

VETROGENERATORI – PERSPEKTIVNI IZVORI EKOLOŠKI ČISTE ELEKTRIČNE ENERGIJE U SRBIJI I CRNOJ GORI (SCG)

Branko Radičević¹, Dušan Mikičić²

SAŽETAK:

U ukupnoj proizvodnji električne energije u svetu energija vetra danas učestvuje sa oko 0,6 %. Međutim, sudeći po svetskim trendovima ovaj procenat bi u 2020. godini trebao da iznosi 12 %, a u narednih nekoliko decenija i fantastičnih 20 %. U radu je analizirana raspoloživa energija vetra u svetu i u SCG. Pokazano je da je vetar energetska resursa naše zemlje čiji potencijal iznosi oko 20 TWh/godini (oko 10 GW) i čijim aktiviranjem bi se znatno povećali instalisani kapaciteti i raznovrsnost energetske resursa i smanjila zavisnost od uvoza energetske sirovine. Naglašeno je takođe da je cena električne energije koju proizvode vetrogeneratori već danas konkurentna sa cenom mnogih klasičnih izvora, kao i da vetrogeneratori proizvode najčistiju električnu energiju. Energetika naše zemlje se nalazi na raskršću i bez obzira kakav strateški model razvoja elektroenergetike se bude izabrao, uvek će se javljati potreba i obaveza za korišćenjem ekološki čistih izvora, a pre svega vetrogeneratora s obzirom da je vetar obnovljivi izvor energije koji u SCG ima veliku raspoloživost.

Ključne reči: *energetski potencijali vetra, vetrogeneratori, električna energija, ekologija*

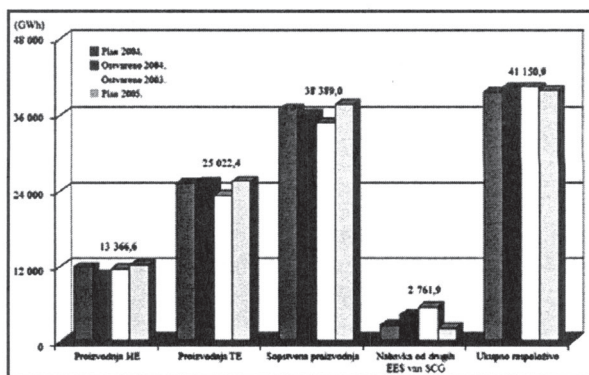
¹ Asist. Branko M. Radičević, dipl. inž. el., Poljoprivredni fakultet, Institut za polj. tehniku, Katedra za tehničke nauke, Nemanjina 6, 11081 Beograd – Zemun, branko@agrifaculty.bg.ac.yu.

² Prof. dr Dušan Mikičić, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd.

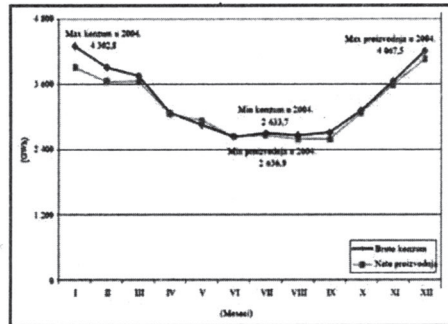
1. UVOD

Vetroenergetika predstavlja oblast energetike sa najvećim trendom razvoja u poslednjoj deceniji. Ovakav trend razvoja omogućila je pre svega moderna industrija vetrogeneratora, u kojoj je izvršen snažan razvoj novih kompozitnih materijala, električnih mašina, energetske elektronike, uz nova znanja i konstrukcije u oblasti aeromehanike. Savremena postrojenja vetrogeneratora omogućavaju pouzdan i ekonomičan način elektromehaničke konverzije energije vetra, uz zadovoljenje svih IEC tehničkih propisa rada. Perspektive daljeg razvoja vetroenergetike su izrazito optimističke s obzirom da resursi tehnički iskoristivog vetra višestruko prevazilaze trenutne globalne potrebe za električnom energijom u svetu.

Generalno gledano, naša zemlja je energetska siromašna zemlja kada su u pitanju kvalitetna konvencionalna goriva (40 % potreba za energijom se danas uvozi na godišnjem nivou, a očekuje se da taj procenat do 2020. dostigne čak 70%). Ostvarenje elektroenergetskog bilansa EES SCG je prikazano na slici 1, a na slici 2 su date mesečna proizvodnja i bruto konzum u SCG za 2004. godinu. U EES SCG permanentno se javlja deficit u električnoj energiji koji je procenjen na oko 10 % ukupne nacionalne potrošnje. Iako su u Srbiji evidentni pozitivni efekti tarifnog sistema, tj. peglanje dnevnog dijagrama opterećenja, samo u 2004. godini u pojedinim trenucima zimskih opterećenja nedostajalo je oko 730 MW snage, zimi i do 15 GWh električne energije dnevno, a u proseku leti do 2 GWh električne energije dnevno, [4]. Treba imati u vidu da će u skladu sa potrebom ubrzanja industrijskog razvoja potrošnja energije u Srbiji i Crnoj Gori nastaviti da raste u narednom periodu, uprkos povećanju energetske efikasnosti. Ukoliko se do početka 2006. godine ne izgrade kapaciteti ukupne snage do 800 MW, godišnji manjak u 2010. godini u Srbiji narašće na 2,3 milijarde kWh. Do 2020. godine biće nužno dostići 2 kW instalisane snage po glavi stanovnika, koliko će verovatno trošiti srednje razvijene zemlje EU.



Slika 1: Ostvarenje elektroenergetskog bilansa EES SCG



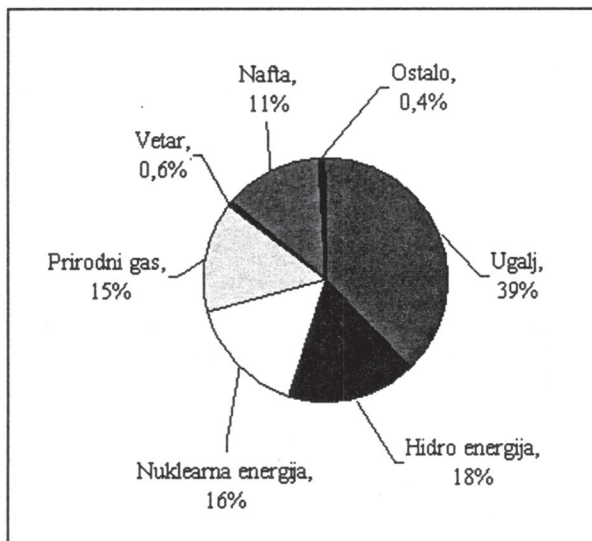
Slika 2: Mesečna proizvodnja i bruto konzum u SCG

SCG do 2012. godine ne podleže restrikcijama u proizvodnji energije, odnosno emisiji gasova, jer je ratifikovala Okvirnu konvenciju UN o klimatskim promenama, ali ne i Kjoto protokol koji je konačno ratifikovan 16. februara 2005. i na osnovu koga će većina razvijenih zemalja u svetu smanjiti emisiju ugljen-dioksida i drugih gasova koji izazivaju globalno otopljanje za 5,2 % u periodu 2008-2012. u odnosu na emisiju iz 1990. Ako je naš globalni cilj integracija u Evropsku uniju, onda je jasno da se reforma energetskog sektora mora sprovesti tako da se prate svi procesi razvoja energetike u EU. Upravo iskustva većine evropskih zemalja ukazuju na neophodnost uključivanja vetroenergetike u nacionalnu strategiju razvoja energetike SCG.

