelt szélútmérő műszer a 20. ábrán látható diagramot írja. A szalag hosszában végigvonulótíz sáv 10 km-t jelent. Az írókar a kilométereket ív alakban keresztben jegyzi és az órahenger a szalagot úgy továbbítja, hogy azt óránként pontosan egy óraosztással viszi



21. ábra. A különböző szélsébségek évi előfordulásának diagramja. Felvette az Országos Meteorológiai Intézet Pestlőrincen, 1955-ben, 15,5 m magasságban a talajszint felett

tovább. Az egy óra alatt megtett szélút kilométerekben könnyen leolvasható.

Ebből feldolgozáskor csak kerek számú kilométereket jegyeznek fel, amit 3,6-dal osztva m/s szélsébségekre számítanak át. Ebből készítik a havi és ezek összegezésével az évi statisztikát, amelyből megállapítható, hogy az egyes szélsébségek havonta, évente hány órán keresztül fordultak elő. Ennek az alapján készül a 21. ábrán példaképpen bemutatott széldiagram, amelyet meteo-

lógiai intézetünk 1955-ben vett fel a Pestlőrinci obszervatórium 15,5 m talajszint feletti magasságú szélmérő műszerével. Ebből az évi átlagos szélsébség is kiszámítható, amely a mérési hely széljárásának az egyik fontos jellemzője.

Mivel minden szélerőművet úgy kell megszerkeszteni, hogy bármilyen szélirányba önműködően beálljon, energetikai szempontból nincs szükség olyan szélmérő eszközökre és statisztikákra, amelyek a szél irányának változásait is regisztrálják. Ez csak meteorológiai szempontból fontos. Az energetikust csak az érdekli, hogy a szélben — bárhonnán fúj is — mennyi az energia.

Olyan műszert eddig még nem sikerült szerkeszteni, amely a szél energiáját nemcsak méri, hanem összegezi is. Ezért ezt a szélsébségből kell megállapítanunk, így pedig csak jó közelítő értéket kaphatunk, mivel a szél energiája nemcsak a sebességtől függ, hanem a levegő sűrűségétől is, ami viszont a hőmérséklet és a légnyomás függvénye.

Az m tömegű és v sebességű levegő mozgási energiája:

$$m \frac{v^2}{2}.$$

Ha G kp az m tömegű levegő súlya**, úgy

$$m = \frac{G}{g}.$$

Ha a G súlyú levegő térfogatát V -vel jelöljük (m^3 -ben), úgy

$$G = V\gamma, \text{ ahol } \gamma \text{ a levegő fajsúlya.}$$

Behelyettesítve az energiaképletbe

$$m \frac{v^2}{2} = \frac{V}{2} \cdot \gamma v^2 \text{ [mkp].}$$

** Lásd a 10 oldal lábjegyzetét.

Itt $\frac{\gamma}{g} = \rho$ légsűrűség, amit átlagosan $1/8$ -nak vehetünk, és így $\frac{\rho}{2} = \frac{1}{16} [\text{kp} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}]$. Esetenként ρ értékét természetesen pontosan is kiszámíthatjuk; a legtöbb esetben azonban elég az átlagértéket venni. Eszerint a v sebességű légáramlás energiája:

$$L = \frac{\rho V v^2}{2} \sim V \frac{v^2}{16}. \quad (1)$$

A V térfogatú és v sebességgel haladó légtömeget egy F keresztmetszeten v sebességgel áthaladó légtömegként is kifejezhetjük, tehát $V = Fv$, ezzel a helyettesítéssel az áramló levegő teljesítménye:

$$L = \frac{\rho \cdot Fv \cdot v^2}{2} = \frac{v^3 \rho F}{2} \text{ [mkp/s]},$$

tehát lóerőben $L = \frac{v^3 \rho F}{2 \cdot 75} = 0,000\ 842\ v^3 F$

és kilowattokban $L = \frac{v^3 \rho F}{2 \cdot 102} = 0,000\ 619\ v^3 F. \quad (2)$

Adott keresztmetszeten átáramló levegő energiája tehát sebességének harmadik hatványával arányos, vagyis kétszeres sebességű szélnek $2^3 = 8$ -szor nagyobb az energiája.

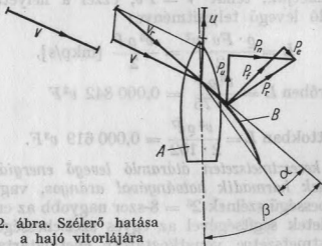
E képletek segítségével az egyes szélesebességek $1\ \text{m}^2$ szélkeresztmetszetre vonatkoztatott energiatartalmát is kiszámíthatjuk (lásd a 21. ábrán bemutatott széldiagramot); minthogy azonban itt lineáris óraátlagok alapján számoltunk, a valóságnál kisebb értéket kapunk. Az egyes szélesebességek energiáját összegezve megkapjuk azt az évi Q mennyiséget (pl. energiát kW-órákban), amelyet az illető hely szélenergiái — $1\ \text{m}^2$ keresztmetszetre vonatkoztatva — tartalmaznak. Jelen példában tehát $Q = 745,6\ \text{kWh/m}^2$, év. Ez az illető hely széljárásának második jellemző számértéke. Ez a jellemző csak akkor teljesértékű, ha azt is megadjuk, hogy a mérést milyen talajszintfeletti magasságban végeztük, vagyis az adott földrajzi hely fajlagos szélteljesítményét a mérés magasságában.

Az egy órára eső szélenergiát úgy kapjuk, hogy Q -t elosztjuk az évi órák számával, tehát $Q/8760$ adja a szélenergia óraátlagát. Ha most a (2) képlet segítségével megkeressük, hogy ennek az óraátlagnak milyen évi átlagos szélesebesség felel meg, kapjuk a szélesebesség évi *közözött átlagát*. $F = 1 \text{ m}^2$ esetén

$$v^3 = 1615 \text{ L tehát}$$

$$v = \sqrt[3]{1615 \text{ L}}$$

Az így nyert *közözött évi átlagos szélesebesség* az adott földrajzi hely széljárásának harmadik jellemző számér-



22. ábra. Szélerő hatása a hajó vitorlájára

téke, amely mindig nagyobb, mint a szél lineáris évi középsebessége. Pestlőrinci példánk esetében a lineáris évi középsebesség $3,8 \text{ m/s}$, a közözött középsebesség pedig $5,17 \text{ m/s}$ volt, $15,5 \text{ m}$ magasban mérve a talajszint felett.

A szél energiájával úgy tudunk munkát végeztetni, hogy elmozdítható testet helyezünk az útjába, melyre a szél erőt fejt ki. Így működik a legősibb, szélenergiát hasznosító eszköz: a vitorláhajó is.

Tekintsünk a 22. ábrán felülnézetben rajzolt vitorláhajóra. Amikor a B vitorla az A hajótest hosszára és egyben a szélirányra is merőlegesen áll, akkor a vitorla előtt keletkező túlnyomásból és a mögötte kialakuló

depresszióból a szél irányába mutató erő, az ún. ellenállás keletkezik. Ez addig gyorsítja a vitorláhajót, míg a hajótest ellenállása a vízben egyenlő nem lesz a vitorlára ható erővel. (A hajó haladási sebességének növekedésével ui. a hajótest ellenállása növekszik, a szél erő viszont csökken, mert a vitorla és a levegő közötti relatív sebesség is csökken. Ebből egyúttal az is következik, hogy ez esetben a hajó u haladási sebessége mindig kisebb a szél v sebességénél, mert egyenlő sebesség esetén már nem kapnánk szél erőt a hajótest ellenállásának legyőzésére).

Ha azonban a vitorlát a hajó hossz tengelyéhez képest β szög alatt állítjuk el úgy, hogy az egyúttal a szél v sebességéből és a hajó u haladási sebességéből adódó v_r relatív sebességgel kis ($\alpha = 10 \sim 15^\circ$) szöget zárjon be — megfelelően kormányozva a hajót —, akkor a légáramlás a vitorla mindkét felületét követi, nem keletkezik mögötte örvénytér, mint az előző esetben, és a vitorlán kialakuló P_r erő csaknem merőleges lesz a levegő v_r relatív sebességére. Ezt az erőt a repüléstechnikában két összetevőre szokás bontani, a relatív áramlás irányára merőleges, ún. felhajtó erőre P_f , és az áramlás irányába eső ellenállásra P_e .

Helyes beállítással a P_f felhajtó erő $10 \sim 100$ -szorosra is lehet a P_e ellenállásnak, és nagysága kb. megegyezik a merőlegesen állított vitorla ellenállásával.

Amint a 22. ábrából látható, a P_r erőnek még a kissé szemközt fújó szél esetében is aránylag nagy összetevője mutat a hajó haladási irányába és szolgáltatja a hajótest ellenállásának legyőzéséhez szükséges vonóerőt. Itt már az is lehetséges, hogy a hajó u haladási sebessége a szél v sebességét meghaladja, amíg az első esetben el sem érte azt. A vitorláhajó gyorsaságát tehát az u/v viszonytal jellemezhetjük, amely mindig kisebb 1-nél, ha a hajó hátszéllel csak a vitorla szél ellenállását használja ki, és nagyobb is lehet 1-nél, ha oldalszéllel a felhajtó erőt hasznosítja.

Alkalmazzuk mármost fenti megállapításokat a szélkerék esetére. A hajó haladási sebességét itt a szélkerék

u kerületi sebessége helyettesíti, tehát a szélkerék járására, forgásának sebességére is az u/v viszony jellemző, amelyet *gyorsjárési tényezőnek* nevezünk és a görög λ (lambda) betűvel jelölünk, tehát

$$\lambda = \frac{u}{v}.$$

Ez a viszonzyszám a szélkerék működésére igen jellemző. A D átmérőjű és n percnkénti fordulatszámú szélkerék kerületi sebessége:

$$u = \frac{D\pi n}{60} \text{ m/s, tehát}$$

$$\lambda = \frac{D\pi n}{60v}, \text{ azaz}$$

$$n = \frac{60\lambda v}{D\pi},$$

ami azt jelenti, hogy adott szélesebesség és azonos λ mellett a szélkerékátmérő D növekedésével arányosan csökken az n fordulatszám.

Térjünk most vissza a vitorlánhajó példájára. A hajó haladási sebességét a hajótest ellenállása és az oldalszél esetében a vitorlázat ellenállása is egyaránt károsan befolyásolja. Ezt az ellenállást azáltal csökkenthetjük, hogy a hajótestet és vitorlázatát úgy alakítjuk ki, hogy ellenállásuk a haladás irányában minél kisebb legyen. Ezt áramvonalas kiképzésnek nevezzük. Az áramvonalas kiképzés fontos szerepet játszik a szélkerék lapátjainak kiképzésében is; minél tökéletesebb, annál jobb a hatásfoka.

Hogy milyen mértékben módosítja a testek légellenállását azok külső alakja, arra jellemzők a következő szám adatok. A légáramlással szembeállított kör alakú lap ellenállási tényezője $c_e = 1,11$ a félgömbcsészéé, üregével a szélnek szembefordítva $c_e = 1,33$ és háttá fordítva $c_e = 0,34$. A két utóbbi ellenállástényező viszony száma (kb. 1 : 4) magyarázza a Robinson-szélkerék műkö-

dési elvét. Ugyanakkor egy cseppformájú áramvonalas test ellenállási tényezője $c_e = 0,05 \sim 0,20$, tehát még a félgömbfelületnél is jóval kisebb.

A v sebességű szél által az F m² felületre kifejtett P erőt a $P = \frac{\rho v^2 F c_e}{2}$ képlet fejezi ki, ahol ρ = a levegő sűrűsége. Láthatjuk, hogy a szélerő a sebessége négyzetével arányos, azaz kétszer akkora sebességű szél négyszer akkora erőt fejt ki a felületekre. A szél torló nyomása azonban, mint már láttuk, a szél útjában levő test alakjától is függ, ezért a képletben szorozóként még egy formátényező c_e is szerepel. Mivel a szélerő a sebesség négyzetével nő, a szélgépek méretezésénél kellő biztonsággal kell eljárni, ami abban nyilvánul meg, hogy minden szélnek kitett méretezendő tárgyat, tornyot, oszlopot, álló szellapátot stb. a kérdéses helyen előforduló legnagyobb szélesebességre kell méretezni. Ha ez nem ismeretes, úgy

2 m talajszint feletti magasságig $\frac{\rho}{2} v^2 = 40 \text{ kp/m}^2$

2—8 m talajszintfeletti magasság között $\frac{\rho}{2} v^2 = 60 \text{ kp/m}^2$

8—20 m talajszint feletti magasság között $\frac{\rho}{2} v^2 = 80 \text{ kp/m}^2$

20—100 m talajszint feletti mag. között $\frac{\rho}{2} v^2 = 110 \text{ kp/m}^2$

és

100 m talajszint feletti magasság fölött $\frac{\rho}{2} v^2 = 130 \text{ kp/m}^2$

szélterheléssel számolunk (MSZ 15 021). Amint látható, ez az előírás is számításba veszi azt, hogy nagyobb talajszint feletti magasságokban nagyobb a szél sebessége, tehát ereje is.

Ezzel számot vetettünk egy esetleges orkán, különlegesen erős szélvihar igénybevételeivel is. Erre később még visszatérünk.

Még egy fontos kérdésre kell ebben a fejezetben feleletet adni: hol lehet a széleenergiát gazdaságosan kihasz-

nálni? Általában az a közhit, hogy csak a tengerpartokon és a hegycsúcsokon van kihasználásra alkalmas erősségű szél. Még nemrég az volt az általános vélemény, hogy Magyarországon nem érdemes a szélenergia hasznosításával foglalkozni, hiszen Meteorológiai Intézetünk 2,6 m/s évi országos szélesebséget mutat ki, ami valóban nagyon kicsi. Ez a szám azonban nem reális, mivel a szélmérő eszközök legnagyobb részét energetikai szempontból nem megfelelő magasságban és helyen telepítették, sokszor kimondottan szélcsendes zugokban, vagy szélárnyékban és az ország legszelesebb nyugati részein van belőlük a legkevesebb. A magyaróvári műszert pl. magas fák veszik körül. A pestlőrinci mérések megmutatták, hogy nálunk is jóformán mindenütt van kihasználásra érdemes szélenergia. Világos, hogy a szélerőműveket elsősorban a jobb széljárású helyekre kell telepíteni, mert ott ugyanakkora beruházási összeggel jóval több és olcsóbb energiát termelhetünk. Az azonban vitatható, hogy szélerőművet előnyösebb lenne hegycsúcsokra és hegyhátakra építeni. Ezeken a helyeken egyrészt drágább az építkezés, másrészt nyugtalanabb, örvénylésesebb a légáramlás, harmadsorban aránylag nagy hegyes-dombos területen is csak kevés szélerőmű telepítésére van lehetőség. Ha kellő magasságig hatolunk fel, úgy (mint ahogy azt a 17. ábra diagramja is bizonyítja) elegendő erősségű légáramlásokat találunk sík vidéken is. 30—35 m az a talajszint feletti magasság, ameddig okvetlenül fel kell menni a szélerőmű közép magasságával, hogy olcsó és bőséges szélenergiához juthassunk, viszont 100—120 m-nél magasabbra már nem igen érdemes felmenni, mert ott már alig növekedik a szélesebség és vele a szélenergia, az építkezés viszont így magassági méretekben már fokozottan költséges. Mindezt tekintetbe véve megállapíthatjuk, hogy kellő magasságú szélerőművek országunk bármely részén gazdaságosak lennének, de a legelőnyösebb a helyzet a nyugati részekben, a Sopron—Magyaróvár—Bakony háromszögben, ahová még elég gyakran és elég nagy erővel tör be az Alpok és Kárpátok közötti kapun a nyugati monszun északnyugati szélömege. Az elmondottakból

az is világos, hogy energiaszempontról mindenütt 25 m talajszint feletti magasságban kellene mérni a szélesebséget, nem pedig 12 m-en, mint ahogy most mérik általában.

Való igaz, hogy Európában sokkal jobb széljárású helyek is vannak bőségesen. Ilyenek pl. Németország északi tengerpartvidéke és a Brocken hegyhát, Dánia egész területe, Anglia és Franciaország nyugati tengerpartjai, Hollandia és Belgium egész területe, a Szovjetunió déli és északi részei, Skandinávia nyugati partvidéke, Izland, továbbá Eurázia északi partvidéke. Világviszonylatban kitűnőek a passzát-szélzónák Dél- és Kelet-Ázsia, Dél-Amerika, Dél-Afrika, Ausztrália, Új-Zéland és a „szél-paradicsom” az egész Déli-sark, ahol állítólag állandó szélviharok tombolnak, amelyeknek az évi átlagos szélesebsége kb. 25 m/s-ra becsülhető.

2. SZÉLKERÉKRENDSZEREK

A szélből a levegő mozgásában rejlő energiát a szél-áramba állított szélkerék termeli ki. Egy jó szélkeréktől megköveteljük, hogy a szél energiájának minél nagyobb részét termelje ki, más szóval minél jobb hatásfokkal dolgozzék, de az sem érdektelen, hogy ezt milyen fordulatszámmal teszi. Minél nagyobb a szélkerék fordulatszámja, annál kisebb méretű és súlyú, tehát annál olcsóbb a szélerőmű egész gépi berendezése és annál kisebbek a beruházási költségek is, amelyekről elsősorban függ a termelt energia ára. A szélkerék járását azonban mégsem kizárólag a fordulatszám alapján ítéljük meg, mert hiszen — amint fentebb említettük — minél nagyobb a szélkerék, annál kisebb a fordulatszámja. A szélkerékre a λ gyorsjárású tényező a jellemző, amely — mint tudjuk — a fordulatszám és az átmérő szorzatával arányos.

Elmélet és kísérletek egyaránt azt bizonyítják, hogy a gyorsjárású tényező szoros összefüggésben van a szélkerék hatásfokával. Egy szélkerék akkor jár a legjobb hatásfokkal, ha a rajta áthaladó szél sebességét egy meghatározott mértékben csökkenti. Ha ennél nagyobb sebességgel távozik a szél, úgy túl sok kihasználatlan energiát visz magával, ha pedig kisebbel, úgy a szélkeréken a kívánatosnál kevesebb levegő halad át.

A. Betz göttingai egyetemi tanár a sebességcsökkenés legkedvezőbb arányát $1/3$ -nak találta, tehát szerinte a szélgép akkor adja a legnagyobb teljesítményt, ha a szél harmadrész annyi sebességgel távozik a szélgéptől, mint amennyivel érkezett.

A tétel levezetése a következő:

A szélkerékhez v sebességgel közeledő levegő, miután áthaladt a szélkeréken, v_2 sebességgel távozik, hogy helyet adjon az utána áramló légtömegeknek. A szélkerék síkjában egy közbenső v_1 középsebességgel kell számolni, amelynek értékéül

$$v_1 = \frac{v + v_2}{2}$$

vehető fel, és így a szélkeréken átáramló levegőmennyiség

$$V = v_1 F = \frac{v + v_2}{2} F.$$

Ha ennek a V légtömeggnek az érkezési v sebességgel számított energiájából levonjuk a v_2 távozási sebességgel számított energiáját, úgy ebből a szél leadott teljesítményét kapjuk.

Tehát az (1) képlet alapján:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\rho v^2 V}{2} - \frac{\rho v_2^2 V}{2} = \frac{v + v_2}{2} \cdot \frac{\rho F}{2} \cdot (v^2 - v_2^2) = \\ &= \frac{\rho F}{4} (v + v_2) \cdot (v^2 - v_2^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Legyen $v_2 = vx$, ekkor

$$\begin{aligned} L &= \rho \frac{Fv^3}{4} (x + 1) \cdot (1 - x^2) = \\ &= \frac{\rho Fv^3}{4} (1 + x - x^2 - x^3). \end{aligned} \quad (4)$$

Ennek a függvénynek az

$$x = \frac{1}{3}$$

helyen van a maximuma. Ezt behelyettesítve kapjuk, hogy $v_2 = \frac{1}{3}v$ és a legnagyobb nyerhető teljesítmény

$$L_{\max} = \frac{\rho F v^3}{4} \left(1 + \frac{1}{3} - \frac{1}{9} - \frac{1}{27} \right) = \frac{8}{27} \rho F v^3.$$

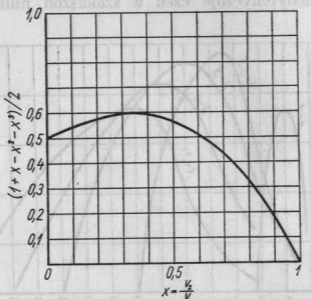
A hasznosítható teljesítmény tehát az F keresztmetszeten v sebességgel másodpercenként áthaladó levegőtömeg $\frac{\rho F v^3}{2}$ mozgási energiájának legfeljebb 16/27 része, azaz

kb. 60%-a. Ekkor a legjobb tehát a szélkerék hatásfoka. Ennek a megállapításnak az alapján egyesek a szélgépek hatásfokát nem az F keresztmetszetű tér teljes energiátartalmára, hanem csak annak 16/27-ére, tehát 60%-ára vonatkoztatva adják meg, tehát a szélgép legnagyobb elméleti teljesítményéhez viszonyítják a tényleg elért gyakorlati teljesítményt. Az eddig ténylegesen elért (a szél teljes energiátartalmára vonatkoztatott) 49%-os legjobb szélkerék teljesítmény eszerint a $49/60 = 0,82$, azaz 82% hatásfokot adna. Ugyanebből az elgondolásból kifolyólag az egyes helyek széljárásának Q energiaértékére sem a szélmérő műszer által adott teljes összeget adják meg, hanem ennek csak 60%-át, amiből esetleg a hasznosításra alkalmatlan kis szélesebességek és a rosszul hasznosítható viharos szelek energiáját is levonják. Ez az eljárás bizonytalan helyzetet teremtett a szél teljesítmények megadásánál, mert hiszen nem mindig világos, hogy a megadott teljesítményértékek teljeseke-e, vagy csonkítottak és mennyire csonkítottak?

Annál is inkább helytelen volt ezt a gyakorlatot bevezetni, mert a Betz-féle egyenlet csak megközelítő értéket ad, ill. csak $x \approx 1-0,3$ értékek között nyújt elfogadható megközelítést, $x = 0,3-0$ között pedig már nem is használható (23. ábra). Egyelőre azonban mégis elfogadjuk a Betz-féle levezetés eredményeit, mert a gyakorlatilag fontos szakaszon a függvény elég jól megközelítő értéket ad. Mi azonban a Q évi szél teljesítmény értéként mindig a meteorológiai műszerekkel megállá-

pított teljes értéket adjuk meg, hogy kiküszöböljünk minden félreértési lehetőséget.

Az elméletileg számított teljesítményt gyakorlatilag sohasem érhetjük el, mert a szélkeréknek sűrűdása, közegellenállása is van, amely a szélből nyert energia

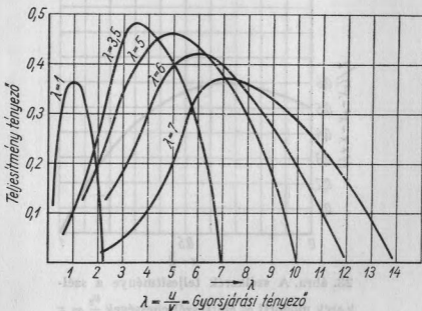


23. ábra. A szélkerék teljesítménye a szélkerék mögötti és előtti szélsébségek $\frac{v_2}{v} = x$ viszonyának függvényében!

egy részét felemészti, és így csökkenti a hatásfokot. Megjegyezzük itt, hogy a szélkerékteljesítménynek az F keresztmetszetű légáram teljes energiátartalmára vonatkoztatott hányadát nem hatásfoknak, hanem *teljesítménytényezőnek* nevezzük, mivel nem Fv légmennyiség folyik át a szélkeréken, hanem csak Fv_1 ; az e légmennyiség energiájára vonatkoztatott szélkerékteljesítményt ugyan hatásfoknak nevezhetnénk, ettől viszont azért kell eltekintnünk, mivel v_1 értéke nem a szélsébségből számított független érték.

Mint már mondtuk, a szélkerék teljesítménytényezője elsősorban gyorsjárási tényezőjétől, λ -tól függ. Különböző gyorsjárású szélkerekekkel a gyorsjárási tényező-

jüknek megfelelő állandó fordulatszám mellett számos kísérletet végeztek, és erről a 24. ábrán látható teljesítménytényezőgörbéket készítettek. Valamennyi görbének olyan a lefolyása, hogy nulláról növekedő szélsébségnél egy küszöbérték alatt el sem indul a szélkerék, tehát teljesítménytényezője ezen a szakaszon nulla. Amikor



24. ábra. A szélkerék teljesítménytényezője a tényleges gyorsjárási tényezők függvényében, különböző gyorsjárási tényezőre tervezett szélkerekekre

a szélsébség annyira megnő, hogy az a λ gyorsjárási tényezővel készült szélkerék körülbelül kétszeres gyorsjárási tényezőjének felel meg, tehát körülbelül 2λ -nak, a szélkerék megindul és üresen járva hamarosan eléri fordulatszámát. Ekkor még nem termel, tehát hatásfoka nulla, de már forog. Ha tovább nő a szélsébség, a szélkerék termelni kezd és nő a teljesítménytényezője is, egészen addig, amíg a szél sebessége v el nem éri a tervezett λ -val számított $v = \frac{u}{\lambda}$ értékét. Ekkor tetőzik a teljesítménytényezőgörbe, mert ekkor fúj a szél ponto-

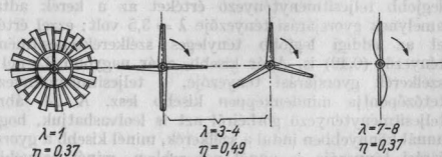
san azzal a sebességgel, amely a szélkerék gyorsjárási tényezőjének megfelel. Ha mármost tovább erősödik a szél, $\lambda = \frac{u}{v}$ értéke állandó fordulatszám (tehát állandó

u kerületi sebesség) mellett fokozatosan csökken, és vele együtt a teljesítménytényező is kezdetben lassan, később rohamosan romlik (nullára sohasem csökkenhet, mert ahhoz a v szélesebességnek végtelen nagyoknak kellene lennie). A különböző gyorsjárási tényezőjű szélkerekek között a legjobb teljesítménytényező értéket az a kerék adta, amelynek gyorsjárási tényezője $\lambda = 3,5$ volt; ezzel érték el az eddigi legjobb tényleges szélkerékteljesítmény tényezőt (0,49) is. Akár kisebb, akár nagyobb 3,5-nél a szélkerék gyorsjárási tényezője, a teljesítménytényező tetőzőpontja mindenképpen kisebb lesz. A 24. ábra teljesítménytényező görbéiről azt is leolvashatjuk, hogy annál könnyebben indul a szélkerék, minél kisebb a gyorsjárási tényezője, és annál nehezebben, minél nagyobb. A $\lambda = 3,5$ gyorsjárási tényezőjű kerék kb. $\lambda = 7$ -nél indul, a $\lambda = 7$ gyorsjárási tényezőjű kerék pedig kb. $\lambda = 14$ -nél. Mivel pedig $\lambda = 14$ -nél sokkal rosszabb a hatásfok, mint $\lambda = 7$ -nél, a kerék nehezen is indul. Ez a magyarázata annak, hogy a nagy gyorsjárási tényezőjű szélkerekeket külön hajtással indítják meg, ha már elég erősen fúj a szél. Ezek mindig kétlapátosak. Ugyanezen okból a kis gyorsjárási tényezőjű, soklapátos szélkerekek mind könnyen indulnak.

A teljesítménytényező a λ kisebbmértékű növelésével még nem csökken lényegesen. Ezért gyorsjárású szélkerekeknél $\lambda = 5 \sim 6$ megválasztása is indokolt, mert a $\lambda = 5$ gyorsjárású szélkerék maximális teljesítménytényezője még mindig 0,46 (24. ábra), e szélkerék fordulatszámát viszont 43%-kal nagyobb, mint a $\lambda = 3,5$ gyorsjárású keréké, ami lényegesen csökkenti a szélenergia beruházási költségeit. Ilyen elgondolásból kifolyólag bizonyos esetekben még $\lambda = 7$ is előnyös lehet. Az elmondottak ismeretében most már szemlét tarthatunk az ismert szélkerékrendszerek fölött, amelyek száma igen nagy. Ezért csak a főbb típusokat ismertetjük.

Térjünk el a történelmi sorrendtől és vegyük előbb a vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerekeket, mert ma majdnem kizárólag ilyeneket építenek. Egy ilyen szélkerék egy vízszintes tengely végén sugárirányban álló szárnylapátokból áll (25. ábra).

A szél a szárnylapátos kerékre, a szélkerék tengelyével párhuzamosan „szembe” fúj, magukra a lapátokra pedig úgy, mint ahogy idézett példánkban a vitorláhajó vitorláira az oldalszél. A szélkerék λ gyorsjárási tényezőjét



25. ábra. Vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerekek. Soklapátos lassújárású és négy-, három-, kétlapátos gyorsjárású szélkerekek

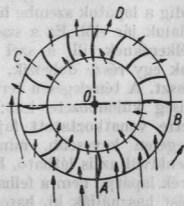
is ugyanúgy tudjuk változtatni, akárcsak a vitorla állását: a szárnylapátok hajlásszögének beállításával. Ha nagy hajlásszöget veszünk, úgy u/v kisebb lesz 1-nél, és a szélkerék kis u kerületi sebességgel, tehát lassan forog. Ezek soklapátos, lassújárású szélkerekek, amelyek kizárólag kisebb energiamennyiségek felvételére alkalmasak.

Minél nagyobb a $\lambda = \frac{u}{v}$ tényező, annál nagyobb a szélkerék kerületi sebessége, annál kevesebb szárnylapátra van szükség. Mindenesetre előnyös lenne a kisebb szárnylapát-szám, de e tekintetben korlátokat szab az a már előadott körülmény, hogy $\lambda = 3,5$ -nél a legjobb a szélkerék hatásfoka és ennél nagyobb gyorsjárási tényezőnél a hatásfok kezdetben lassan, később rohamosabban csökken (lásd a 24. ábrán). A $\lambda = 3,5$ gyorsjárási tényezőjű szélkerekeket 4–5 szárnylapáttal készítik. $\lambda = 6 \sim 7$ esetén rendszerint 3 szárnylapátot találunk, ezenfelül pedig már csak kettőt (25. ábra).

A vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerék nagy előnye, hogy aránylag kevés szerkezeti anyagot tartalmazó és mégis nagy teret bejáró szárnylapátjaival terjedelmes széltérből termel ki energiát. Viszont ezeket a kerekeket állandóan szembe kell állítani a széllal, és így olyan berendezéssel kell felszerelni, amely ezt a szembefordítást önműködően elvégzi. Ezt a berendezést egyes szélérőműveknél úgy próbálták kiküszöbölni, hogy a szélkerekeket nem a szélgéptornya előtt, hanem mögötte járatják, ahova a szél maga terelte, de a megoldás nem vált be, mert amint a szárnylapátok a torony szélárnyékába értek, a hirtelen nyomásváltozás a szárnylapátot rezgésbe hozta, ami igen károsnak bizonyult. Ezenkívül a torony szélárnyéka számottevő energiavesztést is okozott.

Sokan a szélkeréknek a szélirányba állítását úgy akarták kiküszöbölni, hogy függőleges tengelyű szélkerekeket szerkesztettek, amelyek függőleges lapátkoszorújára bármely irányból egyformán fújhat a szél. Ezzel elérkezünk a szélkerekek másik nagy csoportjához, a függőleges tengelyű szélkerekekhez, amelyek időben jóval megelőzték a szárnylapátos, vízszintes tengelyű szélkerekeket, és amelyek korszerűsítésére még ma is tesznek erőfeszítéseket. A függőleges tengelyű szélkerekek legáltalánosabb alakját a 26. ábra mutatja (felülnézetben). A szélkerék hasáb alakú lapátjai koszorúszerűen helyezkednek el, a függőleges forgási tengely körül; a hasábalkotók a tengellyel párhuzamosak.

