

POTENCIJAL ENERGIJE VJETRA U SR HRVATSKOJ

Wind Power Potential in Socialist Republic of Croatia

BRANKO CIVIDINI I DRAŽEN POJE

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Primljeno 20. lipnja 1986, u konačnom obliku 22. listopada 1986.

Sažetak: Na osnovi parametara Weibullove razdiobe c i k procijenjene su srednje godišnje i sezonske snage i energije vjetra na 10 m visine od tla za 32 lokacije u SRH. Uvažen je utjecaj hrapavosti z_0 koji je određen opisnom metodom (WMO-tablica). Za nekoliko izabranih lokacija z_0 je procijenjen iz podataka mjerenja vjetra (metoda Wieringa) i diskutirana je ovisnost raspoloživih snaga i energija o hrapavosti z_0 . Prilagodbenost Weibullove razdiobe stvarnim podacima mjerenja vjetra ispitana je Kolmogorov-Smirnovim testom. U kontinentalnom dijelu Hrvatske, uglavnom u ravničarskim područjima, potencijal energije vjetra je vrlo mali – ispod 100 W/m^2 . Na istočnom dijelu Jadranskog mora, posebno u njegovom južnom dijelu, vjetrovi: jaka bura i jugo uzrokuju da potencijal vjetra dostiže i do 446 W/m^2 (Palagruža).

Ključne riječi: snaga vjetra, energija vjetra, parametri Weibullove razdiobe, parametar hrapavosti.

Abstract: On the basis of Weibull's distribution function parameters c and k the mean annual and seasonal wind powers and energies at 10 m above ground for 32 locations in the Socialist Republic of Croatia were calculated. The influence of roughness parameter z_0 is taken into consideration on the basis of the WMO defined method. For several selected locations this parameter was estimated from wind data using the Wieringa method and the dependence of available wind power and energy on roughness parameter z_0 . The goodness of fit of Weibull's distribution function on measured data was tested by the Kolmogorov-Smirnov test. In the continental part of Croatia, in the majority of the lowland regions, the wind energy potential is very modest – under 100 W/m^2 . On the eastern part of the Adriatic Sea, especially in its southern part the wind potential reaches up to 446 W/m^2 due to strong bora and scirocco winds (Palagruža).

Key words: wind power, wind energy, Weibull distribution parameters, roughness parameter.

1. UVOD

Zbog pomanjkanja osnovnih baznih energenata, sve većih potreba za dodatnim količinama energija kao i zbog ekoloških razloga, već duže vrijeme nameće se potreba za istraživanjem tzv. alternativnih izvora energije. Od svih obnovljivih i ekološki čistih izvora energije, prvenstveno energije vjetra i sunca, očekuje se u budućnosti da značajnije sudjeluju u ukupnom nacionalnim, odnosno svjetskim potrebama za energijom. Prvi korak u mogućoj primjeni takvog oblika energije je istraživanje i procjena prirodno raspoloživog potencijala, na osnovi koje se izrađuje ekonomska analiza opravdanosti iskorištavanja takvog oblika energije na određenoj lokaciji ili području.

Zbog toga su u ovom radu prikazani rezultati istraživanja prirodno raspoloživog potencijala energije vjetra na području SRH za 32 lokacije na kojima su obavljena mjerenja i registracije brzine i smjera vjetra.

Ova je problematika već dugi niz godina predmet intenzivnog proučavanja u svijetu i za mnoge zemlje su procijenjene raspoložive energije vjetra na različitim visinama od tla (Hunt, 1981; Petersen, 1981; Jarass, 1981;

Lavagnini, 1982). Kod nas se tek u posljednjih nekoliko godina više pažnje posvećuje ovoj problematici (Milošavljević, 1977; Gburčik, 1981; Golub, 1983), a prva sustavna istraživanja raspoložive energije vjetra u Jugoslaviji rade se već duže vrijeme u Centru za meteorološka istraživanja RHMZ-a SRH.

2. VJETAR – IZVOR ENERGIJE

2.1. Općenito o vjetru

Vjetar je horizontalna komponenta strujanja zraka u atmosferi, a nastaje kao posljedica pretvaranja potencijalne energije atmosfere u kinetičku energiju, uglavnom pod utjecajem sile tlaka. Detaljnije gledajući strujanje zraka nastaje i održava se zbog nejednakog rasporeda i akumuliranja toplinske energije Sunca na različitim geografskim širinama. Zbog toga u sistemu opće cirkulacije atmosfere, vjetar djeluje kao mehanizam transporta topline iz nižih geografskih širina u više i obrnuto. Vjetar je vrlo promjenljiv meteorološki element u prostoru i vremenu naročito pri tlu, a ove varijacije određuju lokalni faktori (Technical Note 175, WMO, 1981): turbulen-

cija, svojstva podloge preko koje zrak struji, dnevno i noćno zagrijavanje (hlađenje) podloge, topografske karakteristike terena kao i vanjski poremećaji atmosfere mezo i makrorazmjera.

S energetskeg stajališta od navedenih faktora posebno je značajna turbulencija. Gburčik, 1981, pokazuje na primjeru košave da turbulentno strujanje daje čak i dvostruko više energije nego strujanje konstantne brzine. S druge strane razvijena turbulencija zraka nepovoljno djeluje na rad samih uređaja za iskorištavanje energije vjetera čija je konstrukcija izložena većim naprezanjima nego u slučaju slabo razvijene turbulencije.

Jedan od posebno važnih faktora u ovoj problematiki je i stupanj reprezentativnosti podataka vjetera za procjenu eolnog potencijala. Jarass, 1981, naveo je slijedeće faktore o kojima ovisi reprezentativnost podataka vjetera: visina mjerenja, vremenska rezolucija, period mjerenja, metoda mjerenja i primjenljivost na šire područje. Ovi faktori prije svega ovise o potrebama u istraživanju i primjeni i mogućnostima s kojima se raspolaže. Tako visina mjerenja može varirati od 10 do 50 m, pa čak i više od tla, period osrednjavanja može biti vrlo različit od 10 min do 1 h. Za dovoljan period mjerenja smatra se bar 8–10 godina mjerenja iako neki autori uzimaju da je dovoljan i manji broj godina (Lalas, 1983; Technical Note, WMO, 1981). Metoda mjerenja, odnosno vrsta mjernog instrumenta često može biti ograničavajući faktor u procjeni eolnog potencijala zbog različitih vlastitih grešaka i sistemskih karakteristika instrumenta, posebno kod prvih generacija anemometara i anemografa. Što se tiče primjenljivosti podataka vjetera na šire područje oko mjerne lokacije može se općenito reći da ona ovisi o reljefu terena na kojem je postavljen mjerni instrument i karakteru okolnih prepreka. Jasno je da je u uvjetima relativno ravnog i homogenog terena veća reprezentativnost nekog anemometra nego u uvjetima kompleksnog terena ili smještenog u urbanoj sredini. Utjecaj prepreka oko mjerne lokacije određuje veličinu parametra hrapavosti z_0 koji je procijenjen za svaku od 32 mjerne lokacije u SRH i uvažen kod proračuna raspoložive energije vjetera.