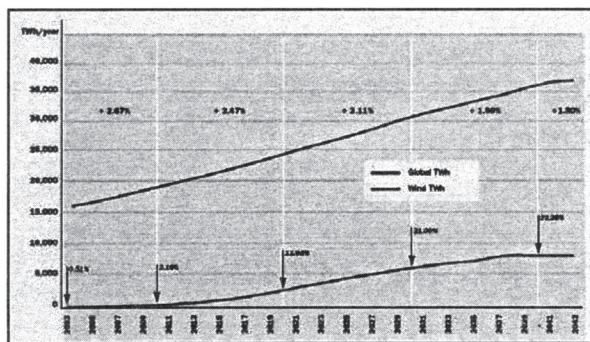
Tabela 1: Instalirani vetroenergetski kapaciteti i proizvodnja električne energije od vetra u svetu

Zemlja/Region	Ukupno instalirani kapaciteti do kraja 2004. god.	Prosečan broj časova punog opterećenja	Prosečna vrednost faktora snage	Proizvedena električna energija u 2004. god.
	MW	h	%	TWh /god.
Nemačka	16649	1794	20,5	29,87
Španija	8263	2100	24,0	17,35
USA	6750	2300	26,3	15,53
Danska	3083	2250	25,7	6,94
Indija	3000	1800	20,5	5,40
Holandija	1081	2100	24,0	2,27
Italija	1261	2000	22,8	2,52
Velika Britanija	889	2628	30,0	2,34
Kina	769	2100	24,0	1,61
Grčka	587	2500	28,5	1,47
Švedska	478	2100	24,0	1,00
Ostatak sveta	5102	2000	22,8	10,20
Ukupno	47912	2014 (prosek)	23 % (prosek)	96,50

U ukupnoj proizvodnji električne energije u svetu energija vetra početkom 2005. godine učestvuje sa oko 0,6 %, tj. oko 100 TWh/god. (slika 3), a u zemljama EU sa oko 3 % (iz 34,2 GW instalisanih kapaciteta dobija se oko 75 TWh/god. električne energije u EU). U oko 55 zemalja u svetu do početka 2005. godine instalisano je oko 48 000 MW kapaciteta (tabela 1), od toga 72% u Evropi. S obzirom da ne postoje tehnička i ekonomska ograničenja, kao i barijere po pitanju resursa, realno se očekuje da do 2020. godine učešće električne energije koja se dobija od vetra iznosi 12 % od ukupnih svetskih potreba za električnom energijom (slika 4), a u narednih nekoliko decenija i fantastičnih 20 %, [6].



Slika 3. Proizvodnja električne energije u svetu u 2004. godini



Slika 4. Udeo električne energije dobijene u vetrogeneratorima i projektovana globalna potrošnja električne energije, pri čemu procenti predstavljaju povećanje globalnih potreba za električnom energijom

U prosečno vetrovitoj godini (kakva je bila 2004), sa instalisanom snagom vetrogeneratorskog od 48 GW, postignuta je godišnja proizvodnja električne energije od oko 97000 GWh, što pokazuje da je prosečan broj časova godišnjeg iskorišćenja vetrogeneratorskog ~2000 h, odnosno godišnji faktor iskorišćenja oko 23% (tabela 1). Današnja cena električne energije koja se dobija od vetra je tipično od ~3 € centi/kWh (za 3600 časova punog godišnjeg iskorišćenja) do ~8 € centi/kWh (za 2000 časova punog godišnjeg iskorišćenja), [3].

Tehnički iskoristiv vetroenergetski potencijal u svetu iznosi preko 100.000 TWh/god., višestruko je veći od hidropotencijala (oko 15.000 TWh/god.) i u velikoj meri prevazilazi ukupne globalne potrebe za električnom energijom. Energija vetra je obnovljiva i čista, ne zagađuje vazduh, ne emituje ugljen-dioksid, ne prouzrokuje kisele kiše, ne zrači, ne razara ozonski omotač i ne zahteva energetske zavisnost. Samo na pogodnim lokacijama u svetu gde je srednja brzina vetra od 5 do 12 m/s, moguće je dobiti više nego dovoljno električne energije za ceo svet.

2. VETROENERGETSKI POTENCIJAL I ANALIZA POGODNIH LOKACIJA ZA IZGRADNJU VETROGENERATORA U SCG

Istraživanje i definisanje lokalnog vetroenergetskog potencijala u SCG i analiza pogodnih lokacija za buduću izgradnju vetrogeneratorskih postrojenja, koje autori rada sprovode, izvršeno je u nekoliko faza:

FAZA 1. Utvrđivanje globalnih vetroenergetskih resursa u SCG. Postojeće mape vetrova SCG nisu upotpunosti upotrebljive za procenu mogućnosti pretvaranje energije vetra u električnu, jer mikrolokacije hidrometeoroloških stanica ne odgovaraju mikrolokacijama za izgradnju vetrogeneratorskog. Takođe, standardna visina merenja brzine vetra (10 m) nije odgovarajuća. U oblastima koje mogu biti od interesa za postavljanje vetrogeneratorskog određene su najpogodnije mikrolokacije i obavljena su namenska merenja. Na osnovu rezultata merenja i ogromne baze podataka iz lokalnih hidrometeoroloških stanica uspostavljena je odgovarajuća korelacija i na taj način je dobijena raspodela vetra na mikrolokacijama u dužem periodu. Dakle, na osnovu relativno malog broja merenja, standardnih podataka iz hidrometeoroloških stanica i uspostavljenih korelacija dobijene su pouzdane procene vetroenergetskog potencijala i konkretni podaci za nekoliko lokacija na kojima su vršena merenja, a takođe je razvijena i metoda za ubranu procenu vetroenergetskog potencijala.

FAZA 2. Analiza pogodnih lokacija za izgradnju vetrogeneratorskog. Na osnovu prethodnog su identifikovane lokacije sa realnim mogućnostima za izgradnju vetrogeneratorskog. Na njima su izvršene analize svih ostalih parametara kvaliteta vetra, a zatim je pomoću dostupnih softvera izvršena procena snage generisanja električne energije. Sagledana je pogodnost lokacije sa stanovišta put-

ne i elektroenergetske infrastrukture. Izvršena je identifikacija optimalnih mesta priključenja vetrogeneratora i određene su njihove maksimalne snage (koje su ograničene karakteristikama konzuma i postojećom elektroenergetskom prenosnom mrežom) za lokacije definisane u fazi 1. Sa tim ciljem analizirana je konfiguracija mreže i izvršena su merenja relevantnih dnevnih dijagrama potrošnje.

