

A FÜGGŐLEGES SZÉLPROFIL HATÁSA SZÉLERŐMŰVEK ÜZEMÉRE

EFFECT OF THE VERTICAL WIND PROFILE TO THE WIND TURBINES' OPERATION

Prof. Dr. Patai István¹ Ph.D
Prof. Dr. Tóth László² DSc
Dr. Schrempf Norbert³ Ph.D

*1. Tessedik Sámuel Főiskola, Mezőgazdasági Víz- és Környezetgazdálkodási Kar
Műszaki és Vízgazdálkodási Intézet*

2.,3. Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet

Összefoglalás

A szélerőművek rotorszárnnyai üzemelés közben változó sebességű légáramban dolgoznak. Ennek következménye a szárnyak változó dinamikus terhelése. A függőleges szélprofil megadó Hellmann-kitevő ismeretében felírhatók a szárnyak dinamikai egyenletei, amelyek megadják a szárnyak változó teljesítmény- és nyomatékviszonyait egy-egy körülfordulás közben.

Kulcsszavak: szélenergia, szélerőmű, függőleges szélprofil, dinamikus terhelés

Summary

During operation the blades of wind generators work with different wind speed areas in the course of the rotating. It has results in the different dynamic loading of the blades. The vertical wind profile is determined by the Hellmann coefficient. The dynamic equations are given to analyse the power and torque relations for the blades of wind turbines.

Keywords: windenergy, windturbine, vertical wind profile, dynamical load

BEVEZETÉS

A szél sebessége a terep felületi sűrűsége („szélnyírás”) következtében a földfelszíntől mért magasságtól függően változik. A változás mértéke és módja számos tényező függvénye (domborzat, tereptárgyak, stb.). A szélesebesség lokális magasságfüggése, azaz a függőleges szélprofil jelentős hatású a szélerőművek üzemviszonyainak alakulása szempontjából. A szélirány változásával - a sebességétől és jellegétől függően - az irányába eső terep miatt a szélprofil is változik, s igen jelentős eltérések lehetnek.

A szélerőművek toronymagasságának (tengelymagasságának) növelését elsősorban a nagyobb magasságokban kialakuló szélesebességek, szélteljesítmény jobb kihasználása indokolja. Az szélerőművek, szélparkok tervezésénél, a turbinák adott helyre való adaptálásánál az ezzel járó kísérőjelenségek számbavétele általában háttérbe szorul, különösen akkor, ha előzetesen nem végeztek mélyreható energiatermelést prognosztizáló, több magasságra kiterjedő helyi szélméréseket. A mérés és értékelés nem hanyagolható el, mivel a szélprofiltól függően alapvetően változnak a szélerőművek üzemeltetési feltételei, a kitermelhető energia mennyisége, a berendezésekre ható specifikus erőviszonyok, már a telepítési költség az alapozással szembeni kívánalmak miatta, várható szerviz és karbantartási igény (üzemeltetési

költségek), stb. E hatásmechanizmusok jó közelítésekkel előre számíthatók. Ezért is vizsgáltuk ezeket a folyamatokat, amelyeknek egy szegmensét mutatjuk be a következőkben.

VIZSGÁLATI ANYAG, MÓDSZER

A nemzetközi szakirodalom megállapításait a hazai mérővizsgálatok is igazolták, s általános tapasztalat, hogy a terepfelszín felett – az ország tájegységeire jellemző specifikumokkal - a magassággal arányosan a szélsébség növekszik (Tóth–Horváth, 2003, Patay 2003.) Az energetikai célú szélméréseknél a szélsébséget, kettő vagy több szinten a mérő anemométerek (kanalas szélsébség mérők) magasságában határozzuk meg, s e pontokból számítják a szélprofil..