2.2. Energija vjetera

Kako vjetar predstavlja gibanje zraka u otvorenom sistemu ne možemo govoriti o integralnim snagama i energijama, već samo o njihovim gustoćama. Gustoća snage vjetera P definira se kao kinetička energija zraka koja protекne u jedinici vremena t kroz jediničnu površinu A (masa m koja prođe u jedinici vremena t kroz jediničnu površinu A jednaka je ρv):

$$\frac{P}{At} = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{At} = \frac{1}{2} \rho v^3, \quad (1)$$

gdje je ρ gustoća zraka, a v brzina vjetera. Uvažavajući turbulentne karakteristike vjetera, gustoća snage izražava se u obliku:

$$\frac{P}{At} = \frac{1}{2} \rho (\bar{v}^3 + 3 \bar{v} v'^2); \quad v = \bar{v} + v', \quad (2)$$

gdje je \bar{v} srednja brzina, a v' odstupanje od srednje brzine.

Međutim, kako klasični anemografi koji su u rutinskoj upotrebi u Hidrometeorološkim službama ne registriiraju fluktuacije v' , koristi se za srednju gustoću snage izraz (1). Prema Hennesseyu (1977) korištenje izraza (1) može uzrokovati greške u proračunu zbog nevažavanja turbulencija ili zbog pogrešne procjene broja klasa brzine vjetera.

Da bi se što više eliminirao utjecaj slučajnih grešaka mjerenja, kao i utjecaj šireg i užeg okoliša na režim strujanja zraka, koriste se u proračunu eolnog potencijala različite funkcije razdiobe učestalosti brzine vjetera. Ovi modeli razdiobe brzine vjetera predstavljaju osnovne pokazatelje vjetrovne klime i koriste se ne samo za proračun energije vjetera već i za procjenu ekstremnih brzina vjetera. Ekstremno velike brzine vjetera nisu od bitne važnosti za eolni potencijal jer se generatori vjetera isključuju kod takvih brzina, već su bitne samo u svrhu proračuna opterećenja od vjetera kojima aerogenerator može biti izložen u nekom vremenskom periodu. Od postojećih teorijskih razdioba koriste se za proračun energija vjetera Planckova, bivarijantna normalna, gama, odnosno njeni specijalni slučajevi Rayleighova i Weibullova razdioba učestalosti brzine vjetera (Hennessey, 1977; Tech. Note 175, WMO 1981). Weibullova razdioba se danas najčešće koristi i prihvaćena je kao dobra metoda za procjenu eolnog potencijala, pa je u ovom radu uzeta kao metoda za proračun prirodno raspoloživih energija vjetera na području SRH. Osnovni oblik dvoparametarske Weibullove razdiobe dan je izrazom (3):

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (3)$$

gdje c predstavlja tzv. parametar mjere i ima dimenziju brzine vjetera (m/s), a k je bezdimenzionalan parametar oblika. Kumulativna funkcija razdiobe za sve brzine $v < v_a$ ima oblik:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]. \quad (4)$$

Ocjenu uspješnosti prilagođenja Weibullove razdiobe moguće je odrediti na osnovi raznih statističkih testova, a u ovom radu korišten je Kolmogorov-Smirnov test (S) koji se za grupirane podatke definira kao maksimalna udaljenost između funkcija empiričke kumulativne razdiobe i očekivane kumulativne razdiobe čestina:

$$S = n \cdot \max |S_{n_i} - F_{n_i}|, \quad (5)$$

gdje je S_{n_i} empirička kumulativna, a F_{n_i} očekivana kumulativna vjerojatnost, a n je broj opažanja u skupu podataka (Schönwiese, 1985).

Podacima brzine vjetera izabranih stanica u ovom radu prilagođena je zapravo troparametarska Weibullova razdioba $f(c, k, x_0)$ pomoću programa MAXFIT na

UNIVAC-u 1100 (Fitz-Simons, 1979). Međutim, zbog malih vrijednosti parametra x_0 koje se kreću između 0.0 i 0.1, što bitno ne utječe na procjenu ostala dva parametra c i k , srednja gustoća snage P određena je prema izrazu (2), uz $A=1\text{ m}^2$ i $t=1$ god, sezona:

$$P = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

gdje je $\Gamma(x)$ gama funkcija. Gustoća zraka određena je na temelju sezonskih i godišnjih vrijednosti apsolutne temperature T (K) i tlaka zraka p (hPa), prema izrazu:

$$\rho = \frac{0,3484p}{T} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (7)$$

Treba napomenuti da su zbog poteškoća u kompjutorskoj obradi podataka, parametri c i k određeni iz osnovne razdiobe, a ne iz tzv. hibridne razdiobe čestina koja isključuje utjecaj broja tišina jer ne doprinose ukupnoj energiji vjetra što se preporučuje u novijoj literaturi (Takle, 1978 i Lavagnini, 1983). Izraz za hibridni oblik Weibulllove razdiobe glasi:

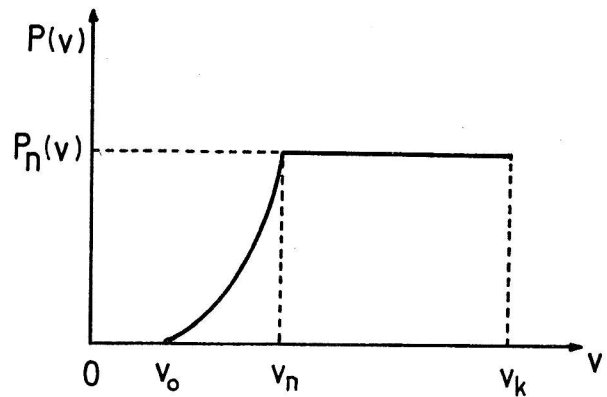
$$g(v) = p_c \cdot \delta(v) + (1 - p_c) \cdot f(v) \quad (8)$$

gdje je $g(v)$ hibridni, $f(v)$ osnovni oblik Weibulllove razdiobe, p_c je vjerojatnost pojavljivanja tišina, a $\delta(v)$ je Diracova funkcija. Svakako da bi prvi korak u budućoj analizi trebao biti proračun raspoloživih energija vjetra na osnovi hibridne razdiobe, dakle uz uvažavanje broja tišina. Ovaj problem je usko povezan i sa pragom osjetljivosti anemografa, koji ovisi o tipu instrumenta i njegovom redovnom održavanju. Za ispitani niz stanica ovi podaci nisu bili poznati u dovoljnoj mjeri za čitavo promatrano razdoblje. Za potrebe eventualnog budućeg iskorištavanja ove energije treba naglasiti da se od prirodno raspoložive energije vjetra odbija bar 40% jer idealni generator s idealnim stupnjem konverzije i neograničenim kapacitetom može, izvući iz vjetra najviše cca 60% energije, odnosno:

$$\frac{P_{\max}}{A} = 0,593 \rho \frac{v^3}{2} \quad (9)$$

Koeficijent 0.593 naziva se Betzova granica, koja se ne može premašiti nikakvim poboljšanjima sistema za konverziju energije vjetra. Stvarne energije od vjetra koje mogu proizvesti današnji aerogeneratori su još manje i kreću se od 25–48% prirodno raspoložive energije. Treba dodati da ovih 25–48% nije iz cijelog spektra brzina nego samo iz intervala koji određuju početna brzina za uključivanje uređaja v_0 i kritična brzina v_k kod koje se aerogenerator isključuje (slika 1). Ovo je vrlo važno znati kod izrade ekonomske analize opravdanosti izgradnje i kasnije eksploatacije.

