

**Mérési útmutató**  
**Megújuló energiatermelést bemutató energiapark**

**Szélturbinák villamosenergia termelése**



**A mérést tervezte, összeállította:**  
Dr. Kádár Péter

**A mérésért felelős:**  
Dr. Kádár Péter

**A mérési útmutatót összeállította:**  
Dr. Kádár Péter  
Aranyos Zsolt  
Fehér Szabolcs  
Illés Gergely  
Kazai Imre  
Piatkó Tamás

**BMF KKV VEI**  
**Budapest, 2006. október**

## Tartalom

1	A mérés célja.....	2
2	A szélenergia átalakítása.....	2
3	A szélturbinák felépítése, üzeme.....	4
4	A mérési összeállítás, eszközök.....	5
5	A mérési feladatok.....	8
5.1	Szélrózsa készítése a mért szélirányokból.....	9
5.2	Szélrózsa készítése, az átlagos szélesebséggel súlyozva.....	10
5.3	Szélesebség diagram, átlagos szélesebség.....	10
5.4	Szélesebség eloszlás (tartam) diagram.....	11
5.5	Szélesebség eloszlás sűrűségfüggvénye.....	11
5.6	Turbulencia diagram.....	12
5.7	Generátor teljesítmény diagram.....	12
5.8	Generátor szél-teljesítmény karakterisztika.....	13
6	Mérési jegyzőkönyv.....	13

### 1 A mérés célja

A mérés során a hallgatók megismerkednek a szélerőművek/szélturbinák villamosenergia termelési karakterisztikájával és a telepítést megelőző- és üzemeltetés közbeni folyamatos szél- és villamos mérésekkel. A mérés bevezetője a „Szélerőművek” című .ppt előadás.

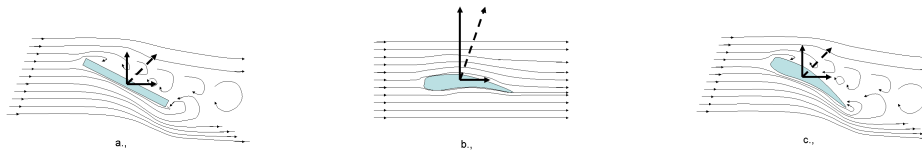
### 2 A szélenergia átalakítása

A szél energiája az áramló tömeg mozgási energiája, ezt lehet részlegesen átalakítani egyéb mechanikai mozgásokká, elsősorban forgássá. A szélenergia teljes kifogása nem lehetséges, ugyanis ez azt jelentené, hogy a sebesen érkező levegő teljesen lefékeződne, megállna. Az amúgy nyomáskülönbségek hatására létrejövő egyenletes légáram útjába helyezett szélerő kinyerő berendezések valamelyest lassítják az áramlást, nyomáskülönbséget, turbulenciákat okoznak.

A haladó szél energiáját általában vízszintes vagy függőleges tengelyű kerekre szerelt, a kerék síkjával szöget bezáró lapátokkal alakítják forgássá. Régebben tapasztalatok alapján készítették a szélkerekeket, vitorlákat, de ma a szélkerekek aerodinamikai formázása és gépészeti konstrukciója a „high tech”-hez, azaz a nagyon felett technológiákhoz tartozik.

- A kis sebességgel egyenletesen (laminárisan, rétegzetten) áramló levegő útjába helyezett akadályra a levegő a közegellenállás mértéke szerint (torló-) erővel hat.
- Amennyiben az egyenletesen áramló levegőbe áramvonalas, de aszimmetrikus akadályt állítunk (szárnyprofil, vitorla), akkor a levegő útját jobban beszűkítő oldalon az áramlási irányra merőleges Bernoulli féle szívóhatás lép fel.
- Ha az áramvonalas test nem megfelelő irányból találkozik a nagy sebességgel áramló levegővel, akkor Bernoulli féle hatás lecsökken, esetleg megszűnik, és turbulens áramlás alakul ki.

A fentiek miatt a vízemelő kerekre és az egyszerű sík deszkavitorlákra főként a tolóerő hat, míg a hajlított lapátokra, a felvásznozott malomvitorlákra és a szárnyprofilú szélerőmű lapátokra a Bernoulli erő is.



### Akadály az áramló levegő útjában

A szél által hajtott vízszintes tengelyű szélkerekek által leadott teljesítményt az alábbi (egyszerűsített) egyenlet írja le:

$$P = 0,5 \rho A v^3 \eta$$

ahol

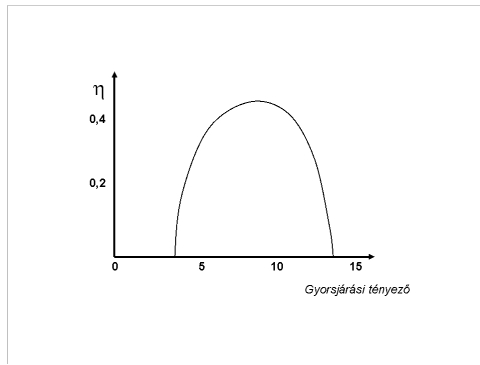
- $P$  - a szélkerék leadott teljesítménye,
- $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$  - az áramló levegő sűrűsége, de ez hőmérsékletfüggő, ezért télen, amikor a levegő hidegebb, jobb hatásfokúak lehetnek a szélturbinák
- $A = r^2\pi = d^2\pi/4$  - a lapátok által súrolt terület mérete (ahol  $r$  - a lapátok hossza;  $d = 2r$  - a szélkerék átmérője),
- $v$  a szél sebessége, amely mellett a teljesítményt meghatározzuk,
- $\eta$  a szélkerék hatásfoka, amely nem lehet több 60 %-nál, a gyakorlatban 10-30 % közötti érték szokott lenni.

A megadott képlet alapján látható, hogy a szél energiája a szélesebb harmadik hatványával arányos. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy igen kis szélesebb változás is igen nagy teljesítmény-változást okoz.

