

Analiza vetrnega potenciala na Primorskem z vidika možnosti za proizvodnjo električne energije

An Analysis of Wind Energy in the Coastal Region from the Point of View of Electricity Production

Karlo Peter Peršolja

Današnja družba v veliki meri temelji na uporabi električne energije. Električni mrki, kakršnim so bili priča v nekaterih državah v zadnjem času, so še posebej očitno prikazali odvisnost družbe od električne energije. Nepredvidljivost cene nafte in dejstvo, da bodo ta in razni drugi fosilni viri v doglednem času postopno izčrpani, silijo človeštvo k iskanju drugih, nadomestnih energijskih virov, ki naj bodo trajnejši, cenejši in primernejši za okolje. Primer takšnega, navidez neizčrpnega vira, je veter. Izkoriščanje energije vetra za proizvodnjo električne energije je tehnološko izvedljivo. Vetrne elektrarne so že vključene v elektroenergetske sisteme na Danskem, v Nemčiji, ZDA, Španiji in številnih drugih državah. V Sloveniji električne energije še ne pridobivamo z uporabo vetra. Namen tega prispevka je preveriti, ali je na področju Primorske, kot najbolj vetrovnem območju Slovenije, dovolj vetrnega potenciala za ekonomsko upravičeno naložbo v proizvodnjo električne energije z uporabo vetrnih elektrarn.

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: elektrarne na veter, hitrost vetra, potencial vetra, porazdelitev Weibullova)

Modern society is based on the use of electrical energy. Electricity blackouts, which have occurred in some countries in recent years, have revealed how dependent society is on electrical energy. The unpredictability of oil prices and the fact that fossil fuels will be exhausted in the future, force mankind to investigate new energy sources, which must be sustainable, cheap and environmentally friendly. Wind is an example of such an apparently inexhaustible energy source. The exploitation of wind energy is technologically possible. Wind power plants are already included in the electro-energy systems of Denmark, Germany, the USA, Spain and many other countries. In Slovenia, electricity is not yet produced from wind energy. The purpose of this article is to examine whether the wind energy available in the windiest part of Slovenia, the Coastal region, is sufficient to allow economical electricity production using wind power plants.

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: wind power plants, wind speed, wind energy potential, Weibull distribution)

0 UVOD

Primorska leži na skrajnem zahodu Slovenije. Ima razgiban relief, od goratega na severu in severovzhodu do ravninskega v njenem jugozahodnem delu. Posledica takšnega reliefa je različno podnebje, ki je ponekod zmerno zaradi vpliva morja, drugje celinsko in celo alpsko.

Geografska lega, relief in bližina morja ustvarjajo razmere, ki pokrajino naredijo vetrovno bogato predvsem z zahodnimi vetrovi, občasno pa se oblikujejo tudi posebni zračni vrtinci, ki se gibljejo v smeri urnega kazalca ali nasprotno. Razgibanost je pogosto tudi vzrok za nastanek lokalnih vetrov, s

kopnega na morje v nočnem času in z morja na kopno čez dan. Najpomembnejši vetrovi na Primorskem so: jugo, burja ter severni in južni fen, ki lahko dosežejo tudi velike hitrosti. Zato nas je zanimalo, ali so ti vetrovi zadosten vetrni potencial za proizvodnjo električne energije z uporabo vetrnih elektrarn.

Dolgoletnih analiz, daljših od 20 let, ki bi lahko ovrednotile možnosti izrabe vetra za proizvodnjo električne energije pri nas, žal nimamo. Prve tovrstne analize na Primorskem smo se lotili predstavniki podjetja Elektro Primorska, d.d. (EP) in Agencije za prestrukturiranje energetike, ob strokovni pomoči podjetja EHN iz Španije ([1] do [3]). V ta namen smo leta 1999 pričeli meriti hitrosti in smeri vetra v

naslednjih krajih: Bate v Banjšicah, Sinji vrh nad Predmejo, Nanos, Trstelj na Krasu, Tabor pri Pivki, Volovja Reber, Vremščica, Selivec nad Senožecami, Golič nad Rakitovcem, Kokoš pri Lipici ter na dveh krajih na Pohorju in v Prekmurju. Za določitev merilnih točk smo najprej preučili znane lokalne informacije, kartografijo in strokovno literaturo. Na tej podlagi smo izdelali analizo najbolj primernih območij z vidika virov energije, topografije, vegetacije, naravnih in kulturnih vrednot. Nato smo izvedli terenske ogleda poprej izbranih krajev. Postavili smo merilne stolpe; najprej na višini 15 m, kasneje pa na nekaterih krajih tudi na višini 41 m.

V letih 1999 in 2000 smo k sodelovanju pritegnili tudi Katedro za meteorologijo Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani ter Urad za meteorologijo Agencije Republike Slovenije za okolje (UM-ARSO) z namenom, da bi ugotovili značilnost naših meritev za daljše obdobje. Naloga je bila opravljena v treh fazah ([4] in [5]).

- Najprej je bila ocenjena relativna razlika glede vetrovnosti po posameznih področjih. Pri tem sta bila uporabljena dva fizikalna modela. Z obema lahko napovemo polje vetra v odvisnosti od splošnih, širših pogojev, ki opredeljujejo vetrovnost.
- V naslednji fazi smo preverili, ali sta bili leti 1999 in 2000 vetrovno značilni za daljše obdobje.
- V zadnji fazi smo ocenili potencial vetra za pridobivanje električne energije.

