

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 136

**OBRADA I ANALIZA MJERENIH
PODATAKA ZA VJETAR U URBANOJ
SREDINI**

Pero Vukić

Zagreb, siječanj 2011.

Zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc.
Zdenku Šimiću na savjetima i podršci

Sadržaj

1. UVOD	5
2. OSNOVNA TEORIJSKA PODLOGA	6
2.1. Snaga i energija vjetra.....	6
2.2. Promjena brzine vjetra s visinom	11
2.3. Turbulencije.....	14
3. INSTALIRANI VJETROAGREGAT I MJERNI UREĐAJI	17
4. METODE ANALIZE I PROCJENE POTENCIJALNE SNAGE VJETRA	18
4.1. Direktne metode analize podataka, procjene potencijalne snage vjetra i proizvodnje turbine....	18
4.1.1. Direktna upotreba podataka	18
4.1.2. Metoda razreda	20
4.2. Statističke metode	21
4.2.1. Weibullova razdioba	21
4.2.2. Rayleighova razdioba	26
5. PRIKAZ I OBRADA MJERENIH PODATAKA	28
5.1. Struja i napon	30
5.2. Temperatura.....	35
5.3. Relativna vlažnost zraka.....	38
5.4. Vertikalna brzina vjetra.....	41
5.5. Brzina vjetra	43
5.6. Intenzitet turbulencija	45
5.7. Smjer vjetra	47
5.7.1. Ruža vjetrova za sve podatke	47
5.7.2. Ruža vjetrova za pojedine mjesece	49
5.8. Snaga i energija vjetra i vjetroagregata	53
5.8.1. Ukupna snaga i energija dobivene stvarnim mjerenjem na lokaciji	53

5.8.2.	<i>Ukupna snaga i energija dobivene procjenom iz krivulje snage</i>	56
5.8.3.	<i>Snaga i energija za pojedine mjesece</i>	61
5.9.	Statistička analiza podataka	64
6.	ZAKLJUČAK	67
7.	LITERATURA	68
	SAŽETAK	70
	ABSTRACT	71
	POPIS SLIKA	72
	POPIS TABLICA	74
	DODATAK 1. OPIS INSTALIRANOG VJETROAGREGATA I MJERNE OPREME	75
	Senzor temperature	75
	Higrometar	78
	Anemometar	79
	<i>Anemometar s lopaticama</i>	81
	<i>Ultrazvučni anemometar</i>	82
	<i>Laser doppler anemometar</i>	82
	<i>Anemometar s ugrijanom žicom</i>	83
	<i>Tlačni anemometri</i>	84
	<i>Opis instaliranog anemometra</i>	85
	Vertikalni anemometar	87
	Pokazatelj smjera vjetra	88
	Vjetroagregat Rutland 503	90
	DODATAK 2. MATLAB KOD KORIŠTEN U RADU	92

1. Uvod

Kao što mu i sam naslov kaže, cilj ovog rada je obraditi i analizirati mjerene podatke s eksperimentalnog sustava instaliranog na neboder FER-a (C zgrada). Mjerna oprema sastoji se od anemometra, pokazivača smjera vjetra, vertikalnog anemometra, termometra i higrometra. Također, mjeri se struja i napon na trošilu koje je priključeno na vjetroagregat. Svi podaci se mjere u intervalima od deset sekundi što osigurava visoku rezoluciju, ali takva opsežnost mjerenja otežava obradu podataka.

Korištenje prikupljenih podataka na razmatranoj lokaciji najprecizniji je način procjene potencijalne snage i energije vjetra. Drugi, manje precizan način dobivanja podataka je koreliranje podataka s najbliže meteorološke stanice. Jedan od ciljeva rada je usporediti izmjerenu snagu vjetroagregata s krivuljom snage vjetroagregata koju daje proizvođač.

Naravno, da bi imali što točnije podatke i da bi ih mogli razumjeti, važno je poznavati glavne karakteristike mjernih uređaja. Stoga su u zasebnom poglavlju detaljno opisani svi korišteni mjerni uređaji.

Ovaj rad ujedno je i početak analize podataka dobivenih mjerenjem na promatranoj lokaciji. S obzirom na to da se radi o prvim mjerenjima na lokaciji i da je sustav tek osposobljen, očekivalo se dosta grešaka u mjerenjima (nedostaci podataka, krivo mjereni podaci, greške prilikom pretvorbe u stvarne fizikalne veličine i sl.). Takvi podaci su korigirani na najbolji mogući način.

Daljnjim unapređenjem sustava u budućnosti trebali bi dobiti potpunije podatke. Mali period mjerenja također nije dovoljan za konkretnu ocjenu lokacije, ali neke zaključke možemo izvesti. Nove spoznaje valja očekivati iz rezultata daljnjeg mjerenja i obrade podataka na razmatranoj lokaciji.

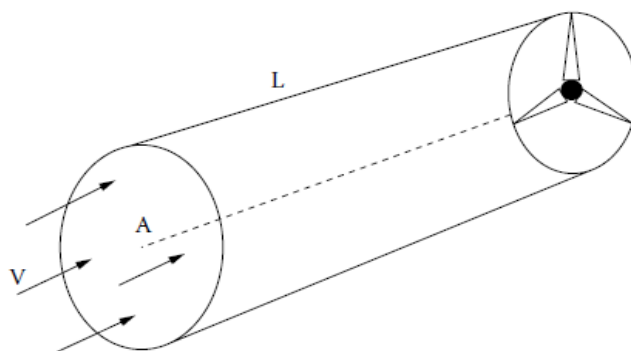
Na početku rada objašnjeni su osnovni pojmovi vezani za snagu i energiju vjetra, promjene brzine vjetra s visinom i turbulencije. Osim toga, u nastavku su detaljno opisane metode analize i procjene potencijalne snage vjetra i obrađeni su svi mjereni podaci. Provedena je i statistička analiza podataka, odnosno pokušalo se utvrditi u kojoj mjeri podaci brzine vjetra slijede Weibullovu razdiobu.

2. Osnovna teorijska podloga

2.1. Snaga i energija vjetra

Energija vjetra je kinetička energija. Molekule zraka koje se gibaju imaju kinetičku energiju, tako da količina molekula zraka koje prolaze preko nekog područja u određenom vremenskom periodu određuje energiju vjetra.

Budući da lopatice turbine prilikom vrtnje opisuju zamišljeni krug površine A i ako uzmemo neki cilindar duljine L (slika 1) [4], tada se pomoću volumena i gustoće zraka može izračunati ukupna masa čestica koje dolaze na lopatice turbine, a pomoću mase i brzine dobije se kinetička energija.



Slika 1. Zamišljeni cilindar koji opisuje vjetar na ulasku u turbinu

Iz izraza za kinetičku energiju danog formulom 2.1, dalje se izvode izrazi za energiju i snagu vjetra [1], [2], [3]:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.1)$$

Masu zraka određuje gustoća, površina kroz koju struji, kao i brzina i vrijeme:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (2.2)$$

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot t \quad (2.3)$$

Snaga vjetra je derivacija kinetičke energije po vremenu, dW_k/dt :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.4)$$

Pritom je važno primijetiti sljedeće važne činjenice:

- Snaga vjetra proporcionalna je gustoći zraka. Za standardne uvjete (morska razina, temperatura 15 °C) gustoća zraka iznosi 1.225 kg/m³.
- Snaga vjetra proporcionalna je zamišljenoj površini koju opisuje rotor.
- Snaga vjetra proporcionalna je kubu brzine vjetra. Ako brzina vjetra poraste dva puta, snaga poraste osam puta.

Formule (2.3) i (2.4) daju maksimalnu teorijsku energiju odnosno snagu koja je sadržana u vjetru. Kad bi se zrak iza turbine zaustavio turbina bi preuzela svu tu energiju odnosno snagu. Ukupna kinetička energija zraka ne može se sva iskoristiti jer zrak mora dalje strujati da bi načinio mjesta onome koji dolazi, energija se djelomično gubi na trenje, te turbina može iskoristiti samo jedan dio te energije koji je proporcionalan razlici kinetičkih energija zraka ispred i iza turbine. Izraz za mehaničku snagu turbine je [4]:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (2.5)$$

gdje je:

\dot{m} – maseni protok (kg/s), ovisi o prosjeku brzina tj. $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{v+v_0}{2}$

v – brzina vjetra na ulazu u turbinu

v_0 – brzina vjetra na izlazu iz turbine

Uvrštavanjem masenog protoka u izraz 2.5 slijedi da je energija turbine [4]:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2} \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (2.6)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (2.7)$$

$$c_p = \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (2.8)$$

Faktor c_p ima maksimum za omjer $\frac{v_0}{v} = 1/3$ i iznosi $c_{p \max} = c_{p \text{ Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59259$ [4]. Betzov faktor objašnjava da je maksimalno moguće iskoristiti 59% snage vjetra. U praktičnoj primjeni, turbine mogu iskoristiti puno manje od vrijednosti Betzova faktora. Ako uzmemo u obzir maksimalni stupanj djelovanja turbine od oko 0.65 i stupanj djelovanja generatora od otprilike 0.8, dobijemo da je

moгуće iskoristiti nešto više od 30% ukupne energije vjetra za proizvodnju električne energije [5]:

$$P_{el} = 0.59259 \cdot 0.65 \cdot 0.8 \cdot P_v = 0.31 \cdot P_v \quad (2.9)$$

Upravo zbog ovisnosti snage o trećoj potenciji brzine možemo objasniti zašto ima puno raspoložive snage na velikim brzinama vjetra, a to također postavlja i ograničenja na turbine koje mogu biti uništene pri takvim brzinama. Zbog kubne ovisnosti snage o brzini, nije dobro procjenjivati potencijalnu snagu i energiju vjetra korištenjem samo srednje brzine vjetra. Takvom procjenom možemo dosta pogriješiti u procjeni snage, kao što je prikazano sljedećim jednostavnim primjerom.

Primjer 1.

Pretpostavimo da srednja brzina vjetra godišnje iznosi 15 m/s i izračunajmo gustoću snage:

$$\frac{P}{A_1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 = 0.5 \cdot \rho \cdot 15^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 3375 \quad (2.10)$$

Sada treba pogledati što se dogodi sa snagom u slučaju kad je brzina vjetra prvu polovicu vremena jednaka 10 m/s, a drugu polovicu 20 m/s. Srednja brzina je također 15 m/s, ali gustoća snage je:

$$\frac{P}{A_2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^3 + v_2^3) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (10^3 + 20^3) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 4500 \quad (2.11)$$

$$\frac{\frac{P}{A_2}}{\frac{P}{A_1}} = \frac{4500}{3375} = 1.33 \quad (2.12)$$

Gustoća snage je 33% veća nego u prvom slučaju upravo zbog kubne ovisnosti snage o brzini. Srednja vrijednost kuba brzine uvijek je veća od kuba srednje vrijednosti brzine. Razlog tome treba potražiti u činjenici da srednja brzina ignorira brzine ispod i iznad nje, a upravo brzine iznad srednje vrijednosti najviše doprinose snazi vjetra.

Standardna gustoća zraka iznosi 1.225 kg/m³ i mjeri se na 15 °C (288.15 K) i na tlaku zraka morske razine. Zbog male gustoće zraka vjetar je difuzni izvor energije. Zbog toga su potrebni sustavi velikih dimenzija za značajniju proizvodnju električne energije iz vjetra.

Snaga vjetra proporcionalna je vrijednosti gustoće zraka koju računamo iz jednadžbe stanja idealnog plina [3],

$$\rho = \frac{M}{R} \cdot \frac{p}{T} \quad (2.13)$$

gdje je:

T – temperatura (K)

p – tlak (Pa)

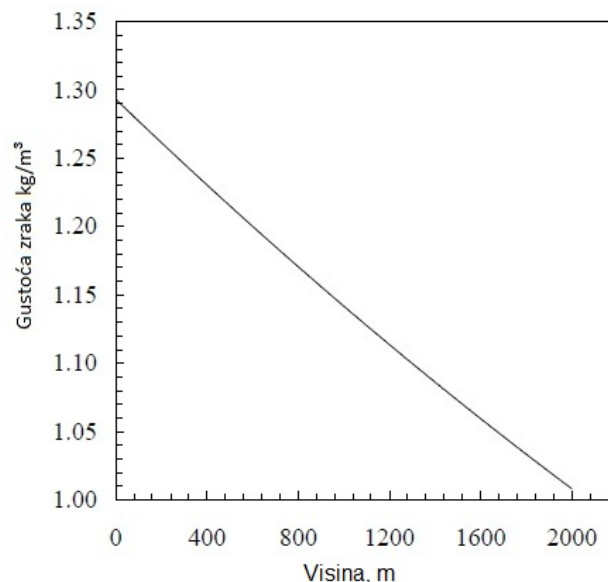
R – plinska konstanta, 8.314 J/Kmol

M – molna masa plina (kg/kmol)

Iz formule je vidljivo da gustoća zraka ovisi o tlaku (glavni utjecaj na tlak ima promjena nadmorske visine), temperaturi i o masi zraka (utjecaj vlažnosti zraka). Vidljivo je da visoke temperature i niski tlak zraka smanjuju gustoću zraka, smanjujući tako linearno i snagu. Ipak, glavni faktor u promjeni gustoće je promjena u tlaku s povećanjem nadmorske visine. Ako znamo nadmorsku visinu z i mjerimo temperaturu T na promatranom mjestu, tada gustoća zraka eksponencijalno ovisi o promjeni visine i dana je izrazom [3]:

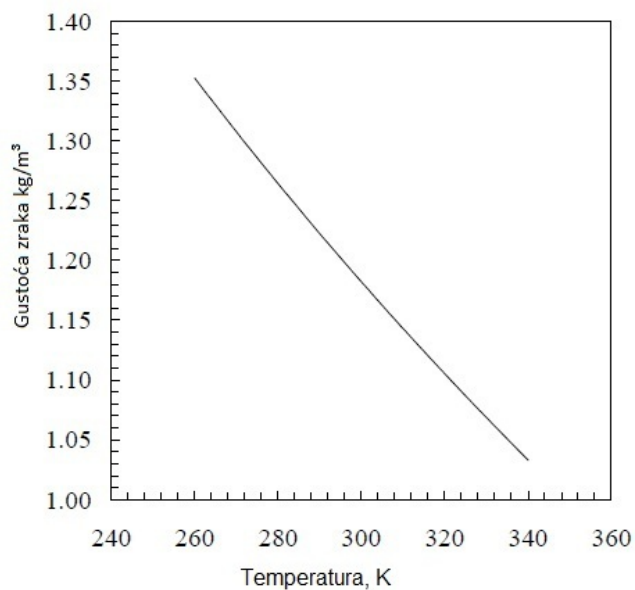
$$\rho = \frac{353.049}{T} \cdot e^{(-0.034 \cdot \frac{z}{T})} \quad (2.14)$$

Naredna slika (slika 2) ilustrira promjenu gustoće zraka s visinom [3].



Slika 2. Promjena gustoće zraka s visinom

Utjecaj temperature na gustoću zraka vidljiv je na slici (slika 3) [3]. Iz slike se vidi da je gustoća zraka obrnuto proporcionalna promjeni temperature. Zrak je tako ljeti rjeđi nego zimi, a te varijacije mogu biti 10 do 15% [3].



Slika 3. Utjecaj temperature na gustoću zraka

Iz tabličnih vrijednosti (tablica 1) vidi se primjerice da na temperaturi od -20 °C gustoća iznosi 1.395 kg/m³, a na temperaturi od 40 °C gustoća iznosi 1.127 kg/m³ [7]. Ako ovaj odnos prikažemo postotno vidljivo je da u hladnom zraku ima gotovo 25% više molekula zraka u kubičnom metru nego u toplom zraku.

Tablica 1. Promjena gustoće zraka s promjenom temperature

Temperatura (°C)	Gustoća suhog zraka (kg/m ³)
-25	1.423
-20	1.395
-15	1.368
-10	1.342
-5	1.317
0	1.292
5	1.269
10	1.247
15	1.225
20	1.204
25	1.184
30	1.165
35	1.146
40	1.127

Povećanje vlažnosti zraka smanjuje gustoću zraka. Iako je ova tvrdnja na prvi pogled nelogična, lako je utvrditi njezinu ispravnost. Za bilo koji plin na danom iznosu temperature i tlaka, broj molekula mora biti konstantan (prema idealnom plinskom zakonu). Tako se u slučaju povećanja broja molekula vode (povećanje vlažnosti) mora smanjiti broj ostalih molekula u zraku da bi se spriječio porast temperature i tlaka. Budući da molekula vode ima manju molnu masu ($M \approx 18$ g/mol) od molekula dušika ($M \approx 28$ g/mol) i kisika ($M \approx 32$ g/mol) koji čine 78% molekula suhog zraka, vidljivo je da povećanjem vlažnosti opada gustoća zraka. Gustoća vlažnog zraka može se odrediti iz izraza [8],

$$\rho_{\text{vlažnog zraka}} = \frac{p_d}{R_d \cdot T} + \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad (2.15)$$

pri čemu su:

p_d – parcijalni tlak suhog zraka (Pa)

R_d – plinska konstanta za suhi zrak, 287.058 J/(kg·K)

T – temperatura (K)

p_v – tlak pare (Pa)

R_v – plinska konstanta vodene pare, 461.495 J/(kg·K)

Tlak pare računa se prema formuli 2.16 iz tlaka zasićene pare (p_{sat}) i relativne vlažnosti zraka (φ) [8]:

$$p_v = \varphi \cdot p_{sat} \quad (2.16)$$

U pravilu na svakoj lokaciji dnevne ili sezonske promjene temperature imaju puno veći utjecaj na gustoću zraka, nego što imaju promjene u tlaku ili vlažnosti zraka.

Budući da se na odabranoj lokaciji tlak može varirati od npr. 970 mbar do 1060 mbar, a temperatura od -15 °C do 35 °C, ukupne promjene u gustoći zraka utjecat će na snagu turbine s otprilike 10% [1]. Iako je gustoća zraka jedan od tri faktora koji utječu na snagu vjetra, pretpostavka standardnih uvjeta zadovoljava u većini slučajeva. Naravno, u slučaju da uvjeti na lokaciji značajno odstupaju od standardnih potrebno je uzeti u obzir proračun gustoće zraka.

2.2. Promjena brzine vjetra s visinom

Brzina vjetra, a samim time i snaga, ovise o visini iznad zemljine površine. Strujanje zraka iznad zemlje usporeno je zbog trenja čestica zraka s površinom

zemlje. Trenje može biti uzrokovano zbog same konfiguracije tla (različita vegetacija, planine, brežuljci) ili prepreka kao što su visoke zgrade ili slične strukture. Teoretski, brzina vjetra na samoj površini zemlje trebala bi zbog trenja biti nula.

Efekt usporavanja vjetra zbog sile trenja smanjuje se s povećanjem visine. To uzrokuje povećanje brzine vjetra s povećanjem visine.

Postoje dva osnovna principa koji objašnjavaju varijacije brzine vjetra s visinom: zakon profila snage (eng. power law) i logaritamski zakon (temelji se na mehanici fluida graničnog sloja atmosfere u kombinaciji s iskustvenim spoznajama atmosferskih istraživanja).

Zakon profila snage izveden je empirijski iz stvarnih mjerenja i glasi [2], [3], [4]:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2.17)$$

pri čemu su:

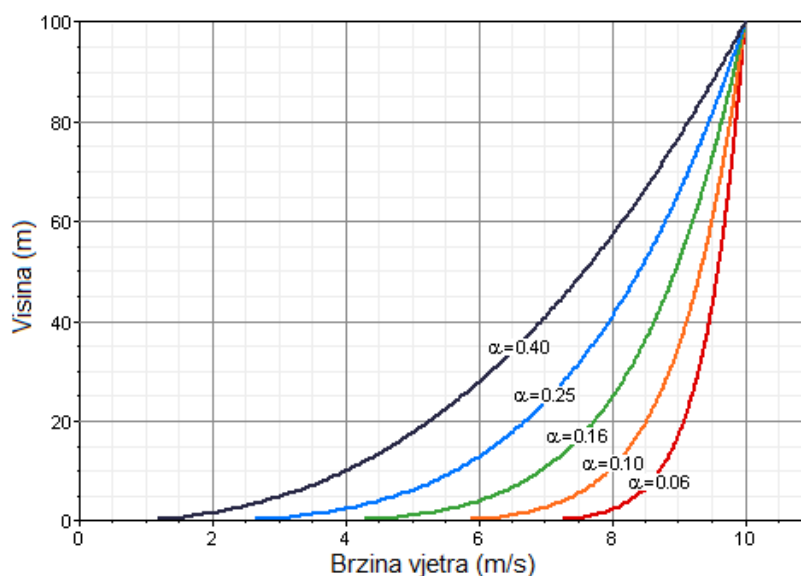
v_0 – mjerena brzina vjetra

H_0 – visina na kojoj je mjerena brzina v_0

H – visina

α – koeficijent smicanja vjetra

Koeficijent α ovisi o vrsti terena, a neke karakteristične vrijednosti su: mirna voda i glatko i tvrdo tlo $\alpha = 0.10$, visoka trava $\alpha = 0.15$, šume $\alpha = 0.25$, urbano područje s visokim zgradama $\alpha = 0.4$. Naredna slika (slika 4) ilustrira promjenu brzine s visinom prema zakonu profila snage za različite vrijednosti α [4].



Slika 4. Promjena brzine vjetra s visinom prema zakonu profila snage

Logaritamski zakon matematički je izveden iz teoretskog razumijevanja gibanja vjetra preko površine zemlje. Koeficijent grubosti terena z_0 koristi se da bi se opisao utjecaj konfiguracije terena na brzinu vjetra.

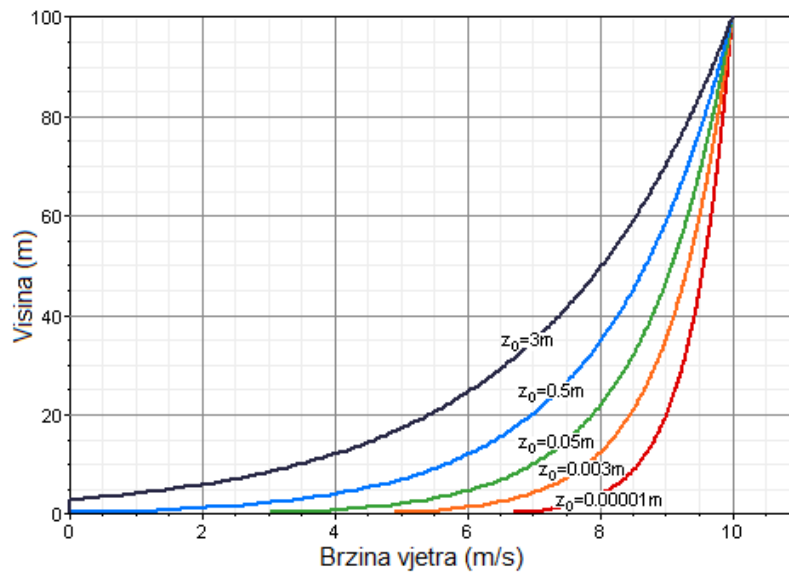
Promjena brzine vjetra s visinom prema logaritamskom zakonu predstavljena je dvjema formulama. Osnovni izraz je [2], [3], [4]:

$$v = v_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (2.18)$$

Drugi izraz koji pretpostavlja brzinu vjetra jednaku nuli na površini [4]:

$$v = v_0 \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{H_0}{z_0}\right)} \quad (2.19)$$

Slika 5 pokazuje promjenu brzine s visinom prema logaritamskom zakonu za različite vrijednosti koeficijenta z_0 [4].



Slika 5. Promjena brzine vjetra s visinom prema logaritamskom zakonu

U tablici 2 dane su neke karakteristične vrijednosti koeficijenta z_0 [6].

Tablica 2. Iznos koeficijenta grubosti terena za različite vrste terena

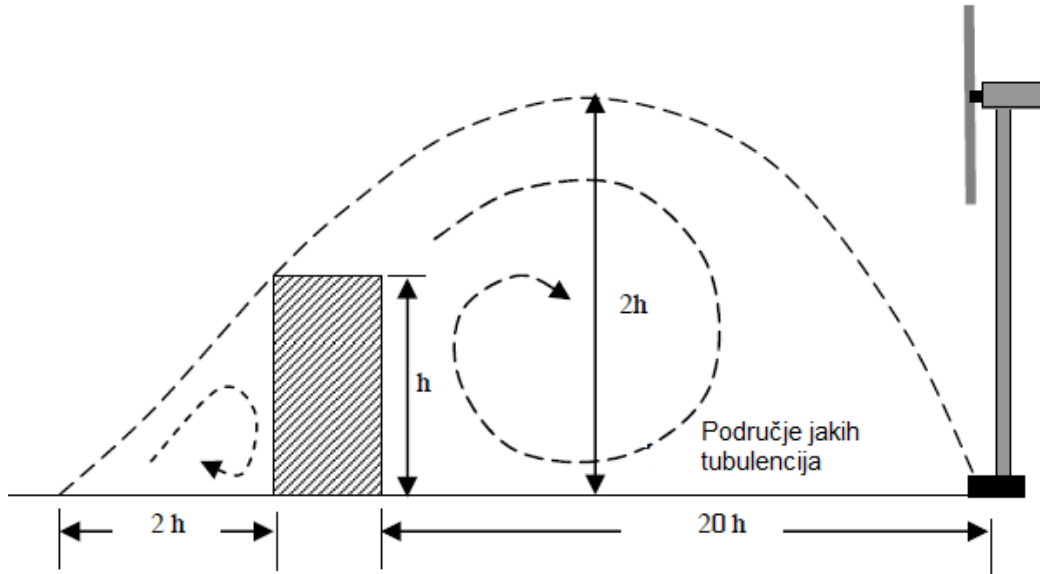
Opis terena	Koeficijent z_0
Snijeg, ravna zemlja	0.0001
Mirno otvoreno more	0.0001
Valovito more	0.001
Snijeg, obrađena zemlja	0.002
Travnjaci	0.02 – 0.05
Žitna polja	0.05
Farme	0.002 – 0.3
Malo drveća	0.06
Puno drveća	0.3
Šume	0.4 – 1.2
Gradovi	1.2
Centri gradova s velikim zgradama	3

Bez obzira na izbor metode za proračun brzine vjetra s visinom, treba uzeti u obzir i činjenicu da na malim brzinama vjetra efekt povećanja brzine vjetra s visinom nije tako izražen i postojan kao u slučaju većih brzina vjetra.

2.3. Turbulencije

Turbulencije vjetra uzrokuju gubitak kinetičke energije vjetra njenom pretvorbom u toplinsku energiju (progresivnim stvaranjem i nestajanjem vrtloga). Turbulencije ne samo da smanjuju raspoloživu snagu vjetra, nego i stvaraju dodatna naprezanja na lopatice turbine. Jasno je da se zato želi smanjiti njihov utjecaj na najmanju moguću mjeru.

Brzina vjetra u trenutku nailaska na prepreku brzo se mijenja i nastaje turbulentno strujanje koje se proteže prostorno ispred i iza prepreke, kao što je to prikazano je slikom 6 [3].



Slika 6. Zona turbulencija oko prepreke

Kao što je vidljivo na slici, područje turbulencija može se ispred prepreke protezati u dužini koja je jednaka dvostrukoj vrijednosti visine prepreke i iza prepreke u dužini koja je 10 do 20 puta veća od visine prepreke. U vertikalnom smjeru turbulencije dosežu dvije do tri visine prepreke. Vjetroagregat bi trebalo postaviti na području sa što manje prepreka, a u slučaju postojanja prepreka treba odabrati viši stup tako da izbjegnemo turbulentnu zonu.

Iznos turbulencije može se matematički kvantificirati pomoću veličine koja se zove intenzitet turbulencija (veličina bez dimenzije). Definira se kao količnik standardne devijacije i srednje vrijednosti brzine vjetra za odabrani vremenski period [2], [3],

$$T_i = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (2.20)$$

gdje je σ standardna devijacija i \bar{v} srednja brzina vjetra.

Da bi se objasnila varijabilnost proizvoljnog seta podataka, osim srednje brzine vjetra koristi se standardna devijacija. Standardna devijacija za mjerene podatke brzine vjetra iznosi:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N (v_j - \bar{v})^2} \quad (2.21)$$

gdje je N broj mjerenja. Ako izraz malo preuredimo dobijemo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{j=1}^N v_j^2 - 2 \cdot \bar{v} \cdot \sum_{j=1}^N v_j + N \cdot \bar{v}^2 \right)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{j=1}^N v_j^2 - N \cdot \bar{v}^2 \right)} \quad (2.22)$$

Intenzitet turbulencija najčešće se računa za kraće vremenske periode od minute do jednog sata, uobičajeno za periode od deset minuta. Vrijednosti intenziteta turbulencija najčešće se kreću u rasponu od 0.1 do 0.4 [2], [3].

Osnovno je pravilo da se najveće vrijednosti intenziteta turbulencija javljaju pri niskim brzinama vjetra, ali te vrijednosti snažno ovise o karakteristikama terena i preprekama na odabranoj lokaciji.

Valja još primijetiti da zbog načina računanja, vrijednost intenziteta može poprimiti i vrijednosti veće od 1 (100%). To se može dogoditi npr. u slučaju jako male srednje brzine vjetra i/ili kad su prisutne velike fluktuacije brzine u razmatranom vremenskom periodu.

3. Instalirani vjetroagregat i mjerni uređaji

U sklopu predmeta Projekt u siječnju 2010. na neboder FER-a instaliran je eksperimentalni sustav (slika 7) koji se sastoji od: vjetroagregata (Rutland 503), anemometra (NRG #40), vertikalnog anemometra (RM Young 27106-T), pokazatelja smjera vjetra (NRG #220P), termometra (NRG 110S) i higrometra (RH-5). Vjetroagregat nazivne snage 20 W spojen je na trošilo (žarulja) na kojemu mjerimo struju i napon.

Anemometar mjeri brzinu vjetra u rasponu od 1 do 96 m/s uz preciznost od ± 0.1 m/s (za brzine od 5 do 25 m/s). Vertikalni anemometar ima mjerni opseg od 0.5 do 40 m/s uz preciznost od ± 1 %. Istu preciznost ima i pokazatelj smjera vjetra.

Higrometar mjeri vlažnost zraka u rasponu od 5 do 95 % uz preciznost od ± 5 % pri 25 °C, dok termometar mjeri temperaturu u granicama od -40 do 52.5 °C uz preciznost od ± 1.1 °C.

Sve ostale karakteristike mjernih uređaja detaljno su opisane u Dodatku 1.



Slika 7. Sustav instaliran na zgradu FER-a

4. Metode analize i procjene potencijalne snage vjetra

Pretpostavka za učinkovitu i točnu analizu potencijalne snage vjetra je postojanje dovoljne količine mjerenih podataka brzine vjetra. Postoji više načina na koji se mogu obraditi mjereni podaci. Oni uključuju direktne i statističke metode.

4.1. Direktne metode analize podataka, procjene potencijalne snage vjetra i proizvodnje turbine

4.1.1. Direktna upotreba podataka

Pretpostavimo da imamo N mjerenja brzine vjetra v , pri čemu su mjerenja usrednjena za odabrani vremenski interval Δt (najčešće satni ili desetominutni interval). Ovi podaci se mogu iskoristiti za izračunavanje sljedećih korisnih parametara [2], [3]:

1. Srednja brzina vjetra tijekom cijelog vremenskog perioda

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i \quad (4.1)$$

2. Standardna devijacija

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^N v_i^2 - N \cdot \bar{v}^2 \right)} \quad (4.2)$$

3. Srednja gustoća snage vjetra

Veličina pomoću koje procjenjujemo potencijal vjetra najčešće je snaga po jedinici površine odnosno gustoća snage vjetra. Određujemo je korištenjem naredne formule:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{A}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{0.5 \cdot \rho_i \cdot v_i^3 \cdot A}{A}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N 0.5 \cdot \rho_i \cdot v_i^3}{N} \quad (4.3)$$

Pritom se radi pojednostavnjenja može računati s prosječnom gustoćom zraka (dobijemo je korištenjem prosječnih vrijednosti temperature i tlaka). Rezultat koji dobijemo na taj način prilično je precizan jer se temperatura i tlak ne mijenjaju u tolikoj mjeri tijekom vremena da bi mogli utjecati na

snagu u onoj mjeri koliko utječe brzina vjetra (zbog treće potencije). Tako dobijemo pojednostavnjeni izraz za gustoću snage:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{0.5 \cdot \rho_{avg}}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^3 \quad (4.4)$$

Naredna tablica prikazuje gustoću snage vjetra za različite brzine vjetra (tablica 3) [7]. Vidljiv je značajan porast gustoće snage na velikim brzinama vjetra upravo zbog kubne ovisnosti snage o brzini.

Tablica 3. Gustoća snage vjetra za različite brzine

m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
0	0.0	8	314	16	2510
1	0.6	9	446	17	3010
2	4.9	10	612	18	3570
3	16.5	11	815	19	4200
4	39.2	12	1060	20	4900
5	76.2	13	1350	21	5670
6	132	14	1680	22	6520
7	210	15	2070	23	7450

Jedan od načina vrednovanja lokacija s obzirom na gustoću snage vjetra je sljedeći: lokacije s $\frac{\bar{P}}{A} < 100 \text{ W/m}^2$ smatraju se nepovoljnim za gradnju vjetroelektrana budući da imaju duga razdoblja s nedostatnom brzinom vjetra za rad vjetroagregata, lokacije s $\frac{\bar{P}}{A} \approx 400 \text{ W/m}^2$ su dobre lokacije, a sve lokacije s $\frac{\bar{P}}{A} > 700 \text{ W/m}^2$ smatraju se izvrsnim lokacijama [2].

Također, pomoću izračunate prosječne gustoće vjetra može se izračunati i prosječna gustoća energije vjetra:

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{\bar{P}}{A} \cdot (N \cdot \Delta t) \quad (4.5)$$

4. Prosječna snaga turbine iznosi

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N P_w(v_i) \quad (4.6)$$

gdje je $P_w(v_i)$ ovisnost snage turbine o brzini vjetra iz krivulje snage turbine.

