

SZÉLENERGETIKAI VIZSGÁLATOK AZ ÓBUDAI EGYETEMEN

WIND ENERGETIC EXAMINATIONS AT ÓBUDA UNIVERSITY

Kádár Péter

Óbudai Egyetem KVK Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi u. 96/b, kadar.peter@kvk.uni-obuda.hu

Összefoglalás. Az Óbudai Egyetemen egy évtizede folynak széleenergetikai kutatások. Áttekintést adunk a szélturbina fejlesztéséről (2009), a széleenergia korrelációs elemzéseiről (2007), a kisléptékű szélturbina mérésekről (2011) és az épület szélklimájának feltérképezéséről (2012).

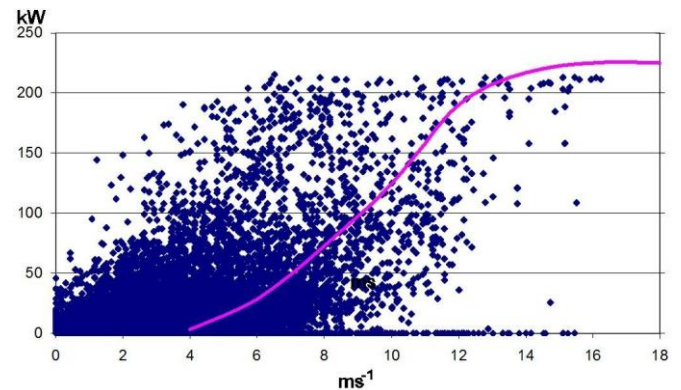
Abstracts. Wind energetic researches have been going on at University of Óbuda (Budapest, Hungary) for a decade. We give an overview on development of the wind turbine (2009), the correlation analyses of the wind power (2007), the small scale wind turbine measurements (2011) and mapping of the wind climate of the building (2012).

Billenő-lapátos VAWT. Az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Villamosenergetikai Inté-

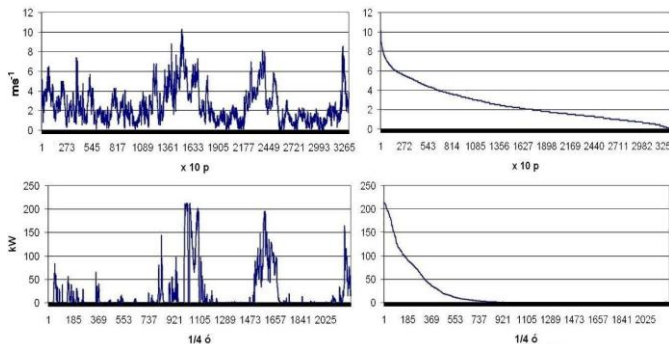
zői mérés korrelációjának vizsgálata – megtermelt energiamentiség alapján.



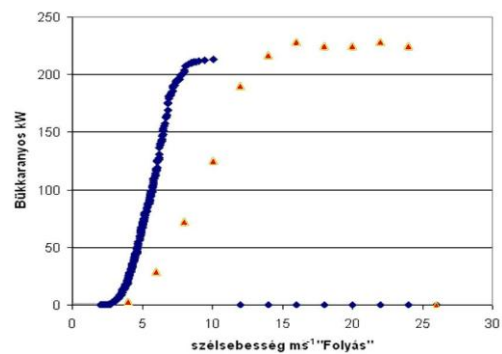
1. ábra: Dudás féle billenő-lapátos VAWT



2. ábra: Valós idejű adatok párosítása. A Bükkaranyosi szélerőmű kimenő teljesítményének és a folyási szélmérések kapcsolata, átszámítva rotormagasságra



3. ábra: Időfüggvényekből képzett eloszlásfüggvények tényleges mérési adatok alapján. Felül: szélsébség, eloszlás, Folyás; alul: termelés, eloszlás, Bükkaranyos, 2005.05.09–31.



4. ábra: A bükkaranyosi karakterisztika a folyásimérés alapján

zetével való együttműködés keretén belül Dudás Péter hallgató kifejlesztett egy újszerű függőleges tengelyű szélturbinát. (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine). Ennek lényege, hogy a függőleges tengelyen keresztül-fűrt vízszintes tengelyre két lapát van rögzítve (1. ábra). A szélnyomás ezt megbillenti, minek hatására a függőlegeshez közelebb álló lapát nagyobb légellenállást fejt ki, mint a másik oldali lapát, így a két nyomatek nem egyenlő, a vízszintes tengely elfordul. Amikor a tengely átfordul, a másik lapát billen az előbbi pozícióba, a forgás folyamatos lesz. A kísérlet sikeres volt, bár energetikai méréseket a TDK munka keretében nem folytattunk.

Széljárások energetikai korrelációja. A számítás célja egy erőmű tényleges termelésének és a közeli meteoro-

A szélerőművek energia-termelésének vizsgálatok több időskála is elképzelhető:

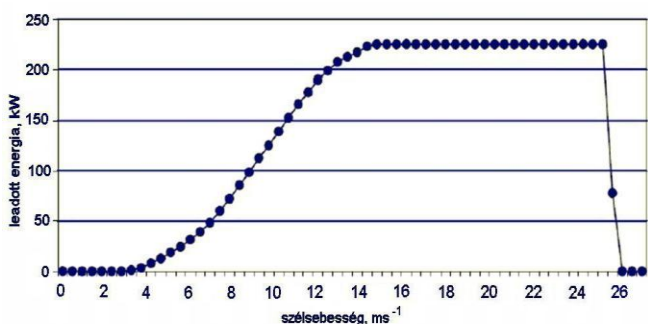
- az egyik a valós idő, amikor a pillanatnyi szélsébség ismeretében a pillanatnyi teljesítmény számítható, illetve mérések esetén a pillanatnyi szélsébséget a pillanatnyi teljesítményhez viszonyítjuk;
- a másik megközelítés, amikor nagyobb időtartam alatti energiatermelést nézünk, tehát az adott energiatermelés szélenergiából mennyi energiát vesz ki az erőmű. Ezt a megközelítést használják a megtérülés számításánál, amikor az évi megtermelt energiát becslik.

Pontos mérések esetén (egy helyen és időben történő) a szélerőművek karakterisztikáját pontosan kimérhetjük, a gyári karakterisztikával összevethetjük. A rendelkezésre

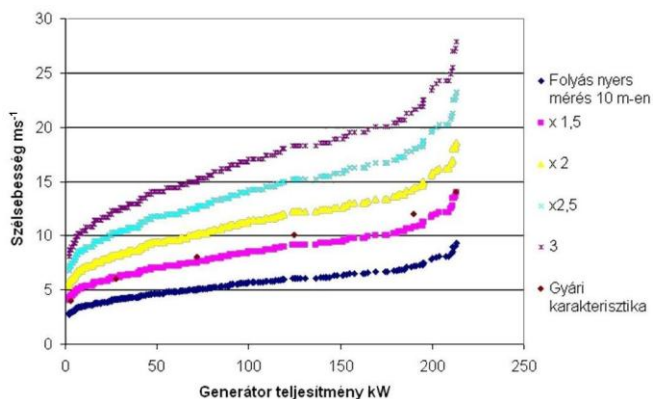
álló mérések (vagy becslések) sokszor nem teszik lehetővé, hogy a szélerőmű közvetlen közeléből származzanak a széladatok (2. ábra).

Minél pontosabban mérjük a szél pillanatnyi sebességét, annál inkább azt tapasztaljuk, hogy egy percen belül is igen nagy a szélsébség ingadozás, a turbulencia. Ez a turbulencia lokális, azaz a közelben ez hasonló energiagtartalommal, de más lefolyással történik. Ezek szerint egy közeli szélsébségmérés nem azonos, de hasonló energiagtartalmú szélsébség időbeli lefolyást mér. Ez ad alapot arra, hogy a toronytól több tíz km távolságban levő szélsébségméréseket is felhasználhatunk becslésre (különösen, ha azonos szélsébságnál van szó).