Rezultate naštetih faz podrobneje predstavljamo v nadaljevanju.

1 ANALIZA VETROVNOSTI PO PODROČJIH

Vetrovne razlike med posameznimi področji lahko preučujemo z dvema modeloma: z meteorološkim in masno konsistentnim. Z meteorološkim modelom ALADIN/SI napovedujemo dinamični potek meteoroloških spremenljivk nad območjem velikosti $800 \text{ km} \times 800 \text{ km}$ s središčem v osrednji Sloveniji. Vodoravna ločljivost modela je 11 km. Njegovi rezultati so najbolj natančen vsakodnevni vir podatkov o trirazsežnem polju vetra v Sloveniji. Pomanjkljivost modela je v tem, da ne upošteva gorskih gmot Trnovskega gozda in Nanosa ter kraške planote, ki v precejšnji meri vplivajo na razmere na izbranih lokacijah. Z modelom izračunano polje vetra je zato primerno le kot začetni približek za kasnejšo natančnejšo simulacijo s t.i. masno-konsistentnim modelom.

Masno-konsistentni model poskuša napovedano polje vetra čim bolj prilagoditi izmerjenim vetrovom. Vodoravna ločljivost modela je 500 m. Absolutne vrednosti napovedane hitrosti vetra niso dovolj zanesljive, če nam ne uspe primerno nastaviti parametrov modela, npr. stabilnost ozračja v odvisnosti od gibalne količine ipd. Pomanjkljivost

tega modela se med drugim kaže v tem, da je vetrovnost ob povsem enakomernem vetru v višinah popolnoma enaka, če veter piha iz ene ali druge strani, saj je vseeno, ali tok teče naprej ali nazaj, ker so tokovnice v obeh primerih identične. Z masno-konsistentnim modelom prav tako ne moremo zajeti lokalnih toplotno povzročenih pojavov, kakršen je npr. burja. Zanj je značilno spuščanje hladnega zraka na sredozemsko stran alpsko-dinarske gorske pregrade v področje toplejšega zraka nad Jadrantom. Pritekajoči zrak nad planotami Notranjske je dovolj hladen, da je kljub segrevanju ob spustu proti morju na dnu še vedno hladnejši od zračne mase, kar pomeni, da pri spuščanju zračni tok ves čas pospešuje. Masno konsistentni model predvideva možnost, da nad obravnavanim območjem predpišemo splošni veter v višinah ter z ekstrapolacijo ocenimo veter po višini navzdol po enem od primernih navpičnih profilov vetra. Z osnovno različico modela, ki vključuje samo podatek o vetru v višinah, lahko zadovoljivo simuliramo jugozahodni in jugovzhodni veter.

Napovedi polja vetra z nobenim od uporabljenih modelov niso dovolj zanesljive. Namenjene so lahko kot osnova za oceno relativnih razlik v vetrovnosti med posameznimi geografskimi področji ali med posameznimi časovnimi obdobji znotraj izbranega področja.

2 OCENA ZNAČILNOSTI VETRA V LETIH 1999 IN 2000 ZA DALJŠE ČASOVNO OBDOBJE

Da bi ocenili značilnost vetra v letih 1999 in 2000 za daljše časovno obdobje, smo meritve za ti dve leti želeli primerjati z dolgoletnimi meritvami. V preteklih letih je obsežnejše meritve vetra pri nas opravljal le UM-ARSO. Žal stojijo merilne postaje UM-ARSO in EP na povsem različnih krajih. Postaje UM-ARSO so v neposredni bližini mest in pomembnejših prometnic, kar v našem primeru niso kraji, primerni za pridobivanje električne energije, medtem ko so postaje EP nameščene na vetrovno izpostavljenih mestih, to so hribi, grebeni ipd. Neposredna primerjava meritev zato ni bila mogoča. Oceno značilnosti vetra v letih 1999 in 2000 za daljše časovno obdobje smo tako opravili na podlagi mesečnih povprečnih hitrosti vetra na višini 5 km nad Slovenijo [6]. Pri tem predpostavljamo, da podobni sklepi o značilnosti omenjenih let veljajo tudi za merilna mesta, za katera dolgoletnih meritev nimamo na voljo.

V preglednici 1 so prikazane nekatere statistične mere mesečnih povprečnih hitrosti po desetletjih od 1948 do 1997 ter za leti 1999 in 2000. Podatki o hitrosti vetra veljajo za področje Slovenije na višini 5 km. Posredovali so nam jih iz Nacionalnega centra za atmosferske raziskave (NCAR) iz Bouldra v Coloradu (ZDA) [6]. Iz preglednice lahko razberemo,

Preglednica 1. Nekatere statistične lastnosti mesečnih povprečnih hitrosti vetra nad Slovenijo na višini 5 km v letih od 1948 do 1997 in 1999 ter 2000 [6].