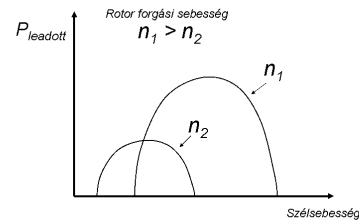
Egy 1,5 MW-os szélerőműnek már 37,5 m hosszú lapátjai vannak. 25%-os hatásfokkal számolva azt kapjuk, hogy a néveleges teljesítményét 12,9 m/s-nél (47 km/h) éri el. 3 m/s szél esetén a leadott teljesítmény még a 20 kW-ot sem éri el, ami saját veszteségek fedezésére is alig elegendő. Ezért sem indulnak 3 – 3,5 m/s alatt az erőművek.

A valóságban egy szélkerékre a  $\eta$ -val jelölt hatásfok a levegő sebességének függvényében erősen változik (részben a lamináris és turbulens áramlás miatt) és ez egy „púpos” karakterisztika görbét eredményez. Azért, hogy a kerekek forgását áramlástani szempontból jól össze lehessen hasonlítani, bevezették a gyorsjárási tényezőt, ami a lapátvég sebesség (kerületi sebesség) és a szélesebb arányát fejezi ki.

A következő két ábra egy konkrét szélkerék hatásfokának ( $\eta$ ) változását mutatja a gyorsjárási tényező függvényében, illetve egy állandó fordulatszámon tartott rotor által leadott mechanikai teljesítményét mutatja különböző forgási sebességeknél:



Egy rotor hatásfokának változása

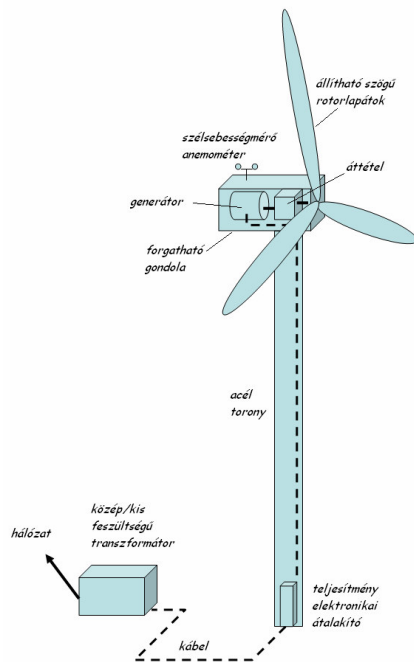


A leadott teljesítmény és a szélsebesség összefüggése

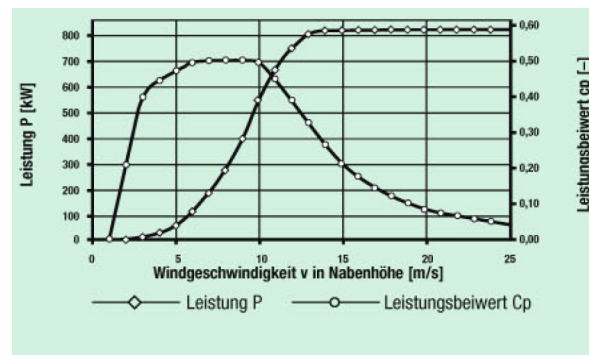
Szélerőművek esetén a púp tetejét levágják, azaz a kiadott teljesítményt elektronikai és mechanikai úton maximálják, és ez eredményezi a szélerőművek általános telítődő, lapos karakterisztikáját.

### 3 A szélturbinák felépítése, üzeme

A szélerőművek viselkedését elsősorban a szélsebesség és a kiadott villamos teljesítmény közötti összefüggés írja le. A szélerőművek karakterisztikájára főként a mechanikai kialakítás van hatással, amibe beletartozik a rotorlapátok profilja, a változtatható lapátszög és a rotor síkjának állíthatósága a szél irányához képest. Ezt a „mechanikai” karakterisztikát a teljesítményelektronika formálja tovább, főként a kiadott teljesítmény limitálásával az „üzemi szél” tartományában (kb. 10-25 m/s). A következő ábrán egy erőmű felépítése és egy erőmű gyári adatlapján megadott karakterisztikát látjuk.

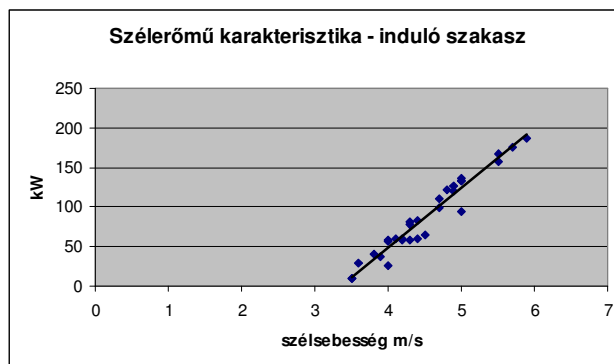


A szélerőmű főbb elemei



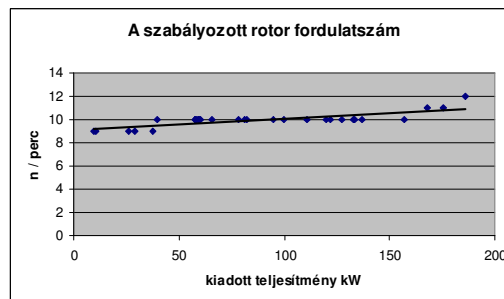
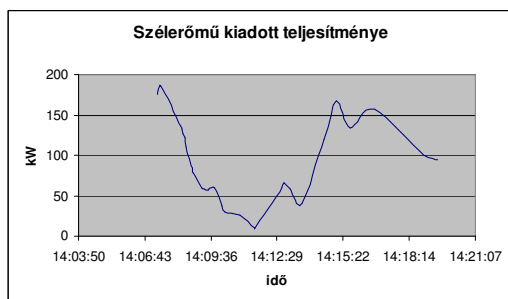
Az E-48-a turbina teljesítmény és hatásfok karakterisztikája

A következő mérési diagram egy 1 MW-os névleges teljesítményű szélerőmű karakterisztikájának közel lineáris, induló szakaszát ábrázolja.



