



Univerzitet u Novom Sadu,
Prirodno – matematički fakultet,

Departman za fiziku



Procena srednje brzine i srednje gustine snage veta u Srbiji

-diplomski rad-

Mentor: dr Zorica Podraščanin

Kandidat: Jelena Čolović

Novi Sad, septembar 2017.

Sadržaj:

UVOD.....	3
1.METODI ANALIZE PODATAKA O VETRU.....	4
1.1 Direktni metod analize podataka i karakterizacija resursa vetra	4
1.2 Statistička analiza podataka o vetu	5
1.3 Funkcija gustine verovatnoće	6
1.4 Funkcija kumulativne raspodele	7
1.5 Rejlijeva (Rayleigh) raspodela	7
1.6 Vejbulova (Weibull) raspodela	8
2. TEORIJSKA ANALIZA RESURSA VETRA	13
2.1 Logaritamski zakon	13
2.2 Stepeni zakon	14
2.3 Teorija sličnosti Monin - Obuhova	15
3.OBRADA PODATAKA O VETRU NA TERITORIJI SRBIJE	17
3.1 Vejbulova funkcija gustine verovatnoće i kumulativna funkcija gustine	18
3.2 Srednja godišnja brzina vetra	20
3.3 Srednja mesečna brzina vetra	21
4. PRORAČUN SREDNJE GUSTINE SNAGE VETRA	23
4.1 Grafičko predstavljanje rezultata i njihova analiza	23
ZAKLJUČAK	29

Literatura	32
BIOGRAFIJA	33

UVOD

U današnje vreme je sve više reči o obnovljivim izvorima energije. Mnoge razvijene zemlje ulažu sve više novčanih sredstava za istraživanja i razvoj tehnologije koja će biti najefikasnija u iskorišćavanju energije veta. Za razvoj vetroenergetike je od presudne važnosti prvo izvršiti dobre procene o raspoloživosti resursa veta.

Poznavanje visinskog i vremenskog profila brzine veta je od ključnog značaja za izbor vetroagregata. Karakteristike, efikasnost i način rada vetroagregata pripadaju tehnološkom domenu, tako da o njima u ovom radu neće biti reči.

Zadatak ovog rada je sticanje predstave o potencijalu snage veta na teritoriji Srbije. Izvršene su analize podataka o srednjim brzinama i srednjim gustinama snage veta. Na osnovu toga je moguće proceniti da li naši raspoloživi resursi zadovoljavaju kriterijume za izgradnju i isplativost vetroparkova.

U prvom poglavlju ovog rada su opisani metodi analize i predstavljeni su podaci koji će biti korišćeni u radu. Prezentovan je direktni i statistički metod obrade podataka o vetu. Više pažnje je posvećeno raspodeli verovatnoće brzine veta koja se u praksi često koristi za obradu podataka. Drugo poglavlje sadrži objašnjenja o metodima koja se koriste za predstavljanje visinskog profila veta. Treće poglavlje se odnosi na izračunavanje srednje brzine veta. U njemu je objašnjeno koji metodi i podaci su korišćeni i kako je izvršena njihova obrada. Dobijeni rezultati su grafički predstavljeni i izvršena je njihova analiza. U četvrtom poglavlju je prikazana srednja gустина snage veta. Grafički su predstavljeni i analizirani dobijeni rezultati.

1. METODI ANALIZE PODATAKA O VETRU

Vetar kao vektorska veličina je definisana svojim intenzitetom, pravcem i smerom odakle duva. Predstavljanje i obrada podataka o vetru je za nijansu teža nego za ostale meteorološke veličine. Baš zbog svoje česte promenljivosti i u prostoru i u vremenu, podaci o vetru u sebi sadrže dozu nesigurnosti.

Za obradu podataka možemo koristiti direktne ili statističke metode. U oba slučaja je neophodno raspolagati sa velikim brojem podataka dobijenih iz merenja. U ovom radu su korišćeni podaci za srednju dnevnu brzinu vetra prikupljeni sa zvaničnih meteoroloških stanica.

1.1 Direktni metod analize podataka i karakterizacija resursa vetra

U ovom radu su korišćeni metodi i relacije opisani u [1]. Ako sa U_i označimo srednju brzinu vetra za dati interval vremena Δt , a sa N ukupni broj merenja, možemo izračunati sledeće parametre:

1. Srednju brzinu vetra za ukupni period, \bar{U}

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad 1.1$$

2. Standardnu devijaciju brzine vetra, σ_U

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N U_i^2 - N \bar{U}^2 \right)} \quad 1.2$$

3. Srednju gustinu snage vetra koja je data kao srednja snaga vetra po jedinici površine

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad 1.3$$

4. Gustinu energije vetra po jedinici površine za period $N\Delta t$

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \Delta t \sum_{i=1}^N U_i^3 = \frac{\bar{P}}{A} N \Delta t \quad 1.4$$

1.2 Statistička analiza podataka o vetu

Za određivanje potencijala energije vetra se pored direktnog metoda koristi i statistički metod. Statistički metod se zasniva na verovatnoći raspodele brzine vetra. Verovatnoća raspodele nam govori koje to brzine vetra najverovatnije možemo očekivati. Verovatnoća raspodele je okarakterisana sa funkcijom gustine verovatnoće (Probability Density Function - pdf) ili sa funkcijom kumulativne gustine (Cumulative Distribution Function - cdf).

Dve najčešće korišćene raspodele verovatnoće prilikom analize brzina vetra su: Rejljeva (Rayleigh) i Vejbulova (Weibull) raspodela. Obe raspodele su definisane jedino za vrednosti veće od nule. Za određivanje Rejljeve raspodele koristi se samo jedan parametar, srednja vrednost brzine vetra, dok se za Vejbulovu raspodelu koriste dva parametra. Primena dvoparametarske raspodele daje širi obim promena u vrednostima za vetrar.

1.3 Funkcija gustine verovatnoće

Funkcijom gustine verovatnoće se opisuje učestalost (frekvencija) pojavljivanja brzina vetra. Funkcijom gustine se može izraziti pojava brzina vetra u intervalu brzina od U_a do U_b

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U)dU \quad 1.5$$

Takođe, važi

$$\int_0^{\infty} p(U)dU = 1 \quad . \quad 1.6$$

Kada je verovatnoća vetra $p(U)$ poznata možemo izračunati sledeće veličine:

1. Srednju brzinu vetra, \bar{U}

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} Up(U)dU \quad 1.7$$

2. Standardnu devijaciju brzine vetra, σ_U

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U)dU} \quad 1.8$$

3. Srednju gustinu snage vetra

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U^3} \quad 1.9$$

gde je sa $\bar{U^3}$ označena srednja vrednost kubnog stepena brzine vetra.

1.4 Funkcija kumulativne raspodele

Funkcija kumulativne raspodele, $F(U)$ označava verovatnoću pojave brzine vetra koja je manja ili jednaka dатој brzini vetra U .

$$F(U) = \int_0^U p(U') dU' . \quad 1.10$$

U jednačini 1.10 je sa U' označeno odstupanje od srednje brzine vetra.

1.5 Rejlijeva (Rayleigh) raspodela

Rejlijeva raspodela je najjednostavnija raspodela verovatnoće brzine vetra i dobija se samo na osnovu srednje brzine vetra \bar{U} . Funkcija gustine verovatnoće za ovu raspodelu je data preko izraza:

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right) \exp \left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right) . \quad 1.11$$

Funkcija kumulativne raspodele je data kao:

$$F(U) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right) \quad 1.12$$

1.6 Vejbulova (Weibull) raspodela

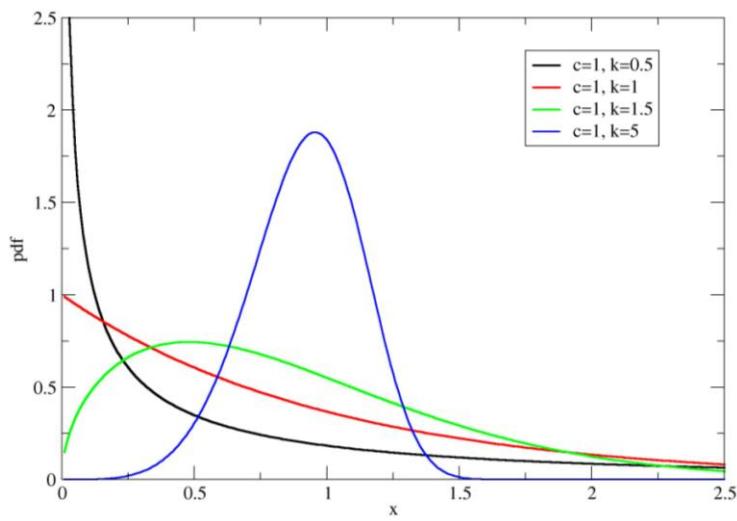
Vejbulova raspodela funkcije gustine verovatnoće zahteva poznavanje dva parametra: k i c . Prvi parametar je faktor oblika, a drugi je faktor skaliranja. Oba faktora su funkcije od \bar{U} i σ_U . Funkcija gustine verovatnoće za ovu raspodelu je data preko izraza:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right), \quad 1.13$$

dok je funkcija kumulativne raspodele data preko izraza:

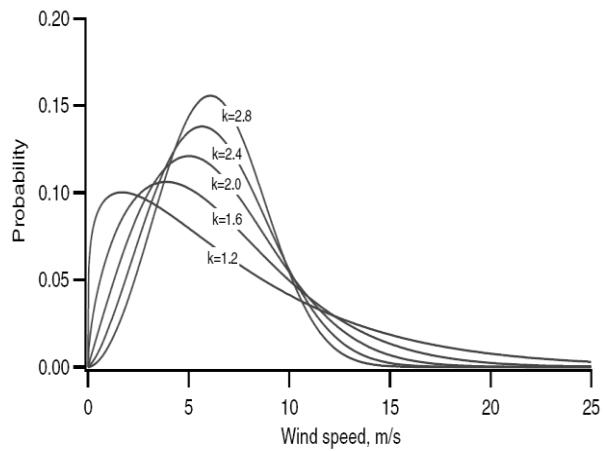
$$F(U) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right) \quad 1.14$$

Na slici 1.1 prikazana je Vejbulova funkcija gustine verovatnoće za slučaj kada je faktor skaliranja konstantan, a faktor oblika se menja.



Slika 1.1: Vejbulova (Weibull) funkcija gustine verovatnoće

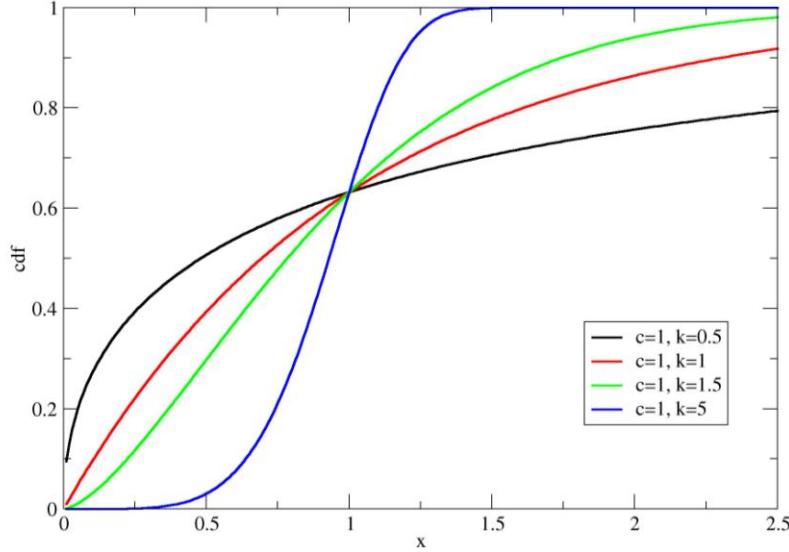
Na slici 1.2 dat je izgled Vejbulove funkcije gustine verovatnoće za slučaj kada vrednosti faktora oblika k postepeno rastu. Sa porastom parametra k , funkcija raspodele ima oštriji vrh, što ukazuje da su promene u brzini vetra manje.



Slika 1.2*: Vejbulova (Weibull) funkcija gustine verovatnoće za različito k

* Slika 1.2 preuzeta iz [1]

Na slici 1.3 prikazana je Vejbulova funkcija kumulativne raspodele za slučaj kada je faktor skaliranja konstantan, a faktor oblika se menja.



Slika 1.3: Vejbulova (Weibull) funkcija kumulativne raspodele

Za određivanje parametara k i c koristićemo jednačinu 1.13 iz koje ćemo odrediti srednju brzinu vетра, \bar{U}

$$\bar{U} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad 1.15$$

gde je $\Gamma = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$ gama funkcija.

Standardna devijacija za ovu raspodelu iznosi:

$$\sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left(\frac{\Gamma(1 + \frac{2}{k})}{\Gamma^2(1 + \frac{2}{k})} - 1 \right) \quad 1.16$$

Ne postoji direktni način dobijanja faktora k i c već koristimo razne aproksimacije. Ovde su prikazani sledeći načini određivanja ovih faktora:

1. Metod maksimuma verovatnoće: faktori k i c se dobijaju na osnovu sledećih izraza [2] :

$$k = \left[\frac{\sum_i^n U_i^k \ln(U_i)}{\sum_i^n U_i^k} - \frac{\sum_i^n \ln(U_i)}{n} \right]^{-1}, \quad 1.17$$

$$c = \frac{\sum_i^n U_i^k}{n} \quad 1.18$$

2. Analitički metod: za dobijanje faktora k i c se koristi izraz za srednju brzinu (1.15) i izraz za standardnu devijaciju (1.16) [3]

3. Analitičko – empirijski metod za dobijanje parametra k , kada $1 \leq k < 10$

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1.086}, \quad 1.19$$

Faktor c možemo dobiti iz jednačine 1.15

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 1.20$$

4. Empirijski metod: parametar k dobijamo iz jednačine 1.19, a faktor c određujemo na osnovu sledeće relacije:

$$\frac{c}{U} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad 1.21$$

5. Grafički metod

Sa grafika na kojem x -osa predstavlja brzinu vетра, a y -osa $\log F(U)$, možemo očitati vrednosti parametara k kao nagib prave linije koja se dobija sa grafika, a faktor c sa x -ose, na mestu preseka horizontalne linije sa vrednošćу funkcije $F(U)=0.632$.

6. Energetski metod

Koristeći Vejbulovu raspodelu i prepostavljajući da su nam parametri k i c poznati, možemo naći očekivanu srednju vrednost kuba brzine vетра:

$$\overline{U^3} = \int_0^\infty U^3 p(U) dU = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad 1.22$$

Treba napomenuti da normalizovana vrednost od $\overline{U^3}$ zavisi jedino od parametra k , faktora oblika. Pored toga, energetska faktor K_e takođe zavisi samo od faktora oblika.

K_e je definisan kao ukupna raspoloživa snaga vетра podeljena sa snagom koja se dobija računskim putem, dizanjem na treći stepen srednje vrednosti brzine vетра:

$$K_e = \frac{\overline{U^3}}{(\overline{U})^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 1.23$$

Na osnovu izraza (1.23) moguće je na direktni način odrediti faktor k [4]

$$k = 1 + \frac{3.69}{(K_e)^2} \quad 1.24$$

2. TEORIJSKA ANALIZA RESURSA VETRA

Kao što smo videli iz relacije 1.3 snaga vetra je proporcionalna trećem stepenu brzine vetra. To znači da čak i najmanje povećanje brzine vetra značajno doprinosi povećanju snage vetra. Brzina vetra raste sa visinom i zato se vetrogeneratori stavljuju na veće visine. Iz tog razloga, pri analizi resursa energije vetra neophodno je detaljno analizirati visinski profil brzine vetra, odnosno analizirati promenu brzine vetra sa visinom iznad tla.

Visinski profil brzine vetra najviše zavisi od hrapavosti tla i stabilnosti atmosfere. Zbog postojanja velikog broja parametara koji utiču na visinski profil vetra i njihove složenosti, za praktičnu primenu je neophodno koristiti matematičke modele. Najčešće se koriste sledeći modeli pomoću kojih se opisuje visinski profil brzine vetra:

- Logaritamski zakon
- Stepeni zakon
- Teorija sličnosti Monin - Obuhova

2.1 Logaritamski zakon

Koristeći činjenicu da brzina vetra u planetarnom graničnom sloju raste sa visinom po logaritamskom zakonu, možemo dobiti brzinu vetra $U(z)$ na nekoj visini z iznad površine tla:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad 2.1$$

U izrazu (2.1) sa u_* je označena brzina trenja koja zavisi od hrapavosti podloge i viskoznosti vazduha; sa k je označena von Karmanova konstanta za koju se

najčešće uzima vrednost 0,4; z_0 predstavlja parametar hrapavosti terena (visina trenja).

Brzina trenja u_* obično nije poznata što predstavlja najveći problem za korišćenje ovog metoda za opisivanje profila vetra. Kako bismo eliminisali brzinu trenja u_* , potrebno je imati merenja brzine vetra U_1 na nekoj visini z_1 :

$$U_1 = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_1}{z_0} \quad 2.2$$

Deljenjem jednačina 2.1 i 2.2 dolazi se do praktične jednačine za analizu visinskog profila brzine vetra, koja definiše logaritamski zakon:

$$U = U_1 \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad 2.3$$

2.2 Stepeni zakon

Pojednostavljena verzija logaritamskog zakona je stepeni zakon u kojem se uticaj hrapavosti terena na visinski profil brzine vetra izražava preko stepena α :

$$\left(\frac{U}{U_1}\right) = \left(\frac{z}{z_1}\right)^\alpha \quad 2.4$$

gde je:

U - brzina vetra na visini z ;

U_1 - brzina vetra na visini z_1 ;

α - koeficijent vertikalnog smicanja vetra.