A számítás menete. Mint azt a 3. ábra is mutatja a valóságban (pl. ¼, fél vagy 1 órás időtartamokra számított,



5. ábra: A Bükkaranyoson alkalmazott V27-es gép gyári karakterisztikája

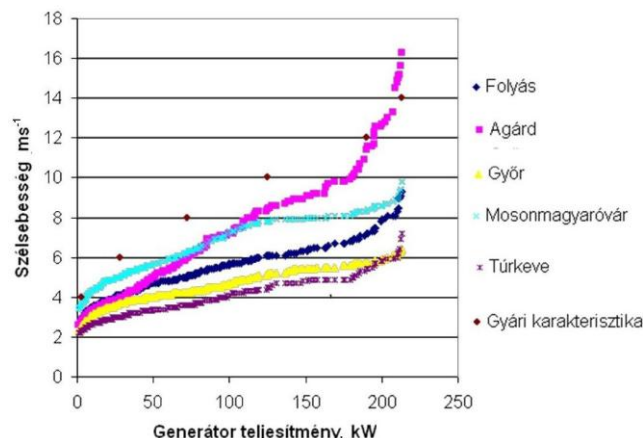


7. ábra: Átskálázási tényező meghatározása

szinkronba hozott átlagok) szélsébség és szélerőmű termelés közötti korreláció igen kicsi, gyakorlatilag függetlennek mondható a két fizikai folyamat. Az azonos helyen lévő ideális szélsébség és termelésmérés a generátor szélsébség karakterisztikája szerint függ össze, és a szélsébség változás alapján szinkron fut. Könnyen belátható, hogy ha mindkét időfüggvényre elkészítjük az eloszlásfüggvényt egy kijelölt időtartamra, akkor az előbbi arányosság (generátor karakterisztika) továbbra is fennáll, azaz adott szélsébséghez mindig hozzárendelhető a generátor teljesítmény. A valóságban az előző, nem monoton függvényt apró „szelletekre” szeljük, majd átszortozzuk a két, párhuzamos függvényt két immár monoton függvényre.

A 4. ábrán a bükkaranyosi erőmű 2005.05.09–31-i időszakra eső termelés eloszlásfüggvényének és az onnan mintegy 30 km-re DK-re levő (zömében ÉNy széljárás a jellemző) Folyás meteorológiai állomás 10 m magasságon mért pillanatnyi szélsébségek eloszlásfüggvényének korrelációját ábrázoltuk. A közös időalapot a negyedórás átlagteljesítményekből képzett félórás átlagok, illetve a 10 perces pillanatnyi értékekből képzett félórás átlagok jelentik. A sűrűpontozású (kék) vonal a mért karakterisztikát jelöli, míg a sárga jelek a gyári karakterisztikát mutatják. A két görbe jellegében megegyeznek.

Az 5. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy nagyobb időtartományban (pl. 2 hét), hasonló eredetű széljárásnak kitett helyről származó szélsébségméréssel a gyári karakterisztikával arányos karakterisztika rajzolódik ki.



6. ábra: Energetikai korrelációs távkarakterisztikák (helyi energiatermelés – távoli szélsébségmérés)



8. ábra: Elhelyezési opciók

Azt, hogy melyik a közeli, illetve hasonló széljárású hely, azt a 6. ábra illusztrálja. Érdekes, hogy jellegében mindegyik, azonos időszaktól származó szélsébségmérésre alapozott görbe közelíti a gyári karakterisztikához. Nem véletlen, hogy a légvonalban legközelebbi, azonos szélsébságnál levő mérés adja jellegében a gyári karakterisztikához legközelebbi görbét. Jelen esetben ez a folyási mérés. A bükkaranyosi erőmű és a szélsébségmérések elhelyezkedésének légvonalbeli távolságát az 1. táblázatban foglaljuk adjuk.

Továbbá meg kell határozni azt az átváltási számot, amely kapcsolatot teremt a Folyásnál 10 m-en mért szél és a bükkaranyosi, dombos vidéken, 33 m-es toronyma-

gasságban mért szélesség között. (Meg kell jegyeznünk, hogy a tengelymagasságra való átskálázás egy

$$u_z = u_m \left(\frac{z}{z_m}\right)^a, \text{ ms}^{-1},$$

1. táblázat: A bükkaranyosi erőmű és a szélmérések elhelyezkedésének légvonalbeli távolságát

Szélmérési hely	Bükkaranyostól mért távolság
Folyás	33 km
Agárd	187 km
Túrkeve	98 km
Mosonmagyaróvár	263 km
Győr	238 km

konvenció, ugyanis az adott szélerőmű rotorja 27 m átmérőjű, más erőműveknél már akár a 100 m-t is eléri a

képletet alkalmaztuk. Kitevőnek 0,445 adódik, ami nagyságrendileg megfelel az eddig alkalmazott kitevőnek.

Az eredmények értékelése. A fenti számítások jól példázák, hogy a termeléshez csak nagyon közel eső szélelőrejelzéssel lehet időben pontos termelési görbét becsülni, míg az energiatarományt akár távolabbi méréssel/beccsléssel is igen nagy biztonsággal meg lehet állapítani/beccsülni. Ez jelenti azt is, hogy a hónapos/éves energiamentiség beccslések megbízhatóak. Ez fontos, mert az állami támogatás (KÁT v. hasonló) a termelt energiamentiséggel arányos, függetlenül annak időbeli lefolyásától.

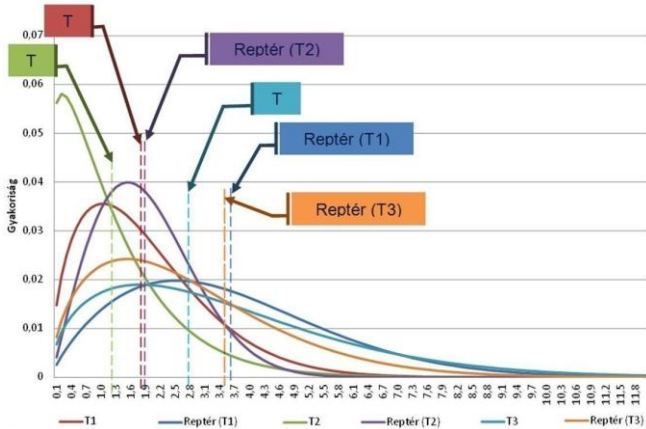
Kis szél turbinák összehasonlító vizsgálata. Feladatunk



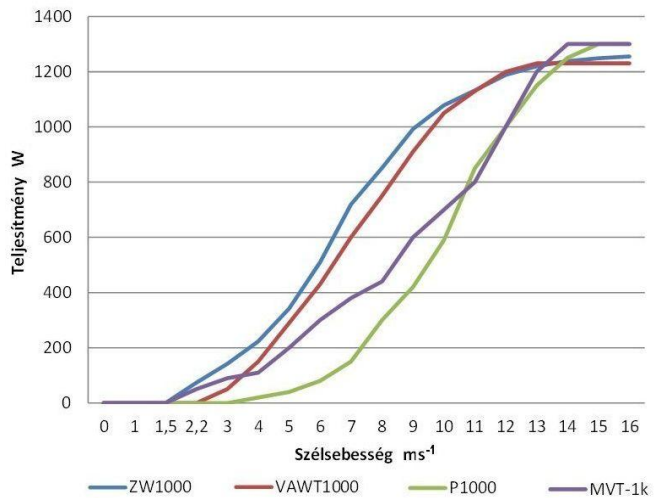
9. ábra: Unitek szélmérő



10. ábra: A telepített turbinák



11. ábra: A T1, T2, T3 és a reptéri szélesség-mérés eloszlásai



12. ábra: Alkalmazott szélerőmű karakterisztikák

rotorátmérő, ahol a lapát egészen különböző sebességű légtömegeken halad keresztül.) A modellezés jelenlegi szintjén megelégszünk lineáris, egy magasságra szóló összefüggéssel. A 7. ábrából kiolvasható, hogy a lineáris „átskálázási” tényező kb. 1,7. Ez az érték a legkisebb négyzetek módszerével tovább pontosítható.

A Hellmann-féle felskálázási tényezőt egy földrajzi ponton, vertikális irányban használják. Ehhez hasonlóan lehet egy távolabbi mérést az energiatermelő helyre és magasságára, a megtermelt energiamentiség alapján pontosan behangolni („átskálázni”). Jelen esetben a 33 m-es toronnyal, 10 méteren mért szélességgel (de egyéb felszíni jellemzőkkel nem számolva), a

volt néhány kisléptékű szél turbinája

- telepítési helyének kiválasztása,
- energia termelésének beccslése és
- telepítése, valamint a performancia mérése.

A telepítési hely kiválasztása. Első lépésként (8. ábra) a telepítési helyet választottuk ki a Budapest Airport Zrt. telephelyén. Több hónapon keresztül végeztünk szélesség méréseket, bár az évi széljárás eltérhet az ebben a mérési periódusban tapasztaltaktól. Elemeztük az összefüggést (korrelációt) az aktuális mérési hely és az évtizedekre visszatekintő OMSZ mérési helyszín közötti széljárás között. Feltételezésünk, hogy, ha a referenciaméréshez képest jelentősen nagyobb szélességeket mé-

rünk, akkor ez egész évben nagyobb energiájú szélesebbeséget jelent. Mértük a szélirányt is, amit a kiértékelések során szintén ábrázoltunk, azonban (mivel nem szélfarm telepítése történt) további számításokat ezen adatokkal nem végeztünk.

Egy hónapos méréseket (9. ábra) végeztünk a

- T1 – 1-es terminál tetőn, 15 m magasságban,
- T2 – 2-es terminál teraszon, 10 m magasságban,
- K – Kazán épület tetején, 12 m magasságban,
- T3 – használaton kívüli radartornyon, 20 méteren és az
- OMSZ – referencia mérőhelyén, 10 m magasságban.