A szélerőművek az idő nagy részében nem termelnek energiát. Ekkor inkább villamosenergia fogyasztóként lépnek fel, ugyanis a szél irányát követő vízszintes forgató egység folyamatosan készenlétben/működésben van, és télen egyes szerkezeti elemeket fűteni is kell. Az üzemkész, szélre váró erőmű a küszöb szélsebességet meghaladó (3-4 m/s) tartós szél fennállása esetén indul. Míg a szélerőműveknek a névleges teljesítményre vetített teljes kihasználtsága évente 2000 óra körül van, addig a kisebb-nagyobb szélben való működési óraszám elérheti a 4000 órát is. Ez azt jelenti, hogy igen ritkán termel az erőmű a teljes kapacitásával, ugyanis ehhez legtöbb esetben 8-12 m/s szélsebesség szükséges.

Az következő ábra egy erőmű ingadozó termelését mutatja, a változó szélben. A névlegesen 1 MW-os erőmű teljesítménye mintegy 6 perc alatt 1-18 % között változott. Amennyiben több erőmű termel egyszerre, akkor ezek a gyors termelésváltozások statisztikailag kiegyenlítik egymást.

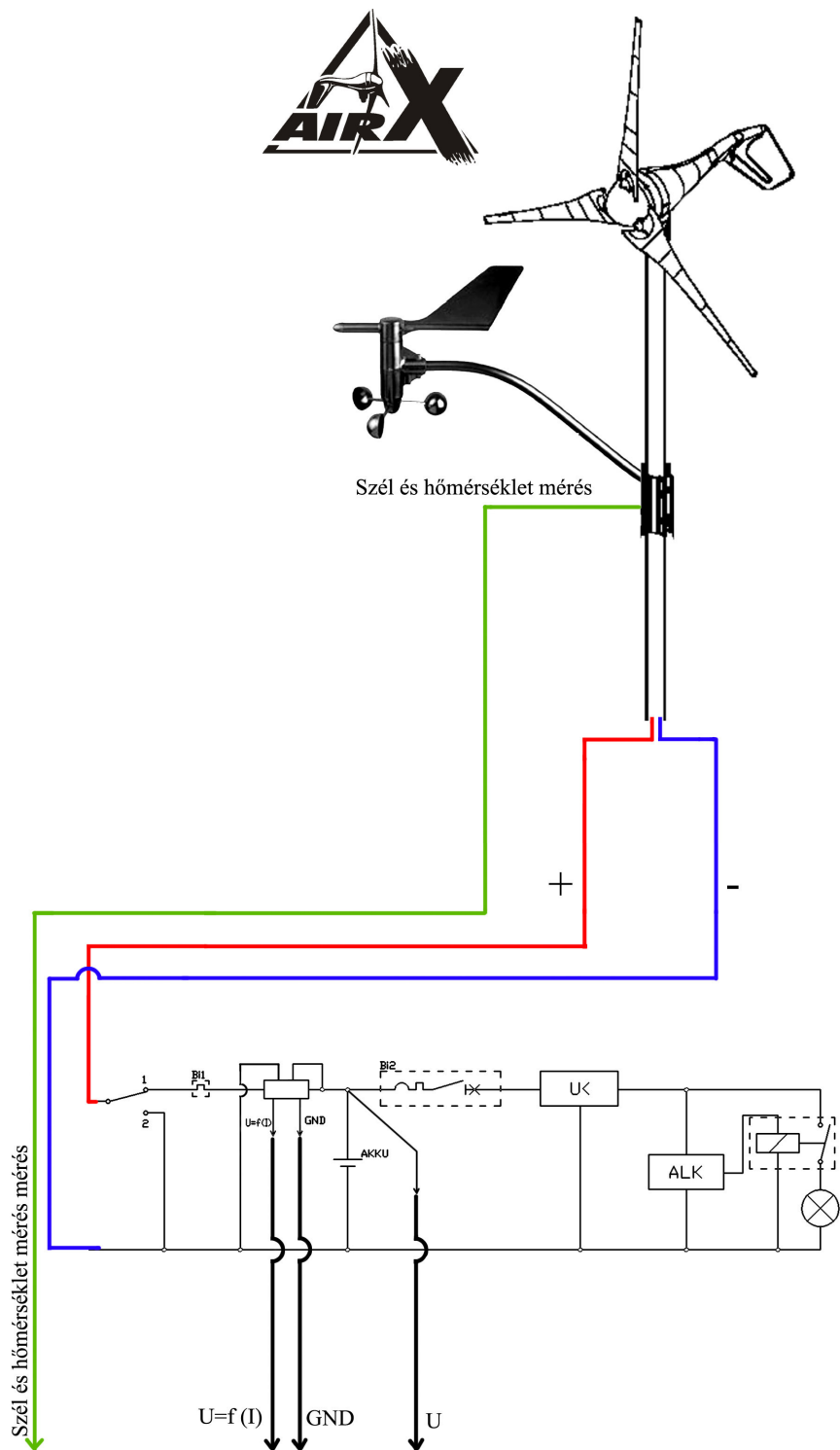


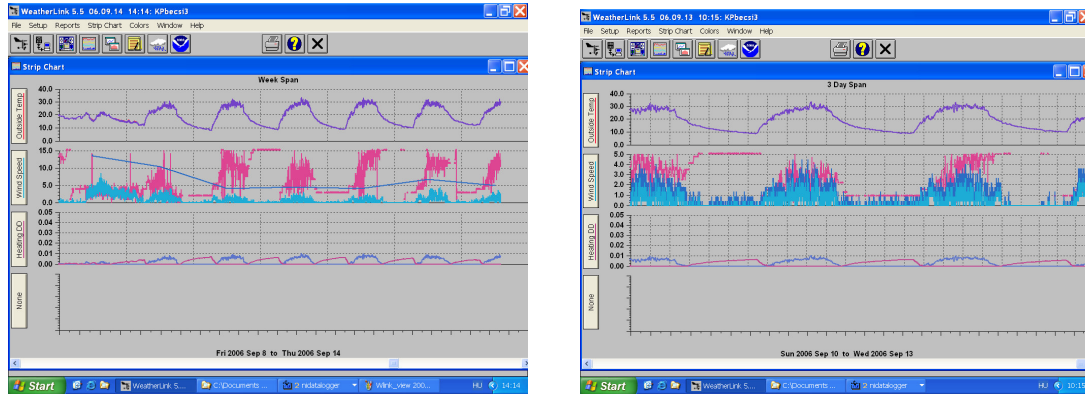
Mindeközben az erőmű rotorjának (ill. generátorának) sebességét igyekeznek állandó fordulatszámon tartani. Ezt mutatja a következő ábra.