Ha a lapátok sugárirányú egyenes lapátok volnának, egyáltalán nem forogna a szélkerék, csak akkor, ha az egyik felét a szél elől eltakarnánk. Ez volt a legősibb szélkerék alapelve (1. ábra). Ha azonban a lapátok egy-



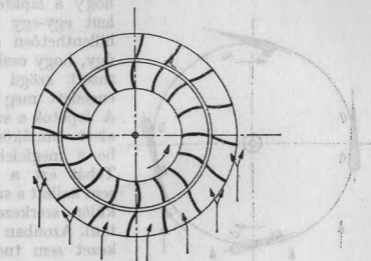
26. ábra. Függőleges tengelyű, lapátkoszorús szélkerék felülnézete

irányúan homorúak, úgy a szél a lapátok homorú oldalába „belekap”, míg a domború oldaláról „lecsúszik”. Az ilyen szélkerék tehát forogni fog abban az irányban, amelyre lapátjainak domború oldala mutat. Ehhez hasonló jelenséget tárgyaltunk már a *Robinson* kerék ismertetésénél is (19. ábra), de ott nem homorú hasábok, hanem félgömbcsészék idézik elő ugyanezt a hatást. A szél a 26. ábrán látható módon a lapátok homorú oldalába az $A-B$ szakaszon fúj be, de A -tól kezdődően fokozódó, majd B -ig csökkenő hatással. A szél a lapátokon keresztül a szélkerék belső, üres terébe jut, és a közben leadott energia folytán csökkent átlagos sebességgel halad tovább a $D-C$ szakaszon levő lapátokhoz, ahol átömölve még tovább csökkent sebességgel jut a szélkerék mögé. A $B-D$ szakasz nem termel energiát, sőt fogyaszt. A $C-A$ szakaszon pedig a lapátok szembe haladnak a széllal, noha domború oldaluk jár elől. Ez a szakasz is energiát emészt és így a szélkeréknek, ill. a szél útjába eső keresztmetszetének csak egy része dolgozik, míg a másik része energiát fogyaszt. A ténylegesen termelt energia tehát e két mennyiség különbözete lesz; az egységnyi szélkeresztmetszetre vonatkoztatott fajlagos energiatermelés tehát lényegesen kevesebb, mint a szárnylapátos szélkeréké. Ezenkívül az is látható, hogy a függőleges tengelyű szélkerék lapátjai nem a felhajtó erőt, hanem csak a légellenállást használják ki, hasonlóan a hátszéllel haladó vitorláhajóhoz. Ebből következik az ilyen szélkerekek másik nagy hátránya is, a kis fordulatszám, mivel ezek gyorsjárási tényezője igen kevés kivétellel mind kisebb 1-nél (a kivételek is alig lépik túl a $\lambda = 1$ értéket).

Kísérletképpen ezt a szélkereket úgy fejlesztették tovább, hogy vezető lapátokat építettek köréje (27. ábra, lengyel szélmalom), de ezzel csak sokkal drágább lett a szerkezet, anélkül, hogy lényegesen javult volna az eredmény; a levegő be- és kiáramlási viszonyai ugyanolyan kedvezőtlenek maradtak.

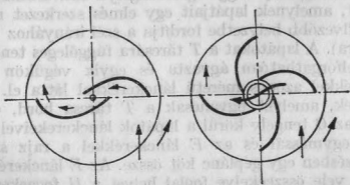
A bajokon *Savonius* svéd feltaláló legalább részben úgy próbált segíteni, hogy kiküszöbölte a lapátkoszorú belsejében levő üres teret. A lapátok egészen a tengelyig

nyúlnak be (28. ábra) és az egyik lapátból átömlik a szél a vele szemközti lapátba. Az egyik lapátot tehát a ráfújó szél hajtja, míg a szemközti másik lapátot a róla érintőlegesen elfolyó szél reakciója. A kétlapátos kivitellel



27. ábra. Vezető lapátkoszorús, függőleges tengelyű szélkerék — ún. szélturbina — felülnézete (lengyel szélmalom)

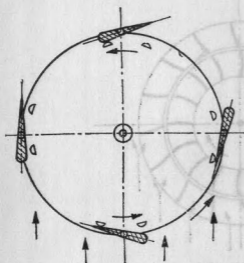
végzett kísérletek 1-nél valamivel nagyobb gyorsjárási tényezőt eredményeztek, 0,23 teljesítménytényező mellett. Ez eddig a legjobb eredmény, amit függőleges tengelyű szélkerékkel elértek, de ez is kevesebb, mint fele annak, amit vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerék-



28. ábra. Két- és négylapátos Savonius-kerék

kel el lehet érni. Fajlagos beruházási költsége pedig többszöröse az utóbbinak.

Egy újabb másik feltaláló: *Just*, a függőleges tengelyű szélkerék gyorsjárási tényezőjét úgy akarta megjavítani,



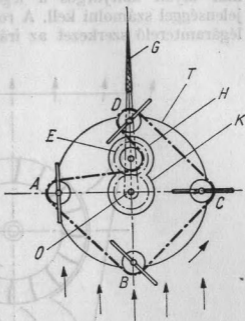
29. ábra. *Just*-féle függőleges tengelyű billenőlapátos szélkerék felülnézete

hogy a lapátokat fent és lent egy-egy csap körül billenthetően ágyazta, de úgy, hogy csak meghatározott szögű elfordulást engedett meg (29. ábra). A lapátok a szél nyomása alatt önműködően álltak be a megfelelő irányba. Tehát ezt a szélkereket sem kellett a szél irányába külön szerkezettel beállítani. Azonban ez a szerkezet sem tudta a szél energiáját a körülforgás minden szakaszán egyformán jól hasznosítani. A lapátok a széllal szemben megtett útszakaszon itt is

energiát fogyasztanak, ezenkívül egy-egy körbefordulásuk minden helyzetében más és más határfokkal hasznosítják a szél energiáját. Az eredmények tehát itt sem jók, noha a gyorsjárási tényező itt is nagyobb valamivel 1-nél.

Jackson egy oly függőleges tengelyű szél turbinát szerkesztett, amelynek lapátjait egy elmés szerkezet mindig a legkedvezőbb helyzetbe fordítja a szél irányához képest (30. ábra). A lapátokat a *T* tárcsára függőleges tengelyük körül elforgathatóan ágyazta és egyik végükön az *E* lánckerékkel azonos méretű lánckerékkel látta el. Az *E* lánckerék, amelyet ugyancsak a *T* tárcsa hord, együtt kering az *O* tengely körül a lapátok lánckerekeivel, amelyeket egymással és az *E* lánckerékkel a rajz szerinti elrendezésben egy géplánc köt össze. Az *E* lánckerék tengelyén, vele összeékelve foglal helyet a *H* fogaskerék is, amely a mozdulatlan alapon nyugvó és vele azonos fog-

számú K fogaskeréken gördül le. A géplánc ezáltal a lapátok lánckerekein körülhaladva a széllapátokat az ábrán látható módon úgy állítja be, hogy a szélkerék forgását sehol sem gátolják, csupán a visszahaladás rövid szakaszán, az A ponton, a szél ellenében élével áthaladó lap légellenállása formájában. A szélkerék gyorsjárású tényezője azonban jóval 1 alatt marad. Az ilyen szélkerék tehát, bármilyen szellemes szerkezetű, mégis igen lassú járású és rossz hatásfokú, és így igen sok szerkezeti anyagot, tehát hatalmas beruházási összeget igényel a teljesítményéhez képest. Emellett ezt a szerkezetet már be kell állítani a szél irányába. A szél által irányított G kormánylapát az O

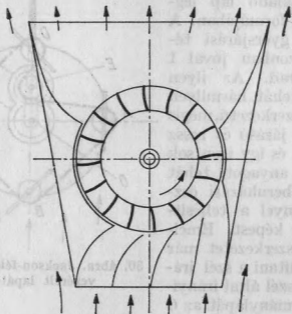


30. ábra. Jackson-féle szélkerék, vezérelt lapátokkal

középpont körül elforgatható K fogaskereket egy rudazat segítségével megfelelően elállítja. Mivel ennek a szélkeréknek a hatásfoka is rosszabb a Savonius rotorénál, szóba sem jöhet egy jó hatásfokú szárnylapátos szélkerékkel szemben.

Még egy módon igyekeztek a függőleges tengelyű szélkeréken javítani, éspedig úgy, hogy a szélirányba beálló be- és kiömlő csatornák közé helyezték (31. ábra). Ez tulajdonképpen a 27. ábrán látható szerkezet továbbfejlesztése. Ezzel még aránylag a legjobb aerodinamikai viszonyokat lehet elérni egy függőleges tengelyű szélturbina számára, de még így sem lehet a 26. ábra szélkerékénél felmerült problémákat megoldani, csupán némileg enyhíteni. Ennél a berendezésnél azonban már egy másik jelenséggel is számolni kell, azzal ti., hogy ha a szabad térbe állított szélgépben sokat kell kanyarognia

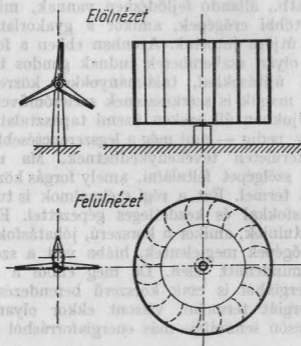
a széláramnak, úgy ez olyan ellenállást idéz elő, hogy emiatt kisebb légmennyiség áramlik át rajta, ami szintén rontja a szélgép hatásfokát. Ebben a szélgépben már olyan kanyargós a légáram, hogy az elmondott jelenséggel számolni kell. A rossz hatásfok és a hatalmas légáramterelő szerkezet az irányítóberendezésével együtt



31. ábra. Laval-csőszerű szélcsatornába épített függőleges tengelyű szélturbína

oly óriási beruházási költségeket igényel, hogy ezen az összegben egy sokszorta nagyobb teljesítményű szárnylapátos szélgépet lehet építeni, amely sokkal olcsóbban és sokkal több energiát tud termelni. Hasonló összehasonlítást lehet tenni a szárnylapátos szélkerék és valamennyi eddig ismert függőleges tengelyű szélgép között, aminek eredményét a 32. ábra szemléltető módon mutatja be. Ez az ábra egy szárnylapátos szélrómúvet és egy ugyanolyan teljesítményű függőleges tengelyű szélgépet mutat be mérethelyesen. Utóbbi jóval nagyobb méretei fogalmat nyújtanak a méretekkal közel arányosan nagyobb beru-

házási költségekről is, ami egyúttal a termelt energia költségét is megsokszorozza. Ezért nem tudott a függőleges tengelyű szélgép meghonosodni és elterjedni. Ma már csupán alárendelt célokra (pl. műszerek hajtására stb.) használják, mint pl. a *Robinson* kereket.



32. ábra. Azonos teljesítményű vízszintes és függőleges tengelyű szélerőművek összehasonlító méretarányos körvonalrajza

Az elmondottak alapján könnyen belátható, hogy a vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerékkel semmiféle más rendszerű szélkerék sem tud versenyezni, mivel aránylag kevés építési anyagot igénylő 3—4 szárnylapátjával hatalmas széltérből képes a szél energiáját a gyakorlatilag elérhető legjobb hatásfokkal és legnagyobb fordulatszámmal kitermelni és hasznosításra — egyszerű és olcsó szerkezeteken keresztül — az erőgépnek továbbadni, ami az esetek legnagyobb részében legelőnyösebben egy villamos generátor lehet.

Magán a szárnylapátos, vízszintes tengelyű szélkerékkel dolgozó szélérőmű rendszerén már nincs feltalálni való, de a részletei, a szárnylapátok szerkezeti megoldása, az erőátvitel gépezete, a széliránybaállítás gépezete, a gépházhajó kialakítása, a termelés teljes automatizmusa, a biztonsági berendezések túlterhelés és légköri elektromosság ellen stb., állandó fejlődésben vannak, mint annak idején a többi erőgépek, amikor a gyakorlatbavétellel a fejlődés útjára jutottak. Azonban ebben a fejlődésben már csak olyan szakemberek tudnak gondos technikusmunkával, újításokkal, találmányokkal közreműködni, akik vagy maguk is szerkesztenek szélérőműveket, vagy pedig módjukban áll ezeken üzemi tapasztalatokat szerezní, vagy pedig — ami még a legszerencsésebb eset —, mindkét területen tevékenykedhetnek. Ma már nem elég olyan szélgépet feltalálni, amely forgás közben némi energiát is termel. Ezt a régi szélmalomok is tudták, de rossz hatásfokkal és kezdetleges gépezettel. Ezért kellett kipusztulniok, amikor a korszerű, jóhatásfokú, olcsón termelő erőgépek megjelentek, hiába volt a szél ingyen energiája mindenütt jelen. De még ebből a hatalmas ingyen energiából is csak korszerű berendezéssel lehet olcsón energiát termelni, viszont ekkor olyan olcsón, amilyen olcsón semmiféle más energiaforrásból sem.

22. tábla. A szélenergia hasznosításának
 a) a szélenergia hasznosításának
 b) a szélenergia hasznosításának

Az elmondottak alapján könnyen belátható, hogy a
 vízszintes tengelyű szárnylapátos szélkerékkel szembe
 más rendszerű szélkerék csak a vízszintes tengelyű
 rendszerű szélkerék építésénél nagyobb 3—4 szárnylapát-
 járat használatával érhető el, és az energiát a gyökör-
 laljai elvárási helyén hatékonyabban és könnyebben lehet
 társasággal kihasználni és hasznosítani — egyrészt és
 másrészt a szélenergia hasznosításánál — az erőgépek tovább-
 fejlődésével és az erőkönnyebb rendszerű szélkerék-
 építéssel, ami az erőkönnyebb rendszerű szélkerék-
 építéssel egy villamos generátor lehet.

3. MEGÉPÍTETT SZÉLERŐGÉPEK

A jelenkor legegyszerűbb és egyben legelterjedtebben használt szélgépe a soklapátos, lassújárású szélmotor (7. ábra), amelyet majdnem kizárólag vízszivattyúzásra használnak. Száraz éghajlatú vidékeken százezerszámra dolgoznak, vizet szivattyúzva a megművelt földnek. Ezeknek a vízszivattyúzó szélgépeknek az üzeme nem a termelt energia révén fizetődik ki, hanem az öntözött földek többlethozamával. Ha mód lenne más erőgépekkel (benzin-, diesel-, vagy villamos motorral) végeztetni az öntözést, bizonyára olcsóbb lenne, de éppen ott használnak ilyen szélgépet, ahol más megoldások nehézséggel járnak. Ilyen egyszerű, rossz hatásfokú szélgép üzeme csak ott olcsóbb a motorikusnál, ahol a szélviszonyok igen jók, és így majdnem állandóan dolgozhat. A soklapátos, lassújárású szélgép gyorsjárási tényezője $\lambda = 1$ körül van, tehát igen könnyen indul és már 2,5 m/s szélsébségnél dolgozni kezd, viszont 7,5—8 m/s szélsébségnél egy egyszerű kiváltószerkezet kifordítja a szél irányából, úgyhogy ennél nagyobb szélsébséget nem hasznosít. Azonban éppen a 2,5—8 m/s közötti szélsébségek a leggyakoribbak, és így az ilyen szélgépek sok üzemórát teljesíthetnek. A vízszivattyú általában dugattyús rendszerű, és a vízszint alatt, vagy annak közelében dolgozik, hogy minél kisebb legyen a szívómagassága. A szivattyút a szélkerék a tengelyén levő forgattyúhoz csatlakozó függőleges rudazattal hajtja. A szélkerék méretei olyanok, hogy már 2,5 m/s szélsébségnél működteti a vízszivattyút. Mivel azonban a szélgép teljesítőképessége a szélsébség harmadik hatványával növekszik, viszont a dugattyús vízszivattyú energiaszükséglete csak egyenes

arányban nő a fordulatszámmal, így a szélgép terhelési foka a szél sebességének növekedésével mindinkább csökken, és így megfelelő korlátozó berendezés nélkül nagyobb szélben veszélyes gyorsasággal forogna. Ezért kell már 7,5–8 m/s szélesebségnél kifordítani a szél irányából, nehogy megszaladjon. Egy ilyen szivattyúzó szélmotorral tanulságos kísérleteket végzett Műszaki Egyetemünk Mezőgazdasági Géptani Tanszéke a Magyar Tudományos Akadémia megbízásából Martonvásár-Erdőháton, 1953. november 1-től 1954. október 31-ig, tehát egy éven keresztül. A kísérletek eredményét az alanti táblázat mutatja:

Szélesebesség, m/s:	2,5–3,5	3,5–4,5	4,5–5,5	5,5–6,5	6,5–7,5
A szél energiája a szélkerék 63,6 m ² területén, kW:	1,06	2,51	4,92	8,52	13,48
Vízszivattyúzással végzett teljesítmény, kW:	0,0825	0,0975	0,1190	0,1478	0,1810
Össz. teljesítménytényező, %:	7,8	3,8	2,4	1,7	1,3
Szélkerék által továbbadott teljesítmény, kW:	0,298	0,352	0,427	0,531	0,652
Szélkerék teljesítménytényezője, %:	28,4	14,2	8,8	6,32	4,8

Ehhez hasonlóan gyenge a kihasználása minden dugattyús szivattyúval dolgozó vízszivattyúzó szélmotoroknak. Ilyen szélgépeket tehát csak ott indokolt használni, ahol ez az egyetlen vízszivattyúzási lehetőség. Mihelyt ugyanezt a szélgépet villamos generátorral terhelték, amely már ugyanezen szélesebségeknél jó terhelést nyújtott, az mindjárt 32–37% teljesítménytényezővel dolgozott és 6,5–7,5 m/s szélesebségnél 4,8 kW teljesít-

ményt adott, szemben a vízzivattyúzás ugyanilyen szélesebségnél szolgáltatott 0,65 kW szélkerékteljesítményével.

A Martonvásár—erdőháti kísérletekhez használt szélgép 9 m átmérőjű szélkereke 27 lapátos volt, tengelyének földszint feletti magassága 16 m és változó, a szél sebességétől függő fordulatszámának legnagyobb értéke 30 ford./min. Még a második világháború előtt épült a H S C S gyárban, Kispesten és most csak üzemképes állapotba hozták a kísérlet céljára. Csupán ez és még egy-két hasonló vízzivattyúzó szélgép dolgozik jelenleg országunkban.

A Szovjetunió sokezer vízzivattyúzó szélgépet készít évente, távolfekvő száraz vidékeinek öntözéses megműveléséhez.

Legkisebb típusa a TV-2,5 jelű soklapátos szélgép, amelynek szélkerékátmérője 2,5 m. Teljes súlya 200 kg és így könnyen szállítható, sőt 2—3 óra alatt fel is szerelhető. Óránként 2 m³ vizet szivattyúz fel a vízszinttől számított 10 m magasságra.

A TV-8 jelű szélgép szintén soklapátos. Szélkerékátmérője 8 m. Teljesítménye max 6 LE, és óránként átlag 6 m³ vizet szállít 10 m magasra.

Az USA-ban, Angliában és Németországban tömegben gyártott soklapátos lassújárású vízzivattyúzó szélmotorok hasonló nagyságrendűek és szerkezetűek.

A Szovjetunió óriási távolfekvő területeinek energiaellátására gyorsjárású, háromlapátos szélerőműveket is ezerszámra gyárt. Ilyenek a D-5 és a D-18 típusú szélelektromos gépek, amelyeknek a számjelzése a szélkerék átmérőjét jelenti (méterben). A legelterjedtebb ezek között a D-18 típusú szélerőmű, amelynek fordulatszáma $n = 70$ ford./min. Teljesítménytényezője a legkedvezőbb ponton 42%. Toronymagassága 18 m. Teljesítményei: 4 m/s szélben 3—4 kW, 8 m/s szélben 27 kW és 9 m/s szélben 35 kW, amely nagyobb szél esetén sem növekszik tovább, sőt 35 m/s szélben a szélmotor önműködően megáll. A szélkerék lapátjai önműködően állanak be a jelentkező terhelés szerint. De nagyobb teljesítményű telepekhez is felhasználják ezeket az egységeket.

Amikor egy 400 kW-os szélérőműre volt szükségük, azt mint már elmondottuk, úgy állították elő, hogy 12 db/D-18-szélérőművet állítottak fel egy 600 m átmérőjű körzetben elosztva. Az egységek által termelt energiát a központosan elhelyezett gépházba küldik, ahol egy áramátalakítót táplálnak. A telep az Akmolenszk kerületben a közeli falvakat és kolhozokat látja el olcsó villamos árammal. Szélcsend idején a generátort 2 db 200 W-os dieselmotor hajtja. Ez az erőmű 1958 óta van üzemben. Ezen a ponton a szél évi átlagsebessége 7 m/s és igen állandóan és egyenletesen fúj.

A szovjet 400 kW-os szélérőmű egyszerre két kérdést is felvet. Az egyik kérdés: miért használtak 12 db 35 kW-os szélérőgépet, miért nem inkább egy 400 kW-osat? És melyik megoldás az előnyösebb? Másképpen megfogalmazva, mi az előnyösebb: több kisebb, vagy egy, ezek összteljesítményével bíró nagyobb szélérőgép?

Kis szélérőgépet nem építhetünk magas torony tetejére, pedig mint láttuk, a felsőbb légrétegekben jóval több a szélenergia. A 12 db 35 kW-os szélgép összes szélkerékterülete 3048 m². Egy 400 kW-os szélgépnek 40 m magasban lenne a szélkeréktengelye, ahol a szél energiája 1,63-szor akkora, mint 18 m magasban, tehát ennyiszerezesen kisebb lehet a szélkerékterülete, vagyis csak 1870 m² lenne, ami 48,6 szélkerékátmérőnek felel meg. Ugyanolyan gyorsjárású tényezőt véve fel, a fordulatszám $n = 25,9$ ford./min lenne, ami jól megvalósítható, sőt $n = 25$ ford./min-t véve, ez a szélgép egy 240 pólusú szinkron generátort közvetlenül hajthatna, tehát hajtóműre sem lenne szüksége. Nyilvánvaló, hogy egy ilyen 400 kW-os szélérőmű sokkal előnyösebb lenne, mint a 12 db 35 kW-os, mert hiszen sokkalta olcsóbb lehet és helyszükséglete is kisebb. Hogy mégis inkább 12 db kis szélérőgépből állították össze a 400 kW-os erőműegységet, annak az lehet a magyarázata, hogy ezeket a D-18 szélérőgépeket, amelyekkel már sok éves üzemi tapasztalatot szereztek, ezres sorozatokban gyártják, míg a 400 kW-osat egyedi gyártásban kellett volna előállítaniok a megfelelő üzemi tapasztalatok híján.

A másik kérdés az energiaátvitelre vonatkozik. A tizenkét kis szélérőgép csak közvetítő (egyenáramú) villamosenergiát állít elő és azzal egy áramátalakítót táplál. Ez a közbenső energiaátvitel mindenesetre veszteségekkel jár, és pedig egyszer a kis szélérőgépek generátoraiban, másodszor a közvetítő (belső) hálózatban és az áramátalakítóban. Emiatt a sok-kisgépes rendszer hatásfoka legalább 12—15%-kal rosszabb, mint az egy nagy gépé; ugyanilyen arányban növekednek a termelt energia költségei is. Ezenkívül háromszor annyi teljesítményű villamosgépet igényel, mint az egy nagy szélérőmű, tehát sokkal nagyobbak a beruházás költségei is.

Több kis szélérőgépről egy közös erőközpontba az energiát nemcsak villamosenergia közvetítésével lehet átvinni, hanem hidraulikusan, vagy pneumatikusan is. Mindkettőre van példa a szélérőművek történetében. Hidraulikus erőátvitellel ugyancsak a Szovjetunióban tervezték meg egy (a fentiekben már megemlített) 10 000 kW teljesítményű szélérőművet, még a második világháború előtt. A terv szerint egy 160 m magas toronyra egymás fölé felszerelt 2 db háromlapátos szélkerék olajszivattyúkat hajtana, amelyek 35 att nyomású olajat szállítanának a torony aljában elhelyezett Pelton-kerekeknek; az utóbbiak állandó fordulatszámmal hajtánák a generátorokat. Ez a berendezés nyilvánvalóan még rosszabb hatásfokkal dolgozott volna, hiszen a szivattyúknak és turbináknak rosszabb a hatásfoka, mint a villamosgépeké. Ez a terv azonban nem került kivitelre.

A pneumatikus energiaátvitellel egy *Andreau* nevezetű francia feltaláló próbálkozott, akinek rendszere szerint Angliában az Enfield Cables Co. gyár épített egy 100 kW szélérőművet, amelyet a 12. ábrán mutattunk be. Szélkerékének két önműködően beálló lapátja van, amelyek belül üregesek és végükön nyitottak. A forgás következtében a centrifugális erő a lapátokból kihajtja a levegőt, így alul az üreges tengelyen és az ugyancsak üreges tornyon keresztül depresszió keletkezik. Az így alul beszívott levegő egy függőleges tengelyű légturbinát hajt, amely viszont egy állandó fordulatszámú villamos generátort for-

gat. A tengely magassága a talajszint fölött 30,5 m és a szélkerék átmérője 24,38 m. Egy lapát súlya 726 kg és az egész szélérőmű 61 t; 13,4 m/s szélességnél a szélkerék fordulatszámja 100 ford./min, amiből gyorsjárási tényezője $\lambda = 9,5$ -nek adódik. Ez azért oly nagy, hogy minél nagyobb legyen a fordulatszám, ami a lég-szivattyúzásnak kedvező. De a berendezés hatásfoka igen rossznak bizonyult, s még a legkedvezőbb ponton sem jobb 14%-nál. Valószínűleg emiatt nem is épült belőle több. A pneumatikus rendszer tehát nem vált be, annak ellenére, hogy igen szellemes a megoldása.

Az ilyen közbenső közvetítő energiával dolgozó szél-erőműrendszereknek mégis volna egy jó oldaluk is és ez az, hogy a szélkeréknek nem kell állandó fordulatszámmal járnia, hanem úgy változhat a fordulatszáma, hogy a gyorsjárási tényező bármily szélességnél mindig ugyanaz maradjon. Láttuk a 24. ábra teljesítménytényező-görbéjénél, hogy az állandó fordulatszámú szélkerék csak egy ponton jár a legjobb teljesítménytényezővel, akkor, amikor a szél sebessége éppen megfelel a szélkerék tervezett gyorsjárási tényezőjének. Ezt a szélességet, amelynél tehát a legjobb a szélkerék teljesítménytényezője, *alapszélességnek* hívjuk, és ennek helyes megválasztása igen fontos a szélérőmű gazdaságossága szempontjából (erre még később részletesen visszatérünk). A szél azonban csak kivételesen fúj ezzel a legkedvezőbb sebességgel, márpedig minden más esetben már romlik a szélkerék teljesítménytényezője. Állandó fordulatszámú szélkeréknek ezzel a hátrányával számolni kell.

Ha mármost lehetséges lenne egy szélkereket mindig oly módon terhelni, hogy fordulatszámja a szélességgel arányosan változva gyorsjárási tényezője mindig állandó maradjon, akkor ezzel egy olyan szélérőművet nyernénk, amelynek minden szélességnél, tehát minden teljesítménynél körülbelül azonos és egyúttal optimális is lenne a teljesítménytényezője. Pl. egy $\lambda = 5$ gyorsjárására szerkesztett szélkerék, amely minden szélességnél mindig ezzel is járhatna, minden teljesítménynél 46% teljesítménytényezővel dolgozna. Mivel azonban az áram-

termelő generátornak állandó fordulatra van szüksége, ezért a változó fordulatszámú szélkerékről az energiát az állandó fordulatszámú generátorra az elmondott módon vagy elektromos, vagy hidraulikus, vagy pneumatikus közvetítéssel kellene átvinni. A fentebb már ismertetett ilyen példákából láttuk, hogy ez a közbenső energiaátvitel veszteséges, maga az erőátvitel gépezete is nagyon költséges, az ilyen szélerőművek tehát igen drágák lennének. Ezenkívül gyakorlatilag sokkal kisebb nyereség származik a változó fordulatszámú szélkerék jobb hatásfokából, mint ahogy azt elméletileg remélhetnők, mert a széljárások jól használható szélsébségei általában meglehetősen szűk határokon belül mozognak. Ha pedig jól választjuk meg az alapszélsébséget, akkor oly kevés lesz a különbség a két rendszer energiatermelése között, hogy minden költséget és veszteséget figyelembe véve a változó fordulatszámú szélkerék ténylegesen drágábban fog termelni, mint az egyszerűbb és olcsóbb állandó fordulatszámú, noha utóbbinak csak az alapsebességnél és annak közelében jó a hatásfoka.

Legolcsóbban termel tehát az a rendszer, amelynél a szélkerék csak olyan villamos generátort vagy erőgépet hajt, amely már közvetlenül felhasználható energiát termel, mivel ennek a legjobb az összhatósfoka és legkisebb a beruházási költsége. Ez a felismerés érvényesül ma általában a 100 kW-nál nagyobb szélerőművek szerkesztésénél és építésénél.

Úttörő ebben is a Szovjetunió volt, amikor 1931-ben megépítette a világ első 100 kW-os szélerőművét, amely már állandóan hálózatra dolgozott (8. ábra). A szélerőművet Balakláván a Krim félszigeten, Szevasztopol városától 32 km távolságban állították fel, és szélenergiából termelt áramát a város 20 000 kW-os hőerőművének 6300 V-os távvezetékére táplálta.

Toronymagassága 30,5 m. Szélkerékátmérője 30,5 m (730,6 m²). Tengelyének hajlása a vízszinteshez 12°. A szélkerék egy 100 kW teljesítményű 220 V-os generátort hajtott. Háromlapátos szélkerékének lapátjai fix küllőkön elfordulhattak. Az elfordulás mértékét centri-

fugális erőhatással szabályozták, a fordulatszámmal arányosan. A hálózatra kapcsolás teljesen önműködően történt. A szélérőmű a 100 kW teljesítményt 11 m/s szélsebességnél érte el, ami csak 16,7% teljesítménytényezőnek felel meg. A 6,7 m/s átlagos évi szélsebességű helyen egy év alatt 279 000 kWh-áramot termelt, tehát évi átlagos 32 kW-os teljesítménnyel dolgozott. Két évi üzem után újabb két 100 kW-os szélérőmű felállítását tervezték, de a tapasztalatok alapján módosított berendezéssel. Erre azonban a második világháború miatt már nem került sor. Ez az erőmű 10 évig dolgozott kifogástalan üzembiztonsággal, és a háborús események folyamán pusztult el.

Ennek a 100 kW-os kísérleti szélérőműnek a tapasztalatait használták fel a WIME-D 30 szovjet szélérőműnél, amelynek három, állítható szárnylapátos szélkereke 30 m átmérőjű és toronymagassága 25 m. Ebből a típusból csak egyes kísérleti példányok készültek.

A szovjet szélérőművek sikere nyomán az egyes európai országokban kisebb, gyorsjáratú szélérőművek épültek, a legkülönbözőbb megoldású szerkezetekkel. Ezek mind állítható szárnylapátokkal dolgoztak.

Ilyen előzmények után az USA-ban *P. C. Putnam* 1939-ben merész tervet ajánlott kivitelezésre, ami meg is valósult és 1941-ben, mint „Smith-Putnam szélturbina” épült meg (9. ábra). Ezt a szélérőművet úgy tervezték, hogy 13,41 m/s szélsebességnél 30% összteljesítmény tényező mellett 1000 kW-ot teljesítsen. Szélkereke két állítható lapátból állott és a torony mögött forgott, ahová a szél beállító szerkezet nélkül mindig befordította. A szélkerék átmérője 53,3 m (2231,2 m²), tengelymagassága 33,5 m, és fordulatszáma 29 ford./min volt. Gyorsjárási tényezője mérsékelt: $\lambda = 6$. A szárnylapátok rozsdamentes acélból készültek, és felületük 20 m hosszú és 3,7 m széles volt. Egy szárnylapát súlya 7 t-t tett ki. A szárnylapátok a tengely agyában elforoghatóan voltak ágyazva és állításukat centrifugál regulátorral vezérelt hidraulikus berendezés végezte. Az 1000 kW-os aszinkron generátor 2300 V feszültségű és 60 Hz frekvenciájú villamosenergiát állított elő, amit egy transzformá-

tor 44 000 V-ra alakított és így táplálta be a közeli hálózatba. A szélerőmű 1941. X. 19-én indult meg és 1943. II. 21-ig volt üzemben. Ekkor a főcsapágy hőnfutástól berágódott; így üzemét emiatt szüneteltetni kellett. A kb. másfél évre terjedő üzemi tapasztalatok szerint a szárnylapátok állandó rezgésben voltak, mivel a toronymögött forogva annak szélárnyékában minden fordultnál ellenkező irányú szélökést kaptak. A főcsapágy kijavítása után rövid idő múlva egyenletes 12 m/s szélben a szélkerék egyik szárnya letört és kb. 230 m távolságra repült el, de szerencsére csak a szélerőmű tornya rongálódott meg. A rossz üzemi tapasztalatok miatt a szélerőművet már nem javították ki, hanem leszerelték. Mindössze 695 órán keresztül dolgozott és 192 órán keresztül külön kísérleteket is végeztek vele. Ezen összesen 887 üzemóra alatt 298 240 kWh-t termelt, azaz átlagosan 336 kW. Ez az elfogadható eredmény főleg a jó széljárásnak tulajdonítható, mivel a 607 méter magas Grand Pa hegységen, ahol a szélerőművet felállították (Vermont kerület) 7,47 m/s évi átlagos szélsébséget mértek, ami igen kedvező érték. Szélenergia tehát volt bőven. Kár, hogy e sikertelenség miatt megvonták a támogatást Putnam-tól, aki hiába javasolt egy szerinte jobb konstrukciót, nem kapott többé rá vállalkozót.

Az elkövetett hibákból fontos tanulságokat vonhatunk le. Mindenekelőtt hiba volt, hogy a szélkerék a torony mögött forgott, annál is inkább, mert a tornyot rácsos vasszerkezettel építették, ami különösen erős légörvényléseket idézett elő a szélárnyékban.