U slučaju modelovanja visinskog profila brzine vetra pomoću stepenog zakona, karakteristika terena u pogledu harapavosti je opisana parametrom α čije vrednosti čitamo iz tablica. [5] Najčešće se za vrednost ovog parametra uzima 1/7.

S obzirom da gustina snage vetra zavisi od trećeg stepena brzine vetra, može se napisati stepeni zakon za promenu gustine snage vetra sa visinom:

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^{3\alpha} \quad 2.5$$

gde je :

P - gustina snage vetra na visini z ;

P_1 - gustina snage vetra na visini z_1 .

2.3 Teorija sličnosti Monin - Obuhova

Monin i Obuhov su predložili da se procesi unutar planetarno graničnog sloja opišu pomoću univerzalne funkcije odnosa dužine i karakterističnog dužinskog razmera kojeg određuju parametri relevantni za taj proces. Na taj način se računanje flukseva ili ekvivalentno računanje vertikalnih profila svodi na određivanje novouvedenih univerzalnih funkcija. Centralna tačka je bila prepostavka da je dužinski razmer jedinstven za sve veličine. [6] Kao karakteristični razmer turbulentacije koristi se dužina Monin – Obuhova L :

$$L = \frac{u_*^3}{k\beta g \cdot w\Theta_0} \quad 2.6$$

gde je:

u_* - brzina trenja;

βg - rad sile potiska;

k - von Karmanova konstanta;

$\overline{w\Theta_0}$ - vertikalni fluks toplove.

Izraz za određivanje brzine veta na bilo kom nivo je predstavljen relacijom 2.7

$$U(z) - U_0 = -\frac{1}{k} \frac{\overline{wu_0}}{u_\tau} \left[\log\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad 2.7$$

Veličine z_0, z_{0m} su visine trenja za odgovarajuće procese i moraju biti poznate ukoliko računamo flukseve. Oblik funkcije $\Psi_m\left(\frac{z}{L}\right)$, tj $\Psi_m(\zeta)$ dobijamo iz integrala:

$$\Psi_m(\zeta) = \int_{z_{0m}}^z \frac{1 - \Phi_m(\zeta)}{\zeta} d\zeta \quad 2.8$$

U izrazu 2.8, Φ_m predstavlja univerzalnu funkciju čiji oblik je dobio empirijskim putem. Ona služi za određivanje funkcije $\Psi_m(\zeta)$ i to za različite uslove stabilnosti atmosfere.

Kada bi nam unapred bili poznati fluksevi toplove i količine kretanja, mogli bismo uz pomoć teorije sličnosti odrediti brzinu veta na bilo kom nivou unutar površinskog sloja PBL-a.[7]

3.OBRADA PODATAKA O VETRU NA TERITORIJI SRBIJE

Merenja veta se na svakoj meteorološkoj stanci vrše po određenim standardima. Ti standardi podrazumevaju da se merenje vrši na visini od 10 metara sa tačno određenim tipom anemometra. Podaci o brzini veta se beleže na svakih deset minuta pre punog sata, kao srednja desetominutna brzina veta, sa odgovarajućim pravcem, ali zaokružena na ceo broj. [7]. Srednje dnevne brzine veta se beleže kao klimatološki podaci.

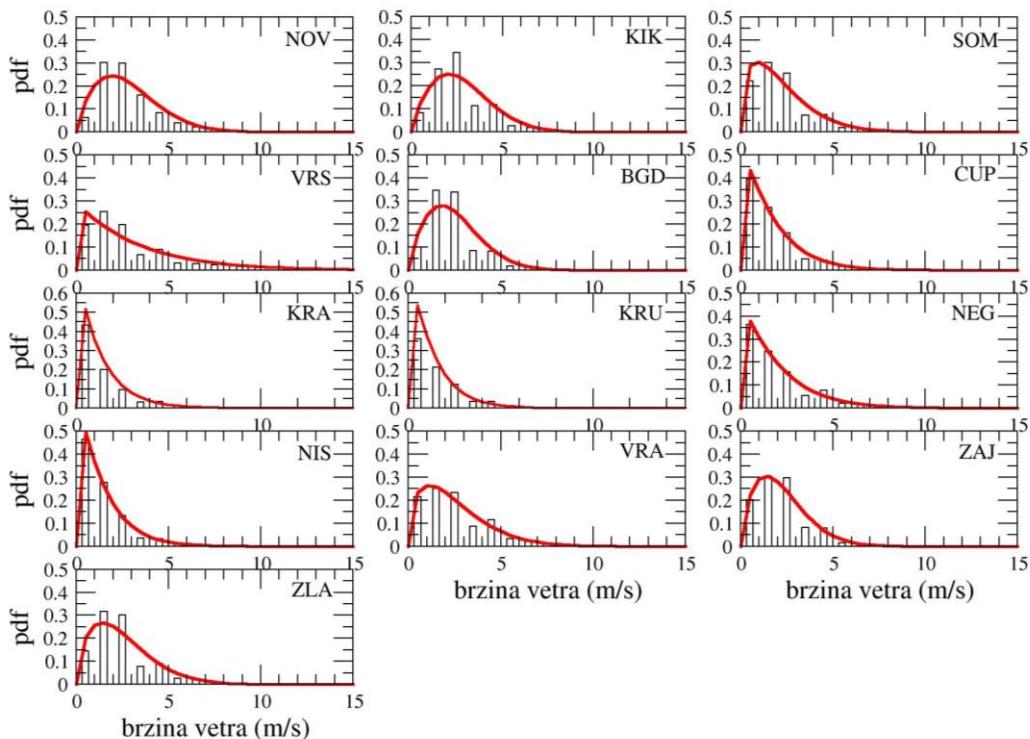
U ovom radu su korišćene srednje dnevne brzine veta izmerene na 13 zvaničnih meteoroloških stanica RHMZ-a Srbije. Podaci koji su korišćeni u radu obuhvataju period od 1971. do 2000. godine na svim posmatranim stanicama. Detalji o mernim stanicama su prikazani u tabeli 3.1. Na posmatranim stanicama smo prvo analizirali raspodelu brzine za posmatrani period koristeći empirijsku i teorijsku Vejbulovu raspodelu i odgovarajuću kumulativnu funkciju raspodele. Nakon toga smo posmatrali srednje godišnje, sezonske i mesečne vrednosti brzine veta. Srednja gustina snage veta je računata na visinama 10m, 50 m, 70 m i 100 m i analizirana na godišnjem i mesečnom nivou. Prilikom svih spomenutih analiza, osim analize raspodele i kumulativne funkcije, korišćen je direktni metod određivanja podataka o vetu.

Tabela 3.1: Podaci o meteorološkim stanicama

<i>Redni broj</i>	<i>Sinoptički broj</i>	<i>Ime stanice</i>	<i>Nadmorska visina</i>	<i>Geografska širina</i>	<i>Geografska dužina</i>
1	13160	Sombor	88	45° 47'	19° 05'
2	13174	Kikinda	81	45° 51'	20° 28'
3	13183	Vršac	82	45° 09'	21° 19'
4	13274	Beograd	132	44° 48'	20° 02'
5	13295	Negotin	42	44° 14'	22° 33'
6	13367	Zlatibor	1028	43° 44'	19° 43'
7	13376	Kraljevo	215	43° 43'	20° 42'
8	13383	Kruševac	166	43° 34'	21° 21'
9	13384	Čuprija	123	43° 56'	21° 22'
10	13388	Niš	201	43° 20'	21° 54'
11	13392	Zaječar	144	43° 53'	22° 17'
12	13489	Vranje	432	42° 29'	21° 54'
13	13168	Novi Sad (Rimski šančevi)	84	45° 19'	19° 50'

3.1 Vejbuloova (Weibull) funkcija gustine verovatnoće i kumulativna funkcija

Empirijska raspodela za srednju brzinu vetra u intervalima od po 1 m/s izračunata je na svih 13 posmatranih stanica. Za dobijanje teorijske Vejbulove raspodele koristili smo izraze (1.13), (1.14) i (1.15). Faktor oblika k , za $1 \leq k < 10$, smo računali na osnovu analitičko – empirijskog metoda (1.19). Kako je faktor k za stanice Kraljevo i Kruševac bio manji od 1, na ovim stanicama su za određivanje fakora k korišćene relacije (1.23) i (1.24).