5. Energija turbine

$$E_w = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N P_w(v_i) \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

4.1.2. Metoda razreda

Čest je slučaj da su mjerene brzine vjetra prikazane histogramom, odnosno podijeljene u razrede brzine vjetra s frekvencijom pojave f , tada vrijede izrazi,

$$N = \sum_{i=1}^c n_i \quad (4.8)$$

$$f_i = \frac{n_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^c f_i = 1 \quad (4.9)$$

gdje je:

c – broj različitih razreda brzine vjetra na histogramu

n_i – broj mjerenja u jednom razredu

Vrijednosti računane prema formulama 4.1 do 4.7 sada glase [2], [3]:

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^c v_i \cdot f_i \quad (4.10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^c v_i^2 \cdot f_i - N \cdot \bar{v}^2 \right)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^c v_i^2 \cdot f_i - N \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^c v_i \cdot f_i \right)^2 \right)} \quad (4.11)$$

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{0.5 \cdot \rho_{avg}}{N} \cdot \sum_{i=1}^c n_i \cdot v_i^3 = 0.5 \cdot \rho_{avg} \cdot \sum_{i=1}^c f_i \cdot v_i^3 \quad (4.12)$$

$$\bar{P}_w = \sum_{i=1}^c P_w(v_i) \cdot f_i \quad (4.13)$$

$$E_w = \sum_{i=1}^c P_w(v_i) \cdot f_i \cdot \Delta t \quad (4.14)$$

4.2. Statističke metode

Za analizu rada uređaja koji se koriste energijom vjetra potrebno je poznavati raspodjelu vjerojatnosti brzine vjetra u toku nekog perioda, npr. jedne godine. Funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti brzine vjetra i njezine ostale funkcionalne forme (kao što je primjerice funkcija razdiobe) pritom predstavljaju glavni aspekt u analizi brzine vjetra u relevantnoj literaturi.

Funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti koristi se u širokom opsegu pri analizi mjerenih podataka brzine vjetra, uključujući: pronalaženje parametara funkcije koji najbolje predstavljaju mjerene vrijednosti, analizu i predviđanje brzine vjetra u budućnosti, ekonomske analize i opravdanost investicije u vjetroelektranu.

Dvije osnovne razdiobe koje se koriste za matematičko opisivanje mjerenih podataka brzine vjetra (cilj je predstaviti mjerene podatke brzine vjetra matematičkom funkcijom) su Weibullova i Rayleighova razdioba. Mjerene podatke moguće je jako dobro prikazati dvoparametarskom Weibullovom razdiobom. Rayleighova razdioba je jednoparametarska, a samim time i jednostavnija pa je za mnoge lokacije prikladnija nego Weibullova.

4.2.1. Weibullova razdioba

U Weibullovoj razdiobi varijacije u brzini vjetra karakterizirane su dvjema funkcijama: funkcijom gustoće razdiobe vjerojatnosti i funkcijom razdiobe (nazvana još i kumulativna funkcija razdiobe).

Funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti (slika 8) označava vjerojatnost da je brzina vjetra upravo jednaka vrijednosti v [1], [2],

$$f(v) = \begin{cases} \left(\frac{k}{v}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

pri čemu je:

$f(v)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanja brzine vjetra,

c – faktor skale (m/s),

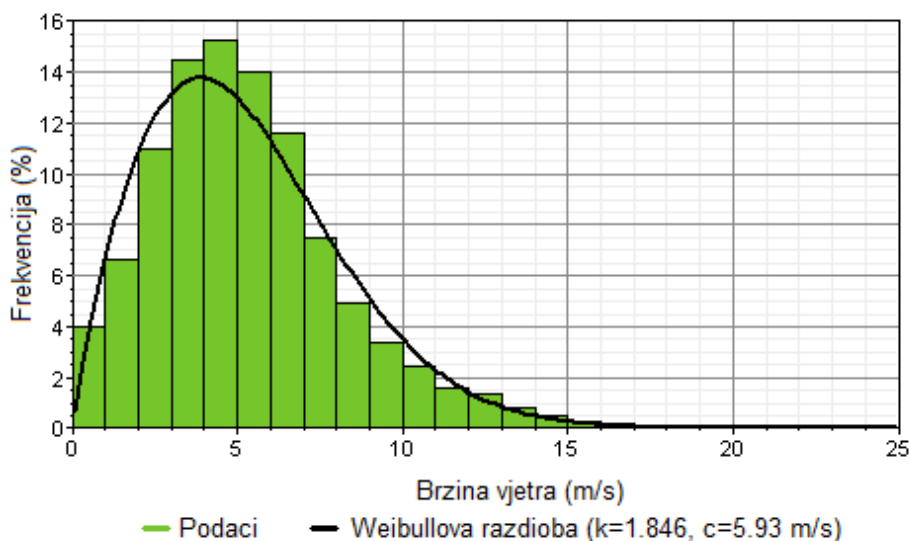
k – faktor oblika (veličina bez dimenzije).

Pripadajuća funkcija razdiobe za slučajnu varijablu brzine vjetra je kontinuirana neopadajuća funkcija koja daje vjerojatnost da je brzina vjetra manja ili jednaka brzini v , dakle dobije se integriranjem funkcije gustoće razdiobe [1],

$$F(v) = \int_0^v f(v) \cdot dv \quad (4.16)$$

odnosno uvrštenjem $f(v)$ u gornju formulu dobijemo [1]

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.17)$$



Slika 8. Histogram brzine vjetra i pripadajuća funkcija gustoće Weibullove razdiobe

Pomoću funkcije gustoće razdiobe vjerojatnosti može se jednostavno odrediti vjerojatnost da su brzine vjetra primjerice iznad neke brzine v_1 [1]:

$$p(v \geq v_1) = \int_{v_1}^{\infty} f(v) \cdot dv = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} \quad (4.18)$$

Ovaj je proračun koristan jer nas zanima vjerojatnost da će brzina vjetra biti iznad neke brzine (bilo da se radi o brzini koju smatramo povoljnom za izgradnju vjetroelektrane ili o ekstremnoj brzini koja može uzrokovati oštećenje lopatica turbine). Pritom se najčešće uzima da su srednje vrijednosti brzine manje od 5 m/s neprihvatljive za izgradnju vjetroelektrane, lokacije sa srednjom brzinom većom od 8 m/s smatraju se dobrim lokacijama i lokacije sa srednjom brzinom većom od 12 m/s odlične su lokacije.

Također, moguće je odrediti intervalnu procjenu slučajne varijable brzine vjetra, odnosno vjerojatnost da se brzina vjetra nalazi između neke dvije brzine v_1 i v_2 . Razlika vrijednosti funkcije razdiobe jednaka je vjerojatnosti da brzina v poprimi vrijednost u tom intervalu. Kod funkcije gustoće ta je vjerojatnost predočena površinom ispod grafa funkcije [1], [3]:

$$p(v_1 < v < v_2) = F(v_2) - F(v_1) = \int_{v_1}^{v_2} f(v) \cdot dv = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k} \quad (4.19)$$

Srednja vrijednost brzine vjetra, srednja vrijednost kuba brzine i pripadajuća standardna devijacija mogu se izračunati pomoću parametara k i c [1], [3]:

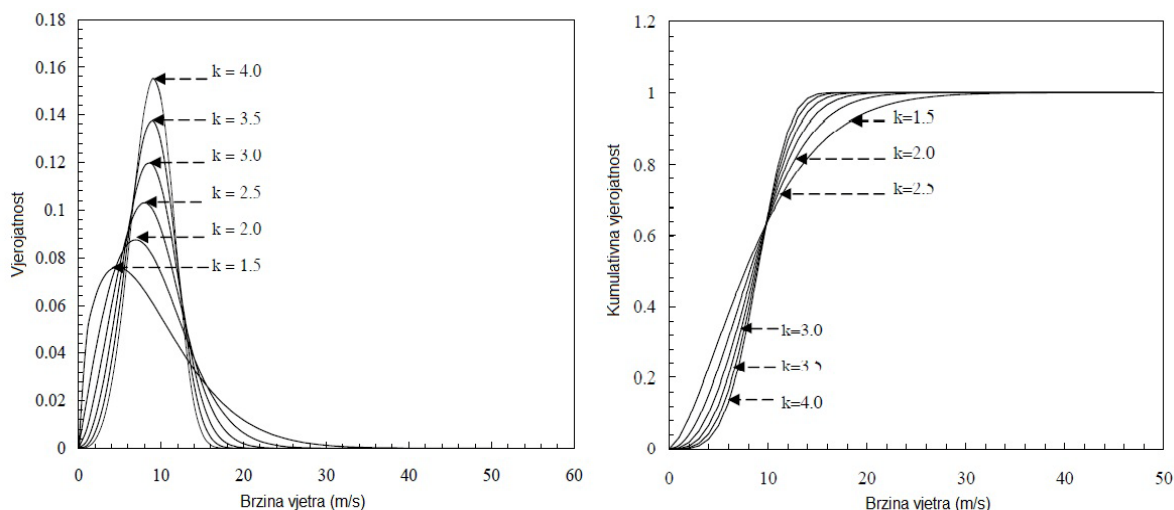
$$v_m = \frac{\int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.20)$$

$$v_m^3 = \frac{\int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.21)$$

$$\sigma = c \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{1/2} \quad (4.22)$$

gdje je $\Gamma(x)$ gama razdioba.

Kod Weibullove razdiobe glavni faktor koji određuje ravnomjernost raspodjele brzine vjetra je faktor oblika k . Slika 9 prikazuje efekt različitih veličina k na izgled funkcije razdiobe i funkcije gustoće razdiobe vjerojatnosti [3].



Slika 9. Funkcija gustoće i funkcija razdiobe za Weibullovu razdiobu (različiti parametri k)

Vidljivo je da s povećanjem vrijednosti k raste ravnomjernost raspodjele brzine vjetra. Primjerice za $k=1.5$, brzina vjetra je između 0 i 20 m/s 95% vremena.

Naprotiv, u slučaju da je $k=4$ brzina je jednoličnije raspoređena u manjem rasponu od 0 do 13 m/s 95% vremena. U prvom slučaju najučestalija brzina vjetra iznosi 5 m/s (otprilike 7.5% vremena), dok je brzina od 9 m/s najučestalija u drugom slučaju (približno 15.5% vremena).

Što točnija procjena parametara k i c nužna je za preciznost Weibullove razdiobe. Najviše korištene metode utvrđivanja parametara k i c su [2], [3]:

1. Grafička metoda

U grafičkoj metodi transformiramo kumulativnu funkciju razdiobe u linearni oblik koristeći logaritamsku skalu.

Ako izraz za funkciju razdiobe transformiramo u oblik

$$1 - F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.23)$$

i potom ga logaritmiramo dva puta dobijemo:

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \cdot \ln(v_i) - k \cdot \ln c \quad (4.24)$$

Uzduž X osi crtamo $\ln(v_i)$, a uzduž Y osi $\ln\{-\ln[1 - F(v)]\}$ i tako dobijemo vrijednosti u točkama koje se raspršene (ne čine pravac nego krivulju). Provedbom linearne aproksimacije funkcije dobivamo pravac. Nagib pravca daje parametar k , a $-k \cdot \ln c$ predstavlja odsječak na Y osi. Iz toga se lako može odrediti parametar c .

2. Metoda standardne devijacije

Parametri k i c mogu biti procijenjeni iz standardne devijacije i srednje brzine vjetra v_m

$$\left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (4.25)$$

Numeričkim proračunom iz gornje jednadžbe odredimo k . Pomoću k određujemo c korištenjem izraza

$$c = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.26)$$

Da se pojednostavni proračun, često se uzima prihvatljiva aproksimacija za k koja glasi:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.090} \quad (4.27)$$

Jednostavniji izraz za računanje parametra c glasi

$$c = \frac{v_m \cdot k^{2.6674}}{0.184 + 0.816 \cdot k^{2.73855}} \quad (4.27)$$

3. Metoda momenata

Za Weibullovu razdiobu n -ti moment dan je izrazom

$$M_n = c^n \cdot \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (4.28)$$

Ako su M_1 i M_2 prvi i drugi moment izračunati iz seta podataka, tada se može odrediti c i k pomoću jednadžbi

$$c = \frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (4.29)$$

$$\frac{M_2}{M_1^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.30)$$

4. Metoda najveće vjerojatnosti

Korištenjem ove metode faktori k i c Weibullove razdiobe računaju se pomoću formula:

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \cdot \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (4.31)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (4.32)$$

5. Metoda faktora uzorka energije

Faktor uzorka energije (E_{PF}) odnos je između ukupne snage vjetra i snage koja odgovara kubu srednje brzine vjetra

$$E_{PF} = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i\right)^3} \quad (4.33)$$

Faktor oblika k sada se računa

$$k = 3.957 \cdot E_{PF}^{-0.898} \quad (4.34)$$

4.2.2. Rayleighova razdioba

Da bi Weibullova razdioba bila precizna nužno je što točnije procijeniti vrijednost parametara k i c . To je moguće u slučaju kad imamo dovoljne količine podataka brzine vjetra, prikupljenih tijekom kraćih vremenskih intervala (obično desetominutni intervali ili kraći). U slučaju da su podaci dani u obliku srednjih vrijednosti brzine vjetra tijekom dužeg vremenskog perioda (dani, mjeseci), tada je moguće koristiti Rayleighovu razdiobu.

Rayleighova razdioba samo je specijalni slučaj Weibullove razdiobe u slučajevima kada faktor oblika k poprima vrijednost 2.

Funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti za jednoparametarsku Rayleighovu razdiobu dana je narednim izrazom [1], [3]:

$$f(v) = \frac{2 \cdot v}{c^2} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4.35)$$

gdje je c konstanta ovisna o srednjoj brzini vjetra v_m u razmatranom periodu. Budući da je srednja brzina vjetra po definiciji [1], [3]

$$v_m = \frac{\int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = c \cdot \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi} \quad (4.36)$$

proizlazi da je konstanta c [1], [3]

$$c = \frac{2 \cdot v_m}{\sqrt{\pi}}. \quad (4.37)$$

Uzevši u obzir izraz za c funkciju gustoće razdiobe možemo pisati i ovako [1], [3]:

$$f(v) = \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot v_m^2} \cdot e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2}. \quad (4.38)$$

Kao i kod Weibullove razdiobe funkcija razdiobe također se dobije integriranjem funkcije gustoće razdiobe [1], [3]:

$$F(v) = \int_0^v f(v) \cdot dv = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2} \quad (4.39)$$

Vjerojatnost da je brzina vjetra veća od neke određene brzine v_1 i vjerojatnost da se brzina nalazi unutar intervala v_1 i v_2 dane su izrazima [1], [3]:

$$p(v > v_1) = \int_{v_1}^{\infty} f(v) \cdot dv = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_1}{v_m}\right)^2} \quad (4.40)$$

$$p(v_1 < v < v_2) = F(v_2) - F(v_1) = \int_{v_1}^{v_2} f(v) \cdot dv = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_1}{v_m}\right)^2} - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_2}{v_m}\right)^2} \quad (4.41)$$

Srednja vrijednost kuba brzine iznosi [1], [3],

$$\overline{v^3} = \frac{\int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = \frac{6}{\pi} \cdot v_m^3 \quad (4.42)$$

dok je standardna devijacija jednaka [1], [3]

$$\sigma = c \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4}} \cdot v_m \quad (4.43)$$

5. Prikaz i obrada mjerenih podataka

Mjerni sustav instaliran na neboderu FER-a mjeri sljedeće veličine: napon, struju, temperaturu, vertikalnu brzinu (u voltima i milivoltima iz čega se pretvorbom dobije jedna vrijednost), relativnu vlažnost, smjer vjetra i horizontalnu brzinu vjetra.

Za potrebe proračuna uzeti su podaci od 22. srpnja 2010. godine (početak mjerenja) pa sve do kraja studenoga. Pritom podaci nisu potpuni jer u određene dane računalo na koje se podaci spremaju nije radilo zbog prekida opskrbe električnom energijom (radovi na fakultetu i sl.). Za zadnjih deset dana u srpnju podaci su potpuni. U kolovozu neki dani nedostaju (od 21. do 24.), a neki su nekompletni (15., 16., 20. i 25.). U mjerenjima za rujan neki dani nedostaju (od 5. do 9.), a veći broja dana je nekompletna. U listopadu nedostaju podaci za 15., 19. i 21., a u studenome nema podataka za 7., 8., 9., 10., i 23.

Budući da su ovo prva mjerenja na lokaciji, nije moguće na zadovoljavajući način rekonstruirati podatke koji nedostaju. Za to bi bila potrebna veća baza podataka mjerenja za prethodne godine, koja naravno ne postoji. Stoga podaci koji nedostaju nisu uzimani u obzir prilikom proračuna. Svakako bi u budućnosti trebalo razmotriti alternativno napajanje uređaja (baterije, fotonaponski paneli) s ciljem kontinuiranog mjerenja. Kontinuirano mjerenje potrebno je radi što točnije procjene potencijala vjetra na lokaciji, a olakšalo bi i usporedbu mjerenih podataka sa službenim meteorološkim mjerenjima u Zagrebu.

Sirove podatke potrebno je pretvoriti u stvarne fizikalne veličine. Sustav je podešen tako da se vrijednosti mjere i upisuju u bazu podataka na udaljenom računalu u intervalima od deset sekundi.

Podaci su za potrebe obrade usrednjeni i na veće intervale od deset minuta i jednog sata. To su standardni intervali prikaza podataka jer većina komercijalnih programa za obradu podataka za vjetar radi s takvim intervalima. Također, većina meteoroloških podataka u Hrvatskoj dostupna je u desetominutnim i satnim intervalima (na nekim meteorološkim postajama s novijom opremom dostupni su i podaci u intervalima od deset sekundi).

Mali vremenski interval mjerenja od deset sekundi također uzrokuje jako veliki broj podataka što otežava obradu podatka (pogotovo tijekom dužeg

razdoblja mjerenja). Kao što je pokazano u nastavku, interval mjerenja od deset sekundi potpuno je nepotreban za podatke koji nemaju izražene dinamičke promjene (temperatura, relativna vlažnost zraka).

Izrazi za pretvorbu mjerenih veličina u stvarne fizikalne veličine (programski odsječak):

```
% Napon
U_V = (U / 1023. * 10) * 2;

% Struja
I_mA = ((I / 1023. * 10) - 2.5) * 200/5 / 0.05;

% Temperatura
Temp_oC = (Temp / 1023. * 10) * 55.55 - 86.38;

% Vertikalna brzina
if ( abs ((Vert_V / 1023. * 10 - 2.5) * 20/5) < 0.1 )
    Vert_speed = ((Vert_mV / 1023. * 10) - 2.5) * 0.2/5 *
1000 * 0.018;
else
    Vert_speed = ((Vert_V / 1023. * 10) - 2.5) * 20/5 *
0.018;

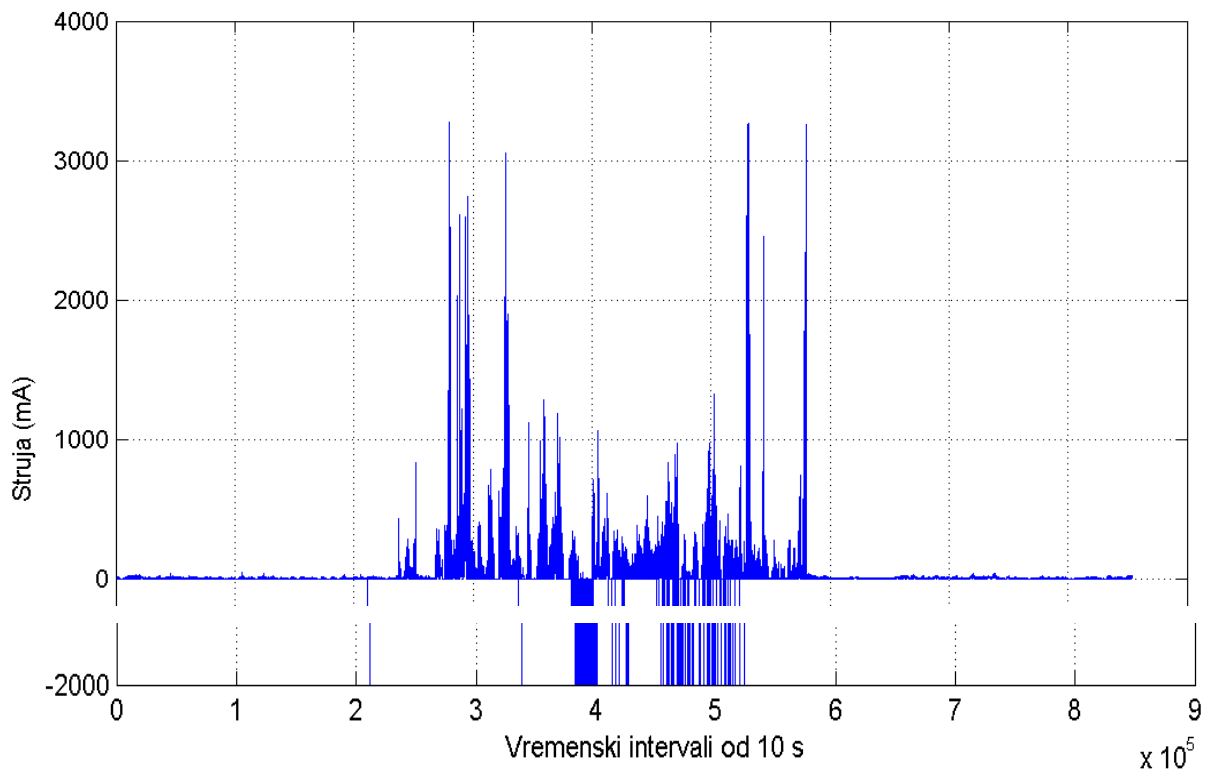
% Vlaga
RH_post = (RH / 1023. * 10) * 20;

% Smjer vjetra
Direct_deg = Dir / 1023. * 360;

% Horizontalna brzina
if ( Speed > 0 )
    Speed_m/s = (Speed * 0.765) + 0.35;
else
    Speed_m/s = 0
```

5.1. Struja i napon

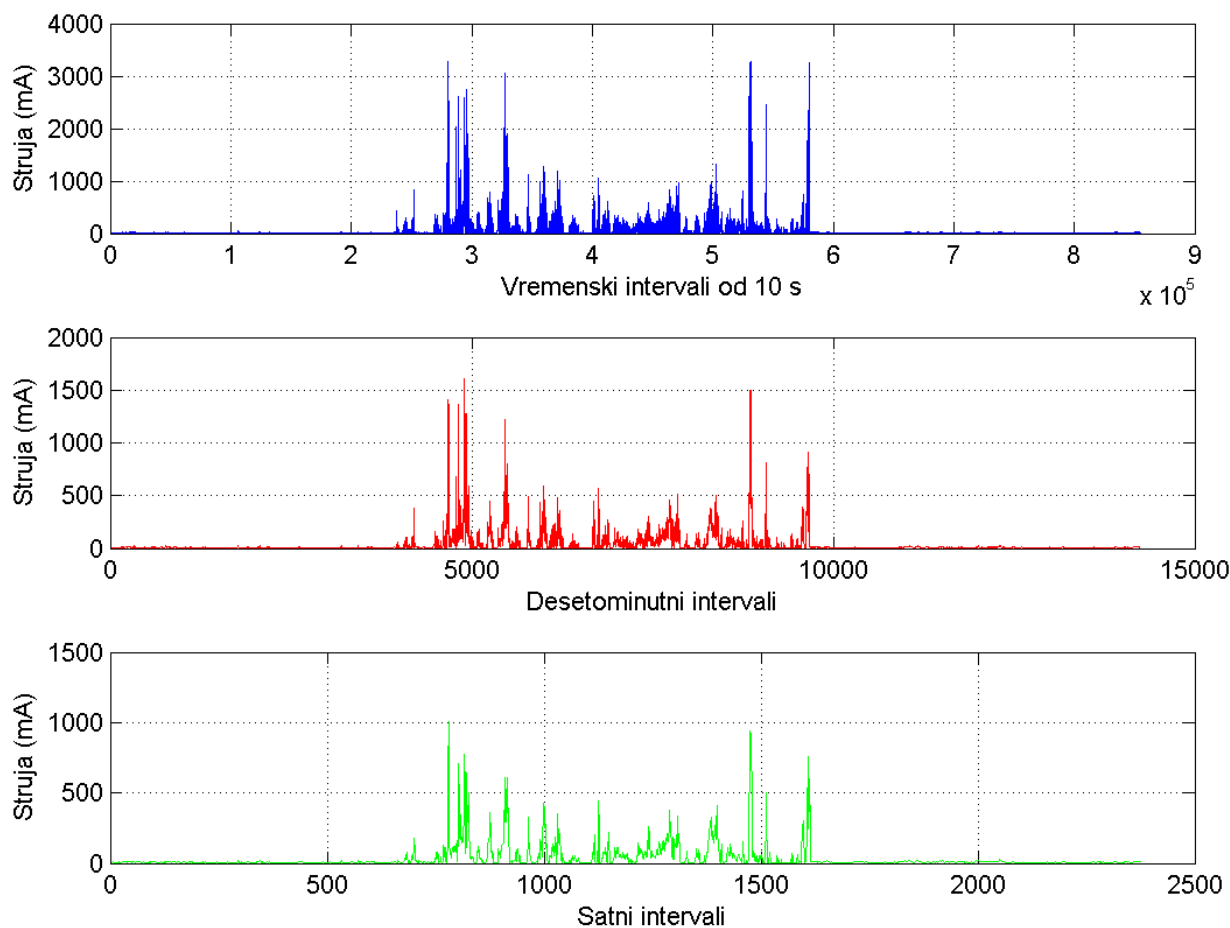
Na slici 10 prikazana je struja (mA) koja se mjeri na trošilu. Kao trošilo spojena je žarulja fiksne snage.



Slika 10. Struja (mA) koju uzima trošilo prije korekcije

Iz slike je vidljivo da struja poprima negativne vrijednosti iznosa -2000 mA. Takve vrijednosti predstavljaju grešku čiji je uzrok izraz za pretvorbu mjerenih vrijednosti u stvarne fizikalne veličine. Naime, iz izraza za pretvorbu danih na početku ovog poglavlja, vidljivo je da će iznos struje jednak nula u pretvorbi u stvarnu fizikalnu veličinu dati iznos od -2000 mA, što je pogrešno. Napravljena je korekcija takvih podataka i to tako da su vrijednosti struje postavljene na ispravnu vrijednost jednaku nula.

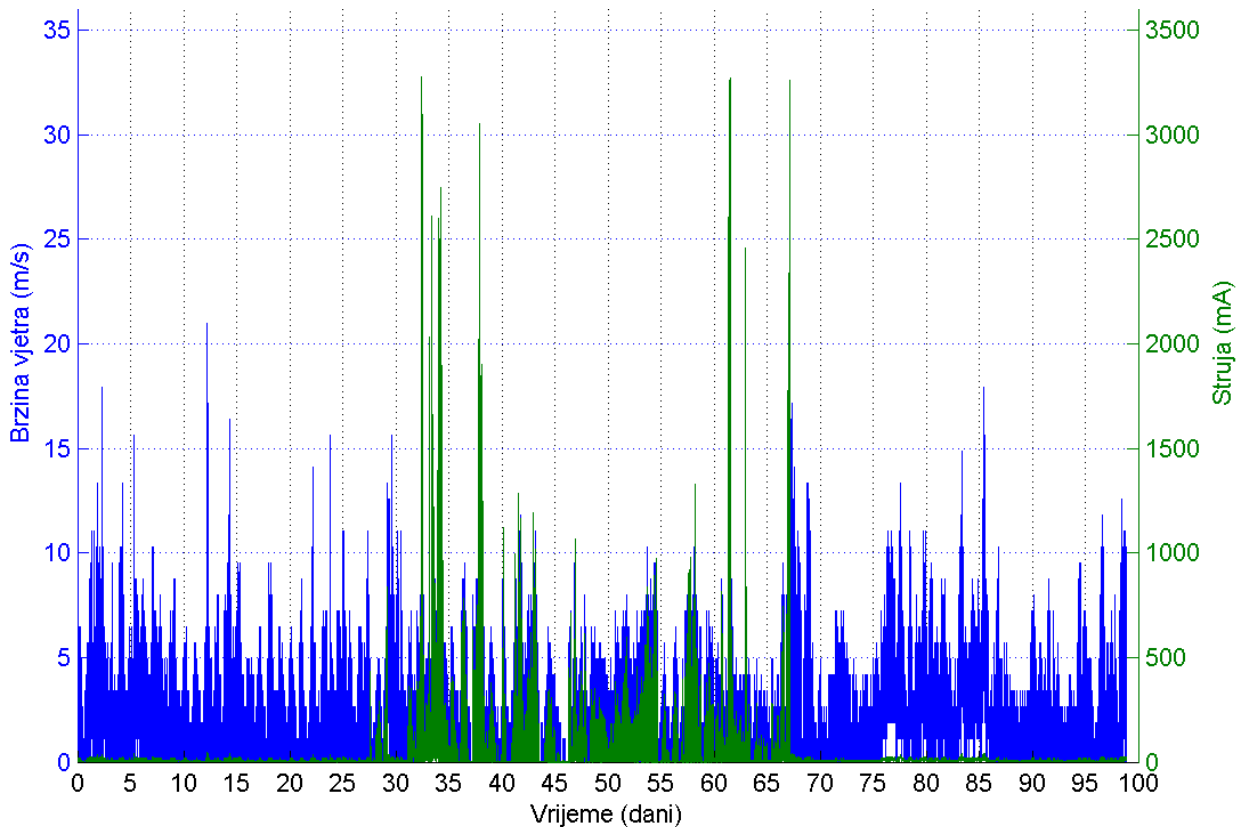
Na slici 11 prikazani su podaci za struju (nakon provedene korekcije) u vremenskim intervalima od deset sekundi, kao i podaci usrednjeni na desetominutne i satne korake.



Slika 11. Prikaz struje u tri vremenska intervala

Na slici se vide dva dulja razdoblja na početku i kraju mjernog razdoblja tijekom kojih je iznos struje vrlo niskog iznosa (blizu nule). Ta područja predstavljaju kvar spojenog trošila (žarulja je pregorjela). Na sljedećoj slici (slika 12) prikazane su brzina vjetra i struja. Jasno se vide duža razdoblja tijekom kojih je trošilo u kvaru (brzina vjetra je veća od nule, a struja je bliska vrijednosti nula).

Poznato je da je žarulja bila u kvaru sve do kraja kolovoza kada je zamijenjena. S obzirom na iznos mjerene struje tijekom studenoga, očito je početkom toga mjeseca žarulja ponovno pregorjela. Uzrok čestih pregaranja žarulje je njezina neadekvatna snaga pa bi zato trebalo ugraditi žarulju veće snage ili korištenjem regulatora spojiti sustav na mrežu. Tako bi dobili potpunije podatke za napon i struju.



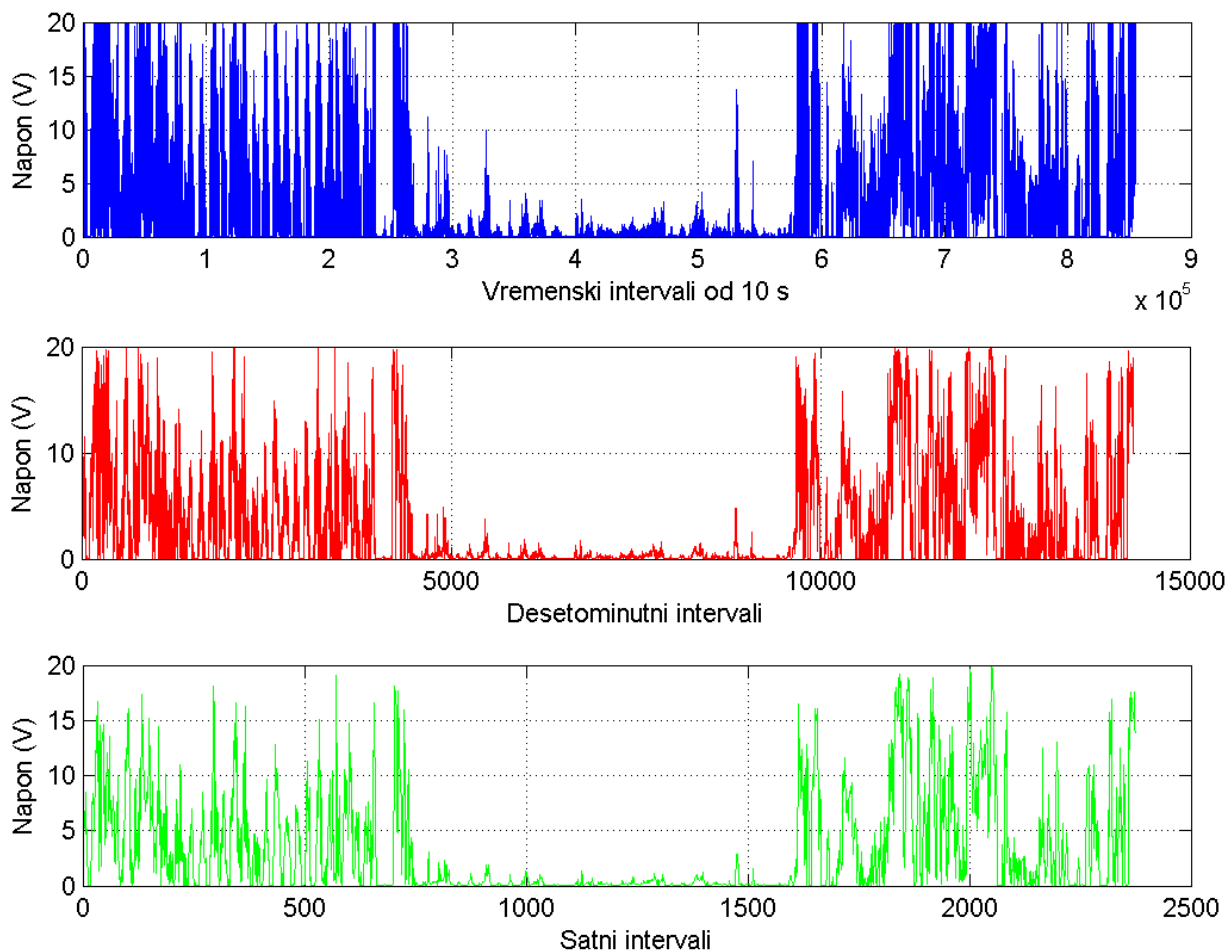
Slika 12. Izmjerena vrijednost struje i brzine za sve podatke

Osnovni statistički podaci za struju (maksimalne, minimalne vrijednosti i sl.) dani su u tablici 4.