Razni gubici koji se mogu javiti u eksploataciji vezani su uz nepovoljne meteorološke i druge uvjete (zaledjivanje, olujni vjetrovi, atmosfersko pražnjenje, korozija metala zbog soli i onečišćenja u atmosferi) i tehničkih ograničenja uređaja za konverziju vjetra, npr. nemogućnost postavljanja lopatica generatora točno pod pravim kutom u odnosu na smjer strujanja i sl.



Slika 1. Funkcija promjene izlazne snage aerogeneratora $P(v)$ u ovisnosti o brzini vjetra v (v_0 – početna brzina, v_n – nazivna brzina, v_k – kritična brzina).

Figure 1. Relation between wind velocity (v) and power output of the generator $P(v)$ (v_0 – cut-in speed, v_n – rated speed, v_k – critical speed).

2.3. Promjena vjetra i energije visinom

Promjena brzine vjetra visinom u prvih nekoliko stotina metara atmosfere ovisi o lokalnim faktorima vazanim uz karakteristike terena (hrapavost) i stabilnost atmosfere. Kako ne postoji jedinstvena analitička veza između brzine vjetra i visine koja bi važila za sve uvjete stabilnosti atmosfere, u upotrebi su različiti izrazi za promjenu vjetra visinom. Danas se najčešće koriste jednostavni logaritamski ili eksponencijalni izrazi koji povezuju brzinu vjetra i visinu ili gustoću snage i visinu u obliku:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{p_b} \quad \text{i} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{p_s}, \quad (10)$$

ili

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad \text{i} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left[\frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}\right]^3, \quad (11)$$

gdje indeksi 1 i 2 označavaju broj nivoa, a z_0 hrapavost terena, a eksponenti p_b odnosno p_s odnose se na brzinu, odnosno snagu vjetra.

Na relativno ravnom homogenom terenu moguće je relativno dobro procijeniti eksponente p , međutim u uvjetima kompleksnog terena upotreba ovih relacija nije opravdana (Peterson, 1978). Mnogi istraživači smatraju da je konstantna vrijednost od p loše pojednostavljenje i da p treba tretirati kao statistički parametar.

Kako u SRH, uz postojeće anemografe, ne postoje mjerenja na osnovi kojih bi mogli na direktan ili indirektan način odrediti osnovne parametre graničnog sloja atmosfere (z_0 , u^* , L itd), nije bilo moguće koristiti relaciju koju je dao Sedefian, 1980 za p kao funkciju hrapavosti i stabilnosti:

$$p = \frac{\Phi(z/L)}{[\ln(z/z_0) - \Psi(z/L)]} \quad \text{i} \quad z = (z_1 z_2)^{1/2}, \quad (12)$$

gdje su Φ i Ψ univerzalne funkcije koje ovise samo o sta-

bilnosti i za koje postoje izrazi u slučajevima labilne, neutralne i stabilne atmosfere. Zbog svega ovoga što je dosad rečeno, u ovom radu korištena je metoda predložena od Spera i Richardsa, 1979. U ovoj metodi pretpostavka je da je srednja vrijednost p ovisna jedino o hrapavosti terena i srednjoj brzini vjetra, dok ostali faktori uzrokuju statističke varijacije p oko tog srednjaka, pa zanemarujemo njihov utjecaj. Analogno možemo primijeniti na Weibullove parametre c i k i dobivamo slijedeće izraze:

$$c_2 = c_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{p_{c,1}} \quad (13)$$

$$p_{c,1} = p_o \frac{1 - \log c_1 | \log V_h}{1 - p_o \log(z_1 | z_p) | \log V_h} \quad (14)$$

$$k_2 = k_1 \frac{1 - p_o \log(z_1 | z_p) | \log V_h}{1 - p_o \log(z_2 | z_p) | \log V_h} \quad (15)$$

$$p_o = \left(\frac{z_o}{z_p} \right)^{0.2} \quad (16)$$

gdje su c_1 , k_1 i c_2 , k_2 parametri Weibullove razdiobe na visinama z_1 i z_2 , p_o je eksponent koji vrijedi za prizemne uvjete hrapavosti, V_h je brzina homogenog strujanja kad je $p = 0$, $V_h = 67$ m/s, a z_r je referentna visina (10 m).

Na osnovi izraza (6) lako se dobiva izraz za promjenu energije visinom u prizemnom sloju atmosfere gdje možemo uzeti $\rho_1 = \rho_2$ koja ovisi samo o parametrima Weibullove razdiobe c i k :

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^3 \frac{\Gamma(1 + 3/k_2)}{\Gamma(1 + 3/k_1)} \quad (17)$$

3. METEOROLOŠKI PODACI

3.1. Podaci o mjerenju vjetra

Na meteorološkim stanicama SRH, ovisno o tipu stanice i njezine opremljenosti, obavljaju se redovna motrenja, mjerenja ili registracije smjera i brzine vjetra.

Za potrebe ovog rada odabrane su 32 stanice na kojima se neprekidno registriraju smjer i brzina vjetra. Podaci o brzinama vjetra svrstani su u intervale brzina koji odgovaraju jačinama vjetra po Beaufortovoj skali (12 stupnjeva) i za svaku jačinu određen je srednji broj sati puhanja, sezonski i godišnje. Ovakav način svrstavanja podataka rađen je zbog toga da ostavimo mogućnost usporedbe s podacima vjetra onih stanica na kojima se obavljaju samo vizuelna motrenja jačine i smjera vjetra po Beaufortovoj skali, kao i zbog tradicije, odnosno dosadašnje prakse u RHMZ-u SRH.

Satni interval uzorkovanja vjetra određen je iz praktičnih razloga u vrijeme uvođenja anemografa i zadržao se do danas, iako se već duže vrijeme za različite potrebe pa i za proračun energije vjetra postavlja zahtjev za manjim osnovnim periodom osrednjavanja npr. 10 min, od-

nosno 20 min. Kako je vrijeme odziva današnjih generatora vjetra između 10 min i 1 sat, smatra se da su satni srednjaci razumna, a za sada kod nas gotovo i jedina osnova za energetska razmatranja. Treba napomenuti da se detaljni prikaz istraživanja dosadašnjih mjerenja vjetra, kvalitete podataka, te nekih osnovnih pokazatelja o radu postojećih anemografa u SRH nalazi u radu Poje, 1985, pa se na to u ovom radu nećemo posebno osvrta- ti.

3.2. Izbor stanica i kvaliteta mjerenih podataka

Od raspoloživih 39 meteoroloških stanica s anemografom u SRH, na osnovi kvalitete i dostupnosti podataka vjetra, izabrano je slijedećih 32 (tabela 1).