	od 1948 do 1957	od 1958 do 1967	od 1968 do 1977	od 1978 do 1987	od 1988 do 1997	od 1948 do 1997	1999	2000	od 1999 do 2000
povprečje (m/s)	7,89	7,58	7,48	8,05	7,92	7,80	8,20	9,72	8,96
std. deviacija (m/s)	3,39	3,33	3,41	3,40	3,45	3,39	3,61	3,40	3,52
minimum (m/s)	1,29	0,14	1,27	2,25	2,21	0,14	2,90	5,16	2,90
maksimum (m/s)	18,04	16,57	16,28	17,84	17,90	18,04	13,95	15,23	15,23

da sta bila povprečje in standardna deviacija mesečnih povprečnih hitrosti vetra skoraj nespremenljiva v desetletjih od 1948 do 1997. Nekaj več spremenljivosti opazimo pri največjih in najmanjših hitrostih vetra, kar je razumljivo. Če leti 1999 in 2000 primerjamo z obdobjem 1948–1997, opazimo večji povprečni in najmanjši hitrosti vetra, posebej v letu 2000, podobni vrednosti standardne deviacije ter precej manjši največji hitrosti, posebej v letu 1999. Statistično preverjanje enakosti povprečij s testom t pokaže [7], da se povprečna hitrost vetra v letu 1999 značilno ne razlikuje od povprečja v letih 1947 do 1997 (vrednost p testa je $p=0,35$), medtem ko je povprečje v letu 2000 značilno večje od dolgoletnega ($p=0,04$). Če leti 1999 in 2000 obravnavamo skupaj, sicer ugotovimo povečanje povprečne hitrosti vetra glede na obdobje 1947 do 1997 ($p=0,06$), ki pa ne presega meje statistično značilnega povečanja ($p=0,05$).

Sklepamo torej lahko, da je bilo leto 2000 v povprečju izrazito bolj vetrovno kakor prejšnja leta, medtem ko je bilo leto 1999 v tem pogledu podobno prejšnjim. Tudi povprečje dveletnega obdobja 1999 do 2000 je precej večje od dolgoletnega povprečja, predvsem na račun leta 2000. Zanimivo je, da so kljub večjima povprečni in najmanjši hitrosti vetra največje hitrosti bistveno manjše od tistih v prejšnjih letih. To nakazuje, da se je porazdelitev hitrosti vetra v letih 1999 in 2000 glede na obdobje 1947 do 1997 nekoliko spremenila. Da bi lahko podali zanesljivejše sklepe o spremembah vetrovnosti, bi morali primerjati porazdelitve hitrosti vetra in ne samo povprečij in ekstremnih vrednosti. Primer takšne analize porazdelitve hitrosti vetra predstavljamo v razdelku 5.

Kljub izrazito večjim povprečnim hitrostim vetra v letu 2000 ne moremo trditi, da se je povprečna hitrost vetra dolgoročno povečala, saj lahko bolj vetrovnemu letu 2000 sledijo manj vetrovna leta. Za takšne sklepe potrebujemo meritve, ki trajajo več let.

3 OCENA VETRNEGA POTENCIALA

S pojmom vetrni potencial označujemo električno moč, ki bi jo lahko pridobili z izbrano vetrnico. Do izraza za moč zračnega toka pridemo takole.

Energija toka zraka s hitrostjo v in maso m je:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1).$$

To je teoretično največja mogoča kinetična energija vetra, ki velja, če je hitrost vetra za vetrnico enaka nič. Upošteva odvisnost mase od gostote ρ in prostornine V , $m=\rho V$, lahko energijo zračnega toka zapišemo kot:

$$E = \frac{1}{2}\rho Vv^2 \quad (2).$$

Največja moč P , ki jo lahko prestreže vetrnica, ki pri vrtenju zajema ploskev s prerezo S , je odvisna od prostornine zraka, ki v času t steče skozi prerez S :

$$V = vSt \quad (3).$$

Upošteva zvezo med močjo P in energijo E , $P=E/t$, dobimo moč zračnega toka pri prerezu S :

$$P = \frac{1}{2}S\rho v^3 \quad (4),$$

ki jo običajno podajamo z gostoto moči (v W/m^2):

$$\frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (5).$$

Hitrost vetra na izbranem kraju se nenehno spreminja, zato jo je treba opisati statistično. Temelj statističnega opisa je verjetnostna porazdelitev, ki za poljubni korak hitrosti vetra, npr. med 3 in 4 m/s, podaja njegovo verjetnost oziroma pogostost. Po evropski metodologiji se porazdelitev hitrosti vetra opisuje z Weibullovo verjetnostno porazdelitvijo, katere gostota verjetnosti je [7]:

$$f(v; \beta, \delta) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{v}{\delta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-(v/\delta)^\beta} \quad (6).$$

za $v > 0$, $\beta > 0$, $\delta > 0$

Pri tem sta β (brez enote) in δ (v m/s) parametra, s katerima določamo obliko oziroma velikost porazdelitve. Parametra β in δ sta odvisna od lokalnih vetrnih razmer in ju moramo oceniti na podlagi

izmerjenih hitrosti vetra za vsak kraj posebej. Ko poznamo ta dva parametra za izbrani kraj, lahko napovemo, kako pogosto bo pihal veter s hitrostjo v določenem obdobju, kolikšna bo povprečna hitrost vetra ipd. Povprečno hitrost vetra tako izračunamo po enačbi:

$$\langle v \rangle = \delta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (7),$$

kjer $\Gamma()$ označuje t.i. gama funkcijo, katere vrednost je treba določiti numerično [8].