Tablica 4. Osnovni statistički podaci za struju

Statistički podaci za struju	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost struje (mA)	0	0.98	0.98
Maksimalna vrijednost struje (mA)	3279	1609	1010
Srednja vrijednost struje (mA)	36.2	36.2	36.2
Srednja vrijednost standardne devijacije	113	95.5	88.5

Kod napona način pretvorbe u stvarne fizikalne veličine ne uzrokuje probleme. Podaci su također prikazani u vremenskim intervalima od deset sekundi, desetominutnim intervalima i satnim intervalima (slika 13). Također, osnovni statistički podaci dani su tablicom 5.

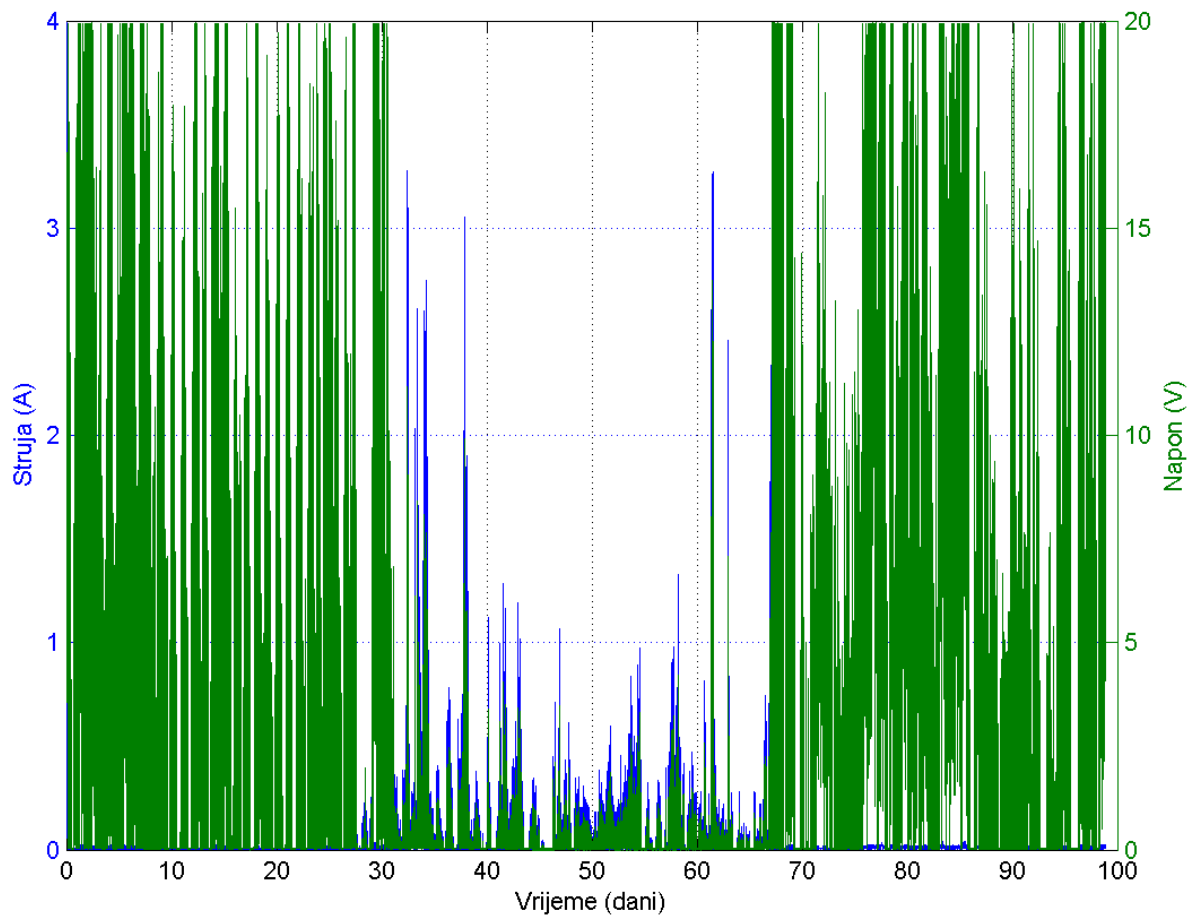


Slika 13. Prikaz napona u tri vremenska intervala

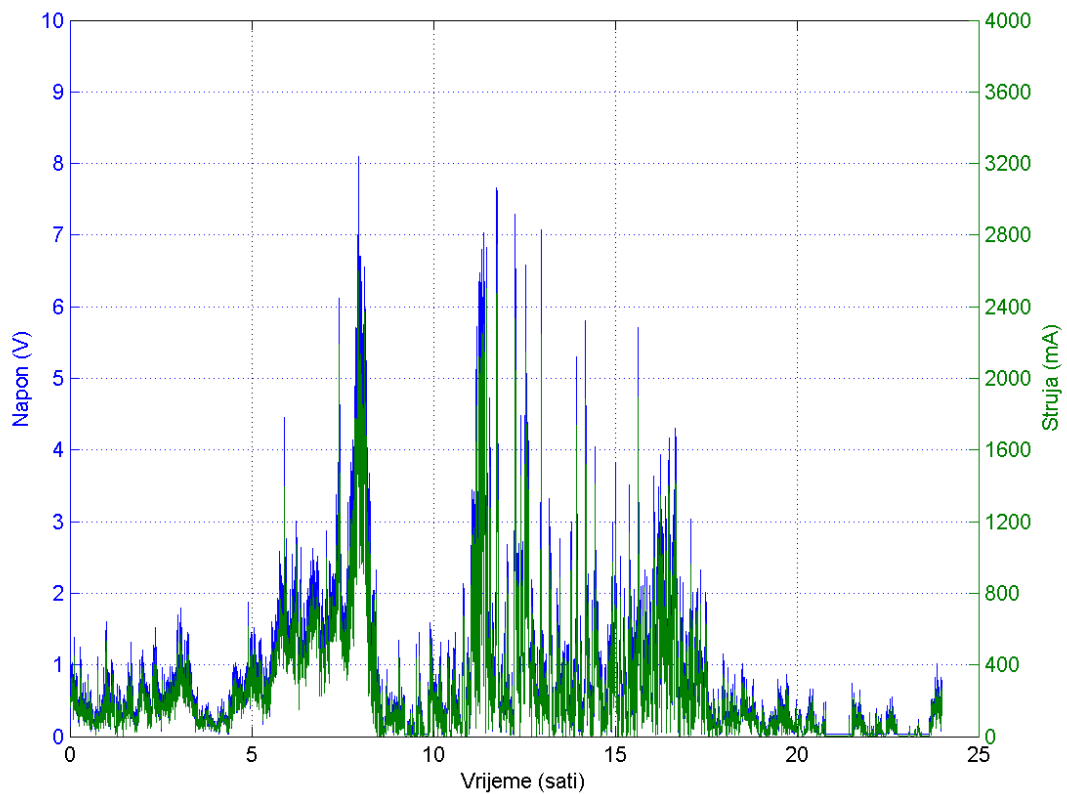
Tablica 5. Osnovni statistički podaci za napon

Statistički podaci za napon	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost napona (V)	0	0.018	0.019
Maksimalna vrijednost napona (V)	19.96	19.94	19.89
Srednja vrijednost napona (V)	3.27	3.27	3.27
Srednja vrijednost standardne devijacije	5.12	4.81	4.57

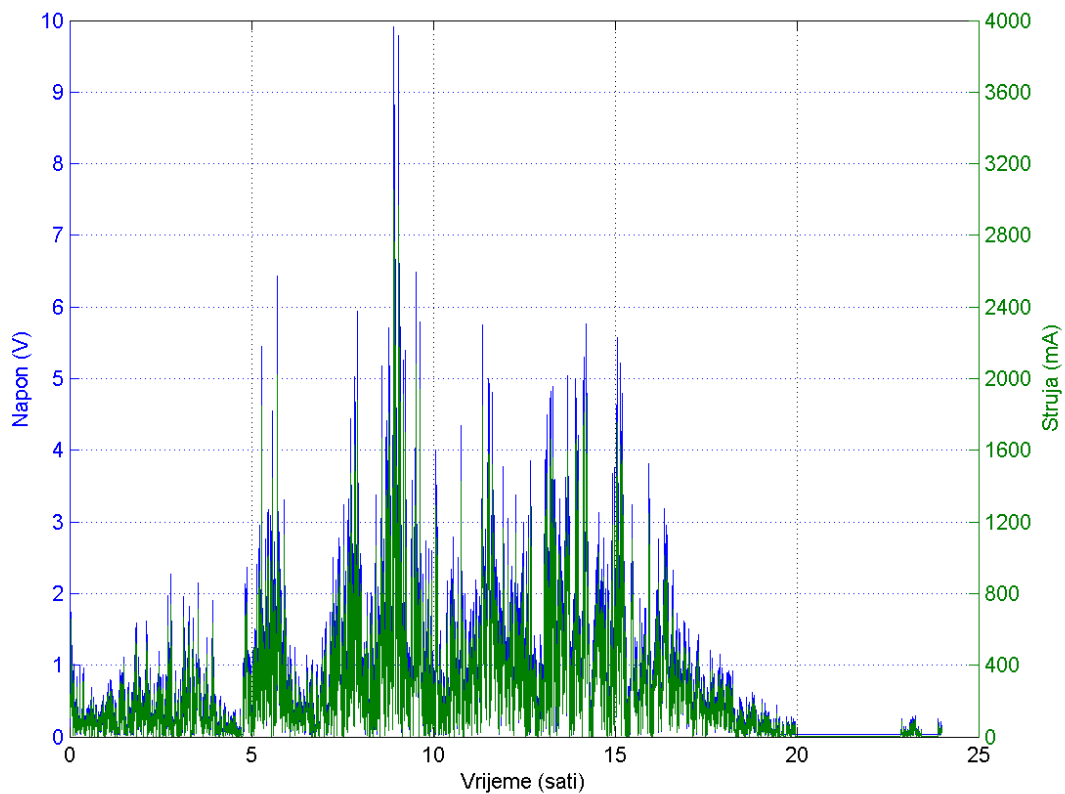
I slike napona jasno pokazuju područje kvara trošila. Napon koji se tada mjeri je napon praznog hoda koji ima veću vrijednost jer nema pada napona na trošilu. Na sljedećoj slici (slika 14) zajednički su prikazani i napon i struja. Središnje područje na slici kada se napon i struja podjednako mijenjaju predstavlja vrijeme tijekom kojeg je trošilo bilo u funkciji.



Slika 14. Struja i napon za sve podatke (vremenska skala u danima)



Slika 15. Struja i napon za 1. rujna 2010



Slika 16. Struja i napon za 11. rujna 2010.

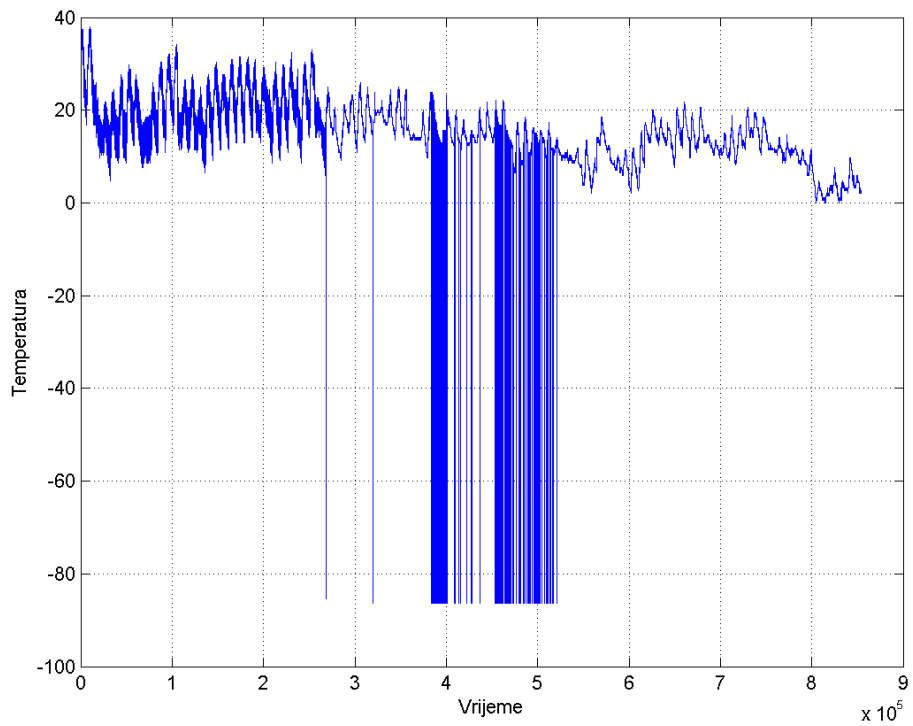
Na slikama 15 i 16 prikazani su naponi i struje za dva najvjetrovitija dana (1. i 11. rujna 2010.) kada je trošilo bilo ispravno.

5.2. Temperatura

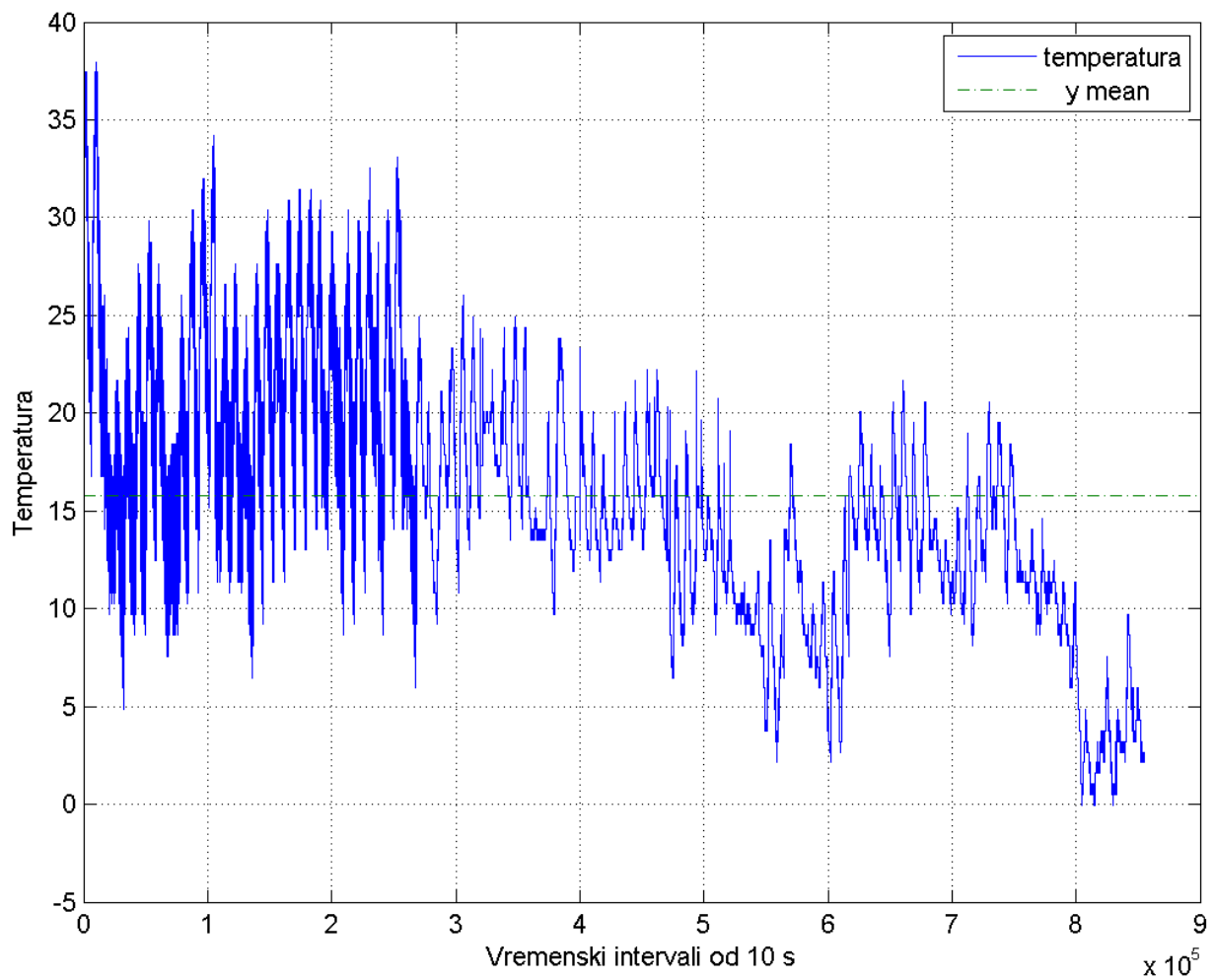
Slika 17 prikazuje mjerenu temperaturu u °C. Vidi se minimalni iznos temperature od -86.38 °C što ukazuje na grešku u mjerenju. Greška opet proizlazi iz načina pretvorbe mjerenih veličina u stvarne fizikalne veličine.

Pogrešni podaci su interpolirani i to tako da je uzeta srednja vrijednost susjedna dva ispravna podatka (u slučajevima kad nedostaje samo jedan podatak) ili smo podatke dobili zbrajanjem srednje vrijednosti sa slučajno generiranom vrijednošću unutar standardne devijacije (kad nedostaje više od jednog podatka u nizu).

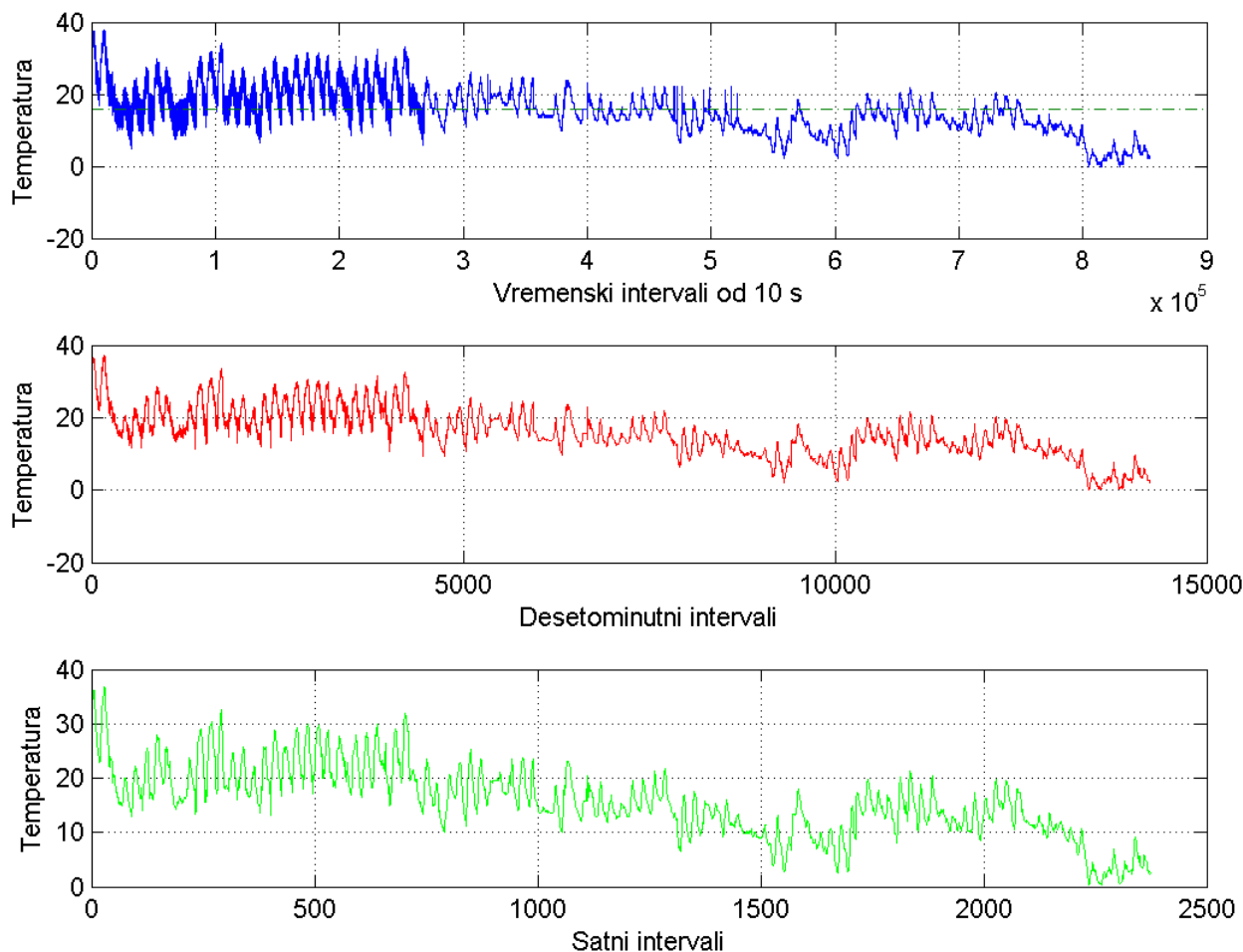
Mjerena temperatura nakon korekcije dana je slikom 18, a slika 19 prikazuje temperaturu u sva tri vremenska koraka.



Slika 17. Temperatura u °C za sve podatke



Slika 18. Temperatura nakon korekcije pogrešnih vrijednosti



Slika 19. Prikaz temperature u tri vremenska intervala

Tablica 6 daje osnovne statističke podatke za mjerenu temperaturu.

Tablica 6. Osnovni statistički podaci za mjerenu temperaturu

Statistički podaci za temperaturu	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost temperature (°C)	-0.041	-0.041	0.254
Maksimalna vrijednost temperature (°C)	37.97	37.05	36.79
Srednja vrijednost temperature (°C)	15.76	15.76	15.76
Srednja vrijednost standardne devijacije	6.64	6.52	6.51

Prema podacima iz gornje tablice, jasno je da podatke za temperaturu nije potrebno prikupljati svakih deset sekundi jer temperatura nema izražene dinamičke promjene kao primjerice brzina vjetrova. Dovoljno je prikupljati podatke u

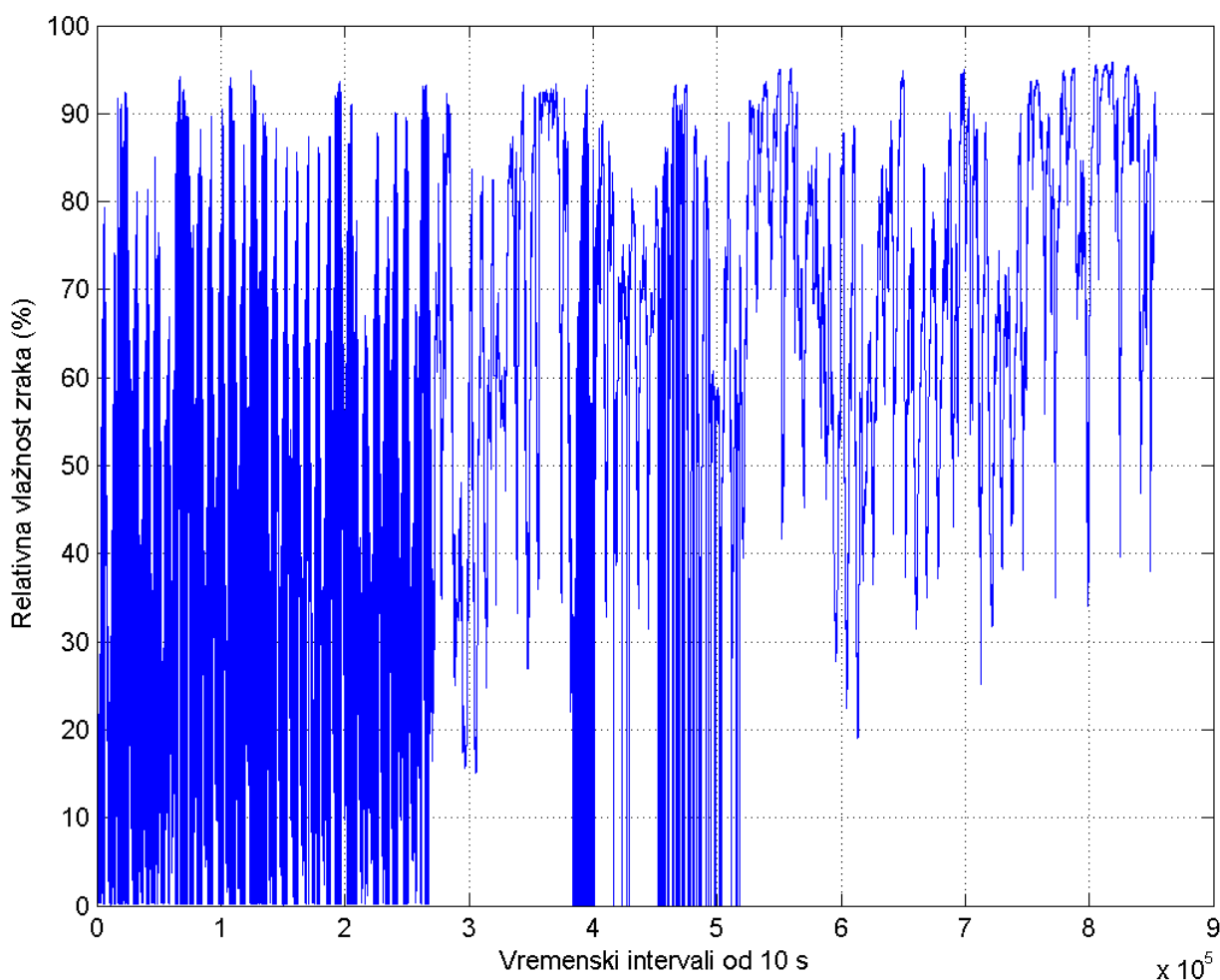
desetominutnim ili satnim intervalima. Na taj bi način olakšali obradu podataka u slučaju velikog broja mjerenja.

5.3. Relativna vlažnost zraka

Kao što je već ranije spomenuto, vlažnost zraka utječe na snagu vjetra. Povećanje vlažnosti zraka smanjuje gustoću zraka smanjujući proporcionalno i snagu vjetra. Iako bi se pomoću relativne vlažnosti zraka mogla računati gustoća zraka, to nije napravljeno zbog složenosti samog postupka i nedostatka svih potrebnih podataka (između ostalog potrebno je mjeriti i tlak zraka).

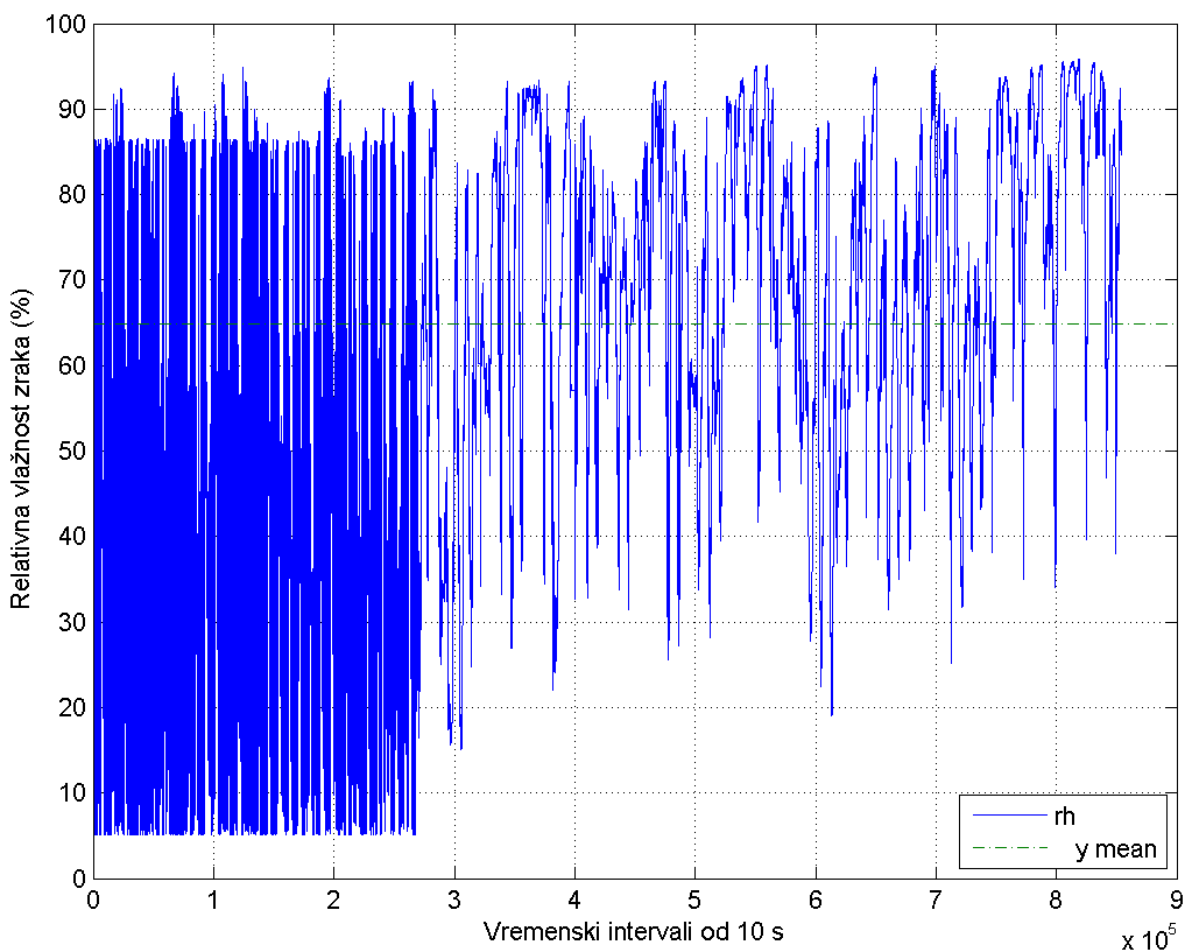
Računanje sa standardnom gustoćom zraka (1.225 kg/m^3) u ovom slučaju sasvim zadovoljava u pogledu točnosti.

Podaci relativne vlažnosti zraka nakon pretvorbe u postotne vrijednosti prikazani su slikom 20.



Slika 20. Relativna vlažnost zraka prije korekcije

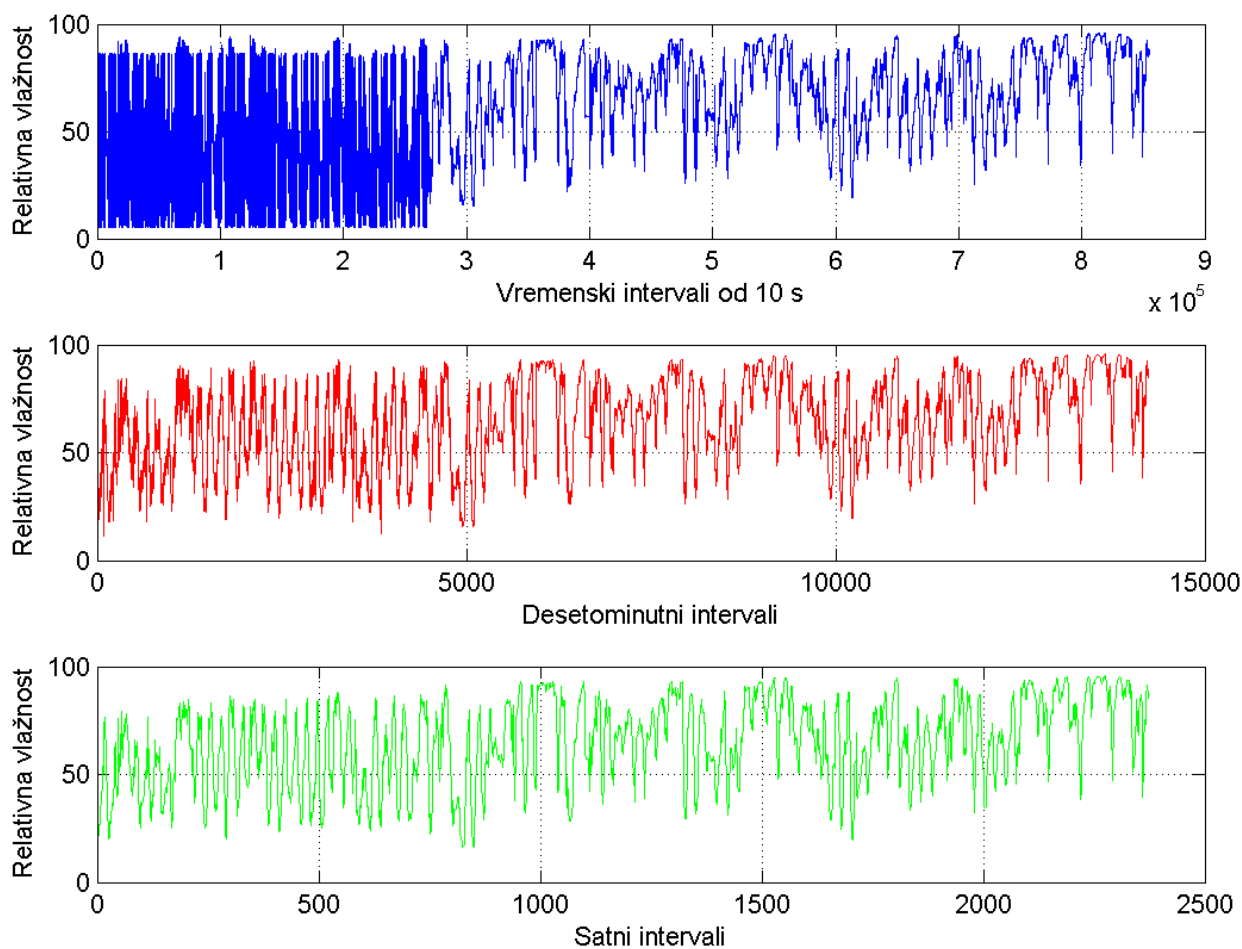
Na ovoj slici vidljivo je da relativna vlažnost zraka poprima vrlo niske vrijednosti koje su izvan mjernog opsega uređaja (budući da je mjerni opseg 5 – 95%, podaci relativne vlažnosti zraka ispod 5% sigurno su pogrešni). Čak i nakon korekcije podataka izvan mjernog opsega (Slika 21) podaci na početnom dijelu grafa poprimaju neočekivano niske vrijednosti tako da je njihova točnost veoma upitna. Nije poznato što je uzrok takvim mjerenjima.



