

---

Horváth Gábor - Tóth László

## A SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁSA

### *A téma jelentősége*

A népesség növekedésével az energiafelhasználás, és az energiatermelés is rohamosan növekvő tendenciát mutat. Jelenleg az energiatermelés és fogyasztás a leginkább környezet-szennyező emberi tevékenység. A fenntartható élet előfeltétele többek között a fenntartható energiagazdálkodás megvalósítása. Jelenlegi tudásunk szerint ennek az útnak két fontos eleme van: jelenlegi energiaforrásaink hatékony, takarékos használata, és a megújuló, környezetünk nem szennyező energiaforrások alkalmazására való fokozatos áttérés. A Föld kőolaj-, földgáz- és szénkészlete egyre apad, az atomenergia előállítás pedig olyan, környezetre káros végtermékeket eredményez, amelyek tárolása hosszú távon nagyon nehéz feladat. Megoldásként marad tehát a víz-, a szél- és a napenergia kihasználása. A vízierőművek telepítésének gátat szabnak a vízgazdálkodási, természetvédelmi szempontok, a napenergia felhasználás pedig nem biztosít nagy mennyiségű azonnal rendelkezésre álló energiát. Marad, tehát a szélenergia-hasznosítás.

Az Európai Unió összes országában jelenleg az energiafogyasztás 6 %-a származik megújuló energiaforrásból. Az Európai Parlament határozatot hozott arról, hogy a megújuló energiahordozók által termelt energia 2010-re érje el az EU-ban a 12 %-ot. Erre vonatkozóan létrehoztak egy pénzügyi alapot, mely segítségével 15000 MW teljesítményű szélenergiatermelőt kell létrehozni. Dániában, a felhasznált energia 12 %-át szélenergiatermelők szolgáltatják. Ez persze kiugróan magas érték az európai átlaghoz képest. Európában a tengerpartokra telepített szélenergiatermelők működésével, üzemeltetésével és energiaszolgáltatásával kapcsolatban szerzett kedvező tapasztalatok nyomán megkezdődött a terjeszkedés a kontinens belseje felé.

Magyarországon nemrég indult el az a folyamat, hogy a meglévő jellemző széljárásokból lehetőség legyen energia gazdaságos hasznosítására. Ennek alapja, a szélenergiatermelők működési sajátosságait figyelembe véve, a helyi szélmozgások felmérése. Az energiapolitika tervei

szerint 2010-re Magyarországon az összes energia-felhasználáson belül 6 % körül kell, hogy legyen a megújuló energiaforrások részaránya. Jelenleg ez az arány 3,6 %. Magyarországon az első szélgenerátor üzembeállítása Inotán 2000. decemberben történt. Ezzel kapcsolatban is végzett szélesebb- és teljesítmény elemzéseket a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Karának Agrárenergetika Tanszéke.

A szélgenerátorok névleges teljesítménye az elmúlt évtizedben ugrásszerűen növekedett. Az első korszerű, általános célra használható, nagyteljesítményű generátorok 50-200 kW teljesítménnyel rendelkeztek az 1980-as években, míg manapság a 600 kW - 2,5 MW-os tartományban mozog a gyártott gépek teljesítménye. A teljesítménynövekedéssel nőtt a gépészeti és villamos berendezések tömege is. A folyamatos fejlesztések során a tartóoszlopok magassága is növekedett mivel így lehet elérni a megfelelő energiataralommal rendelkező légáramokat is.

### *A szél keletkezése*

A napsütés hatására a levegő a föld felszínén különböző mértékben felmelegszik, légmozgást idézve elő. A hidegebb, súlyosabb léghalmaz süllyedve elindul a melegebb irányába, miközben a meleg levegő felemelkedve tér ki a hidegebb elől. E mozgás közös vonása a szélnek, a szélrendszereknek, amelyek lehetnek állandóak, helyiek és teljesen szeszélyes irányúak.

Az egyenlítőn a meleg levegő felemelkedik, majd egyenes mozgással halad a sarkok felé. Ez a magassági szél, az antipasszát.

A sarkok felé haladó léghalmaz a Föld gömbjéhez alkalmazkodik, ezért a pályája fokozatosan leszűkül, nyomása és súlya is megnövekszik. A leszálló levegő a földfelszín közelében az egyenlítő irányába igyekszik. Ez a passzát szél.