## 4 A mérési összeállítás, eszközök

A címlapon látható AIR-X 401-es kísérleti szélturbina, a műterhelés és az elektromos kapcsolószekrény a Bécsi úti épület tetején helyezkedik el. A turbina főbb jellemzői:

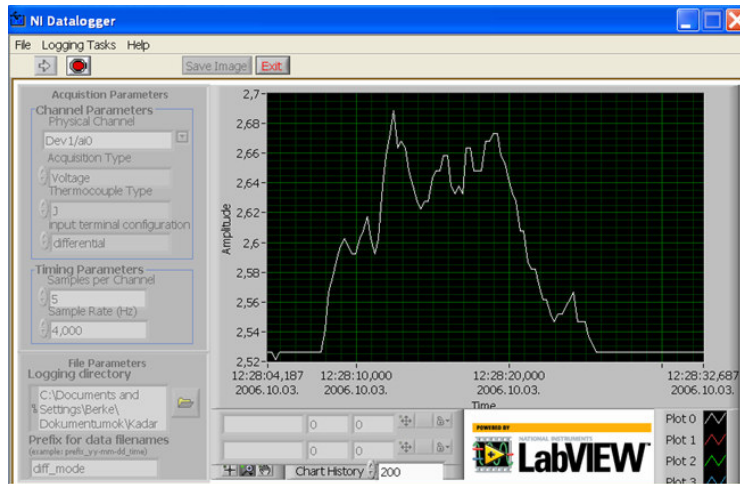
- rotor átmérő: 1,15 m
- névleges feszültség: 12 V
- indulási szélsebesség: 3 m/s
- névleges teljesítmény: 400 W/11,5 m/s
- maximális leadott teljesítmény: 520 W/18 m/s





A szélességet, irányt és hőmérsékletet a Weather Wizard állomás méri és a Weather Link nevű szoftver gyűjti folyamatosan az alábbi listába:

Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Low Temp	wind Speed	wind Dir	wind Run	Hi Speed	wind Chill	Heat D-D	Cool D-D	In Temp	Arc. Int.
06.09.03	0:30	15.2	15.4	14.8	0.0	---	0.00	0.0	15.2	0.066	0.000	24.7	30
06.09.03	1:00	14.7	14.9	14.6	0.0	---	0.00	0.4	14.7	0.075	0.000	24.6	30
06.09.03	1:30	14.7	14.8	14.4	0.0	NNW	0.00	0.9	14.7	0.076	0.000	24.6	30
06.09.03	2:00	14.3	14.5	14.2	0.0	NNW	0.00	1.3	14.3	0.083	0.000	24.5	30
06.09.03	2:30	14.0	14.2	13.8	0.0	---	0.00	0.0	14.0	0.090	0.000	24.4	30
06.09.03	3:00	13.8	13.9	13.7	0.0	---	0.00	0.0	13.8	0.095	0.000	24.3	30
06.09.03	3:30	13.7	13.9	13.5	0.0	---	0.00	0.0	13.7	0.096	0.000	24.3	30
06.09.03	4:00	13.4	13.6	13.4	0.0	---	0.00	0.0	13.4	0.102	0.000	24.3	30
06.09.03	4:30	13.3	13.4	13.2	0.0	---	0.00	0.0	13.3	0.104	0.000	24.2	30
06.09.03	5:00	13.3	13.4	13.1	0.0	NNW	0.00	0.4	13.3	0.105	0.000	24.2	30
06.09.03	5:30	12.9	13.2	12.8	0.0	---	0.00	0.0	12.9	0.112	0.000	24.1	30
06.09.03	6:00	12.8	13.0	12.7	0.0	NNW	0.00	0.9	12.8	0.115	0.000	24.1	30
06.09.03	6:30	12.9	14.1	12.7	0.0	---	0.00	0.0	12.9	0.112	0.000	24.0	30
06.09.03	7:00	16.2	18.2	14.1	0.0	NNW	0.00	0.9	16.2	0.045	0.000	24.0	30
06.09.03	7:30	20.1	23.2	18.1	0.0	NE	0.00	0.9	20.1	0.000	0.037	24.1	30
06.09.03	8:00	21.6	23.9	20.2	0.0	NE	0.00	0.9	21.6	0.000	0.068	24.5	30
06.09.03	8:30	20.3	20.8	19.9	0.0	SSE	0.00	1.3	20.3	0.000	0.041	24.6	30
06.09.03	9:00	21.2	22.3	20.7	0.0	SSE	0.00	0.4	21.2	0.000	0.060	24.6	30



```

LabVIEW Measurement
writer_version 0.92
Reader_version 1
Separator Tab
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator Berke
Date 2006/10/05
Time 14:41:56.061
***End_of_Header***

Channels 1
Samples 5
Date 2006/10/08
Time 06:08:19.25
X_Dimension Time
X0 2.275000000000000000
Delta_X 0.250000
***End_of_Header***

X_value Comment
227500.000000 2.546628
227500.250000 2.536482
227500.500000 2.541555
227500.750000 2.536482
227501.000000 2.536482
227501.250000 2.546628
227501.500000 2.561846
227501.750000 2.561846
227502.000000 2.546628
227502.250000 2.541555
227502.500000 2.536482
227502.750000 2.536482
227503.000000 2.541555
227503.250000 2.536482
227503.500000 2.546628
    
```