Kereskedelembe kapható berendezéseket telepítettünk (10. ábra):

- 600 W HAWT – ZW 600 vízszintes tengelyű turbina 3

2. táblázat: A Weibull-függvény paraméterei

Mérési hely	λ értékek	Átlagos szélesebbesség ms^{-1}
T1 helyszín	2,1027	1,877
T2 helyszín	1,3443	1,2
T3 helyszín	3,0873	2,756
BA Zrt. saját mérés	4,0263	3,6
BA Zrt. saját mérés	2,1594	1,9
BA Zrt. saját mérés	3,905	3,486

rotorlapáttal,

- 500W VAWT mágneses lebegtetésű kombinált Savonius–Darrieus PER 500 turbina,
- 1000W VAWT 5 lapátos „kanalas” turbina – Sollight 1000 és
- 600 W VAWT Darrieus turbina – SAWT P600.

Szél mérés és adatelemzés a Budapest Airport Zrt. telephelyén. Vizsgáltuk az éves

- átlag szélesebbeségeket,
- szélirány-függőséget, irány-gyakoriságot és az
- eloszlásokat.

A szélesebbesség gyakoriság igen jól jellemezhető Weibull-eloszlással, valamint megadtuk a jellemző paraméterek és az átlagos szélesebbesség kapcsolatát is. Ez alapján azt mondhatjuk, hogy a λ paraméter nagyobb értéke magasabb átlagos szélesebbeséget jelent. Az 2. táblázatban összefoglaltuk az egyes mérési helyekre kapott λ értékeket és az ebből számított átlagos szélesebbeséget. A 11. ábrában foglaltuk össze az egyes mérési helyekre kapott Weibull-görbéket és átlagos szélesebbeségeket. Az ábra alapján a vizsgált mérési helyek közül a T3 mérés helyszíne a legkedvezőbb szél erőmű telepítésére. A mérések alapján, az itteni szélesebbesség ugyan elmarad a reptéri OMSZ mérés helyén tapasztalhatótól, azonban a vizsgáltak közül ez a legkedvezőbb a szél erőmű telepítésre.

A várható villamosenergia termelés. A kutatás során cél volt, hogy különböző elvű berendezéseket hasonlítsunk össze a gyakorlatban. A következőkben bemutatjuk,

hogy a T1-en végzett mérési időszakban mennyi villamos energiát lehetett volna termelni, különböző típusú, 1 kW-os névleges teljesítményű szélturbinákkal. A

- ZW1000 (a méretek miatt telepítésre került ZW600)
- VAWT1000
- P1000 (a méretek miatt telepítésre került P600)
- MVT-1k adataival számoltunk.

A felsorolt szél erőművek karakterisztikáit a 12. ábra mutatja. Érdekes megemlíteni, hogy a P1000 és az MVT-1k kis szélesebbeségek esetén rosszabbul teljesít, ugyanakkor $13 ms^{-1}$ felett viszont nagyobb a kimenő teljesítményük, mint a ZW1000 és VAWT1000 típusoknak (13. és 14. ábra). Tekintettel arra, hogy a mérési adatok alapján ennél jellemzően kisebb szélesebbeségeket mértünk, várhatóan a ZW1000 és a VAWT1000 termelése lesz nagyobb.

Mivel a T1 mérési helyre vonatkozóan állt rendelkezésre a legtöbb adat, ezért a várható energiatermelés számítását erre a mérési pontra, valamint a reptéri adatokra végeztük el. E számításnak az elsődleges célja, hogy kiválasszuk, melyik szél erőmű típust érdemes telepíteni. A helyszín kiválasztásához ez az elemzés nem feltétlenül szükséges, ugyanis az eldönthető a szélesebbesség-gyakoriságok Weibull-eloszlása alapján.

Az energiatermelést a

$$E = \int_{t_1}^{t_2} v(t) * P(v) dt,$$

képlettel számítottuk, ahol E a t_1-t_2 időtartam alatt termelt energia, $v(t)$ a szélesebbesség az idő függvényében és $P(v)$ a szélturbina karakterisztika, a szélesebbesség függvényében. A 15. ábra alapján, a telepített (T1) mérés helyszínén a várható villamos energia termelés nagyon alacsony volt, a szél erőmű névleges teljesítményéhez viszonyított kihasználás a legjobban teljesítő ZW1000 esetén is csak 7% volt.

Az OMSZ/BA mérése a T1-nél sokkal kedvezőbb helyen van felállítva. A vizsgált időszakban a ZW1000 kihasználtsága itt majdnem elérte a 20%-ot, ami már jónak mondható. Mivel a T3-as mérés gyakorlatilag együtt fut az OMSZ/BA méréssel, és csak kicsit alacsonyabbak a mért szélesebbeségek, várhatóan a termelés közel azonos lesz az itt számítottal.

A szimulációs számítások alapján elsősorban a ZW1000, vagy a VAWT1000 szél erőmű típustól várunk sokat, de az MVT-1k sem teljesített sokkal rosszabbul, mint a VAWT1000. A P1000-es egyedül a nagyobb szélesebbeségek ($12 ms^{-1}$ felett) tartományában teljesíthet jól.

Alkalmazott műszerek. Az esetileg felhasznált kézi műszereken túl UNITEK szél mérőt használtunk. Percenkénti adatmentés történt a következő mennyiségekről:

- minimális sebesség,
- átlagsebesség (egy perc alatti 10 mérés alapján),
- maximális sebesség,
- szélirány (fok).

A 16. ábrán a mérőrendszer vázlatát, a 17. ábrán a tényleges megvalósítást látjuk. Mértük az akkumulátor feszültséget, a töltőáramokat. Ezen túl állandó 80 mA és 150 mA-es, 1 és 3,6 W-os terhelést is alkalmaztunk. Az akkumulátorokat a töltő és esetenként külső ellenállás védi. Az adatgyűjtést 1 perces átlagmérésekkel végeztük. A turbinák egybe vannak építve a generátorral, esetleges szabályozóval, a töltő szabályozza a külső ellenállást. A szélesség–turbina karakterisztika nem egyezik meg a szélesség–töltő karakterisztikájával. Mi az utóbbit vizsgáltuk, ugyanis a felhasználót ez érinti. A töltés to-

vább függ az akkumulátor állapotától is.

Az UNITEK áram és feszültségmérőt percenkénti adatmentésre használtuk 5 csatorna adatainál a – feszültség átlagérték (egy perc alatti 10 mérés alapján), – áram átlagérték (egy perc alatti 10 mérés alapján) mérésére.

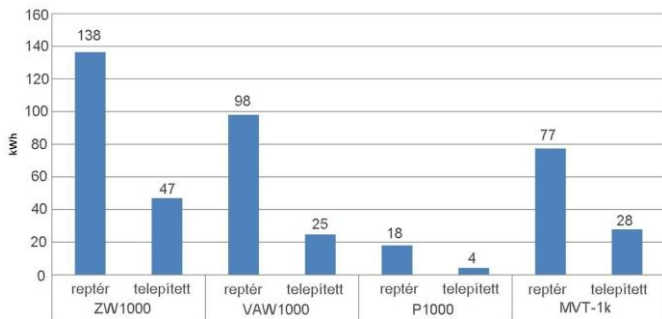
Karakterisztika mérés. A rövidtávú üzem kiértékelésére egy 80 perces szélvihart választottunk (2012.07.29. 20:00). Gyakorlatilag sem előtte (18. ábra), sem utána nem volt jelentős szél. A 19. ábrán a szélvihar alatt mért



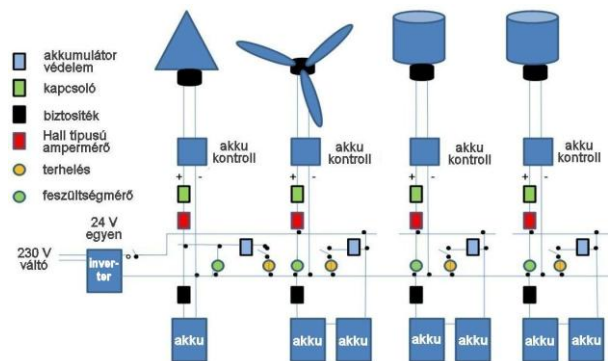
13. ábra: ZW600 és VAWT100



14. ábra: MVT-1k – PER 500 és a SAWT P600



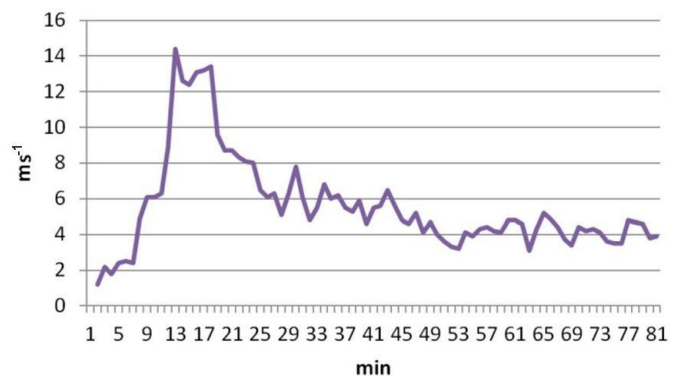
15. ábra: Energiatermelés számítás. Számított villamosenergia termelés október 11-től november 8-ig.