A passzát és az antipasszát mellett állandó jellegű a nappal tengerről, éjszaka pedig a szárazföldről fújó szél. A monszunok a tenger hűvösebb és a szárazföld melegebb levegőjét kényszerítik cserére. Az említett szélrendszereken kívül vannak időszakos és helyi jellegű

szelek. A viharokat és a zavarokat a felhalmozódott légkör erők okozzák.

### A szél, mint energia

A szélenergia hasznosításának alapvetően két irányzata különíthető el; a lokális és a villamos hálózati. Lokális felhasználáshoz tartoznak a helyi mechanikai munkát végző berendezések, ennek legismertebb változatai a gabona őrlését szolgáló szélmalmok, illetve a víz szivattyúzására használatos sűrű lapátozású, lassú forgású dugattyús- vagy membrán szivattyúkat hajtó 1-2 kW teljesítményű gépek. Helyenként az ilyen típusokat villamos energia előállítására is használják úgy, hogy akkumulátorokat töltenek és az energia felhasználása a szükséges időpontokban az akkumulátorból származik. Lokális felhasználás elsősorban ott lehet gazdaságos, ahol a villamos hálózatoktól a felhasználási helyek távol esnek és a hálózatok kiépítése egy-egy gép előállításának többszörösébe kerülnek.

Amikor  $m$  tömegű levegő  $v$  sebességgel mozog, mozgási energiája:  $E = \frac{1}{2}mv^2$  [J]

Megfigyelhető, hogy a szélirányra merőleges  $A$  felületen egységnyi idő alatt  $V$  térfogatú levegő halad át.

Így a térfogatáram:  $Q_V = \rho v_x A$  [ $m^3s^{-1}$ ]

A teljesítmény a dinamikus nyomás és a térfogatáram szorzata:  $P = \frac{1}{2}\rho v_x^3 A$  [W]

Ez az ideális teljesítmény, a gyakorlatban ennek csak töredékét hasznosítjuk. A fenti következtetések alapján állítható:

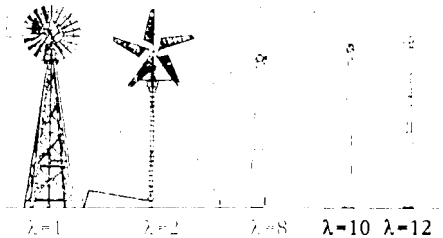
- a teljesítmény arányos a sűrűséggel;
- vízszintes tengelyű szélkeréknél a teljesítmény arányos a lapátok által súrolt felülettel;
- a teljesítmény a szélesebbég harmadik hatványával arányos.

A szélkerekek vizsgálatához bevezették az ún. gyorsjárású tényezőt ( $\lambda$ ), amely a szélkerék-lapát kerületi sebességének ( $u$ ) és a zavartalan szélsebességnek ( $v_0$ ) a viszonyszáma:  $\lambda = u/v_0$

A szélkerekek a gyorsjárású tényező alapján két nagy csoportra oszthatók:

- gyorsjárású gépek ( $\lambda < 4$ ), szélturbinák, áramtermelő gépek
- lassújárású gépek ( $\lambda \geq 4$ ), szélmotorok, víz húzó gépek.

A szélerőgépek teljesítményjellemzőit a  $\lambda$  függvényében szokás megadni, így a teljesítmény:  $P = c_p \cdot v_0^3 \cdot \rho / 2$  [W], ahol  $c_p$  a teljesítménytényező.



1. ábra • A gyorsjárású tényező alakulása különböző szélkerekek esetén

### Mérések

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

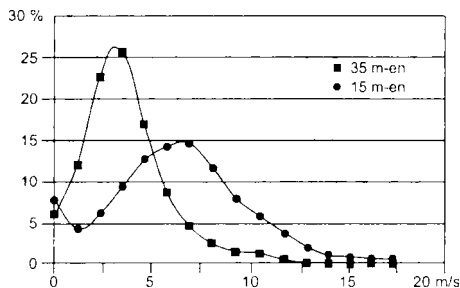
Hazánkban az 50-100 m oszlopmagasságú szélgenerátorok telepítése jöhet szóba, ezért a mérési eredményeket a dán minta alapján 30, illetve 50 m-re célszerű átszámítani. Az összefüggés:  $v_1/v_2 = (z_1/z_2)^p$ ; ahol:  $v_1$  a szélesebbég  $z_1$  magasságban,  $v_2$  a szélesebbég  $z_2$  magasságban, a  $p$  kitevő jellemző értéke 0,14.