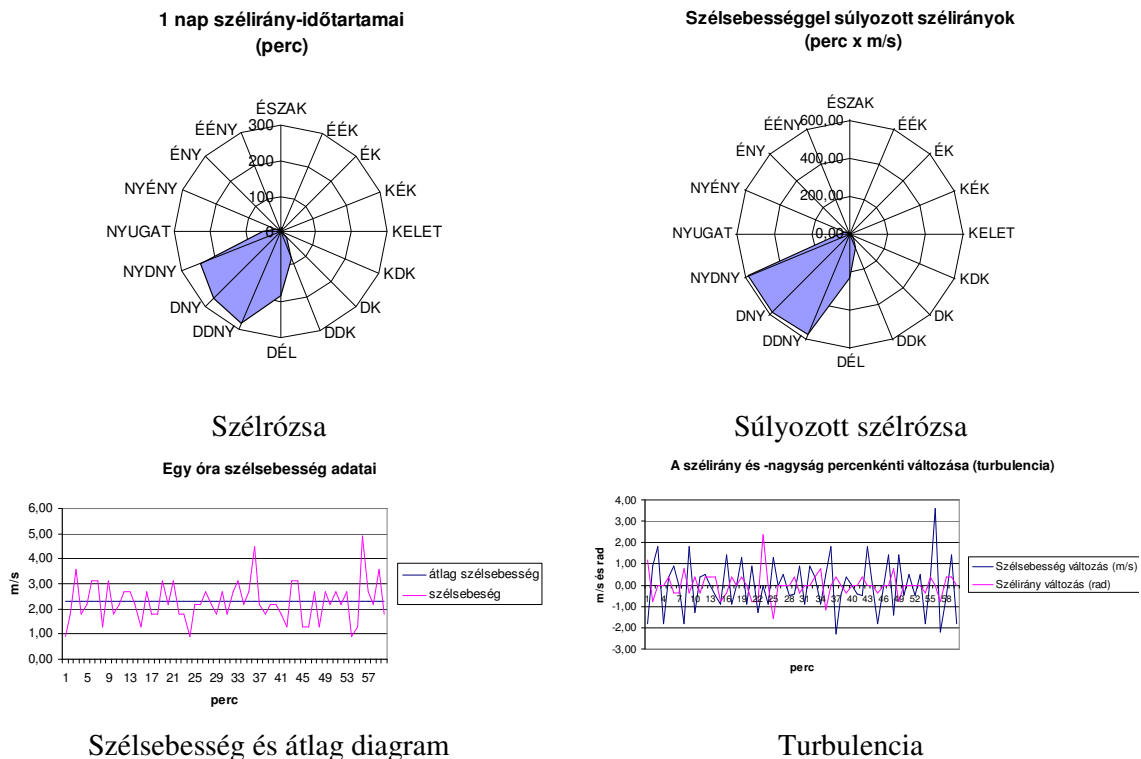
A turbina termelését a National Instruments USB 600-as adatgyűjtője LabView szoftveren keresztül logolja.

## 5 A mérési feladatok

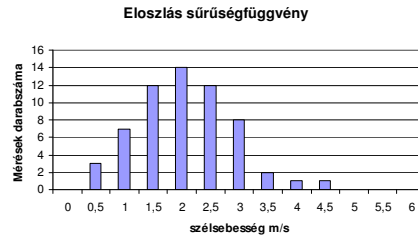
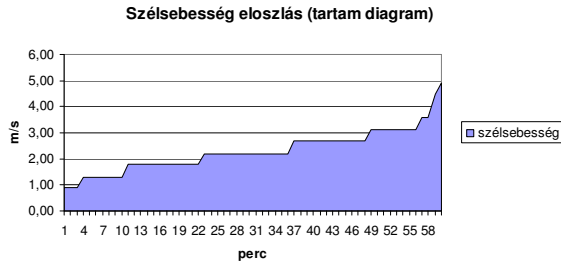
A szélerőművek telepítési helyének kiválasztásánál először általános meteorológiai szélmérési adatsorokat vesznek figyelembe. Ezt követi a helyszíni méréssorozat, amelyben a tervezett létesítési helyszínen, több évszakon keresztül a rotormagasságot megközelítő szinten gyűjtenek adatokat. Egy telepített erőműnél folyamatosan regisztrálják a szél- és villamos termelési adatokat.

Az uralkodó szélirányt, illetve az ennek nagyságára is utaló súlyozott átlagot szélrózsán lehet megjeleníteni. Fontos adat a szélesebesség, a szélesebesség átlaga, illetve mindennek eloszlása, azaz, hogy az adott átlag hosszú idejű, kis sebességű szelekből tevődik-e össze, vagy ritkább, de erősebb szelekből. Ez utóbbi alkalmasabb az energiatermelésre, mert a kis szelek hiába kitaróak, az erőművet esetleg el sem indítják. Ugyan ezt lehet a szélesebesség sűrűség diagramon is ábrázolni. Az egyenletes termelést befolyásoló kavargó, turbulens szél jellemzésére az időegység alatti szélesebesség- és szélirányváltozás mértékét érdemes regisztrálni. A kis változásokat a szélerőmű le tudja követni, míg a hirtelen változások határfok csökkenést okoznak.

A villamosenergia termelés szempontjából szinte a legfontosabb a teljesítmény-szél karakterisztika, illetve a tényleges termelési görbe.