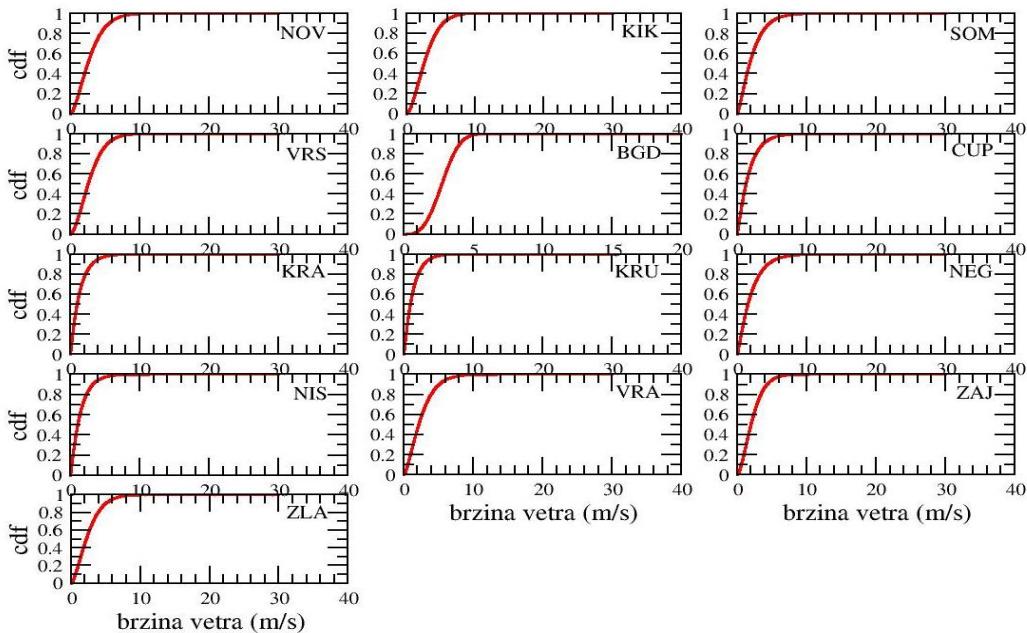
Slika 3.1.1: Empirijska i Vejbulova raspodela srednje mesečne brzine vetra za gradove u Srbiji

Na slici 3.1.1 prikazan je histogram empirijske raspodele za srednju brzinu vetra kao i Vejbulova teorijska raspodela brzina. Histogramom je predstavljena empirijska raspodela za srednju brzinu vetra i to u intervalima od po 1 m / s, dok je crvenom krivom označena teorijska raspodela brzina vetra. Analiza ove slike nam govori koje to vrednosti srednje dnevne brzine vetra imaju najveću verovatnoću

pojavljivanja, odnosno koja je verovatnoća pojavljivanja određenog intervala brzina vетра, za pojedini grad.

Na osnovу analize slike 3.1.1. može se zaključiti da se empirijka i teorijska distribucija srednje dnevne brzine vетра dosta dobro slažu. Nešto manja odstupanja između empirijske i teorijske raspodele javljaju se na stanicama Novi Sad, Kikinda, Beograd i Zlatibor. Na stanicama Ćuprija, Kraljevo, Kruševac, Negotin i Niš najveću verovatnoću pojavljivanja ima brzina vетра u interavlu 0-1 m/s. Najveća verovatnoćа појављивања брзине ветра у интервалу 1-2 m/s se javља на stanicama Sombor, Vršac, Vranje i Zlatibor. Na stanicам Novi Sad, Zaječар i Beograd najveća je verovatnoćа појава брзина ветра у интервалу 1-3 m/s. Jedino je na stanicи Kikinda najveća verovatnoćа појављивања брзине ветра у интервалу 2-3 m/s.

Na slici 3.1.2 dat je prikaz teorijske kumulativne funkcije gustine.



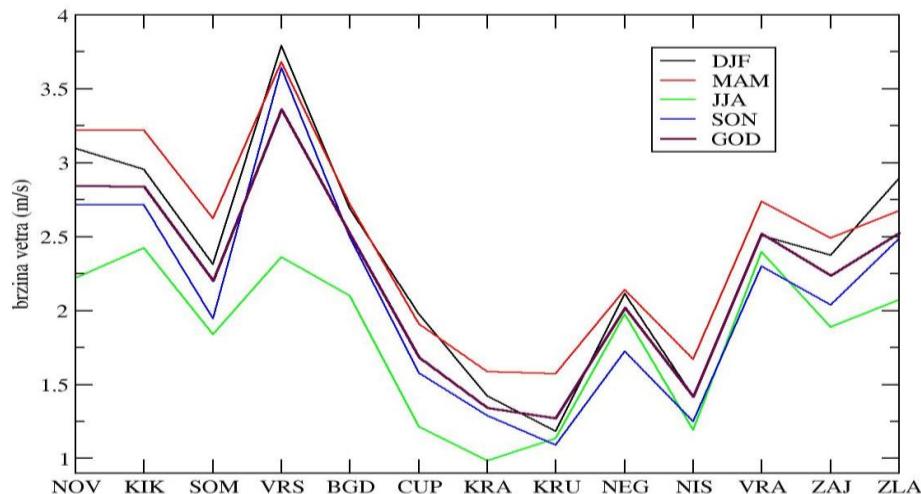
Slika 3.1.2 : Teorijska (Vejbulova) kumulativna funkcija gustine raspodele

Analizom slike 3.1.2 može se zaključiti da skoro svi gradovi imaju verovatnoćу појављивања брзина вредности до 5 m/s. Nešto značajnija verovatnoćа појављивања брзина većih od 7 m/s javља se samo na stanicи Vršac. Veća verovatnoćа

pojavljivanja većih brzina veta na stanicu Vršac, nego na ostalim stanicama, je zbog pojave košave, koja je karakteristična za ovu oblast.

3.2 Srednja godišnja brzina vetra

Na osnovu podataka prikupljenih sa stаница datih u tabeli 3.1 izračunali smo srednju godišnju brzinu veta i srednju godišnju brzinu veta po sezonama, za svaki grad koristeći direktni pristup obrade podataka. Na grafiku 3.2.1 su predstavljene srednje godišnje brzine veta za svaki grad i to po sezonama: DJF (decembar, januar, februar), MAM (mart, april, maj), JJA (jun, jul, avgust) i SON (septembar, oktobar, novembar).



Grafik 3.2.1: Srednja godišnja brzina vetra i srednja godišnja brzina vetra po sezonama za gradove u Srbiji

Analizom grafika 3.2.1 uočavamo da se srednja godišnja brzina veta za većinu gradova kreće u intervalu od 2 do 2.5 m/s. Nešto veće vrednosti srednje

godišnje brzine vetra imaju Novi Sad i Kikinda, ali ni one ne prelaze 3 m/s . Vršac ima najveću vrednost srednje godišnje brzine vetra 3.3 m/s , a Kruševac najmanju 1.25 m/s .

Ako sada posmatramo vrednosti srednje godišnje brzine vetra po sezonama, primećujemo da većina gradova maksimum vrednosti srednje brzine vetra ima u sezoni MAM, dok Vršac i Zlatibor imaju maksimum vrednosti srednje brzine vetra u sezoni DJF.

Za sezonu MAM vrednosti srednje brzine vetra se za većinu gradova kreću u intervalu od 2.2 do 2.75 m/s . Vršac ima najveću vrednost srednje brzine vetra 3.6 m/s za sezonu MAM, a za njim slede Novi Sad i Kikinda sa 3.25 m/s . Najmanju vrednost srednje brzine vetra u sezoni MAM imaju Kraljevo i Kruševac.

Većina gradova u sezoni DJF ima vrednosti srednje brzine vetra u intervalu od 2 do 3 m/s . U sezoni DJF Vršac ima najveću vrednost srednje brzine vetra 3.75 m/s .

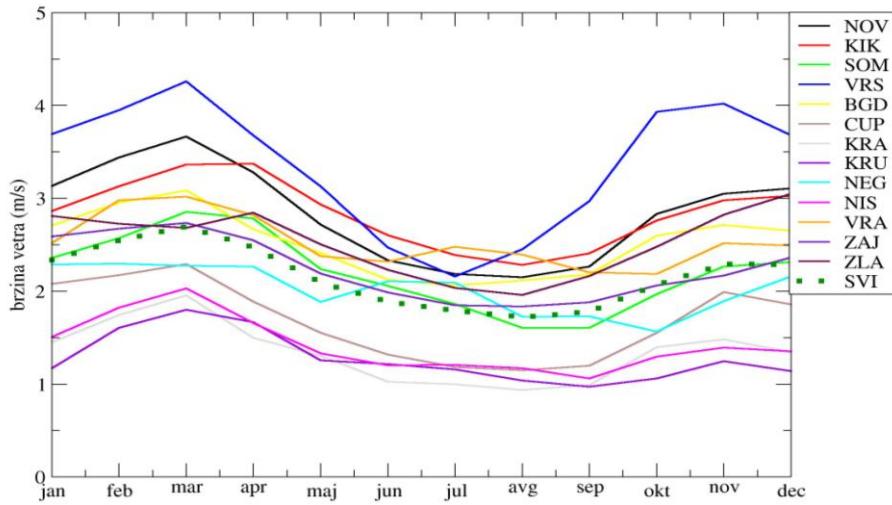
Najmanje vrednosti srednje brzine vetra gradovi imaju u sezoni JJA. Izuzetak su Kruševac, Negotin i Vranje koji imaju minimum u sezoni SON.