A valószínűsíthetően alkalmas területek meghatározása után szükséges a ténylegesen megfelelő hely kiválasztása.

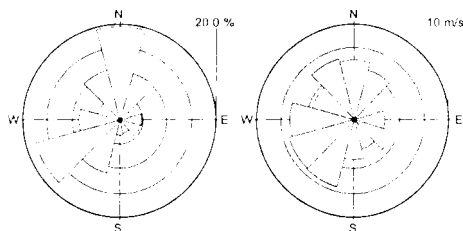
Természetesen a szélenergia – mérő rendszer kiépítése a meteorológiai praktikumban elterjedt összeállításokéval azonos, jellemzően három fő egység található meg benne: a jeladó az adatgyűjtő és az adatfeldolgozó.

Az adatgyűjtő általában mikroprocesszorral rendelkező egység, mely alkalmas a jeladó által szolgáltatott impulzusok számlálására és tárolására. A mintavételek 1–10 másodpercenként történnek. Minél nagyobb a mintavétel gyakorisága, annál precízebb eredmények várhatók.

A széljárásra vonatkozó legfontosabb információk a szélesebbég eloszlási statisztikákból nyerhetők ki. A telepítendő szélerőmű várható hozamának lehetséges legpontosabb kalkulációjához a Windsiter a szélesebbégeket harminc osztályba sorolja, mindegyik osztály 1m/s szélességű. A műszer lehetővé teszi egy második anemométer elhelyezését, mely segítségével a helyi széljárásról pontosabb kép kapható a különböző magasságokban. A méréseket általában 15 és 35 m magasságban végzik.



2. ábra • Szélsebesség-eloszlás



3. ábra • Szélirányeloszlás

A – a jellemző szélirányok eloszlása  
B – átlagos szélsebességek

A szélergiapotenciál-felmérés további fejlődésének kilátásai igen jók, a folyamatosan gyarapodó számítógépes erőforrások és a számítási eljárások hatékonysága lehetővé teszi a bonyolultabb modellek folyamatos fejlesztését. Másrészt a nagy adatállományok a hosszú távú szélklímára, és a nagy felbontású topográfiára vonatkozóan lehetővé teszik világszerte megbízható szélátlaszok készítését, valamint szél-turbinák pontos elhelyezését.

#### A szélgenerátor technológia általános helyzete

A hálózatba kapcsolt szél-turbinák technológiája ma már mind a lapátozás, mind a kapcsolódó egységek szempontjából fejlett. A telepített kapacitás ma már 18.500 MW. Az utóbbi öt évben a telepített kapacitások 45–75%-os növekedést mutattak évente. 1999-ben csak Németországban 1400 MW kapacitást állítottak üzembe. A szélerőművek gyorsan üzembe helyezhetők. Például egy 50 MW kapacitású szélerőmű a szerződések aláírásától számított egy éven belül működőképessé lehet. Kidolgozásra kerültek a kis indítási, működési sebességű szélgenerátorok

és a mechanikus áttételek nélküli sokpólusú generátorok. Ez utóbbi, további 5-10%-os teljesítménynövekedéssel jár. Általában a technológiát három csoportra oszthatjuk.

Az elsőbe tartoznak a közép- illetve nagyméretű szélgenerátorok, melyek teljesítménye a 80-as évek óta 50 kW-ról 600-2000 kW-ra nőtt. A kereskedelemben kapható szélgenerátorok újabb, 1-2,5 MW-os generációját már telepítik, lecserélve a kisebb teljesítményűeket. Ez önmagában átlagosan 4-5-szörös teljesítménynövekedést jelent az adott területeken. A hálózatra kapcsolt szélgenerátorok gyakran szélfarmon üzemelnek. Többféle szélkerékvaltozat is létezik, jelenleg a legelterjedtebb a háromlapátos, vízszintes tengelyű berendezés, mely szinte teljesen állandó forgási sebességgel működik. A változó fordulatszámú megoldások szintén ígéretes előnyökkel kecsegtetnek, és ma már rendelkezésre állnak a szél-tartalékot értékelő szoftverek és technológiák.

A második csoportba tartoznak a hibrid energiarendszerek közepes méretű szélgenerátorai, melyeket más energiaforrásokkal kombinálnak, mint pl. napelemekkel, dízelgenerátorral, ezeket vízhálózatok töltésére, vagy más speciális célokra használják, mint vízpumpálás, akkumulátor feltöltés és sótanítás (10–150 kW tartományra). Ezekkel a rendszerekkel lehet megvalósítani a szigetüzemű energiatermelést.