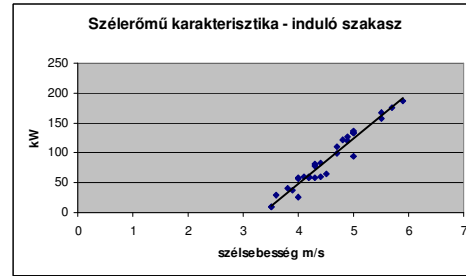
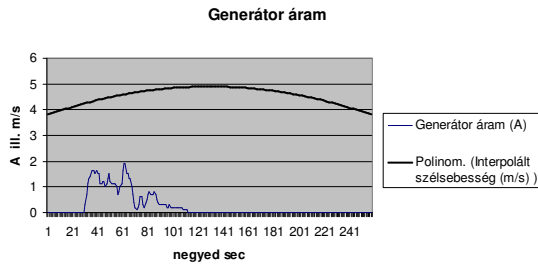






Szélesebesség eloszlás (tartam-) diagram

Az eloszlás sűrűségfüggvénye



Tartam diagram

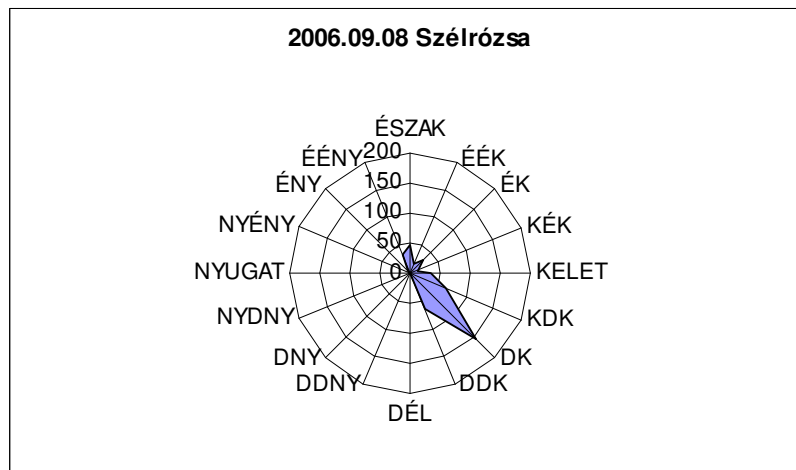
Generátor karakterisztika

### 5.1 Szélrózsa készítése a mért szélirányokból

A mérés célja, hogy megállapítsuk, hogy az adott mérési időszakban milyen irányból fúj leggyakrabban a szél. A mérés során a szélirány mérése korrekciót igényel melynek mértéke  $315^\circ$ . (Azaz a műszer által mutatott  $360^\circ$  a valóságban  $315^\circ$ .) A szélrózsa a mérési időszakra (pl. 1 nap) vonatkoztatóan mutatja meg, hogy milyen gyakorisággal fúj a szél egy adott irányból, azaz mi volt az uralkodó szélirány.

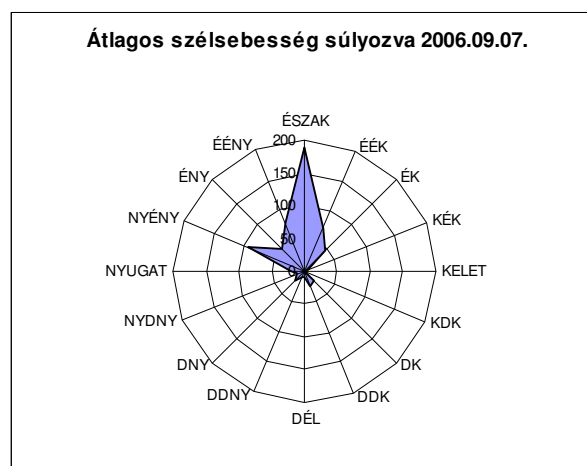
#### A mérési feladat:

Egy adott időszak adataiból a szélirányok darabszámának meghatározása és ezt követően a szélrózsa kirajzolása.



## 5.2 Szélrózsa készítése, az átlagos szélesebséggel súlyozva

Az adott irányból érkező szél „mennyiségét” csak az irányok ábrázolása nem tükrözi helyesen. Ezért a szélrózsába a szélirányokat átlagos szélesebséggel súlyozva is ábrázolhatjuk. A mérő hely által rögzített mérési adatokat tartalmazó *pl.: download20060909\_13h.txt* file-t nyissa meg Excelben. (Megjegyzés: A szövegebeolvasó varázsló harmadik lépésénél kattintson az *Irányított...* ikonra és ott a tizedes jelet állítsa pontra.) A diagram elkészítéséhez a szélirány (Wind dir) és a szélesebség (Wind speed) mérési adatait tartalmazó oszlopokat használja fel. Rendezze szélirányok szerint sorba az adatokat és az adott szélirányokhoz tartozó szélesebségeket adja össze, majd ábrázolja sugárdiagramban. Így egy átlagos szélesebséggel súlyozott szélrózsát kap eredményül. A valódi földrajzi tájolás miatt a kapott diagramot 315°-kal el kell forgatni így kapja meg a valós szélrózsa diagramot. Ez a mérés megmutatja az adott időintervallumban mely irányból érkezett a legtöbb szél (széláram, ugyanis egy adott keresztmetszeten áthaladó, adott sebességű szél valóságban légáramot jelent, ez időben pedig légmennyiséget tesz ki)

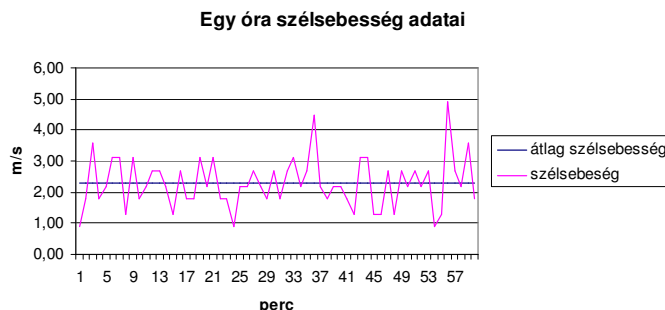


### A mérési feladat:

Egy adott időszak adataiból a szélesebséggel súlyozott szélrózsa kirajzolása.