FAZA 3. Izbor optimalne konfiguracije vetroenergetskog postrojenja. Proučena su postojeća komercijalna rešenja u svetu koja se koriste na lokacijama sličnim onima kod nas. Zatim je izvršena kompleksna analiza svih relevantnih električnih parametara, predložena je konačna konfiguracija i snaga generatora i definisano je najpogodnije tehničko rešenje (za generator i stub). Ove analize mogu da se odnose na poboljšanje postojećih prilika u mreži, i na situaciju pri planiranom porastu konzuma. Definisana je zaštitna i regulaciona oprema postrojenja vetrogeneratora. Izvršen je jedan nestandardni tip tehno-ekonomske analize u slučaju porasta konzuma, poređenjem cene vetrogeneratora sa cenom rekonstrukcije prenosne mreže, a takođe je izvršena i klasična tehno-ekonomska analiza zasnovana na ceni kWh. Na kraju je urađena računarska simulacija rada generatora za konkretne lokacije, uz uvažavanje svih relevantnih vetro i elektro parametara.

Očigledno je da se iskustvo kod modelovanja mnogih fizičkih procesa može primeniti i kod određivanja globalnog vetropotencijala neke zemlje ili regiona. Ma kakav matematički model da se odabere ili isprojektuje, on gotovo nikada ne daje pouzdane konačne rezultate. Međutim, on je koristan za lociranje određene pojave, i u slučaju definisanja globalnog vetropotencijala model je koristan za lociranje oblasti koje bi u budućnosti trebalo detaljnije ispitati i preciznim merenjima utvrditi njihov stvarni potencijal. Osnovni razlog za velike razlike u procenama vetroenergetskog potencijala je visoka senzitivnost energije vetra od brzine koja je funkcija velikog broja meteoroloških i topografskih parametara. Pogrešna procena nekog od parametara može dovesti do višestruke greške u proceni vetropotencijala

Poznato je da se promena snage vetra sa visinom se može izraziti sledećom relacijom [1]:

$$P(z) = P(z_0) \left(z / z_0 \right)^{3\alpha} \quad (1)$$

gde je: $P(z)$ snaga vetra na visini z , a $P(z_0)$ je snaga vetra na visini z_0 . Standardni meteorološki podaci o brzini vetra odgovaraju visini od $z_0 = 10$ m. Ekstrapolacijom se može proceniti brzina i odgovarajuća snaga vetra na visini postavljanja

gondole vetroturbine i neka je to npr. $z=80$ m (tipična visina za moderne vetrogeneratorne snage do 2 MW):

$$v(80) = v(10) \cdot 8^{1/7} = 1,35 \cdot v(10) \Rightarrow P(80) = P(10) \cdot 8^{3/7} = 2,45 \cdot P(10) \quad (2)$$

Dakle, na visini od 80 metara, za usvojeni faktor hrapavosti terena $\alpha=1/7$, brzina vetra je oko 35 % veća nego na standardnoj visini od 10 metara, dok je snaga vetra 2,45 puta veća. Iz ove kratke analize može se konstatovati da je za tačno određivanje snage vetra neophodno veoma precizno znati visinski profil brzine vetra, odnosno faktor α . Praktična merenja su pokazala da faktor hrapavosti terena varira u relativno širokom opsegu vrednosti: $0,1 < \alpha < 0,3$, što se u pogledu procene opsega snage P vetra na visini od 80 m odražava višestruko, odnosno:

$$P(80) \approx (1,9 - 6,5) \cdot P(10). \quad (3)$$

Zaključujemo da se pogrešnim izborom samo jednog parametra može napraviti greška u proceni snage vetra od ~350 %. Greške u proceni snage se kumulativno preslikavaju na estimaciju električne energije koja se može dobiti iz vetra na godišnjem nivou. Dakle, može se konstatovati da najbitniji parametri vetra nisu jedinstveni, niti vremenski i prostorno stabilni, zavise od praktičnih rešenja, a za analitičko modelovanje zahtevaju precizna i složena merenja na dužem vremenskom horizontu. Procene globalnog vetropotencijala koje se baziraju na standardnim meteorološkim podacima i teorijskim modelima koji se oslanjaju na te podatke su dosta nepouzdana.

Za potrebe analize vetra u SCG u svrhu proizvodnje električne energije, **korisćena je uporedna metoda**, koje se sastojala iz tri glavne faze:

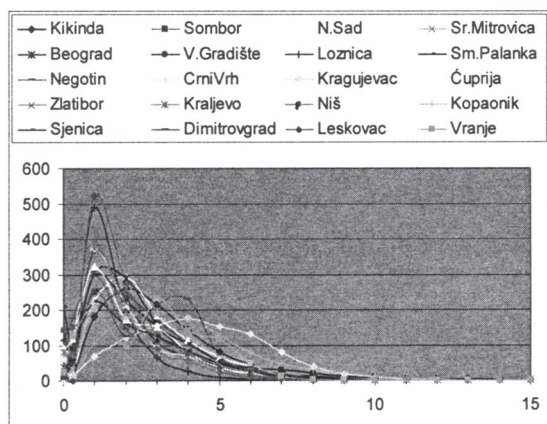
1. Uspostavljanje geografske, topološke i demografske sličnosti između SCG i Danske, koja ima najveće iskustvo u oblasti vetroenergetike, kao i verifikovane procene svog globalnog vetroenergetskog potencijala kroz znatna izgrađena vetroenergetska postrojenja.

2. Utvrđivanje klimatoloških i fizičkih karakteristika vetra (srednje brzine, učestalosti brzina, učestalosti tišina), identifikovanje perspektivnih zona za izgradnju farmi vetrogeneratora i utvrđivanja ukupnih površina i njihovog klasifikovanja prema pogodnosti za proizvodnju električne energije od vetra.

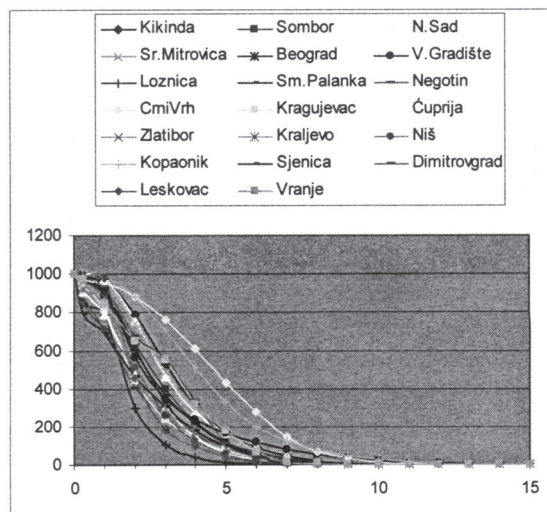
3. Procene ukupnog i tehnički iskoristivog potencijala u SCG.

Osnova za analizu fizičko-mehaničkih karakteristika vetra u SCG, bio je skup raspoloživih anemografskih merenja brzine i pravca vetra, iz više anemografskih stanica u periodu 1991-2000. godina. Najpre je izvršeno određivanje učestalosti pojavljivanja srednje satne brzine vetra za svih 20 stanica, za sve me- sece, sezone i godine i dobijena je empirijska raspodela učestalosti brzine vetra

(slika 5). Učestalost pojavljivanja pojedinih vrednosti brzine vetra, predstavlja prosečnu učestalost na godišnjem nivou i odnosi se na visinu 10 m iznad tla, na kojoj se, po pravilu, nalaze prijemni delovi anemografa na glavnim meteo stanicama. Poznavanje empirijskih raspodela učestalosti pojavljivanja pojedinih vrednosti brzine vetra omogućuje dobijanje validnih informacija o učestalosti određene ili veće brzine vetra. Takav kvantitativan prikaz za obrađene anemografske stanice je dat na slici 6, [5].