Za napoved gostote moči zračnega toka (en. (5)) potrebujemo vrednost hitrosti na tretjo potenco. Pri Weibullovi porazdelitvi je povprečje hitrosti na tretjo potenco določeno z izrazom:

$$\langle v^3 \rangle = \delta^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{\beta} \right) \quad (8).$$

Povprečna gostota moči zračnega toka oziroma vetra je tedaj:

$$\left\langle \frac{P}{S} \right\rangle = \frac{1}{2} \rho \langle v^3 \rangle \quad (9).$$

Na ta način lahko napovemo povprečno gostoto moči vetra, če porazdelitev hitrosti ustreza Weibullovi in če poznamo parametra porazdelitve β in δ . Če pa porazdelitve hitrosti vetra ne moremo opisati z Weibullovo porazdelitvijo, moramo povprečje hitrosti na tretjo potenco izračunati neposredno iz vzorca izmerjenih hitrosti vetra po enačbi:

$$\langle v^3 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (10),$$

kjer v_i označuje i -to izmerjeno hitrost vetra iz vzorca, medtem ko je n število vseh meritev v vzorcu. Z dobljeno vrednostjo lahko nato po en. (9) izračunamo povprečno gostoto moči vetra.

Pri tem je pomembno poudariti, da vetrnica z idealnim izkoristkom izrablja 59,3% kinetične energije vetra, pri tem pa se hitrost vetra skozi vetrnico zmanjša za dve tretjini. Dejanski izkoristek vetrnice je bistveno manjši, saj je treba upoštevati tudi notranji izkoristek stroja, ki pri vetrnicah ni velik. Ker je vetrnica osni turbinski stroj, se notranji izkoristek pri delnih obremenitvah močno poslabša [9].

Izračun vetrnega potenciala torej temelji na hitrosti vetra na višini vetrne turbine, t.j. približno 60 m. Ker so meritve vetra na tej višini le redko dostopne, jih je treba oceniti na podlagi meritev, izvedenih na manjših višinah, v našem primeru 15 in 41 m. V ta namen se običajno uporablja metoda, ki so jo razvili na Oddelku za vetrno energijo danskega državnega laboratorija Riso, in je namenjen za izdelavo evropskega vetrnega atlasa [10]. Pri tej metodi do hitrosti vetra na želeni višini pridemo z ekstrapolacijo hitrosti, izmerjenih na površinskih merilnih postajah. Zahtevani izračun

izvedemo z računalniškim programom WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Predpostavlja se, da tak postopek daje dovolj dobro oceno povprečne hitrosti vetra na višini vetrnih turbin.

3.1 Metoda WAsP in njene omejitve

Metoda WAsP sestoji iz dveh delov: izdelave vetrnega atlasa in mreže vetrnih virov. Vetrni atlas vsebuje splošne značilnosti krajevnih vetrov, izračunane na podlagi podatkov z referenčne merilne postaje, topografskega opisa neposredne okolice, hrapavosti terena na polmeru 5 do 10 km in ovir na terenu. Vetrni atlas je podlaga za izračun mreže vetrnih virov in vsebuje podatke o lastnostih vetra na določeni višini. Regionalne mreže virov so kvadratne s stranico 1 km, medtem ko je pri območnih mrežah stranica dolga 100 m.

Za izdelavo vetrnega atlasa in mreže vetrov potrebujemo več ko desetletne podatke o vetru za izbrano merilno postajo in natančen topografski opis območja. Kakovost podatkov seveda pomembno vpliva na natančnost in zanesljivost atlasa ter mreže vetrov. Pri podatkih o vetru je najtežje pridobiti časovno dovolj dolg niz enakozbiranih podatkov. Dolgi nizi podatkov običajno niso na voljo za tista merilna mesta, ki so zanimiva z vidika pridobivanja vetrne energije. Pri nas so za takšna mesta na voljo dveletni nizi meritev. Nadalje je pomembna višina, na kateri so merjene hitrosti vetra. Mi smo pretežno del meritev izvajali na višini 15 m, na kateri ne moremo zanemariti vplivov neposredne topografske okolice (hrapavost terena, ovire ipd.). Da bi se tem vplivom izognili, smo na nekaterih mestih (Bate, Golč, Nanos, Selivec, Volovja Reber) postavili 41 m visoke merilne stolpe z merilnima postajama na višinah 15 in 41 m. Natančni izračuni porazdelitve hitrosti vetra po višini sicer še niso dokončani, vendar že lahko sklepamo, da je razlika v hitrosti vetra med obema višinama približno 10 %. Pri topografskih podatkih za izbrano območje ali regijo je glavna omejitev njihova natančnost. Podati je treba ne le profil temveč tudi vrsto zemljišča (mesto, vas, polje, voda ipd.), po možnosti na podlagi zemljevidov s čim manjšim merilom.