16. ábra: Mérési séma



17. ábra: Mérési elrendezés



18. ábra: Szélesség átlag a vihar közben

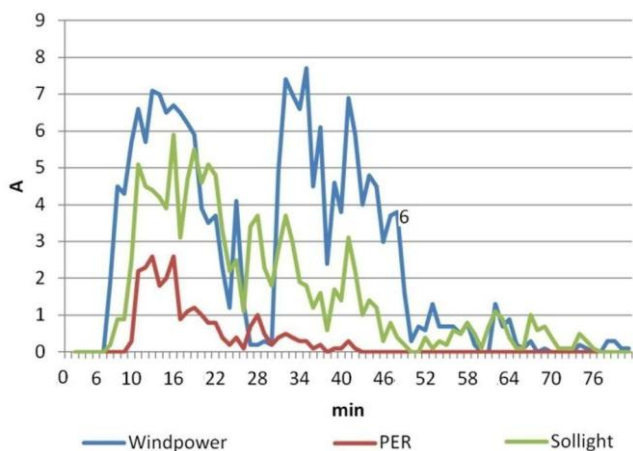
töltési áramokat ábrázoltuk. Ez igazolja, hogy kb. 4 ms^{-1} sebességnél indul a PER turbina és 3 ms^{-1} -nál a Windpower és Sollight turbina. Az áramok perces átlagértékek, de nincs közvetett információnk, hogy ettől jelentősen eltérnének a minimum-maximum értékek. Transziens méréseket itt nem végeztünk. Meg kell jegyezni, hogy ezek az értékek nem a turbina, illetve a generátor által leadott áramok, hanem a töltőből kijövő áramok. Bár egy terhelő ellenállás volt beépítve, nem feltételezzük, hogy egyéb normál töltés közben a megtermelt energia nagy részét egy ellenálláson eldisszipálná a töltő, így a mért értékeket a rendszer aktuális termelésének tekintjük.

A méréseket felhasználva kirajzoltuk a tapasztalati turbinák karakterisztikáit. Ezek közelítik a gyári formát, bár

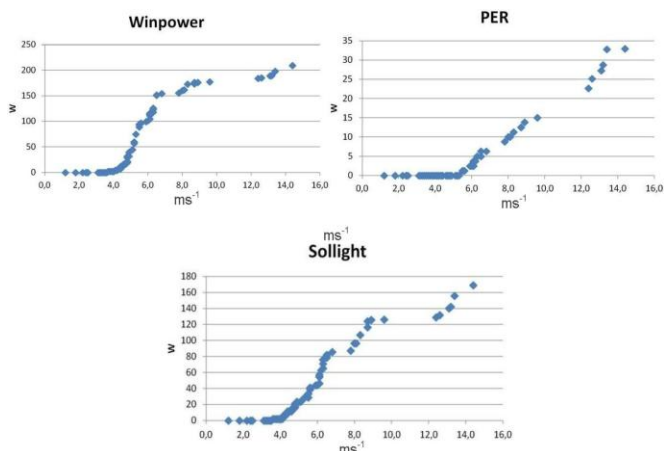
frontok ritkán alakítják (növelik) a „szokásos” sebességet. A 22. ábrán két nap széljárását nagyítottuk ki.

A rendszer normál üzemét mutatjuk be a 23., 24., 25. és 26. ábrán, az akkumulátor feszültségén és a töltőáram változásán keresztül. Jól látható, hogy jelentősebb szél esetén az akkumulátor töltődik, a feszültség átmenetileg megnövekedik, de utána is magasabb szinten marad. Amikor a töltés leáll, a műterhelés és az elektronika folyamatosan fogyasztja az akkumulátor energiáját, a feszültség csökken. Elegendő szél esetén a fel-le „szánkózás” hosszútávon fenntartható, a rendszer jól működik.

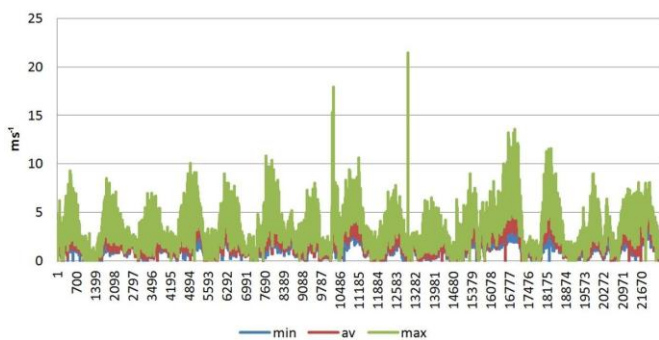
Más kérdés, hogy a megjáratott energia mennyisége messze elmarad a becsült mennyiségtől. Ez azt jelenti, hogy csak nagyon kicsi terhelést lehet biztonsággal a rendszerre kapcsolni.



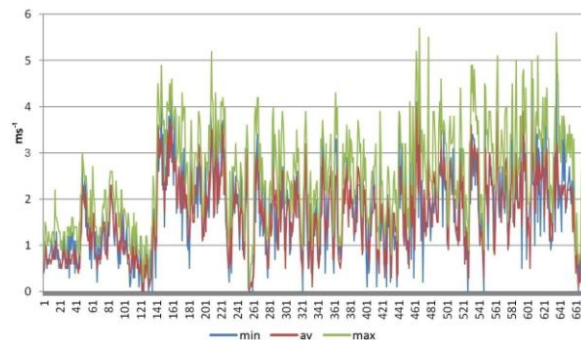
19. ábra: Generátor áramok a vihar közben



20. ábra: Akkumulátor töltési karakterisztikák



21. ábra: 2 hetes széljárás, 2012.. június 1–15.



22. ábra: 2 nap széljárása – min – átlag – max sebesség

csúcsteljesítményben messze elmaradnak attól. Jól látható, hogy $3-4 \text{ ms}^{-1}$ -nál indul a rendszer és $6-7 \text{ ms}^{-1}$ alatt érdemi termelés nem várható (25 kmh^{-1} !). E feletti szélsebességet városi környezetben viszont ritkán mérhetünk.

A mérések azt is is egyértelművé tették (20. ábra), hogy a legnagyobb energiatermelés (azonos szélviszonyok mellett) a Winpower (hagyományos kialakítású HAWT, 3 lapátos) géptől várható. A 2. helyen a Sollight (VAWT1000) gép áll. Ez a sorrend volt várható a bemutatott gépkarakterisztikák, és a villamosenergia-termelési szimuláció alapján.

Hosszabb távú mérés. A 21. ábrán 2 hét széljárását mutattuk be (minimum, átlag és maximum sebességek). Jól látható, hogy délben minden nap megerősödik a szél (ez a helyi lokális felmelegedésből adódik, míg az időjárási

A 26. ábrán mutatott esetben is működött a rendszer, attól eltekintve, hogy valamilyen oknál fogva akkutöltés nem volt. Az akkumulátor folyamatosan táplálta a terhelést, majd bekövetkezett a mélykisüléssel akkumulátor katasztrófa, amely az akkumulátor tönkremeneteléhez vezetett.

Ez ellen a következőkkel lehetne védekezni:

- sok szél és ennek eredményeként folyamatos külső töltés (tartós szélcsend mindig lehet),
- pl. kiegészítő napelemmel lehet tölteni (nagy biztonsággal) naponta a rendszert,
- túlzott fogyasztás esetén le kell kapcsolni a fogyasztást,
- külső töltőt kapcsolunk a rendszerre.

Érdekes tapasztalat (27. ábra), hogy az akkumulátortöltés és a szélsebesség között hosszú távon egyelőre nem

sikerült szoros kapcsolatot kimutatni. Azaz, a rendszer nem töltött mindig, amikor azt elvártuk volna (habár az akku nem volt túltöltve, és volt szél is). Lehet, hogy ennek ellenére a töltő elektronika helyesen működött, de erről nincsen közelebbi információnk.