Slika 5: Empirijska raspodela godišnjih tišina i učestalosti časovnih srednjih brzina vetra (od 0 do 15 m/s), u promilima



Slika 6: Prosečna godišnja učestalost tišina i srednjih godišnjih brzina vetra (od 0 do 15 m/s), po anemografskim podacima, u promilima

S obzirom da je početkom 2005. godine Danska je prva zemlja u svetu po učešću vetroenergije u ukupnoj proizvodnji električne energije - oko 20 % (instalirano oko 3100 MW kapaciteta), koristeći metodu uporedne analize uspostavljena je određena geografska, topološka i demografska sličnost između SCG i Danske i na osnovu takve analize procenjen vetroenergetski potencijal SCG. Ovakav pristup je relativno jednostavan, ali se temelji na rezultatima koji su verifikovani u praksi, što daje, za razliku od teorijskih matematičkih modela, određenu sigurnost. *Danska je namerno uzeta da bude zemlja za poređenje, jer prema najnovijim preporukama Evropske komisije za vetroenergiju iz 2004. godine, Danska je dobila referentni indeks vetroenergetskog potencijala (vrednost 100) i resursi vetra svih drugih zemalja se tretiraju u odnosu na Dansku.*

Za potrebe analize same metode, u smislu određivanja perspektivnih zona za proizvodnju električne energije od vetra, izvršena je rekonstrukcija vrednosti parametara vetra sa horizontalnom rezolucijom od 500x500m na teritoriji SCG. Rezolucija modela (500x500 metara) uslovlila je podelu teritorije SCG na više oblasti sa referentnim meteo stanicama. Sledeći korak je bio izrada karte vetroenergetskih resursa Danske. Površina teritorije Danske (~44000 km²) je podeljena na 1,1 milion kvadrata oblika 200x200 m i srednja brzina vetra je određena za svaki kvadrat.

Pored izgrađenih preko 3100 MW u vetrogeneratorskim kapacitetima, Danske planira gradnju novih 4000 MW do 2010. godine, a dugoročni planovi (do 2030. godine) su izgradnja ukupno 10000 MW kapaciteta (od kojih će većina biti na moru), koji bi proizveli oko 50 % nacionalnih potreba za električnom energijom. Može se zaključiti da su vetroenergetski resursi Danske oko 20000 MW, od čega je oko 50 % koncentrisano u morskima, a 50 % u kopnenim vetrovima. Ovaj podatak se može uzeti kao pouzdan, jer je rezultat dugogodišnjeg iskustva i opsežnih merenja koja su korigovana na osnovu praktičnih iskustava.

Kopneni vetrovi u Srbiji i Crnoj Gori su oko 30 % slabiji nego u Danskoj, tj.:

$$v_{sr(SCG)} \sim 0,7 \cdot v_{sr(D)} \Rightarrow P_{sr(SCG)} \sim 0,7^3 \cdot P_{sr(D)} \approx 0,343 \cdot P_{sr(D)} \quad (4)$$

Za procenu iskoristivog vetroenergetskog potencijala uzet je tipičan vetrogenerator sa sledećim bitnim karakteristikama: nominalna snaga 1500 kW, nominalna brzina 15 m/s, brzina pokretanja 4 m/s, brzina zaustavljanja 25 m/s, prečnik rotora 62 m, standardna visina stuba 60 m, površina zone rotora 3018 m², godišnja proizvodnja električne energije: $E=0,2 \cdot 1,5 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h}=2628 \text{ MWh/god}$. Na osnovu kriterijuma za projektovanje farme vetrogeneratora, utvrđena je optimalna površina zemljišta koju zauzima jedan VG navedenog tipa, primenom rastojanja od 7D u opredeljujućem pravcu vetra najvećeg potencijala (tipične vrednosti su od 7D do 9D), a 4D upravno na opredeljujući pravac vetra (tipične vredno-

sti su od 3D do 5D). Dobijena je površina od $7D \times 4D = 28D^2$ ili 107632 m^2 . Ukupan broj VG koji može da se smesti na 1 km^2 je $n_{vg} = 9 \text{ VG/km}^2$, a odgovarajuća instalisana snaga: $9 \text{ VTG/km}^2 \times 1,5 \text{ MW} = 13,5 \text{ MW/km}^2$.

Površina teritorije Danske koja će u budućnosti biti popunjena sa maksimalnim brojem vetrogeneratora je:

$$A_{f(Danske)} = VP_{(Danske)} \cdot P_{in}^{-1} = 10000 \text{ MW} \cdot 0,074 \frac{\text{km}^2}{\text{MW}} = 740 \text{ km}^2 \quad (5)$$

pa je faktor popunjenosti teritorije sa vetrogeneratorima za Dansku:

$$f_{(Danske)} = \frac{A_{f(Danske)}}{A_{(Danske)}} = \frac{740}{44000} = 0,017 = 1,7\% \quad (6)$$

Faktor ispunje teritorije vetrogeneratorima (koji zavisi od gustine naseljenosti teritorije) za SCG iznosi:

$$f_{(SCG)} = f_{(Danske)} \frac{\rho_{(Danske)}}{\rho_{(SCG)}} = 0,017 \frac{120}{100} = 0,02 (2\%) \quad (7)$$

pa se dobija površina teritorije SCG koja u budućnosti može biti popunjena sa maksimalnim brojem vetrogeneratora:

$$A_{f(SCG)} = f_{(SCG)} A_{(SCG)} = 0,02 \cdot 102000 = 2040 \text{ km}^2 \quad (8)$$

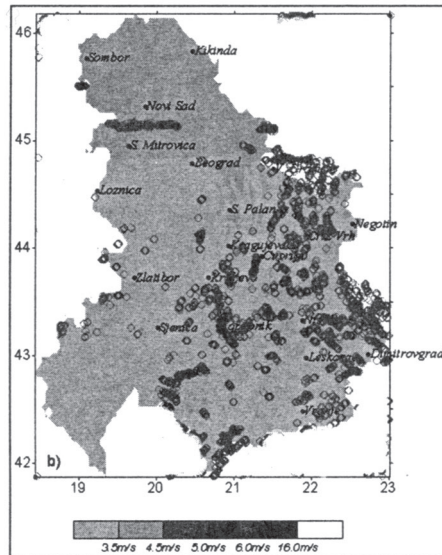
Usporedna analiza energetskog potencijala vetra u SCG i Danskoj je izvršena na osnovu sledeće formule, [3]:

$$VP_{(SCG)} = VP_{(Danske)} \cdot \frac{A_{f(SCG)}}{A_{f(Danske)}} \cdot \left(\frac{v_{sr(SCG)}}{v_{sr(Danske)}} \right)^3 = 10 \text{ GW} \cdot \frac{2040 \text{ km}^2}{740 \text{ km}^2} \cdot (0,7)^3 \approx 9,5 \text{ GW} \quad (9)$$