A második gyöngé pont a szárnylapátoknak a tengely agyában elforgatható ágyazása volt; a teherbírás ott volt a legkisebb, ahol a legnagyobb a lapátok hajlítónyomatéka: a tengelyagy közelében. Ma már azt is tudjuk, hogy két szárnylapát ilyen nagy szélkerékátmérőnél mindenképpen kevés, legalább hármat kellett volna alkalmazni, hogy egyenletesebb legyen a kerék járása. A szárnylapátok állíthatósága pedig csak a túlterhelést akadályozta meg — ami egyszerűbb eszközökkel is megoldható —, egyébként nem volt rá szükség.

Habár nem éri el a 100 kW teljesítményt, mert csak 70 kW-ra tervezték, mégis említésreméltó a *F. L. Smidth Company* által 1942-ben megépített szélérőmű, amelyet Dánia délkeleti részén, Falster szigetén állítottak fel és még jelenleg is üzemben van. Háromlapátos szélkerekének átmérője 24,3 m és toronymagassága 24 m; fordulatszám változó. Gyorsjárási tényezője $\lambda = 9$, tehát nagy, ezért a szélkereket mesterségesen kell megindítani, ha a termelésre már alkalmas szél jelentkezik. Szánylapátjai nem állíthatók, de túlfordulás ellen védve vannak. Évi 140 000 kWh-t termel, elég olcsón, termelési költségei ui. kb. megegyeznek egy hasonló nagyságú dieselmotorréval.

Nyugat-Németországban, Stuttgartban 1955-ben egyesülés alakult a széleenergia hasznosítására alkalmas szélgépek kifejlesztésére. Ez az egyesülés 1957-ben *dr. Ulrich Hütter* tervei alapján egy 100 kW-os szélérőművet épített (10. ábra). A két (állítható) szárnylapátú szélkerék átmérője 34 m, tengelymagassága 23 m. A szárnylapátok üvegrostokkal merevített poliészter műanyagból készültek; rugalmasságuknál fogva viharos erejű szelek igénybevételeit is könnyen kibírják. A szélérőmű már 2,5 m/s szélben is megindul. A szélkerék névleges fordulatszámja 42 ford./min. A szárnylapátok állítása az AEG által kifejlesztett önműködő elektromos berendezéssel történik. Teljesen önműködően kapcsol rá a hálózatra. Sajnos hatásfoka nem kielégítő, ami magas gyorsjárási tényezőjének a következménye.

Angliában a John Brown gyár 1950-ben saját tervei szerint épített egy 100 kW-os kísérleti szélérőművet (13. ábra), amelyet az északskóciai Orkney szigeteken állítottak fel. Rácsos vasszerkezetű tornya 23,8 m magas, három lapátos szélkerekének átmérője 15,7 m, fordulatszámja 130 ford./min. Gyorsjárási tényezője $\lambda = 6,5$. A saját tengelyük körül elfordítható lapátokat egy önműködő hidraulikus berendezés a mindenkori terhelésnek megfelelően állítja be. A termelt áramot a közeli hálózatba táplálják. Fennállása óta nehéz viharokat is sértetlenül vészelt át.

Franciaországban 1955-ben épült egy 130 kW-os kísérleti szélérőmű (11. ábra), amelyet a Francia Elektromos Társaság (Électricité de France) fejlesztett ki. Ez a *Neyrpic D-21* típusú szélérőmű szintén három szárnylapátos. Szélkerékének átmérője 21 m, fordulatszáma 56 ford./min. A szárnylapátok önműködően állanak be a terhelés szerint. A toronymagasság 22 m, 380 V-os aszinkron generátora (amelynek fordulatszáma: 1500 ford./min) a termelt áramot a közeli energiahálózatba táplálja. 12 m/s szélsébség mellett 156 kW teljesítményt adott, ami 42,5% teljesítménytényezőnek felel meg. Ez kedvezőnek mondható.

A felsorolt szélérőműveknek közös jellemzője a szélkerék állítható lapátszögű szárnylapátszerkezete, ami bonyolult és drága megoldás, ezenfelül még tetemesen korlátozza is a megépíthető szélkerék-nagyságot. Valósággal útjában volt a nagy szélérőművek kifejlesztésének. Évtizedeken keresztül vesződtek vele, míg végül kiderült, hogy nincs is szükség a lapátok állíthatóságára, amelyet a hőerőgépek és a vízerőgépek gyakorlatából vettek át. A szélenergia azonban nem tárolható, és így hasznosítása egészen más technikát igényel, mint a tárolható víz- és hőenergia. A bármikor jelentkező szél energiáját azonnal hasznosítani kell, mert különben kárbavész. A megfelelő terhelést tehát a szél jelentkezésekor azonnal és önműködően kell biztosítani. Egy ilyen önműködően terhelt szélkeréknek nincs szüksége állítható szárnylapátokra, mivel mindig a szélenergiával arányos, teljes terheléssel kell járnia. A fix lapátú szárnykerék pedig aránytalanul egyszerűbb, olcsóbb és biztonságosabb, sőt ezenkívül még jóval nagyobbra is építhető, mint az állítható-lapátos szárnykerék. A túlerős szél okozta túlterhelést pedig fix szárnylapátos szélkeréken is meg lehet akadályozni.

Ez a felismerés vezette a dániai *J. Juul* mérnököt arra, hogy fix szárnylapátos szélérőművet tervezzen. Mivel ez az esemény fordulópontot képez a szélérőművek fejlődésének történetében, teljes részletességgel kell foglalkoznunk vele.

Dánia egyetlen energiaforrása a szélenergia, amely — tengerparti állam lévén — elég bőséges. Dániában éppen ezért sok évtizedes múltja van már a szélenergia hasznosításának, de a korszerű munkálatok ezen a téren csak 1947-ben kezdődtek a SEAS (Sydöstjaellands Elektricitets Aktieselskab) akciójával. Ez az intézmény azzal kezdte tevékenységét, hogy automatikus szélmérő műszereket állított fel Dánia különböző pontjain, amelyeket a Dán Meteorológiai Intézet gondozott. Ezekre a helyekre 4,7—6,5 m/s évi átlagos szélsébséget regisztráltak, ami azt bizonyítja, hogy Dánia az ő évi 4 milliárd kilowattórányi villamosenergiaszükségletét bőven tudná szélenergiából fedezni. Ennek megállapításával megkezdődött a megfelelő típusú szélérőművek kifejlesztésére irányuló munka.

Először is egy kísérleti szélérőművet terveztek és építettek, amelynek szélkerékátmérője 7,6 m volt, és melynek szárnylapátmodelljeit először egy szélcsatornában gondosan kikísérletezték. Ezt a szélérőművet 1950-ben állították fel Zealand szigetén Vester Egersborg közelében. Szélkerékterülete 45 m^2 és generátora 12 kW volt; 38 m/s min szélsébségnél 13 kW-ot termelt. Ebben a kísérleti szélérőműben különböző típusú szárnylapátokon különböző szélsébségek mellett végeztek méréseket. Ugyanakkor különböző automatikus berendezéseket is kipróbáltak, hogy a szélérőmű üzemét teljesen önműködővé tegyék. A kísérletek 1950-ben fejeződtek be; ezután állandó üzemenként működött és 1960-ig dolgozott kielégítő biztonsággal. Ekkor, miután hivatását, mint kísérleti szélérőmű befejezte, és mert kis méretei folytán nem lehetett gazdaságos, leszerelték. A kísérleti eredmények alapján a SEAS egy Bogö-ben 1952-ben megépített, egyenáramot termelő szélérőművet megvásárolt és váltakozóáram termelésére épített át (14. ábra). Szélkerék átmérője 13,5 m, tehát szélkerékterülete 143 m^2 , generátora 45 kW teljesítményű. A szárnylapátokat is átépítették és az elektromos automatikát is felszerelték a Vester Egersborg-i tapasztalatok alapján. A Bogö-szélérőművet még 1952-ben helyezték üzembe és azóta kielégítő üzem-

biztonsággal, komolyabb meghibásodás nélkül dolgozik. Egy ízben 9 hónapig egyfolytában volt üzemben, anélkül, hogy hozzányúltak volna és utána csak azért álltak meg rövid időre, hogy kenését ellássák és gépezetét megvizsgálják.

Ezek a kísérleti szélérőművek olyan biztató eredményeket szolgáltatottak, hogy a SEAS javaslatára a DEF (Danske Elvaerkers Forening = Dán Elektromos Művek) egy Szélerőenergia Bizottságot hozott létre, a szélerőenergia hasznosítás kérdéseinek kíművelésére. Első lépésként a DEF 300 000 dán koronát (15 000 angol font) biztosított a Bizottságnak egy nagyobb szélérőmű létesítésére; ez Gedser közelében meg is épült, 24 m szélkerékátmérővel. Ezenkívül további 225 000 Dkr-t adott kísérletek és kutatások céljaira s szélmérések végzésére. E méréseket Dánia különböző pontjain a talajszint fölött 25 és 45 m magasságokban végezték.

A Gedser-szélérőmű 1957. nyarán épült meg (15. ábra). Főbb adatai a következők:

Szélkerékátmérő 24 m.

Szélkerékterület 452 m².

Szélkerék fordulatszám 30 ford./min.

Szélkerék kerületi sebesség 38 m/s.

Szárnylapátok száma 3.

Toronymagasság 25 m.

Generátor: 200 kW aszinkron, 8 pólusú, $n = 750$ ford./min.

Generátor szlip teljes terhelésnél 1%.

Automatikus indulás 5 m/s szélesebségnél.

A generátor a 200 kW teljesítményt 16 m/s szélesebségnél 5 °C léghőmérsékletnél teljesíti.

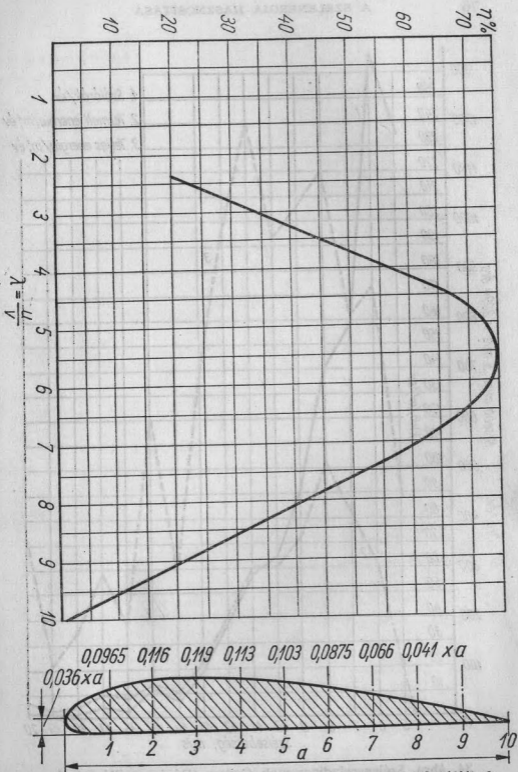
A megépítés költségei a következőképpen alakultak:

Torony és talajvizsgálatok	76 000,— Dkr
Gépház, szereléssel együtt	75 000,— Dkr
Szárnylapátok és tartozékai	44 000,— Dkr
Lánchajtás, fék, hidraulikus fékállítás	20 000,— Dkr
Generátor, transzformátor, elosztókapcsolók, kapcsolótáblák stb.	57 000,— Dkr
Tervezés	48 000,— Dkr
Összes költség:	320 000,— Dkr

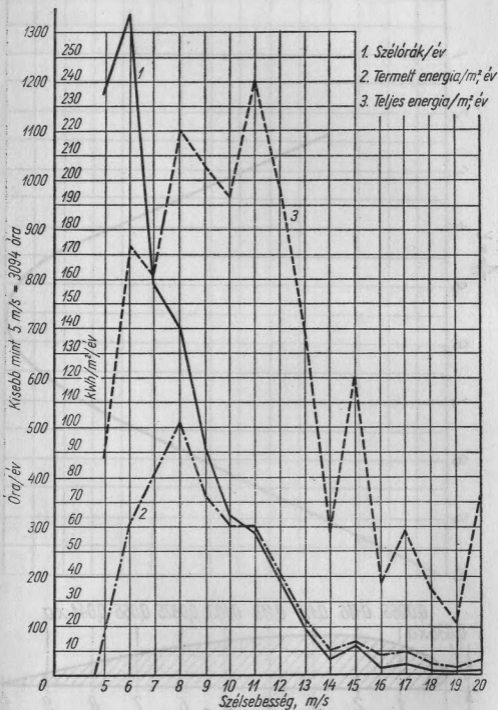
Különböző mérőeszközök, mérések és tudományos kutatások	55 000,— Dkr
Összesen:	375 000,— Dkr =
	= 56 000,— \$

Az 1957. nyarán üzembehelyezett 200 kW Gedser-szélerőművet röviddel ezután kísérleteknek vetették alá, s azok alapján kisebb változtatásokat hajtottak végre rajta. Majd teljesítménykísérleteket is végeztek és mechanikai üzemviszonyait vizsgálták, ami 1958. júniusáig tartott. Csak ezután helyezték folytonos üzembe, és azóta éjjel, nappal, teljesen önműködően termeli az áramot és táplálja a SEAS hálózatba, minden említésreméltó üzemzavar nélkül. A szélerőmű berendezésének részletes leírása — *J. Juul* a szélerőmű tervezője által megadott dokumentáció alapján — a következő:

A *szárnylapátok* teljes hossza, beleértve a végükön levő külön állítható szárnyrészt is, 9 m, szélessége 1,5 m; keresztmetszetük a 33. ábrán látható. A szárnylapát ezzel a keresztmetszettel készült, kissé csavart hasáb alakú test. Többféle meretezésű és alakú szárnylapáttal végeztek szélszatorna kísérleteket s közöttük ezt találták a legjobb hatásfokúnak. A hatásfokgörbét szintén a 33. ábra mutatja. (A dán hatásfokszámítások nem a teljes, hanem a redukált évi széleenergiára vonatkoznak, ezért mutat a hatásfokgörbe 75% szélkerékhatásfokot). Az ábráról leolvasható, hogy a szélkerék gyorsjárási tényezője $\lambda = 5,5$. A szélkeréknek három szárnylapátja van, és kimérését a szélszatornában 6 m/s szélssebesség-nél végezték. A szélkerék fordulatszámát a következőképpen számították ki. Ismeretes volt a Vester-Egersborgban mért szélteljesítmény. Ennek adataiból készült a szélórák görbéje (a 34. ábrán az 1 görbe). Ebből megszerkesztették az 1 m² szélkerékterületre vonatkoztatott energiatarthatam-diagramot (a 2 görbét), azzal a feltételezéssel, hogy a szélerőmű teljesítménye 540 kWh/év lesz a szélkerék 1 m²-ére számítva. Ez a görbe azt mutatja, hogy a legnagyobb évi széleenergiamennyiség 8 m/s szélssebesség-nél jelentkezik, tehát a szélkerék fordulatszámát



33. ábra. A dániai 200 kW (Gedser) szélenergiaátviteli szárnylapátjának metszete és a szélkerék hatásfokgörbéje



34. ábra. Szélenergiadiagramok Gedser (Dánia) széljárásáról

úgy kell megválasztani, hogy ennél a szélsébségnél kb. $\lambda = 5$ legyen a gyorsjárási tényező, azaz a szélkerék kerületi sebessége $u = v_a \lambda = 8 \cdot 5 = 40 \sim 38$ m/s legyen. Mivel pedig a szélkerékátmérőt 24 m-ben választották meg, a fordulatszám így $n = \frac{60 u}{D \pi} = \frac{60 \cdot 38}{75,4} =$

$= 30,2 \sim 30$ ford./min lett. (Nb. Visszafelé számítva a kikerekített jellegszámok alapján az a szélsébség, amelynél a szélkerék hatásfoka a legjobb, tehát $\lambda = 5,5$ -nél

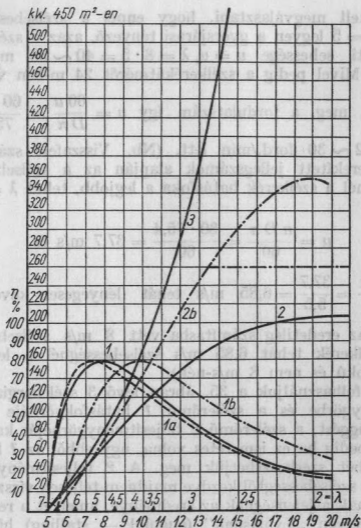
$$u = \frac{n D \pi}{60} = \frac{30 \cdot 75,4}{60} = 37,7 \text{ m/s és}$$

$$v_a = \frac{u}{\lambda} = \frac{37,7}{5,5} = 6,85 \text{ m/s tehát lényegesen kevesebb,}$$

mint az eredetileg számításba vett 8 m/s szélsébség. A szélkerék tehát 6,85 m/s szélsébségnél a legjobb hatásfokú és nem 8 m/s-nél.)

Ha felhasználjuk a 35. ábrán levő 3 szélenergiateljesítménygörbe és a szélérőmű 1 hatásfokgörbéje közti összefüggést, a szélérőmű 2 teljesítménygörbéjét kapjuk, vagy pedig ha ez ismeretes volna, úgy ebből az 1 hatásfokgörbét szerkeszthetjük meg. A 2 teljesítménygörbe 15 m/s szélsébségtől kezdve majdnem teljesen vízszintes. Ez annak a jelenségnek az eredménye, amelyet a repülők szaknyelvén „leválásnak” (angolul — stalling) hívnak. Ennek megfelelően kisebb lesz a felhajtóerő, vagy — a szélkerékre alkalmazva — kisebb lesz a szélkerék nyomatéka nagyobb sebesség mellett.

A SEAS által szerkesztett kísérleti szélérőművek szerkezetében a „leválás” jelenségét a teljesítmény szabályozására használják fel. Ebben a jelenségben egyszerű eszközt találtak a túlterhelés megakadályozására. A szélérőmű teljesítményének ilyen ingadozásait a szél sebességének természetes változásai idézik elő, amelyeket egy megfelelően nagy kapacitású erőhálózat minden nehézség nélkül felvesz.

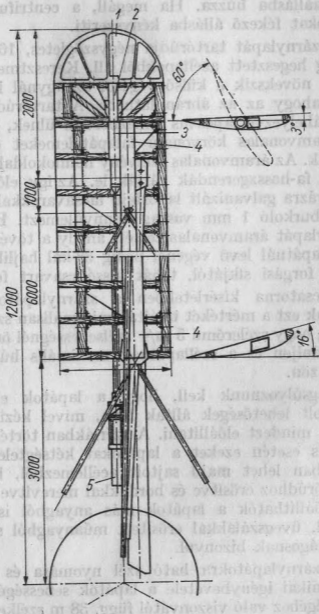


35. ábra. A dániai 200 kW (Gedser) szélörmű teljesítménygörbéi

A szélörművet azonban ettől függetlenül el kell látni olyan vezérléssel, hogy szükség esetén bármikor leállítható legyen kenés, karbantartás céljából, vagy az erőhálózattal való kapcsolat megszakadása esetén. Ezt a célt szolgálja a szárnylapátok végén elhelyezett külön fékezőlapát, amint az a 36. ábrán látható.

A fékezőlapát *1* felülete a szárnylapát felületének 12%-át teszi ki és rendes üzemi viszonyok között a szárny-

lapát szerves részét képezi, vele együtt dolgozik. Mind-egyik fékezőlapát egy tartócsőrúdra 2 van erősítve, amely körül — ha a szélerőmű automatikája működteti —, 60° -nyira fordulhat el a szárnylapát fix részéhez



36. ábra. A dániai 200 kW (Gedser) szélerőmű szárnylapátszerkezete

képezt, miáltal ellenkező irányú erőhatást kifejtve, megállítja a szélkerék forgását.

A féklapátokat egy hidraulikus szervomotor 5 vezérli. Ha a szélerő megindul, a szervomotor a féklapátokat munkaállásba húzza. Ha megáll, a centrifugális erő a lapátokat fékező állásba kényszeríti.

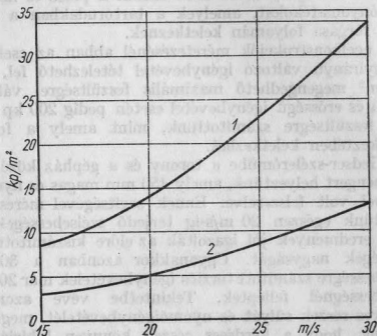
A szárnylapát tartórúdja négyszögletes, 16 és 10 mm vastag hegesztett acéllapokból áll. Keresztmetszete lineárisan növekszik a külső végétől az agynál levő tövéig, mint ahogy az az ábrán látható. A tartórúdra keresztben ráhelyezve laposvas lemezbordák ülnek, amelyekhez az áramvonalas körvonalú falapátelemeket csavarokkal erősítik. Az áramvonalas szelvény homlokoldalát és kifutó részét fa-hosszgerendák zárják le. Az így előállított falapátvázra galvanizált laposfejű facsavarokkal erősítették fel a burkoló 1 mm vastag könnyűlemezt. Ez képezi a szárnylapát áramvonalas testét, amely a tövénél 16° -kal, a féklapátnál levő végénél pedig 3° -kal hajlik el a szélkerék forgási síkjától, tehát kissé csavart felületű.

Szélcsatorna kísérletekben a szárnylapátok csavartságának ezt a mértékét találták minimálisan szükségesnek ahhoz, hogy szélerőmű 5 m/s szélesebségnél önműködően meginduljon és a széllapátnak maximális húzóerőt kölcsönözzön.

Hangsúlyoznunk kell, hogy a lapátok elkészítésére korlátolt lehetőségek álltak fenn, mivel kézi munkával kellett mindezt előállítani. A szériákban történendő jövő gyártás esetén ezeket a lapátokat kétségtelenül sokkal olcsóbban lehet majd sajtolni acéllemezből, hegesztéssel a tartórúdhoz erősítve és bordákkal merevítve előállítani. De előállíthatók a lapátok más anyagból is, mint pl. acélból, üvegszálakkal erősített műanyagból stb., ha az gazdaságosnak bizonyul.

A szárnylapátokra ható szél nyomása és a lapátok mechanikai igénybevétele a lapátok sebességének a szél sebességéhez való viszonyától függ. 38 m szélkerékterületi sebességnél a szélkerékterületre ható nyomás — egy háromlapátos szélkerék esetén, a SEAS-nak a Vester

Egersborg-i szélérőművön végzett kísérletei alapján — a 37. ábra 1 görbéje szerint alakul, míg a 2 görbe ugyanannak a szélkeréknek a szélnyomását álló helyzetben mutatja.



37. ábra. A szárnylapátra ható szélnyomás görbéje (200 kW Gedser)

Juul mérnök így folytatja:

„A szélkerékterületen belül előállható ilyen szélesebségváltozásokra vonatkozó vizsgálatok alapján számításokat végeztünk arra nézve, hogy milyen forgatónyomatékok léphetnek fel ebből, a szélérőmű tornyának függőleges tengelye körül. A fellépő forgatónyomatékból adódó, a szélérőmű tornyának kerületén ható erőt 5300 kp-nak találtuk, ami a fentebb említett erőhatáshoz hozzászámítva, számítási alapot nyújtott a szárnylapátok, a gépház és a torony szerkezeti részeinek méretezéséhez.

A számítások azt mutatták, hogy ha aerodinamikailag előnyös profilt alkalmazunk, úgy gyakorlatilag lehetetlen

a csupán a tartó csőrúdra erősített szárnylapátokat külön kitámasztó rudak és feszítő huzalok nélkül megépíteni. Ezért a lapátok konstrukcióját merevítőlécek és feszítő huzalok alkalmazására alapoztuk, amelyek felfogják a szárnylapátokra ható azokat a plusz és mínusz hajlítónyomatékokat, amelyek a tartórudakban a szélkerék forgása folyamán keletkeznek.

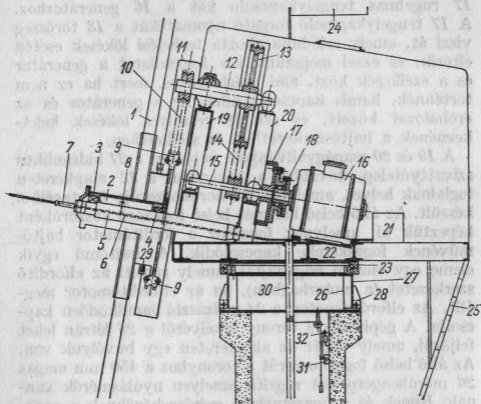
Az acélkonstrukciók méretezésénél abban az esetben, ha egyirányú változó igénybevétel tételezhető fel, 600 kp cm^2 megengedhető maximális feszültségre, változó irányú és erősségű igénybevétel esetén pedig 200 kp cm^2 max feszültségre számítottunk, mint amely a forgás következtében keletkezhet.

A Gedser-szélérőműbe a torony és a gépház közé egy mérőhengert helyeztünk, amely 450 mm magas és nyúlás-mérővel volt felszerelve. Ennek segítségével méréseket végeztünk egészen 20 m/s -ig terjedő szélsébségekkel, és az eredmények jól igazolták az előre kiszámított feszültségek nagyságát. Ugyanakkor azonban a 30 m/s szélsébségre számított torziós igénybevételek már 20 m/s szélsébségnél felleptek. Tekintetbe véve azonban az egyes részek súlyát és nyomóigénybevételét, megállapítottuk, hogy a kérdéses részek könnyen kibírják a nagyobb torziós igénybevételeket is, mert a szárnylapátok a torony és a gépház méretei bőségesek.

Az Electrical Research Association nyúlás méréseket végzett a Gedser-szélérőmű szárnylapátjain. A méréseket csak 15 m/s szélsébségig végezték el, de az eredmények jól megegyeztek a SEAS által előre meghatározott értékekkel.

A gépház hosszmetzetét a 38. ábrán láthatjuk. A szárnylapátok 1 tartórúdja a 2 agyra van csavarozva, amely két beépített 3 és 4 golyóscsapágyon nyugszik. A 4 golyóscsapágy csak a szélkerék és a 2 agy leszerelése esetén cserélhető. Ezért ezt minél hosszabb élettartamra, tehát nagy üzembiztonságra méreteztük. A 3 golyóscsapágy egyúttal axiális nyomást is felvesz, és kiszerezhető a szélkerék, a 2 agy, továbbá az 5 tengelycsap leszerelése nélkül. A 2 agy csapágyait, az 5 fix csap tartja, amelyet a

kabinhoz erősítettünk és közepén egész hosszában a 6 furattal láttunk el; e furat a féklapátok működtetésére szolgáló szervomotorok számára szükséges vezérlő olajnyomás vezetékét képezi.



38. ábra. A dániai 200 kW (Gedser) szélérőmű gépháza

A fix tengelycsap 6 furata és a 2 agy forgó olajvezetékei közé egy önzáró tömszelence 7 van beépítve. A 8 biztonsági szelep a fix tengely olajvezető furatához csatlakozik. A biztonsági szelepet egy olvadó lap zárja le, amelynek anyaga 110 C°-nál olvad. Az esetben, ha a csapágyak valamelyikének hőnfutása következtében a tengelycsap felmelegszik, a zárólap megolvad, kiereszti az olajnyomást, aminek következtében a szélkerék önműködően megáll.

A 2 agyra ékelt 9 ikerlánckerék a 10 kettős 2,5"-os görgős lánc segítségével a 11 lánckereket hajtja a 12 előtét tengelyen, amelynek másik végén a 13 hármas lánckerék foglal helyet. Ez utóbbi az 1,5"-os görgős láncok — 14 — segítségével a 15 tengelyt hajtja, amelyet a 17 rugalmas tengelykapcsoló köt a 16 generátorhoz. A 17 tengelykapcsoló forgató nyomatékát a 18 törőszeg viszi át, amely relé-hiba okozta terhelési lökések esetén eltörik, és ezzel megszünteti a kapcsolatot a generátor és a szélkerék közt, ami azért fontos, mert ha ez nem történnék, hamis kapcsolás állna be a generátor és az erőhálózat között, és ezáltal veszélyes lökések keletkeznének a hajtószerkezetben és szélkeréken.

A 19 és 20 csapágyállványok, valamint a 21 hidraulikus szivattyútelep, továbbá a generátor a 22 alapkereten foglalnak helyet, amelynek 23 hordkoszorúja folytacélból készült. Az álló belső karimát belső fogazású koszorúként képeztük ki, amelynek fogaihoz a fordítómotor hajtóművének fogaskereke kapcsolódik. A hajtómű egyik eleme egy önzáró csigahajtás, amely rögzíti az elfordító szerkezetet (a motorházban), ha az elfordítómotor megállt. Az elfordítómotort a 24 szélzászló önműködően kapcsolja. A gépházba a torony erkélyéről a 25 létrán lehet feljárni, amely fölött az alapkereten egy bűvöllyuk van. Az álló belső fogaskoszorút a toronyhoz a 450 mm magas 26 mérőhengerpalást rögzíti, amelyen nyúlásmérők vannak. Ennek és a hozzátartozó mérőeszközöknek a segítségével az axiális nyomás és a torziós erők mérhetők. A mérőhenger méreteit a lehető legnagyobb érzékenység biztosítására a megengedhető leggyöngébbre állapították meg. Erre való tekintettel egy másik, jóval biztonságosabban méretezett 27 hengert is helyeztek a mérőhenger köré és ezt a 28 bordákkal látták el. A bordák a talpgyűrűhöz hegesztett bordákhoz csavarozhatók, amely talpgyűrűhöz a mérőhenger is hegesztve van. Ha nincs mérés, a 28 bordák csavarok és néhány kúpos szeg segítségével a talpgyűrű bordáihoz erősítve vehetik át a terhet.

A lánckerekeket és a láncokat burkolat védi. A primer lánchajtást olajfürdő keni, de a szekunder lánchajtásnak

olajszivattyús kenése van, egy olajnyomás-relével, amely megállítja a szélerőművet, ha az olajnyomás megszűnik. Az olaj kicsurgását a burkolatból és az esővíz beszivárgását a burkolatba a burkolat és a forgórészek közötti labirint tömítés gátolja.

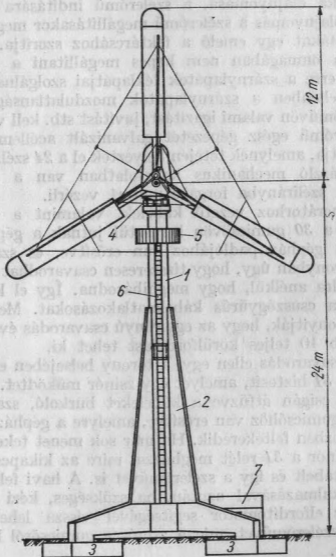
A 17 rugalmas tengelykapcsolón féktárcsa van, amely mechanikusan fékez. A fékpofák akkor oldódnak, ha a hidraulika olajnyomása, a szélerőmű indítására áll be. Ha az olajnyomás a szélerőmű megállításakor megszűnik, a fékpofákat egy emelő a féktárcsához szorítja. A fék azonban önmagában nem képes megállítani a szélerőművet, erre a szárnylapátok féklapátjai szolgálnak; biztosítja ellenben a szárnylapátok mozdulatlanságát, ha a szélerőművön valami igazítást, javítást stb. kell végezni. A szélerőmű egész gépezetét galvanizált acéllemez-gépház borítja, amelynek tetején helyezték el a 24 szélzászlót. A szélzászló mechanikus kapcsolatban van a relével, amely a szélirányba forgató motort vezérli.

A generátorhoz vezető kábelek, valamint a vezérlő kábelek a 30 gumicsövön keresztül jutnak a gépházba, amely a gépház padlójához van erősítve, és szabadon lóg a toronyban úgy, hogy tízszeresen csavarodhat jobbra vagy balra anélkül, hogy meghibásodna. Így el lehetett kerülni a csúszógyűrűs kábelcsatlakozásokat. Megfigyelések bizonyítják, hogy az egyirányú csavarodás évenként legfeljebb 10 teljes körfordulást tehet ki.

A túlcsvarodás ellen egy, a torony belsejében elhelyezett relé 31 biztosít, amelyet egy zsinór működtet. A zsinór egy csigán átfűzve a kábeleket burkoló, szabadon lógó 30 gumicsőhöz van erősítve, amelyre a gépház elfordítása közben feltekeredik. Ha már sok menet tekeredett fel, a zsinór a 31 relét meghúzza, mire az kikapcsolja a vezérlő kábelt és így a szélerőművet is. A havi felülvizsgálat alkalmazásával azután, ha szükséges, kézi vezérléssel, az elfordítómotor segítségével vissza lehet forgatni a szélerőművet, míg a zsinór a gumicsőről le nem tekeredik.