U sezoni JJA najmanju vrednost srednje brzine vetra ima Kraljevo 1 m/s , dok najveće vrednosti srednje brzine vetra oko 2.4 m/s imaju Vranje, Kikinda i Vršac. Za sezonu SON vrednosti srednje brzine vetra se za većinu gradova kreću u intervalu od 1.7 do 2.7 m/s . Najveću vrednost srednje brzine vetra ima Vršac 3.6 m/s , a najmanju Kruševac 1.15 m/s .

3.3 Srednja mesečna brzina vetra

Na osnovu podataka prikupljenih sa stanica datih u tabeli 3.1 izračunali smo i srednju mesečnu brzinu vetra prikazanu na grafiku 3.3.1. Uočavamo da se krive vrednosti srednjih mesečnih brzina za sve gradove nalaze u intervalu od 1 m/s do 4.25 m/s . Najveću vrednost srednje mesečne brzine ima Vršac, i to u martu. U periodu od maja do septembra srednje mesečne vrednosti brzine za Vršac naglo opadaju, pa su razlike izmedju njegovih minimuma i maksimuma veće nego što je to slučaj za ostale

gradove. Za Novi Sad maksimum srednje mesečne brzine vetra je u martu i iznosi 3.6 m/s , dok je za Kikindu najveća vrednost srednje mesečne brzine 3.4 m/s u aprilu.



Grafik 3.3.1: Srednja mesečna brzina vetra za gradove u Srbiji

Većina krivih se nalazi između vrednosti od 2 m/s do 3 m/s . Njihov oblik i vrednosti se ne razlikuju mnogo od osrednjene vrednosti za brzinu, za sve gradove. Sa ovom krivom najbolje slaganje u vrednostima imaju Zaječar i Sombor. Maksimumi vrednosti su uglavnom u martu i februaru, a za Zlatibor u decembru.

Interesantno je primetiti da u pomenutom periodu, od maja do septembra, svi gradovi imaju najmanje vrednosti srednje mesečne brzine. Negotin i Vranje u ovom periodu imaju vrednosti srednje mesečne brzine vetra koje se ne razlikuju mnogo od njihovih maksimuma, a svoj minimum imaju u oktobru.

Na donjem delu grafika se nalaze krive za Ćupriju, Niš, Kraljevo i Kruševac sa najmanjim vrednostima srednjih mesečnih brzina, u intervalu od 1 m/s do 2.25 m/s .

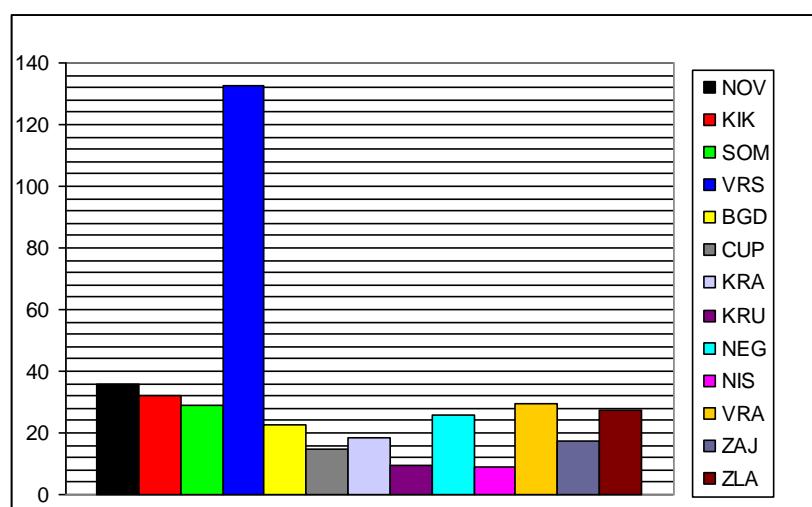
4. PRORAČUN SREDNJE GUSTINE SNAGE VETRA

Za potrebe ovog rada napisan je fortranski program za izračunavanje gustine snage vetra. Računali smo srednju godišnju vrednost na visini od 10, 50, 70 i 100 metara. Takođe, računali smo srednju gustinu snage vetra i za svaki mesec.

Proračuni su rađeni za 13 lokacija: Novi Sad, Kikinda, Sombor, Vršac, Beograd, Čuprija, Kraljevo, Kruševac, Negotin, Niš, Vranje, Zaječar i Zlatibor. Srednju gustinu snage vetra smo računali na osnovu relacije (1.9), dok je za opisivanje visinskog profila vetra korišćen stepeni zakon (2.4), eksponenta 1/7. Za gustinu vazduha smo uzeli standardnu vrednost od 1.2 kg/m^3 .

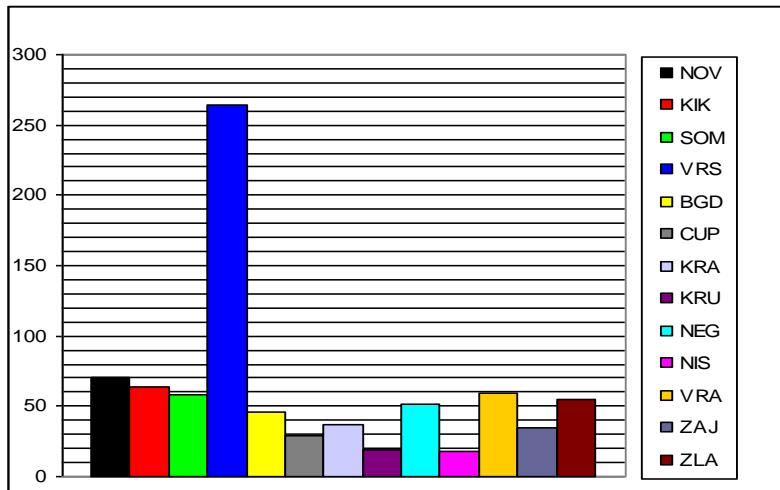
4.1 Grafičko predstavljanje rezultata i njihova analiza

Na grafiku 4.1.1 prikazana je srednja godišnja gustina snage vetra na visini 10 metara. Po najvećoj vrednosti se ističe Vršac sa $132 (\text{W/m}^2)$, slede Novi Sad sa 35 i Kikinda sa $32 (\text{W/m}^2)$. Vrednosti između 20 i 30 (W/m^2) imaju Beograd, Negotin, Zlatibor, Sombor, Vranje.

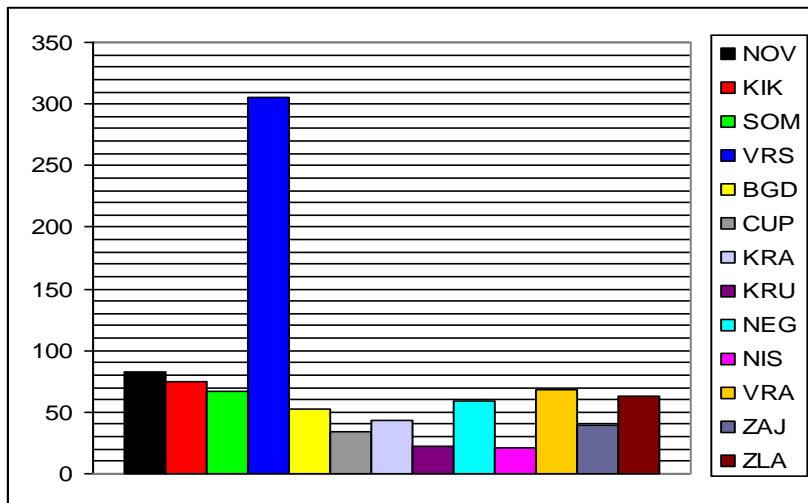


Grafik 4.1.1 : Srednja godišnja gustina snage vetra na visini 10 m

Srednja godišnja gustina snage vетra na visini 50 metara je predstavljena na grafiku 4.1.2. Po najvećoj vrednosti se ističe Vršac sa $264 (W/m^2)$, slede Novi Sad sa 70 i Kikinda sa $64 (W/m^2)$. Vrednosti između 50 i 60 (W/m^2) imaju Negotin, Zlatibor, Sombor, Vranje.