A harmadik a kicsi, különálló szélkerekek csoportja, amelyeket akkumulátortöltésre, vízpumpálásra, fűtésre használnak (10 kW tartomány alatt). Ez gazdaságosság szempontjából a legsikeresebb megoldás. Jelenleg 200.000 akkumulátortöltő kis szélgenerátor üzemel a világon. A legelterjedtebb szélergiatechnológia még mindig a víz-húzó szélmotor. A szélmotorokat a mezőgazdaságban főleg szivattyúzásra, ritkábban egyéb gépek meghajtására használjuk. A víz-húzó, illetve a víz-temelő szélmotoroknál a lapátkerék forgó mozgását kulisszás, excenteres hajtóművek alakítják át a szivattyú által hasznosítható egyenes vonalú mozgássá. Ha a lapát-tengely és a dugattyúrúd közé áttétele mechanizmust építenek, akkor a dugattyún hasznosítható nyomaték is módosítható. Az ilyen megoldások olyan kutaknál is alkalmazhatók, ahol a vízszint a talajszinttől 20-30 méter mélységben van, tehát nagyobb haj-

tónyomaték szükséges. Másik megoldás, ha a forgattyú membránzivattyút működtet. Itt kisebb a vízemelő magasság, de igen nagy a vízszállító képesség. Világszerte 1-2 milliót használnak rendszeresen, több mint 50 aktív gyártó ismert. A technológia felfutását elterjedésének számadatai jelzik.

#### *Vízszintes tengelyű szélgenerátorok felépítése és részei*

A szélmotorok a levegő mozgási energiáját alakítják át forgó mozgási energiává. A lapátkerék tengelye megegyezik a szél irányával. A korszerű szélgenerátorok 2 vagy 3 szárnylapáttal rendelkeznek aminek gazdasági és kiegyensúlyozási okai vannak. A gépház nagyságától függően 30-120 m magas tornyokon van elhelyezve, benne a villamos generátor, amelyet szélkerék hajt. Fontos eleme a szélturbinának a szélirány beállító berendezés, amely függőleges tengely körül elfordítja a tornyon levő házat, és ezzel eléri, hogy a lapátkerék a szélirányra merőlegesen álljon. A szárnylapátok hidraulikusan elforgathatók, így fékező hatást is kiválthatnak. A torony magassága általában 1-1,5-szerese a lapátkerék átmérőjének.

A tengely, amin tárcsafék van, továbbítja a forgatónyomatékokat a váltóhoz. Nagyobb gépeknél bolygókerékes váltóművet alkalmaznak. Általában aszinkron generátort építenek be, a szinkron típusú precíz fordulatszámot igényel. A szabályozó feladata, hogy illeszse a rendelkezésre álló szélenergiát a szükséges teljesítménnyel, illetve beállítsa a lapátkeréket a forgatható házon keresztül. A ház mindig megközelíthető a karbantartás miatt. A lapátkerék illetve a gépház a toronyra van szerelve.

A szélgenerátor legfontosabb eleme a lapátkerék, amely a levegő mozgási energiáját alakítja át a főtengelelyre ható forgási energiává. A főtengeley jó minőségű edzett, ötvözött acél. A főcsapágy, amely a főtengeley tökéletes megfutását is biztosítja, kétsoros golyóscsapágy. A csapágyház a gépház padlójához van hegesztve. A csapágy veszi fel a széllökésekből, a tömegterhelésekből és hajlítónyomatékokból adódó terheléseket, ezzel is mentesítve a hajtóművet. A tengelykapcsoló csillapítási funkciót is ellát a hajtómű és a generátor között, gumibetétek segítségével.

A szárnyra aerodinamikai felhajtóerő hat,

ez a megfelelő széláram kialakulásával jön létre, mint a repülőgépeknél. A szárnylapát mentén keletkező megfúvási szöveget állandó értéken kell tartani. A felhajtóerő arányos ezzel a szöggel. A lapátkeréket forgató erő a szárnylapáton keletkező felhajtóerőből származik. Ebből jön létre a tengelyen a forgatónyomaték, s az ellenállás-erő kelti az oszlopon ható hajlító nyomatékokot.