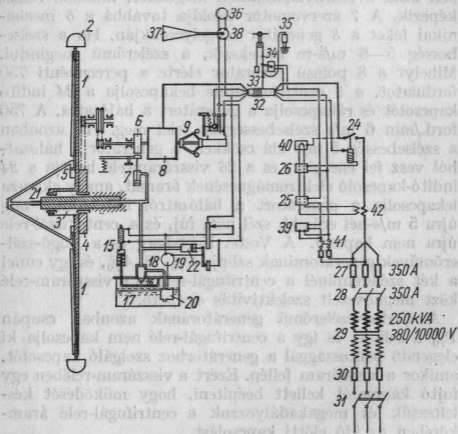
A reléhez egy másik zsinór is tartozik, a végén egy súllyal. A súly csak lazán ül a helyén, úgyhogy ha rend-

ellenes rezgések keletkeznek a toronyban, a súly lerázódik, leesik, megrántja a relét, mire az megállítja a szél-erőművet. A 39. ábra a torony teljes szerkezetét mutatja. Ez egy előfeszített betonból készített függőleges 1 csőből áll, míg a 2 támpillérek és a 3 alap közönséges vasbeton, 4 a fentebb említett mérőhenger, a gépház és a torony



39. ábra. A dániai 200 kW (Gedser) szél-erőmű összeállítási rajza, a toronnyal

között. A nyitott 5 körfolyosóra úgy egy belső, mint egy külső 6 létrán fel lehet menni. A torony közelében egy 7 acél szolgálati épület is van. A tornyot dr. techn. Hejlund Rasmussen (Koppenhága) tervezte.



40. ábra. A dániai 200 kW szélérőmű szabályozóművének vázlata

A 40. ábrán a szélérőmű szabályozásának működési vázlatát adjuk. A szerkezeti részeket sematikusan, a különböző kábeleket és vezetékeket vonalasan ábrázoltuk.

Ha a szélkerék megindul, mind a nagyfeszültségű 31 kapcsoló, mind a 28 kisfeszültségű kapcsoló, továbbá a 41 vezérlő áramkörkapcsoló is kapcsolt állásban van.

A 15 indítómágnes ekkor egy kar-áttétellel zárja a 16 szelepet, a 19 villamosmotor a 20 olajszivattyúval megindul és olajat nyom a hidraulikába. Az olajnyomás az 5 szervomotort működésbe hozza, amely az 1 szárnylapátok 2 féklapátjait üzemi állásba húzza vissza, melyben azok a szárnylapátoknak kiegészítő, működő részét képezik. A 7 szervomotor feloldja továbbá a 6 mechanikai féket a 8 generátor tengelycsonkján. Ha a szélesség 5—6 m/s-re növekszik, a szélerőmű megindul. Mihelyt a 8 pólusú generátor elérte a percenkénti 750 fordulatot, a 9 centrifugál-relé bekapcsolja a 24 indító kapcsolót és rákapcsolja a generátort a hálózatra. A 750 ford./min 6 m/s szélességnek felel meg. Ha azonban a szélesség 5 m/s alá csökken, a generátor a hálózatról vesz fel energiát, és a 26 visszaramrelé bontja a 24 indító-kapcsoló elektromágnesének áramát, amely ekkorra lekapcsolja a generátort a hálózatról mindaddig, míg újra 5 m/s-nél erősebb szél nem fúj, és a centrifugál-relé újra nem kapcsol. A Vester Egersborg és a Bogó-szélerőművek generátorainak szlipje 5%, ill. 4%, és így ennél a két szélerőműnél a centrifugál-relé és a visszaramrelé közt megkövetelt szelektivitás elérhető.

A Gedser-szélerőmű generátorának azonban csupán 1% a szlipje, és így a centrifugál-relé nem kapcsolja ki elegendő pontossággal a generátorhoz szolgáló kapcsolót, amikor a visszaram fellép. Ezért a visszaram-relében egy fojtó kapcsolót kellett beépíteni, hogy működését késleltessük és megakadályozzuk a centrifugál-relé áramkörében az idő előtti kapcsolást.

A szélerőmű megáll, ha a kisfeszültségű áramkör 28 kapcsolóját vagy a vezérlőáram 41 kapcsolóját oldjuk. Ekkor a 24 kapcsoló is oldódik, és megszűnik a generátor kapcsolata a hálózattal. A 15 kapcsoló-mágnesen is megszűnik a feszültség. A 16 szelep elvezeti az olajnyomást az 5 és 7 szervomotoroktól, mire a szárnylapátok féklapátjai és a 6 mechanikus fék működésbe jönnek és a szélerőmű leáll.

A 37 szélzászló arra való, hogy a szélkerekeket a szél irányával szembeállítsa; elfordulásával a 38 reverzáló

szerkezetet vezérli, amely a 36 irányítómotor vezetőkeit keresztbekapcsolja úgy, hogy az irányítómotor abban az irányban forogjon, ahogy a szél irányának változása megkívánja. Ha a szél a szélkerékteret merőlegesen támadja, a szélkerék ebben az állásban rögzítve marad, minthogy az elfordítómotor hajtóművébe beépített csigahajtás önzáró. A szélzászló mozgásait egy olajjal töltött lökés-gátló fékezi.

Különböző biztonsági berendezések szolgálnak a szélkerék megállítására abban az esetben, ha bármi hibásodás állna be, vagy ha termelés közben a hálózattal megszakadna az összeköttetés.

Ha a hálózattal megszakad az összeköttetés, és így ez nem szolgáltat gerjesztőáramot a generátornak, a 24 kapcsolója oldódik, és ugyanakkor a 15 kapcsoló-elektromágnes is kikapcsol, mire esik az olajnyomás és a fékezőberendezések megállítják a szélkereket. Ha a terhelés meghaladja azt a teljesítményt, amit a szélerőmű még elbír, fordulatszám és a generátorfeszültség automatikusan csökken, míg végül is leáll. Ha azonban a terhelés történetesen kevesebb, mint a termelés, a szélkerék fordulatszám és a generátor áramfeszültsége is emelkedni fog. Ez esetben a 39 túlfeszültség-relé megszakítja a vezérlőáramot, ha ezt a centrifugál-relé biztonsági kapcsolója még meg nem tette volna, amely hasonlóképpen szintén meg tudja szakítani a vezérlőáramot. A vezérlőáramot egy túlnyomás-kapcsoló is meg tudja szakítani, amely a hidraulikába van beépítve és a 22 dugattyúshenger működteti.

A 15 szelepszáró elektromágnes dugattyús-hengerének dugattyúrúdján egy rugó is helyet foglal, amely lehetővé teszi, hogy a 16 zárószelep mint biztonsági szelep is működhessen, amely túlnyomás esetén a rugó ellenében kinyílik és a nyomást kiengedi, mire a szárnylapátok féklapátjai megelőzik a veszélyes helyzet lehetőségét, melyet a túl nagy fordulatszám idézne elő.

A szélerőművek ilyen túlgyorsulását megakadályozó biztosító berendezéseknek többféle megoldása használatos.

A különböző biztosító berendezések — ha működésbe jöttek — önmagukat reteszelik úgy, hogy a szélérőmű addig nem indul el, amíg a reteszeléssel kézzel fel nem oldották; e különböző biztosító berendezések annyira szelektívek, hogy külön-külön is megállítják a szélkereket (ha csak az egyikük jön is működésbe).

A generátor normális körülmények között nem kaphat túlterhelést, még a leghevesebb orkánban sem, mivel a forgató hatást a szárnylapátokon a nagy széláramban bekövetkező leválási jelenség önműködően határozza meg, amint azt már említettük.

Ha a hálózatban az egyik fázis megszakad, akkor a generátor másik két fázisa túlterhelést kaphat; a 25 túláram-relé ez esetben kikapcsolja a vezérlőkábelt, mire a szélkerék megáll. A 25 és 26 relé és a 40 fogyasztásmérő a fővezetékre kapcsolt 42 transzformátor szekunder oldalához csatlakozik.

A Vester Egersborg és a Bogó-szélérőmű szabályozó rendszere nagyjából azonos. A Bogó-szélérőműnél hidraulika helyett egy erős spirálrugót alkalmaztak. A rugót egy csiga segítségével kézzel vagy egy elektromotorral feszítik meg; a rugó a féklapátokat a működő szélérőművön fékező állásba húzza, ha a szélkerék megállítására szükség van. A Vester Egersborg szélérőmű olajnyomás helyett légnymást használt. Az ilyen pneumatikus rendszerben azonban kondenzvíz csapódhat le, ami — főleg fagyos időben — bajt okozhat. Mindazonáltal mind a három rendszer olyan megbízhatóan működött, hogy mostanáig semmi lényeges meghibásodás nem fordult elő.”

J. Juul eme leírása alapján a későbbiekben kritikailag is foglalkozunk majd a 200 kW Gedser-szélérőművel. Most pedig hallgassuk meg *J. Juul* beszámolóját a szélérőmű üzemi tapasztalatairól.

A 41. ábra a közös elosztóhálózatra dolgozó dán hőerőművek és a Bogó- és Gedser-szélérőművek termelési adatait mutatja be 1959. november—december hónapokban. Az 1 görbe a hőerőművek termelése MWh-ban, a 2 görbe a Gedser- és a 3 görbe a Bogó-szélérőmű terme-

lése kWh-ban. Jól látható, hogy a hőerőművek szeles, hideg időben több áramot kénytelenek termelni, de ugyanakkor a szélerőművek is többet termelnek. A szélerőművek termelése tehát jól alkalmazkodik az időjárás okozta nagyobb energiaigényhez. December 8-án pl. 8°-os hideg volt, és viharos szél fújt. A hőerőművek termelése a maximumra emelkedett, és a szélerőművek is

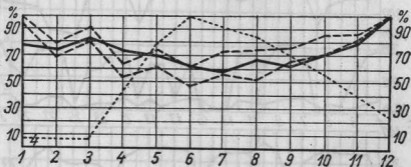


41. ábra. A dániai hőerőművek és a velük együttműködő Bogö- és Gedser-szélerőművek termelési görbéi

teljes kapacitással dolgoztak. A szélerőművek tehát az ilyen esetekben nagyon meg tudják könnyíteni a hőerőművek munkáját mind mennyiség, mind a feszültség tartása tekintetében. Ez a megállapítás nemcsak napokra, hanem évszakokra is érvényes. A 42. ábrán az 1 görbe a Gedser- és a 2 görbe a Bogö-szélerőmű havi teljesítményeit ábrázolja a december havi teljesítmény százalékában, a SEAS egész termeléséhez (3 görbe) hasonlítva. Látható, hogy közel párhuzamosan futnak a görbék. Télen több a fogyasztás és a szélerőművek is többet

termelnek, mert több a szél, mint nyáron. Mindezt jól kiegészíti az a tény, hogy a vízerőművek Skandináviában nyáron termelnek többet (4 görbe) és télen kevesebbet (mert befagynak a vizek). (A két ország ui. energiacsereviszonyban van egymással.)

A világháború idején Dánia nagyon nehéz helyzetben volt energiaellátás teljesítésében, annyira, hogy kénytelen volt helyben bányászható silány tüzelőanyagokat, lignitet, tőzeget is igénybevenni. Sokat segített a még meglévő 3000 nagy ipari szélmalom is, amelyek átlagos



42. ábra. A dániai hőerőművek egész évi termelési görbéi

szélkerékátmérője 20 m volt; akkor ui. részben ezek végezték el az őrlés munkáját.

Ma már ezek a szélmalomok nagyobb részben eltűntek, és elfogyott a lignit és a tőzeg is, úgyhogy ha valami okból a külföldi szén és olaj importja megszűnnék, ez katasztrofát jelentene. Egy ilyen kritikus helyzetben nagy enyhülést jelentene megfelelő számú szélelektromos-mű villamosenergia-termelése, amely a szükséglet egy részét ki tudná elégíteni és kiegészítené a szűkös mennyiségű tüzelőanyagot. Mindezt figyelembe véve olyan viszonyok között, mint amilyenek Dániában vannak, a szél erőművek teljes használati értékűek.

A 200 kW Gedser-szél erőművel végzett kísérletek és mérések tárgyában meg kell még emlékeznünk egy üzemi jelenségről, amelynek kiküszöbölése kívánatos volna: a szél erőmű teljesítménye ui. még állandó szélben is erősen pulzál, lüktet. A lüktetés (amelynek nagysága 20—50 kW),

majdnem egybeesik a szélkerék fordulatanak periódusával. Szakértők meghallgatása és saját megfigyelések alapján ezt valószínűleg az okozza, hogy a szélkerék nem szemben áll a széllal, hanem a tengelye kb. 10° -kal ferde a vízszinteshez, tehát a szél irányához képest. Ezen tehát a tengely vízszintes elrendezésével lehetne segíteni.

A Bogó-szélérőmű 8 évi üzeme alapján számított átlagos évi termelése 80 457 kWh, amiből az 1 m^2 szélkerékterületre a vonatkoztatott évi termelés $80\,457/132 = 610$ kWh.

Hasonló alapon a Gedser-szélérőmű átlagos évi termelése 410 400 kWh, 1 m^2 szélkerékterületre pedig évi 910 kWh. Ez a fajlagos termelésben mutatkozó nagy különbség azzal magyarázható, hogy Gedser széljárás tekintetében kedvezőbb helyen fekszik, mint Bogó. Ezenkívül a nagyobb egység gazdaságosabb is.

Amikor még a Bogó- és a Gedser-szélérőmű az átépítés előtt egyenáramot fejlesztett, sokkal kisebb volt a fajlagos termelésük. Bogó- 114 kWh/m^2 -t és Gedser 272 kWh/m^2 -t termelt évente. A különbség tehát nagyon jelentékeny, ami azzal magyarázható, hogy a termelt váltakozóáramot a hálózat bármikor teljes mennyiségében felveszi, míg az egyenáramot a szélérőmű kis terjedelmű fogyasztói hálózatra táplálta, amikor is a fel nem vett mennyiség veszendőbe ment. Ez a tény is mutatja, hogy legelőnyösebb a szélenergiából termelt áramot nagykapacitású hálózatra táplálni, mert ez jár a legkisebb veszteséggel.

Az előadottakban J. Juul 1961. évi római szélenergia-konferenciára beküldött három dolgozatát értelemszerűen foglaltuk egybe. Legfontosabbnak tartjuk benne a Gedser-szélérőmű részletes leírását és a 3 év üzemi tapasztalatait, amelyekből most már a berendezés előnyeit és hibáit is láthatjuk. Egyébként, minthogy még ez is csak kísérleti szélérőmű, természetesen, hogy vannak még rajta tökéletesíteni valók. Vegyük őket sorra:

1. A generátor nagyságát jól választották meg 200 kW-ra. Ellenben nagyon alacsony az alapszélsebesség, azaz az a szélsébség, amelynél a szélkerék a megválasz-

tott $\lambda = 5,5$ gyorsjárási tényezővel, tehát a legjobb hatásfokkal jár. Ezt a szélességet $J. Juul$ 8 m/s-re gondolta megválasztani, azonban ez a visszaszámítás alapján ténylegesen csak 6,9 m/s. A 35. ábrán levő 1 hatásfokgörbe tehát nem felel meg a tényeknek, mert az helyesen nem 8 m/s szélességnél tetőzik, hanem 6,9 m/s-nél (1a görbe). Ez a görbe egyébként a 33. ábra λ függvényében rajzolt hatásfokgörbéjének az átrajzolása a szélesség — m/s — függvényében. Látható, hogy mily rohamosan csökken a szélkerék hatásfoka 7 m/s szélesség után. Nézzük meg a 34. ábra általam berajzolt 3 görbéjét, amely a szél évi kWh/m² teljes energiatartalmát mutatja a szélesség függvényében. Ebből láthatjuk, hogy Gedserben az 5—15 m/s közti szélességekben van a legtöbb energia, tehát ebben a tartományban kellene a szél energiáját a legjobb hatásfokkal kihasználni. Azonban amiatt, hogy az alapszélesség túl kicsi, 15 m/s szélességnél már csak 30% a szélkerék hatásfoka (a 16/27-edrész szélességére vonatkoztatva; 35. ábra 1a görbe), tehát ennél a szélességnél már 62,5% a veszteség. Ezért éri el a generátor csak 17 m/s szélességnél (35. ábra 2 görbe) a névleges 200 kW terhelését, amely sebességgel csak kb. 20 órán át fúj a szél évenként. A generátor tehát az év 8760 órájából csak nagyon kevés órán át kap teljes terhelést, tehát nagyon rossz a kihasználása. Ezen úgy lehetne segíteni, hogy fel kellene emelni az alapszélességet. Számításom szerint 10 m/s lenne a legelőnyösebb alapszélesség. A szélkerék tehát nem 6,9 m/s, hanem 10 m/s szélességnél dolgozna a legjobb hatásfokkal és $\lambda = 5,5$ gyorsjárási tényezővel, ami azt jelenti, hogy a szélkerék kerületi sebessége is felemelkednék $u = 10 \cdot 5,5 = 55$ m/s-re és így a fordulatszám is $n = 42,6$ ford./min-re. Mivel pedig a lánchajtások módosítása összesen $i = 25$, tehát a generátor percenként 1000-et fordulhatna, tehát még kisebb súlyú lehetne és még kisebb helyet foglalna el.

A 35. ábrán levő 2 szélkerék teljesítménygörbéje a berajzolt, és 10 m/s szélességnél tetőző 1b hatásfokgörbével kiszámítva, a 2b görbévé módosulna, amely azt

mutatja, hogy ez esetben a generátor már 11,6 m/s szélsebességnél teljes 200 kW terhelést kapna és 14,3 m/s sebességnél érné el a maximális túlterhelést (280 kW-ot). A generátor tehát már 13,6 m/s szélsébségtől kezdve állandóan közepesen 260 kW túlterheléssel dolgozna, tehát ettől a sebességtől kezdve kellene gondoskodni a generátor teljesítményének állandó 260 kW szintre való szabályozásáról. Az ily feltételek mellett kiszámított évi energiatermelés 27%-kal lenne több, mint a jelenlegi. Ez a magyarázata, hogy a Gedser-szélerőműtől évi átlagban 600 000 kWh-t vártak és csak 410 000 kWh-t kaptak. Azt az ötletet tehát, hogy úgy választották meg a szélkerék alapszélességét, hogy a generátor a legnagyobb szélben se kapjon túlterhelést, nagyon drágán kellett megfizetni, mert ez legalább évi 110 000 kWh termelés elvesztésébe került. Ez a számítás csak a szélkerék hatásfok-változásait vette figyelembe, de ha a generátorét is figyelembe vennénk, még nagyobb lenne a különbség, mert ily módon a generátor jó hatásfokú teljesítményterülete jól összeesnék a szélenergia legbősegebb jelentkezésének szakaszával, nem úgy, mint most. A generátor már 10 m/s sebességnél 75% terhelést kapna, míg jelenleg csak 12 m/s sebességnél éri el ezt a terhelést és kezd jó hatásfokkal dolgozni.

2. A túlterhelés korlátozására a meglévő konstrukciónál nem nagy szükség van, hiszen az alacsonyra választott alapszélsébség miatt a generátor sohasem kaphat túlterhelést. A lapátfék berendezés tehát csak biztonságra és esetleges üzemzavar esetére szolgál. Ehhez képest ez az egész önműködő hidraulika nagyon komplikált és drága.

3. A Gedser-szélerőmű még egyenletes szélben is nagy terhelésingadozásokkal működik, ami 30—50 kW-ot is kitesz, és periódusa csaknem megegyezik a fordulatszámmal. J. Juul ezt annak tulajdonítja, hogy a szélkerék tengelye nem vízszintes, hanem 10°-kal ferde. Ezért az újabb szélerőművet már vízszintes tengellyel tervezi, előrefeszített lapátokkal. Véleményem szerint e pulzálás legfőbb oka az, hogy a szárnylapátoknak nincs súlya

(fából, alumíniumból vannak), és így a szélkeréknek nincs tehetetlensége. Ezenkívül jelen esetben kevés a három lapát, mert így egyik lapátnak sincs a széláramban kiegyensúlyozása. Vissza kell térni a régi szélmalomok négy szárnylapátos rendszeréhez. Így áramlástanilag és a tehetetlenség szempontjából is javul a helyzet. Nem szabad a lapátok súlyával takarékoskodni, mert szükség van lendítő tömegekre. Nehezebben szalad meg és nehezebben esik ki a fordulatszámából.

A lapátok számán és súlyán már nehezen lehetne változtatni. De az alapszélsébséget könnyen fel lehetne emelni, egyszerűen úgy, hogy a nyolc pólusú generátor helyett hat pólusút építenek be, amely 1000 ford./min sebességgel jár, és így a szélkerék fordulatszáma is arányosan 40/min-re emelkednék. Ezzel az egyszerű változtatással évente legalább 120 000 kWh-val többet termelnének, sőt talán elérhetnék az előirányzott 600 000 kWh évi termelést is, és akkor a gazdaságossági számítás is még sokkal jobb eredményt mutatna.

Dánia úttörő munkája így is nagyon értékes, mert helyes útra térve, fix szárnylapátos szélkerekeket alkalmazva elindított egy olyan fejlődést, amely nagyteljesítményű szélerőművek kifejlesztésére és ezzel a szélenergia nagyüzemi kihasználására fog vezetni.

Anglia máris követi Dánia nyomdokait. A cronfieldi Dowsett Holding Ltd gyár most épít egy 270 kW-os fix szárnylapátú szélerőművet. A John Brown gyár is fix szárnylapátos szélerőművek gyártására tért át.

Időszerű tehát most már eldönteni, hogy előnyös-e nagyobb szélerőművek építése, és a különböző szélviszonyokra milyen legnagyobb szélerőművek építhetők egyáltalán? Erre a kérdésre a következő fejezetben adunk feleletet.

4. KORSZERŰ NAGY SZÉLERŐMŰVEK

Nem sokkal az első világháború után, az 1920-as években *Honnef* nevezetű mérnök egy óriás szélerőmű tervezetével lépett a nyilvánosság elé. Annak a jelenségnek a kihasználására, hogy nagyobb magasságban, nagyobb és állandóbb a szélenergia, 300 m magas rácsos vasszerkezetű tornyot tervezett, amelynek tetején egy elfordítható acélvázra három vagy öt szélkereket helyezett, amelyek szárnylapátjain egy-egy koszorúgenerátor lett volna. A szélkerekek átmérőjét 160 m-re és a koszorúgenerátorokét 120 m-re tervezte. E tervben azonban sokkal több volt a fantázia, mint a műszaki realitás, így nem is kerülhetett megvalósításra, viszont divatot csinált, és utána szertelen nagyságú és fantasztikus szerkezetű szélgépeket tömegével agyaltak ki laikus feltalálók, amelyeken ma már csak mosolyogni lehet. A nagyarányú tervek között akadtak néha jobban átgondoltak is, amelyeket szakemberek készítettek. Ilyen volt a Szovjetunióban tervezett 10 000 kW-os szélerőmű is, amelyet már említettünk. És ilyen volt *Kleinhenz* óriási szélgépe is, amelynek tengelymagassága 250 m és szélkerékátmérője 130 m lett volna. Ezt a tervet *Kleinhenz* az Augsburg Nürnbergi Gépgyár támogatásával készítette, és annakidején kivitelre is alkalmasnak találták, azonban mégsem valósították meg, mert nem lett volna gazdaságos.

Hogy ezt kellőképpen megérthessük, néhány fontos alapvető ténytet kell ismertetnünk.

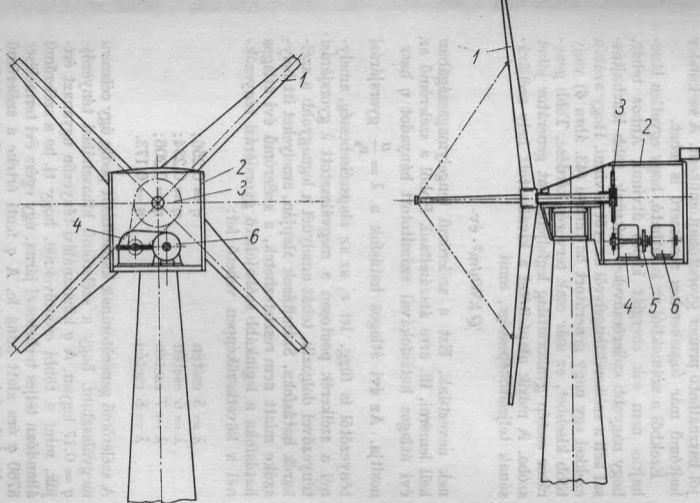
Először is csak bizonyos magasságig kifizetődő felmenni a jobb széljárású légrétegekbe, mivel a szélerőmű beruházási költségei a toronymagassággal aránytalanul

nagyobb mértékben nőnek, mint amit a magasabb légrétegekben kinyerhető energiátöbblet kitesz. Hozzávetőleges számítások azt mutatták, hogy a toronymagasság felső határát 120 m-ben lehet megállapítani. Ennél magasabb tornyú szélérőmű beruházási többletköltségének nincs meg a megfelelő ellenértéke a kitermelhető energia-többletben.

Azt is mutatják a számítások, hogy ugyanazt a termelt energiamentyiséget véve alapul, az egy szélkerekes szélgép a legolcsóbb, és már két szélkerekes szélgép is fajlagosan ennél jóval többbe kerül.

Az is tetemesen megdrágítja a szélérőművet, ha egy magas torony tetején aránylag kis szélkerék foglal helyet, mert így a szélkerékhez képest aránytalanul nagy torony nincs kihasználva, és nagyon megdrágítja a berendezést. A torony magasságát a szélkerékátmérőhöz kell arányítani úgy, hogy a szélkerék legalsó pontja kb. 12—16 m-re legyen a talajszinttől.

Mivel pedig, mint láttuk, a szélkerék gyorsjárási tényezőjét, λ -át nem választhatjuk meg akárhogyan, mert ettől függ a szélkerék hatásfoka, tehát gazdaságossága is, ezért a szélkerék átmérőjét sem vehetjük akármilyen nagy méretűre, mert minél nagyobbra vesszük, annál kisebb a fordulatszám és annál nagyobb a szélkerék-tengelyről átviendő nyomaték. Ez a nyomaték képezi a szélérőmű gépezetének legkritikusabb pontját. Ennek a nyomatéknak az átvitelére szolgáló gyorsító hajtómű számításakor olyan méretek adódnak, hogy emiatt nem is lehet ide — primer hajtóműnek — akármilyen gépezetet alkalmazni. Legolcsóbbnak és legkisebb súlyúnak a lánchajtás bizonyult. Ezért alkalmaztak a dániai 200 kW-os szélérőmű gyorsító hajtóművéhez is lánchajtást. De a lánchajtásnak is korlátolt a teljesítőképessége. A jelenleg gyártott ipari hajtóműláncok közül a legerősebb is csak legfeljebb 1400 kp-dal terhelhető, tekintetbe véve a szélérőműveknél megkövetelt nagyobb üzembiztonságot. A gépház (43. ábra 2) méretei is korlátozottak és ezért a lánckerék (3) osztóköre sem lehet nagyobb 2400 mm-nél, mert különben nem fér el. A szélkerék kis fordulatszám



43. ábra. Sokpólusú generátoros, ún. „magyar” szélérőmű vázlatja (nincs hajtóműve)

miatt a láncsebesség is kicsi és így a lánchajtás nagyon jól használható primer gyorsítóhajtóműként. A szekunder hajtómű már fogaskerékes rendszerű is lehet.

Ezekből a számokból az is látható, hogy egyetlen lánchajtás nem sok energiát képes átvinni. Ahhoz tehát, hogy nagyobb szélérőműveket építsünk, több lánchajtással kell a szélkeréktengelyről az erőt átvinni. Hogy azután ezekkel egy nagy generátort hajtunk-e (43. ábra 6) vagy több kisebbet, ez már csak tervezés kérdése. Több generátor esetén gyakorlatilag legfeljebb hat generátor jöhet szóba. A másik alapfeltétel a kiválasztott hely széljárásának teljesítőképessége, amit

$$|Q \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{év}$$

nek neveztünk. Ezt a szélérőmű tengelymagasságában kell lemérni, ill. arra átszámítani. Ebből a szélérőmű az évi átlagos hatásfokával számítottot hányadot η hasznosítja. Az évi átlagos hatásfok a $\lambda = \frac{u}{v_a}$ gyorsjárási tényezőtől is függ. Itt v_a az az alapszélsebesség, amelynél a szélkerék pontosan a megválasztott λ gyorsjárási tényezővel dolgozik, tehát amelynél a legnagyobb a szélkerék hatásfoka. Számítások alapján, amelyeket itt helyszűke miatt nem részletezhetek, a szélérőmű évi átlagos hatásfoka a leginkább szóhajóhető gyorsjárási tényezőknel a következőképpen vehető fel:

$\lambda = 5$ esetén	$\eta = 0,256;$
$\lambda = 6$ esetén	$\eta = 0,234;$
$\lambda = 7$ esetén	$\eta = 0,206;$
$\lambda = 8$ esetén	$\eta = 0,173.$

A szélérőmű generátorának kapacitását pedig úgy célszerű megválasztani, hogy a szélérőmű kihasználási tényezője $q = 0,17$ legyen. A q kihasználási tényezőn ugyanazt értjük, mint a többi erőműveknél, hogy ti. ha a szélérőmű állandóan teljes terheléssel járna, úgy egész évi termelését 8760 q óra alatt adná le. A q fenti értéke a szélérőmű valószínű évi teljesítményének számításából adódott.

A $8760 \cdot q$ értéke eszerint kb. évi 1500 üzemóra. Ennyi órai teljes terhelésnek felel meg a szélerőmű évi termelése.

A generátor 1 m^2 szélkerékterületre eső teljesítménye e , eszerint:

$$e = \frac{\eta Q}{8760 q} \quad (5)$$

A generátorkapacitás tehát

$$E = F \cdot e,$$

ahol F a szélkerékterület, azaz $F = \frac{D^2 \pi}{4}$, ahol D a szélkerék átmérője. Behelyettesítve ezeket az értékeket:

$$E = \frac{D^2 \pi \eta Q}{4 \cdot 8760 q} \quad (6)$$

Mondottuk, hogy egy ipari lánchajtás lánc a primer gyorsító áttételben (a szélkerék n percenkénti fordulatszám mellett) maximálisan és összesen 14 000 kp húzásra vehető igénybe. Mivel pedig a lánckerék mérete is korlátozott, erőkarul maximálisan 120 cm-t lehet felvenni, és így egy ipari lánchajtással maximálisan átvihető nyomaték nagysága:

$$M = 120 \cdot 14\,000 = 1\,680\,000 \text{ cmkp} \quad (7)$$

z számú lánchajtással átvihető nyomaték = zM .

Az aszinkron generátorok jelentős mértékben túlterhelhetők. Biztonság okáért azonban max 50% túlterhelhetőséggel számolunk és így z számú lánchajtás igénybevehetősége alapján átvihető legnagyobb nyomaték:

$$zM = \frac{71620 \cdot 1,36 \cdot 1,5 \cdot E}{n} = z \cdot 1\,680\,000, \quad (8)$$

amiből

$$E = 11,5 z n \text{ [kW]} \quad (9)$$

$$\text{és } n = \frac{0,087 E}{z} \text{ [ford./min]}, \quad (10)$$

másrésről a szélkerék kerületi sebessége a gyorsjárási tényezőtől

$$u = \lambda v_a = \frac{n D \pi}{60},$$

tehát

$$n = \frac{60 \lambda v_a}{D \pi} = \frac{19,1 \lambda v_a}{D} \quad (11)$$

a (10) és (11) egyenletekből

$$\frac{0,087 E}{z} = \frac{60 \lambda v_a}{D \pi}.$$

Ebbe E-t a (6) egyenlet alapján behelyettesítve

$$\frac{0,087}{z} \cdot \frac{D^2 \pi \eta Q}{4 \cdot 8760 q} = \frac{60 \lambda v_a}{D \pi},$$

amiből

$$D^3 = \frac{60 \cdot 8760 \cdot 4 \lambda v_a q z}{0,087 \cdot \pi^2 \eta Q} = \frac{2\,450\,000 \lambda v_a q z}{\eta Q},$$

és így

$$D = \sqrt[3]{\frac{2\,450\,000 \lambda v_a q z}{\eta Q}} = 135 \sqrt[3]{\frac{v_a \lambda q z}{\eta Q}}. \quad (12)$$

Ennek az egyenletnek a segítségével egy adott Q szél-teljesítményre a D szélkerékátmérő kiszámítható. Utána a (11) egyenletből kiszámítható az n szélkerékfordulat-szám és végül a (9) egyenletből az E generátorteljesítmény.