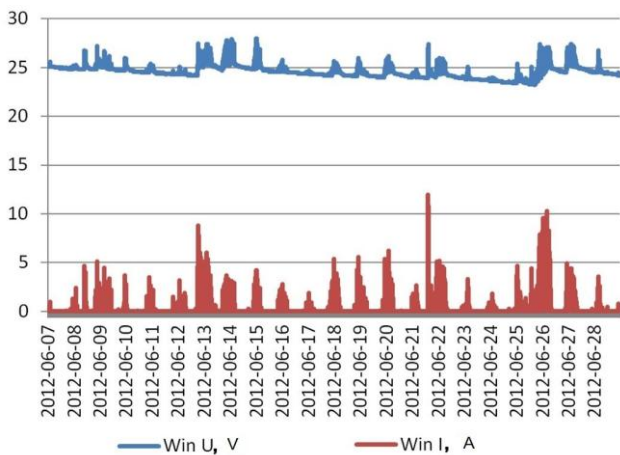
3. táblázat: Az elektronika terhelései

	Winpower 600	PER600	SOLLIGHT	SAWT
U, V	22,8±2,002	11,99±0,2002	22,8±2,002	22,7±2,002
I, mA	44,8±4,802	40,2±4,802	55±4,802	85±4,802

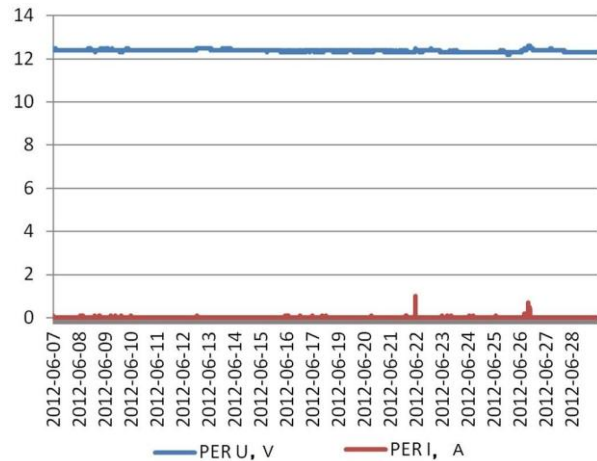
Terhelések. A rendszert feltöltött akkumulátorokkal helyeztük üzembe. Az akkumulátorok folyamatosan táplálják a szélturbinákhoz tartozó töltő berendezéseket, illetve esetenként további külső terhelést is kapcsolunk rájuk. A

Normál üzem. A 28., 29., 30. és 31. ábrán a szélturbina-akkumulátor rendszer normál, ideális üzemét látjuk. Amikor a szélviszonyok ezt lehetővé teszik, a töltő az akkumulátorba áramot táplál, aminek hatására a feszültség átmenetileg több V-tal megemelkedik. Szélcsendes időben a terhelések (az elektronika saját fogyasztása és a terhelés) egyenletesen csökkentik az akkumulátor feszültségét. Az újabb szeles periódusok „fel-fel tornásszák” a feszültséget.

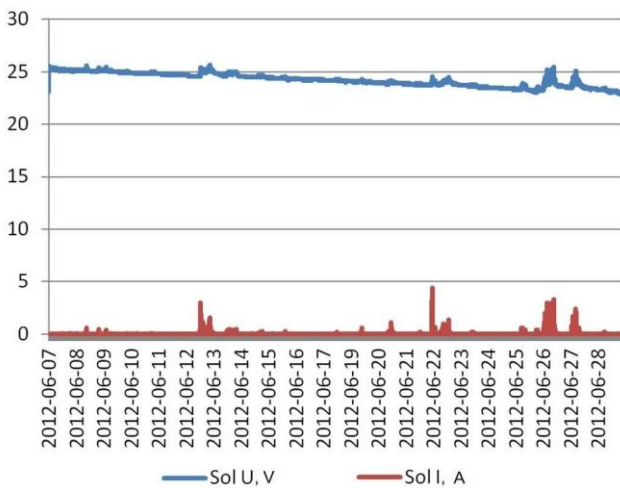
Energiamérleg. Fontos szempont a megtermelt energia-mennyiség elemzése. 10 napos időszak alatt vizsgáltuk a megtermelt és a külső fogyasztóba továbbított villamos energia mennyiségét. Az akkumulátor töltőáram és feszültség segítségével számítható a töltőből (nem a turbínából) az akkumulátorba áramló energia, ez 1,63 kWh



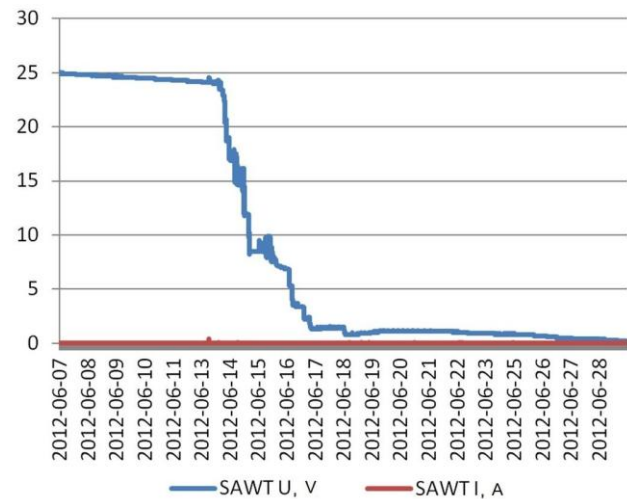
23. ábra: A WIN rendszer tartós üzeme



24. ábra: A PER rendszer tartós üzeme



25. ábra: A SOLLIGHT rendszer tartós üzeme



26. ábra: Az elégtelen töltésből adódó akkumulátor katasztrófa (mélykisülés)

mérést terhelés nélkül, kikötött lapátoknál végeztük. A helyiség hőmérséklete 29±0,8 °C volt (1,5 m magasságban). A terheléseket a 3. táblázat foglalja össze.

Külső terhelések (izzólámpa):

- a PER600 terhelő árama: 119,7±4,802 mA
11,68±0,2002 V akkufeszültség mellett,
- a többi készülék terhelő árama: 150,3±4,802 mA
22,9±2,002 V akkufeszültség mellett.

volt a vizsgált időszakban. A terhelés fogyasztása kb. 0,8 kWh, mindeközben az elektronika *stand-by* fogyasztása kb. 0,5 kWh.

Megállapítások.

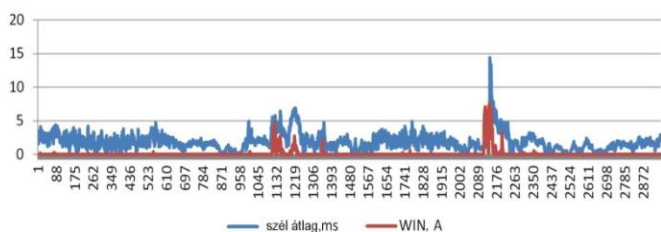
- Városi környezetben a „nagy szél” érzése még nem jelent energetikailag is jelentős szelet a kis szélturbinák számára. A kis szélturbinás termelés nem versenyképes a hálózatos energiával.

- Nehéz meghatározni a működő rendszerre kapcsolható terhelés nagyságát: ha túl nagy a terhelés, akkor hosszabb szélcsend esetén lemerül az akkumulátor. Kis terhelés esetén pedig a rendszer relatívan nagy költségu. Érdemes akkumulátor-védelmet telepíteni, amely vészjelzést ad, illetve a terhelést lekapcsolja alacsony töltöttségi szintnél. Egyes töltők (WinPower) ezt megoldják. Nem szabad megfélekedezni arról sem, hogy egy átlagos akkumulátor tárolási hatásfoka kb. 80%, vagyis a betáplálási és fogyasztási ciklusok alatt is fellép veszteség.
- Az akkumulátorok élettartama átlagosan 5 év, így a szigetüzemü megoldások több akkumulátor készletet is felhasználhatnak élettartamuk során.
- A hibrid rendszer (napelemek + szélturbina) segítik a nagyobb fogyasztás illesztését és folyamatos kiszolgálást.

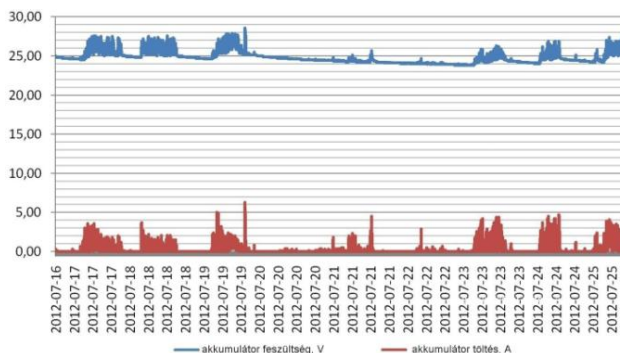
- A gyárilag megadott szélesség-teljesítmény karakterisztikák stacioner körülmények között valószínűleg igaznak bizonyulnak, de a volatilis, turbulens szél miatt állandóan szabályozgató rendszer messze nem hozza a becsült energiamennyiséget.
- A töltő elektronikák közül kettő számítógépes adatkapcsolatra és adatgyűjtésre is alkalmas. Szoftver inkompatibilitások és a helyi disztribútorok gyenge támogatási performanciája miatt ezeket a lehetőségeket nem sikerült beüzemelnünk.

Összegzés.