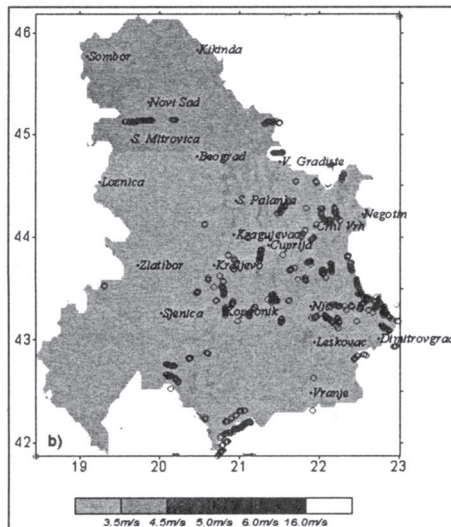
Dakle, može se proceniti da je tehnički iskoristiv vetropotencijal na kopnu SCG oko (9-10) GW (za srednju godišnju brzinu vetra $v_{sr} > 5,1 \text{ m/s}$ koja je određena na bazi desetominutnih prosečnih brzina vetra na visini od 50 m iznad tla). Pošto južni Jadran spada u srednje vetrovita mora i na Crnogorskom primorju bi se mogli instalirati znatni kapaciteti.

Može se zaključiti da tehnički iskoristiv vetroenergetski potencijal na kopnu i moru u SCG iznosi:

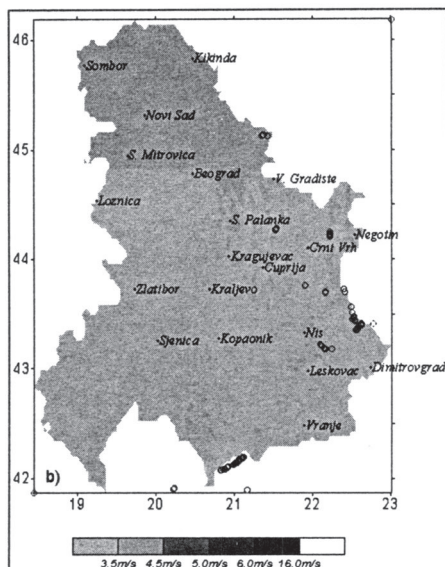
$$VP_{(SCG)} (v_{sr} > 5,1 \text{ m/s}) = (9-10) \text{ GW} = (9000-10000) \text{ MW}$$



Slika 7. Karakteristične lokacije u SCG sa godišnjom srednjom brzinom vetra u intervalu od $\geq 4.5 \text{ m/s}$ do 5 m/s , određenih na bazi desetominutnih srednjih brzina, na visini od 50 metara



Slika 8. Karakteristične lokacije u SCG sa godišnjom srednjom brzinom vetra u intervalu od $\geq 5.1 \text{ m/s}$ do 6 m/s , određenih na bazi desetominutnih srednjih brzina, na visini od 50 metara

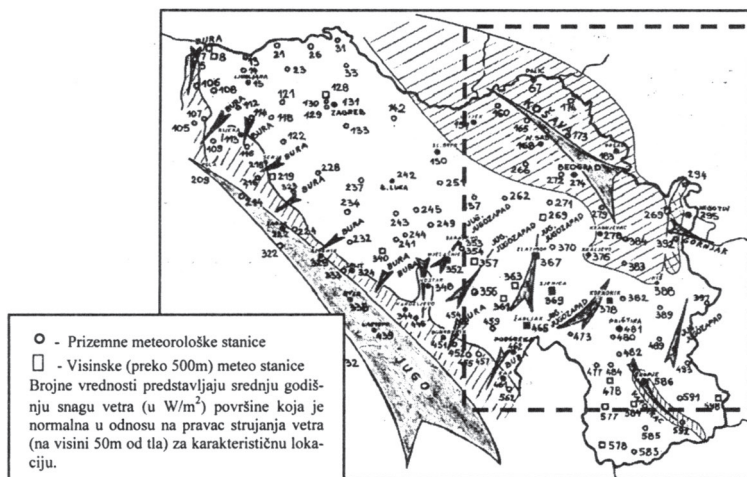


Slika 9. Karakteristične lokacije u SCG sa godišnjom srednjom brzinom vetra u intervalu od $\geq 6.0 \text{ m/s}$, određenih na bazi desetominutnih srednjih brzina, na visini od 50 metara, prema klasifikaciji brzina iz European Wind Atlas, 1989.[5]

Dakle, u SCG postoji znatan broj lokacija na kojima vetar godišnje duva preko 50% vremena, srednjom brzinom većom od 6 m/s (tabela 2). Takođe, postoji veliki broj lokacija sa srednjom godišnjom brzinom vetra od 5 m/s od 6 m/s i stabilnim vetrom i ogroman broj lokacija sa srednjom godišnjom brzinom vetra od 4 m/s od 5 m/s . Na osnovu najnovijih trendova u svetskoj vetroenergetici, gotovo sve ove lokacije su pogodne za izgradnju modernih vetrogeneratora.

Tabela 2. Karakteristične lokacije u SCG sa srednjom desetominutnom brzinom vetra $\geq 6.0 \text{ m/s}$ na visini 50 m iznad tla sa učestalošću većom od 50%

Meteo stanica	Geografska	Geografska	Površina	Učestalost
	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(km^2)	(%)
Midžor	43.52	22.51	19,75	56
Deli Jovan	44.25	22.18	4,75	54
Jastrebac	43.32	21.41	1,75	54
Stara planina-jug	43.32	22.83	7,25	54
Kopaonik	43.35	20.81	5,25	54
Juhor	43.81	22.06	3,00	54
Suva Planina	43.20	22.22	2,50	55
Tupižnica	43.84	21.26	3,00	54
Krepoljin	44.27	21.53	3,50	54
Vršac	45.13	21.36	0,50	59
Šara	42.09	20.87	4,50	56



Slika 10. Zone karakterističnih vetrova u SCG i u okolnom regionu

Na osnovu sprovedene analize i podataka koji su dobijeni od Hidrometeorološkog zavoda Srbije izračunat je fluks snage vetra (u W/m^2) na visini od 50 m za SCG i okolne zemlje (slika 10). I na osnovu ove slike je jasno da naša zemlja ima veliki vetroenergetski potencijal, pa je upravo zbog toga neophodno sprovesti mnogo opsežnija istraživanja (nego što su prikazana u ovom radu i koja se trenutno vrše) radi što bržeg razvoja vetroenergetike. Ovu činjenicu potvrđuju i iskustva okolnih zemalja. Grčka trenutno ima instalisano 465 MW, a Italija 1125 MW vetrogeneratorskih kapaciteta i ove zemlje spadaju u razvijenije u pogledu eksploatacije energije vetra. Hrvatska (6 MW), Mađarska (6 MW), Rumunija (1 MW) i Bugarska (1 MW) i Turska (20 MW) imaju instalisane vetrogeneratorske kapacitete i značajne planove za dalja ulaganja u oblast vetroenergetike.