Előre választandó meg a képletekben szereplő λ , amelynek alapján η is adottnak tekinthető, ezenkívül z , továbbá q is felvehető a már megadott értékekben. Mind η , mind q tapasztalati adatok, amelyek az eddig lefolytatott teljesítményszámításokból adódtak, mint jól megközelítő átlagértékek. Nem választható meg azonban tetszés szerint v_a értéke; ezt tehát számítani kell. Ennek

a számításnak a kiindulópontja a generátornak a szélkerék 1 m^2 -ére vonatkoztatott e teljesítménye, amely a (5) képletből kiszámítható. A szélerőmű tervezése során végzett számítások azt mutatták, hogy a v_a alapszélsebesség legelőnyösebb értékénél a szélerőmű kb. féltérheléssel jár, tehát $e/2$ fajlagos teljesítménnyel. Az ehhez tartozó széltejesítményt úgy kapjuk, hogy osztjuk a szélerőmű összhatósfokával, c -vel. Tehát:

$$w = \frac{e}{2c} \quad (13)$$

c értékét a szélkerék maximális hatásfokából úgy kapjuk, hogy megszorozzuk azt a szélerőmű gépezetének hatásfokával, ami átlagosan 0,8. Tehát:

$$\lambda = 5\text{-nél} \quad c = 0,46 \cdot 0,8 = 0,368;$$

$$\lambda = 6\text{-nál} \quad c = 0,42 \cdot 0,8 = 0,336;$$

$$\lambda = 7\text{-nél} \quad c = 0,37 \cdot 0,8 = 0,296;$$

$$\lambda = 8\text{-nál} \quad c = 0,31 \cdot 0,8 = 0,248.$$

A v_a sebességű szél energiája 1 m^2 keresztmetszeten kW-ban kifejezve:

$$w = 0,000615 v_a^3,$$

amiből

$$v_a^3 = \frac{w}{0,000615} = \frac{e}{0,00123c},$$

és így

$$v_a = \sqrt[3]{\frac{e}{0,00123c}} \quad (14)$$

Mivel pedig mind e , mind c arányos λ -val, így e/c egy λ -tól független számot ad, és így v_a is független λ -tól, és csupán Q -tól függ. A v_a értékei tehát:

$$Q = 1000 \ 1500 \ 2000 \ 3000 \ 4000 \ 6000 \ 8000 \ 10000 \ [\text{kWh}/\text{m}^2 \ \text{év}]$$

$$v_a = 7,23 \ 8,28 \ 9,1 \ 10,43 \ 11,49 \ 13,13 \ 14,15 \ 15,56 \ [\text{m/s}]$$

A fajlagos generátorkapacitás e értékei:

$\lambda = 5$ esetén	$e = 0,171 \cdot 10^3 Q$;
$\lambda = 6$ esetén	$e = 0,156 \cdot 10^3 Q$;
$\lambda = 7$ esetén	$e = 0,137 \cdot 10^3 Q$;
$\lambda = 8$ esetén	$e = 0,115 \cdot 10^3 Q$.

Amint látható, a fajlagos generátorkapacitás λ növekvő értékével jelentékeny mértékben csökken. Ezekben a képletekben a szélkerék tengelyéről az egy hajtóművel (lánchajtással) átvihető M nyomaték oly értékkel szerepel, amely a mai technikai viszonyok között — szél-erőművek lassú fordulató tengelyeinél — a maximálisnak tekinthető. Azonban mint mindenben, úgy ebben is fejlődés várható és így ezeket a képleteket oly formában is meg kell adnunk, amelyben az M nyomaték meghatározott, limitált érték nélkül szerepel; ebben az esetben

$$E = \frac{z M n}{146\,105}; \quad (15)$$

$$n = \frac{146\,105 E}{z M} = \frac{19,1 \lambda v_a}{D}; \quad (16)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{1,463 \lambda v_a q z M}{\eta Q}}. \quad (17)$$

A (9), (11) és (12) képletek alapján kiszámítottam azon szél-erőművek főbb műszaki adatait, amelyek a maximálisnak vett M nyomaték mellett a $Q = 1000$ — $10\,000$ kWh/m² év szélteljesítményű helyek számára optimálisan megszerkeszthetők (I. táblázat). Minden szélteljesítmény négy szél-erőművel szerepel, $\lambda = 5, 6, 7$ és 8 gyorsjárási tényezőkre kiszámítva. A táblázatból nagyon érdekes tanulságok vonhatók le.

Az első tanulság az, hogy a $\lambda = 6$ gyorsjárási tényezővel járó szél-erőmű gazdaságossága a $\lambda = 5$ -höz képest még nem sokkal romlott. De az már meggondolandó, hogy $\lambda = 7$ -tel építsünk-e szél-erőművet, mert lényegesen na-

gyobb (39 m \varnothing helyett 47,2 m \varnothing) szélkerékkel az évi termelés 306 000 kWh-ról csak 354 000 kWh-ra nőtt. A $\lambda = 8$ gyorsjárási tényező pedig már feltűnően előnytelen méreteket ad a termeléshez viszonyítva. A legolcsóbban mindenesetre a $\lambda = 5$ szélerőmű fog termelni.

Magyarországon alig lehet jobb széljárású helyekre számítani, mint a $Q = 4000$ kWh/m² év szélteljesítményű. Nálunk tehát felgyorsító hajtóművel $z = 1$ esetén 500 kW-os a legnagyobb megépíthető szélerőmű. Az Alföldön, ahol 50 m talajszinti magasságban $Q = 1500$ kWh/m² év a valószínű szélteljesítmény, 260—300 kW-os szélerőmű építhető.

A $z = 6$ esetén a gyorsjárási tényezők hatása az erőmű gazdaságosságára hasonló a fentihez. Az Alföldön azonban 50 m magas toronnyal megépíthetnénk kb. 900 kW-os szélerőműveket, vagy $\lambda = 7$ -tel 1000 kW-osakat, amelyek mindegyike kereken 1 500 000 kWh-t termelne évente. De legjobb széljárású helyeinken sem építhetnénk nagyobb szélerőműveket, mint 1700 kW-osat, amelynek az évi termelése kereken 2 500 000 kWh-ra becsülhető.

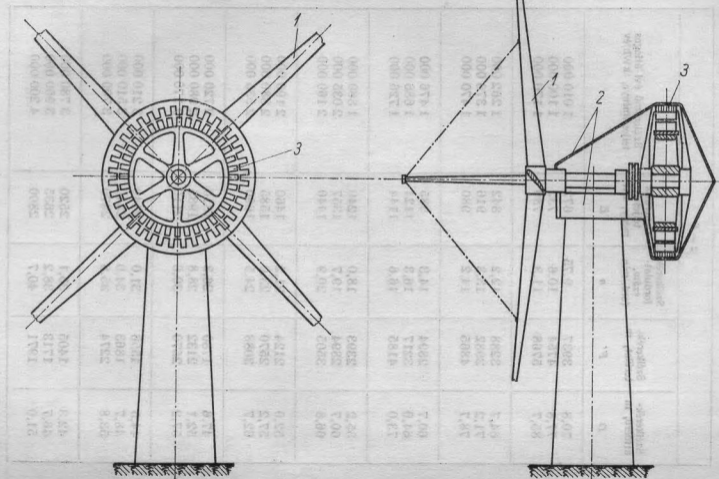
Lehet-e még nagyobb szélerőműveket építeni? Mint láttuk, a nagyobb szélerőművek építése elé a primer felgyorsító áttételezés (43. ábra 3) gördíti a legnagyobb akadályt. Amennyiben a technika haladásával z_M növelhető lesz, ugyanilyen rendszerű, de nagyobb szélerőműveket is építünk majd. Nagyobb szélerőműveket építeni ugyanazt jelenti, mint nagyobb magasságokba vinni fel a szélkerék tengelyét. A táblázat szerinti szélerőművek legelsőjének, a 204—244 kW-osnak kb. 35 m magasan van a tengelye a talajszint fölött, ahol örvénylések már alig vannak és a szél energiája is kb. 60%-kal nagyobb a 15 m magasan mérthez képest (a szél sebességének a talajszint fölötti magassággal való változására a 17. ábrán levő diagram ad tájékoztatást; sík vidékeken kb. ehhez hasonló arányban növekedik a szél sebessége a magasság függvényében).

Ez az egyik ok arra, hogy minél nagyobb szélerőműveket építsünk, minél nagyobb tengelymagassággal. A másik ok pedig az, hogy nagyobb szélerőművek építésénél csök-

Szélteljesítmény, kWh/m ² , év	λ	$z = 1$				
		Szélkerék- átmérő, m	Szélkerék- terület, m ²	Szélkerék fordulat- szám ford./min	Generátor teljesítmény, kW	Szélérőmű évi átlagos teljesítménye, kWh/év
Q		D	F	n	E	
1 000	5	39,0	1195	17,7	204	306 000
	6	42,8	1439	19,3	222	333 000
	7	47,2	1750	20,5	236	354 000
	8	52,0	2124	21,2	244	366 000
1 500	5	35,6	995	22,2	256	384 000
	6	39,2	1207	24,2	278	417 000
	7	43,3	1473	25,6	294	442 000
	8	47,6	1780	26,6	306	458 000
2 000	5	33,4	876	26,0	300	450 000
	6	35,2	973	29,6	341	512 000
	7	40,2	1269	30,2	348	522 000
	8	44,6	1562	31,2	359	538 000
3 000	5	30,4	726	32,7	376	563 000
	6	33,4	876	35,8	412	618 000
	7	36,8	1064	37,9	436	653 000
	8	40,8	1307	39,0	448	672 000
4 000	5	28,6	642	38,4	442	662 000
	6	31,5	779	41,8	482	725 000
	7	34,5	935	44,5	512	767 000
	8	38,2	1148	45,9	528	792 000
6 000	5	26,2	539	47,8	550	825 000
	6	28,7	647	52,4	603	906 000
	7	31,5	779	55,7	640	960 000
	8	35,0	962	57,2	658	988 000
8 000	5	24,5	471	56,3	648	972 000
	6	26,8	564	61,8	712	1 070 000
	7	29,6	688	65,2	750	1 130 000
	8	32,7	840	67,4	773	1 160 000
10 000	5	23,3	426	63,7	733	1 100 000
	6	25,7	519	69,3	797	1 200 000
	7	28,1	620	73,8	850	1 275 000
	8	31,2	765	76,2	876	1 310 000

I. táblázat

$z = 6$				
Szélkerék- átmérő, m	Szélkerék- terület, m	Szélkerék fordulat- szám, ford./min	Generátor teljesít- mény, kW	Szélerőmű évi átlagos teljesítménye, kWh/év
<i>D</i>	<i>F</i>	<i>n</i>	<i>E</i>	
70,8	3937	9,75	672	1 010 000
77,8	4754	10,6	732	1 100 000
85,7	5768	11,3	780	1 170 000
64,7	3288	12,2	842	1 262 000
71,2	3982	13,3	916	1 376 000
78,7	4865	14,2	980	1 470 000
60,7	2894	14,3	985	1 476 000
64,0	3217	16,3	1124	1 686 000
73,0	4185	16,6	1144	1 726 000
55,2	2393	18,0	1240	1 860 000
60,7	2894	19,7	1357	2 035 000
66,8	3505	20,9	1440	2 160 000
52,0	2124	21,2	1460	2 190 000
57,2	2570	23,0	1585	2 380 000
62,7	3088	24,5	1690	2 535 000
47,6	1780	26,3	1810	2 720 000
52,1	2132	28,8	1985	2 980 000
57,2	2570	30,6	2110	3 170 000
44,5	1556	31,0	2140	3 210 000
48,7	1863	34,0	2340	3 510 000
53,8	2274	35,8	2470	3 700 000
42,3	1405	35,1	2520	3 780 000
46,7	1713	38,2	2635	3 950 000
51,0	1971	40,7	2800	4 200 000



44. ábra. Felgorsító hajtóműves szélrómly vázlat

ken a fajlagos beruházás költsége, tehát olcsóbb lesz a termelés is.

A gyorsító hajtóművet, amely a nagyobb szélérőművek építésének a legfőbb akadálya, úgy lehet kiküszöbölni, hogy a szélkeréktengellyel közvetlenül kapcsolva egy sokpólusú generátort hajtunk (44. ábra 3; az ábrán láthatók még a szárnylapátok 1 és a gépház 2 is).

Ennél a berendezésnél nincsenek nyomatékátviteli problémák. Korlátok azonban itt is vannak, és pedig ott, hogy a generátor pólusainak száma, tehát fordulatszámja is határolt. A legnagyobb pólusszám, amelyet a technika jelenlegi állása szerint még elfogadható méretekkel alkalmazni lehet $= 300$, ami -50 Hz periódusú áram termelésénél $- n = 20$ ford./min-nak felel meg. Gohér Mihály a villamosgéptervezés ismert szakértője, megszerkesztett egy ilyen 300 pólusú szinkron generátort, amelynek a méretei megvalósíthatók. Ennek ellenére itt csak max 240 pólusú generátorokat veszünk figyelembe, mert ilyenekből vízerőművekhez már több épült. Az ilyen szélérőmű fordulatszámja tehát: $n = 25/\text{min}$ lesz. Egy ilyen szélérőmű számításának a menete a következő:

A hely szélteljesítményének, Q -nak ismeretében v_a is adva van. Ekkor megválasztjuk λ -át.

$q = 0,172$ most is megtartható, tehát $Qq = 1500$ h/év lesz most is.

Az (5) képlet alapján kiszámítjuk e -t; az ismert összefüggések szerint

$$u = \lambda v_a \text{ és}$$

$$D = \frac{60 u}{n \pi}, \quad (18)$$

amiből már F , a szélkeréktér nagysága is ismeretessé válik. A generátorteljesítmény

$$E = F \cdot s \text{ és az évi termelés } 1500 E \text{ kWh/év.}$$

Kiindulni tehát a lehetséges fordulatszámából n kell, minthogy ez a megvalósítható pólusszám függvénye. A (18) képletből láthatjuk, hogy a D szélkerékátmérő annál nagyobb, minél kisebb n és minél nagyobb u .

Szélteljesít- mény, kWh/m ² , év		Szélkerék- átmérő, m	Szélkerék- terület, m ²	Szélkerék kerületi sebesség, m/s	Szél erőmű évi átlagos energiatermelése, kWh/év
Q	λ	D	F	u	
1 000	5	27,7	603	36,15	155 000
	6	33,2	866	43,38	202 000
	7	38,6	1170	50,61	240 000
	8	44,2	1534	57,84	264 000
1 500	5	31,7	789	41,40	302 000
	6	38,0	1134	49,68	398 000
	7	44,3	1541	57,96	476 000
	8	50,7	2019	66,24	520 000
2 000	5	34,8	951	45,5	488 000
	6	41,7	1366	54,6	638 000
	7	48,7	1863	63,7	765 000
	8	55,7	2437	72,8	840 000
3 000	5	39,8	1244	52,15	962 000
	6	47,8	1795	62,58	1 260 000
	7	55,8	2446	73,01	1 500 000
	8	63,8	3197	83,44	1 650 000
4 000	5	43,8	1507	57,45	1 375 000
	6	52,7	2181	68,94	2 040 000
	7	61,5	2971	80,43	2 440 000
	8	70,3	3882	91,92	2 670 000
6 000	5	50,2	1979	65,65	3 025 000
	6	60,2	2846	78,78	4 000 000
	7	69,7	3816	91,91	4 720 000
	8	80,3	5064	105,04	5 250 000
8 000	5	55,2	2393	72,25	4 920 000
	6	66,3	3452	86,70	6 450 000
	7	77,3	4693	101,15	7 730 000
	8	88,4	5138	115,60	8 500 000
10 000	5	59,5	2771	77,80	7 100 000
	6	71,4	4004	93,36	9 380 000
	7	83,2	5437	108,92	11 400 000
	8	95,3	7133	124,48	12 300 000

II. táblázat

Generátor							
teljesítménye, kW	ford./min	pólusok száma	legkülső szerkezeti átmérője, mm	állórész furat, mm	aktív vastest axiális hossza, mm	pólus osztás, mm	súly, t
<i>E</i>	<i>n</i>		<i>D_k</i>	<i>D_b</i>	<i>L</i>		<i>G</i>
103	25	240					
135	25	240					
160	25	240					
176	25	240					
201	25	240			—		—
265	25	240			—		—
317	25	240	6600	5700	158	74,5	26,0
347	25	240			—		—
325	25	240			—		—
426	25	240			—		—
510	25	240	6600	5700	250	74,5	33,0
560	25	240			—		—
640	25	240			—		—
840	25	240			—		—
1000	25	240	6600	5700	500	74,5	47,0
1100	25	240			—		—
915	25	240			—		—
1360	25	240			—		—
1630	25	240	6600	5700	815	74,5	71,0
1780	25	240			—		—
2016	25	240			—		—
2660	25	240			—		—
3140	25	240	6600	5700	1570	74,5	114,0
3500	25	240			—		—
3280	25	240			—		—
4300	25	240			—		—
5150	25	240	6600	5700	2575	74,5	156,0
5650	25	240			—		—
4730	25	240			—		—
6250	25	240			—		—
7450	25	240	6600	5700	3725	74,5	192,0
8200	25	240			—		—

Mivel pedig u -ra λ van a legnagyobb befolyással, ezt kell minél nagyobbra választani. Azonban ennek korlátokat szab a meglehetősen meredeken rosszabbodó hatásfok. Ennek szemléltetésére kiszámítottam a 240 pólusú generátorral dolgozó lehetséges szélerőműveket $Q = 1000$ — $10\,000$ kWh/év m^2 szélteljesítményre, $\lambda = 5, 6, 7$ és 8 gyorsjárási tényezők esetén (II. táblázat). Ebből a táblázatból jól látható, hogy $\lambda = 6$, sőt még $\lambda = 7$ is előnyös, de $\lambda = 8$ már nem nyújt megfelelő előnyöket, mert a $\lambda = 5$ -höz képest kb. 2,5-szörös szélkerékterület csak 1,7-szer ennyi áramot termel. A λ növelésével tehát erősen nő a fajlagos beruházás költsége is, ami a termelést is megdrágítja. Ha tehát még nagyobb generátorokat akarunk építeni ebben a rendszerben, úgy inkább a generátor pólusainak számát kellene növelni, nem pedig λ értékét. Úgy látszik $\lambda = 7$ értéket túllépni nem előnyös.

A generátor pólusszámának növelése sokkal hathatósabb eszköz λ növelésénél, amint azt a III. táblázatból is láthatjuk. $Q = 2000$ és $\lambda = 7$ esetén a 240 pólusú generátor csak 510 kW-os és évi 765 000 kWh-t termel, míg a 300 pólusú generátor már 800 kW-os volna és kerekén 1 200 000 kWh-t termelne évente. A gyengébb széljárású helyek széleenergiájának hasznosítására tehát minél nagyobb pólusszámú szinkron generátorokat kell szerkeszteni. Erre nézve úgy látszik egyelőre a 300 pólus a felső határ, de ez még nem tekinthető véglegesnek. Viszont erősen széljárt vidékeken meg lehet kísérni az olcsóbb és kisebb méretű és súlyú 200 pólusú generátorok alkalmazását, mert a 240 pólusúak ilyen helyekre túl nagyméretűek és súlyosak lenének. $Q = 6000$ — $10\,000$ kWh/év m^2 és ennél nagyobb szélteljesítményű helyeken tehát 200 pólusú, $n = 30$ ford./min generátorok használata ajánlatos. Ezek nagyságát és főbb adatait $\lambda = 5$ — 8 esetére szintén a III. táblázat tartalmazza. Az 1961. augusztusban tartott római energiakonferencián hangzott el először javaslat sokpólusú generátorral dolgozó szélerőműre, amelyet a magyar javaslattevőre tekintettel *magyar szélerőműnek* neveztek el.

A sokpólusú generátornak azonban olyan hátrányai is vannak, amelyek miatt beépítése csak ott jöhet szóba, ahol a felgyorsító hajtóműves berendezés már csak nehezen valósítható meg.

Első hátránya, hogy itt csak a szinkron generátor gazdaságos, ami viszont megdrágítja a hozzátartozó elektromos berendezést. Második hátránya: nagy méretei (amint az a táblázatból is látható, ahol még a legkisebb egységnek is 6 m a külső átmérője). Harmadik hátránya nagy súlya, ami miatt drágább is. Emiatt 500 kW-on alul nem előnyös a használata, mert nagyon megnöveli a kisebb szélerőművek fajlagos beruházási költségét. 500 kW-on felül azonban a sokpólusú generátoroké a jövő. (A táblázatban szereplő generátorok adatait Gohér Mihály szolgáltatta.)

A szélerőművek tervezésénél és építésénél is érvényesül az a tapasztalati szabály, hogy minél nagyobb az egység, annál kisebbek a fajlagos beruházási költségek, tehát itt is az illető szélteljesítményű helyre megtervezhető legnagyobbat a legelőnyösebb megépíteni.

A részletesen megvizsgált kétféle rendszer között pedig főleg az utóbbi, a sokpólusú generátoros „magyar” szélerőmű az, amelyet a jövő fejlődés korszerű szélerőművének lehet tekinteni.

Az előadott számítások alapján az is világos, hogy szélerőművek tervezésénél nem lehet meggondolatlanul többszáz méteres tornyokat száz méteren felüli szélkerékátmérekkel javaslatba hozni, mert a részletek kidolgozásánál lehetetlen forgatónyomatékok vagy pólusszámok adódnak, vagy oly óriási beruházási költségek, amelyek nem fizetődnek ki. Toronymagasság, szélkerékátmérő és fordulatszám harmonikusan összetartozó értékek, amelyektől lényegesen eltérni a kitermelt energia költségeinek a növelése nélkül nem lehet.

Az olcsó energiatermelést szolgálja az is, ha a szélerőmű teljesen önműködően dolgozik, és így nincs szükség állandó gépezelő személyzetre, csupán időnkénti ellenőrzésre. Az előző fejezetben már leírtunk egy ilyen önműködő

Szélteljesítmény, kWh/m ² , év		Szélkerék- átmérő, m	Szélkerék- terület, m ²	Szélkerék kerületi sebessége, m/s	Szélerőmű évi átlagos energiatermelése, kWh/év
Q	λ	D	F	u	
1 000	5	34,5	935	36,1	240 000
	6	41,4	1346	43,3	315 000
	7	48,3	1832	50,6	376 000
	8	55,2	2393	57,7	413 000
1 500	5	39,6	1232	41,4	474 000
	6	47,5	1772	49,7	623 000
	7	55,3	2402	57,8	750 000
	8	63,3	3147	66,2	812 000
2 000	5	43,3	1473	45,3	755 000
	6	52,2	2140	54,6	1 000 000
	7	60,8	2903	63,6	1 200 000
	8	69,6	3805	72,8	1 310 000
3 000	5	49,7	1940	52,0	1 500 000
	6	59,8	2809	62,6	1 970 000
	7	69,8	3826	73,0	2 350 000
	8	79,7	4989	83,3	2 580 000
4 000	5	54,8	2359	57,3	2 420 000
	6	65,8	3401	68,8	3 280 000
	7	76,8	4633	80,4	3 820 000
	8	87,8	6055	91,7	4 170 000
6 000	5	41,3	1340	65,0	2 060 000
	6	50,2	1979	78,8	2 780 000
	7	58,6	2697	92,0	3 310 000
	8	66,8	3505	105,0	3 620 000
8 000	5	46,1	1669	72,3	3 420 000
	6	55,2	2393	86,7	4 500 000
	7	64,5	3268	102,0	5 360 000
	8	73,6	4255	115,5	5 870 000
10 000	5	49,7	1940	78,0	5 000 000
	6	59,4	2771	93,3	6 480 000
	7	69,4	3783	109,0	7 800 000
	8	79,2	4927	124,3	8 470 000

III. táblázat

Generátor							
teljesítménye, kW	ford./min	pólusok száma	legkülső szerkezeti átmérője, mm	állórész furat max	aktív vastest axiális hossza, mm	pólusosztás, mm	súly, t
<i>E</i>	<i>n</i>		<i>D_k</i>	<i>D_b</i>	<i>L</i>		<i>G</i>
160	20	300			—		—
210	20	300			—		—
251	20	300	8200	7000	126	73,3	26,0
276	20	300			—		—
316	20	300			—		—
415	20	300			—		—
500	20	300	8200	7000	250	73,3	42,0
542	20	300			—		—
503	20	300			—		—
668	20	300			—		—
800	20	300	8200	7000	400	73,3	52,0
876	20	300			—		—
1000	20	300			—		—
1314	20	300			—		—
1570	20	300	8200	7000	790	73,3	82,0
1720	20	300			—		—
1615	20	300			—		—
2120	20	300			—		—
2540	20	300	8200	700	1270	73,3	125,0
2780	20	300			—		—
1370	30	200			—		—
1850	30	200			—		—
2210	30	200	8000	6960	425	109,0	72,0
2420	30	200			—		—
2280	30	200			—		—
3000	30	200			—		—
3580	30	200	8000	6960	685	109,0	99,0
3920	30	200			—		—
3320	30	200			—		—
4320	30	200			—		—
5200	30	200	8000	6960	1000	109,0	127,0
5660	30	200			—		—

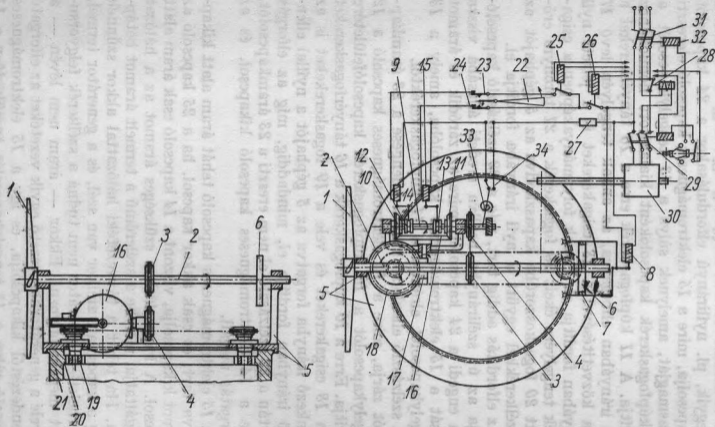
szabályozó berendezést, amelyet *J. Juul* szerkesztett 200 kW-os szélerőműhöz.

Ez a szabályozó berendezés már 1957 óta dolgozik a szóbanlevő dán szélerőművön, Gedserben és jól megállta a helyét, tehát számolhatunk a megbízhatóságával. Ennek ellenére mégsem lehet végleges megoldásnak tekinteni, mivel kívánatos volna egyszerűbbé és olcsóbbá tenni.

Ilyen elgondolás alapján hozom javaslatba a következő önműködő szabályozószerkezetet, amelynél nincs szükség sem hidraulikára, sem elforgató motorra, sem pedig fékező szárnylapátrészekre. Ennek ellenére a szabályozó áram kimaradása esetén is működik és a túlterheléstől is teljes biztonsággal megvédi a generátort. A szerkezet találmányt képez, de arra való tekintettel, hogy a széleenergia minél szélesebb körű, mielőbbi kihasználása igen nagy mértékben járulna hozzá az emberiség jólétének emeléséhez és a népek békés együttélésének biztosításához, mivel minden országnak van elegendő, kihasználható széleenergiája, amit nem kell mástól elvennie, ezt a találmányomat nem jelentettem be szabadalomra, hanem megengedem bárki által való felhasználását az emberiség javára.

A találmány szerinti berendezés vázlata a 45. ábrán látható. Ez a vezérléshez részben villamos áramot használ, amelyet a hálózat két vezetékéből a 27 egyenirányítón keresztül kap, míg a harmadik vezeték árama egy relén áthaladva, a másik két vezeték egyikét kapcsolja ki a generátorból, ha nincsen termelés és viszónt.

Az 1 szélkeréknek az 5 géphajóban csapágyazott 2 tengelyén a 3 lánckerék ül, amelyet ipari lánc köt össze a 9 tengelyen levő 4 lánckerékkel. Az irányváltó 9 tengelyen a 10 és 11 szabadonfutó kúpfogaskerek forognak, melyeket a 12, ill. 13 (elektromágnesek vezérelte) csúszó tengely-kapcsolók rögzítenek a 9 tengelyhez. Mindkét kúpfogaskerék a 16 tányérkúpkerékkel van állandó kapcsolatban. Ezt az a kúpkerék hajtja, amelyet esetlegesen a hozzátartozó elektromágneses kapcsoló a 9 tengelyhez rögzít. Az elektromágneses tengelykapcsolókat



45. ábra. Ledács Kiss Aladár-féle önműködő szabályozó berendezés

a 22 szélzászló vezérli, mégpedig úgy, hogy a szélzászló az egyik, pl. nyílrányú elfordulásakor a 24 kapcsolót kikapcsolja, mire a 15 elektromágneses kapcsoló elereszti a vasmagját, amelynek súlya a 13 tengelykapcsolót a 11 kúpfogaskerék kapcsolóként kialakított homlokához szorítja. A 11 kúpfogaskerék erre a 16 tányérkereket a nyíl irányában elforgatva, az annak tengelyén levő 17 csiga közvetítésével a 18 csigakereket is a jelzett nyíl irányában fordítja el. Ennek folyamányaképpen a csigakerék tengelyére ékelt 19 fogaskerék a 21 toronyra erősített 20 fogaskoszorúba kapaszkodva az 5 géphajót az 1 szélkerékkel együtt a nyíl irányába fordítja el.

Az elfordítás addig tart, míg a 22 szélzászló kapcsolókarja az új szélirányba beállva eredeti állásába vissza nem engedi a 24 kapcsolót, mire az záródik és áramot bocsát a 15 elektromágneses kapcsolóba, amely a 13 tengelykapcsolót elrántja a 11 kúpfogaskeréktől.

A szélzászló ellenkező irányú kilengése a 23 áramkapcsolót zárja, mire a 14 elektromágneses kapcsoló a 12 tengelykapcsolót a 10 kúpfogaskerék kapcsolófelületére szorítja. Erre a 10 kúpfogaskerék a 16 tányérfogaskereket és a 18 csigakereket és vele a 19 fogaskerekeket is az ellenkező irányba forgatva az 5 géphajót a nyíllal ellenkező irányban fordítja el, mindaddig, míg az elforgás folytán a 22 szélzászló el nem ereszti a 23 áramkapcsolót, mire a 14 elektromágneses kapcsoló kikapcsol, és az elforgatás megáll.

A 15 elektromágneses kapcsoló tehát áram alatt kikapcsolva tart, és csak akkor kapcsol, ha a 25 kapcsoló az áramot kikapcsolja, viszont a 14 kapcsoló csak áram alatt kapcsol. A kapcsoláshoz szükséges áramot az a hálózat szolgáltatja, melybe a szélerőmű a termelt áramot betáplálja. Ha tehát a távvezetéki hálózattal akkor szünnék meg a kapcsolat, amikor van szél, és a generátor termel, a terheletlen generátor nem tudná a szélkerék felgyorsulását megakadályozni. Ekkor — áram nem lévén — a 28 relé a generátorhoz vezető egyik vezetékét az elforgató berendezéstől kikapcsolja, és így a 15 elektromágneses kapcsoló súlya a 13 tengelykapcsolót önműködően a 11

kúpfogaskerék kapcsoló felületéhez szorítja, mire az egész elfordító gépezet működésbe jön, és az 5 géphajtót elfordítva, az 1 szélkerék a szél irányával párhuzamos helyzetbe kerül, amelyben már csak csekély erőkifejtésre képes. Hogy ebben a helyzetben a szélkerék meg is maradjon, az áramszolgáltatási zavar megszűnéséig, a 6 fék is működésbe jön, amelyet a 8 elektromágnes tartott működésen kívül. Az áram megszűnván, a 8 elektromágnes súlya a 7 fékpórákat a 6 féktárcsához szorítja, ami elégséges ahhoz, hogy a széllal párhuzamos állásba került szélkerék csekély erőkifejtését lefekezze. Ez a berendezés tehát azt is lehetővé teszi, hogy a 31 kézi főkapcsoló megszakításával a géphajtót a szélkerékkel együtt bármily szélben is kifordítsuk a szélből és megállítsuk.

A 29 kapcsolót a generátornak termelésbe való automatikus be- és kikapcsolására szolgáló berendezés vezérli.

Ha már most az üzemzavar elmúltával újra létrejön a hálózattal az összeköttetés, a hálózat árama az elforgató berendezésbe jutva megoldja a 7 féket, visszahúzza a 11 tengelykapcsolót, és mivel a szélzászló ebben a helyzetben a 23 kapcsolót zárja, a 12 tengelykapcsoló a 10 kúpfogaskerékhez zár. A szélkerék így könnyen mozogván, a szél még akkor is forogni kezd, ha párhuzamosan fúj vele, mivel a felfelé nyúló szárnylapát nagyobb sebességű légrétegekben van, és profilja is élével fordul a szél felé, ami nagyobb légellenállást jelent, mint a lefelé nyúló szemközti szárnylapát, amely cseppalakjának domborúbb, kisebb ellenállású élet mutatja a szélnek. A szélkerék ezzel elkezdi szélirányba vinni önmagát, mindjobban a szél felé fordulva, s így mind nagyobb erőt fejtve ki a beforduláshoz. Mikor azután szembefordult már a széllal és a szélzászló is középre állt, készen áll a szélgép a termelésre. Ez a berendezés tehát teljesen önműködően állítja a szélkereket termelő állásba és fordítja el, ha a kapcsolat a hálózattal megszakad, vagy ha zavar áll elő a termelésben, pl. ha a generátor meghibásodik és nem termel.