U ovoj tabeli navedeni su osnovni podaci o izabranim stanicama: datum početka rada, nadmorska visina, visina anemografa od tla i na osnovi opisa karakteristika podloge i okoline oko anemografa vrijednost parametra hrapavosti z_o koja je procijenjena prema tabeli iz Techn. Note 175, WMO, 1981. Za neke lokacije vrijednost z_o je određena metodom koju je predložio Wieringa, 1976, 1977, a koja uvažava faktor mahovitosti pri jačim strujanjima ($v \geq 6.0$ m/s) i karakteristike instrumenta kojim su mjereni podaci srednje i maksimalne brzine vjetra. Vrijednosti parametra z_o (θ) za pojedine smjerove vjetra θ mogu se dobiti na osnovi izraza:

$$z_o(\theta) = z_s \exp \left[- \frac{Af_T (1.42 + 0.3 \ln(-4 + 10^3 / U_t))}{\langle G \rangle - 1 + A - f_T A} \right] \quad (18)$$

gdje je z_s visina senzora anemografa nad tlom $\langle G \rangle$ je medijan faktora mahovitosti, a f_T , A i U_t su konstante ovisne o periodu osrednjavanja i tipu anemografa. Konačna vrijednost z_o za sve smjerove dobivena je ponderiranim osrednjavanjem, dakle uvažavanjem zastupljenosti pojedinog smjera u odnosu na ukupnu godišnju ružu vjetrova. Uz ove nove vrijednosti z_o za nekoliko lokacija u SRH proračunate su srednje snage i energije i komparirane s prethodno dobivenim vrijednostima, što je detaljnije opisano u poglavlju 4. Duljina niza podataka vjetra predstavlja značajan faktor u određivanju eolne energije, jer se smatra da su za realnu procjenu potrebni duži nizovi podataka i to od barem 5 godina (Technical Note 175, WMO, 1981, Lalas, 1983), 8 godina (Jarass, 1981) ili 10 godina (Mehta, 1979). Međutim i kraći nizovi podataka mogu dati bar orijentacionu sliku režima strujanja i raspoložive eolne energije, pa su u ovom radu korišteni podaci anemografa koji su tek nedavno počeli raditi ili su zbog kvalitete ili nedostupnosti podataka ti nizovi morali biti kraći (vidi tabelu 1). U toku promatranih perioda mjerenja vjetra nije rijedak slučaj premještanja stanice na novu lokaciju, promjene visine od tla ili promjene mjernog uređaja, npr: Slavonski Brod, Križevci, Kutina. Koliko to može biti značajno pokazuje primjer Slavenskog Broda gdje je u 1968. g. došlo do premještanja anemografa na novu lokaciju, pa je srednja godišnja brzina porasla za gotovo 1.5 m/s. Zbog istih

Tabela 1. Osnovni podaci o izabranim anemografskim stanicama u SRH.

Table 1. Basic data of selected anemograph stations in the SR Croatia

Red. br.	Stanica	Datum početka rada	Nadmorska visina (m)	Visina anem. nad tлом (m)	z_0 (m)	Korišteni period mjerenja (god)
Nr.	Station	Data when station started work	Altitude a. s. l. (m)	Height of anemog. above ground (m)		Used period of measurement
1.	Dalj	22. 7. 1980.	88	10	0.10	1980–83.
2.	Osijek-aer.	1. 6. 1980.	88	10	0.02	1980–83.
3.	Slavonski Brod	22. 10. 1961.	88	12	0.20	1966–75.
4.	Molve CPS ¹	27. 12. 1982.	125	35	0.05	1983–84.
5.	Kutina	12. 7. 1977.	107	60	0.05	1981–83.
6.	Križevci	15. 5. 1955.	155	10	0.17	1980–84.
7.	Varaždin	13. 12. 1973.	167	10	0.02	1974–79.
8.	Oborovo	9. 12. 1974.	101	12	0.05	1982–84.
9.	Zagreb-Pleso	1. 4. 1959.	106	10	0.02	1966–75.
10.	Zagreb-Maksimir	1. 4. 1962.	128	10	0.05	1966–75.
11.	Zagreb-Grič	1. 11. 1945.	157	23	0.90	1956–75.
12.	Puntijarka	30. 12. 1974.	988	22.5	2.00	1975–81.
13.	Pula-aer.	30. 4. 1968.	67	7.5	0.02	1975–84.
14.	Plomin TE ²	23. 8. 1978.	5	40	0.17	1978–82.
15.	Štrmac ³	28. 12. 1978.	340	33	0.05	1980–83.
16.	Rijeka	9. 3. 1978.	120	10	0.17	1979–84.
17.	Bakar ⁴	27. 7. 1974.	2	20	0.60	1974–77.
18.	Šoići ⁴	6. 4. 1974.	140	10	0.40	1974–77.
19.	Škrljevo	5. 5. 1979.	295	10	0.10	1979–83.
20.	Rijeka-aer. ⁵	15. 5. 1963.	85	8.5	0.02	1964–76.
21.	Jablan	20. 8. 1983.	650	10	0.10	1983–85.
22.	Ogulin	1. 1. 1971.	328	10	0.17	1975–84.
23.	Senj	1. 12. 1954.	26	16	0.60	1966–75.
24.	Mali Lošinj	17. 6. 1977.	53	10	0.20	1977–84.
25.	Plitvice	1. 8. 1980.	580	15	0.40	1980–85.
26.	Gospić	1. 6. 1962.	564	10	0.17	1966–75.
27.	Vir ⁶	1. 3. 1980.	4	50	0.04	1980–81.
28.	Šibenik	22. 12. 1976.	77	10	0.17	1977–84.
29.	Split-Marjan	1. 2. 1948.	122	9.4	0.15	1966–75.
30.	Dubrovnik-aer.	1. 2. 1963.	164	9.6	0.02	1966–75.
31.	Lastovo	14. 6. 1975.	186	15	0.05	1977–81.
32.	Palagruža	24. 5. 1971.	98	7.5	0.17	1972–75.

¹ End of measurement in October 1985.

² Elaboration of data ceased in April 1983.

³ End of measurement in March 1984.

⁴ End of measurement in April, resp. in June 1977.

⁵ Cited date represents the beginning of anemograph registration in Omišalj; wind measurement started at the airport on 30 April 1970.

⁶ End of measurement in September 1982.

Notice: Description of immediate and greater vicinity of measurement locations due to complexity and large volume could not be given here.

¹ Prestao s radom u listopadu 1985. g.

² Prestala obrada podataka u travnju 1983.

³ Stanica prestala s radom u ožujku 1984. g.

⁴ Prestala s radom u travnju, odnosno lipnju 1977. g.

⁵ Navedeni datum je početak rada anemografa u Omišlju, a na samom aerodromu je mjerenje vjetra počelo 30. 4. 1970. g.

⁶ Prestao s radom u rujnu 1982. g.

Napomena: Opis neposrednog šireg i užeg okoliša mjernog mjesta zbog složenosti i opsežnosti ovdje nije bilo moguće dati.

razloga podaci vjetra mjereni u Križevcima uzeti su tek od 1980. g. iako ovaj anemograf radi od 1955. g. U Kutini je senzor anemografa u 1981. g. premješten s 30 m na 60 m, pa su podaci jednog i drugog perioda obrađeni odvojeno. Primjer odbacivanja podataka vjetra zbog loše kvalitete mjerenja je u slučaju Daruvara gdje u većem dijelu mjernog perioda maksimalne srednje satne brzine vjetra ne prelaze 8 m/s, dakle 4 B, dok susjedne stanice u istom periodu bilježe vjetrove i do 9 B, dakle više od 20 m/s.

4. REZULTATI

4.1. Rezultati testiranja prilagođenosti Weibullove razdiobe mjerenim podacima (H_0), Kolmogorov-Smirnovim testom, pokazuju kako se i očekivalo vrlo dobro slaganje. Uz standardne nivoe značajnosti, odnosno vjerojatnosti pogreške prve vrste $\alpha = 0.05$ hipoteza H_0 se odbacuje u 4 slučaja (Zagreb-Maksimir, Štrmac, Šibenik i Dubrovnik aer.), a za $\alpha = 0.01$ hipoteza se odbacuje samo za Dubrovnik aerodrom. Za ilustraciju metode rada dane su u tabeli 2 vrijednosti parametara c i k za 2 lokacije reprezentante šireg područja za Zagreb (kontinentalni dio) i Split (obalno područje) za godinu i sezone na 10 m visine.