Pregled regiona i područja u našoj zemlji u kojima postoje potencijalno pogodne lokacije za izgradnju vetrogeneratorskih sa navedenim srednjim godišnjim brzinama vetra su:

a) Panonska nizija, severno iznad Dunava, odnosno šira oblast košavskog područja i Podunavlje je izuzetno bogato vetrom, sa najvećom brzinom vetra između 20 i 30 m/s i $v_{sr} \approx 6$ m/s. Ova oblast pokriva oko 2000 km^2 i pogodna je za izgradnju vetrogeneratorskih, jer je izgrađena putna infrastruktura, postoji električna mreža, blizina velikih centara potrošnje električne energije i slično. U budućnosti bi se moglo instalirati oko (1500-2000) MW vetrogeneratorskih proizvodnih kapaciteta;

b) Istočni delovi Srbije - Stara planina, Ozren, Vlasinska visoravan, Suva planina, Rtanj, Deli Jovan, Crni Vrh itd. U ovim regionima postoje lokacije čija je srednja brzina vetra $v_{SR} > 6,5$ m/s, što odgovara snazi $P_{SR}=(300-400)$ W/m².

Ova oblast prostorno pokriva oko 3000 km² i u njoj bi se u perspektivi moglo izgraditi oko 2500 MW instalisane snage vetrogeneratora;

c) Pešter, Zlatibor, Žabljak, Bjelasica, Kopaonik, Divčibare su planinske oblasti bogate vetrom ($v_{SR} > 6$ m/s), gde bi se merenjem mogle utvrditi pogodno mikrolokacije (na visinama preko 800 m) za izgradnju vetrogeneratora;

d) Crnogorsko primorje, odnosno pojas morske obale od Ulcinja do Herceg Novog širine oko 20 km, odnosno površine od oko 1000 km². U ovoj oblasti su vetrovi srednje brzine $v_{SR} > 7$ m/s i snage $P_{SR}=(400-600)$ W/m². Takođe je ova oblast pogodna za izgradnju vetrogeneratora i sa drugih aspekata (nije šumovita, blizina električne mreže, nemaju se problemi vizuelnog uticaja na sredinu) i ovde bi se moglo izgraditi oko (1000-1500) MW vetrogeneratora. Duž Crnogorskog primorja postoji dosta lokacija sa visokim grebenima i brdima (lokacije iznad Budve, Tivta, Kotora i slično) u kojima srednja snaga vetra na visinama od 50 m može biti i preko 1 000 W/m². Takođe, u zapadnim delovima Crne Gore ima dosta područja potencijalno pogodnih za korišćenje energije vetra.

3. OCENA RESURSA VETRA U SCG

Tehnički potencijal vetra je energetski potencijal vetra koji je moguće iskoristiti za proizvodnju električne energije primenom savremenih vetrogeneratora na ekonomski isplativ način. Pretpostavke koje su korišćene za procenu tehničkog potencijala vetra u SCG za proizvodnju električne energije su: za graničnu brzinu vetra uzeta je brzina od 4 m/s, u analizi je korišćen vetrogenerator nominalne snage 1,5 MW, za koeficijent iskorišćenja kapaciteta vetrogeneratora pretpostavljena je tipična vrednost od 0,25, usvojena vrednost za koeficijent iskorišćenja površine zemljišta je 0,02 (20%).

Tabela 3. Tehnički iskoristiv vetroenergetski potencijal i procena godišnje proizvodnje električne energije od vetra u SCG

Brzina vetra	Ukupna površina zemljišta	Korisna površina zemljišta	Broj vetrogeneratora	Instalisani kapacitet	Proizvodnja električne energije od vetra
m/s	km ²	km ²	—	MW	TWh/god.
≥5,1	3 600	X 0,2 → 720	X 9,3 → 6700	X 1,5 → 10000	6700x0,25x1, 5x10 ⁻⁶ x8760 → 22

Saglasno uvedenim kriterijumima dobijen je tehnički iskoristiv vetroenergetski potencijal u Srbiji i Crnoj Gori i procena godišnje proizvodnje električne energije od vetra. Podaci su sistematizovani u tabeli 3. Tehnički iskoristiv potencijal vetra u SCG, ako se aktiviraju zone sa srednjom brzinom vetra većom od 5,1 m/s, omogućava izgradnju 10000 MW vetrogeneratorskih kapaciteta. Ovi kapaciteti, uz pretpostavku niskog koeficijenta iskorišćenja kapaciteta od 0,25 (25 %) mogli bi da proizvedu oko 22 TWh godišnje električne energije.

Realni scenario izgradnje vetrogeneratora u Srbiji i Crnoj Gori je da se u prvih petnaest godina instalira oko 100 MW kapaciteta godišnje, što bi obezbedilo, na kraju ovog perioda, oko 10 % električne energije na ekološki najprihvatljiviji način:

$$P_{(posle.15god.)} = 100 \text{ MW} / \text{god} \cdot 15 \text{ god.} = 1500 \text{ MW} \quad (10)$$

$$E_{(posle.15god.)} = \eta \cdot P \cdot t = 0,25 \cdot 1500 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h} = 3,28 \text{ TWh} / \text{god.} \quad (11)$$

Na osnovu sprovedene kompletne analize, može se zaključiti da je vetar energetska resurs SCG čijim aktiviranjem bi se znatno povećali instalisani kapaciteti, raznovrsnost energetskih izvora i smanjila zavisnost od uvoza sve skupljih energetskih sirovina. Zvanični podaci ukazuju da je cena električne energije koju proizvedu vetrogeneratori, za lokacije bogate kvalitetnim vetrom, već konkurentna sa klasičnim izvorima. Buduća primena vetrogeneratori bi u našoj zemlji mogla da bude veoma raznovrsna i višenamenska. Koristeći obnovljivu, čistu i besplatnu energiju vetra, vetrogeneratori većih snaga (preko 1 MW) koji su pojedinačno ili u grupama priključeni na energetska mrežu, mogli bi uspešno da se koriste za budući razvoj industrije i privrede, zatim u poljoprivredi, kao i za proizvodnju električne energije za desetine hiljada naših domaćinstava (jer upravo domaćinstva sa 57,6 % su najveći potrošači električne energije u Srbiji, kojima je u 2004. godini iz konvencionalnih izvora EPS-a isporučeno ~24 TWh električne energije). Vetrogeneratori srednjih snaga mogli bi se koristiti u hibridnim energetskim sistemima koji su kombinovani sa drugim izvorima (fotonaponskim, hidro, dizel) i koji se mogu koristiti u poljoprivredi za navodnjavanje/odvodnjavanje, za napajanje vodenih pumpi, punjenje akumulatora i gorivnih ćelija i kod mašina koje kao gorivo koriste vodonik (snaga ovih vetrogeneratora je od 10-300 kW i ovakva snaga nije isplativa za povezivanje na električnu mrežu). Mali samostalni vetrogeneratori snage ispod 10-50 kW, mogli bi da se koriste za napajanje vodenih pumpi, grejanje, punjenje akumulatora i gorivnih ćelija itd.

EES SCG su strukturno povoljni za integraciju vetrogeneratora. Postojanje reverzibilne hidroelektrane Bajina Bašta omogućava preuzimanje viška električne

ne energije u uslovima pojačanog vetra odnosno proizvodnje vetrogeneratora. Takođe, stabilni hidropotencijali (Đerdapske hidroelektrane) mogu obezbediti efikasnu regulacionu rezervu i time stabilan rad sistema i u uslovima velike varijacije u proizvodnji vetrogeneratora. Priključenjem vetrogeneratorskih kapaciteta delom bi rasteretili prenosnu mrežu, smanjili ukupne gubitke i poboljšali naponske prilike. Vetroelektrane imaju kratak rok izgradnje (5 - 10 meseci), pa se energetska situacija na ovaj način može relativno brzo popraviti [2].