Ugyanez a berendezés a teljesítményt is határolni tudja. Ha a szélkerék erős szélben a 30 generátort túlterhelné,

egy bizonyos a túlterhelésnél a 25 maximálrelé segítségével kikapcsolja a 14 elektromágneses tengelykapcsoló áramát, hogy a szélzászló ebben az irányban elfordítást ne vezérelhessen. Ha a generátor túlterhelése még egy további b értékkel nő, a 26 maximál-relé, amely erre a terhelésre reagál, kikapcsolja a 15 elektromágneses tengelykapcsoló áramát, mire az 5 géphajó elkezd a szélből a rajzon jelzett nyíl irányában kifordulni mindaddig, amíg ezáltal a generátor terhelése az $a + b$ túlterhelés alá nem csökken. Ekkor a 26 maximál-relé újra bekapcsol és áramot ad a 15 kapcsolónak, mire a géphajó elfordulása megáll. Újabb terhelésemelkedés esetén ez megismétlődik. Ha már most csökken a szél ereje, és a generátor terhelése az a túlterhelés alá száll, a 25 relé újra bekapcsol, és a 14 kapcsoló a szélkeréknek a szélirányba való visszafordítását vezérli. A berendezés tehát a generátor teljesítményét is önműködően határolja.

A berendezés egyes szerkezeti megoldásai csak példakul szolgálnak, és más módon is kivitelezhetők. Így pl. a kúp-fogaskerekes irányváltó homlokfogaskerekes kivitelben is készíthető. A szélkeréktengely kapcsolata az elfordító berendezéssel nemcsak lánchajtású, hanem fogaskerekes is lehet stb. Az ilyen változtatások a berendezés lényegét nem módosítják.

Figyelembe kell még venni azt az eshetőséget is, ha a szélerőgép bármilyen okból oly mértékben szaladna meg, hogy a fellépő centrifugális erő a berendezés épségét veszélyeztetné. Említettük már, hogy amikor a szél annyira erősödik, hogy az 1 szélkerék fordulatszáma folyton növekedvén, eléri üzemi fordulatszámát, a 30 generátort egy automatikus szerkezet a 29 kapcsoló bekapcsolásával az erőhálózatra kapcsolja. Ez az automatikus szerkezet egyik kiviteli alakjában egy centrifugális kapcsolóból áll. Ugyanez a centrifugális kapcsoló a fordulatszám bizonyos mértékű túllépése esetén a 32 relét működteti, amely a 31 főkapcsolót bontja, még mielőtt a szélerőgép veszélyes fordulatszámot érne el. Ekkor a kifordító és fékező berendezés azonnal működésbe jön és a szélerőgépet megállítja. Ez a kapcsoló már nem kap-

esol vissza önműködően, hanem csak kézzel, ha már a megszaladás okát kiküszöbölték. A szélerőmű ezzel megszaladás esetére is biztosítva van.

Szélesend után megeshet, hogy az újból felébredt szél nem szemben, hanem hátulról fújja a szélkereket. A szélkerék ekkor is megindul, de kisebb erővel és ellenkező fordulatiránnyal. Ebből a helyzetből a 22 szélzászló nem képes a szélkereket szembenállásra kormányozni, hanem ingaszerűen ide-oda járatná. Ennek a megakadályozására szolgál a 33 szerkezet, amely a 2 szélkerék-tengely ellenkező irányú forgása esetén a vezérlő áramkörbe iktatott 34 kapcsolót bontja. Ekkor csak a 11 tengelykapcsoló tud kapcsolni és addig forgatja el az 5 géphajót, míg az 1 szélkerék szembe nem fordul a széllal, miáltal a helyes forgásirányba lendül a szélkerék és a 33 szerkezet a 34 kapcsolót újra bekapcsolja, helyreállítván ezzel a normális üzemi állapotot.

Ez az önműködő szabályozóberendezés a következő szabályozási alapelveket tartalmazza igen kedvező formában megvalósítva:

a) A géphajó elfordítását nem külön motor végzi, ami esetleg felmondhatná a szolgálatot, hanem maga a szélkerék, amelynek forgatónyomatéka szél esetén mindig megbízhatóan rendelkezésre áll.

b) A generátor túlterhelését erős szélben úgy akadályozza meg, hogy a szélkerék félrefordításával csökkenti a szélnek a szélkerekekre való hatását, és így magának a szélkeréknek is csökkenti az erő kifejtését. Az ilyen helyzetben forgó szélkeréknek ugyan egyenlőtlenebb a nyomatéka, mint a széllal teljesen szemben állónak, de ezt az egyenlőtlenséget a szélkerék lendítőtömegével és a lapátok számának némi növekedésével elfogadható határok közé lehet szorítani. Így pl. a gyorsjárású szélerőműveknél eddig szokásos három szárnylapát helyett négy szárnylapát már eléggé egyenletes energiakifejtést fog szolgáltatni.

c) Abban az esetben, ha az elektromos szabályozás felmondaná a szolgálatot, a mechanikus szabályozás

önműködően hatályba lép és a szélkereket kifordítja a szél irányából és lefékezve megállítja, tehát bármilyen viharos szélben is veszélyen kívül helyezi.

Ennek a három szabályozási alapelvnek az érvényesítése elengedhetetlen kelleke a nagy szélerőművek üzembiztonságának.

A tervezett 200 kW-os magyar szélerőmű szabályozását már ezzel a berendezéssel oldjuk meg, és így belátható időn belül gyakorlatilag is ki lehet majd próbálni a működését.

Ez a szabályozó berendezés minden olyan szélerőműnél használható, amelynél a szélkerék elektromos áramfejlesztő gépet hajt. Mivel pedig 50 kW-nál nagyobb szélerőművek általában csak áramfejlesztők lehetnek, így valamennyi nagyobb szélerőmű gyakorlatilag ehhez hasonló alapelvű szabályozóművet fog használni.

A beruházási költségek csökkentését szolgálja az az elrendezés is, hogy az áramfejlesztő generátor és forgatógépezete a géphajóban foglalnak helyet (23. és 24. ábra), mégpedig a szélkerékkel ellenkező oldalon, mert így azok jó ellensúlyt képezhetnek a szélkerékkel szemben. Egyes szerkesztők a szélkerékről a torony aljába viszik át az energiát, és ott forgatják vele a generátort. De az a gépezet, amely a szélkerékről az energiát a földszintre viszi át, igen súlyos és költséges, és így nagyon megnöveli a beruházás volumenét. Így mégis csak az a legelőnyösebb és legolcsóbb megoldás, ha az egész gépi berendezést a torony tetején az elforgatható géphajóban helyezük el.

A torony alakja és kivitele tekintetében a rácsos vasszerkezet és a vasbeton egy ideig versenyeztek egymással. A vasbeton alakra is és karbantartás tekintetében is előnyösebb lenne, de zsaluzással készítve lényegesen drágább, mint a rácsos vasszerkezet. Újabban azonban az Erőterv kidolgozott egy oly vasbeton toronyépítő eljárást, amelyhez nem kell zsaluzás, hanem előregyártott elemekből kéményszerűen készülhet, akármilyen magassági méretekben. A számítások azt mutatják,

hogy az ilyen vasbeton torony még a rácsos vasszerkezetnél is olcsóbb.

Az esetben, ha a szélkerék gyorsító hajtómű közvetítésével hajtja a nagy fordulatszámú generátort, a gyorsító hajtómű szerkezeti megoldása igen fontos szerepet játszik. Kétféle hajtóműrendszer jöhet szóba: lánchajtás és homlokfogaskerék-hajtómű. Lassú forgás és kis kerületi sebesség esetén kétségtelenül a lánchajtás az olcsóbb és üzembiztonságosabb, sőt a súlya is lényegesen kisebb. Ezért primer hajtómű céljára elsősorban ez jöhet számításba. Szekunder hajtóműnek viszont, ahol lánchajtás esetén már nagy láncsebességek adódnának, előnyösebbek a fogaskerekes hajtóművek.

A különböző hajtóműszerkezeteket ma már oly sokféle gépi berendezésben alkalmazzák, hogy elég gyors iramban tökéletesednek. A hajtóművek kifejlesztése bizonyára párhuzamosan halad majd a szélerőművek fejlődésével, amennyiben a sokpólusú generátoros megoldás fejlesztése nehézségekbe ütközne.

Az időjárás mostohaságának kitett szélerőművet úgy kell megszerkeszteni és olyan anyagokból megépíteni, hogy hideg, meleg, nedvesség, por és légköri elektromosság ne árthassanak neki. A gépi berendezés a géphajóban (gondola) elégségesen védve van, de már a géphajó külső felülete korrózióvédelemre szorul. A dánok ezt galvanozással oldották meg. A védőbevonás fémszórással ma már annyira fejlett eljárás, hogy az előbbinél biztosabbnak és olcsóbbnak is mondható. A szélkerék szárnylapátjai ugyanígy védhetők meg, és ekkor acélból is készíthetők; ez elég olcsó és kellő szilárdságú is.

A szélerőmű szerkezetének általában jóval üzembiztosabbnak kell lennie, mint más erőgépeknek, mivel itt nem építhetők be tartalékok. (Így — többek között — tengelyeit gördülő csapágyakba kell ágyazni, met azok biztonságos kenése jól megoldható és így üzembiztosabb.) Ha valami a szélerőmű szerkezetében meghibásodik, az egész szélerőműnek állnia kell addig, míg a hibát rendbe nem hozták. Az önműködő szabályozású szélerőmű azon-

ban az esetleges meghibásodást azonnal jelzi azzal, hogy — erős szélben is — megáll.

Ha jól telepített a szélérőmű, úgy környezetéből megszűre kimagasodik, és így a légköri elektromosságnak is kedvelt célpontja lehet. Ennek ellenére nem említ a műszaki irodalom egy esetet sem, hogy szélgépet villám sújtott volna. Mindazáltal megvan ennek a lehetősége, és így a szélérőműveket is ugyanolyan villámvédelemben kell részesíteni, akárcsak a gyári kéményeket vagy magas épületeket és tornyokat; erre a célra teljesen megfelelnek az ismert villámhárító berendezések.

5. OLCÓ SZÉLENERGIA MEZŐGAZDASÁGI CÉLOKRA

A fejlődő kultúra követelményeit csak a gépesített mezőgazdaság tudja kielégíteni. A gépesítéshez energia kell, és pedig olcsó energia, hogy olcsóbb legyen a mezőgazdasági termelvények ára, amely a többi szükségleti cikkek árát is alapvetően befolyásolja.

A gépesítés elsősorban azt a célt szolgálja, hogy a terméseredményt függetleníteni lehessen az időjárás szélségeitől, tehát szárazságban öntözést és tartós esős időben a fölös vízmennyiség eltávolítását kell biztosítani. Ez egyúttal egy másik főcél eléréséhez: a többlettermeléshez is közelebb visz. Többtermelésre törekedni azonban csak akkor ésszerű, ha a termékek ezzel nem drágulnak, hanem inkább olcsóbbá lesznek; ez viszont csak úgy lehetséges, ha a gépesítéshez olcsó energia áll rendelkezésre. Ezért tehát gazdaságosság szempontjából nem racionális a mezőgazdasági üzemeket az országos erőhálózatról gépesíteni, mert annak villamos árama drága a mezőgazdasági termékek árához képest.

A mezőgazdaság legolcsóbb és leghozzáférhetőbb energiaforrása a szél, de csak akkor, ha hasznosítása olcsó és jó hatásfokú gépekkel történik. Az is fontos, hogy az ilyen szélgépek a kis sebességű szelet használja ki elsősorban, mert mint azt a 21. ábra szélgyakorisági diagramjából is láthatjuk, hazánkban a 2—5 m/s sebességű szelekből van a legtöbb. A már említett Martonvásár-Erdőhát-i kísérletek alkalmával oly egyenletes időbeli elosztásúnak találták az ottani széljárást, hogy a 2,5—9,5 m/s sebességű szél, amely mezőgazdasági szélgépek üzemére igen alkalmas, az év 5027 óráján keresztül fúj, ami az évi órák 57,4 %-át teszi ki. Ez napi 13,6 órának

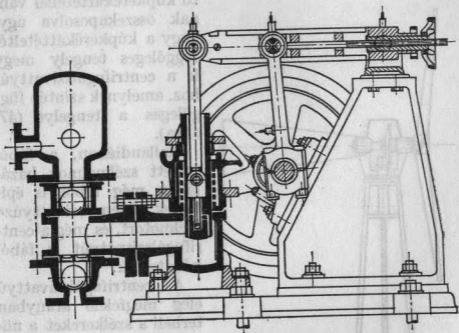
felel meg. A szélcsendes időszakok oly egyenletesen osztottak meg, hogy az egész év folyamán mindössze 57 olyan nap volt, amelyen — naponta — 6 órán át sem lehetett volna szélenergiát vízszivattyúzásra felhasználni. A 12,5 m/s-nél sebesebb szél pedig csak mindössze 5 órán át fújt. Ez az év pedig nem volt a szelesebb évek közé számítható. Ilyen széljárásra Magyarországnak jóformán minden részén lehet számítani, sőt a Sopron—Bakony háromszögben még ennél sokkal jobbra is.

Nézzük tehát, milyenek azok a szélgépek, amelyekkel olcsó energiát tudunk juttatni a mezőgazdaságnak. Mivel pedig a mezőgazdaság az energiát elsősorban vízgazdálkodásának, a mesterséges öntözésnek szolgálatában használja fel, a kérdést először is ebből a szempontból vizsgáljuk meg.

Vízszivattyúzó szélmotorok százezerszámra dolgoznak a világ monszun- és passzátszéljárta vidékein. Ezek soklapátos, lassújárású szélmotorok (7. ábra), melyek már kis szélben is könnyen megindulnak, de, mint láttuk, dugattyús vízszivattyúval igen rosszul használják ki a szél energiáját. Ha tehát meg lehetne valósítani azt, hogy ugyanily könnyű indulás mellett a fokozódó sebességű szél energiájával arányosan lehessen a szélgépet terhelni, akkor egy olyan szélgépet nyernénk, amely a mindenütt leggyakoribb 2,5—10 m/s közti sebességű szeleket a legelőnyösebben használná ki, tehát igen alkalmas volna a mezőgazdaság vízgazdálkodásának gépesítésére.

Ezt úgy lehet megoldani, hogy a vízszivattyúzásra nem közönséges dugattyús szivattyút használunk, hanem változtatható löketűt. Ilyen az ismert Mackensen-szivattyú, amelyet a 46. ábrán mutatunk be. A forgattyú csak egy egykarú emelőt mozgat, amelyet kulissza-szerűen képeztek ki. A forgattyúrúd a kulisszakóhoz csatlakozik, amely egyenes vezetékében elcsúsztatható. A kulissza külső végpontjához csatlakozik a vízszivattyú dugattyúrúdja. A kulisszakónek a kulisszában elfoglalt helyzetétől függően a szivattyú lökete nagyobb vagy kisebb lehet. Kis szélesebségeknél a legkisebb lökethez van szükség, és ugyanekkor a fordulatszám is kicsi.

Nagy szélesebségeknél a dugattyú lökete is és a fordulatszám is megnő. Ily módon biztosítható, hogy a szélkerék terhelése mindig közel arányos legyen a szélesebség harmadik hatványával. A túlterhelés ellen itt is ugyanúgy lehet védekezni, mint a többi vízszivattyúzó szélmotornál, tehát úgy, hogy egy bizonyos szélesebségnél

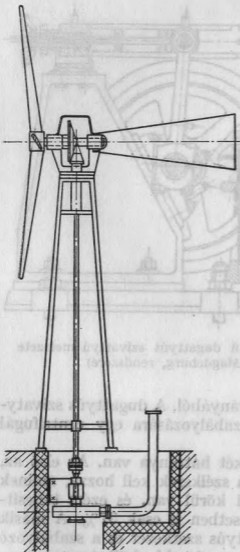


46. ábra. Változtatható löketű dugattyús szivattyú metszete
(A. W. Mackensen, Magdeburg, rendszere)

a szélkerék kifordul a szél irányából. A dugattyús szivattyú löketének önműködő szabályozására egy centrifugál regulátort használhatunk.

Ennek a berendezésnek két hátránya van. Az első az, hogy soklapátos lassújárású szélkerék kell hozzá, aminek gyorsjárású tényezője $\lambda = 1$ körül van, és ezért teljesítménytényezője a legjobb esetben is csak 37%. A másik hátránya az, hogy a dugattyús szerkezet és a szabályozó gépezet drága, és üzeme is gondosabb, költségesebb karbantartást igényel. Viszont évente sok üzemórát teljesít, mert már 2,5 m/s szélesebségnél megindul és szivattyúz.

Ha lemondunk erről az előnyről és megelégszünk azzal, hogy a szélgép 3,5 m/s szélsébségnél kezdjen csak szivattyúzni, akkor egészen korszerű szivattyúzó szélmotort állíthatunk össze, egy négylapátos gyorsjárású szélkerékből, amelynek gyorsjárási tényezője $\lambda = 5 \sim 6$, és egy centrifugál szivattyúból, amelyek gyorsító kúpkerékáttétellel van-



47. ábra. Centrifugál szivattyúval közvetlenül kapcsolt vízszivattyúzó szélmotor

nak összekapcsolva úgy, hogy a kúpkerékáttételtől függőleges tengely megy le a centrifugálszivattyúhoz, amelynek szintén függőleges a tengelye (47. ábra).

Hollandiában, a fából épített szélmalomok hazájában még fából is építettek ilyen szivattyúzó szélmotort, és még a centrifugálszivattyút is fából készítették.

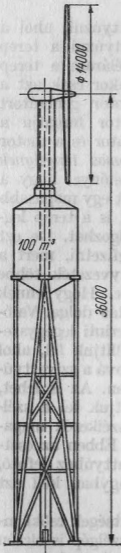
A centrifugálszivattyú elég megfelelő arányban terheli a szélkereket a növekedő szélsébségeknél. A különbség onnan ered, hogy itt a centrifugálszivattyú minden szélsébségnél állandó magasságra: a víztárolóba szállít, holott a szélkerék helyes terhelése érdekében nagyobb szélsébségnél nagyobb magasságra kellene szállítania. Mivel ez nem lehetséges, a szélkerék a növekvő szélsébségnél mindjobban megszalad, tehát itt is szükség

van erős szélben a túlterhelés elleni védelemre, a szélkerék kifordítására a szél irányából. Az ilyen rendszerű vízszivattyúzó szélkerék már 10—20 kW-os teljesítménymagyságban is olcsón termeli a szivattyúzás energiáját, mivel a szélkerék és a centrifugálszivattyú közt nincs energiafogyasztó közvetítés és a beruházás is a lehető legkisebb.

Nem lehet azonban mindig ott szivattyúzni, ahol a széláram is kedvező, mert hiszen szivattyúzni a terep valamilyen mélyedésében kell, míg a széláram a terep kimagasló pontjain a legkedvezőbb. Ilyenkor csak azt a megoldást választhatjuk, hogy a szélmotor generátort hajt, a vízszivattyút pedig villamosmotor forgatja a generátor fejlesztette energiával. A generátor és a motor ilyen együttműködő elrendezését *elektromos tengelynek* nevezik. Ennek az elrendezésnek az az előnye, hogy a szélmotor is a legkedvezőbb viszonyok közt egy magasabb ponton termel energiát, és a vízszivattyú is a terep legmélyebb pontján, víz alá süllyesztve dolgozhat. De ezt az előnyt meglehetősen drágán kell megfizetni, mert a két villamosgép és a közöttük levő távvezeték többet kerül, mint a szélgép többi berendezése. Hogy ennek ellenére is kifizetődik-e, az tisztán számítás dolga. Valószínűleg jobban járunk, ha a 47. ábra szerinti legegyszerűbb vízszivattyúzógépet olyan helyen állítjuk fel, ahol már a szélviszonyok is kedvezőbbek, és ahová a szivattyúzandó vizet is odavezethetjük csatornában. Az is lehet, hogy a kedvező szivattyúzás helyén állítjuk fel a szélgépet, de oly magas toronnyal, hogy a szélkerék magasabb, erősebb széláramban dolgozhasson. Ebben az esetben azonban nagyon hosszú lesz a szivattyúhoz lefutó, gyorsan forgó tengely, tehát több csapágyban kell azt vezetni.

Van még egy lehetőség a beruházási költségek csökkentésére, tehát arra, hogy már egy kisebb szélgép is olcsón termeljen energiát a mezőgazdaság számára. A mezőgazdasági üzem vízgazdálkodásához víztoronyra, ill. nagyobb víztárolóra is szükség van. Akár víztorony, akár hidroglobus ez, mindenképpen egy acélszerkezetű torony

tetején foglal helyet. Ha tehát az ilyen víztárolót egy mezőgazdasági szélgéppel kombináljuk össze oly módon, hogy a szélgépet a víztároló tetejére építjük, megtakarítjuk vele a szélgép toronyszerkezetének nagyobb részét, tehát kisebb összegből építhetjük meg a szélgépet és mégis kedvező, magas széláramban dolgozhat a szélkerék. Ekkor még az is kifizetődhet, hogy a szélgép egyenáramot termel, amit a mezőgazdasági üzem különböző célokra használhat fel, tehát vizet is szivattyúzhat vele (48. ábra).



48. ábra. Mezőgazdasági szélermű 100 m³-es víztoronyra építve

Egy villamos áramot termelő mezőgazdasági szélmotor is termelhet olcsón energiát, ha terhelés-szabályozása önműködő, ha tehát a bármikor jelentkező szél energiáját teljes mennyiségben hasznosítja. Ehhez olyan alapterhelésre van szükség, amely bármikor önműködően üzembe lép. Erre a célra mezőgazdasági üzemekben a vízszivattyúzás a legalkalmasabb, hiszen tavasztól őszig a mezőgazdaság minden vízmennyiséget el tud használni. Ősztől tavaszig már más alapterhelésre is szükség van; ilyen célra jól megfelel a villanyfűtés, amelynek a megoldása is egyszerű. Ha van szél, akkor a vízszivattyúzás mellett az igénybe nem vett villamosenergiát az önműködően bekapcsolódó fűtőtestek fogyaszthatják a mezőgazdasági épületekben és lakásokban. Csak az ezen felül szükséges fűtéshez kell fűtőanyagokat felhasználni. Villamosenergiát tárolni csak világítás számára érdemes, ami az egész energiaszükségletnek csak kis részét teszi. De olyan megoldást is választhatunk, hogy elégtelen szél esetén a közeli hálózat adja az energiát, viszont ha bőven

van szél, a termelt fölösleges energiát visszatápláljuk a hálózatra. Amikor pedig más célra is kellene a mezőgazdaságnak villamosenergia, úgy azt az alapterhelések rovására bármikor igénybe lehetne venni. Ekkor — önműködően — annyival kevesebbet venne fel az alapterhelés. Ilyen energiagazdálkodáshoz egyenáram a legalkalmasabb, amit Rosenberg- vagy Charlet-dinamóval helyes termelni, mert ezek a dinamók bizonyos fordulatszám-tól fölfelé, bármilyen terhelésnél és fordulatszám-nál állandó feszültséget adnak.

A mezőgazdasági üzem változó vízszükségletét és a vízszivattyúzó szélmotor változó termelését a víztároló egyenlíti ki. Ezt kell oly nagyra méretezni, hogy a mezőgazdaságnak minden időben elégséges víz álljon rendelkezésére és a szélmotornak is meglegyen a mindenkori terhelése.

A világítás változó szükségletét és a szélelektromos berendezés változó termelését az akkumulátor is kiegyenlítheti. Ez azonban lényegesen drágább és rosszabb hatásfokú megoldás, mint a víztárolás, és ezért, ha csak lehet, kerüljük el, és világítás céljaira inkább hálózati áramot használjunk. A szovjet *Vetcsinkin* és *Ufimcev* a szélenergia egyenetlenségét nehéz lendkerekekkel egyenlíti ki. Egy ilyen szélerőművet Kurszkban állítottak fel; ez rövidebb időszakok áthidalására és csak egyenáram termelésére be is vált.

A mezőgazdasági üzem más energiaszükségletét is fedezheti szélenergiából, ha jó munkabeosztással dolgozik. Darálni, szecskát vágni, fát vágni stb. ti. akkor is lehet, amikor van szél, és az így nyert termékek tárolhatók. Ilyen munkabeosztással és télen a villamos fűtés, nyáron a vízszivattyúzás önműködő beállításával, mint alapterheléssel egy 40 ~ 50 kW-os szélerőmű is jóval olcsóbban termel villamosenergiát, mint amibe a hálózati energia kerül. A hangsúly az önműködő berendezésen van, amely a bármikor jelentkező szélenergia kihasználására azonnal megfelelő terhelést biztosít, tehát a szél energiájának teljes kihasználást teszi lehetővé.

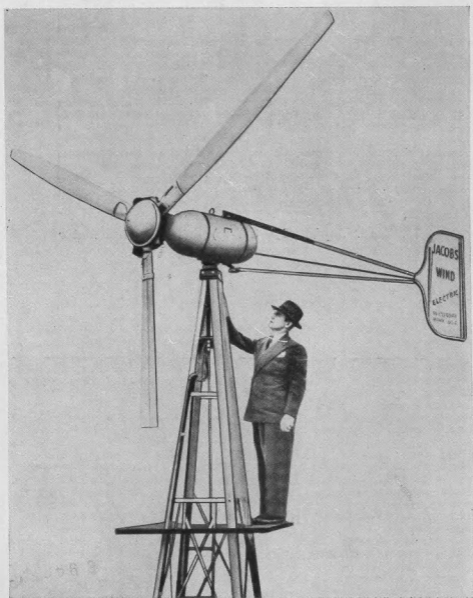
A mezőgazdasági szélmotor teljesen önműködő legyen, felügyeletre egyáltalán ne legyen szüksége, mert az nagyon

megdrágítaná az üzemét. Időnkénti ellenőrzésre, kezelésre-kenésre azonban szükség van.

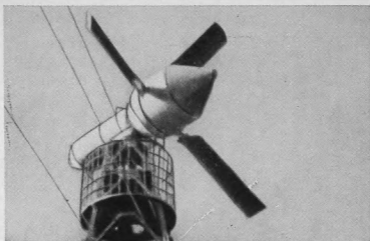
A gépesített mezőgazdasági üzemben nagy mennyiségű energiát fogyasztanak a földmunkák gépei. Ezek hajtására ma általában belsőégésű motorokat, benzin- és dieselmotorokat használnak. (Ebben a tekintetben a gőz már a múlté.) Ezek energiája nem olcsóbb, mint a hálózatról vett energia, de kisebb a beruházása. Hálózatról vett energiával csak akkor lenne érdemes földmunkákat végeztetni, ha olcsóbb lenne. A mezőgazdasági üzem oly módon juthatna olcsó villamosenergiához, ha egy legalább 200 kW-os szélerőművet állítana fel és tartana saját üzemben, amelynek évi energiatermelése egy közepes mezőgazdasági üzem energiaszükségletét fedezni is tudná. Ennek villamos kapcsolása olyan lenne, hogy ha van szél és van fogyasztás, akkor közvetlenül fogyasztásra termelne, míg ha nincs fogyasztás, akkor a távvezetési hálózatra táplálna. Ha pedig nincs szél, a gépek a távvezetékről vennék az energiát. Így a kétféle eredetű energia mennyisége az év folyamán kiegyenlítődne, és a mezőgazdasági üzem végeredményben az egész év folyamán a szélerőmű olcsó áramával dolgozna, amely kb. csak harmadrészébe kerül a hálózat áramának. Az olyan mezőgazdasági üzemnek tehát, amely a földmunkákat is olcsó széleenergiával akarja végeztetni, legalább 200 kW-os szélerőműre van szüksége, amelynek a közelben levő országos hálózattal együtt kell működnie, hogy a szükséges energia bármilyen széljárás mellett is a szükséges mennyiségben és a kellő időben álljon rendelkezésre, minthogy a mezőgazdasági földmunkák nem tűnnek halasztást.

A mezőgazdasági üzemnek azonban már az is nagy segítség, ha — a földmunkák kivételével — a többi munkákat kisebb mezőgazdasági szélmotorokkal termelt olcsó energiával végeztetheti. Ez különösen áll az öntözésre, amelynek széleskörű elterjedése éppen a hozzá szükséges energia olcsóságán múlik.

Hazánkban a mezőgazdasági üzemekben könnyen el lehetne helyezni mintegy tízezer kis mezőgazdasági



49. ábra. Jacobs-féle 3 kW-os szélelektromos motor



50. ábra. Japán (2,1 kW-os) szélelektromos motor



52. ábra. Vízelektrolízis Észak-Koreában, melyhez az áramot a közeli hidroelektromos erőművekből kapják. (A kép a berendezést a háború által megrongált állapotban, télidőben mutatja be)

szélerőművet, egyenként évi 40 000 kWh termeléssel, amely így 400 millió kWh fejlesztésétől mentesítené hőerőműveinket. Ilyen szélerőművek tömeggyártásban oly olcsók lennének, hogy az általuk termelt energia kb. 1/3-ába kerülne a hőerőművek által termeltnek. És ezzel egy csapásra kettős célt lehetne elérni, egyrészt szénvagyonunk kímélését, másrészt pedig mezőgazdaságunk nagyüzemi termelésének olcsó energiával való ellátását, tehát a mezőgazdasági termelvények önköltségének csökkentését, ami pedig végeredményben az ország összes fogyasztási cikkeinek áralakulására is kedvező hatással lenne.

Nem mezőgazdasági szélmotoroknak számítanak ugyan, de nagyságrendjük miatt mégis itt tárgyaljuk azokat a kisebb, teljes automatizmussal működő szélmotorokat, amelyeket egyes országokban különleges rendeltetéssel fejlesztettek ki.

Az egyik ilyen kis szélmotor az USA-ból származik, ahol a Jacobs Wind Electric Co. Minneapolisban egy teljesen önműködő 3 kW-os szélelektromos motort hozott a piacra 1931-ben, amelyből azóta már sok ezer példány van üzemben, és amelyet ma is ezerszámra gyárt (49. ábra). Szélkerékátmérője 4 m. Három állítható szárnyalapátja van, amelyek önműködően állnak be a szélesebbség és a terhelés szerint. Fordulatszama 125—225 percenként, toronymagassága a felállítás helye szerint változik. Havonként átlag 4~5000 kWh áramot termel, amely főleg világításra szolgál. Egyik érdekes alkalmazási területe az Észak- és Dél-Amerikában sok ezer kilométer hosszban megépült olaj- és földgázvezetékek korrózió elleni védelme. Nagy számban állítják fel a vezeték-vonalak mentén és az általuk termelt 10 V — 100 A erősségű áramot a csővezetésekre táplálják; így teljes korrózióvédelmet nyújt kóbor áramok korrodáló hatásával szemben, amelyet semlegesít.

Egy másik teljesen önműködő szélelektromos motort Japánban fejlesztettek ki a második világháború után, amikor az ország igen nagy energiaszükségben szenvedett. Háromlapátos szélkerékének átmérője 7 m. A lapátokat

egy önműködő szerkezet állítja el a szélesebb és terhelés szerint. Fordulatszám: 65/min; 2,1 kW-os generátora 125 V-os egyenáramot termel. A hozzátartozó akkumulátor kapacitása 420 Ah. Eredetileg a japán Antarktisz kutató expedíció számára tervezték, és mivel ott jól bevált, most már számos jó széljárású helyen használják (50. ábra). Különösen jól bírja a nehéz téli időjárást, fagyot, eljegesedést, zuzmarát.

Nyugat-Németországban gyorsjárású kis szélmotorokat fejlesztettek ki (F. Willinger) permanens-mágneses generátorral. Egy szükség szerinti magasságú acélszöszlop tetején van a kétlapátos szélkerék, műanyag szárnylapátokkal és szélirányba beállítható szélzászlóval. A szélkerék a szélesebb szerint változó fordulatszámmal jár és ugyanilyen fordulatszámmal közvetlenül forgatja a generátort, áttételezés nélkül. A generátor változó periódusú váltakozó áramot termel. Két nagyságban készül. A nagyobbik 500 W-os, és szélkerékátmérője 5 m. A kisebbik 200 W-os és szélkerékátmérője 2,5 m. Teljesen önműködő és üzembiztos. A termelt árammal lakást lehet világítani, vagy rádió és televízió üzemét ellátni, sőt egyenirányítóval akkumulátort is tölthet.

Hasonló kis gyorsjárású szélmotorokat már több országban készítenek, így pl. az USA-ban és Olaszországban is. Ezek a lehető legegyszerűbb szerkezetek és olcsók is, hogy versenyezni tudjanak más energiaforrások költségeivel. Használatuk mindjobban terjed, még a hálózattal jól ellátott országokban is, mivel jóformán nincs karbantartási költségük. Működésükhöz ingyen kapják az energiát a szélből, kezelést nem igényelnek, és még egy lapos háztetőn is felszerelhetők.

6. SZÉLERŐMŰVEK MÉRETEZÉSÉNEK FŐBB ELVEI

Az itt következőkben csak a szárnylapátos, vízszintes főtengelyű szélgépek méretezéséről beszélünk, mivel ma majdnem kizárólag csak ilyenek épülnek.

Elsősorban azt kell tudnunk, hogy a szélerőmű felállítása helyén mekkora Q = az évi fajlagos szélteljesítmény. Ha ez ismeretes, akkor a széldiagram (21. ábra) is bizonyára rendelkezésre áll, hiszen Q -t ennek alapján számították ki. Az is fontos, hogy ezek az adatok milyen talajszint feletti magasságra vonatkoznak.