Mérő torony 2 db anemométerrel
Wind measuring Tower with 2 anemometers



Mérő torony csúcsa az érzékelőkkel
Wind measuring Tower with sensors on tip

1. ábra Szélmérő oszlopok
Fig.1. Wind measuring Tower

Az ilyen mérésekkel a működtetni kívánt szélerőmű rotortartományában (lapátkerék átmérő) uralkodó szélviszonyoknak csak egy kis részéről származik közvetlen információ. A mért adatok alapján elméleti összefüggések segítségével számoljuk ki a szélsébség értékeket a szükséges magassági tartományra. A számos ismert függvény közül a szélerő hasznosítás gyakorlatában az ún. Hellmann-kitevős hatványfüggvény terjedt el (Lysen, 1982, Johansson, 1994):

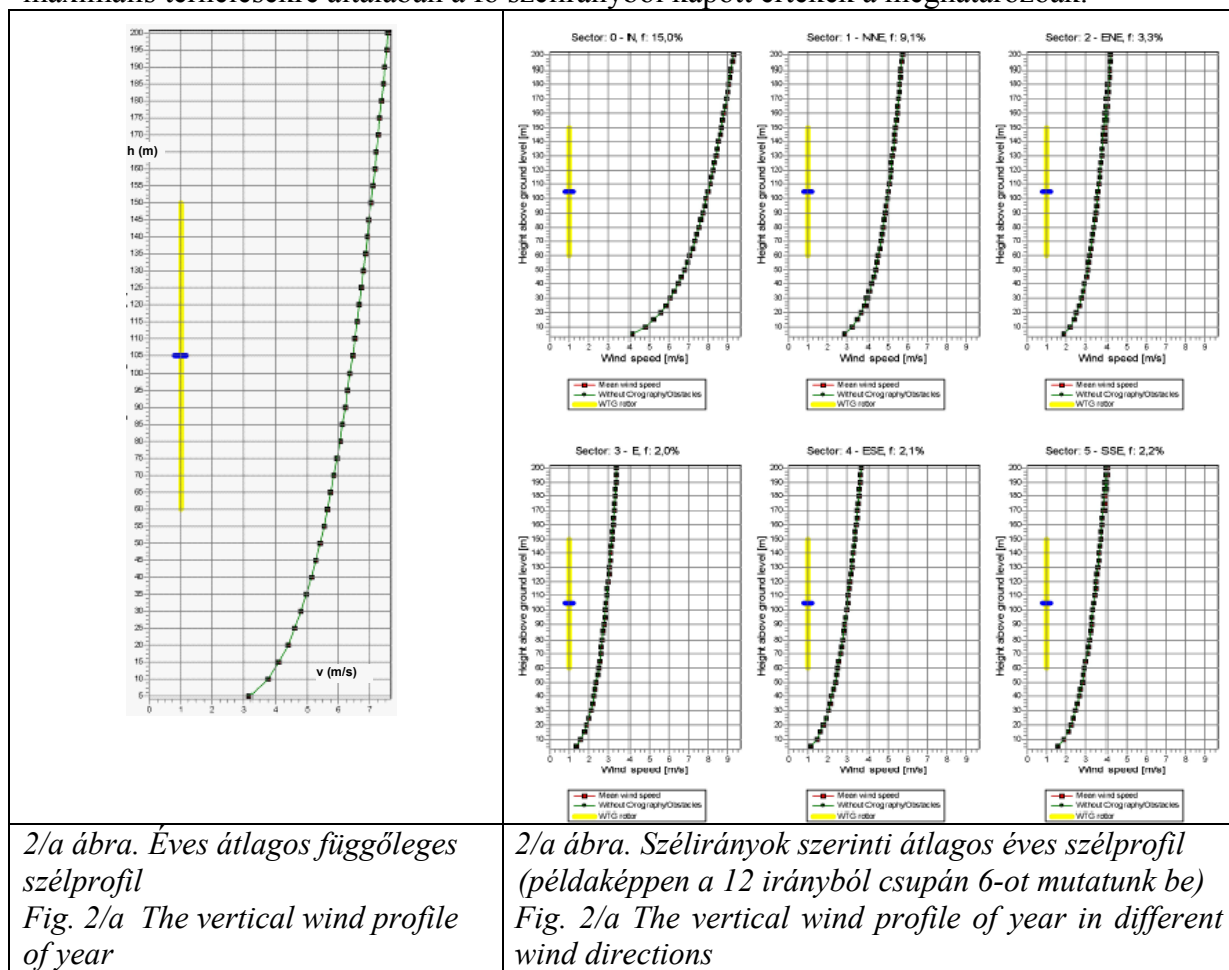
$$\frac{v}{v_{\text{ref}}} = \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}$$