Manapság a hengerelt acél torony a legelterjedtebb Európában, míg az Egyesült Államokban a rácsszerkezetű. A kisebb generátoroknál alkalmazzák az acélsodronyos kifeszítést is, az egyszerűbb szerkezet miatt. A torony magasságát optimalizálni kell a jobb szélviszonyok, szilárdságtani és gazdasági tényezők függvényében. Telepítésnél figyelembe kell venni a házat felhelyező daru elhelyezését is. A kábelezés a földben vezet a transzformátorhoz. A csoportos telepítésnél először összefutnak a vezetékek, majd azután kapcsolódik a hálózatra. A legjobb szélpotenciálú környezetben is figyelembe kell venni a kábelezési költséget a fő hálózathoz. A szélmérő (anemométer) fontos részegysége a szélgenerátornak. Segítségével felmérhetjük a gép vagy szél erőmű park hatásfokát. A szabályozás és viharvédelem a szélsébségtől függően vezérelt. A vezérlést a beépített érzékelők jelét felhasználó programvezérelt mikroprocesszor és központi számítógép végzi. E rendszerek csak villamos hálózattal képesek működni, csak így biztosítható a hálózati frekvencia. A generátor egy különleges kialakítású 4/6 pólusú aszinkron generátor. Alacsonyabb szélsébségeknél a vezérlés a 6 pólusú rendszert, nagyobb szélsébségeknél pedig a 4 pólusú kört kapcsolja be, ezzel biztosítja a gép jobb kihasználtságát. Saját termosztátos, folyadékűtéses rendszerrel van megoldva a berendezés üzemi hőmérsékleten való tartása.

A korszerű szélgenerátorok már két generátorral dolgoznak, a kisebb teljesítményű generátor kis szélsébségnél, a nagyobb pedig a 10 m/s feletti szélsébségnél kapcsolódik a rendszerre. A lapátkerék forgási sebessége és egyéb műveletek ellenőrzéséhez használt műszerek, a lapátot szélirányba állító elektrohidraulikus szabályozó egység, a lapátmozgás forgási sík szélirányba fordításához rendszeresített segédmotorok áramforrása a hálózat. Ennek megoldására a hajópadló és a torony közé egy elektromo-

torral hajtott homlokfogaskerék-hajtóművet építettek be. Egy hidraulikus tárcsafék segíti és védi a követő rendszert, a pontos irányba állítást.

Az irányba állítást és az egyéb vezérlési funkciókat mikroprocesszor végzi el. A rendszer saját vezérlő programmal működik, melynek ellenőrzése ki- és beírása a toronyban található terminál segítségével történik. A terminál a vezérlőszekrényben található, melynek saját kijelzője és billentyűzete van. A processzor a vezérlésen kívül tárolja a rendszer üzemmenetét amit meghatározott időközönként ki lehet olvasni, majd a kapott adatokból számítógép segítségével pontosan ki lehet elemezni. Így meg lehet vizsgálni az utolsó eltelt időszakban a gép pontos működését, melyek a gép későbbi üzemeltetéséhez nagy segítséget nyújtanak. A vezérlés természetesen megoldható *online* módban is, amilhez az kell hogy a gép össze legyen kötve (rádiófrekvenciás úton, telefon v. villamos hálózaton stb.) a központi vezérlővel.

A szélgenerátort 30-120 méter magas, zárt acél oszlop toronnyal gyártják. A torony alsó részében található a villamos elosztó szekrény és a vezérlő terminál. Innen vezet egy alumínium létra fel a gépházba. A tornyot természetesen villám- és rövidzár védelemmel látják el.

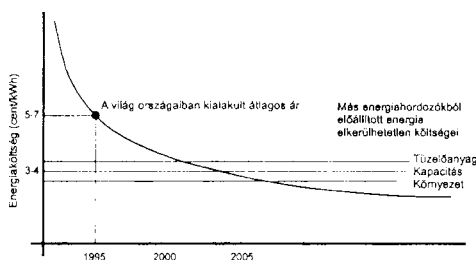
### *A szélerőművek létesítésének feltételei*