Tabela 2. Vrijednosti parametara Weibullove razdiobe c i k na 10 m visine od tla za Zagreb-Maksimir i Split-Marjan.

Table 2. Values of c and k parameters of Weibull's distribution at 10 m above ground for Zagreb-Maksimir and Split-Marjan.

Stanica		Proljeće	Ljeto	Jesen	Zima	Godina
Station		Spring	Summer	Fall	Winter	Year
Zagreb-Maksimir	c	2.73	2.24	1.74	1.67	2.06
	k	1.35	1.39	1.07	0.96	1.13
Split-Marjan	c	5.15	3.75	4.75	5.86	4.82
	k	1.27	1.39	1.28	1.38	1.29

Na osnovu procijenjenih parametara c i k Weibullove razdiobe čestina klasa brzina svake izabrane stanice i ostalih parametara po već opisanom algoritmu određene su vrijednosti srednje gustoće snage (W/m^2) i energije (kWh/m^2) na 10 m za navedene 32 lokacije u SRH za godinu koje su dane u tabeli 3.

U ovoj tabeli pored ukupne raspoložive energije E dane su i vrijednosti raspoloživih energije (E_I i E_{II}) na visini 10 m od tla za dva tipa generatora vjetra koji imaju slijedeće karakteristike (tabela 4).

Možemo vidjeti da su najveće vrijednosti snaga i energija, kao što se to i očekivalo, dobivene za jadransko-obalno područje, posebno tamo gdje su izraženiji utjecaji lokalnih vjetrova bure i juga (Plomin TE, Senj, Split-Marjan, Lastovo i Palagruža).

Dobivene vrijednosti međutim na ovom području znatno variraju ovisno o stupnju izloženosti lokacije, nadmorskoj visini i položaju anemografa (urbana sredina, aerodrom i dr). Tako su u Bakru i Rijeci dobivene najmanje vrijednosti srednje snage P od $16.2 W/m^2$ i $19.4 W/m^2$, što je logično ako se zna da su anemografi smješteni u urbanim sredinama, a u Bakru još i u izrazito zaklonjenom položaju s obzirom i na buru i na jugo. U neposrednoj blizini Bakra, ali na cca 140 m većoj nadmorskoj visini, na lokaciji Šoići snaga vjetra kao i raspoloživa energija je čak cca 4 puta veća nego na desetak metara nad tлом u Bakarskom zaljevu. Interesantno je da je u blizini, u Škrljevu, koje je na još većoj nadmorskoj visini ($H_S = 295$ m), snaga vjetra manja nego u Šoićima i iznosi $53.9 W/m^2$. Sličan primjer je u Istri oko Plomina gdje je Štrmac ($H_S = 340$ m) na čak više od 300 m većoj nadmorskoj visini od lokacije Plomin TE ($H_S = 5$ m) a ima na 10 m visine od tla cca 2 puta manju snagu i energiju vjetra. Ovdje se zacijelo radi o kanaliziranju strujanja u kotlini u kojoj je smješten anemograf na termoelektrani Plomin TE. Utjecaj urbane sredine u priobalnom dijelu SRH može se vidjeti na primjerima Šibenika i Vira. Iako su snage vjetra približno iste i iznose nešto preko $100 W/m^2$, vidimo da se iznosi ukupnih energija E , E_I i E_{II} razlikuju. Na Viru imamo gotovo 10–25% više prirodno raspoložive energije nego u Šibeniku. Razlog tome je što je zastupljenost tišina i slabih vjetrova u Šibeniku značajno veće nego na Viru, a što je prvenstveno posljedica urbane sredine, odnosno povećane hrapavosti terena.

Najveće vrijednosti snage vjetra dobivene su za već navedene lokacije gdje je posebno izraženo pojačano strujanje bure na sjevernom Jadranu (Senj) i juga na vanjskim otocima južnog Jadrana (Lastovo i Palagruža). Vrijednosti snage vjetra na ovim lokacijama značajno premašuju granicu od $100 W/m^2$ koja se u literaturi navodi kao prvi grubo pokazatelj da se ekonomski isplati iskorištavanje vjetra (Hunt, 1981). Palagruža, za koju je dobivena najveća snaga od $455.7 W/m^2$, ima gotovo $4000 kWh/m^2$ godišnje prirodno raspoložive energije, a za nepovoljnije izabran aerogenerator (II kombinacija) gotovo $2900 kWh/m^2$ godišnje, od koje, spomenimo još jednom, danas u najboljem slučaju možemo iskoristiti 48%. Za ilustraciju možemo na primjeru Palagruže u slučaju aerogeneratora manje snage vidjeti o kolikim količinama godišnje energije se radi.

Površina koju zahvaćaju lopatice generatora, odnosno promjer rotorskog kola, obično je daleko veći od $1 m^2$, npr: za 10 kW aerogeneratore je taj promjer obično $d = 10$ m, i uz stupanj iskorištenja cca 42% dobivena godišnja energija može biti cca 95 MWh, što uz pretpostavljenu prosječnu godišnju potrošnju po domaćinstvu od 4 MWh znači da takav generator može opskrbljivati cca 24 domaćinstva.

U kontinentalnom dijelu Hrvatske dobivene vrijednosti snage i energije su manje, ali pokazuju isto tako znatne varijacije. Najmanje vrijednosti snage dobivene su na lokaciji Zagreb-Grič (u urbanoj sredini) od samo

Tabela 3. Vrijednosti srednje snage \bar{P} i energije E , E_I i E_{II} na području SRH na 10 m visine za godinu.

Table 3. Annual values of mean wind power \bar{P} and energy E , E_I and E_{II} for the area of Croatia at 10 m above the ground.

Red. br.	Stanica	\bar{P} (W/m ²)	E (kWh/m ² god)	E_I	E_{II}	Red. br.	Stanica	\bar{P} (W/m ²)	E (kWh/m ² god)	E_I	E_{II}
1.	Dalj	14.2	124	75	21	17.	Bakar	16.2	131	67	29
2.	Osijek-aer.	32.6	286	183	60	18.	Šoići	68.3	595	339	140
3.	Slavonski Brod	21.3	182	107	41	19.	Škrljevo	53.9	411	212	88
4.	Molve CPS	32.9	375	300	194	20.	Rijeka-aer.	42.7	366	227	90
5.	Kutina	16.3	139	106	52	21.	Jablan	40.1	337	205	90
6.	Križevci	16.5	145	70	25	22.	Ogulin	14.2	121	69	17
7.	Varaždin	28.0	235	151	57	23.	Senj	332.6	2915	2554	1692
8.	Oborovo	12.0	105	32	12	24.	Mali Lošinj	70.4	617	338	180
9.	Zagreb-Pleso	24.5	203	112	39	25.	Plitvice	9.6	84	19	8
10.	Zagreb-Maksimir	21.2	166	102	35	26.	Gospić	22.8	199	102	46
11.	Zagreb-Grič	3.5	30	17	4	27.	Vir	106.8	925	795	483
12.	Puntijarka	24.4	213	175	90	28.	Šibenik	103.5	833	641	416
13.	Pula-aer.	52.7	456	365	162	29.	Split-Marjan	186.5	1630	1372	830
14.	Plomin TE	260.8	2286	1324	939	30.	Dubrov. aer.	109.1	954	911	539
15.	Štrmac	125.1	1097	1003	711	31.	Lastovo	237.0	2070	2013	1641
16.	Rijeka	19.4	170	71	20	32.	Palagruža	445.7	3995	3615	2890

Tabela 4. Karakteristike odabranih aerogeneratora.