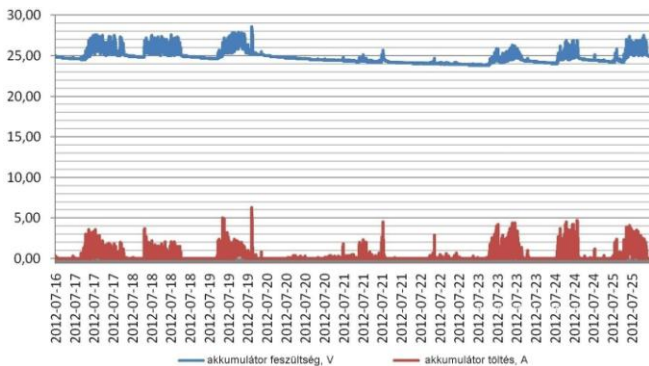
- Számos kisléptékü szélturbina elérhető a kereskedelemben.
- Különböféle „látványos” típusok is kaphatók, azonban ezek energiatermelésének egy részét „elviszi” a látvány.



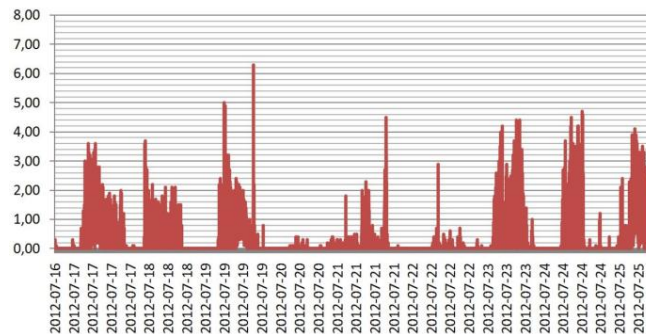
27. ábra: Szélesség és töltőáram közel szinkronban



28. ábra: A WinPower rendszer töltőárama és feszültsége



29. ábra: Akkumulátor mérési értékek

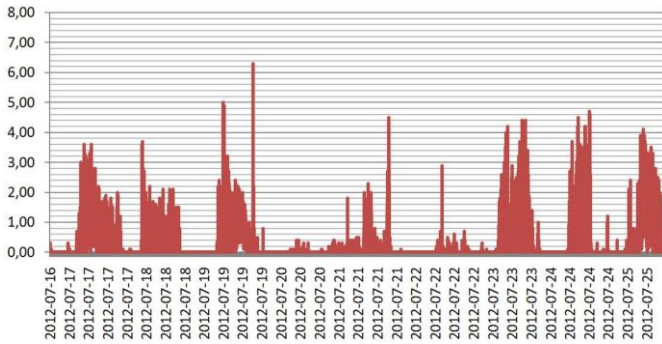


30. ábra: A WinPower rendszer töltőárama

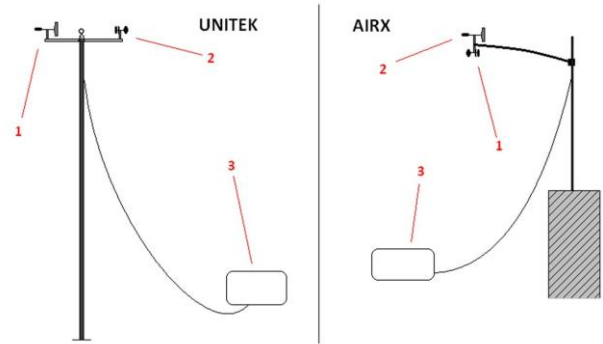
lását, védik az akkumulátort a mélykisüléstől.

- Sajnos nem teljesen ismert és nem kontrollálható az elektronikus töltők működése. Szerepük, hogy a változó intenzitású szél esetén, a változó frekvenciájú és feszültségű áramból közel azonos feszültségű és limitált töltőáramot hozzon létre. Képesek a turbinák “elektromos” fékezésére, illetve teljesen feltöltött akkumulátor esetén a felesleges energia eldisszipálására.
- Többször tapasztaltunk nehezen megmagyarázható eseteket, amikor nem túltöltött akkumulátor és jelentős szél esetén sem volt töltés.
- A töltők stand-by árama is hozzámérhető a fogyasztáshoz – kb. azonos nagyságrendü.
- Az 50–100 mA készenléti elektronika terhelés 1–2 Wattot jelent csak, de ez egy 100 Ah-s 24 V-os akkumulátort is lemerít kb. 1000 óra (40 nap) alatt.

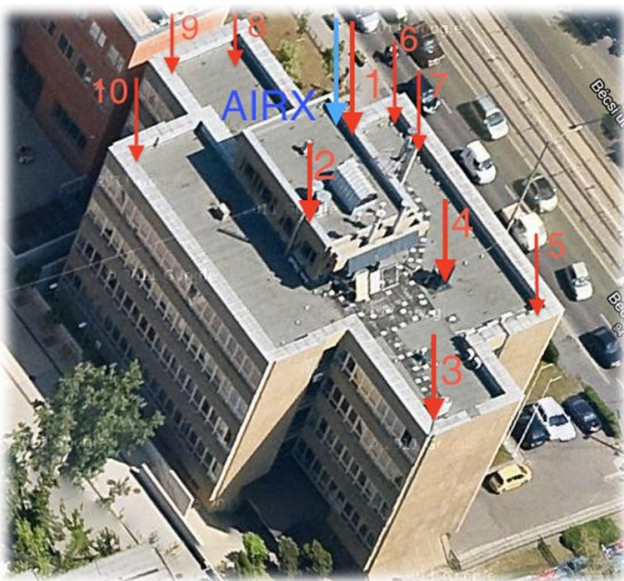
- Csodák itt sincsenek, adott energiájú szélből egyik módszerrel sem lehet „többet kivenni”.
- Ezeket a kisméretü szélturbinákat csak hálózattól távoli helyen (ahol nagyon költséges lenne a hálózat kiépítése) érdemes szigetüzemben üzemeltetni.
- A turbinák, illetve a turbinákkal felépített rendszerek sajnos messze kevesebbet termelnek az elvárásokhoz képest.
- A méréseink szerint a HAWT – WinPower turbina teljesített a legjobban.
- Hosszú távü mérésorozat eredményeként a szélárnyék-hatást (Wake effect) is ki lehet szűrni. Méréseinket ez nem befolyásolta jelentősen (pont a szélfelöli turbina termelte a legkevesebbet).
- A rendszer szük keresztmetszetét képezi az energiátárolás, az akkumulátor.



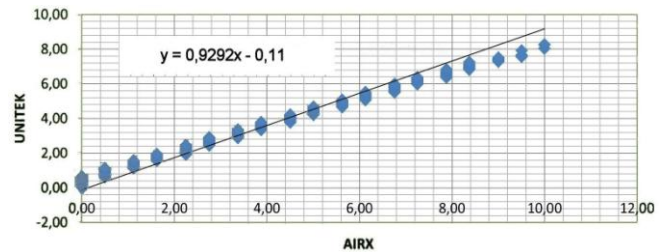
31. ábra: A WinPower rendszer feszültsége



32. ábra: A két mérőeszköz



33. ábra: Szélsebesség mérők elhelyezkedése



34. ábra: Korreláció a referencia pontban



35. ábra: Együftfutás a referencia pontban

– A napelemes hibrid kiegészítés sokat segít az akkumulátor védelemben és a folyamatos energiatermelésben.

Méréseink szerint a kis léptékű szélturbina hálózati ellátás mellett nem versenyképes. Ennek oka, hogy a szoba jöhető urbanizált telepítési helyeken nincs számottevő szél.

Épület szélklimájának feltérképezése. Célul tűztük ki az Óbudai Egyetem Bécsi út 96/b alatt található épület szélklimájának feltérképezését.² A szélklíma felvételéhez mindig két pont szélviszonyait hasonlítottuk össze két anemométer segítségével. Ezek közül az egyik egy referencia pont, ahol az elhelyezésre került szélsebesség mérő helyzetét az egész mérés ideje alatt nem változtattuk. A másik műszer pozícióját időszakonként – általában kéthetente – változtattuk. A második lépésben az épület szélklimáját modelleztük a mért pontokra. A modellezés annyiban különbözik az előző módszertől, hogy három különböző irányú és négy különböző sebességű áramlásba helyeztük a modellünket.

Ezek az irányok a következők É-K (szemből), D-K (Balról), É-NY (Jobbról), a sebességek pedig 5–10–15–20 ms⁻¹. A számítógépes modellt összehasonlítottuk a saját mérésünkkel.

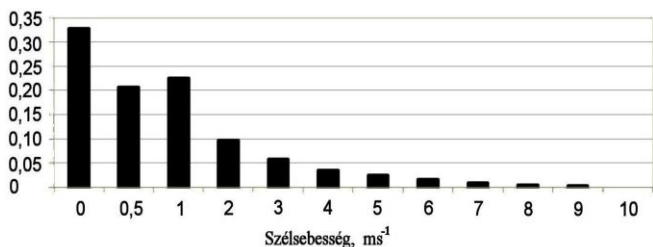
A műszerek részei:

- szélsebesség mérő
- szélirány mérő,
- adattároló.