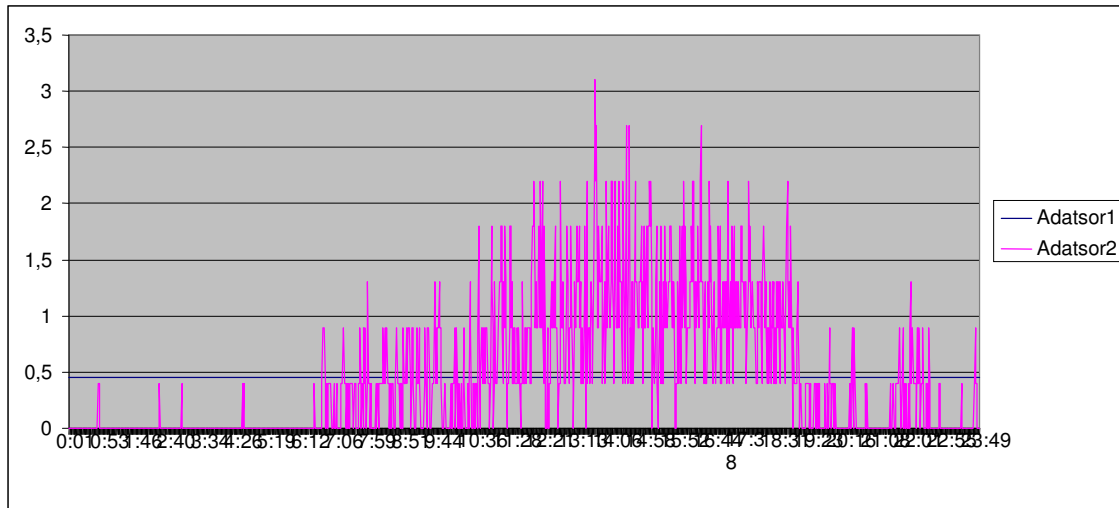
## 5.3 Szélesebség diagram, átlagos szélesebség

A szélesebség időbeli alakulását mutatja a szélesebség diagram. A mérés *pl. a download20060909\_13h.txt* file megnyitása után kezdődhet. A mérés célja hogy lássuk az iskola környékén fellépő szélesebségek nagyságát és átlagosan mekkora széllelkések érnek minket. Jelen esetben 24 órán át vizsgáljuk, hogy mekkora volt a szélesebség. A mérést a szél sebesség (wind speed F-oszlop) valamint a percnkénti mintavételből (time B- oszlop) készítjük el. 1 nap esetén *pl. a 0:00-23:59-ig* terjedő tartományt kell vizsgálni. A függvény elemeit egyszerű összerendezéssel lehet összeválogatni. Átlag sebesség számításánál vagy összeadást és osztást, vagy az **ÁTLAG**- függvényt használjuk. Az egy nap lefutásaként „tüskés” diagramot kapunk, míg kisebb időintervallumot kinagyítva a változások jobban láthatóak.



### A mérési feladat:

Egy adott időszak adataiból a szélesebség görbe rajzolása, illetve az átlagos szélesebség meghatározása.

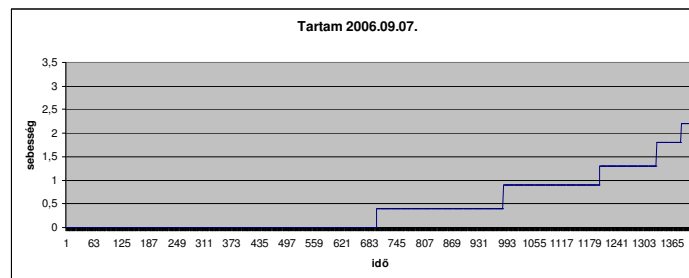


#### 5.4 Szélesebesség eloszlás (tartam) diagram

Az előző ábrából nehéz megállapítani, mennyi ideig fújt pl. a szélerőmű indulási sebességénél nagyobb szél, mennyi ideig lehetett volna villamos energiát termelni. Ez leolvasható az eloszlás diagrammból. A mérés a pl. `download20060909_13h.txt` file megnyitása után kezdődhet. A mérést a szél sebesség ( wind speed F-oszlop) valamint a percnkénti mintavételből ( time B-oszlop) készítjük el. 0:00-23:59-ig terjedő tartományt kell vizsgálni. Mérés célja: szélesebesség tartammérés. Adatok értelmezése : a lépcsőzetes görbe azt mutatja, hogy nem volt tartósan 3 m/s feletti szél, azaz jelentős áramtermelés nem volt lehetséges.

##### A mérési feladat:

Egy adott időszak adataiból a szélesebesség eloszlás diagram elkészítése.

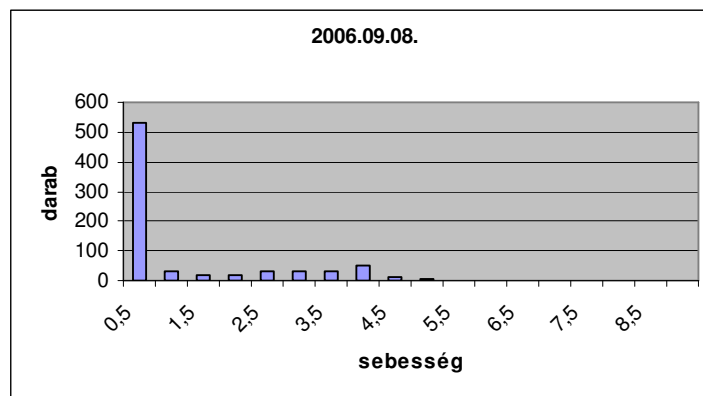


#### 5.5 Szélesebesség eloszlás sűrűségfüggvénye

Az eloszlás sűrűségfüggvénye mutatja, hogy az adott szélesebesség tartományban mennyi ideig fújt a szél.

##### A mérési feladat:

Az adatokból az adott szélesebességek darabszámának meghatározása és ezt követően a diagramm felvétele és kirajzolása.