Slika 21. Relativna vlažnost zraka nakon korekcije podataka izvan mjernog opsega

Obradom podataka i usrednjavanjem na veće vremenske intervale od deset minuta i jednog sata dobiju se bolji grafovi podataka (slika 22).

Kao i kod temperature, ni relativnu vlažnost zraka nema smisla prikupljati u malom vremenskom intervalu od deset sekundi, sasvim su dovoljni desetominutni ili satni intervali. To zorno prikazuju statistički podaci (tablica 7).



Slika 22. Relativna vlažnost zraka prikazana u tri vremenska intervala

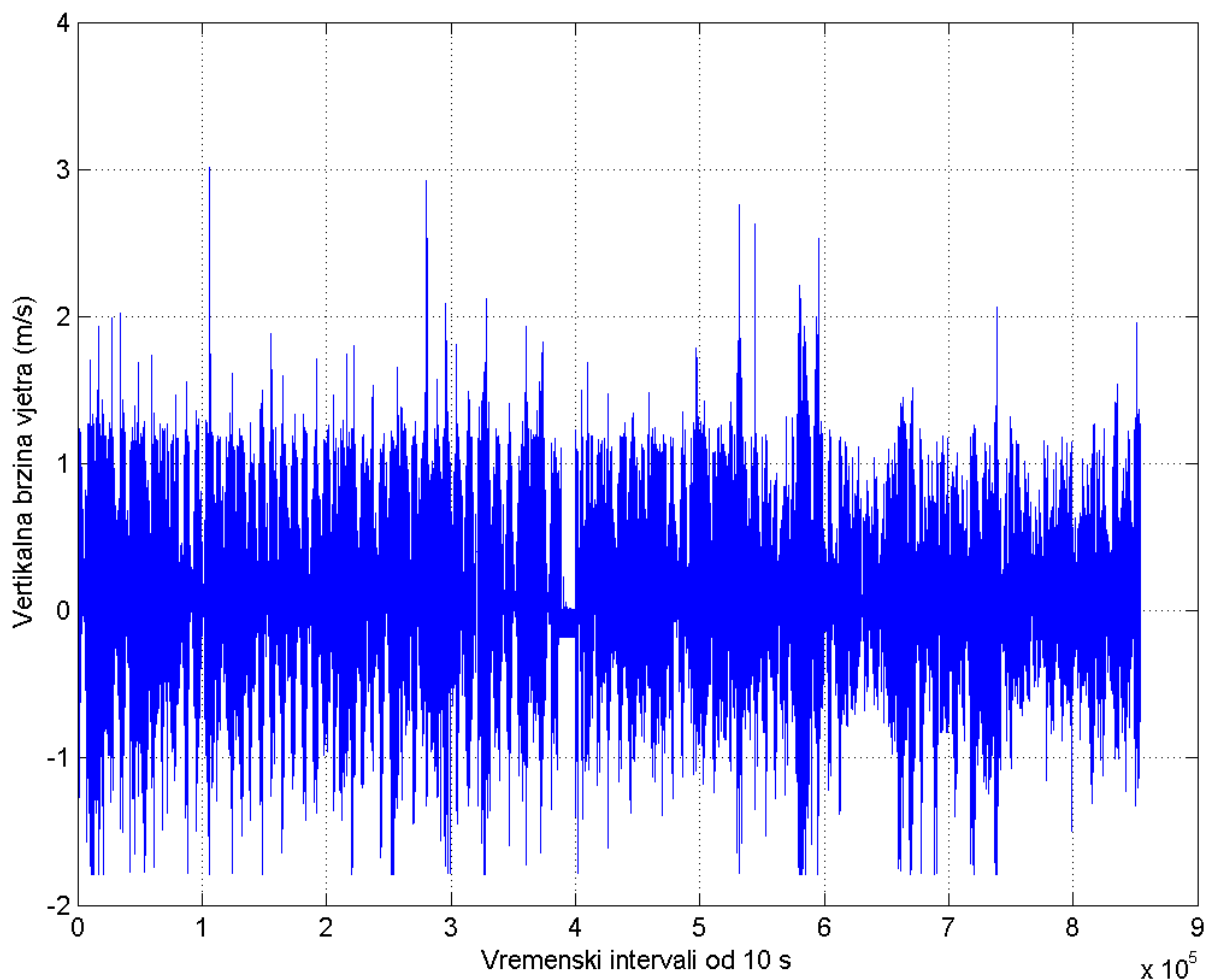
Tablica 7. Osnovni statistički podaci relativne vlažnosti zraka

Statistički podaci relativne vlažnosti zraka	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost relativne vlažnosti (%)	5.08	11.09	16.16
Maksimalna vrijednost relativne vlažnosti (%)	95.80	95.72	95.64
Srednja vrijednost relativne vlažnosti (%)	64.89	64.89	64.89
Srednja vrijednost standardne devijacije	21.40	19.62	19.41

5.4. Vertikalna brzina vjetra

Vertikalna brzina vjetra može biti značajna jer u slučaju velikih iznosa utječe na smanjenje snage vjetroagregata. Neki proizvođači vjetroagregata daju podatke o krivulji snage uz podatke o dozvoljenoj vertikalnoj brzini koja ne ometa rad vjetroagregata (većinom se radi o podacima za velike vjetroagregate).

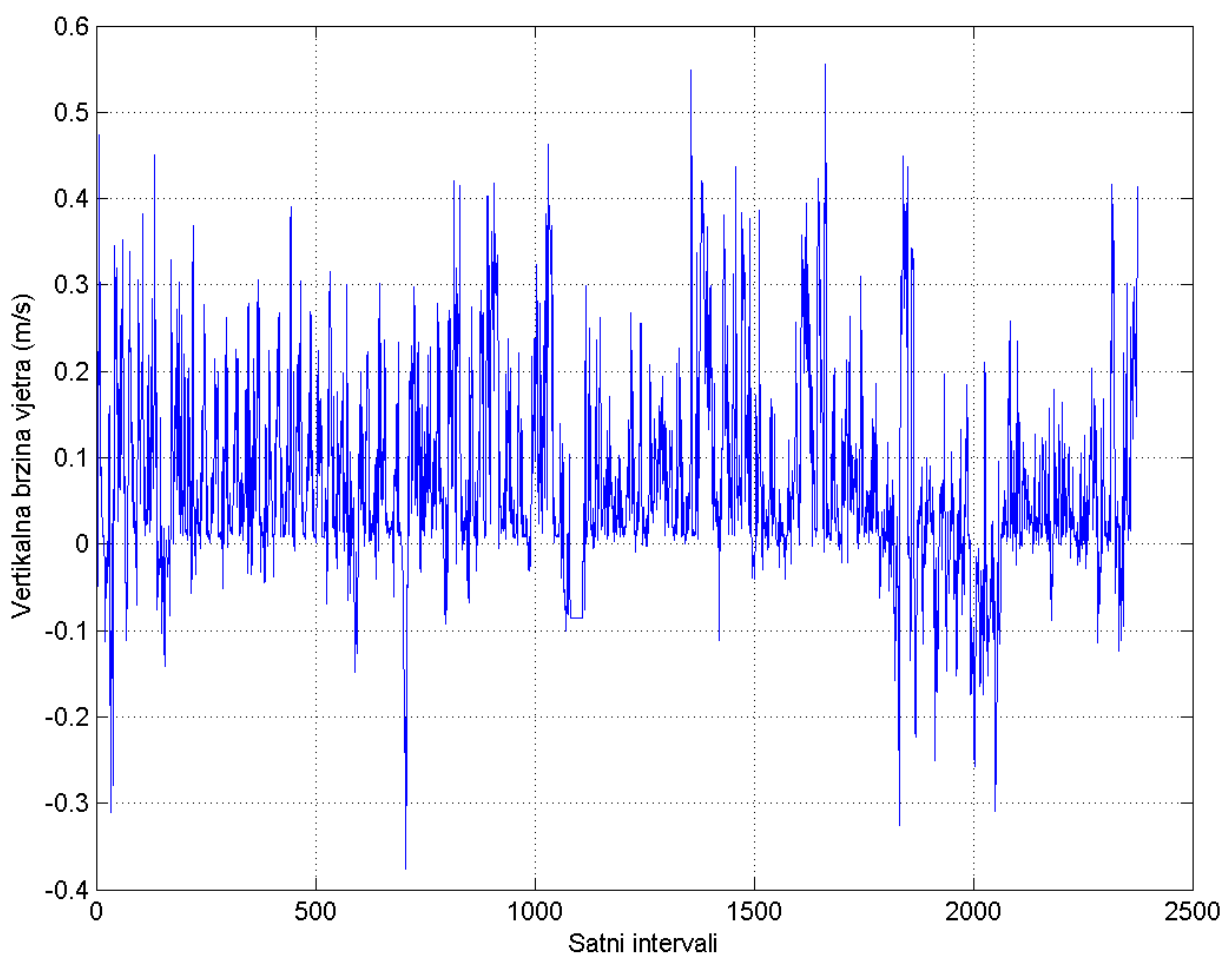
I za podatke vertikalne brzine potrebna je korekcija vrijednosti. Uzrok pogreške opet je izraz za pretvorbu u stvarne fizikalne veličine. Kad je iznos izmjerene brzine u mV ili V jednak nuli pri pretvaranju u stvarne fizikalne veličine prema formuli dobijemo vrijednost brzine od -1.8, a trebali bi dobiti 0. Pogrešne vrijednosti su korigirane na vrijednost 0. Izmjerena vertikalna brzina nakon korekcije prikazana je na slici 23.



Slika 23. Vertikalna brzina vjetra za sve podatke

Pozitivne vrijednosti označuju smjer vjetra odozdo prema gore, dok negativne vrijednosti označuju suprotni smjer. Usrednjavanje podataka na veće vremenske intervale nije povoljno jer bi time izgubili podatke za nedominantni smjer vertikalne brzine. To može dati pogrešnu sliku o stvarnom kretanju iznosa i smjera vertikalne brzine.

Maksimalna izmjerena vrijednost vertikalne brzine iznosi 3.01 m/s za smjer odozdo prema gore i 1.79 m/s za suprotni smjer (prema dolje). Pritom je preciznost uređaja u granicama $\pm 1\%$ u intervalu od 0.5 do 40 m/s.



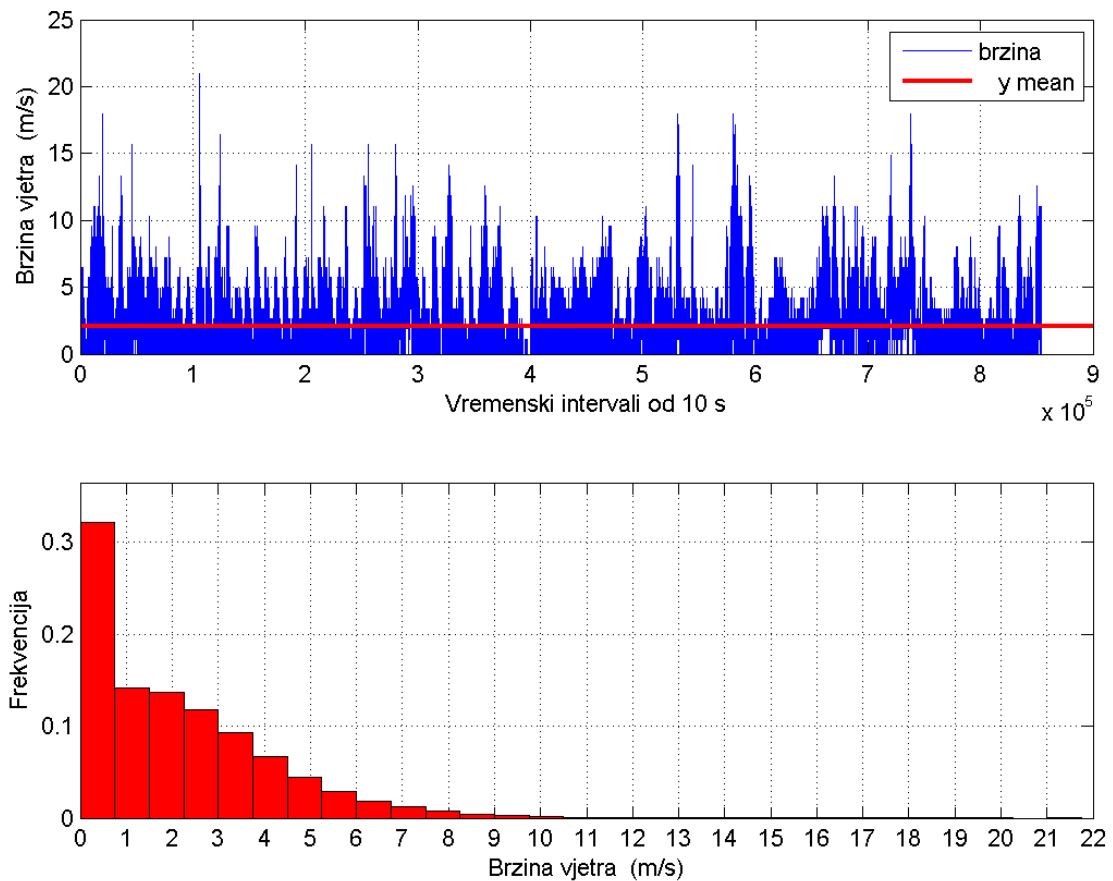
Slika 24. Vertikalna brzina usrednjena na satne intervale

Gornja slika (Slika 24) za satne intervale pokazuje gotovo potpuni gubitak negativnih vrijednosti, a samim time i jednog smjera vjetra.

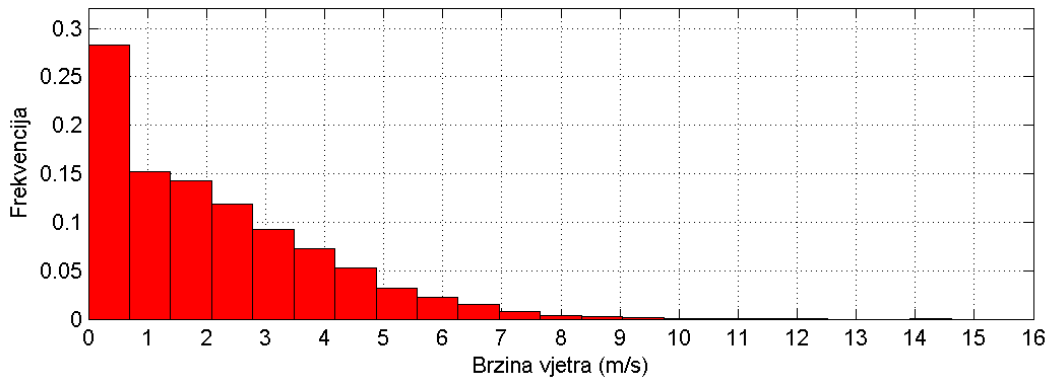
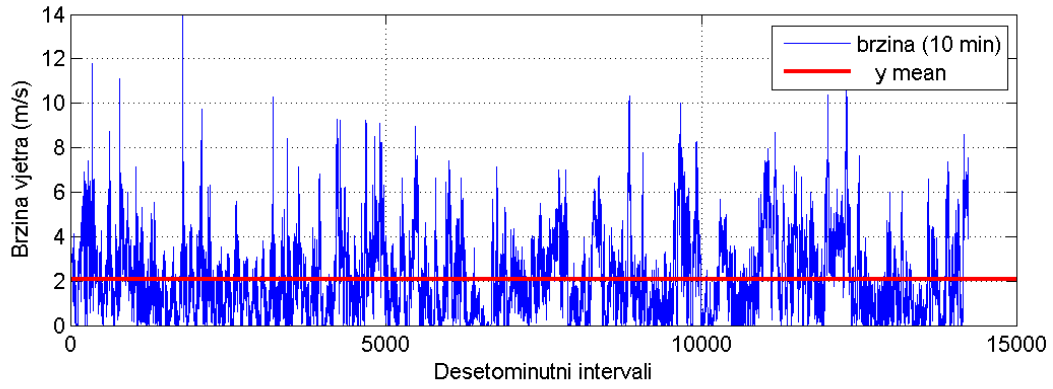
5.5. Brzina vjetra

Na sljedećim slikama (slike 25, 26 i 27) prikazane su brzine vjetra i pripadni histogrami podataka za sva tri vremenska intervala. Histogram podataka brzine za sve vremenske intervale pokazuje da je najveći postotak izmjerenih vrijednosti brzine vjetra manji od 2 m/s.

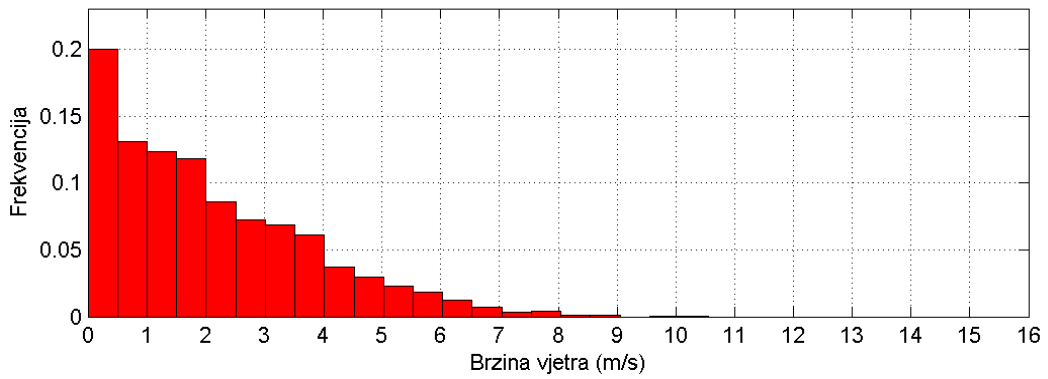
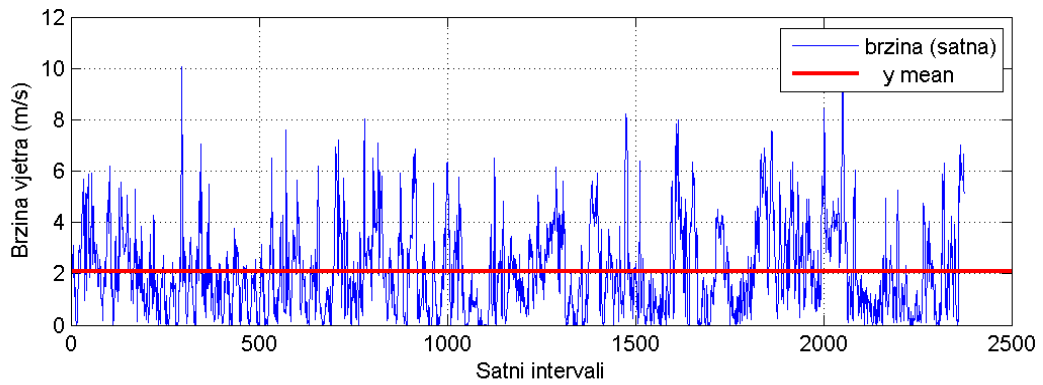
Najučestalija vrijednost izmjerene brzine pritom je 0 m/s (brzina je mjerena 854363 puta u intervalima od 10 s i pritom je iznos brzine od 0 m/s zabilježen 274569 puta, odnosno 32 % svih mjerenja). Ovako duga razdoblja bez vjetra nisu povoljna za rad vjetroagregata.



Slika 25. Brzina vjetra i histogram podataka za vremenske intervale od 10 s



Slika 26. Brzina vjetra i histogram podataka za desetominutne intervale



Slika 27. Brzina vjetra i histogram podataka za satne intervale

Osnovni statistički podaci dani su u tablici 8. Vidi se niska srednja brzina vjetra od otprilike 2 m/s koja je ispod brzine uključenja (cut in speed) bilo koje vrste vjetroagregata. Niska srednja brzina vjetra posljedica je dugih razdoblja bez vjetra.

Tablica 8. Statistički podaci brzine vjetra

Statistički podaci brzine vjetra	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost brzine (m/s)	0	0	0
Maksimalna vrijednost brzine (m/s)	21.00	13.92	10.06
Srednja vrijednost brzine (m/s)	2.09	2.09	2.09
Srednja vrijednost standardne devijacije	2.10	1.85	1.73

Također iz podataka brzine za pojedine mjesece (tablica 9) vidi se da najveću srednju brzinu vjetra imaju srpanj i studeni. Pritom podatke za srpanj treba uzeti sa zadržkom jer uključuju podatke za samo deset dana.

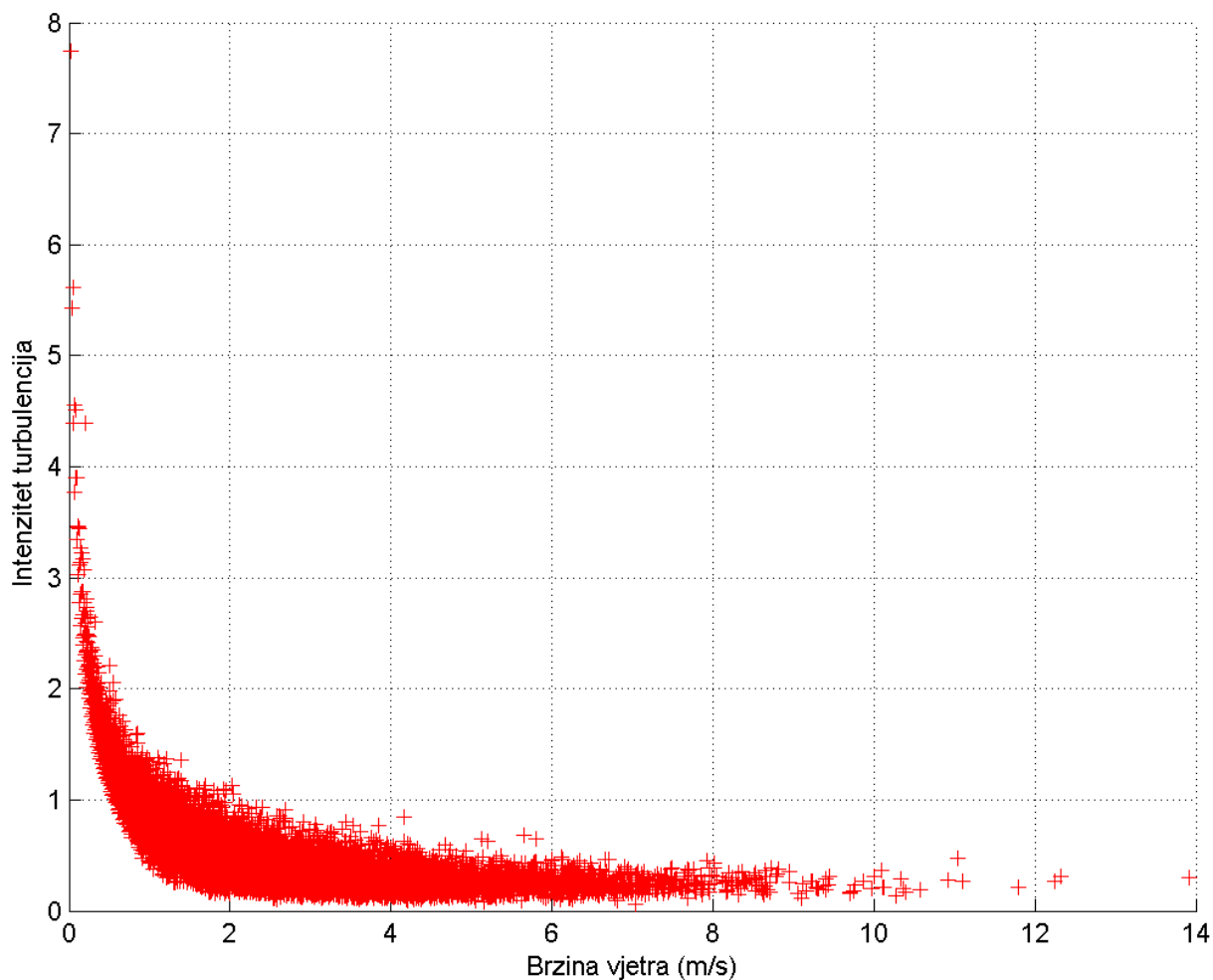
Tablica 9. Statistički podaci brzine vjetra po mjesecima

Statistički podaci za brzinu	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studenj
Minimalna vrijednost brzine (m/s)	0	0	0	0	0
Maksimalna vrijednost brzine (m/s)	17.95	21.00	14.12	17.95	17.95
Srednja vrijednost brzine (m/s)	2.46	1.78	1.89	2.12	2.31
Srednja vrijednost standardne devijacije	1.95	1.98	2.10	2.13	2.16

5.6. Intenzitet turbulencija

U postojećoj se praksi za intenzitet promjenjivosti brzine vjetra, tj. njegovih turbulentnih karakteristika najčešće rabi intenzitet turbulencija (opisan u poglavlju 2). Intenzitet turbulencija dobije se dijeljenjem standardne devijacije i srednje vrijednosti brzine vjetra tijekom odabranog vremenskog perioda.

Budući da su turbulencije dinamične promjene, u ovome je radu intenzitet turbulencija izračunat za desetominutne srednje vrijednosti, što je uobičajeni interval za taj proračun.



Slika 28. Intenzitet turbulencija u ovisnosti o brzini vjetra

Na slici 28 prikazan je intenzitet turbulencija u ovisnosti o brzini vjetra. Jasno se vidi da intenzitet turbulencija poprima najveće vrijednosti na nižim brzinama vjetra, što je u skladu s očekivanjem.

Maksimalna vrijednost intenziteta je veoma visoka i iznosi 7.75. Iako je taj iznos neočekivano visok, on je direktna posljedica vrlo male srednje brzine vjetra i razmjerno velikog iznosa standardne devijacije u desetominutnom periodu. Veliki iznosi turbulencija ometaju idealno strujanje i utječu na pouzdanost turbine.

5.7. Smjer vjetra

Osim smjera vjetra, zanima nas i kolika je brzina vjetra po pojedinim smjerovima. Zato se koristi ruža vjetrova koja prikazuje učestalost i brzinu vjetra po smjerovima. Smjer vjetra ovisan je o vremenskim prilikama.

Vremenske prilike u Hrvatskoj dominantno ovise o:

- općem rasporedu atmosferskog tlaka,
- utjecaju azorskog i sibirskog maksimuma (anticiklone) i islandskog minimuma (ciklone),
- položaju staza pojedinih ciklona koje dolaze iz Atlantika ili se formiraju u Genovskom zaljevu ili na sjevernom Jadranu,
- reljefu područja.

Već prema tim utjecajima razvijaju se uglavnom tri tipična vremena s prevladavajućim smjerom vjetra:

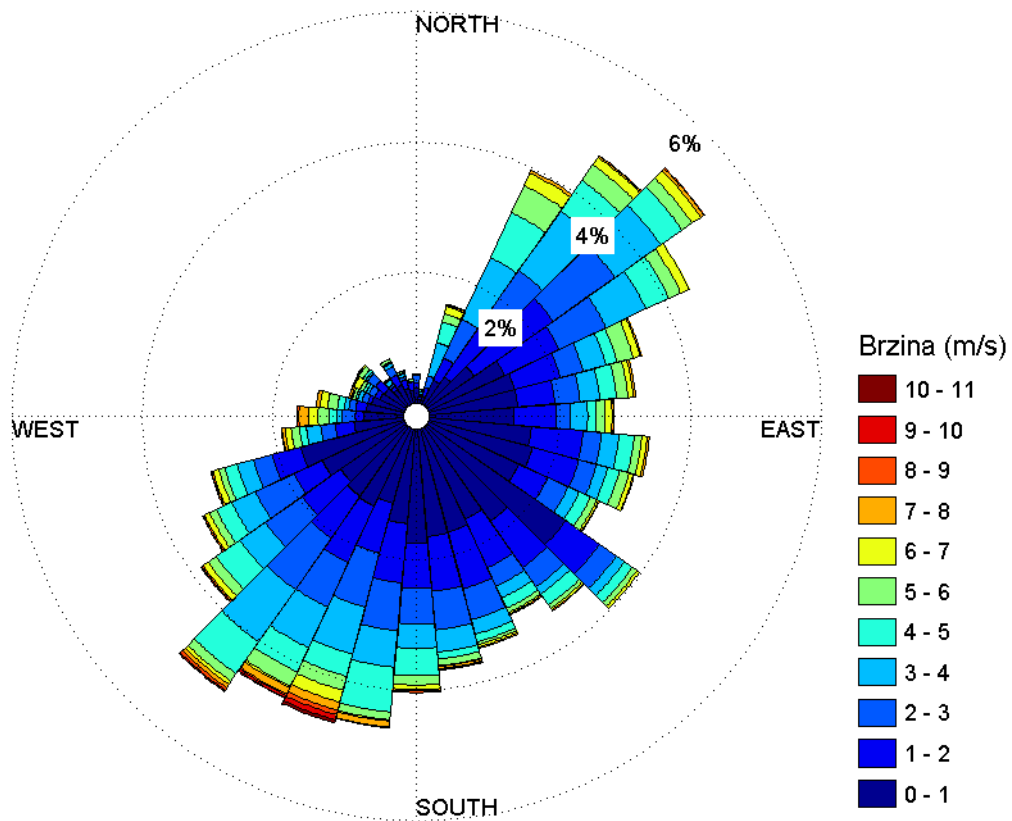
- a) vlažno (s toplim vjetrovima južnog smjera)
- b) suho (sa sjevernim hladnim vjetrovima)
- c) vedro vrijeme (sjeverozapadni vjetar)

5.7.1. Ruža vjetrova za sve podatke

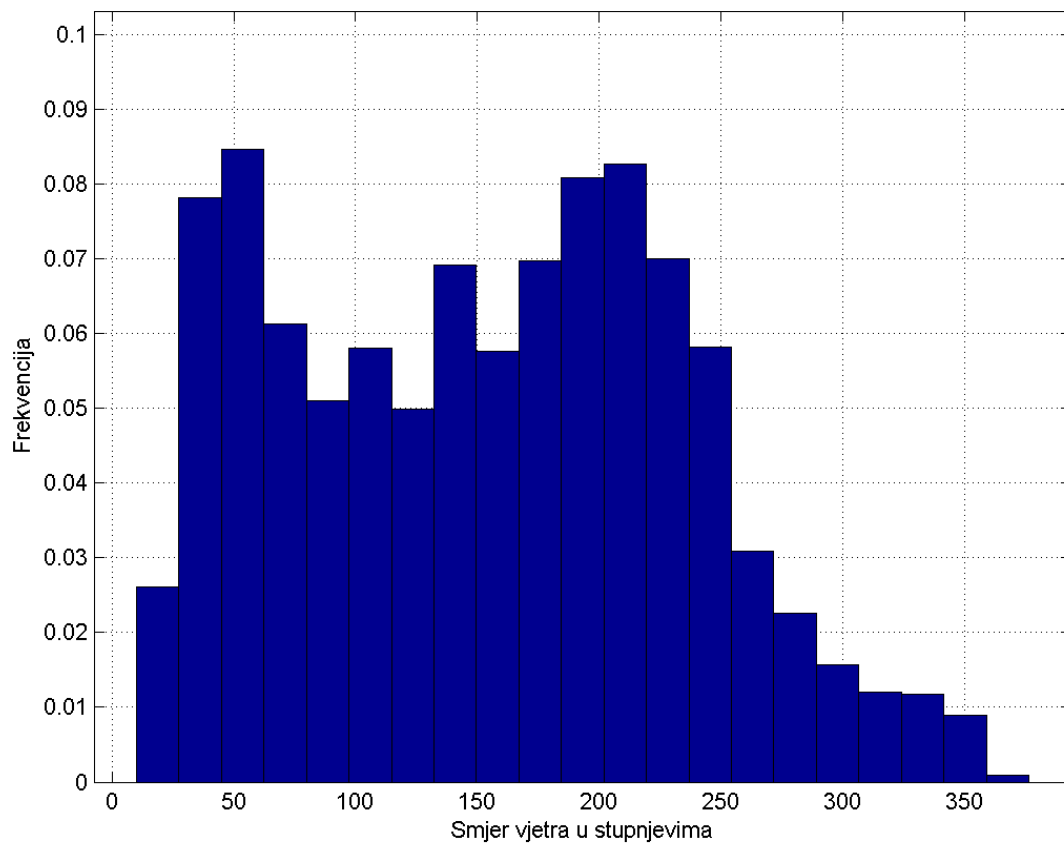
Ruža vjetrova za sve podatke u desetominutnim intervalima prikazana je na sljedećoj slici (slika 29).

Podaci za smjer vjetra uzimani su od 15. rujna 2010. pa sve do kraja studenoga. Vrijednosti za smjer vjetra prije 15. rujna 2010. su pogrešne i ne mogu se rekonstruirati (razlog je očitavanje podataka s krive lokacije u PLC-u).