Grafik 4.1.2 : Srednja godišnja gustina snage vетра na visini 50 m

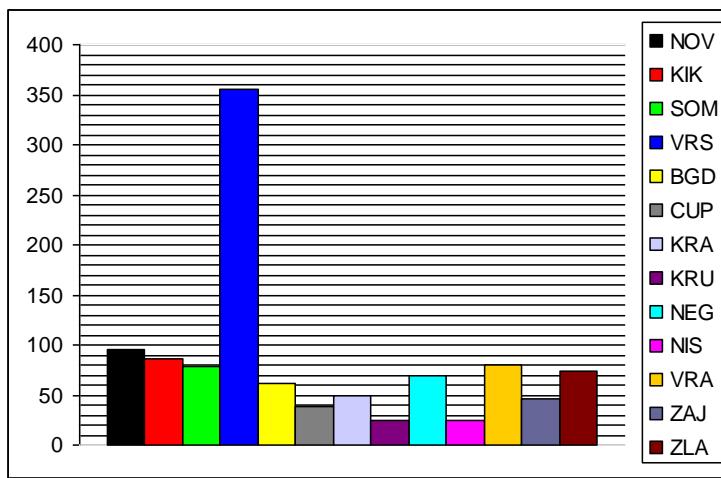


Grafik 4.1.3: Srednja godišnja gustina snage vетра na visini 70 m

Na grafiku 4.1.3 prikazana je srednja godišnja gustina snage vетра na visini 70 metara. Po najvećoj vrednosti se ističe Vršac sa $305 (W/m^2)$, slede Novi Sad sa 82 i

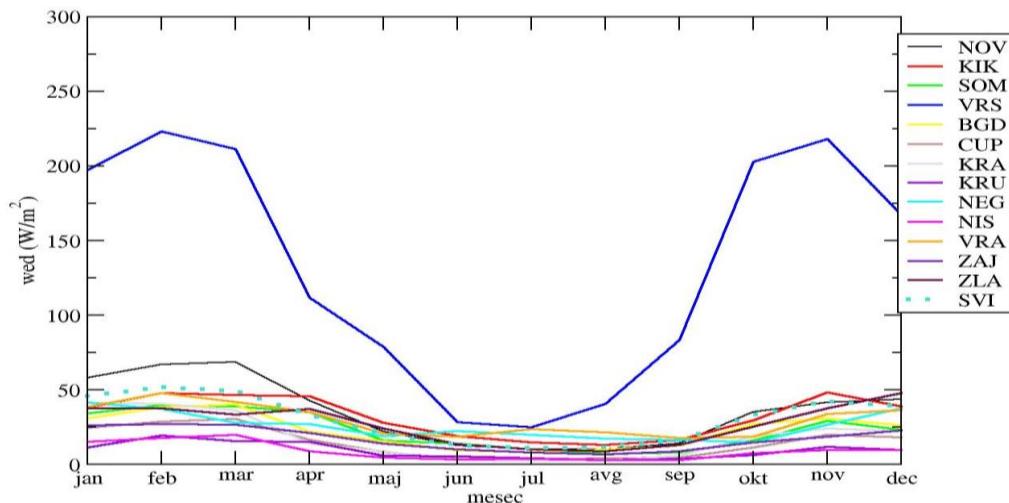
Kikinda sa $74 (W/m^2)$. Kao i na prethodna dva grafika redosled gradova je ostao isti, ali sada za vrednosti između 60 i $70 (W/m^2)$.

Srednja godišnja gustina snage vetra na visini 100 metara je prikazana na grafiku 4.1.4. Po najvećoj vrednosti se ističe Vršac sa $355 (W/m^2)$, slede Novi Sad sa 95 i Kikinda sa $87 (W/m^2)$. Vrednosti između 70 i $80 (W/m^2)$ imaju Negotin, Zlatibor, Sombor, Vranje.



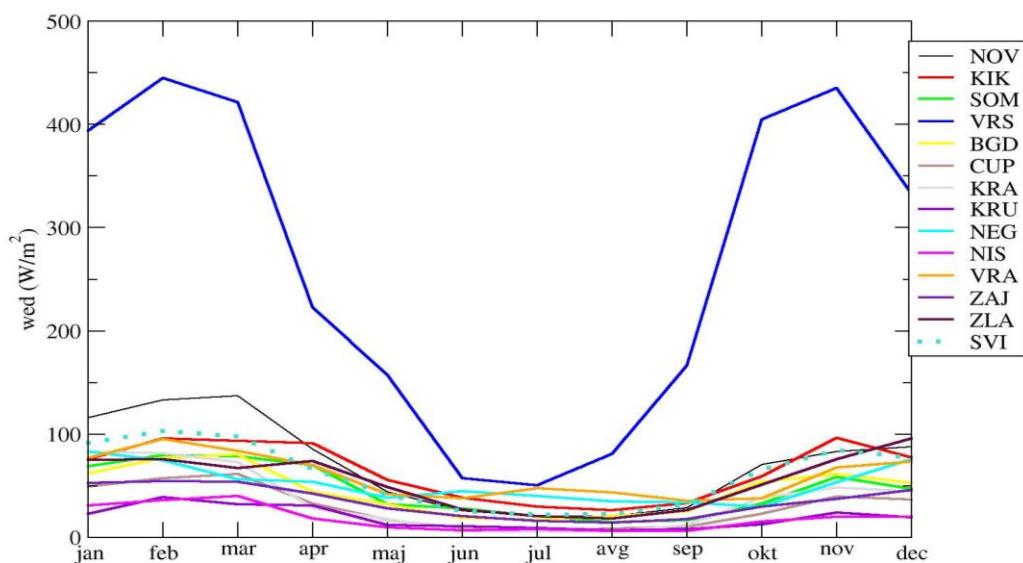
Grafik 4.1.4 : Srednja godišnja gustina snage vetra na visini 100 m

Računali smo i srednju gustinu snage vetra po mesecima za različite visine. Na grafiku 4.1.5 je prikazana srednja gustina snage vetra na visini 10 metara. Možemo reći da je teško razlikovati krive pojedinačnih gradova zbog njihove grupisanost na donjem delu grafika. To nam govori da su razlike u vrednostima energije među gradovima male. Jedino se Vršac vidno ističe po svojim vrednostima. Vrednosti energije su za sve gradove veće u zimskom periodu. Maksimum vrednosti od $223 (W/m^2)$ ima Vršac, slede Novi Sad, Kikinda, Zlatibor i Vranje, dok najmanju vrednost imaju Kruševac i Niš. U letnjem periodu Vršac takođe ima najveću vrednost, slede Negotin i Vranje, dok najmanje vrednosti imaju Kraljevo, Niš i Čuprija. Dakle, za većinu mesta u zimskom periodu gustina snage ne prelazi vrednost od $50 (W/m^2)$, a leti ne prelazi $20 (W/m^2)$.



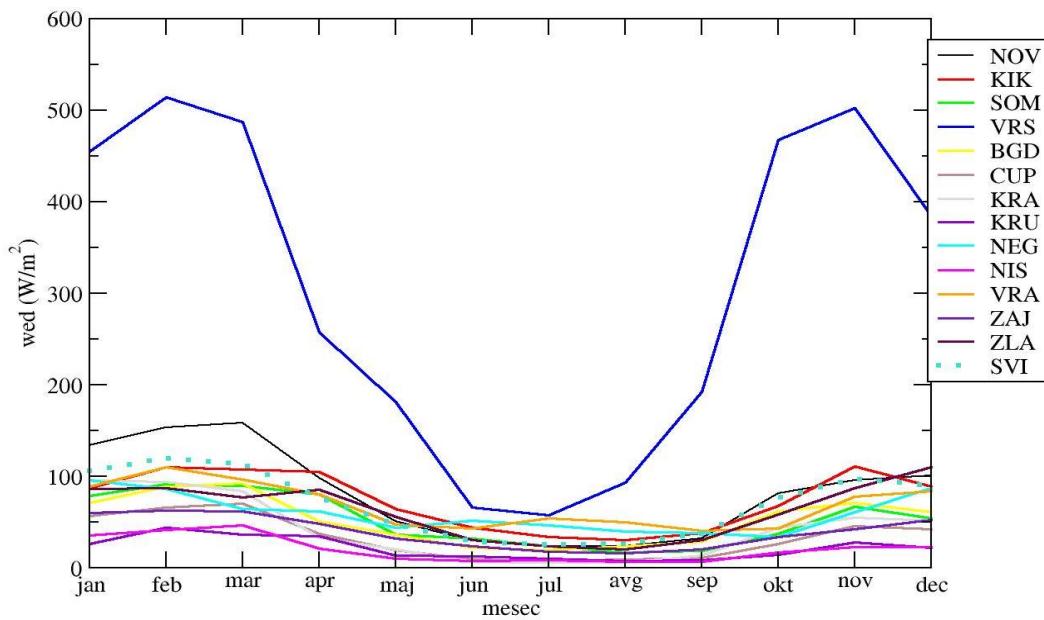
Grafik 4.1.5: Srednja gustina snage vetra na 10 m (Wind Energy Density – wed)

Na grafiku 4.1.6 je prikazana srednja gustina snage vetra na visini 50 metara. Na visini 50 m Vršac u zimskom periodu ima najveću vrednost od $445 \text{ (W/m}^2\text{)}$. Slede Novi Sad sa 133, Kikinda, Zlatibor i Vranje sa $95 \text{ (W/m}^2\text{)}$. Za sve ostale gradove vrednosti idu do $80 \text{ (W/m}^2\text{)}$. Leti Vršac ima maksimum od $81 \text{ (W/m}^2\text{)}$, slede Vranje, Negotin, Kikinda, dok svi ostali imaju vrednosti ispod $25 \text{ (W/m}^2\text{)}$.