Tudi metoda WAsP ima nekatere omejitve, ki jih je pri pojasnjevanju in uporabi njenih rezultatov treba upoštevati. Osnova metode je namreč fizikalni model, s katerim ne moremo zajeti vseh zapletenih postopkov, ki vplivajo na hitrost vetra na izbranem območju. Ugotovljeno je, da je največjo napako pri izračunu zračnega toka mogoče pričakovati na območjih z razgibano topografijo in strmimi pobočji. V vsakem primeru je napovedi metode treba primerjati z meritvami na preučevanem območju.

4 ANALIZA MERITEV VETRA ZA TRI KRAJE

V tem razdelku predstavljamo primer analize meritev vetra za tri izbrane kraje, ki jih imenujemo A, B in C. Analiziramo enoletne nize, ki vsebujejo po 8760 parov povprečnih urnih hitrosti in smeri vetra, izmerjenih na višini 15 m. Na podlagi analize nato za vsak kraj ocenimo vetrni potencial. Na koncu izračunamo še količino pridobljene električne energije, ki bi jo na teh treh krajih lahko pridobili z vetrnicami treh različnih tipov, ki jih označimo z U, V in Z.

4.1 Rože vetra

Smer in hitrost vetra običajno prikazujemo skupaj v diagramu, ki ga imenujemo roža vetra. Diagram prikazuje povprečne hitrosti vetra v letu za tipične nebesne smeri. Odločili smo se za 32 nebesnih smeri, enakomerno razporejenih po krogu. Krožna ločljivost rož vetra je tako $360^\circ/32=11,25^\circ$. Rože vetra za kraje A, B in C so prikazane na sliki 1. Na kraju A je največja povprečna hitrost vetra približno iz smeri JVV, medtem ko je na krajih B in C najmočnejši veter približno iz smeri SVV. Na kraju C ima veliko povprečno hitrost tudi veter iz smeri JJV. Velika povprečna hitrost vetra v določeni smeri še ne zagotavlja velike pogostosti vetra. Kot primer navedimo burjo, ki je sicer močan veter, a piha le občasno. Tako smo ugotovili, da skupna letna energija burje na območju, kjer dosega največje hitrosti, ne dosega energije, ki jo imajo nekoliko šibkejši, a enakomerni vetrovi na grebenih gorskih pregrad.

Za pridobivanje električne energije je poleg hitrosti pomembna tudi pogostost vetra. Relativno pogostost vetra za tipične nebesne smeri prikazujejo krožni histogrami, ki so prav tako vidni na sliki 1. Iz histogramov lahko razberemo, da na kraju A veter najpogosteje piha približno iz smeri V, kar je blizu smeri največje povprečne hitrosti vetra ne tem kraju

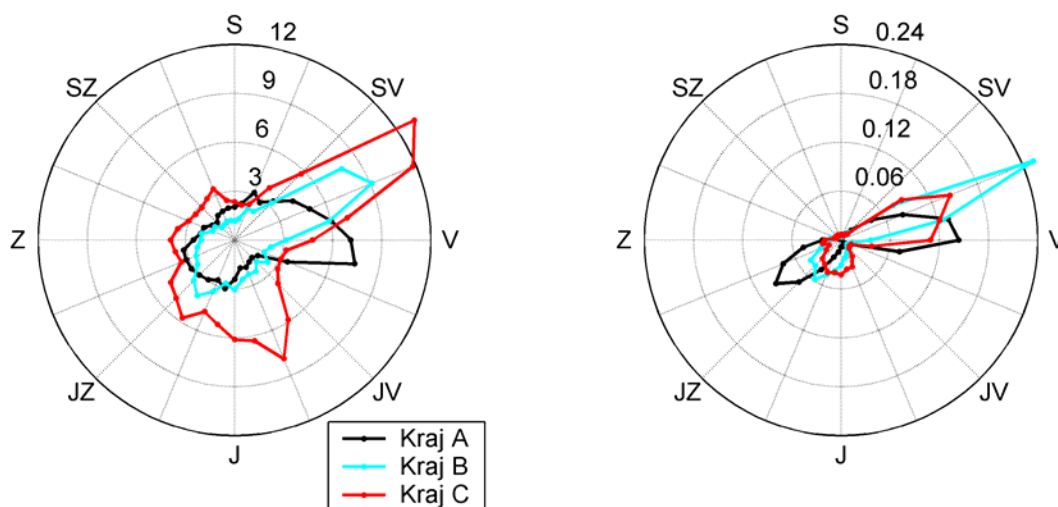
(približno JVV). Pogosta je tudi smer približno JZ, v kateri pa je povprečna hitrost vetra majhna. Na krajih B in C je najpogostejša smer vetra SVV, kar se dobro ujema s smerjo najhitrejšega vetra za oba kraja. Za kraj B je značilna izrazito stalna usmerjenost vetra, saj v več kot 24 % ur letno veter piha iz smeri SVV. Na kraju C je velika povprečna hitrost vetra značilna tudi za smer JJV, iz histograma pa vidimo, da veter le redko piha v tej smeri. Za pridobivanje električne energije iz vetra je seveda ugodno, če se smeri največje hitrosti vetra ujemajo z najpogostejšimi smermi vetra.

Za izračun vetrnega potenciala je pomembna le hitrost vetra, medtem ko je smer vetra zaradi vrtljivih vetrnic lahko poljubna. Zato se pri podrobnejši analizi v nadaljevanju omejimo na hitrost vetra na izbranih krajih.