ahol: v : a keresett (ismeretlen) szélsébségérték a h magasságban,
 v_{ref} : az ismert (mért) szélsébség a h_{ref} referencia magasságban,
 α : a magassági hatványkitevő, vagy Hellmann-tényező.

Számos vizsgálat (Tóth, 2005, Schrempf, 2007) és tapasztalat igazolta, hogy e formula jól használható a függőleges szélprofil leírására, problémát az α tényező helyes megválasztása (alkalmazása) jelent.

Így készült Magyarország széltérképe is (OMSZ, SZIE és DE szakembereinek közreműködésével), amelyhez a mérések két anemométerrel általában 20-60 m-es magasságban folytak, de az értékek a területre „jellemző” α tényezővel 25, 50, 75, 100, 125 és 150 m-es magasságra is meg lettek határozva. E mérésekhez nagyobb biztonságot nyújtott a OMSZ több éves 10 m magasságra korrigált szélsébség adatbázisa.

Végül is mért adatok alapján a Hellmann tényező számítható és annak ismeretében hozzávetőlegesen 200 - 250 m-es magasságig megfelelő értéket kapunk. Az ellenőrzések magasabb oszlopokon történtek, illetve néhány helyszínen akusztikus mérőegységgel (Sodar) is, amely 10-20 m-es magassági sávokban is képes a sebesség értékeket meghatározni egészen 250-300 m-es magasságig. Az éves szélmérésre meghatározott alfa tényező legnagyobb problémája, hogy a 12 vagy 16 szélirányban mért szélprofilokat átlagolja, emiatt a különféle irányokból nyerhető energia, illetve a berendezésre ható terhelések kevésbé pontosak, hiszen a maximális terhelésekre általában a fő szélirányból kapott értékek a meghatározóak.



2. ábra, Szélprofilok éves mérés alapján
Fig. 2. The Vertical Wind profile of one year measuring

1. táblázat: Szélirányok szerinti átlagos éves Hellmann tényezők és azok átlaga
(a szélirányok gyakoriságának 48 %-a két szélirányba esett - 0 (észak), 8(dél-délnyugat).

Table: Average Hellmann-coefficients of year in different Wind Directions

Szélirány	Hellman α
0	0,216
1	0,188
2	0,21
3	0,251
4	0,309
5	0,252
6	0,221
7	0,194
8	0,263
9	0,26
10	0,256
11	0,248
Átlag	0,24

. A 2/a. ábrán konkrét mérések alapján kapott átlagos szélprofil mutat, míg a 2/b ábrákon ugyan ezen mérőszorozatonál, a 12 szélirányban mért, igen szembetűnő eltéréseket mutató szélprofilból 6 látható. Az 1. táblázatban pedig az egyes szélirányokból kapott átlagos alfa értékek találhatók, melyek között az eltérés a 50-60 %-ot is elérheti.

A hazai széltérkép mérései alapján, melyek az ország minden tájegységét lefedték a hatványkitevő tartományára a

$$0,15 \leq \alpha \leq 0,45$$

értékhatár adódott. A kisebb α értékek főként a síkvidéki-, a nagyobbak a domb- és az erősebben szabdaltsági hegyvidéki régiókra adódtak.