Vidljivo je da su dominantni smjerovi vjetra jugozapadni i sjeveroistočni smjer, a najveći iznosi brzine zabilježeni su iz jugozapadnog smjera (crvena i smeđa boja na slici). Podaci su u skladu s očekivanjem s obzirom na promatrano doba godine. Najslabije zastupljeni smjer vjetra je sjeverni i sjeverozapadni. To potvrđuje i histogram podataka smjera vjetra (slika 30).



Slika 29. Ruža vjetrova za desetominutne srednjake brzine i smjera



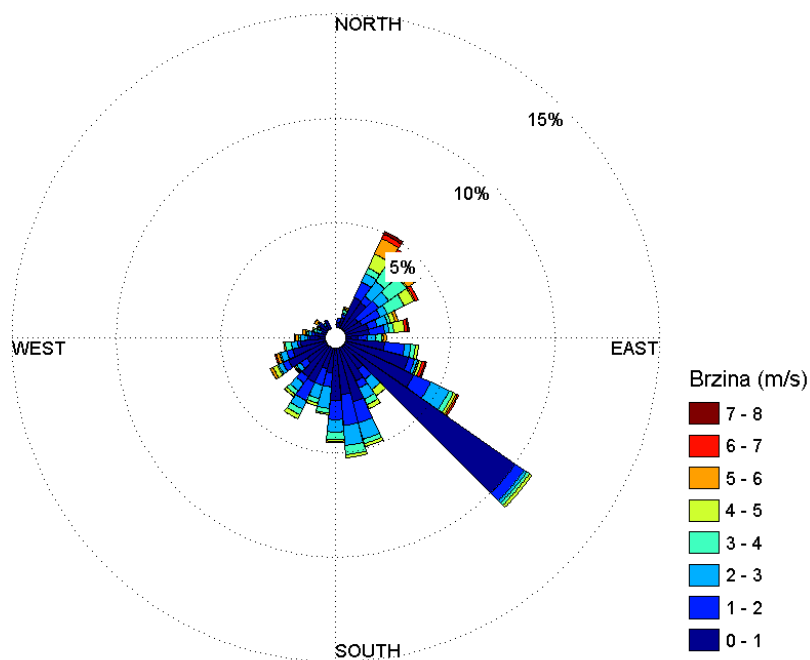
Slika 30. Histogram smjera vjetra

5.7.2. Ruža vjetrova za pojedine mjesece

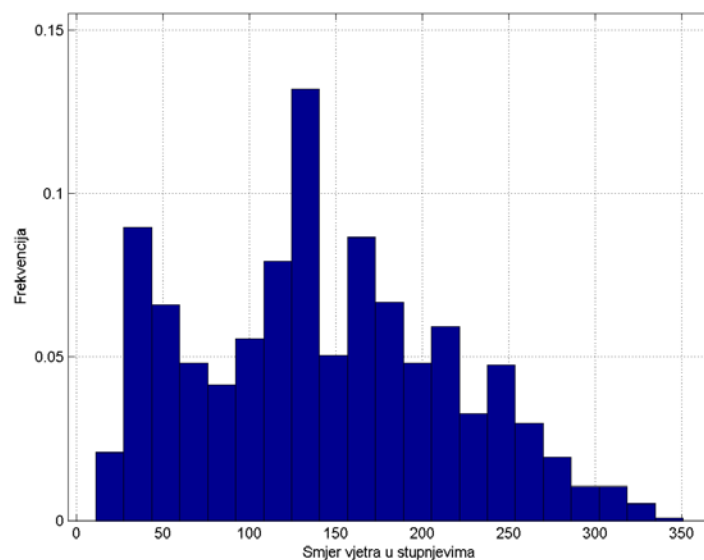
Rujan

Ruža vjetrova i histogram podataka za rujan prikazani su narednim slikama (Slike 31 i 32). Pritom su korištene desetominutne srednje vrijednosti brzine i smjera vjetra.

Dominantni smjer vjetra za rujan (11 mjerenih dana od 15. rujna) je jugoistočni, ali kao što se vidi iz slike radi se većinom o manjim brzinama do 2 m/s. Najveća brzina vjetra (crvena i smeđa boja) je izmjerena iz sjeveroistočnog smjera.



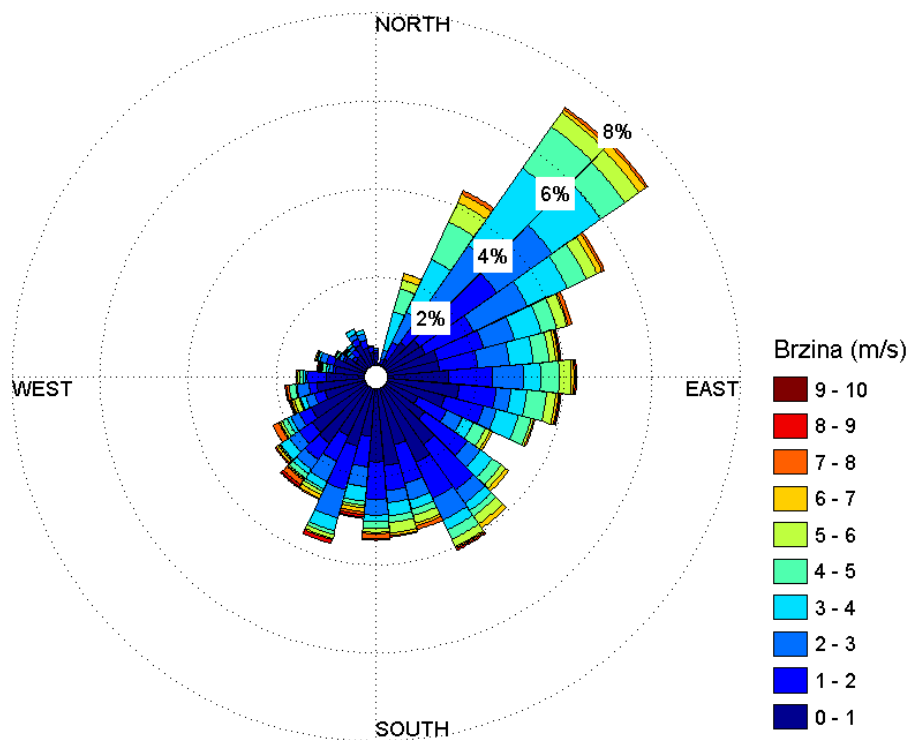
Slika 31. Ruža vjetrova za rujan



Slika 32. Histogram smjera vjetra za rujan

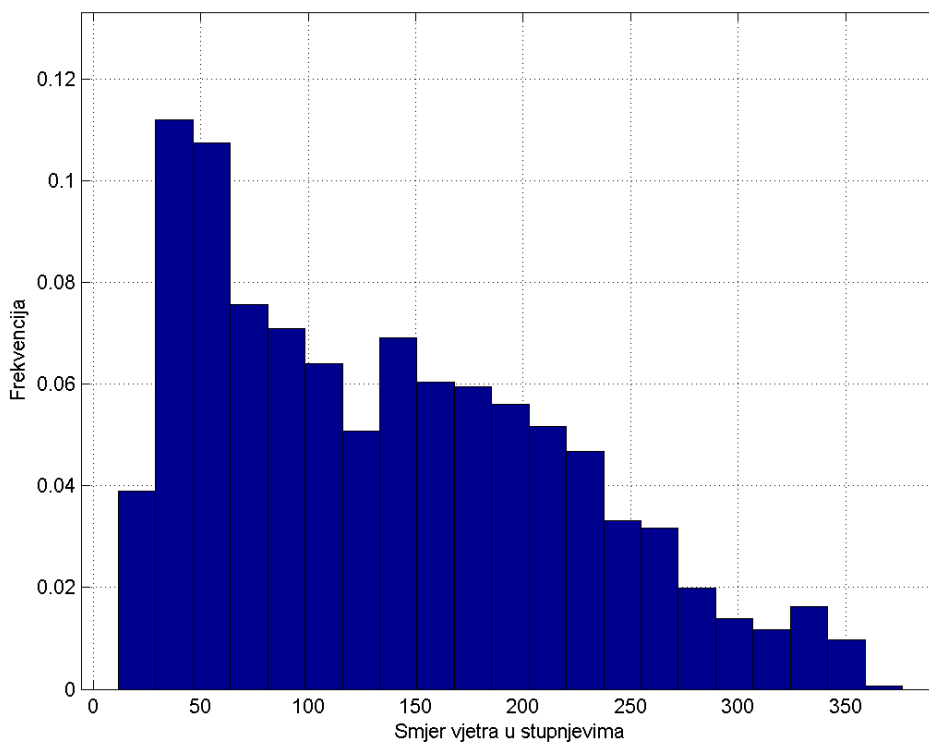
Listopad

Slike 33 i 34 prikazuju ružu vjetrova i pripadni histogram podataka za listopad.



Slika 33. Ruža vjetrova za listopad

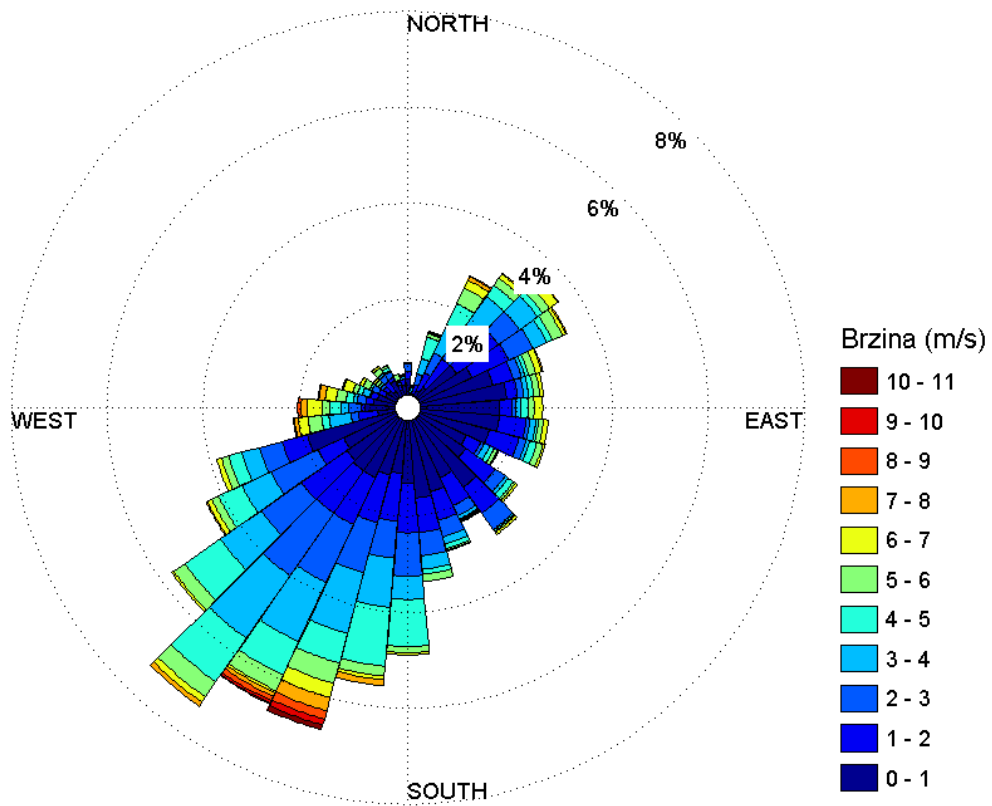
Dominantni smjer vjetra u listopadu je bio sjeveroistočni. Od ostalih smjerova vjetra nešto se više ističu jugozapadni, južni i istočni smjer.



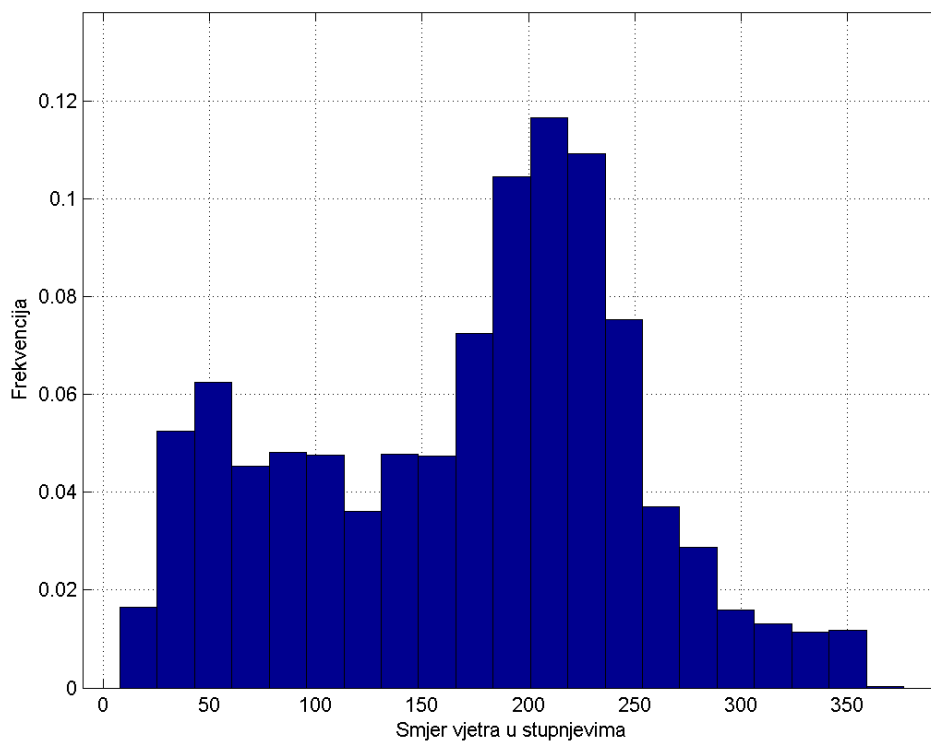
Slika 34. Histogram smjera vjetra za listopad

Studeni

Slike 35 i 36 pokazuju ružu vjetrova i histogram podataka za smjer vjetra u studenome.



Slika 35. Ruža vjetrova za studeni



Slika 36. Histogram brzine vjetra za studeni

Vjetar je većinu vremena i s najvećom brzinom puhao iz jugozapadnog smjera. Ostali su smjerovi daleko manje zastupljeni, pogotovo što se tiče vjetrova veće brzine. Ovakva situacija za studeni u Zagrebu nije uobičajena, ali da su podaci točni pokazuje i stvarna klimatološka situacija u studenome koji je bio iznadprosječno topao i kišovit (to je posljedica izraženog jugozapadnog strujanja).

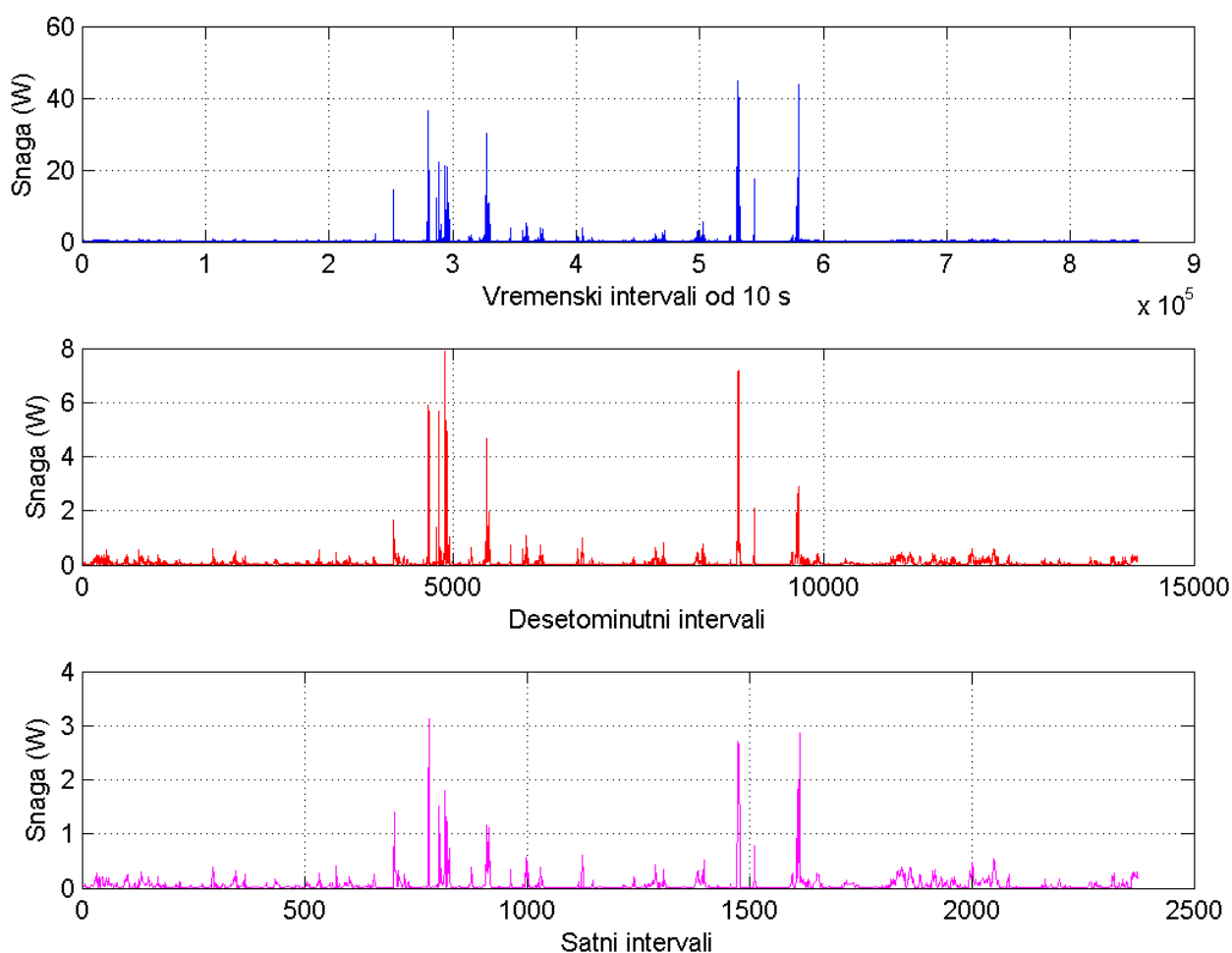
Zanimljivo je primijetiti da je za sva tri mjeseca brzina iz sjeverozapadnog i sjevernog smjera najmanje zastupljena. Vjerojatno je situacija za te smjerove drugačija za zimske mjesece kada se očekuje da vjetar većinom dolazi iz tih smjerova. To bi trebalo provjeriti budućim radovima na ovu temu.

5.8. Snaga i energija vjetra i vjetroagregata

5.8.1. Ukupna snaga i energija dobivene stvarnim mjerenjem na lokaciji

Snaga vjetroagregata dobivena umnoškom mjerenih vrijednosti napona i struje prikazana je slikom 37.

Snaga je računata za vrijednosti napona i struje tijekom osnovnog vremenskog intervala od deset sekundi, kao i za usrednjene vrijednosti od deset minuta i jednog sata.



Slika 37. Snaga vjetroagregata dobivena mjerenjem napona i struje

Budući da je žarulja na kojoj mjerimo snagu bila većinu vremena neispravna, vidimo da je vrijednost snage uglavnom bliska nuli. Osnovni statistički podaci prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Statistički podaci za snagu

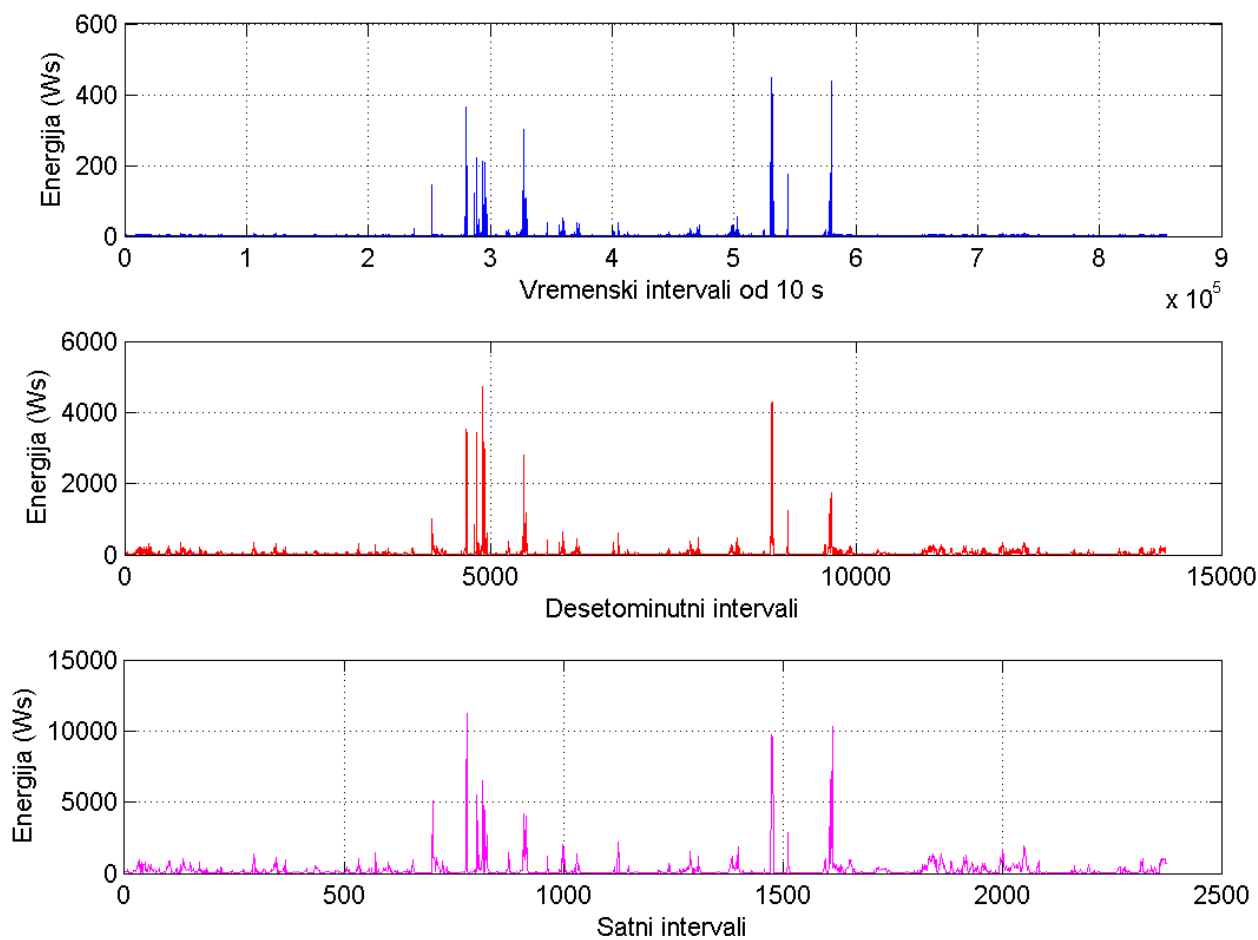
Statistički podaci za snagu	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	44.85	7.88	3.12
Srednja vrijednost snage (W)	0.08	0.07	0.06
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.50	0.24	0.19

Srednja gustoća snage vjetra (tablica 11) računata je prema formuli 4.4 (4. poglavlje). Srednja gustoća snage vrlo je niska, što je razumljivo zbog niske brzine vjetra i dugih razdoblja u kojima je brzina vjetra jednaka nula. Najveća srednja gustoća snage dobivena je za listopad i studeni. Podaci za srpanj su izračunati na temelju podataka deset mjerenih dana pa nisu sasvim vjerodostojni. Instalacija vjetroagregata na promatranoj lokaciji zbog niske srednje gustoće snage nije ekonomski opravdana.

Tablica 11. Srednja gustoća snage vjetra (za sve podatke i pojedine mjesece)

Srednja gustoća snage vjetra (W/m ²)	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Cijelo razdoblje mjerenja	28.98	22.75	20.16
Srpanj	30.44	23.48	18.69
Kolovoz	24.12	17.95	14.97
Rujan	25.75	19.61	17.46
Listopad	30.45	23.12	21.03
Studen	33.36	28.15	26.11

Proizvedena energija vjetroagregata (dobivena računanjem iz stvarno izmjerene snage) za različite vremenske intervale prikazana je slikom 38.



Slika 38. Proizvedena energija vjetroagregata

Tablica 18 daje karakteristične podatke za proizvedenu energiju.

Tablica 12. Statistički podaci za proizvedenu energiju vjetroagregata

Statistički podaci za energiju	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0.01	0.07
Maksimalna vrijednost energije po intervalu (Ws)	448.5	4730	11240
Srednja vrijednost energije po intervalu (Ws)	0.8	41.8	234
Srednja vrijednost standardne devijacije	4.97	146	670
Ukupna proizvedena energija	$7.12 \cdot 10^5$ Ws (0.198 kWh)	$5.95 \cdot 10^5$ Ws (0.165 kWh)	$5.55 \cdot 10^5$ Ws (0.154 kWh)

5.8.2. Ukupna snaga i energija dobivene procjenom iz krivulje snage

Koristeći cftool (curve fitting tool) u Matlabu, generirana je funkcionalna ovisnost snage turbine o brzini vjetra prema stvarnoj krivulji snage. To je napravljeno tako da su ručno očitane karakteristične točke s krivulje snage i onda je korištenjem Matlabu dobivena najbolja funkcionalna ovisnost snage o brzini vjetra. Dakle, dobiven je matematički izraz kojim se opisuje krivulja snage. Tako je moguće jednostavno izračunati snagu turbine za bilo koju brzinu vjetra.

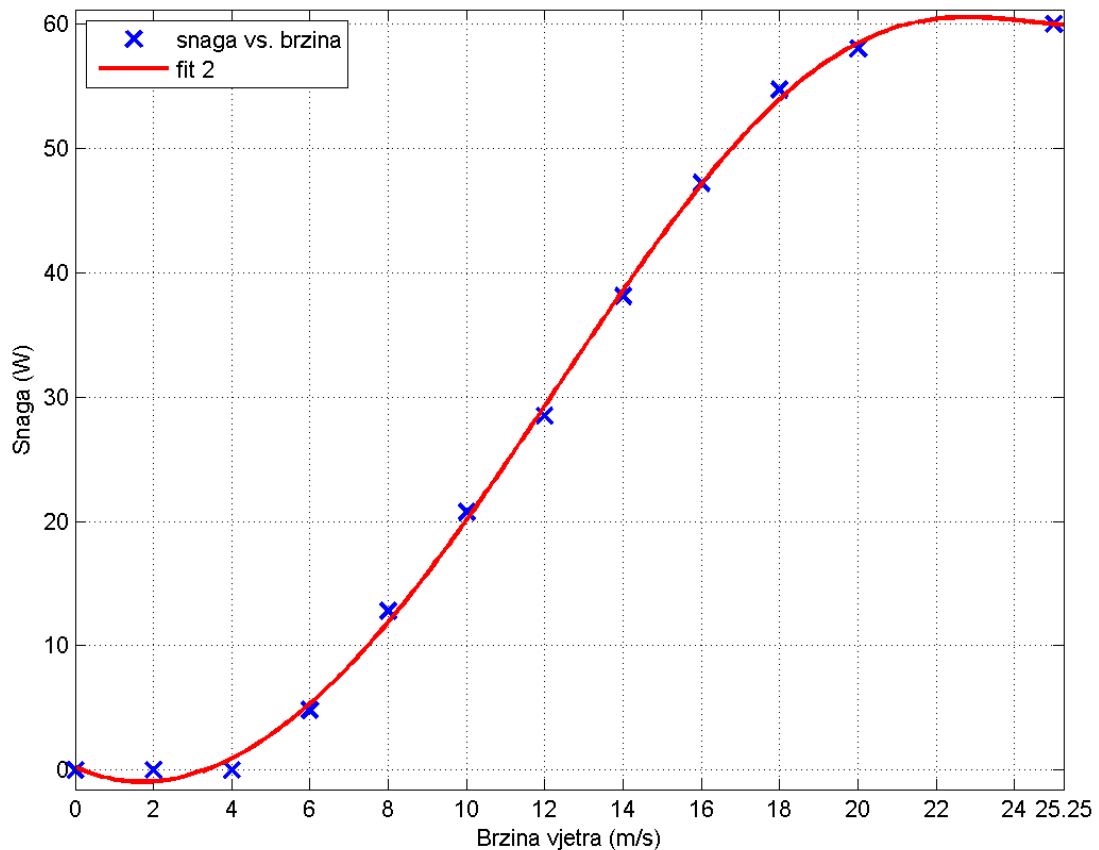
Polinom šestog stupnja dao je najbolje rezultate jer se tako dobila najbolja podudarnost sa stvarnom krivuljom snage. Rezultati fitanja prikazani su u nastavku:

```
Linear model Poly6:
      f(x) = p1*x^6 + p2*x^5 + p3*x^4 + p4*x^3 + p5*x^2 +
             p6*x + p7
Coefficients (with 95% confidence bounds):
      p1 =  2.511e-006   (-4.16e-006,  9.182e-006)
      p2 = -0.0001535   (-0.0006615,  0.0003544)
      p3 =  0.003239    (-0.01134,  0.01782)
      p4 = -0.04085     (-0.2363,  0.1546)
      p5 =  0.574       (-0.648,  1.796)
      p6 = -1.634       (-4.658,  1.39)
      p7 =  0.256       (-1.936,  2.448)
Goodness of fit:
      SSE: 4.905
      R-square: 0.9993
      Adjusted R-square: 0.9986
      RMSE: 0.9042
```

Slika 39 prikazuje krivulju snage generiranu u Matlabu.

U slučaju ispravnih mjerenja snage moguće je provjeriti točnost krivulje snage koju je dao proizvođač vjetroagregata. To je važno pogotovo u slučaju malih vjetroagregata jer za takve uređaje ne postoje neovisna testiranja koja bi potvrdila ili opovrgnula podatke koje daje proizvođač. Nažalost, točnih mjerenja snage u našem slučaju nije bilo jer je trošilo (žarulja) veliki dio vremena bilo izvan funkcije, a i vremenski period mjerenja je kratak.

U budućnosti bi trebalo osmisliti neki pouzdaniji način mjerenja snage jer žarulja to sigurno nije. Tada bi za veći period mjerenja bilo moguće usporediti snagu dobivenu stvarnim mjerenjem na lokaciji i onu dobivenu krivuljom snage i vidjeti u kojoj se mjeri rezultati podudaraju.

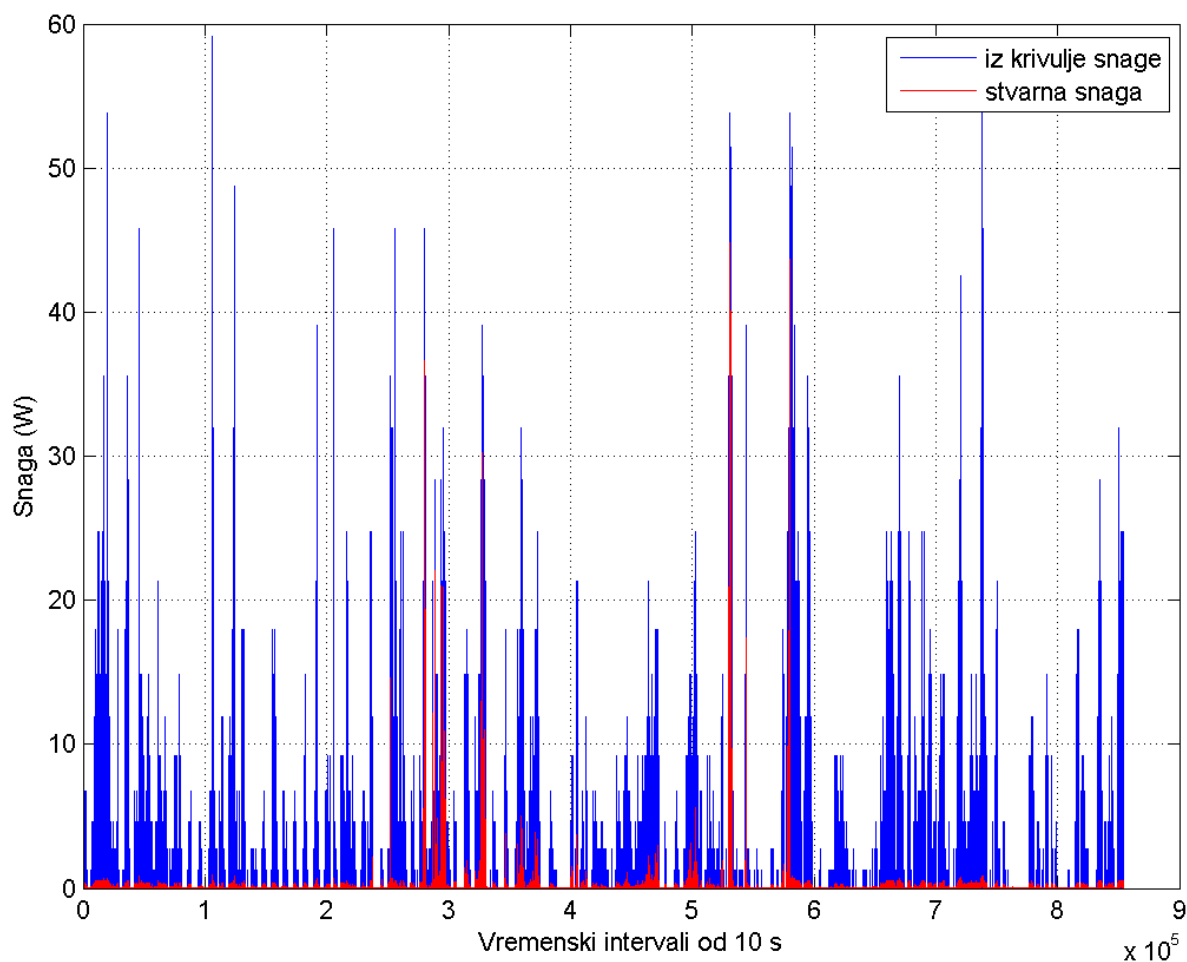


Slika 39. Krivulja snage vjetroagregata Rutland 503 generirana u Matlabu korištenjem cftool-a

Na sljedećoj slici (slika 40) prikazana je snaga dobivena iz stvarnih podataka i potencijalna snaga procijenjena prema krivulji snage. Iz slike se vidi jedno manje područje na kojem se ove dvije snage dobro poklapaju, ali nedovoljno za bilo kakve konkretne zaključke.