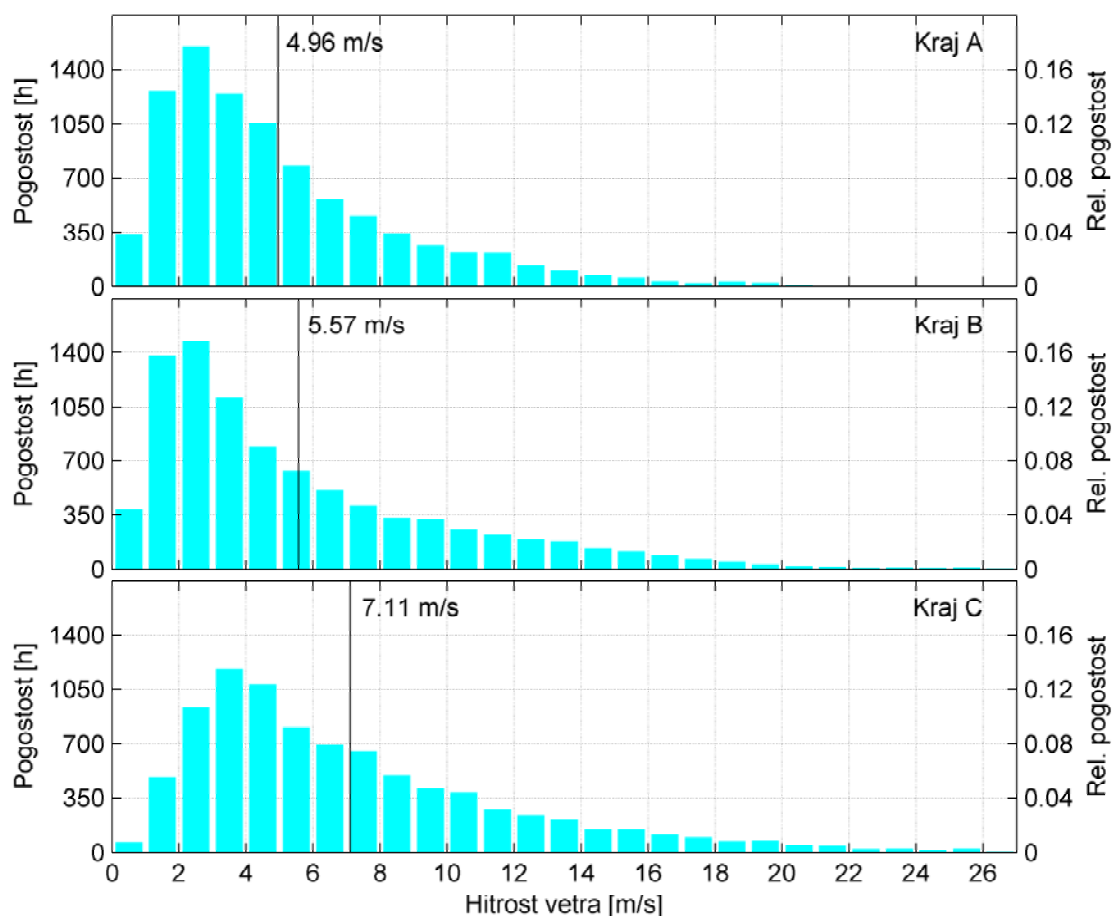
4.2 Porazdelitev hitrosti vetra

Porazdelitev hitrosti vetra na krajih A, B in C je na sliki 2 prikazana s histogrami. Na navpični osi sta pogostost v urah (levo) in relativna pogostost (desno), ki je brez enot. Širina korakov hitrosti vetra na vodoravni osi je lahko poljubna. Zaradi usklajenosti s podatki proizvajalcev vetrnic smo se odločili za korake širine 1 m/s.

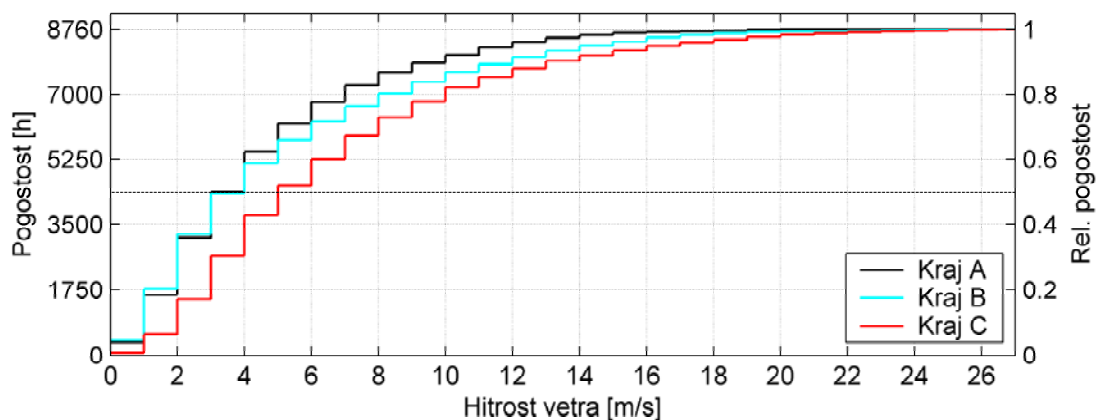
Iz histogramov lahko razberemo, da sta porazdelitvi hitrosti vetra na krajih A in B podobni: veter najpogosteje piha s hitrostjo med 2 in 3 m/s, medtem ko se pogostost pri hitrostih nad 4 m/s hitro zmanjšuje. Za kraj C so najpogostejše hitrosti med 3 in 4 m/s, pogostost pri hitrostih nad 4 m/s pa se zmanjšuje počasneje kakor pri krajih A in B. Da na kraju C veter dosega v povprečju večje hitrosti kakor na krajih A in B, potrjujejo tudi letne povprečne vrednosti hitrosti, ki so na histogramih prikazane z navpično črto. Največja povprečna hitrost vetra je na kraju C (7,11 m/s), sledita kraja B (5,57 m/s) in A (4,96 m/s).