A szél potenciális teljesítménye

A levegő mozgási energiáját jó közelítéssel, az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2;$$

Ha az áramló tömeg helyébe (m) a $(\rho \cdot A \cdot v)$ írjuk, akkor adott ponton a szél potenciális

teljesítményét kapjuk
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W]$$

ahol ρ = a levegő sűrűsége, $[kg/m^3]$

A = az áramlási keresztmetszet $[m^2]$, $D^2 \pi/4$, aho D = a lapátkerék átmérője.

v : a levegő (átlagos) sebessége az áramlási keresztmetszetben $[m/s]$

Egy egységnyi A estén a fajlagos potenciális teljesítményt kapjuk w/m^2 dimenzióban.

A fajlagos teljesítményt a magasság függvényében a fentebbi egyenletek alapján:

$$\left(\frac{v}{v_{\text{ref}}}\right)^3 = \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}}\right)^{3\alpha} = \frac{P}{P_{\text{ref}}};$$

A P_{ref} a referenciamagasságban adódó fajlagos szélteljesítmény. Az egyenletből:

$$P = P_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{h}{h_{\text{ref}}}\right)^{3\alpha}$$

Szélerőmű teljesítményviszonyai

Az előzőkből látható, hogy a teljesítményt alapvetően a szél sebességének értéke határozza meg, mivel a 3. hatványon szerepel. Jelentős szerepe van a szélkerék átmérőjének is, hiszen az A áramlási keresztmetszet a lapát átmérő által meghatározott, a lapatokkal súrolt felületet jelenti. A v értékét a teljesítmény számításoknál a lapátkerék forgásközéppontjára vonatkoztatjuk, amely a szélprofilnál a gondola magasságban jelentkező szélesebesség értékével azonos.

A minél nagyobb erőműteljesítmény elérése, a toronymagasság és a rotorátmérő növelésére ösztönöz. Kérdésként vetődik fel, hogy mi az ésszerű toronymagasság, ill. ehhez mekkora rotorméret rendelhető. Érdekes ezért megvizsgálni, hogy a függőleges szélprofil alakulása hogyan befolyásolja a szélerőmű teljesítményét, az energiatermelés üzemi viszonyait.

Elemezzünk egy háromlapátos rotort, amelynek a tengelymagassága a terepfelszíntől h_0 , a rotor sugara R , akkor a rotor által súrolt legnagyobb magasság: $h_{\text{max}} = h_0 + R$, a legkisebb $h_{\text{min}} = h_0 - R$ (3. ábra). Vizsgáljuk meg az egy szárnyra jutó szélteljesítmény alakulását (számos fontos, de a probléma megvilágításához kevésbé számottevő tényező elhanyagolásával) lapát felső holtponti helyzetében. A forgómozgás szögsebességét tételezzük fel, hogy ($\omega = \text{konstans}$) állandó.

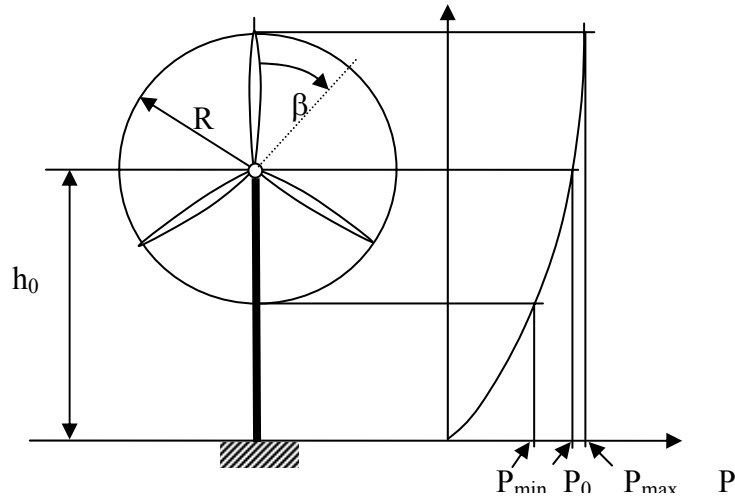
A megrajzolt szélprofil alapján látható, hogy a lapát két vége eltérő szélesebességű tartományban dolgozik. A szárnyra ható átlagos szélesebességet az egyszerűség kedvéért a közepes sugár (R_k) helyén uralkodó szélesebességgel jellemezzük. Így a felső holtponti helyzetben lévő lapátra jutó fajlagos szélteljesítmény, amely a lehetséges maximum:

$$P_{\text{lmax}} = P_0 \cdot \left(\frac{h_0 + \frac{R}{2}}{h_0}\right)^{3\alpha} = P_0 \cdot \left(1 + \frac{R}{2h_0}\right)^{3\alpha}$$

ahol P_0 : a tengelymagasságban mérhető fajlagos szélteljesítmény $[w/m^2]$.

Legkisebb a szárnyra jutó fajlagos szélteljesítmény az alsó holtpontban:

$$P_{\text{lmin}} = P_0 \cdot \left(\frac{h_0 - \frac{R}{2}}{h_0}\right)^{3\alpha} = P_0 \cdot \left(1 - \frac{R}{2h_0}\right)^{3\alpha}$$



3. ábra.

Szélprofil és szélérőmű teljesítményviszonyai

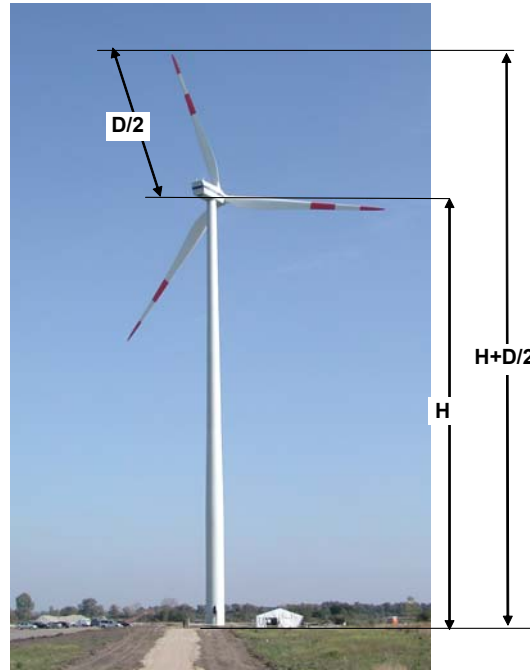
Fig. 3. Load relations of the blades

$$\Delta P_l = P_{l \max} - P_{l \min} = P_o \cdot \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha}$$

Az $\left(\frac{R}{h_o} \right)^{3\alpha}$ egy **dinamikai tényezőt** jelent, a szárny körülfordulása közbeni a fajlagos szélteljesítmény változás eredményeként. A felső holtponttól mért tetszőleges β szög esetén így az egy szárnyra jutó aktuális fajlagos szélteljesítmény:

$$P_l = P_o \left(1 + \cos \beta \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha} \right)$$

A teljes szélteljesítményt úgy kapjuk meg, hogy figyelembe vesszük az egy szárnyra jutó keresztmetszetet (A_1):



4. ábra 2 MW-os 108 m magas 90 m rotorátmérőjű szélérőmű (Felsőzsolca)

A képletekben $H = h_o$, $D/2 = R$

Fig. 4. Wind power plant with 2 MW, on 108 m high tower ($H = h$) and 90 m rotor diameter ($D/2 = R$)