Podaci za procijenjenu snagu dani su tablicom 13.

Srednja snaga je više od deset puta veća nego u slučaju stvarnih mjerenja. Vidi se da je i ovako dobivena srednja snaga vrlo mala (manja od 1 W) jer brzina vjetra većinu vremena nije bila dovoljna za pokretanje vjetroagregata.

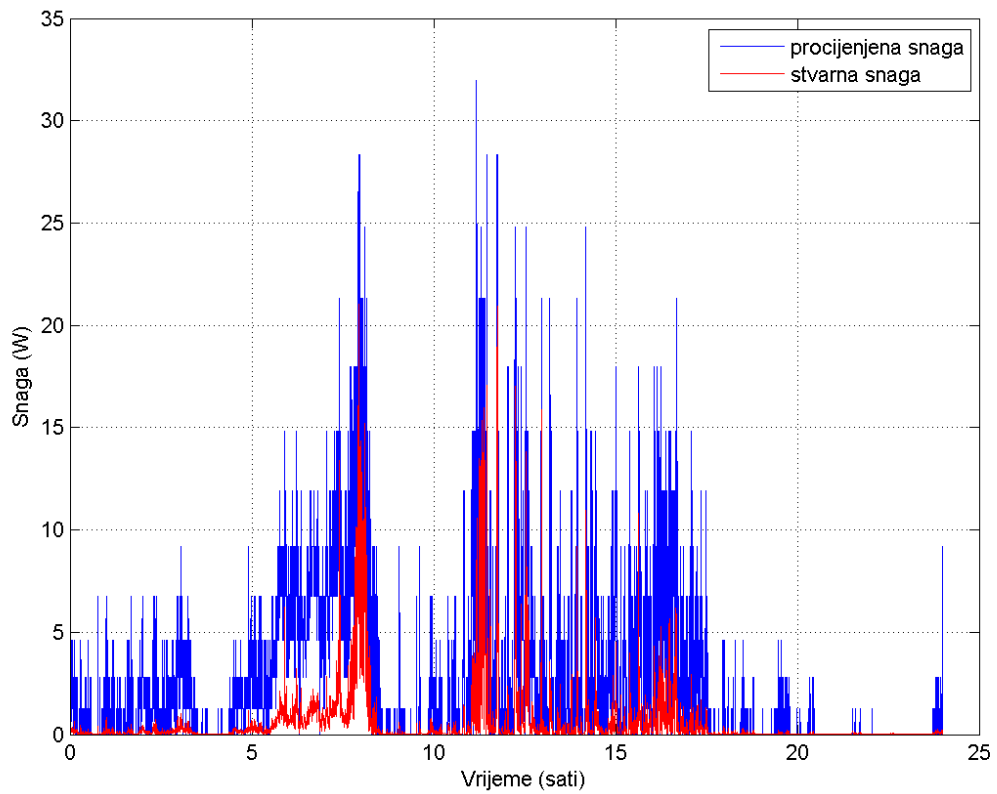


Slika 40. Prikaz mjerene i procijenjene snage vjetroagregata

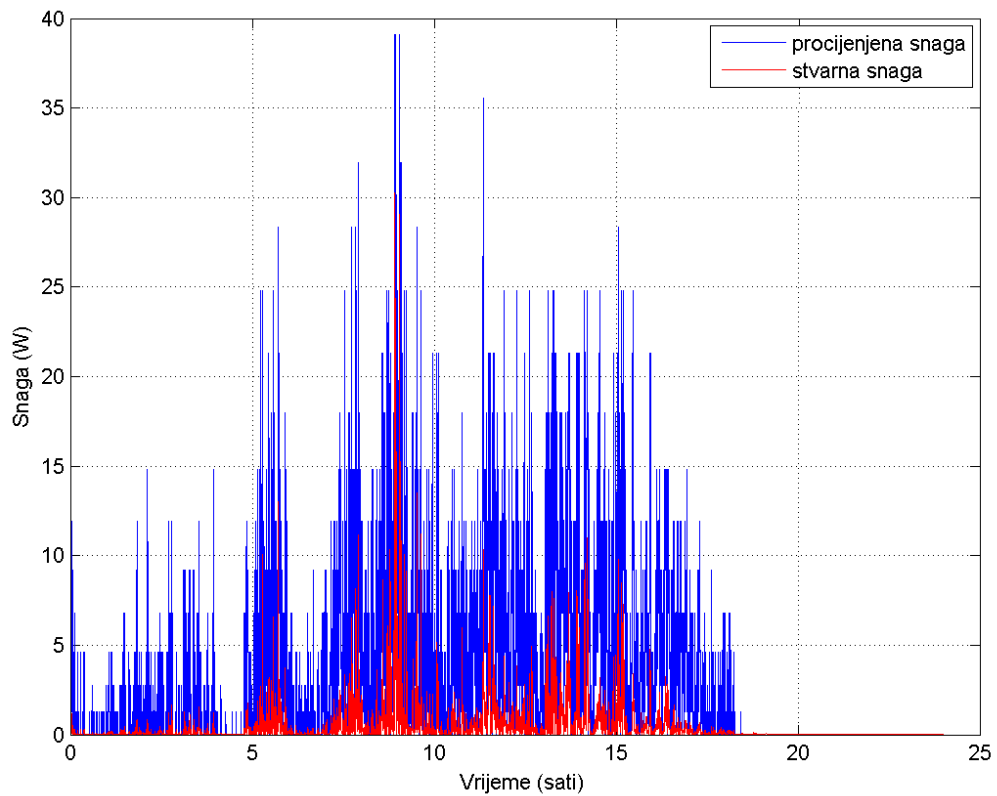
Tablica 13. Statistični podaci za procijenjenu snagu

Statistički podaci za procijenjenu snagu (iz krivulje snage)	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	59.14	38.19	20.26
Srednja vrijednost snage (W)	0.89	0.65	0.55
Srednja vrijednost standardne devijacije	2.80	2.09	1.77

Na slikama 41 i 42 prikazane su mjerene i procijenjene snage vjetroagregata za dva najvjetrovitija dana za koje je trošilo bilo ispravno: 1. rujna (srednja brzina vjetra 4.1 m/s i srednja gustoća snage 76.82 W/m²) i 11. rujna (srednja brzina vjetra 3.96 m/s i srednja gustoća snage 95.85 W/m²).

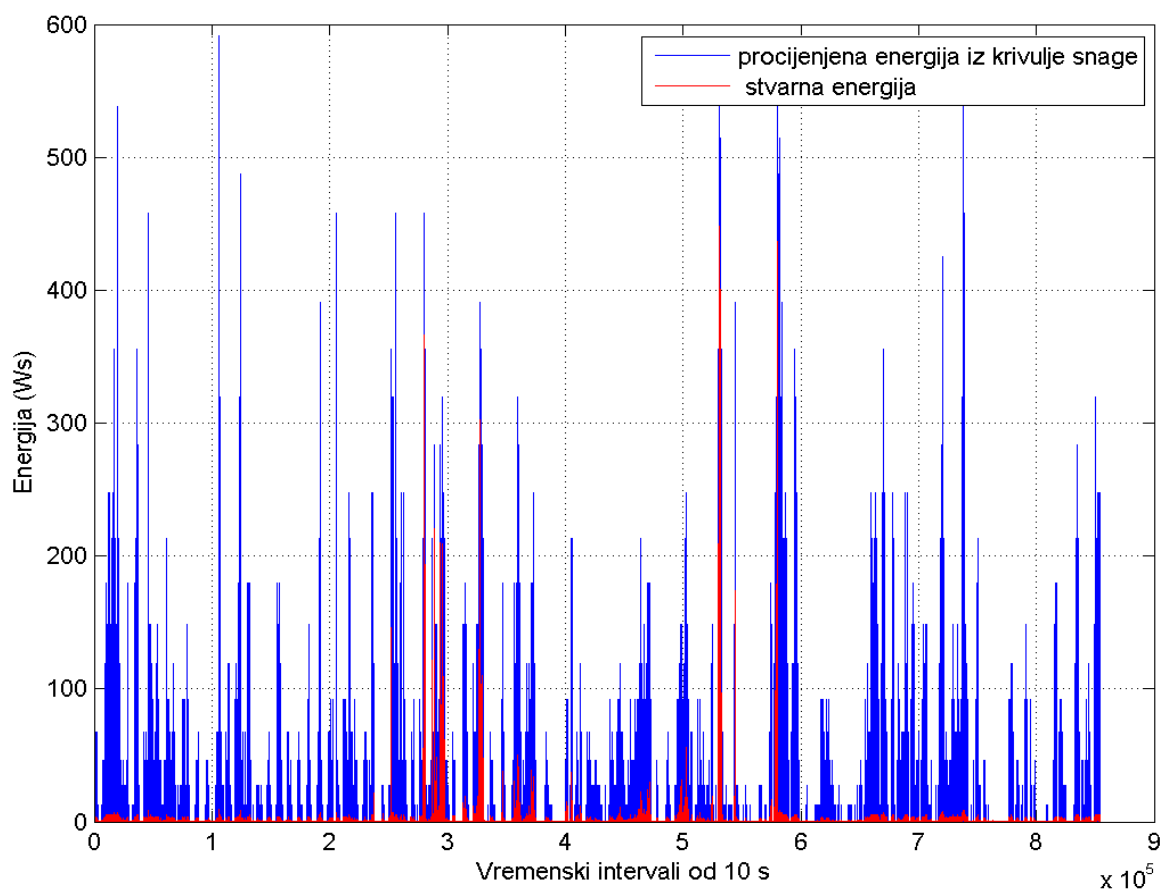


Slika 41. Mjerena i procijenjena snaga vjetroagregata za 1. rujna



Slika 42. Mjerena i procijenjena snaga vjetroagregata za 11. rujna

Proizvedena energija vjetroagregata prema podacima iz krivulje snage u odnosu na stvarnu energiju dana je slikom 43. Osnovni podaci su također dani tablično (tablica 14).



Slika 43. Procijenjena i stvarno proizvedena energija (energija po intervalu)

Tablica 14. Statistički podaci za procijenjenu energiju

Statistički podaci procijenjene energije	Intervali od 10 s	Desetominutni intervali	Satni intervali
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0	0
Maksimalna vrijednost energije po intervalu (Ws)	591.4	22910	72950
Srednja vrijednost energije po intervalu (Ws)	8.84	392	1992
Srednja vrijednost standardne devijacije	28.04	1255	6370
Ukupna proizvedena energija	$7.55 \cdot 10^6$ Ws (2.10 kWh)	$5.59 \cdot 10^6$ Ws (1.55 kWh)	$4.73 \cdot 10^6$ Ws (1.31 kWh)

5.8.3. Snaga i energija za pojedine mjesece

U nastavku (tablice 15 do 24) su prikazane snaga i energija vjetroagregata za pojedine mjesece. Pritom su prikazani podaci za stvarne snage i energije dobivene mjerenjem i potencijalne prema krivulji snage proizvođača. Svi podaci za snagu i energiju računani su za podatke napona, struje i brzine u osnovnim intervalima od deset sekundi. Iz tabličnih podataka vidi se da je jedino u rujnu i listopadu mjerena neka veća vrijednost snage jer je tada trošilo bilo u funkciji.

Tablica 15. Snaga vjetroagregata u srpnju

Snaga - srpanj	Snaga dobivena mjerenjem	Procjena iz krivulje snage
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	0.82	53.8
Srednja vrijednost snage (W)	0.07	0.89
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.09	2.64

Tablica 16. Energija vjetroagregata u srpnju

Energija - srpanj	Energija dobivena mjerenjem	Procijenjena energija iz krivulje snage
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0
Maksimalna vrijednost energije (Ws)	8.19	538
Srednja vrijednost energije (Ws)	0.71	8.91
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.95	26.39
Ukupna energija (Ws)	$5.82 \cdot 10^4$	$7.31 \cdot 10^5$

Tablica 17. Snaga vjetroagregata u kolovozu

Snaga - kolovoz	Snaga dobivena mjerenjem	Procjena iz krivulje snage
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	36.66	59.14
Srednja vrijednost snage (W)	0.07	0.68
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.50	2.81

Tablica 18. Energija vjetroagregata u kolovozu

Energija - kolovoz	Energija dobivena mjeranjem	Procijenjena energija iz krivulje snage
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0
Maksimalna vrijednost energije (Ws)	366.6	591.4
Srednja vrijednost energije (Ws)	0.70	6.84
Srednja vrijednost standardne devijacije	4.99	28.12
Ukupna energija (Ws)	$1.46 \cdot 10^5$	$1.43 \cdot 10^6$

Tablica 19. Snaga vjetroagregata u rujnu

Snaga - rujan	Snaga dobivena mjeranjem	Procjena iz krivulje snage
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	30.25	39.12
Srednja vrijednost snage (W)	0.10	0.82
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.58	2.48

Tablica 20. Energija vjetroagregata u rujnu

Energija - rujan	Energija dobivena mjeranjem	Procijenjena energija iz krivulje snage
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0
Maksimalna vrijednost energije (Ws)	302.5	391.2
Srednja vrijednost energije (Ws)	1.02	8.16
Srednja vrijednost standardne devijacije	5.80	24.76
Ukupna energija (Ws)	$1.34 \cdot 10^5$	$1.07 \cdot 10^6$

Tablica 21. Snaga vjetroagregata u listopadu

Snaga - listopad	Snaga dobivena mjeranjem	Procjena iz krivulje snage
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	44.85	53.8
Srednja vrijednost snage (W)	0.1044	0.932
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.7477	2.931

Tablica 22. Energija vjetroagregata u listopadu

Energija - listopad	Energija dobivena mjerenjem	Procijenjena energija iz krivulje snage
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0
Maksimalna vrijednost energije (Ws)	448.5	538
Srednja vrijednost energije (Ws)	1.02	9.32
Srednja vrijednost standardne devijacije	7.48	29.3
Ukupna energija (Ws)	$2.04 \cdot 10^5$	$1.85 \cdot 10^6$

Tablica 23. Snaga vjetroagregata u studenome

Snaga - studeni	Snaga dobivena mjerenjem	Procjena iz krivulje snage
Minimalna vrijednost snage (W)	0	0
Maksimalna vrijednost snage (W)	0.82	53.8
Srednja vrijednost snage (W)	0.07	1.05
Srednja vrijednost standardne devijacije	0.11	2.90

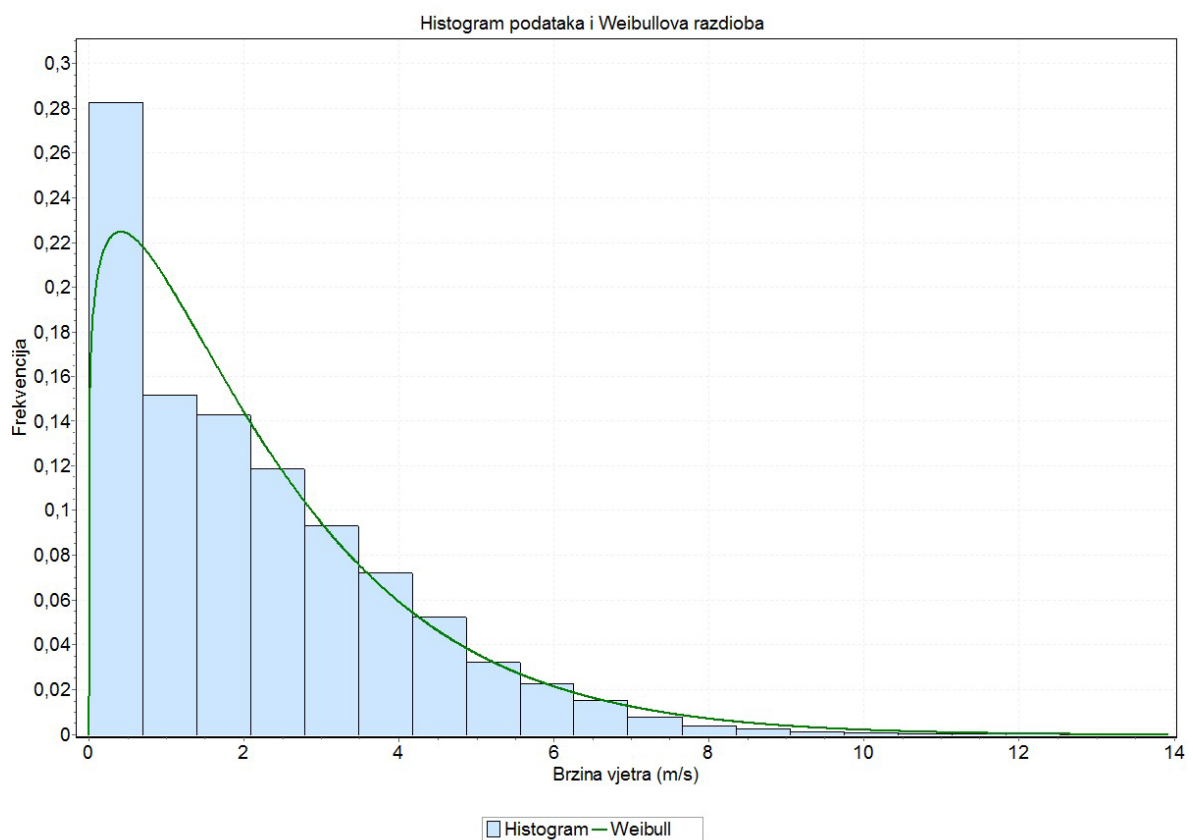
Tablica 24. Energija vjetroagregata u studenome

Energija - studeni	Energija dobivena mjerenjem	Procijenjena energija iz krivulje snage
Minimalna vrijednost energije (Ws)	0	0
Maksimalna vrijednost energije (Ws)	8.19	538
Srednja vrijednost energije (Ws)	0.72	10.55
Srednja vrijednost standardne devijacije	1.09	28.99
Ukupna energija (Ws)	$1.69 \cdot 10^5$	$2.46 \cdot 10^6$

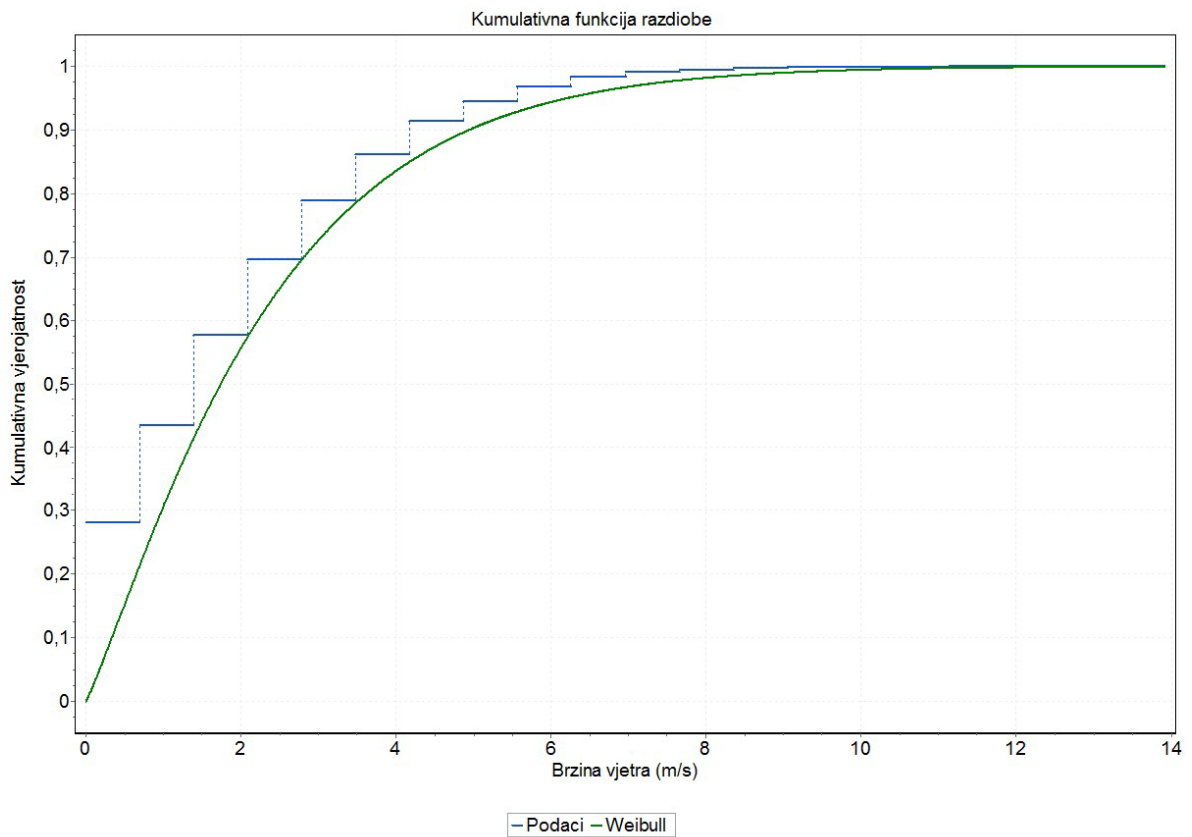
5.9. Statistička analiza podataka

Korištenjem programa EasyFit 5.4 izvršena je statistička obrada podataka, odnosno pokušalo se utvrditi u kojoj mjeri su podaci prilagođeni Weibullovoj razdiobi. Naime, program testira prilagođenost podataka različitim razdiobama pomoću tri testa: Kolmogorov – Smirnov test, Anderson – Darling test i χ^2 – test (Pearsonov test).

Testira se postavljena nul – hipoteza da podaci slijede odabranu razdiobu. Na slikama 44 i 45 prikazane su Weibullova razdioba i njena kumulativna funkcija.



Slika 44. Histogram podataka i Weibullova razdioba



Slika 45. Kumulativna funkcija Weibullove razdiobe

Za Weibullovu razdiobu dobivene su sljedeće vrijednosti parametara k i c , $k=1.150$ i $c=2.396$.

Rezultati testova (tablica 25) pokazali su da distribucija brzine vjetra ne slijedi Weibullovu razdiobu, tj. odbačena je postavljena nul – hipoteza. Ovakav je rezultat razumljiv s obzirom na izgled histograma podataka (većinu vremena brzina vjetra je bila nula ili vrlo malih vrijednosti), što nije povoljno za Weibullovu razdiobu koja je definirana za podatke različite od nule.

Tablica 25. Rezultati testova programom EasyFit

Weibull (k=1,1504, c=2.3962)					
Kolmogorov-Smirnov					
Broj uzoraka	14240				
Testna statistika	0,11631				
P-vrijednost	0				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritična vrijednost	0,00899	0,01025	0,01138	0,01272	0,01365
Hipoteza se odbacuje	Da	Da	Da	Da	Da
Anderson-Darling					
Broj uzoraka	14240				
Vrijednost statistike	2407,6				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritična vrijednost	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Hipoteza se odbacuje	Da	Da	Da	Da	Da
$\chi^2 - test$					
Stupnjevi slobode	13				
Testna statistika	2962,2				
P-vrijednost	0				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritična vrijednost	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
Hipoteza se odbacuje	Da	Da	Da	Da	Da

6. Zaključak

Cilj ovog rada bio je obraditi i analizirati mjerene podatke za vjetar u urbanoj sredini. Detaljno su opisani načini obrade mjerenih podataka i navedene su glavne karakteristike mjernih uređaja. Nakon svega navedenog u ovom radu, jasno je da je mjerenje na lokaciji instalacije vjetroagregata važno za točniju procjenu potencijalne snage i energije vjetra.

Kao što je navedeno u uvodu, trenutno dostupan mali period mjerenja nije dovoljan za kompletnu procjenu lokacije. Procjena lokacije bila bi bolja za duži period mjerenja od barem godinu dana. Dobiveni rezultati obrade podataka ukazuju da lokacija nije povoljna za instalaciju vjetroagregata. To proizlazi iz niske srednje brzine vjetra od oko 2.1 m/s i niske srednje gustoće snage vjetra. Ovako niska brzina vjetra manja je od brzine uključenja vjetroagregata (većinom se kreće od 3 do 5 m/s). Vjetroagregat zbog toga većinu vremena ne bi uopće radio.

Što se tiče smjera vjetra, ruža vjetrova pokazuje da je vjetar većinu vremena i s najvećom brzinom puhao iz sjeveroistočnog i jugozapadnog smjera, a to je s obzirom na klimatološke uvjete tijekom promatranog razdoblja sasvim očekivano. Ostali smjerovi vjetra slabije su zastupljeni.

Budući da je trošilo na kojemu se mjeri proizvedena snaga vjetroagregata većinu vremena bilo u kvaru, nije bilo moguće potvrditi ili opovrgnuti podatke iz krivulje snage koju daje proizvođač. To bi trebao biti cilj nekim budućim radovima na ovu temu. Trenutno korišteno trošilo (žarulja) na kojem mjerimo napon i struju ima nedovoljnu snagu pa lako pregori u slučaju većeg opterećenja. Trebalo bi ugraditi prikladnije trošilo veće snage ili spojiti sustav pomoću regulatora na mrežu. Tako bi dobili točnije i potpunije rezultate za snagu koju daje vjetroagregat.

Zbog vrlo dugih razdoblja bez vjetra (najčešće izmjerena brzina vjetra je upravo 0 m/s), podaci brzine vjetra ne slijede Weibullovu raspodjelu.

7. Literatura

- [1] Kulišić, P. Novi izvori energije II dio: Sunčana energija i energija vjetra, Zagreb: Školska knjiga, 1991.
- [2] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Baffins Lane, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [3] Mathew, S. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Netherlands: Springer, 2006.
- [4] Vaughn, N. Wind Energy: Renewable Energy and the Environment, New York: Taylor & Francis Group, 2009.
- [5] Šimić, Z., Šljivac, D. Obnovljivi izvori energije: Vrste, potencijal i tehnologije http://www.aweres.net/Preuzmi/Obnovljivi%20izvori%20energije_dio%20I.pdf , 29. prosinca 2010.
- [6] Gipe, P. Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business, Vermont, USA: Chelsea Green Publishing Company, 2004.
- [7] Danish Wind Industry Association, 1. lipnja 2003., <http://www.vindselskab.dk/en/tour/wres/index.htm> , 29. prosinca 2010.
- [8] Shelquist, R. An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations, 2. kolovoza 2010., http://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm , 29. prosinca 2010.
- [9] Fraden, J. Handbook of Modern Sensors, New York: Springer, 2004.
- [10] NRG Systems, Standard Sensors, <http://www.nrgsystems.com/AllProducts/SensorsandTurbineControl/StandardSensors.aspx> , 29. prosinca 2010.
- [11] Kerker, M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. New York: Academic Press, 1969.
- [12] Laser-Doppler Anemometry, <http://www.tut.fi/units/me/ener/laitteistot/EFD/LDA.html> , 29. prosinca 2010.
- [13] Rutland 503 Wind Turbine, <http://www.bettergeneration.com/wind-turbine-reviews/rutland-503-wind-turbine.html> , 30 prosinca 2010.

- [14] Patel, M. R. Wind and Solar Power Systems, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC, 1999.
- [15] Youm, I., Sarr, J., Sall, M., Kane, M. M. Renewable Energy Activities in Senegal – a Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 4, str. 75 - 89, 2000.
- [16] Celik, A. N. Assessing the Suitability of Wind Energy Speed Probability Distribution Functions Based on Wind Power Density, Renewable Energy, Vol. 28, str. 1563 - 1574, 2003.

Sažetak

Mjerenja vjetropotencijala provode se zbog određivanja mogućnosti proizvodnje električne energije na nekoj lokaciji. Ukoliko je topografija terena kompleksna, što vrijedi u većini slučajeva, točnost predviđanja vjetropotencijala uz pomoć proračuna na veće udaljenosti od mjernog mjesta opada pa je potrebno mjerenja obaviti na samoj potencijalnoj lokaciji gradnje vjetroelektrane. Cilj ovog rada bio je obraditi i analizirati mjerene podatke za vjetar. Analiza mjerenih podataka je obavljena u programu Matlab. Detaljno su opisani svi načini obrade mjerenih podataka. Također, opisani su svi korišteni senzori koji su instalirani na zgradu FER-a: senzori za temperaturu, relativnu vlažnost zraka, horizontalnu i vertikalnu brzinu vjetra i smjer vjetra.

Dosadašnji rezultati obrade podataka pokazuju da potencijalna energija vjetra na lokaciji nije povoljna za proizvodnje električne energije. To proizlazi iz niske srednje brzine vjetra od 2.1 m/s i niske gustoće snage vjetra od 29 W/m². Iz provedene analize jasno je da treba nastaviti s daljnjim mjerenjima. Mjerenja trebaju trajati barem godinu dana, a po mogućnosti i duže za kompletnu ocjenu potencijala lokacije.

Također, testovi prilagođenosti podataka empirijskim razdiobama pokazali su da brzina vjetra ne slijedi Weibullovu razdiobu zbog dugih razdoblja tijekom kojih nema vjetra.

Ključne riječi: obrada podataka, brzina vjetra, energija vjetra, Matlab, Weibull

Abstract

Wind measurements are taken as a part of evaluation of potential for exploitation of small wind power plant on a given location. If terrain is complex, which is the situation in most cases, accuracy of wind potential calculation on larger distances from wind measurement is decreasing rapidly and therefore it is necessary to make wind measurements on the exact site of future wind power plant. The goal of this thesis was to analyse and evaluate measurement results. The analysis of measured data was made by using Matlab application. All wind data analysis methods have been described in detail. Description was given for sensors installed on a roof of the FER building: sensors for temperature, relative humidity, horizontal and vertical wind speed and wind direction.

Completed data analysis results is showing that there is not enough wind energy potential for a given site for electrical energy production. Mean wind speed is low (2.1 m/s) and wind power density is also very low (29 W/m²). From this analysis it is clear that there is need for continued measurement. Measurements need to last at least one year, and longer if possibly before the evaluation of wind energy potential for a given location.

The goodness-of-fit tests based on the empirical distribution function have shown that the Weibull model did not fit wind speed distributions well enough. This is because of the long periods of calms.