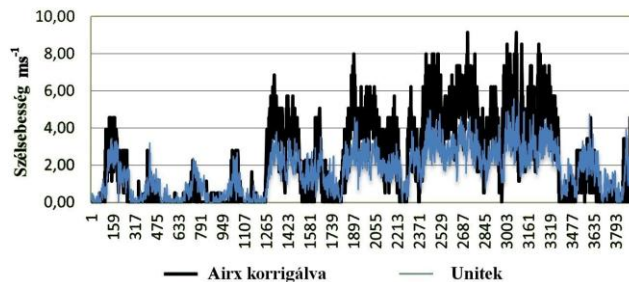
A 32. ábra a mérőberendezések elrendezését mutatja. Az UNITEK-et adott időszakokra telepítettük a 33. ábrán látható pozíciókba. Az AIRX szélmérőt a referencia-pontban használtuk. A szélirányt a műszerek vagy a fő és mellékirányokkal jellemzik vagy fokokban mérik.

A mérés ismertetése. A mérési időszak márciustól mintegy fél évig tartott. A 33. ábrán kék nyíllal jelöltük a referencia pontot, ahol az AIRX nevű szélsebesség mérőt helyeztük el. A piros színű nyilak a másik, UNITEK típusú anemométer pozícióit jelölik, melyet adott időszakokra (általában két hét) helyeztünk el a számozás sorrendjében.

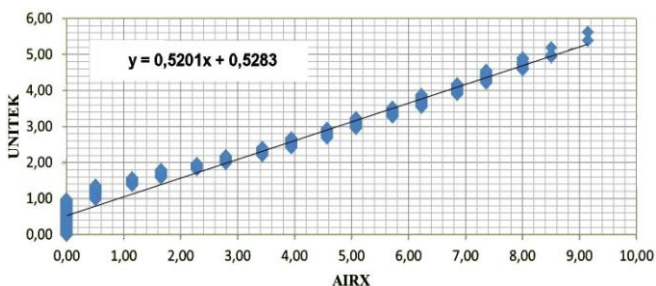
² Ress Imre és Nagypál Szilárd TDK munkája alapján, 2012.



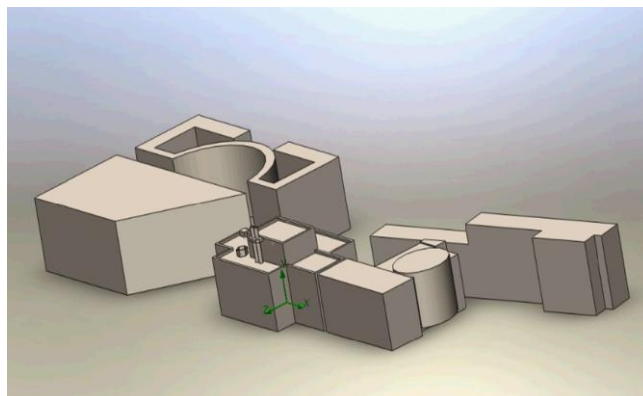
36. ábra: 14 napi szélsebesség mérések eloszlása



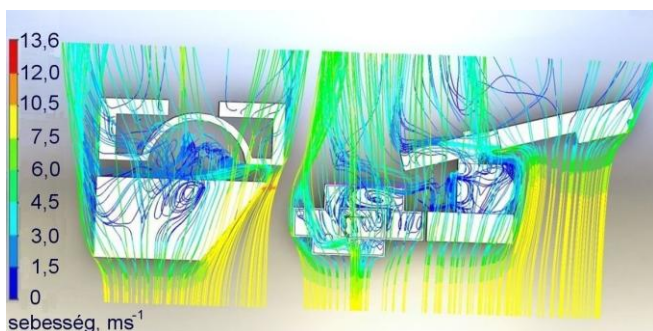
37. ábra: M3 együttfutás



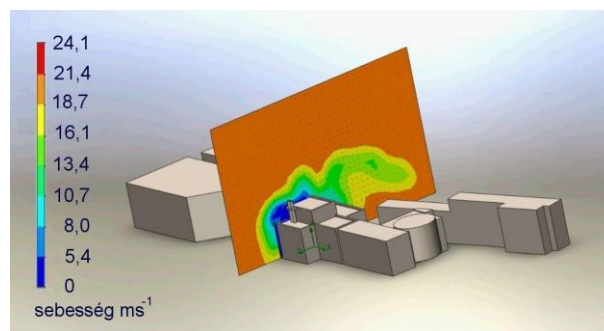
38. ábra: M3 korreláció



39. ábra: Az épület 3D-s modellje



40. ábra: Áramlási kép



41. ábra: Szélsebességek alakulása egy sík mentén

Mérési pontok nevei:

1. Referencia pont
2. Kis épület teteje, villámhárító
3. Vízartály
4. Napelem oktagon
5. Légkondicionáló kültéri egység
6. Észak-keleti sarok
7. Kémény
8. Átjáró Jobb sarok
9. Átjáró Bal sarok
10. Észak-nyugati sarok

Az 1. mérés során nem csupán a szélsebesség értékeire voltunk kíváncsiak, hanem megállapítottuk a két műszer együttfutását is.

Műszerek közötti eltérés meghatározása. Sajnos nem létezik két tökéletesen egyforma műszer, így a rendelkezésünkre álló eszközök között is eltérést tapasztaltunk. Ezt az eltérést a következőképpen állapítottuk meg:

Amikor a szélsebességmérők által rögzített adatsorokat a számítógépre felvittük, egy közel 4000 soros táblázatot kaptunk. A sorokban szereplő értékeket összeadtuk külön-külön a két műszernél, ezáltal mintegy integráltuk a szélsebességek által képezett görbét. Így eredményként a következőket kaptuk AIRX-nél: 4198,3 és UNITEK-nél: 5706,8. A két szám hányadosa megmutatja, hogy mekkora az átlag (d) differencia a két műszer között:

$$d = 4198,3/5716,8 = 0,73567$$

Ha az UNITEK 10 ms⁻¹-os szelet mér, az AIRX mindössze ennek 73,56%-át, 7,35 ms⁻¹-ot. Ezt az eltérést figyelembe kellett vennünk, az AIRX méréseit korigálnunk kellett (minden értéket 1,26-al szoroztunk), hogy az összehasonlítható lehessen a másik adatsorral. A két műszer által mért szélsebességek korrelációját és együttfutását a 34. és 35. ábrán látható.

Szélsebesség eloszlás diagram. A szélsebesség eloszlás diagramból leolvasható, hogy mennyi ideig fúj a szél,

mennyi ideig lehetett volna villamos energiát termelni. Adatok értelmezése: a lépcsőzetes görbe azt mutatja, hogy nem volt tartósan 3 ms^{-1} feletti szél, azaz jelentős áramtermelés nem volt lehetséges. Az eloszlás sűrűségfüggvénye mutatja, hogy az adott szélesség tartományban mennyi ideig fújt a szél. A 36. ábra a mérési időtartam szélesség eloszlás diagramját mutatja.

4. táblázat: Mérési eredmények

Mérés sor-száma	Mérés helye:	Függvény:	Arány szám:	Sor-rend
2	Kis épület teteje, vilámlámpa	$y = 0,934x - 0,16$	1,11	6
3	Víztartály	$y = 0,796x + 0,53$	0,76	9
4	Napelem oktagon	$y = 0,679x + 0,11$	0,91	8
5	Légkondicionáló kültéri egység	$y = 1,180x - 0,39$	1,39	4
6	Észak-keleti sarok	$y = 1,242x - 0,36$	1,56	2
7	Kémény	$y = 1,749x - 0,89$	2,44	1
8	Átjáró bal sarok	$y = 0,832x + 0,048$	0,97	7
9	Átjáró jobb sarok	$y = 0,900x - 0,27$	1,41	3
10	Észak-nyugati sarok	$y = 927x - 0,20$	1,21	5

Egy mérési hely – Víztartály. Az épület tetején található a tározós vízerőmű modell víztartálya. Ennek oldalához erősítettük szélességmérőnk, mely a referencia ponttól 32 méterre található, viszont itt már magasságbeli eltérések lépnek fel, ez a pont körülbelül 6 méterrel lejjebb található az előzőhöz képest. Feltételeztük, hogy itt egészen más értékeket fogunk kapni, és ezt mérésünk és a szimuláció is alátámasztotta.

A szél átlagsebességeinek viszonya az adatsorokat összegének hányadosával számítható:

$$\text{AIRX: } 8705,6$$

$$\text{UNITEK: } 6629,2$$

Melyből az arányszám: $6629,2/8705,6 = 0,76$, ami a legalacsonyabb az összes mérés közül, mivel a kis épület jelentős szélárnyékot képez ezen a helyen. A két anemométer valós időben gyakorlatilag egyáltalán nem korrelált ebben az időszakban. 0-tól $1,8 \text{ ms}^{-1}$ -ig az UNITEK mért magasabb értékeket, azonban $1,8 \text{ ms}^{-1}$ fölött ez megváltozott, sőt erősebb szélben akár 4 ms^{-1} -os különbség is előfordult az AIRX javára. Természetesen a szélesség átlag arányítás itt is értelmezhető (37. és 38. ábra).