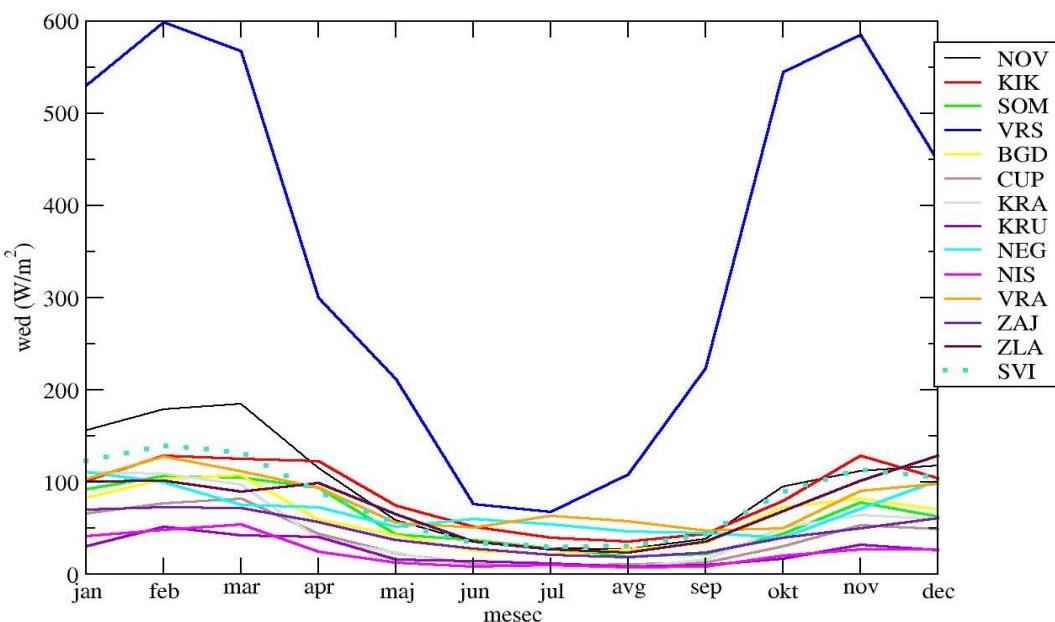
Grafik 4.1.6: Srednja gustina snage vetra na 50 m (Wind Energy Density – wed)

Srednja gustina snage vетra na visini 70 metara je prikazana na grafiku 4.1.7. Primećujemo da je na 70 metara lakše uočiti razliku između krivih. Vrednosti za sve gradove su se povećale i u zimskom periodu su bliže vrednosti od $100 (W/m^2)$. Većina mesta ovu vrednost ne prelazi, dok Vršac dostiže $514 (W/m^2)$. Sledi Novi Sad, Kikinda, Vranje, Zlatibor. U letnjem periodu većina mesta ima vrednosti ispod $30 (W/m^2)$, dok se ističu Vršac, Vranje, Negotin i Kikinda.



Grafik 4.1.7: Srednja gustina snage vетра na 70 m (Wind Energy Density – wed)

Na grafiku 4.1.8 je predstavljena srednja gustina snage vетra na visini 100 metara. Tokom zimskog perioda (decembar, januar, februar) čak osam gradova ima vrednost veću od $100 (W/m^2)$. Na 100 metara Vršac dostiže čak $599 (W/m^2)$, slede Novi Sad, Zlatibor, Kikinda i Vranje. Leti Vršac ima vrednost od $108 (W/m^2)$, slede Vranje, Negotin i Kikinda. Za većinu mesta vrednost ne prelazi $35 (W/m^2)$.



Grafik 4.1.8: Srednja gustina snage vetra na 100 m (Wind Energy Density – wed)

Na svim ovim graficima (4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8) Vršac se ističe po svojim vrednostima za srednju gustinu snage vetra, koje su u proseku 5 do 7 puta veće nego za ostale gradove. Za to je odgovorna košava koja češće i intenzivnije duva u ovom području.

Ako se osvrnemo na podatke o srednjim mesečnim vrednostima za brzinu vetra, (grafik 3.3.1) primetićemo da razlike u brzinama za gradove nisu drastične. Tako, na primer, razlika u brzinama između Vršca i Novog Sada, za mesec februar, iznosi oko 0.6 m / s . S druge strane, srednja gustina snage vetra im se razlikuje četiri puta. Iz ovog primera se jasno vidi koliko veliki efekat ima kubni stepen u relaciji (1.9).

ZAKLJUČAK

Osnovna ideja ovog rada je bilo sticanje okvirne slike o raspoloživosti resursa vetra, odnosno o potencijalu energije vetra na teritoriji Srbije. U tu svrhu smo računali srednje brzine vetra i srednje gustine snage na godišnjem, sezonskom i mesečnom nivou. Pri izračunavanju ovih veličina korišćeni su klimatološki podaci dobijeni sa zvaničnih meteoroloških stanica RHMZS-a za sledeće lokacije: Novi Sad, Kikinda, Sombor, Vršac, Beograd, Ćuprija, Kraljevo, Kruševac, Negotin, Niš, Vranje, Zaječar i Zlatibor u periodu 1971-2000 godna.

Koristeći direktni metod obrade podataka dobijena je empirijska raspodela srednjih brzina vetra. Primenom statističkog metoda određena je teorijska, Vejbulova raspodela i kumulativna funkcija gustine. Zapaženo je međusobno dobro podudaranje empirijske i teorijske raspodele srednjih dnevnih brzina vetra. Analizom je zaključeno da skoro svi gradovi imaju veliku verovatnoću pojavljivanja brzina vetra do 5 m/s . Jedino je kod Vršca zabeležena velika verovatnoća pojavljivanja brzina vrednosti do 7 m/s , zbog jake košave.

Koristeći se direktnom metodom obrade podataka izračunata je srednja godišnja brzina vetra, srednja godišnja brzina vetra po sezonama i srednja mesečna brzina vetra. Analizom dobijenih rezultata pokazalo se da se srednja godišnja brzina vetra za većinu gradova kreće u intervalu od 2 do 2.5 m/s . Novi Sad i Kiknda imaju vrednosti oko 3 m/s , dok Vršac ima najveću vrednost srednje godišnje brzine vetra 3.3 m/s .

Analizom vrednosti srednje godišnje brzine vetra po sezonama, primećujemo da većina gradova maksimum vrednosti srednje brzine vetra ima u sezoni MAM (mart, april, maj), dok Vršac i Zlatibor imaju maksimum vrednosti srednje brzine vetra u sezoni DJF (decembar, januar, februar). Najmanje vrednosti srednje brzine vetra gradovi imaju u sezonama JJA (jun, jul, avgust). Izuzetak su Kruševac, Negotin i Vranje koji imaju minimum u sezonama SON (septembar, oktobar, novembar).

Vrednosti srednjih mesečnih brzina se za većinu gradova kreću između 2 m/s i 3 m/s . Najveću vrednost srednje mesečne brzine ima Vršac, i to u martu, 4.25 m/s . Za

Novi Sad maksimum srednje mesečne brzine vetra je u martu i iznosi 3.6 m/s , dok je za Kikindu najveća vrednost srednje mesečne brzine 3.4 m/s u aprilu.

Izračunata je srednja gustina snage vetra za: Novi Sad, Kikindu, Sombor, Vršac, Beograd, Čupriju, Kraljevo, Kruševac, Negotin, Niš, Vranje, Zaječar i Zlatibor. Računata je srednja godišnja vrednost na visini od 10, 50, 70 i 100 metara, kao i srednja gustina snage vetra za svaki mesec.