Table 4. Characteristics of selected wind generators

	početna brzina v_0 m/s	nazivna brzina v_n m/s	kritična brzina v_k m/s
	starting speed V_0 m/s	rated speed V_n m/s	critical speed V_k m/s
I kombinacija	1.5	8.0	17.2
II kombinacija	3.4	8.0	17.2

3.5 W/m² i prirodno raspoložive energije od 30 kWh/m² godišnje. Lokacije u blizini, ali u uvjetima djelomično ili potpuno otvorenog terena (Zagreb-Maksimir i Zagreb-Pleso), imaju snage preko 20 W/m² i raspoložive energije od 166, odnosno 203 kWh/m² godišnje. Na Puntijarki, jednoj lokaciji na planinskim otvorenim vrhovima ($H_S = 988$ m) u sjeverozapadnom i istočnom dijelu Hrvatske, na 10 m visine od tla nema bitne razlike od potencijala vjetra u nizini u uvjetima slobodno otvorenog terena.

Najveće vrijednosti u tom dijelu Hrvatske dobivene su za lokaciju Molve CPS, za koju snaga prelazi vrijednost 40 W/m², a raspoloživa energija je 375 kWh/m² godišnje. U gorskom dijelu Hrvatske na osnovi malog broja mjernih lokacija dobiveno je da su najmanje vrijednosti snage vjetra u Plitvicama od samo 9.6 W/m², a najveće na lokaciji Jablan u Gorskom kotaru od 40.1 W/m². Ovako male vrijednosti u Plitvicama su vjerojatno posljedica nepovoljnog položaja anemografa koji je smješten na krov hotela, okruženog šumom na udaljenosti od stotinjak metara, što na neki način modificali-

ra režim strujanja, a to se može vidjeti i po broju tišina u ukupnoj godišnjoj statistici koja iznosi čak 47.1%.

4.2. Analizirajući visine od tla na kojima godišnja prirodno raspoloživa snaga vjetra dostiže 100 W/m², možemo vidjeti u tabeli 5. da su na području SRH razlike vrlo velike, a jasno je da to ovisi prije svega o stvarnim režimima strujanja iznad pojedinih lokacija.

Tabela 5. Pregled visina iznad tla na kojima se dostiže granična raspoloživa snaga vjetra 100 W/m².

Table 5. Survey of altitudes above ground at which the limit of available wind power of 100 W/m² is reached for selected stations.

<10 m	Plomin TE, Štrmac, Senj, Vir, Šibenik, Split-Marjan, Dubrovnik-aer., Lastovo, Palagruža
10–20 m	Šoići, Mali Lošinj
20–30 m	Puntijarka, Pula-aer., Škrljevo
30–50 m	Molve, Rijeka-aer., Jablan
>50 m	Dalj, Osijek-aer., Slavonski Brod, Kutina, Križevci, Oborovo, Zagreb-Pleso, Zagreb-Maksimir, Zagreb-Grič, Rijeka, Bakar, Ogulin, Plitvice, Gospić

Iz ove tablice očito je da se granica od 100 W/m² dostiže tek iznad 50 m u cijelom području sjeverozapadne i istočne Hrvatske osim za lokacije Molve i Puntijarka. U slučaju Molve nije jasno odakle tako visoki eolni potencijal u odnosu na okolne lokacije. Greške u ekstrapolaciji podataka nisu moguće zbog toga što je visina mjerenja 35 m od tla i snaga je proračunata na osnovi podataka stvarnog režima vjetra. Usporedimo li to s Kutinom gdje se mjerenja vjetra obavljaju na 60 m, a koja

se prema opisu terena i vrijednosti z_0 nalazi u vrlo sličnim lokalnim uvjetima, spomenimo da su dobivene daleko manje snage vjetra koje ne prelaze ni 50 W/m^2 na visini 50 m od tla, pa za sada ne nalazimo logičan razlog za povećani eolni potencijal u Molvama.

U slučaju Puntijarke bilo je za očekivati povećani eolni potencijal jer je poznato da je na slobodnim planinskim vrhovima i strujanje pojačano. Treba svakako spomenuti da je na ovoj lokaciji porast snage na svakih 10 m visine od tla cca 100% do 30 m, a od 30–50 m iznosi cca 50%, tako da na visini 50 m raspoloživa snaga vjetra dostiže 200 W/m^2 . Valja napomenuti da sadašnja lokacija anemografa na tornju unutar šumskog područja, zbog visokih stabala koja dosižu gotovo razinu anemografa, ne može dati pravu informaciju o prilikama režima vjetra na „standardnoj“ visini od 10 m. U blizini, u ravničarskom području (Zagreb) taj je porast daleko manji i iznosi od cca 24–40% do 30 m visine, a cca 15% na svakih 10 m u intervalu od 30 do 50 m, pa je raspoloživa snaga nešto preko 50 W/m^2 na 50 m visine.

Interesantno je da u ovu grupu stanica gdje se $P = 100 \text{ W/m}^2$ dostiže tek iznad 50 m ulazi i većina stanica u gorskom dijelu Hrvatske (Ogulin, Plitvice i Gospić), kao i lokacije gradova Rijeke i Bakra o kojima je već diskutirano.

Navedena snaga vjetra na manjim visinama od tla (do 30 m) dostiže se samo u priobalnom području Hrvatske i na lokacijama slobodnih planinskih vrhova, ako Puntijarku prihvatimo kao njihov reprezent.

4.3. U tabeli 6. prikazane su sezonske i godišnje vrijednosti srednjih snaga vjetra na 10 m visine od tla (u W/m^2) za nekoliko izabranih lokacija u SRH.

visine značajno manje, dok su u proljeće (Zagreb–Pleso, Ogulin, Palagruža) ili u zimi (Puntijarka, Plomin TE, Senj, Split–Marjan i Palagruža) značajno veće od srednje godišnje snage.

4.4. Kako je već navedeno u poglavlju 3.2. prikazat ćemo ukratko i razlike u dobivenim snagama i energijama u ovisnosti o parametru z_0 (tabela 7).

Za anemografe u Lastovu i Palagruži koji su smješteni na vrhu izolirane stijene, odnosno na hrptu, dakle u uvjetima kompleksnog terena, teško je iz tabele WMO odrediti vrijednost z_{01} jer ne postoje opisi terena koji bi odgovarali takvim lokacijama. Dogovoreno su uzete vrijednosti z_0 koje vrijede za relativno homogen teren okružen preprekama kao drveće, živica, manje zgrade. Tako je za Lastovo uzeta vrijednost $z_{01} = 0.05 \text{ m}$, a za Palagružu $z_{01} = 0.17 \text{ m}$.