A két fajlagos teljesítmény különbsége:

$$P_{1t} = P_1 \cdot A_1 = P_1 \cdot \frac{R^2 \pi}{3};$$

A három szárnyas rotorra vonatkozóan:

$$P = P_{1t} + P_{2t} + P_{3t} = P_o \left(1 + \cos \beta \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha} \right) + \left(1 + \cos (\beta + 120^\circ) \cdot \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha} \right) + \left(1 + \cos (\beta + 240^\circ) \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha} \right)$$

$$P = 3P_o = 3 \cdot \frac{R^2 \pi}{3} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_o^3 = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v_o^3 \quad \text{adódik,}$$

ahol v_o a tengelymagasságban mérhető széleseesség. Vagyis a kiindulásnál feltételezett eredmény adódik. A lényeg azonban az, hogy összefüggést találtunk a függőleges szélprofil és a szélérőmű fő geometriai jellemzői között, amit érdemes kielemezni.

A megelőző egyenletbe többször előforduló tényezőt nevezzük

$$\eta_d = \left[\frac{R}{h_o} \right]^{3\alpha}$$

dinamikai tényezőnek, amely a lapátok terhelésingadozásának mértékét mutatja meg. Világosan látszik, hogy a sugár növelése azonos tengelymagasság esetén növeli a dinamikai tényezőt, azaz a szárnyak egy körülfordulás alatti terhelésingadozását.

Ugyanez a helyzet a függőleges szélprofil meghatározó Hellmann-kitevővel is: állandó R/h_0 viszonynál a nagyobb α -val jellemzett helyen a szélerőmű dinamikai terhelése exponenciálisan nő.

Mivel a rotor szögsebessége (ω) minden szárnyra azonos, a dinamikai tényező a nyomatékingadozást is meghatározza:

$M = \frac{P}{\omega}$ alapján a szárnyak nyomatékingadozása:

$$\Delta M = \frac{\Delta P_1}{\omega} = \frac{P_0}{\omega} \cdot \left(\frac{R}{h_0} \right)^{3\alpha}$$

P_0 behelyettesítésével:

$$\Delta M = \frac{1}{6} R^2 \pi \cdot \rho \frac{v_0^3}{\omega} \cdot \left(\frac{R}{h_0} \right)^{3\alpha} = \frac{1}{6} \pi \cdot \rho \cdot \frac{v_0^3}{\omega} \cdot \left(\frac{R^{2+3\alpha}}{h_0^{3\alpha}} \right)$$

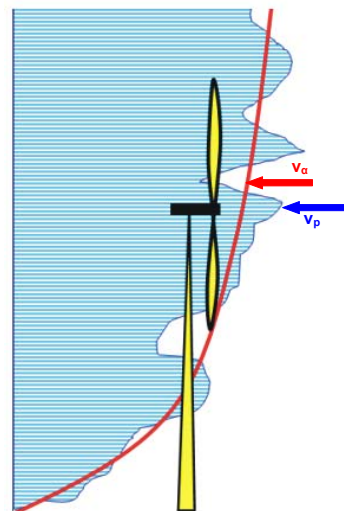
Az utóbbi egyenletben minden, a szárnydinamikát befolyásoló tényező behelyettesíthető, s a hatásuk mértéke is kiolvasható.

Eredmények, következtetések

A felső holtpontban, ahol a szélesebbég 1-2 m/s-mal is nagyobb az alsóban fellépőnél, jóval nagyobb mértékű hajlító erőhatás jelentkezik, amely nyilván a teljesítménnyel is összefüggésben van. A nagyobb terhelés következtében pl. egy 2 MW-os, $h_0=108$ m gondola magasságú (forgásközpontú) berendezésnél, $D = 90$ m-es lapátkerék átmérőnél a kihajlás a felső holtponton 1,5-2 métert is eléri, míg az alsó holtponton 0,5 m-re mérséklődik.