Keywords: data analysis, wind speed, wind energy potential, Matlab, Weibull

Popis slika

Slika 1. Zamišljeni cilindar koji opisuje vjetar na ulasku u turbinu.....	6
Slika 2. Promjena gustoće zraka s visinom	9
Slika 3. Utjecaj temperature na gustoću zraka	10
Slika 4. Promjena brzine vjetra s visinom prema zakonu profila snage.....	12
Slika 5. Promjena brzine vjetra s visinom prema logaritamskom zakonu	13
Slika 6. Zona turbulencija oko prepreke	15
Slika 7. Sustav instaliran na zgradu FER-a	17
Slika 8. Histogram brzine vjetra i pripadajuća funkcija gustoće Weibullove razdiobe	22
Slika 9. Funkcija gustoće i funkcija razdiobe za Weibullovu razdiobu (različiti parametri k)	23
Slika 10. Struja (mA) koju uzima trošilo prije korekcije	30
Slika 11. Prikaz struje u tri vremenska intervala	31
Slika 12. Izmjerena vrijednost struje i brzine za sve podatke	32
Slika 13. Prikaz napona u tri vremenska intervala.....	33
Slika 14. Struja i napon za sve podatke (vremenska skala u danima).....	34
Slika 15. Struja i napon za 1. rujna 2010	34
Slika 16. Struja i napon za 11. rujna 2010.....	35
Slika 17. Temperatura u °C za sve podatke	36
Slika 18. Temperatura nakon korekcije pogrešnih vrijednosti	36
Slika 19. Prikaz temperature u tri vremenska intervala	37
Slika 20. Relativna vlažnost zraka prije korekcije	38
Slika 21. Relativna vlažnost zraka nakon korekcije podataka izvan mjernog opsega	39
Slika 22. Relativna vlažnost zraka prikazana u tri vremenska intervala	40
Slika 23. Vertikalna brzina vjetra za sve podatke	41
Slika 24. Vertikalna brzina usrednjena na satne intervale	42
Slika 25. Brzina vjetra i histogram podataka za vremenske intervale od 10 s	43
Slika 26. Brzina vjetra i histogram podataka za desetominutne intervale	44
Slika 27. Brzina vjetra i histogram podataka za satne intervale.....	44

Slika 28. Intenzitet turbulencija u ovisnosti o brzini vjetra.....	46
Slika 29. Ruža vjetrova za desetominutne srednjake brzine i smjera.....	48
Slika 30. Histogram smjera vjetra.....	48
Slika 31. Ruža vjetrova za rujna.....	49
Slika 32. Histogram smjera vjetra za rujna.....	49
Slika 33. Ruža vjetrova za listopad.....	50
Slika 34. Histogram smjera vjetra za listopad.....	50
Slika 35. Ruža vjetrova za studeni.....	51
Slika 36. Histogram brzine vjetra za studeni.....	51
Slika 37. Snaga vjetroagregata dobivena mjerenjem napona i struje.....	53
Slika 38. Proizvedena energija vjetroagregata.....	55
Slika 39. Krivulja snage vjetroagregata Rutland 503 generirana u Matlabu korištenjem cftool-a.....	57
Slika 40. Prikaz mjerene i procijenjene snage vjetroagregata.....	58
Slika 41. Mjerena i procijenjena snaga vjetroagregata za 1. rujna.....	59
Slika 42. Mjerena i procijenjena snaga vjetroagregata za 11. rujna.....	59
Slika 43. Procijenjena i stvarno proizvedena energija (energija po intervalu).....	60
Slika 44. Histogram podataka i Weibullova razdioba.....	64
Slika 45. Kumulativna funkcija Weibullove razdiobe.....	65
Slika 46. Temperaturni senzor NRG 110S.....	76
Slika 47. Higrometar RH-5.....	78
Slika 48. Anemometar s lopaticama.....	81
Slika 49. Ultrazvučni anemometar.....	82
Slika 50. Princip rada laser doppler anemometra.....	83
Slika 51. Izgled anemometra s ugrijanom žicom.....	84
Slika 52. Anemometar NRG #40.....	85
Slika 53. Vertikalni anemometar RM Young 27106-T i odziv na različite smjerove vjetra.....	88
Slika 54. Pokazatelj smjera vjetra NRG #220P.....	88
Slika 55. Krivulja snage za Rutland 503.....	91
Slika 56. Efikasnost turbine u ovisnosti o brzini vjetra.....	91

Popis tablica

Tablica 1. Promjena gustoće zraka s promjenom temperature	10
Tablica 2. Iznos koeficijenta grubosti terena za različite vrste terena	14
Tablica 3. Gustoća snage vjetra za različite brzine	19
Tablica 4. Osnovni statistički podaci za struju	32
Tablica 5. Osnovni statistički podaci za napon	33
Tablica 6. Osnovni statistički podaci za mjerenu temperaturu.....	37
Tablica 7. Osnovni statistički podaci relativne vlažnosti zraka	40
Tablica 8. Statistički podaci brzine vjetra.....	45
Tablica 9. Statistički podaci brzine vjetra po mjesecima.....	45
Tablica 10. Statistički podaci za snagu.....	54
Tablica 11. Srednja gustoća snage vjetra (za sve podatke i pojedine mjesece)...	54
Tablica 18. Statistički podaci za proizvedenu energiju vjetroagregata	55
Tablica 13. Statistični podaci za procijenjenu snagu	58
Tablica 14. Statistički podaci za procijenjenu energiju	60
Tablica 15. Snaga vjetroagregata u srpnju	61
Tablica 16. Energija vjetroagregata u srpnju	61
Tablica 17. Snaga vjetroagregata u kolovozu.....	61
Tablica 18. Energija vjetroagregata u kolovozu.....	62
Tablica 19. Snaga vjetroagregata u rujnu.....	62
Tablica 20. Energija vjetroagregata u rujnu.....	62
Tablica 21. Snaga vjetroagregata u listopadu	62
Tablica 22. Energija vjetroagregata u listopadu.....	63
Tablica 23. Snaga vjetroagregata u studenome	63
Tablica 24. Energija vjetroagregata u studenome	63
Tablica 25. Rezultati testova programom EasyFit	66
Tablica 26. Karakteristike temperaturnog senzora NRG 110S	77
Tablica 27. Karakteristike higrometra RH-5.....	79
Tablica 28. Karakteristike anemometra NRG #40	86
Tablica 29. Karakteristike vertikalnog anemometra RM Young 27106-T.....	87
Tablica 30. Karakteristike pokazatelja smjera vjetra NRG #220P	89
Tablica 31. Karakteristike vjetroagregata Rutland 503.....	90

Dodatak 1. Opis instaliranog vjetroagregata i mjerne opreme

Da bi mogli procijeniti pogodnost pojedine lokacije za izgradnju vjetroelektrane, nužno je imati precizna mjerenja brzine i smjera vjetra. Osim brzine i smjera vjetra potrebno je mjeriti i ostale klimatološke elemente koji su važni u procjeni potencijalne lokacije kao što su temperatura i vlažnost zraka jer i o njima ovisi snaga koju je moguće dobiti iz vjetra. Na točnost procjene lokacije bitno utječe točnost meteoroloških parametara te je zbog toga potrebno da su senzori kojima se oni mjere što točniji.

U nastavku ovog poglavlja bit će opisani korišteni senzori koji su instalirani zajedno s malim vjetroagregatom na neboderu FER-a: senzori temperature, vlage, horizontalne i vertikalne brzine vjetra i senzor smjera vjetra.

Senzor temperature

Temperatura je fizikalna veličina koja pokazuje stupanj zagrijanosti neke tvari te ovisi o tome koliko energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka. Jedinica za mjerenje i izražavanje temperature u SI sustavu je Kelvin (K), dok se u Europi temperatura uobičajeno izražava u Celzijevim stupnjevima (°C). Veza između te dvije jedinice je $T(K)=273,15 + t(^{\circ}C)$. U meteorologiji se najčešće mjeri temperatura zraka, obično na visini od 2 metra iznad tla kako bi postojala cirkulacija zraka. U našem slučaju temperatura se mjeri na vrhu nebodera (oko 50 metara visine). Instrument za mjerenje temperature mora biti u hladovini, dakle zaklonjen od izravnog sunčevog zračenja, te ne smije biti izložen izravnom utjecaju vjetra. Postoji i poseban minimalni termometar koji se postavlja na visinu od 5 cm iznad tla i koji mjeri iznos minimalne temperature koja se očitava ujutro. Takav termometar nije potreban u ovom slučaju jer nas zanima samo temperatura na lokaciji instalacije vjetroagregata.

Varijacije temperature, kao što je pokazano u poglavlju 2 (slika 3, tablica 1), najviše utječu na gustoću zraka, a samim time i na snagu vjetra.

Za mjerenje temperature mogu se koristiti otpornički senzori (RTD), termistori ili termoparovi [9]. Kod otporničkih senzora koristi se promjena otpora metala, koja je ovisna o temperaturi. Konstantna struja prolazi kroz otpornički senzor i stvara pad napona koji je ovisan o otporu, a time i o temperaturi. Termistori su temperaturno osjetljivi otpornici kojima se električni otpor mijenja ovisno o temperaturi. Postoje dvije vrste termistora: NTC (negative temperature coefficient) termistori koji služe za mjerenje temperature i PTC (positive temperature coefficient) termistori koji se koriste u zaštitnim sklopovima. Kod NTC termistora otpor opada s porastom temperature. Termoparovi su senzori koji se sastoje od dvije žice od različitih metala koje su spojene na jednom kraju. Princip rada termopara zasniva se na termoelektričnom efektu, tj. do pojave napona pri izlaganju metala temperaturnom gradijentu. Ovisno o kombinaciji metala mijenja se točnost mjerenja, njihova stabilnost, kao i troškovi.

Na neboderu FER-a instaliran je senzor temperature NRG 110S (slika 46) [10]. Njegove glavne karakteristike su niska cijena, izdržljivi integrirani strujni senzor temperature koji pruža visoki raspon napona na svom izlazu i jednostavna montaža (tablica 26).

Senzor uključuje interno obavještanje, pojačala i linearizaciju. Senzor se nalazi u posebnom kućištu tanjurastog oblika izrađenog od UV stabilnog materijala, a funkcija mu je zaštita od direktnog sunčevog zračenja. Idealan je za prikupljanje podataka o temperaturi za proračun gustoće energije te praćenje temperature na udaljenim mjestima.



Slika 46. Temperaturni senzor NRG 110S

Tablica 26. Karakteristike temperaturnog senzora NRG 110S

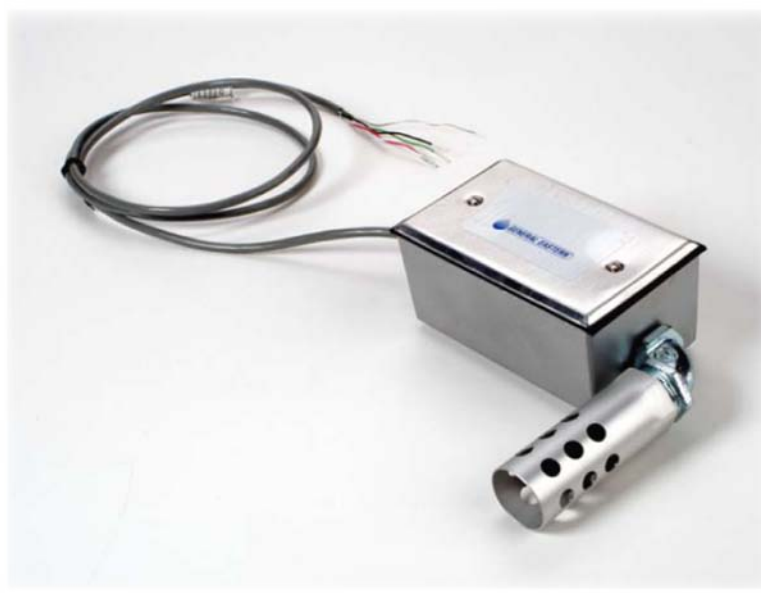
Opis	Tip senzora	Integrirani strujni senzor temperature sa zaštitnim kućištem
	Aplikacije	Procjena izvora vjetra Meterološke studije Ekološka kontrola
	Raspon mjerenja	-40 °C – 52.5 °C
	Kompatibilnost	NRG loggeri
Izlazni signal	Vrsta signala	Linijski analogni napon
	Prijenosna funkcija	[Temp = (napon x 55.55) – 86.38 °C]
	Preciznost	Nagib +/- 0.8 °C max Nelinearnost +/- 0.33 °C max Uk. pogreška +/- 1.1 °C max
	Električna vremenska konstanta	250 µs
	Područje izlaznog signala	0 V – 2.5 V DC
Karakteristika odziva	Toplinska vremenska konstanta	10 min
Napajanje	Napon	4 V – 35 V DC
	Struja	300 µA max (bez tereta na izlazu)
Postavljanje	Montaža	Ručna na stup
	Potrebni alati	8 mm odvijač Kliješta za metal
Okolina	Raspon radne temperature	-40 °C – 52.5 °C
	Radno područje vlažnosti senzora	0 – 100% RH
	Životni vijek	10 godina +
Fizički opis	Povezivost	Oznaka žica: Signal (bijela žica) Uzemljenje (crna žica) Pobuda (crvena žica) Uzemljenje zaštite od zračenja
	Duljina kabela	5 m
	Težina	0.47 kg
	Dimenzije	Senzor: 30.5 mm visina x 12.7 mm promjer Senzor sa zaštitom od zračenja: 127 mm promjer x 127 mm visina
Materijal	Kabel	3 vodiča 22 AWG, kromirani PVC omot
	Sonda	Aluminij
	Zaštita	Termoplastični (UV stabilni) štiti od direktnog zračenja

Higrometar

Higrometar je uređaj za mjerenje vlažnosti zraka. Vlažnost zraka iskazuje se na nekoliko načina, a najčešće je to relativna vlažnost. Relativna vlažnost zraka na određenoj temperaturi jednaka je omjeru tlaka vodene pare i tlaka zasićene vodene pare na toj temperaturi.

Jedan od načina kako izmjeriti vlagu zraka jest pomoću kapacitivnog senzora (higrometra). Sastoji se od podloge na kojoj je tanki film polimera ili metalnog oksida koja se nalazi između dvije vodljive elektrode. Osjetilna površina obložena je poroznim materijalom kako bi se zaštitila od onečišćenja i izlaganja kondenzaciji. Podloga je obično od stakla, keramike ili silicija. Sloj polimera je dielektrik koji apsorbira molekule vode iz zraka, pri čemu se bitno mijenjaju dielektrična svojstva, a time i kapacitet. Dakle, vrijedi da je kapacitet proporcionalan relativnoj vlažnosti. Ovi senzori vlažnosti imaju raspon mjerenja od 1 do 100% s rezolucijom od $\pm 3\%$ [9]. Senzor za mjerenje vlage treba biti smješten odmah pokraj termometara kako bi se osigurala korelacija između očitavanja relativne vlažnosti i temperature.

Za mjerenje vlažnosti zraka odabran je higrometar RH-5 (slika 47) [10] s kontinuiranim mjerenjem relativne vlažnosti. Taj uređaj koristi polimerni otporni senzor koji omogućuje izvrsnu linearnost i osjetljivost uz brzi odziv i dugoročnu stabilnost. Montira se sa donje strane kutije i uključuje 1.5 m kabela.



Slika 47. Higrometar RH-5

Glavne karakteristike uređaja dane su u tablici 27.

Tablica 27. Karakteristike higrometra RH-5

Opis	Vrsta senzora	Polimerni otporni senzor vlage
	Primjene	<ul style="list-style-type: none"> • procjena izvora vjetra • meteorologijske studije • praćenje utjecaja na okoliš
	Raspon senzora	5 – 95 % relativne vlažnosti
	Kompatibilnost	Symphonie s RH5 SCM + iPack
Izlazni signal	Vrsta signala	Linearni analogni napon
	Prijenosna funkcija	% RH = napon x 20
	Preciznost	+/- 5 % RH u rasponu 5 – 95 % RH (pri 25 °C)
	Raspon izlaznog signala	0 – 5 V za 0 – 100 % RH uz otpor tereta >10 kΩ
Napajanje	Napon	10 – 36 V DC, 12 V pri 1.2 mA
Postavljanje	Montaža	Pomoću vijaka
	Alat	<ul style="list-style-type: none"> • odvijač • ključ od 9 mm
Okolina	Radna temperatura	- 40 °C – 54 °C
	Relativna vlažnost	0 – 95 % RH
Vanjski izgled	Spojevi	Trožilni oklopljeni kabel: <ul style="list-style-type: none"> • crvena: napajanje • crna: uzemljenje • bijela: izlazni signal
	Duljina kabela	1.5 m
	Težina	0.68 kg
	Dimenzije	115 mm x 102 mm x 80 mm
Materijal	Kabel	Trožilni 22 AWG
	Kućište	Lijevani aluminij i nehrđajući čelik

Anemometar

Funkcija anemometra je mjerenje nekoliko ili svih komponenata vektora vjetra. Vjetar je horizontalno strujanje zraka koje nastaje zbog nejednakosti tlaka u zemljinoj atmosferi. Određen je brzinom i smjerom. U meteorologiji službena jedinica za brzinu vjetra je m/s, dok je smjer određen engleskim kraticama strana svijeta (N, E, S, W i ostale međupodjele).

Idealni senzor za mjerenje brzine vjetra trebao bi zadovoljavati naredne kriterije:

- reagirati na najmanji povjetarac i na najjače vjetrove
- imati linearni izlaz
- trenutno reagirati na sve turbulentne fluktuacije

Naravno da u stvarnosti senzori ne mogu reagirati na vjetrove male snage niti izdržati jake vjetrove. Potrebno je odabrati senzor koji zadovoljava sve uvjete koji su pred njega postavljeni. Budući da se ovaj rad bavi procjenom energije vjetra, veoma je važna preciznost anemometra. Energija vjetra ovisi o trećoj potenciji brzine pa bi u slučaju da primjerice imamo pogrešku u mjerenju brzine vjetra od 3% to bi uzrokovalo pogrešku u izračunu energije od 9% [7].

Mjerenje vjetra u meteorologiji vrši se na visini od 10 metara iznad tla kako bi se izbjegli negativni utjecaji od miješanja vjetra pri samom tlu uzrokovani od raznih faktora. U našem slučaju brzina vjetra mjeri se na visini instalacije vjetroatagregata (otprilike 50 m visine) zbog što točnijeg mjerenja.

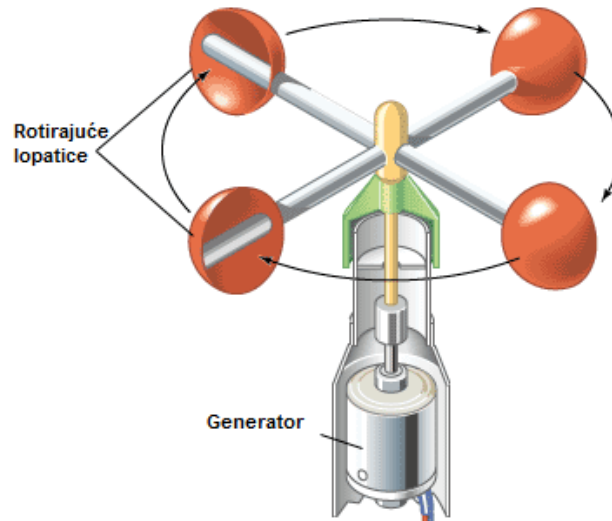
Za pouzdan rad anemometra potrebna je periodična kalibracija uređaja. Kalibracija se radi u idealnim uvjetima u odnosu na referentni anemometar koji se smatra standardom. Kvaliteta mjerene brzine vjetra anemometra ovisit će o karakteristikama instrumenta kao što su točnost, osjetljivost, rezolucija, brzina odziva, pogreške, pouzdanost i ponovljivost rezultata.

Točnost predstavlja stupanj do kojeg anemometar precizno mjeri brzinu vjetra. Tipični anemometri s lopaticama imaju točnost od ± 0.3 m/s ili bolju. Rezolucije je najmanja promjena brzine vjetra koju anemometar može detektirati, a osjetljivost je odnos između izlaznog i ulaznog signala. Pogreška je odstupanje mjerene brzine od stvarne brzine. Brzina odziva pokazuje koliko brzo anemometar može detektirati promjene brzine vjetra. Pouzdanost prikazuje vjerojatnost da će anemometar uspješno raditi unutar zadanog raspona mjerenja. Ponovljivost rezultata pokazuje koliko su blizu rezultati mjerenja anemometra u slučaju ponovljenih mjerenja u identičnim uvjetima.

Postoji više različitih vrsta anemometara: anemometri s lopaticama (ili propelerom), ultrazvučni anemometri, laser doppler anemometri, anemometri s ugrijanom žicom i tlačni anemometri. U nastavku su ukratko opisane glavne značajke tih uređaja.

Anemometar s lopaticama

Za mjerenje brzine vjetra uobičajeno se koriste anemometri s lopaticama (najčešće u obliku šalice). Anemometri s lopaticama jeftiniji su u odnosu na druge vrste anemometara i mogu biti vrlo robusni. Sastoje se od 3 ili 4 lopatice koje su smještene vertikalno na horizontalne nosače. Horizontalni nosači smješteni su na zajedničku osovinu koja se okreće zajedno s lopaticama (slika 48).



Slika 48. Anemometar s lopaticama

Umjesto lopatica anemometar može imati propeler, iako to nije tako česti slučaj. Osovina je spojena na električni pretvornik koji proizvodi električni izlazni izmjenični signal čiji je napon ili frekvencija proporcionalan brzini vjetra. Još jedan od načina mjerenja brzine vjetra je preko optičkog pretvornika tako da se stvaraju impulsi svaki put kad rotirajući krug prekine zraku svjetlosti. U slučaju da se generiraju impulsi srednja brzina vjetra izračuna se na osnovu poznavanja broja impulsa u određenom vremenskom intervalu.

Iako su anemometri s lopaticama vrlo pouzdani, imaju i određena ograničenja. Kako se povećava jačina vjetra tako i anemometri ubrzavaju, ali brzina kojom usporavaju ne može dobro pratiti slabljenje vjetra (imaju spori odziv). Upravo zbog sporog odziva anemometri s lopaticama nisu pouzdani u mjerenju jakih i promjenjivih udara vjetra. Također, zbog pokretnih dijelova anemometri s lopaticama imaju ograničenja u primjeni u hladnim područjima zbog mogućeg zaleđivanja. Da bi se izbjegao taj problem rade se anemometri s posebnim grijačima koji sprečavaju zaleđivanje.

Ultrazvučni anemometar

Ultrazvučni anemometri (slika 49) koriste ultrazvučne valove za mjerenje brzine i smjera vjetra. Brzina vjetra određuje se tako da se mjeri vrijeme koje je potrebno ultrazvučnom impulsu da prođe put između fiksnog odašiljača i fiksnog prijelnika. Brzina vjetra će povećati ili smanjiti brzinu zvuka ovisno o tome u kojem smjeru vjetar puše. Određuje se komponenta brzine vjetra na tom putu.

Ultrazvučni anemometri pogodni su za mjerenje brzine vjetra u rasponu od 0 do 65 m/s. Kako nemaju pomične dijelove pogodni su za dugoročnu upotrebu u udaljenim automatiziranim stanicama i tamo gdje na točnost i pouzdanost tradicionalnih anemometara s lopaticama utječe slani zrak ili velike količine prašine. Vremenska rezolucija mjerenja je vrlo mala (20 Hz i manje) pa je ultrazvučni anemometar pogodan za mjerenje turbulentnih strujanja.

Neki od nedostataka su im skupoća, vlastita konstrukcija koja remeti idealni protok zraka i gubitak signala za vrijeme jake kiše ili snijega (kapljice vode ili snježne pahulje ometaju prolazak zvučnih valova). Budući da brzina zvuka ovisi o temperaturi, a gotovo je konstantna s obzirom na promjenu tlaka zraka, ultrazvučni anemometar može se koristiti i kao termometar.



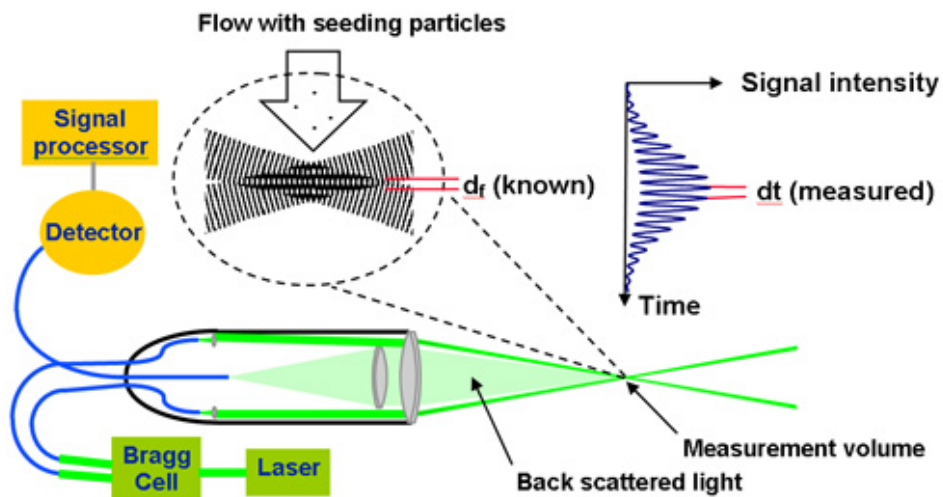
Slika 49. Ultrazvučni anemometar

Laser doppler anemometar

Laser doppler anemometar sastoji se od lasera i optičkog sustava (slika 50) [12]. Rad ove vrste anemometra temelji se raspršenju laserske svjetlosti na

molekulama zraka. Optika se koristi da bi se dvije laserske zrake dovele u točku za mjerenje gdje se one križaju. Mjerni volumen koji nastaje križanjem te dvije zrake ima oblik elipsoida. Tamo gdje se zrake križaju nastaju ravnine visokog intenziteta svjetlosti i između njih ravnine niskog intenziteta koje su okomite na ravninu laserske zrake. Prostor između ravnina je određen postavljenim optičkim parametrima: valnom duljinom optičkog svjetla i kutom između zraka. Protok je prepun malih čestica.

Prolaskom kroz mjerni volumen čestice raspršuju lasersku svjetlost prema Lorenz-Mie-Debyevoj teoriji raspršenja [11]. Intenzitet fluktuacija raspršene svjetlosti ovisi o brzini čestica. Vrijeme dt može se relativno lako izmjeriti i tada je vrlo lako izračunati brzinu čestica dijeljenjem prijeđenog puta df i vremena dt .



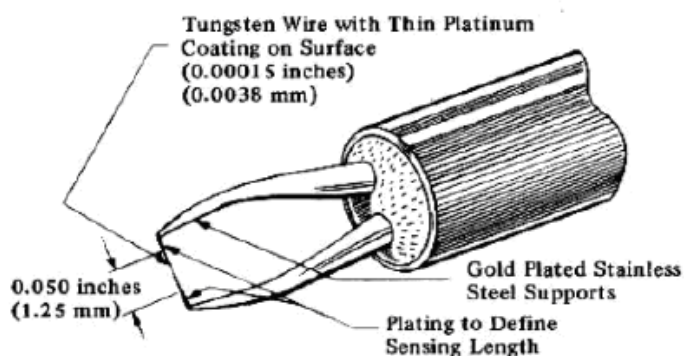
Slika 50. Princip rada laser doppler anemometra

Anemometar s ugrijanom žicom

Anemometri s ugrijanom žicom (eng. hot-wire anemometer) mjere brzinu vjeta tako da opažaju odvođenje topline zbog gibanja zraka.

Glavni dio ovih senzora je ugrijana žica kojoj se mijenja otpor zbog odvođenja topline, koja je u ovisnosti o brzini vjeta kojemu je žica izložena. Žica se grije zbog prolaska struje. Ako se pretpostavi da je žica u temperaturnoj ravnoteži s okolinom, tada je energija potrebna da bi se ugrijala žica jednaka energiji koja se gubi zbog odvođenja topline konvekcijom.

Anemometri s ugrijanom žicom imaju najveću brzinu odziva od svih tipova anemometara i zato se najčešće koriste za mjerenje turbulentnih strujanja. Također se koriste za mjerenje svih brzih fluktuacija brzine vjetra. Umjesto ugrijane žice često se koristi i metalni film. Izgled anemometra s ugrijanom žicom odnosno metal filmom prikazan je na slici 51 [9].



Slika 51. Izgled anemometra s ugrijanom žicom

Anemometar s ugrijanom žicom mora zadovoljavati sljedeće dvije karakteristike: imati veliki temperaturni koeficijent otpora i imati takav električni otpor koji može biti jednostavno zagrijan električnom strujom.

Kod anemometara s ugrijanom žicom, žica je pričvršćena za dva držača malih dimenzija kako ne bi znatnije utjecali na brzinu strujanja na mjestu na kojem je postavljen anemometar. Žica je najčešće izrađena od volframa presvučenog slojem platine zbog otpornosti na oksidaciju i dobrog temperaturnog koeficijenta. Dimenzije žice su od 4-10 μm u promjeru i 1mm u duljinu. Zbog svojih malih dimenzija su krhke i zbog toga pogodne samo za mjerenje strujanja čistih plinova.

Za onečišćene plinove i fluide koristi se metalni film koji je premazan na kvarcnu ili keramičku podlogu zbog manje osjetljivosti na nakupljanje neželjenog materijala i lakšeg čišćenja.

Da bi zagrijali žicu na odgovarajuću temperaturu koriste se različite metode zagrijavanja i postizanja određene temperature, stoga po načinu rada razlikujemo dvije metode: s konstantnom strujom i korištenjem konstantne temperature.

Tlačni anemometri

Tlačni anemometri mjere tlak vjetra koji je ovisan o brzini vjetra. Dvije su osnovne izvedbe tog tipa anemometra: anemometri s pločom i cijevni anemometri.

Anemometar s pločom najstarija je vrsta anemometra. Sastoje se od vertikalne ploče obješene na nosaču. Kako vjetar puše ploča se pomiče. Pomak ploče proporcionalan je brzini vjetra. Anemometar s pločom ne reagira na male brzine vjetra i ima dosta spor odziv na turbulentna strujanja.

Cijevni anemometar sastoji se od dvije cijevi. Jedna je paralelna u odnosu na smjer strujanja vjetra, a druga je okomita. Strujanje zraka kroz horizontalnu cijev uzrokuje povećanje tlaka u odnosu na atmosferski tlak, a strujanje zraka preko otvora okomite cijevi uzrokuje pad tlaka u odnosu na atmosferski tlak. Mjerenjem razlike tlakova pomoću manometra i korištenjem Bernoullijeve jednadžbe može se odrediti brzina vjetra. Najveća prednost ovakvog anemometra je nepostojanje pomičnih dijelova i mala potreba za održavanjem.

Opis instaliranog anemometra

Odabrani anemometar NRG #40 (slika 52) [10] pripada u skupinu anemometara s lopaticama. Glavne karakteristike anemometra (tablica 28) su mali inercijski moment i jedinstven ležaj koji dozvoljava vrlo brze odzive na nagle promjene brzine vjetra.

Rad anemometra temelji se na Hallovu efektu (četveropolni magnet inducira sinusni napon u zavojnici proizvodeći tako izlazni signal frekvencije proporcionalne brzini vjetra). Za rad uređaja potrebna je struja iznosa 5 mA za stvaranje uzbudnog istosmjernog napona u rasponu 5 – 24 V. Prijemni dio se sastoji od tri lopatice (šuplje limene polukugle) postavljene na zajedničku osovinu.



Slika 52. Anemometar NRG #40

Tablica 28. Karakteristike anemometra NRG #40

Opis	Tip senzora	Anemometar s tri lopatice
	Aplikacije	Procjena izvora vjetra Meterološke studije Ekološka kontrola
	Raspon mjerenja	1 m/s – 96 m/s
	Kompatibilnost	Kontroleri ili loggeri kojima je potreban pravokutni valni signal
Izlazni signal	Vrsta signala	Pravokutni valni signal iz otvorenog kolektora tranzistora Frekvencija proporcionalna brzini vjetra
	Prijenosna funkcija	[m/s = (Hz x 0.765) + 0.35]
	Točnost	Unutar 0.1 m/s za raspon brzina između 5 m/s i 25 m/s
	Preporučeni otpor tereta	Izlazi do 20 mA Tipični pritezni otpornik od 3300 Ω za 24 V Minimalni pritezni otpornik od 250 Ω za 5 V
	Kalibracija	Dostupna kalibracijska verzija
	Raspon izlaznog signala	0 Hz – 125 Hz
Napajanje	Napon	5 V – 24 V DC
	Struja	9 mA max
Odzivne karakteristike	Prag	0.78 m/s
	Distantna konstanta	3.0 m
	Moment inercije	7.32×10^{-8}
	Radni promjer rotora	190 mm
Postavljanje	Montaža	Na stup promjera 13 mm
	Potrebni alati	Električna vrpca, petrolejski žele
Okolina	Raspon radne temperature	-55°C – 60 °C
	Raspon radne vlažnosti	0 – 100% RH
	Veze	4 - 40 mjedenih heksagonalnih matica
	Težina	0.14 kg
	Dimenzije	Tri polukugle stožastog presjeka, 51 mm promjer Ukupna visina montaže 81 mm
Materijali	Polukugle	Jednodjelni lijevani crni polikarbonat
	Tijelo	Kućište od crne ABS plastike
	Osovina	Berilij – bakar, potpuno učvršćen
	Ležaj	Modificirani teflon , samopodmazujući
	Priključna kapica	Zaštitna PVC priključna kapica uključena
	Terminali	Mjed

Vertikalni anemometar

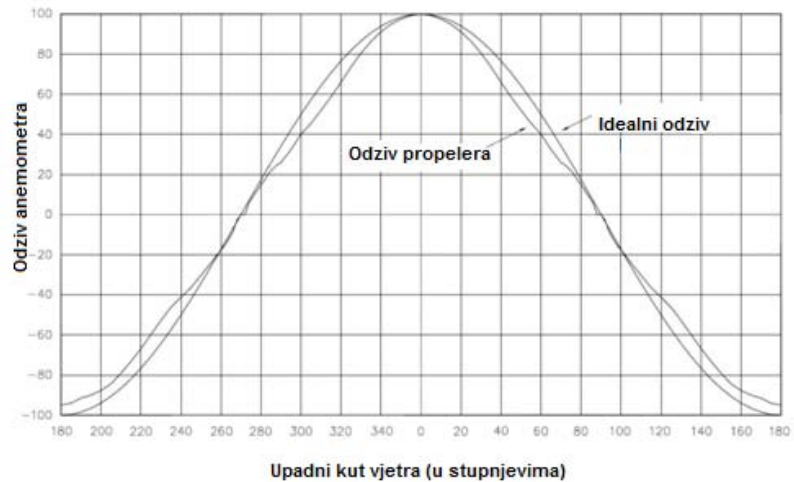
Vertikalni anemometar RM Young 27106-T precizni je anemometar propelerskog tipa s četiri elise niskog praga odziva.

Anemometar registrira brzinu vjetra koji je paralelna s njegovom osi vrtnje. Sa smjerom vjetra koji je okomit na os vrtnje propeler se ne rotira (slika 53) [10]. Za ostale smjerove vjetra odzivna karakteristika propelera prati kosinusnu krivulju.

Osim vertikalne montaže i mjerenja vertikalne brzine vjetra, anemometar se može postaviti i horizontalno i tako mjeriti horizontalnu brzinu vjetra. S obzirom na to da anemometar očitava i pozitivne i negativne brzine vjetra, obično se uređaj spaja tako da pozitivni signal odgovara smjeru vjetra prema gore, a negativni označava smjer prema dolje. To je potrebno provjeriti jer polariteti mogu biti spojeni i suprotno. Glavne karakteristike uređaja dane su u tablici 29.

Tablica 29. Karakteristike vertikalnog anemometra RM Young 27106-T

Opis	Vrsta senzora	Propelerski anemometar s četiri elise
	Aplikacije	Mjerenje vertikalne komponente brzine vjetra, ovisno o orijentaciji može mjeriti sve smjerove vjetra
	Raspon senzora	0.5 m/s – 40 m/s
	Kompatibilnost	NRG Symphonie bilježnik podataka (sa SCM vertikalnim anemometrom)
Izlazni signal	Vrsta signala	Napon u mV
	Prijenosna funkcija	[m/s = 0.01800 x mV]
	Preciznost	+/- 1 %
	Preporučeni otpor tereta	>10 kΩ
	Raspon izlaznog signala	+/- 2250 mV
Odzivna karakteristika	Radni promjer	200 mm
Postavljanje	Montaža	<ul style="list-style-type: none"> – žičani konektor na 1.905 cm cijevnom stupu – montiranje senzora za žičani konektor
Vanjski izgled	Spojevi	<ul style="list-style-type: none"> – kabeli se leme za konektor – senzori se utiču u žičani konektor



Slika 53. Vertikalni anemometar RM Young 27106-T i odziv na različite smjerove vjetra

Pokazatelj smjera vjetra

Pokazatelji smjera vjetra najčešće se sastoje od plastičnog krila koje je na suprotnoj strani balansirano težinom malog utega. Uređaj zahtijeva minimalnu silu da bi se aktivirao, a koja uobičajeno odgovara brzini vjetra od otprilike 1 m/s.