Na osnovu već opisane metode Wieringe dobivena je za Lastovo vrijednost $z_{02} = 0.11 \text{ m}$, a za Palagružu $z_{02} = 0.05 \text{ m}$. Možemo vidjeti da iako postoje znatne razlike između dobivenih parametara z_{01} i z_{02} , razlike između dobivenih godišnjih snaga i energija nisu tako velike. Naime, kod Palagruže je dobivena na 10 m visine od tla samo 3% manja godišnja snaga, odnosno raspoloživa energija, a kod Lastova gotovo isto manje, odnosno cca 3.5% manje nego u slučaju procjene uz z_{01} . Na 50 m visine za Palagružu je dobivena cca 20% godišnja manja snaga, odnosno energija, dok je za Lastovo dobivena cca 11% veća godišnja vrijednost.

Plitvice su primjer gdje postoje velike razlike između procijenjenih veličina z_0 . Tako je iz tabele WMO određena vrijednost $z_{01} = 0.40 \text{ m}$, a na temelju metode Wieringe $z_{02} = 2.38 \text{ m}$, što jasno uzrokuje znatna razli-

Tabela 6. Vrijednosti srednjih snaga vjetra \bar{P} na 10 m visine (W/m^2) za nekoliko izabranih stanica u SRH za sezone.

Table 6. Seasonal values of mean wind power \bar{P} at 10 m above ground from several selected stations in Croatia. Seasons: Spring, Summer, Fall, Winter, Year

STANICA SEZONA	ZAGREB -PLESO aer.	PUNTI- JARKA	OGULIN	PLOMIN TE	SENJ	SPLIT- -MARJAN	PALA- GRUŽA
PROLJEĆE	45.6	18.3	21.3	134.8	257.6	238.6	511.5
LJETO	13.9	7.9	9.5	119.3	141.3	71.2	255.7
JESEN	16.1	27.7	9.1	443.4	333.9	179.9	492.9
ZIMA	23.9	53.8	19.3	679.0	614.4	292.9	592.3
GODINA	24.5	24.4	14.2	260.8	332.6	186.5	445.7

Općenito se može reći da postoje znatne razlike u dobivenim sezonskim vrijednostima snage vjetra na istoj lokaciji. Najveće vrijednosti snage vjetra mogu se očekivati u proljeće (Zagreb–Pleso i Ogulin) ili u zimi (Puntijarka, Plomin TE, Senj, Split–Marjan i Palagruža). Najniže vrijednosti dobivene su za ljeto, osim za Ogulin gdje je u jesen dobivena nešto manja vrijednost nego u ljetu.

U odnosu na godišnje vrijednosti srednje snage vjetra možemo vidjeti da su vrijednosti snage u ljetu na 10 m

ke između raspoloživih snaga i energija vjetra. Tako je na 10 m visine dobivena cca 14% manja raspoloživa snaga (energija), dok je na većim visinama obratno, i na 50 m visine dobivena je čak cca 70% veća snaga (energija).

Na primjeru Vira, gdje su mjerenja vjetra obavljena istodobno na dvije visine (10 i 50 m), možemo na osnovi poznatih raspoloživih snaga i energija na ove dvije visine odrediti ukupnu vrijednost z_0 za sve smjerove vjetra.

Spomenimo da je iz tabele WMO određena vrijednost $z_{01} = 0.04 \text{ m}$, a iz omjera mahovitosti $z_{02} = 0.15 \text{ m}$,

Tabela 7. Vrijednosti srednje snage \bar{P} (W/m^2) i energije E (kWh/m^2 god) na 10 i 50 m za nekoliko izabranih lokacija u SRH u ovisnosti o parametru hrapavosti z_0 (m) za godinu.

Table 7. Annual values of mean wind power \bar{P} (W/m^2) and energy E (kWh/m^2 year) at 10 and 50 m above ground for several selected locations in Croatia dependent on roughness parameter z_0 (m).

STANICA		z_{01} (m)	\bar{P} (W/m^2)	E (kWh/m^2 god)	z_{02} (m)	\bar{P} (W/m^2)	E (kWh/m^2 god)
LASTOVO	10 m	0.05	237.0	2070	0.11	229.0	2007
	50 m		516.0	4508		573.3	5026
PALAGRUŽA	10 m	0.17	445.7	3995	0.05	441.5	3870
	50 m		1077.0	9441		865.0	7583
PLITVICE	10 m	0.40	9.6	84	2.38	8.2	72
	50 m		39.6	347		67.4	591
VIR	10 m	0.04	106.1	925	0.15	106.8	925
	50 m		338.9	2850		310.3	2718

što uzrokuje da je dobivena snaga (energija) na 50 m visine manja za cca 8% u odnosu na prvu procjenu.

Indirektna metoda procjene z_0 na osnovi kako je već rečeno, poznatih snaga (energija) na 10 i 50 m daje vrijednost $z_{03} = 0.20$ m. Ovo pokazuje da je u uvjetima kamenitog, blago nagnutog ravničarskog terena hrapavost veća nego što je u sličnim uvjetima travnatog terena, pa je zato tabela dala prenisku vrijednost. S druge strane, možemo vidjeti da za ovakve potrebe istraživanja metoda Wieringa daje bar u ovakvim lokalnim uvjetima terena dobru procjenu hrapavosti.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu dana su osnovna saznanja o mogućnostima procjene energije vjetra kao i o faktorima koji utječu na režim vjetra, odnosno na procjenu eolnog potencijala nekog područja. Na osnovi raspoloživih materijala mjerenja vjetra na 32 lokacije u SRH dane su prirodno raspoložive i „stvarne“ vrijednosti srednje gustoće snage za dani generator i energije na 10 m visine od tla.

Dobivene vrijednosti pokazuju da postoje znatne razlike u raspoloživim snagama (energijama) ovisno o geografskim uvjetima (kontinentalni, primorski dio SRH), stupnju izloženosti lokacije (reljef), nadmorskoj visini i položaju anemografa (utjecaj prepreka oko mjerne lokacije).

Najveće vrijednosti dobivene su na priobalnom području SRH gdje su izraženi utjecaji lokalnih vjetrova bure i juga, i tu je na većini lokacija na 10 m visine premašena granica od $100 W/m^2$ kod koje se računa da bi iskorištavanje energije vjetra moglo biti ekonomski isplativo.

Najveće vrijednosti snage i energije za godinu dobivene su za Palagružu, a najmanje za Bakar.

U kontinentalnom dijelu SRH dobivene su daleko manje raspoložive snage (energije) za godinu koje nigdje na 10 m visine ne dostižu spomenutu granicu od $100 W/m^2$. Najveće vrijednosti na 10 m visine u ravničarskom dijelu SRH dobivene su za Molve, a u gorskom dijelu za Jablan.

Interesantno je da je na mjernom mjestu Puntijarka na 10 m visine dobivena približno ista vrijednost snage vjetra kao i u ravničarskom otvorenom terenu (Zagreb–Pleso, Zagreb–Maksimir). Međutim, porast raspoložive snage visinom je na mjestu Puntijarke znatno veći nego na ostalim mjernim mjestima u kontinentalnom dijelu SRH, jer se granica od $100 W/m^2$ dostiže već na 20–30 m iznad tla.

Najmanje vrijednosti dobivene su u urbanim uvjetima za Zagreb–Grič, odnosno u uvjetima kompleksnog terena za Plitvice i Ogulin.

Vrijednost snage vjetra za sezone za sedam izabranih lokacija pokazuju da su najveće vrijednosti u kontinentalnom dijelu SRH dobivene u proljeće, dok je to na priobalnom dijelu SRH u zimskom periodu godine. Najniže vrijednosti u pravilu dobivene su u ljeto, osim za Ogulin gdje se minimum javlja u jesen.