Analiza srednje godišnje gustine snage je pokazala da Vršac na svakoj od datih visina ima mnogo veće vrednosti srednje godišnje gustine snage nego ostali gradovi. Na visini 10 metara vrednosti srednje godišnje gustine snage za većinu gradova su između 20 i $35 (\text{W/m}^2)$, dok za Vršac iznosi $132 (\text{W/m}^2)$. Srednja godišnja gustina snage vetra na visini 50 metara za Vršac iznosi $264 (\text{W/m}^2)$, dok je za većinu gradova između 50 i $70 (\text{W/m}^2)$. Na visini 70 metara po najvećoj vrednosti se ističe Vršac sa $305 (\text{W/m}^2)$, dok ostali gradovi imaju vrednosti između 60 i $80 (\text{W/m}^2)$. Srednja godišnja gustina snage vetra na visini 100 metara za Vršac iznosi $355 (\text{W/m}^2)$, dok je za većinu gradova između 70 i $90 (\text{W/m}^2)$.

Analizom vrednosti srednje godišnje gustine snage za svaki mesec je primećeno da su najveće vrednosti u zimskom periodu. Najveće vrednosti, na svakoj od ovih visina, ima Vršac i to u februaru. Za većinu mesta u zimskom periodu, na visini 10 metara, gustine snage ne prelazi vrednost od $50 (\text{W/m}^2)$. Na visini 50 m Vršac ima vrednost $445 (\text{W/m}^2)$, a za ostale gradove vrednosti idu do $80 (\text{W/m}^2)$. Tek od 70 metara visine vrednosti za sve gradove su bliže vrednosti od $100 (\text{W/m}^2)$ u zimskom periodu. Većina mesta vrednost od $100 (\text{W/m}^2)$ ne prelazi, dok u Vršcu dostiže $514 (\text{W/m}^2)$. Na 100 metara visine Vršac dostiže srednju gustinu snage vetra od čak $599 (\text{W/m}^2)$ u februaru. Tokom zimskog perioda (decembar, januar, februar) čak osam gradova na visini od 100 m ima vrednost srednje gustine snage veću od $100 (\text{W/m}^2)$. Iz prethodnih analiza zaključujemo da Vršac ima najveći potencijal energije vetra, naročito u zimskom periodu, kada je košava intenzivnija.

Ozbiljnija procena resursa vetra, odnosno energetskog potencijala vetra, bi bila moguća samo ukoliko bi se izvršila detaljnija merenja brzine vetra. Planska gradnja vetroagregata zahteva srednja desetominutna merenja brzine vetra, kao i

merenja ostalih relevantnih meteoroloških veličina. Zato je praksa da se pri planiranju izgradnje vetroparka na nekoj lokaciji prvo postavi merni stub sa neophodnim mernim instrumentima, i to na visini na kojoj se obično postavlja vetroturbina. Analizom podataka dobijenih na takav način, njihovom ispravnom obradom i interpretacijom je moguće dobiti kvalitetnu procenu o energetskom potencijalu veta na posmatranom mestu.

Literatura

- [1] **J. F. Manwell , J. G. McGowan, A. L. Rogers** :"Wind energy explained – Theory, Design and Application"John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom ; This edition first published 2009
- [2] **Stevens MJM, Smulders PT.**:"The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes", Wind Eng 1979; 3: 132-45.
- [3] **Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A, Graber D.**: "Methods for estimating wind speed frequency distributions ", J Appl Meteorol 1978, 17: 350-3.
- [4] **Junaid K. Khan, Feroz Ahmed, Zaheer Uddin, S. Tanweer Iqbal, Saif UddinJilani, Afaq Ahmed Siddiqui, and Asim Aijaz**: "Determination of Weibull Parameter by Four Numerical Methods and Prediction of Wind Speed in Jiwani (Balochistan)", Journal of Basic & Applied Sciences, 2015, 11, 62-68
- [5] **Željko R. Đurišić**: "Modelovanje i analiza uticaja prostornog i vremenskog profila snage vetra u projektovanju i eksploataciji vetroelektrana u elektroenergetskom sistemu", Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd 2012
- [6] **Rajković Borivoj, Mesinger Fedor**: "Mikrometeorologija", Univerzitet u Beogradu, Beograd 2002
- [7] **Borivoj Rajković, Zlatica Popov**: "Procena brzine vetra na izabranim lokacijama", Univerzitet u Novom Sadu, Centar za meteorologiju i modelovanje životne sredine, Meteorološka opservatorija RHMZ - a, Novi Sad 2005

BIOGRAFIJA



Jelena Čolović je rođena 1984. godine u mestu Osijek, Republika Hrvatska. Osnovnu školu "Petar Kočić" završava u Temerinu, kao nosilac Vukove diplome. Srednjoškolske dane provodi kao odličan đak opštег smera Gimnazije "Svetozar Marković" u Novom Sadu. Godine 2003. upisuje Prirodno – matematički fakultet u Novom Sadu, smer fizika - meteorologija i modeliranje životne sredine. Sticajem životnih okolnosti, od 2007. godine, pravi pauzu u studiranju od ukupno deset godina. U svojoj četvrtoj deceniji života uspeva da položi sve ispite i diplomira.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: *Monografska dokumentacija*

TD

Tip zapisa: *Tekstualni štampani materijal*

TZ

Vrsta rada: *diplomski rad*

VR

Autor: *Jelena Čolović*

AU

Mentor: *dr Zorica Podraščanin*

MN

Naslov rada: *Procena srednje brzine i srednje gustine snage vетra u Srbiji*

PNR

Jezik publikacije: *Srpski (latinica)*

JP

Jezik izvoda: *Srpski (latinica)*

JI

Zemlja publikovanja: *R. Srbija*

ZP

Uže geografsko područje: *AP Vojvodina*

UGP

Godina: 2017.

GO

Izdavač: *Autorski reprint*

IZ

Mesto i adresa: *Departman za fiziku, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3*

MA

Fizički opis rada: (6/39/7/1/15)

(broj poglavlja/strana/lit.citata/tabela/slika)

FO

Naučna oblast: *Fizika*

NO

Naučna disciplina: *Meteorologija*

ND

Predmetna odrednica/Ključne reči: analiza podataka o vетру, srednja brzina vетра,
srednja gustina snage vетра

UDK

Čuva se: *Biblioteka Departmana za fiziku, PMF Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3*

ČU

Važna napomena: -

VN

Izvod: U ovom radu je izvršena analiza relevantnih karakteristika vетра koje se koriste pri proceni energije vетра. Poznavanje srednje brzine i srednje gustine snage vетра omogućuje dobru procenu o potencijalu resursa vетra.

Određivanje ove dve karakteristike zahteva poznavanje velike količine podataka o brzini vetra dobijenih iz merenja. Pri obradi ovih podataka korišćeni su direktni i statistički metod. Za opisivanje visinskog profila vetra korišćen je stepeni zakon. Imajući to u vidu, izračunata je srednja brzina i srednja gustina snage vetra. Konačnom analizom dobijenih vrednosti procenjeno je koji region u Srbiji ima najveći potencijal energije vetra.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: 2017.

DP

Datum odbrane: 29.09.2017.

DO

Članovi komisije:

(Naučni stepen/ime/prezime/zvanje/fakultet)

Predsednik: *dr Petar Mali*

Član: *dr Zorica Podraščanin, mentor*

Član: *dr Nikola Jovančević*

KO

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: *Monograf type*

DT

Type of record: *Printed text*

TR

Contents code: *thesis*

CC

Author: *Jelena Čolović*

AU

Mentor: *dr Zorica Podraščanin*

MN

Title: An estimation of the average wind velocity and the average wind power
density in Serbia

TI

Language of text: *Serbian (Latin alphabet)*

LT

Language of abstract: *Serbian (Latin alphabet)*

LA

Country of publication: *Serbia*

CP

Locality of publication: *AP Vojvodina*

LP

Publication year: *2017.*

PY

Publisher: *Author's reprint*

PU

Publ. place: *Department of physics, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 3*

PP

Physical description: (6/39/7/1/15)

(chapters/pages/literature/tables/pictures)

PD

Scientific field: *Physics*

SF

Scientific discipline: *Meteorology*

SD

Subject/Key words: wind data analysis, average wind speed, average wind power
density

UC

Holding data: *Department of Physics (library), Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 3*

HD

Note: -

NT

Abstract: The research subject in this text is analysis of wind characteristics which are relevant for wind energy estimation. Knowledge of the average wind speed and the average wind power density provide good estimation of wind resource potential. The determination of these two wind characteristics

requires a great amount of measured wind speed data. Those data are summarized by using direct and statistical techniques. The height profile of the wind speed is described by exponential law. The average wind velocity and the average wind power density are calculated by applying all those information. Summarized analysis show which region in Serbia has the greatest potential of the wind energy.

AB

Accepted by the Scientific Board on: 2017.

ASB

Defended: 29.09.2017.

DE

Thesis defend board:

President: *PhD Petar Mali*

Member: *PhD Zorica Podraščanin, mentor*

Member: *PhD Nikola Jovančević*

DB