Izlazni signal se dobiva pomoću potenciometra ili zatvaranjem kontakta. Potenciometar osigurava bolju preciznost, ali je i nešto skuplji.

Odabrani uređaj NRG #200P je potenciometarskog tipa (Slika 54) [10]. Istosmjerni napon uzbude narine se na potenciometar, a proizvedeni izlazni signal je analogni napon proporcionalan kutu azimuta. Termoplastična komponenta i komponenta od nehrđajućeg čelika otporne su na koroziju i nagle udare vjetra.



Slika 54. Pokazatelj smjera vjetra NRG #220P

Karakteristike uređaja navedene su u tablici 30.

Tablica 30. Karakteristike pokazatelja smjera vjetra NRG #220P

Opis	Vrsta senzora	Potenciometarski pokazatelj smjera vjetra s kontinuiranom rotacijom
	Aplikacije	procjena izvora vjetra meteorologijske studije praćenje utjecaja na okoliš
	Raspon senzora	360° mehanički, kontinuirana rotacija
	Kompatibilnost	Svi NRG uređaji za bilježenje podataka
Izlazni signal	Vrsta signala	Analogni istosmjerni napon iz konduktivnog plastičnog potenciometra, 10 kΩ
	Prijenosna funkcija	Izlazni signal je napon razmjern narinutom ulaznom naponu
	Preciznost	Potenciometarska linearnost unutar 1 %
	Mrtvi pojas	8° maksimalno, 4° uobičajeno
	Raspon izlaznog signala	0 V do uzbudnog napona (isključujući mrtvi pojas)
Napajanje	Narinuti napon	Regulirana potenciometarska uzbuda od 1 – 15 V istosmjerno
Odzivna karakteristika	Prag	1 m/s
Postavljanje	Montaža	Na stup promjera 13 mm sa zapornom iglom i setom vijaka
	Alati	Električna vrpca, petrolejski žele, 6.25 mm matice
Okolina	Radna temperatura	-55 °C - +60 °C
	Relativna vlažnost	0 do 100 %
	Životni vijek	50 milijuna revolucija (2-6 godina normalnog pogona)
Vanjski izgled	Spojevi	4 – 40 mjedenih heksagonalnih zakovica
	Težina	0.14 kg
	Dimenzije	21 cm duljine x 12 cm visine 27 cm radni promjer
Materijali	Tijelo	Crna UV stabilizirana antistatička plastika
	Osovina	Nehrđajući čelik
	Ležaj	Nehrđajući čelik
	Krilo	Crna UV stabilizirana lijevana plastika
	Priključna kapica	PVC
	Zakovice	mjed

Vjetroagregat Rutland 503

Iako je inicijalno trebao biti instaliran vjetroagregat veće snage (Artas AV500 snage 500 W), na lokaciju je instaliran manji vjetroagregat Rutland 503 nazivne snage 20 W.

Vjetroagregat Rutland 503 izveden je prvenstveno za instalaciju na plovilima za punjenje baterijskih blokova kapaciteta do 100 Ah, ali se primjenjuje i za instalaciju na kopnu. Rutland proizvodi sve dijelove turbine uključujući specijalni patentirani generator. Zahvaljujući generatoru bez željezne jezgre u statoru, ove turbine postižu rad pri najmanjim brzinama vjetra na tržištu, a zbog efekta zamašnjaka, premošćuju se promjene brzine vjetra i postiže kontinuirana proizvodnja električne energije. Turbina se sastoji od 6 lopatica sa zaštitnim prstenom.

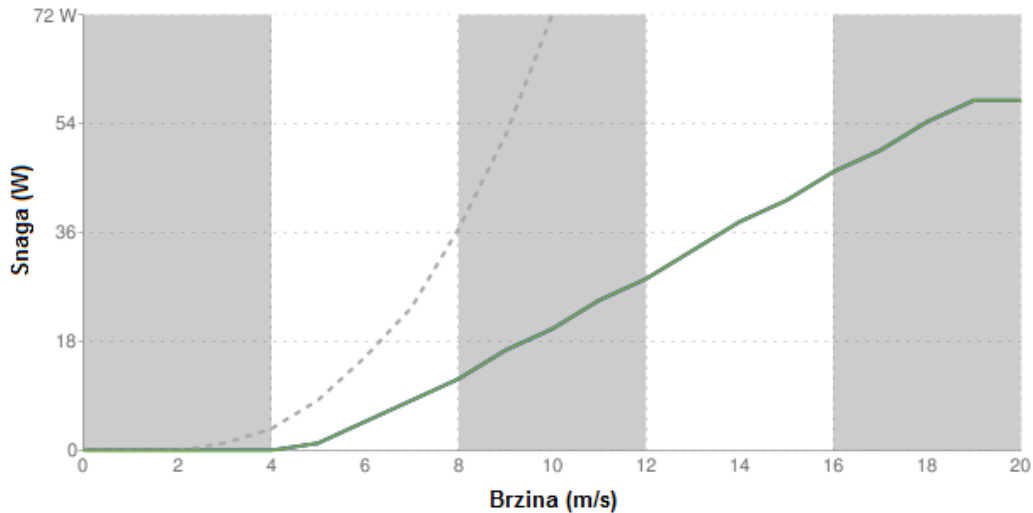
Iako nazivna snaga vjetroagregata iznosi 20 W, vjetroagregat može generirati snagu do tri puta veću od nazivne. Tako vjetroagregat proizvodi do maksimalnih 60 W na većim brzinama vjetra (>25 m/s). Tablica 31 [13] daje glavne karakteristike vjetroagregata Rutland 503.

Tablica 31. Karakteristike vjetroagregata Rutland 503

Nazivna snaga	20 W
Maksimalna snaga	60 W
Brzina vjetra za nazivnu snagu	10 m/s
Nazivni napon	12 V
Masa	3.5 kg
Promjer elise	0.51 m
Broj krakova	6
Materijal elise	UV stabilni fiberglass
Zaštita od prebrzog okretanja	Električna
Tip generatora	Trofazni generator bez četkica
Vrsta magneta	Neodimijski magneti - NdFeB
Materijal tijela generatora	Aluminij
Regulator punjenja	Nema
Preporučeni kabel	Vodič presjeka 2.5 mm ² za dužine do 20 m
Promjer cijevi za montažu	Unutarnji promjer: 31.7 mm (1.25") Vanjski promjer: 38 mm (1.5")

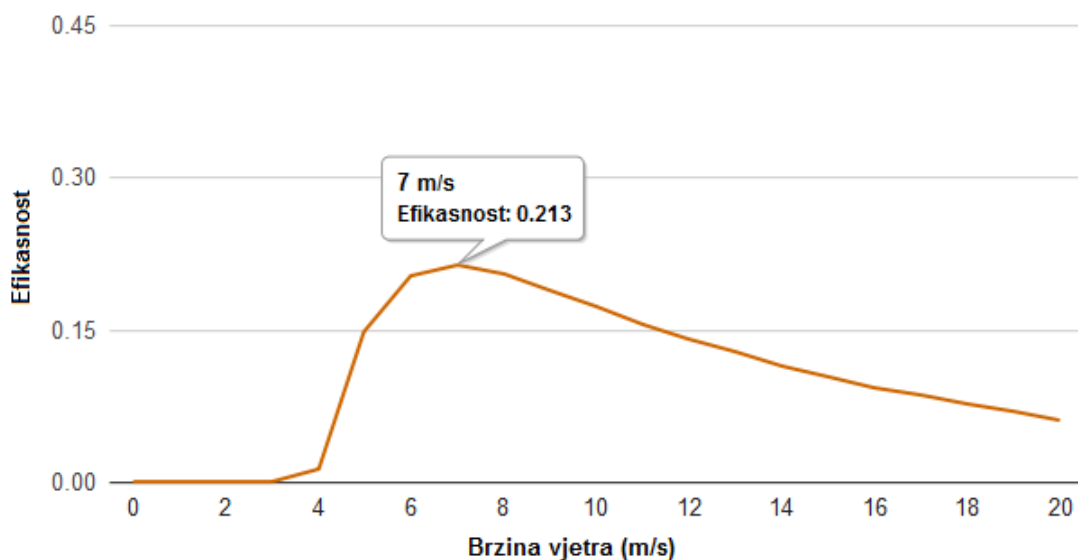
Na slici 55 prikazana je krivulja snage za Rutland 503 prema podacima proizvođača [13]. Krivulja snage prikazuje ovisnost snage turbine o brzini $P(v)$ za

svaku brzinu vjetra. Crtkana linija prikazuje idealnu krivulju snage za $c_p = c_{p\text{ Betz}} = 0.59259$. Brzina uključenja (eng. cut in speed) je oko 4 m/s. Inače, tipična brzina uključenja vjetroagregata iznosi od 3 do 5 m/s.



Slika 55. Krivulja snage za Rutland 503

Efikasnost turbine dana je slikom 56 [13]. Može se uočiti da je najveća efikasnost turbine pri brzini od 7 m/s i iznosi 21.3%.



Slika 56. Efikasnost turbine u ovisnosti o brzini vjetra

Dodatak 2. Matlab kod korišten u radu

%% Unos podataka

```
% Unos podataka iz .txt datoteke pomoću funkcije dataset.Glavna
% prednost ove funkcije je u mogućnosti zadržavanja svih
% informacija na jednom mjestu (i tekstualnih i numeričkih). To
% osigurava bolje raspolaganje podacima i jednostavniju
% organizaciju (ali troši i dosta memorijskih resursa)
% Drugi načini unosa podataka koristeći Import Wizard,
% File->Import Data ... ili naredbom load, B=load('vjetar.txt')
```

```
wind=dataset('file','vjetar.txt','delimiter','');
```

```
%% Pretvorba mjerenih podataka u stvarne fizikalne veličine
```

```
% Napon (V)
```

```
wind.U=(wind.U/1023*10)*2;
```

```
% Struja (mA)
```

```
wind.I=((wind.I/1023*10) - 2.5) * 200/5 / 0.05;
```

```
% Korekcija pogrešnih vrijednosti
```

```
for i=1:size(wind.I, 1)
```

```
    if wind.I(i)==-2000
```

```
        wind.I(i)=0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
% Temperatura
```

```
% Provjera na greške u mjerenju temperature (slučajevi kad je
% izlazna vrijednost napona jednaka 0 što bi odgovaralo
% temperaturi od -86.38) i zamjena tih podataka interpoliranim
% podacima
```

```
for i=2:(size(wind.Temp,1)-1)
```

```
    if wind.Temp(i)==0
```

```
        if(wind.Temp(i-1)~=0) && (wind.Temp(i+1)~=0)
```

```
            wind.Temp(i)=(wind.Temp(i-1)+wind.Temp(i+1))/2;
```

```
        else
```

```
            wind.Temp(i)=mean(wind.Temp)+std(wind.Temp)*rand;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if wind.Temp(1)==0
```

```
    wind.Temp(1)=mean(wind.Temp)+std(wind.Temp)*rand;
```

```
end
```

```
if wind.Temp(size(wind.Temp, 1))==0
```

```
    wind.Temp(size(wind.Temp,
```

```
1))=mean(wind.Temp)+std(wind.Temp)*rand;
```

```
end
```

```
% Pretvorba temperature u stupnjeve
```

```
wind.Temp=(wind.Temp/1023. * 10) * 55.55 - 86.38;
```

```

% Vlažnost zraka

% Isto kao i kod temperature izlazna vrijednost napona jednaka 0
% znači neku grešku u mjerenju jer je raspon osjetljivosti
% higrometra od 5% do 99%
% Te vrijednosti također interpoliramo

for i=2:(size(wind.RH,1)-1)
    if wind.RH(i)==0
        if(wind.RH(i-1)~=0) && (wind.RH(i+1)~=0)
            wind.RH(i)=(wind.RH(i-1)+wind.RH(i+1))/2;
        else
            wind.RH(i)=mean(wind.RH)+std(wind.RH)*rand;
        end
    end
end
if wind.RH(1)==0
    wind.RH(1)=mean(wind.RH)+std(wind.RH)*rand;
end
if wind.RH(size(wind.RH, 1))==0
    wind.RH(size(wind.RH, 1))=mean(wind.RH)+std(wind.RH)*rand;
end

% Pretvorba vlažnosti zraka u postotke
wind.RH=(wind.RH/1023*10)*20;

% Vertikalna brzina

% Početno alociranje memorije pomoću naredbe zeros radi
% efikasnijeg izvođenja for petlje
brzinavertikalna=zeros(size(wind.Vert_mV,1),1);

% Pretvorba izlaznih vrijednosti vertikalne brzine u m/s
for i=1:size(wind.Vert_mV, 1)

    a=(wind.Vert_V(i)/1023 * 10 - 2.5) * 20/5;
    if abs(a)<0.1
        brzinavertikalna(i)=((wind.Vert_mV(i)/1023*10)-
2.5)*0.2/5*1000*0.018;
    else
        brzinavertikalna(i)=((wind.Vert_V(i)/1023*10)-
2.5)*20/5*0.018;
    end

end

% Korekcija pogrešnih vrijednosti (za vrijednost 0 dobijemo
% pogrešni iznos brzine od -1.8 (zbog formule za pretvorbu))
for i=1:size(brzinavertikalna, 1)
    if brzinavertikalna(i)==-1.8
        brzinavertikalna(i)=0;
    end
end

% Smjer vjetra (u stupnjevima)

```

```

wind.Dir=wind.Dir/1023*360;

% Brzina horizontalna (m/s)

for i=1:size(wind.Speed, 1)
    if wind.Speed(i)>0
        wind.Speed(i)=(wind.Speed(i)*0.765)+0.35;
    else
        wind.Speed(i)=0;
    end
end

%% Prikaz podataka i obrada

% Brzina vjetra

% Desetominutni prosjeci brzine vjetra
vmin=reshape(wind.Speed, 60, []);
prosjek_10min=mean(vmin);
prosjek_10min=prosjek_10min';

% Standardna devijacija za desetominutne intervale brzine
dev=std(vmin);
dev=dev';

% Satni prosjeci brzine vjetra
vhr=reshape(wind.Speed, 360, []);
prosjek_satni=mean(vhr);
prosjek_satni=prosjek_satni';

% Prikaz brzine i histogram brzine na istoj slici (za histogram
% brzine u postotnom prikazu korištena skripta histf.m preuzeta s
% web stranice (Matlab Central File Exchange))
subplot(2,1,1)
plot(wind.Speed)
subplot(2,1,2)
histf(wind.Speed)
% Analogno i za prikaz ostalih brzina vjetra i pripadajućih
% histograma (desetominutnih i satnih)

% Prikaz sve tri brzine vjetra na jednoj slici jedna ispod druge
subplot(3,1,1);
plot(wind.Speed)
subplot(3,1,2);
plot(prosjek_10min, 'r')
subplot(3,1,3);
plot(prosjek_satni, 'm')

% Sve tri brzine na jednoj slici (vremenska skala u intervalima od
10 s)
plot(wind.Speed)
hold on
plot((1:size(prosjek_10min,1))*60,prosjek_10min, 'm')
plot((1:size(prosjek_satni,1))*360,prosjek_satni, 'y')

```

```

% Prikaz brzina u različitim vremenskim skalama
% Svi podaci, vremenska skala u satima
plot((1:size(wind.Speed,1))*10/3600,wind.Speed)
% Svi podaci, vremenska skala u danima
plot((1:size(wind.Speed,1))*10/86400,wind.Speed)

% Računanje intenziteta turbulencija (definira se kao
% desetominutna standardna devijacija brzine vjetra podijeljena
% desetominutnom srednjom brzinom)

turbulencija=zeros(size(dev, 1), 1);
for i=1:size(prosjek_10min, 1)
    turbulencija(i)=dev(i)/prosjek_10min(i);
end

% Grafički prikaz intenziteta turbulencija u ovisnosti o brzini
% vjetra
% Koristi se naredba scatter
scatter(prosjek_10min,turbulencija,40,'+', 'r')

% Snaga i energija vjetra
% Snaga (W) iz izmjerenih vrijednosti struje i napona
snaga=zeros(size(wind.U,1),1);
for i=1:size(wind.U,1)
    snaga(i)=wind.U(i)*wind.I(i)*0.001;
end

% Snaga iz krivulje snage VA (krivulja snage dobivena koristeći
% cftool)
ksnaga=zeros(size(wind.Speed,1),1);
for i=1:size(wind.Speed,1)
    if wind.Speed(i)<=4 % brzina uključenja (cut in speed)
        ksnaga(i)=0;
    else
        ksnaga(i)=(2.511e-6)*(wind.Speed(i))^6-
0.0001535*(wind.Speed(i))^5+0.003239*(wind.Speed(i))^4-
0.04085*(wind.Speed(i))^3+0.574*(wind.Speed(i))^2-
1.634*wind.Speed(i)+0.256;
    end
end

% Stvarno proizvedena energija (Ws)
energija=snaga*10;

% Energija (Ws) dobivena iz krivulje snage
energija_ks=ksnaga*10;

% Prikaz obje snage na jednoj slici
plot(ksnaga)
hold on
plot(snaga, 'r')

% Srednja gustoća snage vjetra
kub_brzine=zeros(size(wind.Speed,1),1);
for i=1:size(wind.Speed,1)

```

```

    kub_brzine(i)=(wind.Speed(i))^3;
end
N=size(wind.Speed,1);
gustoca_snage=(0.5*1.225*sum(kub_brzine))/N;

% Gornji proračun za snagu i energiju potrebno je ponoviti za
% usrednjene desetominutne i satne vrijednosti napona,
% struje i brzine

% Obrada ostalih podataka (struje, napona, vlage, temperature i
% vertikalne brzine) obavlja se na isti način kao i za brzinu
% (pretvorba u različite vremenske intervale naredbom reshape,
% različiti prikazi pomoći naredbi plot, subplot i sl)
% U nastavku su neki načini prikaza podataka koji nisu korišteni
% kod brzine

% Struja i napon na istoj slici s y osima lijevo i desno
plotyy((1:size(wind.U,1))*10)/86400,wind.U,((1:size(wind.I,1))*10
)/86400,wind.I) %vremenska skala u danima

% Struja i brzina na istoj slici s y osima lijevo i desno
plotyy((1:size(wind.Speed,1))*10)/86400,wind.Speed,((1:size(wind.
I,1))*10)/86400,wind.I) %vremenska skala u danima

% Smjer vjetra
% Ulazni podaci za ružu vjetrova uzimani su od 15. rujna do kraja
% studenoga (ispravni podaci)
% Za potrebe proračuna ruže vjetrova korišten je naredni
% programski kod wind_rose.m preuzet s Matlab Central File
% Exchange. Popravljen su neke manje greške u programu (kriva
% pretvorba stupnjeva u geografski smjer, problem s bojom pozadine
% prilikom snimanja slike i sl.). Također, komentari su prevedeni
% na hrvatski. Pomoću trial verzije komercijalnog programa za
% crtanje ruža vjetrova WindRosePRO dobiveni su isti rezultati kao
% i ovim kodom u Matlabu pa se program može smatrati ispravnim.

% kod za ružu vjetrova wind_rose.m
function varargout = wind_rose(D,F,varargin)
% Ruža vjetrova za smjer i intenzitet
%
% Sintaksa:
%   [HANDLES,DATA] = WIND_ROSE(D,I,VARARGIN)
%
% Ulazni podaci za proračun:
%   D   Smjer vjetra (u stupnjevima)
%   I   Brzina vjetra
%   VARARGIN:
%   -dtype, vrsta podataka za smjer D, standard ili meteo
%   (meteorološki podaci prema standardnom kompasu 0°
%   označava sjever (gore), 90° istok (desno),
%   180° jug(dolje) i 270° zapad (lijevo),
%   ako su podaci meteo, program radi konverziju
%   dnew=mod(90-D,360);
%   ako nisu, koristi se standard (osnovna vrijednost
%   programa)
%   -n, broj podjela smjera D (inače ga program automatski

```



```

%         računa,ali ovako možemo staviti željenu vrijednost)
% -di, podjela brzine vjetra, osnovna vrijednost je
%         automatic
% -ci, željeni broj krugova s postotcima, osnovna vrijednost
%         je automatic
% -labtitle, glavni naslov slike
% -lablegend, legenda
% -cmap, paleta boja [jet]
% -colors, upotreba umjesto -cmap, za svaki di
% -quad, kvadrant za prikaz postotaka [1]
% -ri, veličina praznog unutarnjeg kružića [1/30]
% -legtype, vrsta legende: 1, kontinuirani prikaz,
%         2,razdvojeni prikaz (kvadratići različite boje
%         za pojedinu brzinu) [2]
% -bcolor, boja okvira cijele slike ['none']
% -lcolor, boja linija za osi i krugove ['k']
% -percbg, boja kvadratića za prikaz postotaka ['w']
% -ax, za stavljanje ruže vjetrova na prethodne osi, ulazni
%         podaci za ax moraju biti oblika [theax x y width],
%         theax su prethodne osi, x i y su koordinate, a width
%         je relativna širina prikaza ruže vjetrova prema theax
%         širini (osnovna vrijednost=1/5)
% -parent, ako ne zadamo ovu vrijednost, stvaraju su i
%         crtaju nove osi
% -iflip, obrnuti prikaz brzina, tj najveće brzine su u
%         ishodištu i prema vani se smanjuju [{0} 1]
% -inorm, normalizirani prikaz intenziteta, odnosno svi
%         kutevi imaju 100%
% -incout, iako je 0, podaci izvan opsega -di se ne koriste
%         [0 {1}]
%
% Izlazni podaci:
%     HANDLES
%     DATA
%
% Primjer:
%     d=0:10:350;
%     D=[];
%     V=[];
%     for i=1:length(d)
%         n=d(i)/10;
%         D=[D ones(1,n)*d(i)];
%         V=[V 1:n];
%     end
%
%     figure
%     wind_rose(D,V)
%
%     figure
%     wind_rose(D,V,'iflip',1)
%
%     figure
%     wind_rose(D,V,'ci',[1 2 7],'dtype','meteo')
%
%     % smještaj na prijašnje osi:
%     ax=axes;

```

```

%      plot(lon,lat)
%      wind_rose(D,V,'ax',[ax x y 1/3])

handles=[];

% varargin opcije:
dtype='standard';
nAngles=36;
ri=1/30;
quad=1;
legType=2;
percBg='w';
titStr='';
legStr='';
cmap=jet;
colors=[];
Ag=[]; % podjela brzine
ci=[]; % broj krugova za prikaz postotaka
lineColors='k';
borderColor='none';
onAxes=false;
iflip=0;
inorm=0;
parent=0;
IncHiLow=1;

vin=varargin;
for i=1:length(vin)
    if isequal(vin{i},'dtype')
        dtype=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'n')
        nAngles=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'ri')
        ri=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'quad')
        quad=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'legtype')
        legType=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'percBg')
        percBg=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'labtitle')
        titStr=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'lablegend')
        legStr=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'cmap')
        cmap=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'colors')
        colors=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'di')
        Ag=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'ci')
        ci=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'lcolor')
        lineColors=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i},'bcolor')

```

```

        borderColor=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i}, 'ax')
        ax=vin{i+1};
        try
            onAxes=ax(1);
            onAxesX=ax(2);
            onAxesY=ax(3);
            onAxesR=ax(4);
        catch
            disp(':: cannot place wind rose on axes, bad argument for
ax')
        return
    end
    elseif isequal(vin{i}, 'iflip')
        iflip=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i}, 'inorm')
        inorm=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i}, 'parent')
        parent=vin{i+1};
    elseif isequal(vin{i}, 'incout')
        IncHiLow=vin{i+1};
    end
end
end

rs=1.2;
rl=1.7;

% pretvorba smjera ako su podaci meteorološki:
if isequal(dtype, 'meteo')
    D=mod(90-D, 360);
end

% podjela stupnjeva za prikaz:
D=mod(D, 360);
Ay=linspace(0, 360, nAngles+1)-0.5*360/nAngles;

% izračun potrebnog broja podjela brzine:
if isempty(Ag)
    % generiranje Ag:
    f=figure('visible', 'off');
    plot(F); axis tight;
    yl=get(gca, 'ytick');
    close(f)
    dyl=diff(yl); dyl=dyl(1);
    if min(F)<yl(1), yl=[yl(1)-dyl yl]; end
    if max(F)>yl(end), yl=[yl yl(end)+dyl]; end
    Ag=yl;
end

for i=1:length(Ay)-1
    if i==1
        I=find( (D>=Ay(i) & D<Ay(i+1)) | D>=Ay(end));
    else
        I=find(D>=Ay(i) & D<Ay(i+1));
    end
end

```

```

b=F(I);

for j=1:length(Ag)-1
    if j==length(Ag)-1
        J=find(b>=Ag(j) & b<=Ag(j+1));
    else
        J=find(b>=Ag(j) & b<Ag(j+1));
    end
    E(i,j)=length(J);
end

if IncHiLow
    E(i,1)=length(find(b<Ag(2)));
    E(i,end)=length(find(b>=Ag(end-1)));
end
end
b=sum(E,2)/length(D)*100;

% normalizacija podataka:
if inorm
    n=sum(E,2);
    for i=1:length(n)
        E(i,:)=E(i,+)/n(i);
    end
    b=100*ones(size(b));
end

% provjera granica za Ag
hasH=length(find(F>Ag(end)));
hasL=length(find(F<Ag(1)));

% izračun potrebnog broja krugova za prikaz postotaka:
if isempty(ci)
    if inorm
        ci=[25 50 75];
        g=120;
        ncircles=3;
    else
        dcircles=[1 2 5 10 15 20 25 30 50];
        ncircles=3;
        d=abs(1./(dcircles/max(b))-ncircles);
        i=find(d==min(d));
        d=dcircles(i(1));
        if d*ncircles<max(b)
            ncircles=ncircles+1;
        end
        ci=[1:ncircles]*d;
        g=ncircles*d;
    end
else
    ncircles=length(ci);
    g=max(max(ci),max(b));
end

% crtanje osi, krugova s postotcima i postotaka:
if parent

```

```

    wrAx=parent;
    set(wrAx,'units','normalized');
else
    wrAx=axes('units','normalized');
end
ri=g*ri;
handles(end+1)=fill([-rs*g rl*g rl*g -rs*g],[-rs*g -rs*g rs*g
rs*g],'w',...
                    'EdgeColor',borderColor);
if onAxes
    set(handles(end),'facecolor','none')
end
hold on
handles(end+1)=plot([-g-ri -ri nan ri g+ri nan 0 0 nan 0 0],...
                    [0 0 nan 0 0 nan -g-ri -ri nan ri
g+ri],':','color',lineColors);
t0=[0:360]*pi/180;
labs=[];
Ang=[1/4 3/4 5/4 7/4]*pi;
Valign={'top' 'top' 'bottom' 'bottom'};
Halign={'right' 'left' 'left' 'right'};
for i=1:ncircles
    x=(ci(i)+ri)*cos(t0);
    y=(ci(i)+ri)*sin(t0);

    circles(i)=plot(x,y,':','color',lineColors);
    handles(end+1)=circles(i);

labs(i)=text((ci(i)+ri)*cos(Ang(quad)),(ci(i)+ri)*sin(Ang(quad)),[
num2str(ci(i)),'%'],...

'VerticalAlignment',Valign{quad},'HorizontalAlignment',Halign{quad}
},...
            'BackgroundColor',percBg,'FontSize',8);
end
handles=[handles labs];

% odabir boja koje će se koristiti u prikazu:
if isempty(colors)
    cor={};
    for j=1:length(Ag)-1
        cor{j}=caxcolor(Ag(j),[Ag(1) Ag(end-1)],cmap);
    end
else
    cor=colors;
end

% crtanje podataka brzine i smjera:
n=sum(E,2);
if iflip, E=fliplr(E); end
for i=1:length(Ay)-1
    if n(i)
        t=linspace(Ay(i),Ay(i+1),20)*pi/180;
        rl=ri;
        for j=1:length(Ag)-1

```

```

r2=E(i,j)/n(i) *b(i) +r1;

x=[r1*cos(t(1)) r2*cos(t) r1*cos(fliplr(t))];
y=[r1*sin(t(1)) r2*sin(t) r1*sin(fliplr(t))];

if iflip, jcor=length(Ag)-1-j+1;
else jcor=j;
end

if E(i,j)>0, handles(end+1)=fill(x,y,cor{jcor}); end
r1=r2;
end
end
axis equal
axis off

ch=get(wrAx, 'children');
if inorm
for i=1:length(circles)
ch(ch==circles(i))=[]; ch=[circles(i); ch];
end
end
for i=1:length(labs)
ch(ch==labs(i))=[]; ch=[labs(i); ch];
end
set(wrAx, 'children', ch);

% N S E W oznake na slici:
bg='none';
args={'BackgroundColor',bg, 'FontSize',8};
h(1)=text(-g-ri, 0, 'WEST', 'VerticalAlignment','top',
'HorizontalAlignment','left', args{:});
h(2)=text( g+ri, 0, 'EAST', 'VerticalAlignment','top',
'HorizontalAlignment','right',args{:});
h(3)=text( 0,-g-
ri, 'SOUTH', 'VerticalAlignment','bottom', 'HorizontalAlignment','left',
args{:});
h(4)=text( 0, g+ri, 'NORTH', 'VerticalAlignment','top',
'HorizontalAlignment','left', args{:});
handles=[handles h];

% legenda:
L=(g*rl-g-ri)/7;
h=(g+ri)/10;
dy=h/3;

x0=g+ri+(g*rl-g-ri)/7;
x1=x0+L;
y0=-g-ri;

if legType==1 % kontinuirani prikaz.
for j=1:length(Ag)-1
lab=num2str(Ag(j));

```

```

    if j==1 && hasL && IncHiLow
        lab='';
    end
    y1=y0+h;
    handles(end+1)=fill([x0 x1 x1 x0],[y0 y0 y1 y1],cor{j});

handles(end+1)=text(x1+L/4,y0,lab,'VerticalAlignment','middle','fontsize',8);
    y0=y1;
end
if ~ (hasH && IncHiLow)

handles(end+1)=text(x1+L/4,y0,num2str(Ag(end)),'VerticalAlignment',
,'middle','fontsize',8);
end
elseif legType==2 % odvojeni prikaz pomoću kvadratića
for j=1:length(Ag)-1
    lab=[num2str(Ag(j)) ' - ' num2str(Ag(j+1))];
    if j==1 && hasL && IncHiLow
        lab=['<',num2str(Ag(2))];
    end
    if j==length(Ag)-1 && hasH && IncHiLow
        lab=['>=',num2str(Ag(j))];
    end
    y1=y0+h;
    handles(end+1)=fill([x0 x1 x1 x0],[y0+dy y0+dy y1 y1],cor{j});

handles(end+1)=text(x1+L/4,(y0+dy+y1)/2,lab,'VerticalAlignment','middle','fontsize',8);
    y0=y1;
end

end

% naslov i oznaka legende:
x=mean([-g*rs,g*rl]);
y=mean([g*ri,g*rs]);
handles(end+1)=text(x,y,titStr,'HorizontalAlignment','center');

x=x0;
y=y1+dy;
handles(end+1)=text(x,y,legStr,'HorizontalAlignment','left','VerticalAlignment','bottom');

if onAxes
    place_wr(onAxes,wrAx,onAxesX,onAxesY,onAxesR);
end

if nargout>=1
    varargout{1}=handles;
end
if nargout>=2
    varargout{2}=E;
end

function place_wr(ax,ax2,x,y,width)

```

```

if nargin < 5
    width=1/5;
end
uax=get(ax, 'units');
pax=get(ax, 'position');
set(ax, 'units', uax)
axXlim=get(ax, 'xlim');
axYlim=get(ax, 'ylim');

x_ax2=pax(1)+pax(3)*(x-axXlim(1))/diff(axXlim);
y_ax2=pax(2)+pax(4)*(y-axYlim(1))/diff(axYlim);

pax2=get(ax2, 'position');
width=pax(3)*width;
height=pax2(4)*width/pax2(3);
pax2=[x_ax2 y_ax2 width height];

if 1
    ax2Xlim=get(ax2, 'xlim');
    ax2Ylim=get(ax2, 'ylim');
    dx=(0-ax2Xlim(1))/diff(ax2Xlim)*pax2(3);
    dy=(0-ax2Ylim(1))/diff(ax2Ylim)*pax2(4);
    x_ax2=x_ax2-dx;
    y_ax2=y_ax2-dy;
    pax2=[x_ax2 y_ax2 width height];
end
set(ax2, 'position', pax2)

function cor = caxcolor(val, cax, cmap)
%CAXCOLOR   Boja za pojedinu vrijednost
%   Pronalazi boju za odabranu vrijednost iz palete boja.
%
%   Sintaksa:
%       COLOR = CAXCOLOR(VALUE, CAXIS, COLORMAP)
%
%   Ulazi:
%       VALUE
%       CAXIS
%       COLORMAP
%
%   Izlazi:
%       COLOR   RGB vektor boja
%
%   Primjer:
%       figure
%       pcolor(peaks)
%       color=caxcolor(0);
%       set(gcf, 'color', color)

if nargin < 3
    cmap = get(gcf, 'colormap');
end
if nargin < 2

```



```

    cax = caxis;
end

n=size(cmap,1);
i= (val-cax(1))/diff(cax) * (n-1) +1;
a=i-floor(i);
i=floor(i);

i=min(i,n);
i=max(i,1);

if i==n
    cor=cmap(n,:);
elseif i==1
    cor=cmap(1,:);
else
    cor=cmap(i,:)*(1-a) + cmap(i+1,:)*a;
end

% postavlja boju pozadine na bijelu, bez ovog ovog odsječka
% prilikom snimanja slike naredbom saveas dobije se crna pozadina
set(gcf, 'color', 'w');
set(gca, 'color', 'w');

% Ruža vjetrova napravljena je za sve podatke i za pojedinačne
% mjesece koristeći desetominutne srednjake brzine i smjera
D=reshape(wind.Dir,60,[]);
D=mean(D);
D=D';

V=reshape(wind.Speed, 60, []);
V=mean(V);
V=V';
wind_rose(D, V, 'labeled', 'Brzina (m/s)', 'dtype', 'meteo')

```