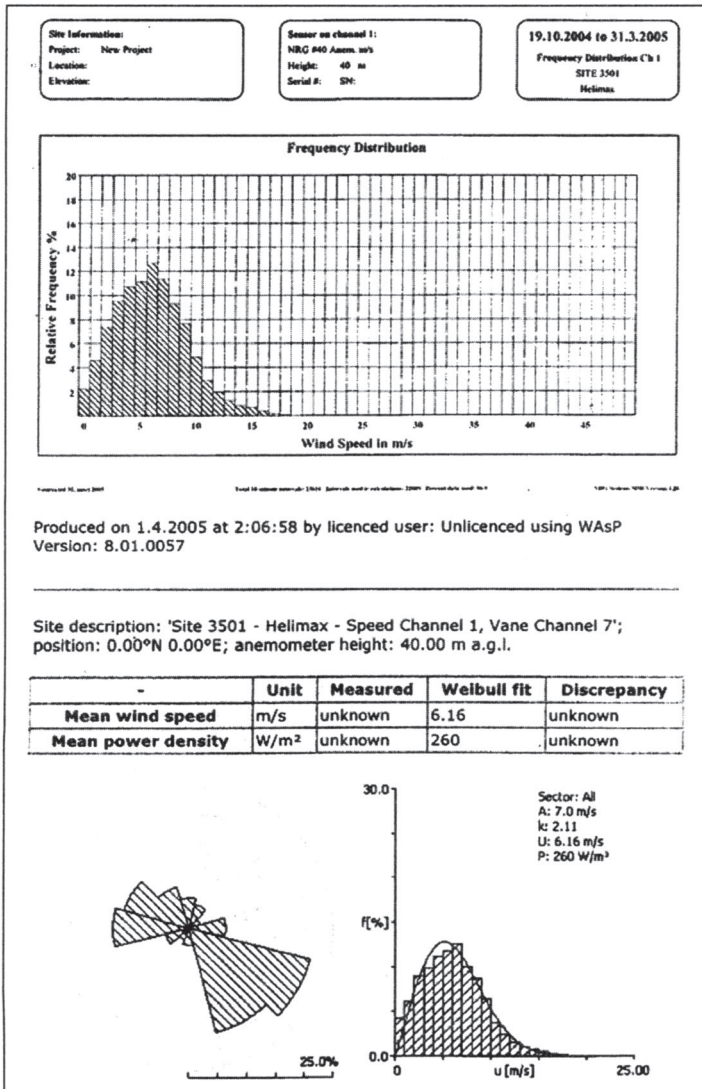
4. REZULTATI MERENJA NA POJEDINIM MIKROLOKACIJAMA

Radi verifikovanja podataka iz poglavlja 2, izvršena su merenja karakterističnih parametara vetra na više mesta u SCG. U ovom radu će biti prikazani rezultati za dve karakteristične lokacije: prva lokacija je u Vojvodini (Dolovo, kod Pančeva) - *ravničarski predeo*, a druga je u jugozapadnom delu Srbije (Vlasinsko jezero) - *planinska oblast*.

U toku izrade ovog rada posebna pažnja je bila posvećena proučavanju karakteristika vetra u Vojvodini, koja je kao ravničarski predeo, bogata kvalitetnim vetrom (manje turbulentnosti, stabilnijeg pravca brzine i veće gustine vazduha u odnosu na planinske lokacije) i takođe ima relativno malo snežnih padavina i pogodnu putnu infrastrukturu. Vazдушna strujanja u Vojvodini imaju poseban značaj s obzirom na relativno veliku učestanost vetrova iz različitih pravaca u toku godine i zbog pretežno poljoprivrednog karaktera područja, pri čemu je posebno važno zadržavanje vode u biljkama i zemljištu i smanjivanje isparavanja.

U mestu Dolovo sredinom 2004. godine postavljen je anemometrijski stub i pomoću instrumenata firme NRG na visini 40 m od tla obavljena su merenja od početka oktobra 2004. godine pa do danas. Rezultati merenja karakterističnih parametara vetra za period 19. 10. 2004. - 31. 3. 2005. dati su na slici 11. U ovom periodu najveća srednja brzina vetra je bila zabeležena u novembru ($v_{sr} = 6,6 \text{ m/s}$), dominantan pravac vetra je jugoistočni, a prosečna srednja brzina vetra bila je $v_{sr} = 6,16 \text{ m/s}$. Koristeći program WASP 8.0 i uzimajući u obzir topografiju terena, dobijena je odgovarajuća gustina snage vetra za ovaj period od $P_{sr} = 260 \text{ W/m}^2$ (klasa vetrova >3) i sasvim zadovoljavajuća frekvencija pojava brzina vetra većih od 5,1 m/s, pa je ova lokacija pogodna za buduću izgradnju vetrogeneratora. Procenjena srednja godišnja brzina vetra na ovoj lokaciji je $v_{sr} = 6,0 \text{ m/s}$, pa srednja godišnja vrednost električne energije po m^2 rotora turbine koja se može dobiti na ovoj lokaciji iznosi:

$$E_{el} = 3,2 \cdot v_{sr}^3 = 3,2 \cdot 6^3 \approx 690 \text{ kWh / m}^2 \text{ god.} \quad (12)$$

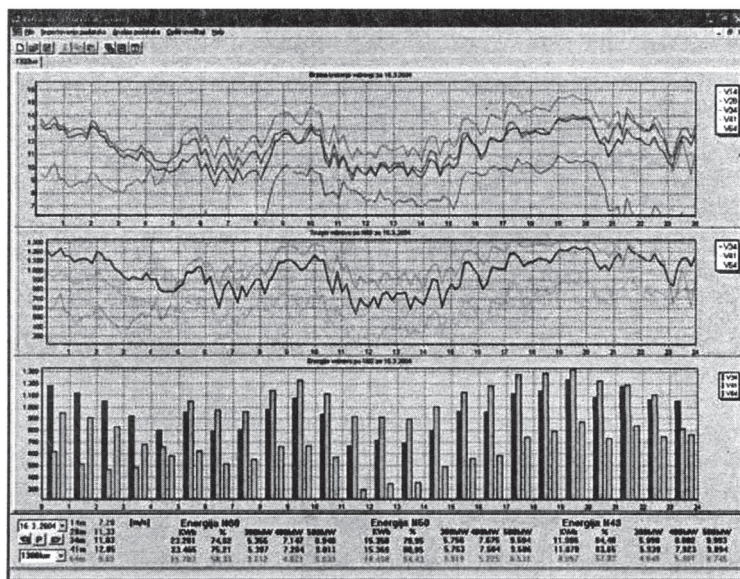


Slika 11: Merenje karakterističnih parametara vetra na lokaciji Dolovo

Hidrometeorološka merenja vetra na Vlasinskoj visoravni (1212 m) pokazuju da je ona izrazito vetrovita sa izraženim jugozapadnim vetrovima, pri čemu postoji više lokacija koje su potencijalno pogodne za izgradnju značajnih vetrogeneratorskih postrojenja. I u topografskom i meteorološkom pogledu region Vlasinskog jezera je pogodan za izgradnju farmi vetrogeneratora (nije pretežno

šumovit i nema oštre planinske vence), pa je hrapavost terena relativno mala, što pogoduje u pogledu visinskog profila brzine vetra i laminarnosti strujanja. Takođe, u ovom regionu se ima relativno malo snežnih padavina, pa je i u tom pogledu povoljan.