Usporedba dobivenih snaga (energija) u ovisnosti o parametru hrapavosti z_0 za nekoliko lokacija (Lastovo, Palagruža, Plitvice i Vir) pokazuje da veće promjene vrijednosti z_0 mogu uzrokovati značajne promjene u raspoloživim snagama, odnosno energijama.

Proširenjem broja stanica sa anemografima, kao i detaljnijim upoznavanjem i uvažavanjem šireg i užeg okoliša mjernog mjesta i s obzirom na smjer, stvorit će se uvjeti za detaljnije istraživanje energije vjetra na području SRH.

LITERATURA

- Fitz-Simons, T. and Holland, D. M., 1979: The maximum likelihood approach to probabilistic modeling of air quality data, EPA-500/4, 34 pp.
- Gburčik, P., 1981: Energetski potencijal vetra na teritoriju Jugoslavije i mogućnosti izgradnje krupnih aeroenergetskih sistema, III Savjetovanje o energiji u okviru RAST-YU-81., 28-30. 10. 1981, Opatija 49-73.
- Golub, M., 1983: Raspoloživi vjetrovi potencijal na području Zagreba, Sunčeva energija, Vol. 4, No 1, 3-7.
- Hennessey, J. P., 1977: Some aspects of wind power statistics, J. Appl. Met., Vol. 16, No 2, 119-128.
- Hunt, V. D., 1981: Windpower - A handbook on wind energy conversion systems, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 461 pp.
- Jarass, L., Hoffmann, Jarass A., Obermair G., 1981: Wind energy, Berlin.
- Lalas, D. P., Tselepidaki, H., Theoharatos, G., 1983: An analysis of wind power potential in Greece, Sol. Ener., Vol. 30., No 6, 497-505.
- Lavagnini, A., Di Giacomo, G., Fisauli, V., Fox, F., Fracassi, G., Guerrini, A., Stellato, G., Tiribocchi, S., 1982: Calcolo della potenzialita eolica per 48 localita italiane, Ener. Alt. Vol., 4, No 15, 30-39.
- Lavagnini, A. and Stellato, G., 1983: Rappresentazione analitica della distribuzioni di velocita del vento, Ener. Alt., Vol. 5, No 21, 35-41.
- Mehta, K. C., and Cermak, J. E., 1979: Application of wind data and definition of needs, Proceedings of the workshop on wind climate, Nov. 1979, North Carolina, 6-7.
- Milosavljević, B., 1977: Metod procene aeroenergetskog potencijala, Savjetovanje „Sunčeva energija u Jugoslaviji”, 22-24. 03. 1977., Beograd.
- Petersen, E. L., Troer, I., Frandsen, S., Hedegaard, K., 1981: Danish windatlas, RISO National Laboratory, Copenhagen, 229 pp.
- Peterson, E. W. and Hennessey, J. P. Jr., 1978: On the use of power laws for estimates of wind power potential, J. Appl. Met., Vol. 17, No 3, 390-394.
- Poje, D., 1985: Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u SRH, Građevinar, God 37, Br. 1, 7-14.
- Schönwiese, C. D., 1985: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, Berlin, 231 pp.
- Sedefian, L., 1980: On the vertical extrapolation of mean wind power density, J. Appl. Met., Vol. 19, No 4, 488-493.
- Spera, D. A. and Richards, T. R., 1979: Modified power law equations for vertical wind profiles, Conference and workshop on wind energy characteristics and wind energy siting, 19-21 June 1979, Oregon, 47-58.
- Takle, E. S. and Brown, J. M., 1978: Note on the Use of Weibull statistics to characterize wind speed data, J. Appl. Met., Vol. 17, No 3, 556-559.
- Technical Note, WMO, 1981: Meteorological aspects of the utilization of wind as an energy source, No 175, Geneva, 180 pp.
- Wieringa, J., 1976: An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location, Quart. J. R. M. S., Vol. 102, 241-253.
- Wieringa, J., 1977: Wind representativity increase due to an exposure correction, obtainable from past analog station wind records, Proc. WMO Techn. Conf. on Instrument and Methods of Observation (TECIMO), July 1977, Hamburg, 39-44.

SUMMARY

The natural potential of wind energy was investigated on the basis of anemographic records from 32 stations in the continental and coastal regions of Croatia. The mean hourly wind speeds

in classes which correspond to Beaufort wind forces were analysed for the seasons and year. The MAXFIT computer program (FITZ-FIMONS and HOLLAND) was used. By the Kolmogorov-Smirnov test we could determine that the best results were obtained with the Weibull three-parameter distribution function fitted to observed wind data. The vertical variation of parameters c and k was calculated using the method by Spera and Richards.

In Table 1 the basic data of selected locations are cited: the data of the measurement beginning, the altitude above sea-level, the anemograph's height above ground, the surface-roughness parameter z_0 and the period of data used in this work. The parameter z_0 was determined on the basis of criteria cited in WMO Tech. Note 175 (1981). For some locations this parameter was defined by the Wieringa method which allows for a wind gustiness factor for different wind directions.

For the sake of illustrating the method of elaboration in Table 2 we cite the values of parameters c and k at 10 m above ground for two locations representative for wider areas: Zagreb for the continental and Split for the coastal regions of Croatia.

In Table 3 the values of mean wind power \bar{P} (W/m^2) and the available wind energy E of the area of Croatia at 10 m above ground are presented. In the column under headings E_I and E_{II} the values of available wind energies for two types of wind generators are enumerated. The characteristics of these two generators are outlined in Table 4 (starting speed v_0 for the first generator 1.5 ms^{-1} , for the second 3.4 ms^{-1} , rated and critical speeds for both types $v_r = 8.0 \text{ ms}^{-1}$, $v_k = 17.2 \text{ ms}^{-1}$).

From the locations considered in this work the first twelve ones, and Jablan and Ogulin stations are situated in the continental part of republic, the rest are in the coastal part of the Adriatic or its hinterland. In the whole continental area, even on mountain peaks (Puntijarka) the average wind power \bar{P} at 10 m above ground hardly exceeds 30 W/m^2 , and the available annual wind energies are between 200 and 400 kW/h only at the exposed northwestern part of Croatia, in other lowland areas much less. In the coastal area significant differences in the available wind potential exist, caused partly by local topography, partly by the degree of exposedness to storm winds bora and scirocco. The highest values of wind power \bar{P} are found for locations of Senj and Plomin (40 km NE from Pula), and on the southern Adriatic for the islands Lastovo and Palagruža due to strong scirocco winds. At these islands the wind power significantly exceeds 100 W/m^2 .

Table 5 depicts the altitudes at different locations considered in this work at which the available wind power reaches the limit value of 100 W/m^2 . It is evident from this Table that in the interior of Croatia and few locations on the coast (Bakar and Rijeka as urban areas) the wind generator should be installed at a height of at least 50 m above ground.

The differences in mean wind power \bar{P} for different seasons, at six locations 10 m above ground, are enumerated in Table 6. For all stations minimal wind power could be expected in summer, and maximum on coastal regions in winter, while in the continental part in spring.

In Table 7 the values of mean annual wind power \bar{P} and energies E at 10 and 50 m above ground for selected locations in function of the parameter are presented. The first value z_{01} is defined by the aforementioned WMO criteria, the second value z_{02} by the Wieringa method.