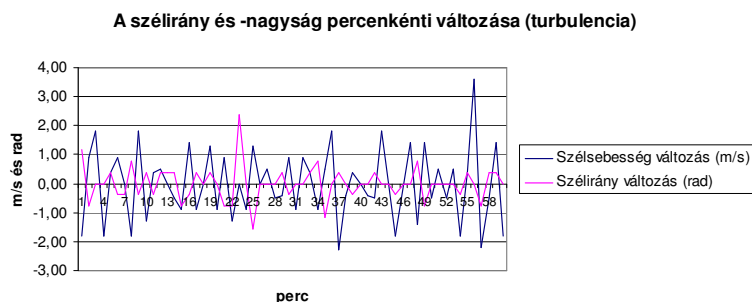


## 5.6 Turbulencia diagram

A szélesség átlaga, illetve eloszlása nem ad információt arról, milyen gyorsak a változások, az adott sebességek hogyan követik egymást. A gyors változások a termelés határfokát csökkentik. A turbulencia a szélirány és a szélesség változását fejezi ki valamilyen egységes időtávra vonatkoztatva, pl. az 1 perc alatt.

### A mérési feladat:

Két egy órás időszak széljárását összehasonlítani a turbulencia szempontjából.



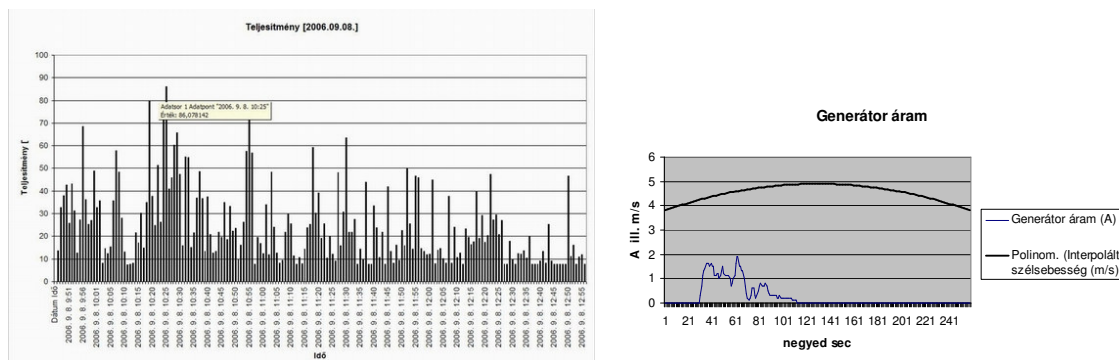
## 5.7 Generátor teljesítmény diagram

A National Instruments által fejlesztett készülék segítségével mérjük az Air-X 403-as típusú szélgenerátor által termelt áramot, amit a készülék elsődlegesen saját Archív memóriájába tárol. A hozzá kapott szoftver segítségével hozzáférhetünk ezekhez a mérési adatokhoz, és \*.xls formátumban elmenthetjük. A kiértékeléshez fontos információ, hogy a mentések 4 Hz-es frissítéssel jönnek létre, tehát másodpercenként 4 adat jelenik meg! A mért érték pedig az-az árammal arányos feszültség, ami tartalmaz 2.5V offset feszültséget is, melyet kivonva a nulla szintet kapjuk! 0.05V feszültség szint 1A áramerősségnek felel meg! Adott esetben additív töltőáram offset-tet is tartalmaz a mérés.

A diagram elkészítéséhez átlagoltuk a mérési pontokat másodpercenként, percenként, majd óránként! Az így kapott jelentősen kevesebb adatból kiszűrtük azokat az időpontokat, ahol termelés volt és az áramokból számolt teljesítményt ábrázoltuk az idő függvényében.

### A mérési feladat:

Egy adott időszak adataiból a generátor áramát megjeleníteni, illetve egy termelési időszakot kinagyítani (pl. 3 perccel).

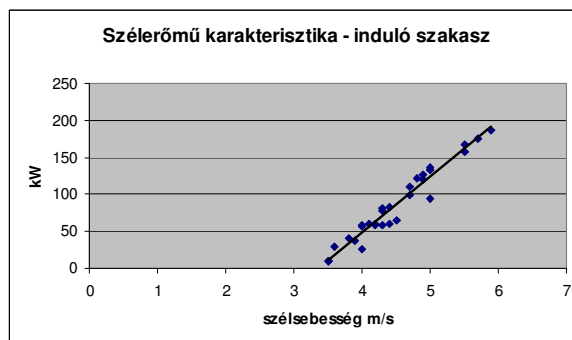


## 5.8 Generátor szél-teljesítmény karakterisztika

A fentiekben említett készülék segítségével pontos adatokhoz juthatunk a szél kiszámíthatatlan jellegéről! A mérési adatokban megtaláljuk a szél sebességét, leolvasható az iránya és az időtartama is! Szintén egy táblázatban tölthetők le ezek a mérési pontok, amiket másodpercre pontosan össze tudunk vetni az árammérés adataival. Ez azért fontos, mert így pontosan vizsgálhatjuk a szélturbina viselkedését, hogy mekkora szélsébség szükséges a termelés beindításához. Valamint pontos információkat kapunk a levegő mozgásáról, amiben megfigyelhetők bizonyos azonosságok.

### A mérési feladat:

Adott időszak szél és áram adataiból a generátor karakterisztika felrajzolása.



## 6 Mérési jegyzőkönyv

A mérési jegyzőkönyvet mérőpáronként nyomtatott formában kell leadni a mérésvezetőnek 1 héten belül (ezzel gyakorolják az elvégzett munka bemutatását, dokumentálását). A jegyzőkönyv formája nem kötött, éppen a kimért, ízléses dokumentum szerkesztés elsajátítása is a cél, hossza 2-3 oldal. Ez tartalmazza:

- Dátum
- Mérést végzők nevét
- Az elvégzett mérés leírását
- A mérésnél felhasznált adatok leírását
- Grafikus megoldást
- Írott értékelést

Szükséges hallgatói eszközök: pen-drive adathordozó.