Sl. 1. Rože vetra (levo, v m/s) ter relativna pogostost smeri vetra (desno) za kraje A, B in C



Sl. 2. Porazdelitve hitrosti vetra na krajih A, B in C, prikazane s histogrami



Sl. 3. Zbirni histogrami porazdelitve vetra za kraje A, B in C. Vodoravna črtkana črta označuje relativno pogostost 0,5

Do podobnih ugotovitev pridemo tudi na podlagi zbirnih histogramov (sl. 3), v katerih je prikazana zbirna relativna pogostost. Iz zbirnih histogramov lahko razberemo, da je na krajih A in B v 50 % ur letno hitrost vetra manjša (ali večja) od 3,5 m/s, medtem ko je pri kraju C meja 50% pomaknjena k večjim hitrostim, k skoraj 5,5 m/s.

Porazdelitev hitrosti vetra običajno opisujemo z Weibullovo porazdelitvijo en. (6). S

spreminjanjem vrednosti parametrov β in δ lahko obliko porazdelitve precej spreminjamo in s tem prilagajamo zelo različnim porazdelitvam. Da bi Weibullovo porazdelitev prilagodili izmerjeni porazdelitvi hitrosti vetra, je treba na podlagi meritev oceniti vrednosti parametrov β in δ . Pri tem si lahko pomagamo s katerim od statističnih programskih paketov. Mi smo uporabili statistični paket programa Matlab [8]. Ocenjene vrednosti parametrov za

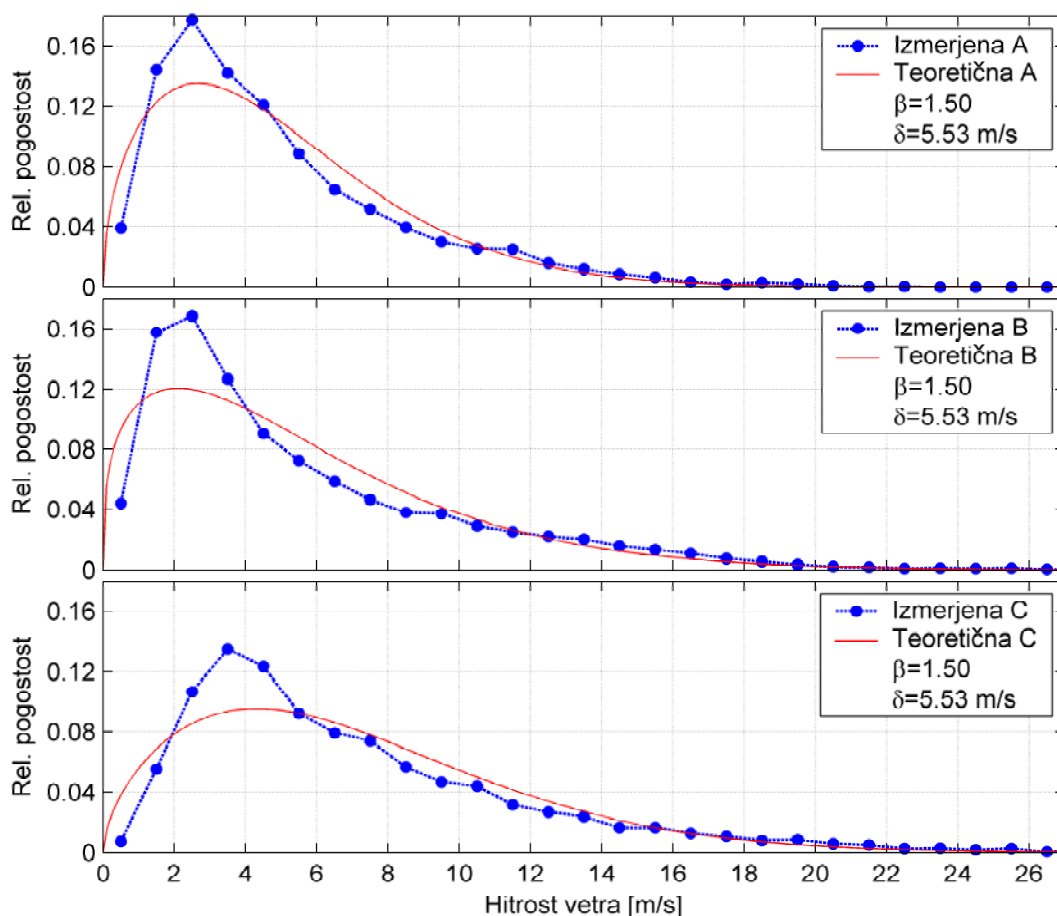
porazdelitve hitrosti vetra na krajih A, B in C so navedene na sliki 4, ki prikazuje izmerjene porazdelitve hitrosti vetra (povezani vrhovi histogramov s slike 2) skupaj s prilagojenimi Weibullovimi porazdelitvami. S slike vidimo, da sta parametra b in d za izbrane kraje različna, kar smo glede na različno obliko porazdelitev na sliki 2 tudi pričakovali. Nadalje je s slike 4 tudi očitno, da se teoretična in izmerjena porazdelitev za noben kraj povsem ne ujemata. V vseh treh primerih so opazne izrazite razlike predvsem pri majhnih hitrostih vetra, pod 4 oziroma 5 m/s, medtem ko je ujemanje med porazdelitvama pri hitrostih, večjih od 5 m/s, precej dobro. Razlike med izmerjenimi in teoretičnimi verjetnostnimi porazdelitvami so v praksi običajne, vendar je s katerim od statističnih prilagoditvenih testov treba preveriti, ali so razlike tudi statistično značilne [7]. V našem primeru je bila za vse tri kraje vrednost p prilagoditvenega testa praktično enaka 0. To pomeni, da so opažene razlike med izmerjeno in teoretično porazdelitvijo statistično značilne, zato porazdelitve hitrosti vetra na krajih A, B in C načeloma ne moremo opisati z Weibullovo verjetnostno porazdelitvijo. Zaradi tega je pri izračunih, kakršen je npr. izračun vetrnega potenciala, smiselno uporabljati izmerjeno porazdelitev hitrosti vetra in ne prilagojene Weibullove.