Mérések összesítése. A tíz mérést elvégezve összesítettük az eredményeket, melyeket a 4. táblázat mutat.

A méréseink alapján szélturbinát a kémény tetejére érdemes telepíteni (7-es mérés). Ha ez kivitelezhetetlen, akkor javasoljuk az észak-keleti sarkot (6-os mérés).

Szimuláció. A szimuláció SolidWorks programban végeztük. „A SolidWorks gépészeti tervezést automatizáló szoftver egy olyan alakzat alapú parametrikus testmodellező eszköz, mely kihasználja a Windows könnyen kezelhető grafikus felhatalmált felhasználói felületének előnyeit. Teljesen asszociatív 3D testmodelleket alkothatnak kötöttségekkel vagy a nélkül, tervezési szándék automatikus vagy felhasználó által megadott kapcsolataival.”³ A SolidWorks megannyi képessége mellett áramlás szimulációra is alkalmas.

A szimuláció során a vizsgált épületet 3dimenzióban megrajzoltuk, majd egy szélsatornába helyeztük, ahol megfigyelhettük a szélviszonyok alakulását a szükséges pontokon.

A modellezés. A modellben az áramlás képét valószínűsíthetően leginkább befolyásoló épületeket kerültek megrajzolásra. A mérési helyeknek megfelelően itt is 10 darab mérési ponttal rendelkezünk melyek a 33. ábrán kerültek bemutatásra.

Az épületet három irányból fújtuk meg: É-K (szemből), D-K (Balról), É-NY (Jobbról) és 4 különböző sebességgel: 5, 10, 15 és 20 ms^{-1} -mal. Az épület szimulált sémája a 39. ábrán látható. A módszer a következő volt: a szimuláció alapján azonosítottuk a vizsgált helyen lévő áramlás színezését a bal felső sarokban lévő színskálával, amihez a pontos szélesség értékeket rendeltük. Leolvastuk a referenciapontnál szimulált szélességet és a mérési ponthoz tartozó értéket, majd ezekből számítottunk egy arányszámot. Ezzel az eljárással megkaptuk a két pont közötti összefüggést melynek segítségével össze tudjuk hasonlítani a két mérési helyet. Ha az arányszám 1 fölött van, akkor a referencia pontnál nagyobb szélességet jelent.

A szimulált áramlási képeken (40., 41. és 42. ábra) turbulenciákat is láthatunk, melyek hátrányosan érinthetnek egy telepítendő szélturbinát. Érdemes megfigyelni, hogy a szél sebessége már azelőtt lelassul, mielőtt elérné az épületeket (torló hatás). A programban kétféle szemléltetési módot lehetett beállítani. Az egyiknél egy áramlási képet kapunk, amin kivehetőek a turbulens áramlatok, valamint egyértelműek a szélirányok. A másik ábrázolásnál az áramlás egy metszetét láthatjuk, bemutatva az épületet körül vevő szél sebességét. Ez már kevésbé alkalmas a turbulens áramlások bemutatására és a szélirányokat egyáltalán nem prezentálja.

A szimuláció eredménye. Az 5. táblázatban feltüntetetésre kerültek a mérési és a szimulációs eredmények. Láthatjuk, hogy a szimulációban kapott eredmények is a kéményt hozták ki optimális telepítési helynek, megerősítve ezzel a mérésünket (M7). Ez az eredmény valószínűleg annak köszönhető, hogy ez a pont található a legmagasabban az összes többi közül, és nincs körülötte semmilyen szelet akadályozó objektum. Az alkalmatlanabb helyeknél már eltérést tapasztaltunk a mért- és a szimu-

³ Forrás: solidworks.hu

lált eredmények között. Az 5. táblázat a vizsgált helyszínek eredményeit mutatja rangsorolva.

A szimulációval létrehozott arányszámoknál jobban megfigyelhetőek a szélárnyékos helyek, mint a mérésnél. Például a víztartály értékeiből látható, hogy dél-keleti irányból érkező szél esetén az arányszám 1,13, ami érthető is, hiszen abból az irányból nem áll semmi a szél útjában. De ha ugyanezt az észak-keleti irányból vizsgáljuk, ahol a víztartály szélárnyékban van a kis épület miatt, az arányszám csak 0,55.

A kémény rendkívüli szélviszonyai itt is jól kivehetőek: az arányszáma sehol sem csökken 1,0 alá, vagyis mindhárom irányból és mindegyik sebességnél vizsgálva azt mondhatjuk, hogy a kémény a legideálisabb pozíció a szélturbina számára.

5. táblázat: A mérés és a szimuláció összehasonlítása.

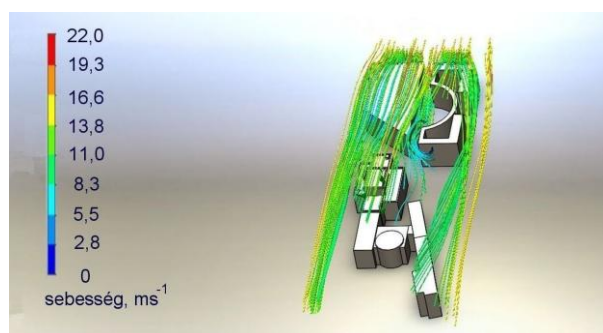
Mérés, legjobb három			Szimuláció, három legjobb		
1	M7	Kémény	1	M7	Kémény
2	M6	Észak-Keleti sarok	2	M6	Észak-Keleti sarok
3	M8	Északi átjáró jobb oldala	3	M3	Víztartály

Értékelés. Az eredményeket szemlélve láthatjuk, hogy a szimuláció és a mérés jól korrelál. A szélturbina optimális telepítési helye a kéménynél lenne, ezt mind a két mérési módszer alátámasztotta. A szimulációval létrehoztunk a széltérképhez nagyon hasonló „közel 3D-s” térképet, ami tájékoztatást ad az épületet körülvevő széljárásról. A szélturbinát nagy városokban nem gazdaságos működtetni, mert hiányzik a működtetéshez szükséges kellő szél erősség.

Összefoglalás. Az Óbudai Egyetem Villamosenergetikai Intézete alapvetően energetikai, energiatermelési szempontok alapján végez szélenergetikai kutatásokat. Ehhez a korlátozott idejű mérési lehetőségek miatt fejlesztünk ki egy olyan mérési eljárást, amellyel fel tudjuk használni a vizsgált helyszín néhány 10 km-es körzetében mért évtizedes adatsorokat. Ezt a módszert alkalmaztuk szélturbina elhelyezési, ill. termelésbecslési feladatban. A rövid idejű korrelációs mérésekkel egy módszert adtunk egy bonyolult épület szélklímájának feltérképezésre is, melyet szimulációval is verifikáltunk.

Irodalom

Kádár, P., 2006: A szélmalomoktól a szélerőművekig. Új Mandátum Kiadó, Budapest. pp. 176
 Kádár, P., 2007: Evaluation of Correlation of the wind speed measurements and wind turbine characteristics. 8th Int. Symp. of Hung. Researchers on Computational Intelligence and Informatics, IEEE CINTI, 15.11.2007, Budapest (Hungary), 429–440.
 Kádár, P., 2010: Elfújta a szél... – A hazai szélerőművek támogatása. *Elektrotechnika* 9, 17–19.
 Kádár, P., 2011: Solutions for the large scale wind energy integration to the power system. *Elektroenergetika*, 6th Int. Sci. Symp. on Electrical Power Engineering, 21.09.2011, High Tatras (Slovakia)
 Kádár, P., 2012: Comparative Performance Analysis of Small Scale Wind Turbines. *J. of Engineering Science and Technology Review* 5, 42–47.



42 ábra: Szélsebességek fonalas megjelenítése

Kádár, P., 2013: Experiences with Small Scale Wind Turbines. *ICCEP Conf. Proc.* Alghero (Italy) 11.06.2013, 1–6.
 Kádár, P., 2013: Mapping of wind climate in urban environment. *Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, Bilbao (Spain), 20.03.2013.13. *Renewable Energy and Power Quality Journal* 11, 1–4.
 Kádár, P., 2013: Large Scale Wind Turbines and their Application in Renewable Energy Systems. (eds: *Kaplanis, S. and Kaplanis, E.*). *Nova Science Publisher Inc.* New York, 405-452
 Kádár, P. and Nagy, L., 2012: Wind measurement analysis for deployment urban small scale wind turbine. 10th Int. Symp. on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2012.) Herlany (Slovakia), *Submission* 102.
 Krisztián Lamár, K. and Morva, Gy., 2013: Hardware and Software Functions of Standalone Field Data Acquisition Devices for the Low Voltage Power Distribution Grid. *Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering* 6, 22–27.
 Molnár, L. és Kádár, P., 2007: Hidrogén előállítás megújuló szélenergiával a közlekedésért. *Intelligens Energiarendszerek. Konferencia Előadaskötet*, Budapest, 37–42.