Ahhoz, hogy szélmotort, vagy szél erőművet létesítsünk számos követelményt kell mérlegelni. Ezért gondos előkészítést igényel. A megvalósíthatósági tervek elkészülte után megszületik a döntés, hogy az adott helyre tervezett szélerőmű megvalósulhat-e. Ha a döntés a megépítés mellett szól abban az esetben a finanszírozáshoz szükséges üzleti tervet kell elkészíteni. A beruházóknak fel kell támiuk a lehetséges állami és EU támogatási lehetőségeket ill. banki forrásokat. A finanszírozási struktúra elkészítése után a tervezési feladat a gyártó által átadott tervrajzok honosításával folytatódik. Az elkészített tervrajzok alapján a szélerőmű építési ügyében szakhatósági állásfoglalást kell beszerezni. A szakhatósági engedélyk beszerezése után kapható meg az építési engedély. A hatályos építési engedély birtokában a realizálódott finanszírozási struktúrával lehetséges a gyártóval a szállítási, és általában a karbantartási szerződést megkötöni. A szélerőművek létesítésekor az Európai

Szélenergia Egyesület ajánlja környezeti hatástanulmány elkészítését. A kötelező hatásvizsgálat körét szabályozó 171/1999 (XII.6.) kormányrendelet a szélerőművek létesítése esetére nem írja elő környezeti hatástanulmány készítését. A Magyar Szabványügyi Titkárság kifejezetten a szélenergia hasznosításával kapcsolatosan semmilyen szabványt nem tart nyilván.

### *A szélenergia gazdaságossága*

A szélenergia gazdaságossága alapvetően meghatározza a telepítési volument. Hosszútávon azonban számolni kell azzal, hogy az összes energiaforrás közül a legtisztábbnak tekinthető semmiféle hulladékot nem bocsát ki. Európai országokban a széndioxid kibocsátás országonként limitált, e szempontból jelentősen megnő a felhasználhatósága, hiszen a telepítése semmiféle korlátok közé nemzetközi egyezmények alapján nem esik. A jelenlegi árviszonyok okozta esetleges veszteségek enyhítése miatt a szélenergia szinte a világ minden országában államilag támogatott: vagy a termelt energiát támogatják, vagy a beruházást, azaz a berendezés létesítését. A nemzetközi szélenergia bizottság által meghatározott trendet a következő ábra szemlélteti. Az ábrából jól látható, hogy az árak igen jelentős csökkenő trendje van és 2005 környékén már versenyképes lesz az egyéb energiaforrásokkal is.



4. ábra • A szélenergiából nyert villamosenergia árának változási trendje

### *Összefoglalás*

A kutatók hosszabb ideje foglalkoznak a szélenergia nagyobb volumenű magyarországi alkalmazásával. Ilyen célra a nagy teljesítményű szélturbinák alkalmasak, amelyek a villamos hálózattal összekapcsolva működnek és az

áramszolgáltató vállalatoknak adják át a termelt energiát. A Szent István Egyetem kutatói megkísérelték bizonyítani, hogy a szélenergia-potenciál megfelelő a szélenergia gazdaságos hasznosítására. Egy szélerőmű valósult meg napjainkban Kulcson a Duna-parton. A Kulcs községben megvalósításra került Enercon típusú berendezés 600 kW névleges teljesítményű, és – a Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület által mért adatok alapján – a helyi szélviszonyok mellett éves szinten várhatóan 1200-1400 MWh energiát termel. A szélgenerátor teljes létesítése, a berendezés vásárlása, felállítása, a tervek elkészítése és hálózatra csatlakoztatása kb. 200 millió Ft-ba került. A berendezés létrehozásában és a megvalósításban az E.ON

Hungária és az Első Magyar Szélerőmű Kft. szakemberei vettek részt. Az oszlop 65 m magas és a lapátok vége 89 m magasságban van. A szárnylapátok hossza 24 m. A rendszer teljesen automata üzemmódban működik. A gépházon lévő szélirány- és szélesebbségmérő érzékeli a mindenkori értékeket és ennek megfelelően szabályoz.

Magyarországon ezután nemcsak beszélünk a lehetőségekről, de reméljük: bizonyítást nyert, hogy a rendszer megvalósításában bízó kutató szakemberek igazat szóltak, amikor kijelentették, hogy Magyarországon sok olyan terület van, amelyek szélben eléggé gazdagok ahhoz, hogy eredményesen tudjunk szélenergiát energiatermelési célokra felhasználni.

---

IRODALOM:

Horváth G.: *A szélgenerátor-oszlopok jellemzőinek összefüggései*. Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2001.

Horváth G., Tóth L.: *The activities in wind energy in Hungary*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Science, Vol 5/2, pp. 191-200, 2001.