Na lokaciji Vlasinsko jezero meren je kvalitet vetra od 26. 5. 2003 – 26. 5. 2005. (ukupno 24 meseci). Postavljeno je pet istih anemometrijskih stubova na karakterističnim lokacijama u ovom regionu. Merni instrumenti, nabavljeni od nemačke firme Lambrecht iz Göttingena, su postavljeni na 5 visinskih nivoa (14 m, 28 m, 34 m, 41 m i 64 m) na stubovima ukupne visine 65 m iznad tla (+2,5 m ispod tla u betonski temelj). Merene su sledeće veličine: brzina vetra (desetosekundna, desetominutna i satna brzina), smer vetra, atmosferski pritisak, temperatura i vlažnost vazduha. Računata je, i šesta veličina i to tačka rose, koja je važna zbog mogućeg zamrzavanja. Softver koji je korišćen vrši kompletnu analizu: trenutne brzine $v(t)$ i srednje brzine v_{sr} vetra, trenutne snage odabranog tipa vetrogeneratora $P(t)$, srednje snage P_{sr} i estimaciju električne energije koju bi proizveo vetrogenerator na datoj lokaciji i datoj visini itd. Softver takođe omogućava čuvanje podataka (do 15 dana) i njihovo daljinsko očitavanje (putem GSM mreže i mobilnog telefona). Sistem raspolaže akumulatorskom baterijom sa solarnim punjenjem. Ovo je potrebno zbog grejača snage 100 W i napajanje elektronike snage 25 W.



Slika 12: Satne vrednosti brzine, snage i energije vetrova za 16. mart 2004. na lokaciji Vlasina

Na slici 12 prikazani su rezultati merenja za jedan prosečan dan. Analizirajući podatke očigledno je da Vlasinsko jezero predstavlja izuzetno dobru lokaciju za buduću izgradnju vetrogeneratora, jer srednja godišnja brzina vetra iznosi oko 9 m/s na visini 41 m, čemu odgovara gustina snage vetra oko 800 W/m² (klasa vetrova >6). Srednja godišnja vrednost električne energije po m² rotora turbine koja se može dobiti na ovoj lokaciji je: $E_{el} \approx 2300 \text{ kWh} / \text{m}^2 \text{ god.}$ Kapacitet buduće farme vetrogeneratora bi bio oko 200 MW, što bi zahtevalo investiciju od oko 200 miliona €. Uloženi novac bi se vratio za oko 10 godina, a sledećih 10 - 15 godina bi doneo dodatni prihod od oko 200 miliona €. Nakon 25 godina eksploatacije sledi revitalizacija ili zamena vetrogeneratora. U softveru koji je korišćen za analizu rada FVG na ovoj lokaciji uzet je standardni vetrogenerator Nordex N60, nominalne snage 1,3 MW. U dopunskoj analizi korišćeni su i vetrogeneratori manjih snaga: Nordex N50 (snage 800 kW) i Nordex N43 (snage 600 kW).

5. ZAKLJUČAK

Dalje usavršavanje tehnologije vetrogeneratora dovodi do permanentnog povećanja efikasnosti vetrogeneratora i pada cene električne energije koju oni proizvode, nasuprot porasta cene energije iz elektrana na fosilna goriva zbog iscrpljenosti izvora i ekoloških problema konverzije. Evropska unija je donela niz direktiva (Directive 2001/77/EC) u kojima, uz preciziranu dinamiku, obavezuje svoje članice na izgradnju obnovljivih izvora energije, a pre svih vetrogeneratora. Preliminarne analize vetroenergetskih resursa u SCG na bazi namenskih merenja karakterističnih parametara vetra koja su izvršena na više lokacija (u Vojvodini, zapadnoj i istočnoj Srbiji i u Crnoj Gori) pokazale su da u našoj zemlji postoje regioni sa značajnim vetroenergetskim potencijalom na kojima je moguća ekonomski isplativa izgradnja vetrogeneratorskih postrojenja. Globalni vetroenergetski potencijal u SCG procenjen je na 9-10 GW (~20 Twh/god.). Slaba ekonomska moć da se u potpunosti direktnim inicijativama podrži razvoj i implementacija vetroturbina u elektroenergetski sistem je glavni faktor koji karakteriše našu zemlju. Najbolje rešenje bi verovatno bilo obrazovanje i realizacija poreskih inicijativa u kombinaciji sa nekim direktnim novčanim ulaganjima. U Zakonu o energetici Republike Srbije od 24. 7. 2004. godine vetroelektrane su konačno dobile status povlašćenog proizvođača električne energije.

6. LITERATURA

- [1] J. F. Manwell, et al, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley and Sons Ltd, april 2002.

- [2] D. Mikičić, Ž. Đurišić, B. Radičević, *Globalna procena o količini električne energije koja bi se mogla dobiti pomoću vetrogeneratora u Srbiji i Crnoj Gori*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, jun 2003.
- [3] D. Mikičić, B. Radičević, Ž. Đurišić, *Wind Energy Potential in the World and in Serbia and Montenegro*, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 9, No 1, 2005.
- [4] B. Bošković, *Ostvarenje elektroenergetskog bilansa Državne zajednice Srbija i Crna gora u 2004. godini*, Elektroprivreda, br. 1, Beograd 2005, str. 90-103
- [5] *Mogućnost korišćenja energije vetra za proizvodnju električne energije*, EPS, Beograd 2002.
- [6] GWEC - Global Wind Energy Council, *WIND FORCE 12*, A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020, Greenpeace, Jun 2005.

WIND GENERATORS – PROMISING SOURCES OF THE ECOLOGICALLY CLEAR ELECTRIC POWER IN SERBIA AND MONTENEGRO

ABSTRACT:

Today, wind energy participates by not more than 0.6 % in the gross world production of electric energy. However, according to the presently existing world trends and due to the fact that the world's wind energy potential is immense, it can be predicted that in the following decades this low percentage might become thirty times larger. Experiences the world has had so far impose the necessity of analyzing technical possibilities for the construction of wind generators and the necessity to incorporate wind energy into the strategic model of the development of energetics in Serbia and Montenegro. In this paper we analyze the availability of wind energy on the global scale, in Europe and in Serbia and Montenegro. We show in this paper that in Serbia and Montenegro wind is the energy resource about 10 GW (20 TWh/year) whose activation would greatly enlarge already installed capacities, increase the diversity of types of energy sources and reduce the dependence on the importation of raw energy sources. In this paper special emphasis is put on the fact that the price of electric energy which is produced by wind generators is already competitive to the prices of energy produced by classical sources.

Keywords: *wind energy potential, wind generators, electric energy, ecology*