Ha közérdekű szélerőművet tervezünk energiatermelés céljaira, úgy a megépíthető legnagyobb méretű szélerőmű a legelőnyösebb. Ennek méreteiről az I. II. és III. táblázat adatai tájékoztatnak. A szélkerékátmérővel arányosan kell a toronymagasságot is megválasztani, amely magasságra a helyi szélteljesítményét interpolálással át kell számítani (17. ábra). Az így átszámított szélteljesítményhez számítjuk ki a v_a alapszélsébséget a (14) képlet segítségével. Hogy az így kiszámított alapszélsébség valóban a legelőnyösebb-e, azt a telepítés helyén felvett széldiagramból (21. ábra) állapíthatjuk meg. A legelőnyösebb, ha a v_a alapszélsébség a diagramnak abba a szakaszába esik, amelyben a legnagyobbak az évi szélteljesítmények, mert ezen a szakaszon van a szűkség a szélkerék legjobb hatásfokára. Az így kiszámított és megválasztott főméretek adják a szélgép méreteinek felső határát. Ennél kisebbek is tervezhetők akármilyen alsó határig, de számolni kell azzal, hogy minél kisebb szélerőművet építünk, annál kevésbé lehet az gazdaságos, mert annál nagyobb a fajlagos beruházási költsége.

Nagy szélerőműveknek nagyok a szárnylapátjai, amelyek ma már nem állítható szerkezetűek, hanem rögzítettek. Ezek méretezése, áramvonalas kialakítása gyakorlott szakembernek is komoly feladatot jelent. A szárnylapátok igénybevétele sokféle és nagyon összetett. A szélnyomás hátra akarja hajlítani; ez ellen nehéz úgy méretezni, hogy közbenső kihorgonyzás nélkül is elég erős legyen. Ezért a szárnylapátot a tengelytől mért kétharmadnyi távolságban ki kell horgonyozni. A kihorgonyzást a tengely meghosszabbításához kell bekötni. A centrifugális erő csak nagy gyorsjárású tényezők esetén, tehát csak a nagyon gyorsjárású szélkerekeknél számottevő. A szárnylapátokat egymáshoz is tanácsos kihorgonyozni.

A szárnylapátokat saját súlyuk is igénybe veszi és pedig nem csak a súlyerő, hanem tehetetlenségi nyomaték formájában is. Pedig nem tanácsos a szárnylapátokat könnyűre tervezni és könnyű anyagból építeni, mert a szélkerék a lendkerék szerepét is betölti, amelynek a szélerő egyenletlenségét lehetőleg egyenletes erőhatássá kell átalakítani. Sokszor még kevés is a szélkerék tömege a kiegyenlítéshez és ekkor a generátor elé még egy lendkeréket kell beépíteni, amely — áttételes megoldásnál — a generátor nagyobb fordulatszámával jár és így kisebb tömegű lehet.

Különleges problémát képez a szélkerékagy és vele együtt a főtengely kialakítása és méretezése. A szélkerékagyon ülnek a szárnylapátok talpai, tehát ehhez megfelelő nagyságúra kell kialakítani. Ha azonban a tengelyt a szélkerék csavaróhatására, tehát torzióra és a szélkerék súlyából adódó hajlításra méretezzük, aránylag kis tengelyátmérőket kapunk, amelyekre az aránylag nagyméretű szélkerékagyat felékelni vakmerőség volna. A főtengely végét tehát a szélkerékagy miatt bőven túl kell méretezni, hogy a szélkerékagy a nagy szárnylapátokkal jól ülhessen rajta. Mivel pedig a szélkerékagy rendesen nagyméretű, nem lehet tömör, ezért üregesen, dobozszerűre kell kialakítani. Így tehát a tengely igénybevételei, a túlméretezés miatt, aránylag kedvezőek és ezért

nem érdemes drága ötvöztött acélból előállítani, megfelel itt az egyszerű szénacél is. Nagyátmérőjű tengelyeket vastag, 50—60 mm-es acéllemezből is hengereltethetünk, és az így készült henger két végébe csapot hegesztünk. Nagy átmérőjű főtengelyek így olcsón elkészíthetők.

Egy szélerőmű főtengelyének csapágái csakis gördülőcsapágak lehetnek, mert ilyen kis fordulatszámom nem oldható meg a csúszócsapágak biztonságos kenése és azok nem üzembiztosak. Ez okozta az amerikai 1000 kW-os szélerőmű csapágainak üzemzavarát is. A gördülő csapágak alkalmazásánál a nagy méretek okoznak nehézséget, hiszen itt 500 ~ 1200 mm tengelyátmérőkhöz kell gördülőcsapágakat gyártani. Ez a nehézség azonban áthidalható. Nálunk is készülnek 500 mm furatú önbeálló hordógörgős csapágak, külföldön már 2000 mm furatúakat is készítenek. A legrosszabb esetben görgőkre is lehet a főtengelyt ágyazni, úgy mint a forgókemencéket. Emellett ez a megoldás még olcsóbb is.

A primer lánchajtás és a szekunder fogaskerék-hajtómű már nem képez a szokványostól eltérő feladatot. A generátor is sorozatgyártmány és nemcsak ilyen célra készül, kivéve a sokpólusú generátort, amely egyelőre csak egyedi gyártással készülhet.

A torony méretezéséhez minden súlyterhelést és nyomatékokat gondosan figyelembe kell venni és ezek eredőjét megállapítani. Erre kell a tornyot méretezni. A berendezés súlyából származó igénybevételek kiszámítása semmi különösebb problémát nem képez. A széligenybevételek kiszámítása azonban már félreértésekre adhat okot. Minden olyan szerkezeti elemet, amely nem forog, arra a maximális szélnyomásra kell méretezni, a formatényező figyelembevételével, amelyet a szabvány előír, s az 1. fejezetben már ismertettünk. Ha a szélkerék áll és szembe fúj vele a szél, ugyanígy számítandó ki a ráható szélnyomás is. Az esetben azonban, ha a szélkerék forog és energiát termel, lényegesen nagyobb nyomást gyakorol a tengelyén keresztül a géphajóra és így a toronyra is.

A forgásban levő energiatermelő szélkerék axiális S nyomását a következő képlet adja:

$$S = \frac{F v^2 \rho}{2} \text{ [kp].}$$

Itt F a szélkerékterület m^2 -ben; ρ a levegősűrűség, amit átlagosan $1/8$ -nak veszünk és v az a szélsébség, amelynél a szélgép a *tervezett maximális terhelést eléri* úgy, hogy terhelése ezen felül már a nagyobb szélsébségeknél sem emelkedik.

Akár vasszerkezetű, akár vasbeton a nagy, energiatermelő szélérőmű tornya, kívül sima, hengeres felületűre kell kiképezni, hogy a szélkeréktől elfolyó levegőmennyiség minél kisebb torlódást szenvedjen. Ezzel egyúttal a torony széligénybevétele is csökken. Kis szélgépek tornyának kialakításánál a minél olcsóbb kivitel a legfőbb szempont, hiszen a kis szélgépek fajlagosan, termelésükhöz viszonyítva úgyis sokba kerülnek. Ezért ezek tornya rendszerint a lehető legegyszerűbb és legolcsóbb rácsos vasszerkezet. Még ezek közt is a legolcsóbb a kereskedelmi acélcsövekből, hegesztett kivitelben készült rácsos szerkezet.

A géphajó (gondola) forgatása a torony tetején mérsékelt sebességgel történjen. Gyors szélirányváltozást csak a szélörvények okoznak, ezekre pedig a géphajóforgató berendezésnek úgy sem szabad reagálnia. Tartós szélirányváltozás mindig lassan következik be, ennek a lassú elfordítás felel meg a legjobban. Mindezeket figyelembe véve elégségesnek látszik, ha az elforgató berendezés a géphajót kb. 6 perc alatt forgatja el egy negyed fordulattal.

Ilyen lassú elfordításnál nem nagy az erőszükséglet sem, és az elforgatás indítónyomatéka is kicsi. Az elforgató gépezetbe valahol önzáró csigahajtást is be kell iktatni, mert az önműködően rögzíti a géphajót új helyzetében. Az elforgató berendezés ne legyen érzékeny. Elég ha akkor működik, ha a szél iránya már legalább 5° -kal változott meg tartósan. Rövid idejű szélirányváltozásokkal szemben a szélzászló lengését folyadék- vagy légfékkal kell késleltetni.

Mind a tervezésnél, mind a kivitelezésnél és üzemben-tartásnál szem előtt kell tartanunk, hogy minden szerkezeti rész hőmérséklete megközelítőleg a szabad tér hőmérséklete szerint alakul. Tehát télen mélyen a fagyponthoz süllyedhet, nyáron viszont a legmelegebb nyári levegőhőmérséklet fölé emelkedhet. A fagyponthoz alatti hőmérsékletek miatt fagyálló üzemanyagokra és olyan szerkezetekre van szükség, amelyek mély fagyponthoz üzemanyagokkal, folyadékokkal üzemeltethetők és pedig lehetőleg az egész évben, tehát a forró nyárban is, hogy ne legyen szükség az év folyamán üzemanyagcserére, csak akkor, ha az már elhasználódott, ill. elszennyeződött és nem nyújtja már a szükséges legnagyobb üzembiztonságot.

Az önműködő villamos vezérlőrendszerbe csakis elsőrendű, teljesen üzembiztos és bőségesen méretezett készülékeket tanácsos betervezni és beépíteni, mert ezek üzemzavara sok kiesést idézhet elő az energiatermelésben.

Az elmondottak képezik a szélérőmű szerkesztésének és méretezésének olyan részleteit, amelyek a szokásos géptervezéshez és építéshez képest újszerűek.

7. SZÉLERŐMŰVEK EGYÜTTMŰKÖDÉSE ORSZÁGOS HÁLÓZATBAN. ENERGIATÁROLÁS

Ha az országos energiaellátásban szélerőművek is részt vesznek, azoknak éppen úgy kell az országos elosztó hálózatra dolgozniuk, mint a hő- és vízerőműveknek. Ennek a lehetőségét a Szovjetunióban, Balaklavában 1931-ben üzembehelyezett 100 kW-os szélerőmű (tíz évig tartó üzemével) és utána a távvezetékű hálózatra dolgozó amerikai, német, francia, angol és dán szélerőművek elég megnyugtatóan bebizonyították. Az együttműködés elméletét többen is kidolgozták, úgyhogy a kérdés ebben a vonatkozásban is teljesen tisztázott. A hálózatra való termelés szempontjából megkülönböztetünk perióduskövető és önállóan periódustartó szélerőműveket.

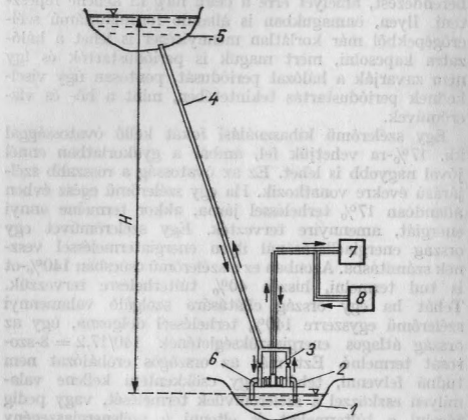
A perióduskövető szélerőműveknek nincs periódus-szabályozó berendezésük. Ezek úgy dolgoznak a hálózatot tápláló más erőgépekkel párhuzamosan, hogy a generátor a gerjesztő meddőáramot a periódustartó hálózatról kapja, amely a generátort szinkron fordulatszámra kényszeríti. Világos, hogy ilyen szélerőműveket nem lehet korlátlan számban az erőhálózatra dolgoztatni, mert nem szabad, hogy túlsúlyba kerüljenek a periódustartó hálózati erőgépekkel szemben, különben zavarni fogják a periódustartást. Ezek a szélerőművek tehát úgy tekinthetők, mint tüzelőanyag-megtakarító energiatermelők. Amennyit ezek termelnek, annyival kevesebbet kell a többi hálózati erőgépnek termelnie, tehát annyival kevesebb tüzelőanyagot fogyasztanak. Ilyen szélgépekkel tehát nem lehet egy ország teljes energiaellátását megszervezni; az utóbbi célra olyan gépek kellene, amelyek a hálózati áramtól függetlenül is állandó periódusú áramot termel-

nek. Ehhez a hő- és vízerőgépek fordulatszám-szabályozójához mindenben hasonló centrifugálszabályozós, szervomotoros szerkezetre van szükség, amelynek azonban nem a lapátokat kellene állítani, hogy azok rögzítve (fixen) maradjanak, hanem egy villamos teljesítményszabályozó berendezést, amelyet erre a célra még ki kellene fejleszteni. Ilyen, önmagukban is állandó fordulatszámú szél-erőgépekből már korlátlan mennyiséget is lehet a hálózatra kapcsolni, mert maguk is periódustartók és így nem zavarják a hálózat periódusát, pontosan úgy viselkednek periódustartás tekintetében, mint a hő- és vízerőművek.

Egy szél-erőmű kihasználási fokát kellő óvatossággal kb. 17%-ra vehetjük fel, ámbár a gyakorlatban ennél jóval nagyobb is lehet. Ez az óvatosság a rosszabb széljárású évekre vonatkozik. Ha egy szél-erőmű egész évben állandóan 17% terheléssel járna, akkor termelne annyi energiát, amennyire tervezték. Egy szél-erőművet egy ország energiaellátásánál ilyen energiatermeléssel vesznek számításba. Azonban ez a szél-erőmű csúcsban 140%-ot is tud termelni, hiszen 40% túlterhelésre tervezzük. Tehát ha egy ország ellátására szolgáló valamennyi szél-erőmű egyszerre 140% terheléssel dolgozna, úgy az ország átlagos energiaszükségletének $140/17,2 = 8$ -szorosát termelné. Ezt már az országos erőhálózat nem tudná felvenni, tehát vagy csökkenteni kellene valamilyen eszközzel a szél-erőművek termelését, vagy pedig tárolni a túltermelést és eltenni a szélenergiaszegény időkre.

Az energiátárolás kérdése minden oly természeti energiánál felmerül, amely egyenlőtlen mennyiségekben jelentkezik, tehát elsősorban a szél- és a napenergiánál, amelyek jelentkezése szélsőségesen egyenlőtlen és szezonális. Mivel pedig magát a szél- és napenergiát nem lehet tárolni, olyan energiát kell belőlük termelni, ami jó hatásfokkal és olcsón tárolható és emellett nagyüzemi tárolásra is alkalmas. Ilyen energia csak egy van és ez a vízenergia. A többi energiaféleség, az elektromosság, a légnyomás, a hőenergia stb. mind lényegesen rosszabb

hatásfokkal tárolható és ennek eszközei is drágák és alkalmazhatatlanok nagyüzemi megvalósításra. A vízenergiával való tárolásnak az a lényege, hogy a fölös energiákkal vizet nyomnak fel egy tárolóba, amiből szükség esetén vízerőgépekkel energiát fejlesztenek (51. ábra).



51. ábra. Szivattyús energiátároló általános elrendezése

A vízenergiával való tárolásnak olyan jó a hatásfoka és olcsók az eszközei, hogy ma már a hő- és vízerőművek terheléseinek kiegyenlítésére is azt használják. Az elgondolás az, hogy ha egy hő- vagy vízerőmű teljesen egyenletes, optimális terheléssel járhat, úgy állandóan a legjobb hatásfokkal, tehát a legolcsóbban is termeli az energiát. Viszont a fogyasztás távolról sem egyenletes; éjjel alig van energiafogyasztás, nappal ellenben két

időszakban is, reggel és este oly óriási a csúcsterhelés, hogy alig győzik az erőgépek. Eddig az erőműveket úgy tervezték, hogy a csúcsterhelést is tudja teljesíteni. Ma már a korszerű erőművet az átlag terhelésre tervezik és egy kiegyenlítő erőművet terveznek hozzá, amely az éjjeli üresjárat idején vizet szivattyúz fel egy tárolóba, amelynek energiájából nappal a kiegyenlítő erőmű vízturbinái teljesítik a csúcsterhelést a főerőmű helyett. Ilyen kiegyenlítő vízerőművet építettek Felső-Bajorországban a Reisach-Rabenleite hőerőműhöz is, amelynek üzemi eredményei 1957. óta rendelkezésre állanak:

a vízfelnymó vízszivattyú hatásfoka	0,884
a villamosmotor hatásfoka	0,965
a vízszállító vezeték hatásfoka	0,99
az energiatermelő vízturbina hatásfoka	0,915
a generátor hatásfoka	0,975
az energiatermelő vezetékének hatásfoka	0,99
az energiatermelő transzformátorának hatásfoka	0,99
Összhatásfok:	0,71

tehát a tárolóba adott energiának 71%-át lehet víztárolós rendszerrel visszanyerni.

Lényeges azonban a különbség aközött, ha egy hővagy vízerőmű terhelésének kiegyenlítésére használják ezt az energiátároló rendszert, vagy ha szélcsend áthidalására. Előbbi esetben ui. a kiegyenlítő-erőmű kapacitása csak a terhelés egyenetlenségeinek nagyságához igazodik, míg utóbbi esetben a teljes energiaszükségletet is fedeznie kell, ha a szélenergia egy időre kimarad. Ez azt jelenti, hogy ha a szélcsend egy egész ország területére is kiterjedhetne, akkor a víztárolás kiegyenlítő berendezésnek oly nagynak kell lennie, hogy szükség esetén fedezni tudja az egész ország energiaszükségletét.

A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy szélcsendes idő sahasem terjed ki nagyobb területre. Így pl. Dániában meteorológiai kutatómunkával megállapították, hogy ha az ország egész energiaszükségletét kizárólag szélenergiából fedeznék, úgy ennek az energiának egy harmada még a legszélcsendesebb időjárás esetén is rendel-

kezésre állana, és csak a kétharmad mennyiséget kellene ilyenkor más úton biztosítani.

Világos, hogy még a jó hatásfokú energiatárolás is lényegesen megdrágítja a szélenergiát, tehát igen kívánatos volna nélkülözhetővé tenni. Erre a különböző országok szakértői egyöntetűen azt a javaslatot teszik, hogy a szélerőműveket minél nagyobb területen kell elosztani, mivel nagy területek szélenergia átlaga azonos és állandó. A nagy területen szétszórt szélerőműveket tehát közös távvezeték-rendszerben kell egyesíteni. Amerikai mérnökök szerint az USA-ban 50 szélerőműcsoportot, csoportonként 10 berendezéssel (amelyek egységei 7500 kW-osak lennének) kellene az ország területén elosztani. Egy ilyen szélerőműrendszer, amely az egész USA területét behálózná, gyakorlatilag elég állandó teljesítményt szolgáltatna. *G. M. Krizsanovszkij* szovjet szakértő 1925-ben mint egyetlen megoldást egy olyan villamosenergia-hálózat létesítését ajánlotta, amely az egész országra kiterjed a rádolgozó szélerőművekkel együtt és így pótolni tudja a szélcsend miatti helyi kieséseket.

Egy elég nagy területre kiterjedő energiahálózat esetén tehát egyáltalán nincs szükség energiatárolásra, mivel ezen a szélenergia átlaga állandó és így a rajta elosztva telepített szélerőművek energiatermelésének összege is minden időben ugyanaz.

A Szovjetunió energiahálózata oly hatalmas területre terjed ki, hogy az erre az egész területen elosztva rádolgozó szélerőművek minden időben, energiatárolás nélkül biztosítani tudnák az ország energiaszükségletét. Hazánk területe viszont ehhez képest oly kicsi, hogy a szomszédok együttműködése nélkül komoly energiatároló berendezéseket kellene építeni a szélerőből való folyamatos energia-termelés biztosítására. Szélgyenge időkben tehát kölcsön kellene kérni energiát a szomszédoktól, amit szélerős időkben vissza lehetne adni a fölöslegben termelt szélenergiából. Ez a módszer azonban a szomszédok energia-termelésének erős hullámvásárlását idézné elő, amit valószínűleg nem vállalnának.

Marad tehát, mint egyetlen megoldás az, hogy az országos méretű szélenergiahasznosítást olyan időre kell halasztani, amikor a szomszédok is megvalósítják és így több ország együtt olyan együttműködő területet képezhet, amelyből ezeknek az országoknak energiaszükséglete bármely időpontban biztosítva lehet. Addig is azonban nagymennyiségű szénmegtakarító szélerőművet lehet felállítani, amelyek jelentékeny mértékben enyhíthetnék az ország energiagondjait, mivel az országos hálózatra dolgozó erőgépek kapacitásának legalább 30%-áig lehet ilyen szélerőműveket a közös hálózatra dolgoztatni, ami ugyanennyi tüzelőanyagmegtakarítást is jelent. Ilyen mennyiségű szélenergia hasznosítása után feltehetően nem lenne szükségünk energia importra.

Országos energiaellátásról lévén szó, lássuk mit várhatunk e téren a szélenergia hasznosításától?

Említettük, hogy sík vidékeinken 50 m magas toronyra 1000 kW-os szélerőműveket lehetne üzemben tartani, amelyek egyenként kb. 1 500 000 kWh-t termelnének évi átlagban. Jelenlegi évi villamosenergia-szükségletünk kerekén 7 milliárd kWh, amelynek kitermelésére kb. 4700 ilyen szélerőmű volna szükséges. Mivel Magyarország területe 90 000 négyzetkilométer, minden 19 km²-en egy ilyen szélerőművet kellene felállítani, tehát még továbbfejlesztésre is volna bőven lehetőség. Ezek egyharmada perióduskövető szélerőmű lehet, amelyeket máris meg lehetne építeni és pedig minden 57 km²-en egyet. Ennek megvalósítása olyan hosszú időt vesz igénybe, hogy ezalatt arra is megéri az idő, hogy a szélenergia hasznosításában a szomszéd országok is együttműködjenek. Ekkor azután már nem lesz szükség semmi energiátárolásra és így a szélrőből termelt energia költségei az elképzelhető legkisebbre csökkennének.

Az ország energiaellátásában az is jelenthet segítséget, ha a szélenergiából nem villamosenergiát termelünk, hanem olyan munkákat végeztetünk vele, amihez egyébként villamosenergiát használunk fel. Így például vizet szivattyúzunk vele, mint ahogy azt már a mezőgazdaság energiaellátását tárgyalva az 5. fejezetben kifejtettük.

Vagy kompresszormunkát végeztetünk vele, pl. jéggyártáshoz stb., vagy egyenáramot termelünk elektrolízis céljára. Az egyik legfontosabb ilyen művelet pl. a víz elektrolízise, hidrogén és oxigén előállítására. A hidrogén a nehézipar egyik legfontosabb nyersanyaga, amelyet eddig általában a szénnek vízgázzá való elégetésével, mint ún. „szintézisgázt” állítottak elő. Ennek hidrogéntartalma az utolsó tisztítás (rézlúgmosás) után kb. 74%, és normál köbmétere 1,22 Ft-ba kerül. A benne levő hidrogén tehát 1,65 Ft/Nm³.

Vízből elektrolízissel gyakorlatilag 100%-os vegytiszta hidrogént kapunk, amelyhez elméletileg 1,23 V feszültségű áramból 2,9 kWh villamosenergia volna szükséges. Gyakorlatilag 1,7 V feszültség mellett 4 kWh villamosenergiát igényel 1 Nm³ hidrogén és 0,5 Nm³ oxigén előállítása. Váltakozóáramból az egyenirányítás veszteségei miatt 5,8 kWh 1 Nm³ hidrogén és 0,5 Nm³ oxigén előállításának enegiaszükséglete. A szélenergiával való hidrogéntermelés tehát már 69 filléres kWh-ár mellett kifizetődik.

Már ott is érdemesebb és olcsóbb a hidrogént vízből elektrolízissel előállítani, ahol olcsó vízenenergia áll rendelkezésre. Így pl. Észak-Kóreában, ahol bőségesen van vízenenergia, az ipari hidrogént hatalmas gyárakban, víz-elektrolízissel állítják elő (52. ábra). Annál is inkább kifizetődő szélenergiát használni vízelektrolízishez, mivel az még a legolcsóbb vízen energiánál is olcsóbb. Igaz ugyan, hogy a szélenergia nem áll egyforma mennyiségben és állandóan rendelkezésre, azonban a vízelektrolizáló üzem úgy kell megtervezni, hogy ha van szél, akkor teljesen önműködően termeljen és az elektrolit-gázokat megfelelő nagyságú gazométerekbe táplálja, ahonnan már a felhasználás egyenletes mennyiségben történhet. Az ilyen üzem már a hidrogéntermeléssel is kifizetődik, úgyhogy a melléktermékként kapott oxigén jóformán tiszta hasznót képez (csak palackozni kell).

Szélenergiával minden olyan munka olcsón teljesíthető, amelynek nem feltétele a folyamatosság és amelynek a végterméke tárolható.

A szélerégiával dolgozó ilyen üzemek csak akkor dolgoznak olcsón, ha teljesen önműködő a berendezésük és így a szél energiáját minden időben teljes mértékben használják ki, közbenső energiátárolás nélkül.

Szélerégiával dolgozó vízelektrolízis üzemet elsőnek szintén a Szovjetunió épített a kazahsztáni Alma-Ata körzetben, jó széljárású sztyepp vidéken. A szélkerék 25 kW teljesítményű egyenáramú generátort hajt és víz elektrolízissel évi átlagban 18—20 000 Nm³ hidrogéngázt termel. Ennek összes égésmelege kb. 56 millió kilokalóriát tesz ki, ami 65 000 kWh évi teljesítménynek felel meg, tehát átlagosan 7,4 kW-nak. Ebből a dinamó teljesítőképességéhez viszonyítva 29,7% átlagos hatásfok adódik, ami — számításba véve az ugyanekkor termelt 9—10 000 Nm³ oxigént is — jó eredménynek mondható. Azonban ha az így előállított hidrogénből gázmotorban elégetve villamosenergiát akarunk termelni, amelynek összhatásfoka csak 21%, akkor csak 13 600 kWh-t kapunk, ami a dinamó teljesítőképességéhez arányítva csak 7%-átlagos hatásfokot jelent. Ez az energiátranszformáció tehát igen veszteséges, nagyon megdrágítja az energiatermelést. Ha tehát hidrogént termelünk olcsó szélerégiából, azt ne energiátárolás céljából tegyük, hanem csak olcsó hidrogén nyerése végett, mert ebből energiát termelni már egyáltalán nem olcsó dolog. A szélerégiából termelt olcsó villamos árammal minden olyan elektrolízis előnyösen és gazdaságosan végezhető, amely teljesen önműködővé tehető, ahol tehát magához az elektrolízishez nincs szükség felügyelő személyzetre.

A felsorolt példákból láthatjuk, hogy milyen széleskörű nagyüzemi felhasználási területe lehet a szélerégiának az országos energiaellátáson kívül is. Hogy a szélerégia hasznosítása emellett még gazdaságos is, azt a következő fejezetben mutatjuk meg.

8. TERMELÉSI ÉS BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEK

Egy erőmű által termelt energia költségei két részből tevődnek össze. Az egyik rész a tényleges termelési költségekből, a másik az erőműbe fektetett összeg leírásából, amortizációjából alakul. A termelési költségeket az üzemanyag költségei és a kiszolgáló személyzet munkabére, valamint a karbantartás és az esetleges javítási költségek teszik ki. Az erőműbe fektetett összeg, azaz másképpen a beruházási összeg leírása egyben a tőkeszolgáltatást, a megengedett törvényes kamatot is tartalmazza.

Nézzük, hogyan alakulnak ezek a tételek egy szél erőmű esetében. Az energiát a szél ereje szolgáltatja, tehát tüzelőanyagra itt egyáltalán nincs szükség. A súrlódó géprészek csak nagyon kevés kenőanyagot igényelnek, amelynek oly kicsi a költsége, hogy alig lehet számításba venni. Mivel egy korszerű szél erőműnek teljesen önműködően kell termelnie, minden súrlódó géprészt úgy kell megtervezni, hogy egyszeri olajtöltéssel legalább egy fél évig működhessen utánpótlás nélkül. Tehát teljesen zárt, olajfürdős, vagy cirkulációs kenésű szerkezeteket kell használni. Ez nemcsak az üzembiztonság érdekében szükséges, hanem a kenési költségek csökkentése érdekében is. A zárt gördülőcsapágyak, lánchajtások, fogaskerékszekrények csak némi olaj-utántöltést igényelnek, hosszabb időszakonként. Az ilyen önműködő kenéssel ellátott gépezetek karbantartási és javítási költsége is nagyon csekély. Mivel pedig a korszerű szél erőmű teljesen önműködően termel, állandó felügyeletre nincs szüksége, tehát állandó gépapolóra sem, csupán periódikus ellenőrzésre. Ennek költségeit csak akkor lehet számításba venni, ha a hosszabb időn át szerzett gyakorlat megmutatja,

hogy egy-egy gépcsoport felügyeletéhez és karbantartásához hány emberre van szükség.

Dániában, ahol a 200 kW-os Gedser-szélerőmű már 1957 óta van állandóan üzemben, úgy látják, hogy egy két főből álló karbantartó és ellenőrző csoport 25 szélerőművet tudna egy szervízautó segítségével ellátni. Ezek adminisztrációja sem kerül sokba és így egy korszerű, teljesen önműködő szélerőmű üzemi és karbantartási költségei nagyon kis összegre rúgnak. Ebben a tekintetben tehát a szélerőmű minden más erőműnél előnyösebb.

A beruházási költségek tekintetében azonban már nem ilyen kedvező a helyzet, mivel a szélerőműnek a felhasználási foka kedvezőtlenebb nemcsak a hőerőműnél, hanem a vízerőműnél is. Ez azt jelenti, hogy a beruházott kilowattok kihasználása lényegesen rosszabb, mint a többi erőműnél, mivel a szélenergia jelentkezése is egyenlőtlenebb és szélsőségesebb.

Egy erőmű fajlagos beruházási értékét helyesen úgy kapjuk meg, hogy a beruházási összeget nemcsak a beépített kilowattokkal osztjuk, hanem ezenkívül még az erőmű várható vagy tényleges kihasználási fokával is. Az így kiszámított fajlagos beruházási összeg a szélerőmű esetében kedvezőtlenebb, mint a hő- és vízerőműnél, mivel utóbbiak kihasználási foka 60—70% szokott lenni, míg a szélerőművéké csak 17—24%. A szélerőmű javára billenti azonban a mérleget az a tény, hogy ténylegesen sokkal hosszabb az élettartama, mint bármely más erőműnek, mivel sokkal kisebb és kevesebb rongáló hatásnak van a berendezése kitéve. Nem szerepelnek az üzemében magas hőmérsékletek, korrodáló füstgázok, hordalékos, iszapos, vízár stb.; csupán az atmoszféra hatásainak van kitéve, amely ellen olcsón és hatásosan lehet védekezni. Dániában és Hollandiában nem egy szélmalom található, amely több mint 100 éves kora ellenére még ma is üzemképes. Mégis a beruházás leírásánál ugyanannyi üzemévvel számolunk, mint a többi erőműnél, aminek az a következménye, hogy a szélerőmű a leírási évek elteltével még évtizedeken keresztül is üzemképes állapotban jóformán ingyen termel majd energiát, mivel a termelés

költségeit az ennek oroszlánrészét képező amortizáció nem terheli többé, üzemanyagra pedig nincs szüksége.

Dániában a 200 kW-os Gedser-szélerőmű eddigi üzemi tapasztalatai alapján a következő gazdaságossági számítást készítették:

Tegyük fel, hogy egyszerre 100 db 200 kW-os szélerőművet építünk meg és állítunk fel a már kipróbált típusban egy 50 km sugarú körzetben. Ezeknek karbantartására és ellenőrzésére 8 ember elég lenne; közülük 2—2 kapna egy-egy szerelőautót, ami összesen 4 szerelőautót jelent. 100 db szélerőművet egyszerre sorozatban legyártva olcsóbb lenne már a szélerőmű is, tehát darabonként 25 000 Dkr-ból (dán korona) kitelnék, ami elég óvatos feltételezés, mivel az első 200 kW-os Gedser-szélerőmű egyedi gyártással 27 000 Dkr-ba került. A sorozatgyártás árát tehát csak 7,4%-kal vették kisebbre az egyedi gyártásnál. Ekkor tehát:

100 db 200 kW szélerőmű építési költsége:	25 000 000 Dkr
Ennek 6% kamatja és 2% törlesztése	
évente	2 000 000 Dkr
A karbantartási személyzet évi költsége	
8 × 1500 Dkr	120 000 Dkr
Igazgatási és irodai költségek	50 000 Dkr
Kezelőkocsik üzeme (évi 100 000 km	
à 0,50 Dkr/km)	50 000 Dkr
Karbantartás, biztosítás, javítások (évi)	200 000 Dkr
Évi összköltség:	2 420 000 Dkr

Egy 200 kW szélerőmű évi termelésének értéke az eddigi tapasztalatok alapján 37 220,— Dkr, tehát 100 egység termelésének értéke 3 722 000 Dkr
Ebből a felbecsült költségeket levonva : 2 420 000 Dkr

Marad évi tiszta jövedelem: 1 302 000 Dkr

ami a termelési költségek 54%-át teszi ki. Ha tehát a szélerőművek által termelt energiát az addigi átlagáron értékesítik, akkor a vállalkozás uzsorahasznót hoz, annál is inkább, mivel már a beruházási összeg leírása is tartalmaz 6% kamatot, ami végeredményben szintén hasznót képez.