Ez minden lapátfordulatnál jelentkezik, tehát a lapát a forgási frekvenciának megfelelően igen jelentősen ki van téve e hajlításból adódó, az anyag kifáradását jelentő dinamikus igénybevételnek. 10-15 tonna tömegű lapátoknál a dinamikus igénybevétel impulzus erejének változása az egész szélerőműre áttérjed, a tengelyének csapágyazására, az állványra, de a rendszer alapozására is (a szélnyomás eltérése az alsó és felső lapáthelyzetben 400-800 kN is lehet).

Ehhez hozzájárul a szélprofilban jelentkező nagymérvű egyenetlenség (5. ábra), mivel a föld feletti szélprofilban a rétegnyírásból adódó turbulencia a magasság függvényében igen eltérő értékeket mutat. Gyakorlatilag a számított a szélprofil csak egy idealizált elemzést tesz lehetővé. Ahhoz, hogy az alapozás jellemzőit az adott körülmények között a szélerőműnek meg tudjuk határozni, még a méréseknél meg kell ismerni a fentebbi jelenségeket, sőt a turbulenciára adatokat is szolgáltatni kell (ennek elemzésétől most eltekintünk).



*5. ábra A számított (v_a) és a valóságos (v_p) szélprofil
Fig 5. Calculate (v_a) and real (v_p) vertical wind profile*

Amint láttuk, a szélirány változásával változik a szélprofil, s ebből adódóan az igénybevétel változás, valamint a szolgáltatott teljesítmény is.

Mindezek még változtatják a fentebb bemutatott rotor eredő teljesítményének alakulását, és a szárnyak és valamint kapcsolódó elemek mechanikai terhelésére.

Mindezekből adódóan egyáltalán nem közömbös, hogy egy szélerőmű-konstrukció milyen függőleges szélprofil mellett dolgozik, vagy megfordítva: egy adott függőleges szélprofilú helyre milyen szélerőművet tervezünk.

A távolabbi jövőben a szélerőművek által előállított villamos energia támogatásának mértékében csökkenése várható, ezért a várható energia kihozatal meghatározásánál a lehető legnagyobb pontossággal kell eljárni, a várható termelést meghatározni.

A gyártók ma a tornyok magasságának növelésére törekszenek, hiszen a szélprofilban a nagyobb mérvű kiegyenlítődés (közeledés a függőlegeshez) 150-160 m feletti magasságokban jelentkezik. Ilyen magasságokra tervezett berendezéseknél számottevően nagyobb a teljesítmény és kisebb az egyenetlenségből fakadó dinamikus igénybevétel, amely jelentősen növelheti a berendezések élettartamát, a lapátok és egyéb szerkezeti egységek kifáradását, a várható szervizigényt.

A bemutatott elemzéssel a témakört koránt sem merítettük ki, de reméljük, hogy a telepítéssel és létesítéssel foglalkozó szakemberek figyelmét még inkább felhívtuk e fontos problémára.

Irodalomjegyzék

1. Dobi I. (szerk): (2006) Magyarország szél és napenergia kutatási eredményei, OMSZ, Budapest, ISBN 963 7702 95 4, p.147
2. Johansson, T.B. et.al.: 1994. Renewable Energy Sources for fuels and Electricity Island Press, Washington.
3. Lysen, E.H.: 1982. Introduction to Wind Energy. S.W.d. Amersfoort.
4. Patay I.: 2003. A szélenergia hasznosítása. Szaktudás Kiadó Ház, Bp.
5. Schrempf N.: 2007. Energetikai célú szélmérő rendszer kialakítása. Doktori (PhD) értekezés, SZIE Gödöllő.
6. Tar K.: (2007) Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights, Department of Meteorology, University of Debrecen, POB 13, Hungary, Renewable and Sustainable Energy Reviews, RSER : 416, Jul162004†, pp:1213
7. Tóth G.: (2005). Energia célú szélmérés. Doktori (PhD) értekezés, SZIE Gödöllő.
8. Tóth L.-Horváth G. szerk.: (2003). Alternatív energia. Szélmotorok, szélgenerátorok. Szaktudás Kiadó Ház, Bp.