Ez a dán kalkuláció több tekintetben is igen óvatos. Először is egy százdarabos sorozatgyártásnál nem 7,4 %-kal, hanem legalább 20%-kal csökken egy szélerőmű előállítási költsége. Másodsor 100 db szélerőmű számára túlságosan nagy terület az 50 km sugarú körzet, hiszen ez 7854 km²-et tesz ki, tehát egy szélerőműre 78,5 km² esnék. Bőségesen elég volna egy négyzetkilométer terület egy gép működési köre számára, tehát a 100 gép számára 100 km² terület, ami csak 5,7 km sugarú körzetnek felel meg. Ez a felvett körzetnek mindössze csak 1,3%-a. Ezzel a szervízautók költségei is lényegesen kisebbek lesznek, mert sokkal kevesebb kilométert kell megtenniük és ilyen kis területre bizonyára kevesebb személyzetre és szervízautóra is lenne szükség. Ha még ehhez hozzávesszük, hogy amint már bebizonyítottuk, ezzel a 200 kW-os szélerőművel a felállítás helyén a fordulatszám felemelésével kb. 30%-kal több energiát lehetne termelni, a következő reális kalkulációt állíthatnánk fel:

100 db 200 kW szélerőmű évi összköltsége	2 123 000,— Dkr
termelési értéke	4 304 000,— Dkr
Marad évi tiszta jövedelem:	2 181 000,— Dkr

ami a termelési költségek 103%-át teszi ki. Ez azt jelenti, hogy normális haszon elérése mellett az energia árát majdnem a felére lehetne csökkenteni ott, ahol az energiát szélerőből termelik, noha a termelő szélerőmű egységek még nem nagyobbak 200 kW-osnál. Holott az ottani szélerőműnél már 1500 kW-os szélerőmű egységekkel kellene dolgozni, amely, mint nagyobb egység még olcsóbban termelne energiát.

A dánok úttörőmunkájának jelentőségét ezekből a kalkulációkból lehet a legjobban megítélni. A szélenergia hasznosításának ilyen reális perspektíváját azelőtt alig lehetett volna felvázolni.

Igen tanulságosak még az amerikai 1000 kW-os szélerőmű gazdaságossági számításai is, amelyek alapját az a 887 órai üzem képezi, amely alatt a szélerőmű ténylegesen 298 240 kWh-t termelt. A szerzett tapasztalatok

alapján P. C. Putnam az összetört 1000 kW-os szélerőmű tervezője egy 1500 kW-os szélerőművet tervezett, amelyhez az alábbi építési anyagokra lett volna szükség. A szélerőmű tornya rácsos vasszerkezet lenne.

Hengerelt acélanyag	66 300 kg
kovácsolt acélanyag	13 600 kg
öntöttvas és acél	9 100 kg
vegyes	1 800 kg
Összesen:	90 800 kg

Magyar pénzben kifejezve a megépítés kb. 6 millió forintba kerülne, amiből az energiatermelés költsége kb. 32 fill/kWh-t tenne ki, a dán számítást véve mintául, mivel a szélerőmű az 1000 kW-os egységgel tett tapasztalatok alapján kb. 1 800 000 kWh-t termelne évente.

A Szovjetunióból sajnos nem kaptunk gazdaságossági számításokat, noha a 100 kW-os szélerőmű Balaklavában 10 éven keresztül dolgozott és évenként termelt 279 000 kWh energiát, ami a kis egységhez viszonyítva jó teljesítménynek mondható, noha az ottani jó széljárásban egy kiforrott szerkezetű szélerőmű jóval többet tudna termelni. Azonban a balaklavai szélerőmű csak kísérleti egység volt, ebben a nagyságban első a világon.

Dolgozik Akmoleszkben egy 12 kis szélerőműből összeállított 400 kW-os telep is, azonban erről nem tudunk gazdaságossági számításokat. A sokezer kisebb egység a Szovjetunió óriási területén viszont nem azért dolgozik, mert olcsón termel energiát, hanem azért, mert azokon a távoleső helyeken, ahol ezeket felállították, nem az energia ára a fontos, csak az, hogy egyáltalán legyen, mert más mód ott az energiaellátásra nincs.

Hazánkban azonban az dönti el a szélenergia hasznosításának sorsát, hogy olcsóbb-e és hozzáférhetőbb-e a szélből termelt energia, mint ami ma, vagy a jövőben más forrásokból rendelkezésre áll.

Azt mondhatná valaki, hogy ha már Dániában olcsónak bizonyult a szélerőből nyert energia, miért ne bizonyulna nálunk is olcsónak? Ez így is volna, ha itt is olyan lenne a széljárás, mint Dániában. Azonban, sajnos

hazánk széljárása lényegesen rosszabb, gyengébb a dániai széljárásnál, amelyet élénk és gyakori tengerparti szelek jellemeznek. A gyengébb széljárású helyeken termelt energia nemcsak azért költségesebb, mert fajlagosan kevesebb a belőle kitermelhető energia, tehát rosszabb a kitermelés határfoka, hanem azért is, mert ugyanazon energiamennyiség kitermeléséhez nagyobb szélkeréktérület, tehát nagyobb szélérőgépjel is szükséges, amelynek a beruházási költsége is nagyobb.

Mindennek ellenére a szélenergia hasznosítása hazánk gyengébb széljárása mellett is kifizetődik, aminek valószínűsítésére egyelőre csak a tervezett 200 kW-os szél-erőmű gazdaságossági számítását tudjuk bemutatni. A számítás a hő- és vízerőművekkel azonos alapon történt, tehát a beruházás 25 év alatt évi 12,5%-os kamattal történő leírásával, aminek évi 13,2% annuitás felel meg. A számításban az évi energiateljesítmény megállapítása nem általános formulák felhasználásával, hanem a felállítás helyén felvett szélteljesítményi diagram analízise alapján történt. Ezért magasabb a kihasználási fok az átlagosnál. A számítás a következő:

Beépített teljesítmény	200,— kW
Értékelhető teljesítmény 18,3%	36,6 kW
Üzemi tartalék	163,4 kW
Beruházás	1 360 000,— Ft
Fajlagos beruházás a beépített teljesítményre	6800,— Ft
Fajlagos beruh. az értékelhető teljesítményre	37 200,— Ft
Kihasználási óraszám	1 600 h/év
Kiadott energia	320 000 kWh/év
Beruházás évi terhe (összesen 13,2 %)	179 500,— Ft/év
Karbantartás 1%	13 600,— Ft/év
Személyzeti költségek	3 000,— Ft/év
Összes termelési költség	196 100,— Ft/év

Energia egységköltség: $196\ 100/320\ 000 = 61$ fill./kWh.

Ebben a számításban a beruházási összeg abban az értékben szerepel, amelyért a szél-erőmű tényleg elkészülhet,

a kész dokumentáció és tervek alapján, tehát amennyiért egyedi gyártásban már akárhányadik szélérőmű is felépülhetne. Ha a rajzok, tanulmányok, kísérletek költségeit is ennek az első szélérőműnek kellene egymagában visszatérítenie, úgy a termelt energia ára több mint 50%-kal lenne magasabb. Így persze nem kaphatnánk hű képet a szélérőmű gazdaságosságáról, mert hiszen az utána következő szélérőművek megépítésénél már valószínűleg nem merülnek fel ilyen költségek és nagyobb és gazdaságosabb szélérőművek épülnek.

A gyengébb széljárás kihatása a beruházási költségekre nem arányos a felállítási helyek teljesítményével. Ha pl. egy félakkora szélteljesítményre tervezett szélérőmű méreteit az eredetiével összehasonlítjuk, úgy az utóbbiak nem kétszerakkorák lesznek, hanem csak $\sim \sqrt{2}$ -szer akkorák, mivel a szélkerékterület nagysága — és így a teljesítőképessége is —, átmérőjének négyzetével arányos. Ennek alapján a fele nagyságú szélteljesítményre tervezett szélérőmű fajlagos költségei sem lesznek kétszerakkorák azonos teljesítőképesség mellett. Ezen az alapon a gyengébb széljárású helyek szélenergiájának hasznosítása nem mondható reménytelennek, csupán gyengébben kifizetődőnek, mivel nagyobb lesz a fajlagos beruházás összege. Ugyanolyan méretű és azonos költségekkel felállítható szélérőművek ott termelnek olcsóbban, ahol jobb a széljárás. Ezért szükséges azt a környéket, ahol a szélérőmű felállításra kerül, alapos tanulmány tárgyává tenni és kikeresni azt a pontot, ahol a legkedvezőbb a széljárás, akár magaslati fekvés, akár csatornahatás, akár a talaj akadálymentessége, felszínének egyenletessége következtében. Egy évi megfigyelés, szélmérés, elegendő támpontot nyújt a hely szélenergiaviszonyainak megítélésére, mivel a tapasztalat szerint a közepes széljárású évek és a szélsőséges évek széljárása között csak $\pm 15\%$ a különbség. Ha tehát a megfigyelést egy olyan évben végezzük, amelyet az Országos Meteorológiai Intézet közepes széljárású évnek talált, úgy a mérés szintén a sok évi átlagnak megfelelő teljesítményt adja, míg ha gyenge széljárású volt az év, akkor a mérések eredményét

85%-nak tekintjük és 100%-ra egészítjük ki, hogy a sok évi átlagot kapjuk belőle. A gazdaságossági számítást azután az így nyert sok évi átlagteljesítmény alapján készítjük el.

Sík vidékeinken 55 m talajszint feletti magasságban $Q = 1500 \text{ kWh/m}^2$ év szélteljesítményre számíthatunk. Az I. táblázat szerint $\lambda = 7$ és $z = 6$ választásával kerekén 1000 kW-os szélérőművet lehetne építeni, amelynek évi termelése 1 500 000 kWh lenne. Ez a szélérőmű tehát ötször annyit teljesítene, mint a készülő 200 kW-os, de csak kb. háromszor annyiba kerülne, részben mivel a nagyobb egység fajlagosan olcsóbb, részben pedig mivel 55 m magasban a 35 m talajszint feletti magassághoz képest a szélben kb. 1,38-szor annyi energia van. A gazdaságossági számítás tehát így alakulna:

Beépített teljesítmény	1000 kW
Értékelhető teljesítmény 18,3%	183 kW
Üzemi tartalék	817 kW
Beruházás	4 000 000 Ft
Fajlagos beruházás a beépített teljesítményre	4000 Ft
Fajlagos beruh. az értékelhető teljesítményre	21 800 Ft
Kihasználati óraszám	1600 h/év
Kiadott energia	1 500 000 kWh/év
Beruházás évi terhe (összesen 13,2 %)	528 000 Ft/év
Karbantartás 1%	40 000 Ft/év
Személyzeti költségek	9000 Ft/év
Összes termelési költség	577 000,— Ft/év

Energia egységköltség: $577\,000/1\,500\,000 = 38,4$ fill/kWh.

Ez a számítás annak a feltételezésnek az alapján készült, hogy meg lehet valósítani a $z = 6$ -nak megfelelő hat-szoros nyomatéknak az átvitelét a főtengelyről a generátorra. Ha csak $z = 1$ -et, tehát csak egyszeres nyomaték átvitelét valósíthatnánk meg, akkor csak 300 kW-os szélérőművet tudnánk építeni, amelynek gazdaságossága nem sokkal volna jobb a 200 kW-os kísérleti szél-erőműnél a magasabb torony miatt. Ehhez képest már

sokkal előnyösebb volna a sokpólusú generátoros szél-erőmű 300 pólusú generátorral, amelyből ugyanezen a helyen 500 kW-os szél-erőművet építhetnénk. Egy ilyen szél-erőmű beruházásának legnagyobb költségét a 42 t súlyú 300 pólusú generátor képezi, amely egymaga 2 100 000 Ft-ba kerül, tehát jóval többre, mint a szél-erőmű összes többi része. A gazdaságossági számítás ekkor a következőképpen alakulna:

Beépített teljesítmény	500 kW
Értékelhető telj. 18,3%	92 kW
Üzemi tartalék	408 kW
Beruházás	3 000 000 Ft
Fajlagos beruh. a beépített teljesítményre	6000 Ft
Fajlagos beruh. az értékelhető teljesítményre	32 000 Ft
Kihasználási óraszám	1600 h/év
Kiadott energia	750 000 kWh/év
Beruházás évi terhe (13,2%)	396 000 Ft/év
Karbantartás	20 000 Ft/év
Személyzeti költségek	4000 Ft/év
Összes termelési költségek:	420 000 Ft/év

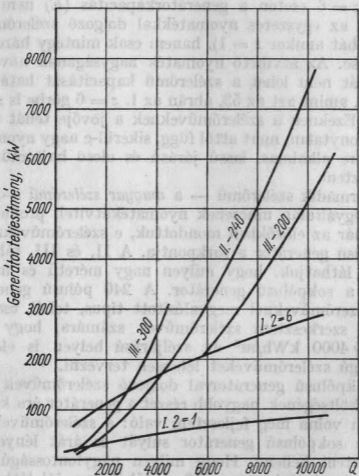
Energia egységköltség $42\,000/750\,000 = 56$ fill/kWh, tehát előnyösebb, mint a 200 kW-os kísérleti szél-erőmű és mint a 300 kW-os szél-erőmű, azonos alapokon számítva.

Mint láthatjuk, $Q = 1500$ kWh/m² év széljárású helyen gazdaságosság tekintetében már háromféle típusú szél-erőmű között válogathatunk.

Ezek között az első a $z = 1$, tehát egyszeres forgatónyomaték-átvitellel dolgozó, minden technikai nehézség nélkül megvalósítható akármilyen széljárású helyen, de csak az egyszeres nyomatéknak megfelelő mérsékelt nagyságú egységekben. Ennek szemléltetésére az 53. ábrán látható diagramokat készítettem az I., a II. és a III. táblázatok $\lambda = 7$ gyorsjárású szél-erőműveinek adatai alapján.

A második típus, amely az elsőnél nagyobb nyomaték-átvitelére képes, s a jelen példa esetében hatszoros nyo-

matékkal ($z = 6$) dolgozik, csak akkor valósítható meg, ha a nyomaték átvitelére már megfelelő, kiforrott szerkezet áll rendelkezésre, vagy ha hat lánchajtással hat



53. ábra. A megépíthető legnagyobb szélerőművek
 $\lambda = 7$ gyorsjárási tényező esetén

generátort építünk be, ami eléggé nehéz feladat. Figyelembe kell még venni azt is, hogy hatszoros nyomaték átvitele a szélerőműveknél nem hatszoros energiamennyiség átvitelét jelenti, mert a nagyobb szélkerék kisebb fordulatszámmal jár, s az átvitt energia nagysága nemcsak

az átvitt M nyomaték nagyságától függ, hanem az n fordulatszámától is;

$$N = 71\,620 M \cdot n \text{ [LE].}$$

Ezért $z = 6$ esetén a generátorkapacitás (E) nem határozosa az egyszeres nyomatékkal dolgozó szélerőművének (tehát amikor $z = 1$), hanem csak mintegy három és félszerese. Az átvihető nyomaték nagyságának növelésével tehát nem lehet a szélerőmű kapacitását hatásosan növelni, amint azt az 53. ábrán az I. $z = 6$ görbe is szemlélteti. Ezeknek a szélerőműveknek a jövője tehát egyelőre bizonytalan, mert attól függ, sikerül-e nagy nyomaték átvitelére alkalmas, lassú járású és olcsó hajtóműveket kifejleszteni.

A harmadik szélerőmű — a *magyar szélerőmű* —, esetében egyáltalán nincsenek nyomatékátviteli problémák. Mint már az előzőekben mondtuk, e szélerőműveknek a sokpólusú generátor a sarkpontja. A II. és III. táblázatokból láthatjuk, hogy milyen nagy méretű és milyen súlyos a sokpólusú generátor. A 240 pólusú generátor már vízerőműveknél megvalósított típus, tehát csak át kellene szerkeszteni szélerőművek számára, hogy $Q = 1500 \sim 4000$ kWh/m² év széljárású helyen is előnyös nagyságú szélerőműveket lehessen tervezni.

A sokpólusú generátorral dolgozó szélerőművek beruházási költségének nagyobb részét a generátor ára képezi. E téren volna még fejleszteni való: a szélerőművek céljaira a sokpólusú generátor súlyát és árát lényegesen csökkenteni kellene. Hogy milyen nagyfontosságú erre a célra törekedni, azt az 53. ábrából igen jól láthatjuk. A II.—240. görbe a 240 pólusú generátorral dolgozó szélerőmű kapacitásának növekedését mutatja a szélteljesítmény függvényében, a III.—300. görbe a 300 pólusú, a III.—200. görbe pedig a 200 pólusú generátorral dolgozó szélerőművét. Láthatjuk, hogy a görbék annyira meredek, hogy $Q = 2000$ kWh/m² év szélteljesítményen felül már más megoldás nem is jöhet szóba. Ha emellett még azt is figyelembe vesszük, hogy a hajtóművek kiküszöbölése igen nagy mértékben növeli

a szélerőmű üzembiztonságát is, be kell látnunk, hogy a jövő csakis ezeké a „magyar” szélerőműveké lehet. Láttuk az 500 kW-os szélerőmű gazdaságossági számításából, hogy ez a rendszer már ilyen nagyságrendben is jobbnak bizonyul, mert lényegesen olcsóbb energiát termel, mint bármely más erőmű.

A nálunk, a mi szélviszonyainkra megépíthető legnagyobb szélerőmű, a 2500 kW-os pedig már kizárólag sokpólusú generátorral építhető meg. Készítsük el ennek gazdaságossági számítását is a jelenlegi helyzet alapján, az eddigiekkel azonos alapon:

Beépített teljesítmény	2500 kW
Értékelhető telj. 18,3%	458 kW
Üzemi tartalék	2042 kW
Beruházás	8 500 000 Ft
Fajlagos beruh. a beépített teljesítményre	3400 Ft
Fajlagos beruh. az értékelhető teljesítményre	18 500 Ft
Kihasználási óraszám	1600 h/év
Kiadott energia	4 013 000 kWh/év
Beruh. évi terve (13,2%)	1 120 000 Ft
Karbantartás 1%	85 000 Ft
Személyzeti költségek	12 000 Ft
Összes termelési költségek:	1 217 000 Ft
Energia egységköltség:	30,3 fill/kWh.

Az 500 kW-os magyar szélerőműhöz képest tehát a 2500 kW-os ugyanilyen rendszerű szélerőmű kb. fél annyi költséggel termel, ami természetes is, mert a nagyobb egység általában gazdaságosabb. Ilyen egységek valószínűleg a Sopron—Bakony háromszögben volnának felállíthatók. A méretek is jól megvalósíthatók. Szélkerék átmérő 76,8 m. Toronymagasság 55 ~ 60 m. Generátor külső átmérője 8200 mm. Az aktív vastest szélessége 1270 mm. Hazánk energiaellátása szempontjából tehát 500 ~ 2500 kW-os szélerőművek jöhetnek szóba, nem számítva a mezőgazdasági szélmotorokat.

Ezekből a gazdaságossági számításokból világosan látható, hogy a termelési költségek legnagyobb része a beruházás törlesztéséből adódik. A termelési költségeket

tehát a legeredményesebben úgy csökkenthetjük, ha a beruházási összegek csökkentésére törekszünk. Erre akkor nyílik lehetőség, ha már egy kísérletileg bevált szélerőmű-típust sorozatban lehet előállítani. Minél nagyobb sorozatban folyik majd a gyártás, annál inkább csökken a beruházási költség.

Van azonban egy elvi jelentőségű kérdés ezekben a számításokban, mégpedig az, hogy élettartam tekintetében nem indokolt a szélerőműveket a többi erőművel azonosítani. Mint már hangsúlyoztuk, a szélerőművek berendezése távról sincs olyan rongáló hatásoknak kitéve, mint egy hő-, vagy vízierőműé. A hőerőművekben a tápvízben levő ásványi sók a lágyítás ellenére is rongálják a gőztermelő berendezéseket. A füstgázak magas hőmérséklete, kén- és kátránytartalma korróziót idéz elő, pernyetartalma pedig a ventillátorlapátokat és az érintkező felületeket koptatja.

A vízierőművek vízturbináinak lapátjaira gyakran ömlik áradásos, iszapos víz, ami szintén koptat. De a gátak, zsilipek is megérik az áradások felfokozott igénybevételét, ami miatt ezek karbantartása és a tároló medence időnkénti kotrása is költséges. A szélerőművet csupán az időjárás hőmérsékletváltozásai, a csapadékok és a szél áramlása veszi igénybe, tehát ugyanazok a hatások, amelyeknek bármilyen épület is ki van téve. A gépi berendezés pedig normális erőművi igénybevételek mellett dolgozik, de átlagos igénybevétele abban az arányban kisebb, mint a többi erőművéké, amilyen arányban kisebb a kihasználás foka is, tehát kb. negyedrészt annyi. Ez a körülmény is hozzájárul ahhoz, hogy a szél-erőmű élettartama sokkal nagyobb lehet a többi erőművékéénél, amit talán még számarányban is ki lehetne fejezni, ha az átlagos igénybevételek alapján következtetünk.

Semmi rendkívüli sincs tehát abban, ha Európa északnyugati részein szép számmal található még több mint 100 éves szélmalomok, amelyek még ma is üzemképesek, noha fából készültek. Egy korszerűen, jó anyagból épült szélerőmű legalább ilyen élettartamra számíthat.

Külföldön a szélgépek élettartamát általában 50 évvel veszik számításba, és a beruházást is ennyi idő alatt amortizálják. A közölt dán gazdaságossági számítás is 50 éves leírást vett alapul. Ha mi is így számítanánk és nagy sorozatok gyártásával a szél erőművek beruházási költségét is a legkisebbre csökkentenénk, az energia egységköltsége kilowattóránként 20 filléرنél is kevesebb lenne. Vegyük emellett azt is figyelembe, hogy ezeket az energiaköltségeket semmiféle anyagár, vagy munkabér változás nem módosítja a jövőben sem, azok tehát a beruházás leírásának egész ideje alatt változatlanok maradnak, annak elteltével pedig jóformán nullára csökkennek, mert a termelést ekkor már csak a karbantartás és ellenőrzés minimális összege terheli.

Azok az országok, amelyek abban a szerencsés helyzetben vannak, hogy 4000—10 000 kWh/m², év szél teljesítményű vidékeken 2500—9000 kW-os szél erőműveket építhetnek, a szélből termelt olcsó energia olyan bőségével rendelkeznek majd, amely gazdasági helyzetükre beláthatatlan következményekkel járhat. Ilyen területek az óceánok partvidékei, ezenkívül a passzát és a monszun zónák, továbbá a sarkvidékek területei. Európa nyugati részén (Angliában, Dániában), ezenkívül a Fekete-tenger környékén, a Szovjetnió déli és északi területein fognak nagy szél erőműveket építeni és velük a világ legolcsóbb energiáját termelni. Mi és a hasonló rosszabb széljárású országok már drágábban nyerünk a szélből energiát, de még mindig jóval olcsóbban, mint más energiaforrásokból.

ZÁRSZÓ

Az olcsón, bőségen és veszélyek nélkül termelhető energia jelentősége a népek élete és kultúrájának fejlődése szempontjából óriási. A kultúra fokát egyebek között az egy főre eső energiafogyasztás nagysága jellemzi. Az ehhez szükséges energia előteremtésére a világ minden táján igen nagy erőfeszítéseket tesznek. A klasszikus földi energiahordozókban bővelkedő országok óriási hőerőműveket építenek, melyekben naponta száz-vagon-számra tüzelik el a szenet, és az égéstermékek országnyi területeket árasztanak el. A vízenergiákban bővelkedő országok gigászi (és drága) vízerőműveket építenek; ezek völgyzáró gátjai mögött hatalmas területeken új, beltengereknek is beillő tavak keletkeznek, csökkentve a növényi és állati élet birodalmát és ezzel az ember életterét is. Az atomerőművek sugárzó melléktermékeinek ártalmait ellen kielégítően védekezni egyelőre még nem tudunk.

Lényegesen csökkennének mindezek az ártalmak, ha fokozottabb mértékben használnánk ki a természeti energiaforrásokat, és közülük is elsősorban a Nap közvetlen sugárzását, valamint a szélérőt. Az előbbi gazdaságos kihasználhatóságának területe egyelőre a forró égövekre korlátozódik, az utóbbi viszont mindenütt hozzáférhető, többé-kevésbé bőséges mennyiségű és igen olcsón hasznosítható.

A hő- és vízerőművek energiája még nem elég olcsó ahhoz, hogy az emberiség minden energiaszükségletét fedezni lehetne belőle, ezért oly alacsony a villamosenergia-fogyasztás a többi fogyasztott energiához képest. Hazánkban például az összes évi energiaszükségletnek

mindössze 5%-a a villamosenergia-fogyasztás, bár a leghigiénikusabb életviszonyokat úgy tudnánk biztosítani, ha lehetőleg minél több energiaigényünket (világítást, fűtést, közlekedést stb.) villamosenergiával elégténénk ki. Ehhez azonban olyan bőségesen termelhető olcsó energiára van szükség, mint pl. a szélenergia.

A teljesen önműködő szélerőművek jóformán beavatkozás nélkül termelnék az energiát; mivel pedig a szélerő mindenütt rendelkezésre áll, ezért minden ország hasznosíthatja is azt. A szélerő kihasználás ily módon az emberiség kultúrájának egyik igen fontos eszközévé válhat; ebben van hasznosításának egyik legnagyobb jelentősége.

IRODALOM

- Aujesky—Berényi—Béll*: Mezőgazdasági meteorológia. Budapest, 1951.
- Bacsó—Kakas—Takács*: Magyarország éghajlata. Budapest, 1953.
- Betz, A.*: Windenergie und ihre Ausnützung durch Windmühlen. Göttingen, 1946.
- Bilau, Karl*: Die Windkraft in Theorie und Praxis, Berlin, 1927.
- Dobroszardov, A. Sz.*: TV-8 szélmotor. Moszkva, 1951.
- Fateev, E. M.*: Szélmotorok és alkalmazásuk a mezőgazdaságban. Moszkva, 1962.
- Freese, Stanley*: Windmills and millwrighting, Cambridge, 1957.
- Golding, E. W.*: The generation of electricity by wind power. London, 1955.
- Gruber József—Blahó Miklós*: Folyadékok mechanikája. Budapest, 1958.
- von Heys, J. W.*: Wind und Windkraftanlagen. Berlin, 1956.
- Hütter, Ulrich*: Die Entwicklung von Windkraftanlagen, zur Stromerzeugung in Deutschland. B.W.K. 1954. 7. sz. 270—278 old.
- Kakas József—Mezősi Miklós*: Szélviszonyaink vizsgálata és az országos energiagazdálkodás. Időjárás. 1956. 6. sz. 350—364. old.
- Karmisin, A. V.*: Szél és szélmotor. Moszkva, 1952.
- La Cour, Paul*: Die Windkraft und ihre Anwendung zum Antrieb von Elektrizitätswerken. Leipzig, 1905.
- Ledács Kiss Aladár*: A szélerő hasznosításának kérdése a Rio de Janeirói világenergia konferencián és hazai vonatkozásai. Magyar Energiagazdaság, 1955. 4. sz. 121—130 oldal.
- Ledács Kiss Aladár*: Korszerű szélenergiahasznosítás Dániában. Energia és atomtechnika 1962. 1. füzet, 13—23 old.
- Ledács Kiss Aladár*: Országos energiaellátásra alkalmas szélerőművek. Energia és Atomtechnika 1962. 9. füzet.
- Meyer, W. Gustav*: Windkraft. Leipzig, 1954.

- Perli, Sz. B.*: Szélhajtású dinamó (A rádiótechnika könyvei, 9.) Budapest, 1956.
- Perli, Sz. B.*: Sajátkészítésű akkumulátortöltő szélmotor. Moszkva—Leningrád, 1953.
- Prandtl, Ludwig*: Führer durch die Strömungslehre, Braunschweig, 1957.
- Putnam, P. C.*: Power from the Wind. Van Nostrand, 1948.
- Római, 1961. évi energiakonferencia anyaga: Fachheft Wind-, Sonnen- und Geothermische Energie. Berichtwerk zur Uno-Tagung-Rom 1961. BWK 1962. júliusi füzet, 14 köt. 7 szám.
- Sevko, E. I.*: Szélmotorok. Kiev, 1955.
- Szidorov, V. I.*: Samarin, V. Sz. A D-18-GUSZMP gyorsjáratú, önszabályzó szélmotor. Moszkva, 1950.
- Tazsiev, I. T.*: A szélenergia, mint a mezőgazdaság villamosításának energiaforrása. Moszkva, 1952.
- Witte, Hans*: Windkraftwerke. Possneck, 1950.

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	5
Bevezetés	9
1. A szélenergia fizikája	29
2. Szélkerékrendszerek	46
3. Megépített szélérőgépek	61
4. Korszerű nagy szélérőművek	97
5. Olcsó szélenergia mezőgazdasági célokra	125
6. Szélérőművek méretezésének főbb elvei	135
7. Szélérőművek együttműködése országos hálózatban. Energiatárolás	140
8. Termelési és beruházási költségek	148
Zárszó	163
Irodalom	165

HIBA J E G Y Z É K

Hibahely oldal, sor	Helytelen	Helyes
17. old. 4. ábra		Jelmagyarázat : 1 = tengely, 2 = küllők, 3 = vitorlák, 4 = ház, 5 = bevájások
37. old. 7. sor fel.	tíz sáv 10 km-t jelent	tíz sáv 10×10 km-t jelent
41. old. 5. sor alul	szél ellenállását	szélellenállását
80. old. 12. sor fel.	falapátelemeket	fa-lapátelemeket
82. old. 10. sor felül 11. sor felül	kp cm ² kp cm ²	kp/cm ² kp/cm ²
88. old. 19. sor. fel.	Bogo — szélerőművek	Bogo szélerőművek
99. old. 43. ábra	Sokpólusú generátoros, ún. „magyar” szélerőmű vázlata (nincs hajtóműve)	Felgyorsító hajtóműves szélerőmű vázlata
108. old. 44. ábra	Felgyorsító hajtóműves szélerőmű vázlata	Sokpólusú generátoros, ún. „magyar” szélerőmű vázlata (nincs hajtóműve)

BOLDIZSÁR—GÓZON:

**A GEOTERMIKUS
ENERGIA
HASZNOSÍTÁSA**

A szerzők a földünkön hozzáférhető energiafajták áttekintése után a kutatások eredményeire támaszkodva ismertetik a geotermikus energia világszerte feltárt lelőhelyeit, majd igen részletesen a hazai geotermikus energia-készleteket.

Tárgyalják a gőzkutak és termálvizek energiájának hasznosítási lehetőségeit (többek között a mezőgazdaságban is), vizsgálják a gyakorlati megoldások gazdaságosságának kérdését.

Erre a műre fel kell figyelniök mindazoknak, akik — akár az iparban, a mezőgazdaságban, vagy a közületek gazdálkodásában — energiát használnak fel.

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ

Az

ÚJ TECHNIKA

sorozattal

a MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ

a műszaki fejlesztést kívánja hatékonyabban szolgálni. A sorozat célja a legfejlettebb technika, a legkorszerűbb technológia ismertetésével gyorsan tájékoztatni a mérnököket, technikusokat és az érdeklődő szakmunkásokat. A sorozat kötetei feldolgozzák a hazai és külföldi műszaki fejlődés legaktuálisabb problémáit. Szem előtt tartják a második népgazdasági ötéves terv célkitűzéseit: az ipar szerkezeti átalakításának folytatását, a tudomány eredményeinek fokozottabb felhasználását a termelésben; a takarékos gazdálkodást munkában, nyersanyagban, energiában és devizában.

EDDIG MEGJELENT:

Magyari: Fotoelektronika	14,— Ft
Bojarcsenkov—Sinjanszkij: Mágneses erősítők	5,90 Ft
Levityin: Infravörös sugárzástechnika	11,— Ft
Beyer: Üvegszálvázás műanyagok	15,50 Ft
Katisz: Optikai hőmérsékletmérők	9,— Ft
Jegorov: Kisnyomású polietilén	5,60 Ft
Zinkovszkij—Bogotov: Az űrhajózás rádiótechnikája	9,70 Ft
Csanda: Föld alatti vezetékek, csatornák, hibahelyek felderítése	22,50 Ft
Dolezsalik: Hasonlóság és modellezés a kémiai technológiában	11,50 Ft
Naslin: Az automatizált számítás alapelvei	19,— Ft
Fodor: Radioizotópos nyomjelző technika az iparban	13,50 Ft

ELŐKÉSZÜLETBEN:

- Szepessy:** Színdinamika
- Fóti:** Elektrotechnológiák
- Németh:** Égésen alapuló vegyipari eljárások
- Vámos:** Adszorpciókromatográfia a vegyiparban

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