4.3 Ocena vetrnega potenciala

Vetrni potencial merimo s povprečno gostoto moči vetra na prerezu vetrnice, en. (9). Za izračun povprečne moči potrebujemo gostoto zraka in povprečje hitrosti vetra na tretjo potenco. Slednji podatek lahko izračunamo po en. (8), pri čemer predpostavimo, da je porazdelitev hitrosti Weibullova, ali po en. (10) neposredno iz meritev in brez omenjene predpostavke. Za naš primer v en. (10) za v_i vstavljamo povprečne izmerjene urne hitrosti vetra in $n=8760$ za število vseh urnih meritev v letu.

V preglednici 2 so navedene povprečja tretje potence hitrosti vetra $\langle v^3 \rangle$ za kraje A, B in C, izračunane na oba načina, po en. (8) in (10). Ugotovimo lahko, da se vrednosti $\langle v^3 \rangle$, dobljene pri obeh načinih izračuna, razlikujejo za približno 8 %. Zanesljivejšo oceno $\langle v^3 \rangle$ daje en. (10), saj smo v prejšnjem razdelku pokazali, da predpostavka, na kateri temelji izračun pri en. (8), za noben kraj ni izpolnjena.

Ker je $\langle v^3 \rangle$ sorazmerna povprečni gostoti moči vetra en. (9) in ker se gostote zraka ρ na krajih A, B in C predvidoma ne razlikujejo, podatki v preglednici 2 lahko rabijo tudi za primerjavo potencialov vetra na krajih A, B in C. To pomeni, da je vetrni potencial na



Sl. 4. Primerjava izmerjenih in prilagojenih Weibullovih porazdelitev hitrosti vetra na krajih A, B in C. Podane so tudi ocenjene vrednosti parametrov porazdelitve, β in δ

Preglednica 2. Povprečja tretje potence hitrosti vetra $\langle v^3 \rangle$ ($v \text{ m}^3/\text{s}^3$) na krajih A, B in C, izračunana po en. (8) in (10)

	Kraj A	Kraj B	Kraj C
po en. (8)	336,48	582,39	910,23
po en. (10)	366,68	632,46	992,92

kraju C bistveno večji od potencialov na krajih B in A. Potenciala na krajih C in B sta približno 2,7-kratnik in 1,7-kratnika potenciala na kraju A.

4.4 Izračun pridobljene električne energije

Omenili smo, da vetrnica ne more spremeniti vse vetrne energije v električno. Količina električne energije, ki jo pridobimo z vetrnico na izbranem kraju, je odvisna od značilnice moči vetrnice, t.j. električne moči, ki jo pridobiva vetrnica, v odvisnosti od hitrosti vetra. Značilnico moči poda izdelovalec vetrnice.

Za nazorni prikaz pridobivanja električne energije smo izbrali tri vetrnice pomembnih evropskih proizvajalcev, ki jih bomo označili s črkami U, V in Z. Vetrnica U je izdelek španskega proizvajalca Gamesa z oznako G58-850 kW s premerom rotorja 58 m, ki opiše površino 2.642 m^2 [11]. Vetrnico V izdeluje nemško podjetje Nordex z oznako N50/800kW s premerom rotorja 50 m, ki opiše površino 1.964 m^2 [12]. Vetrnica Z pa je izdelek danskega proizvajalca Vestas z oznako V52-850 kW s premerom rotorja 52 m, ki opiše površino 2.124 m^2 [13].

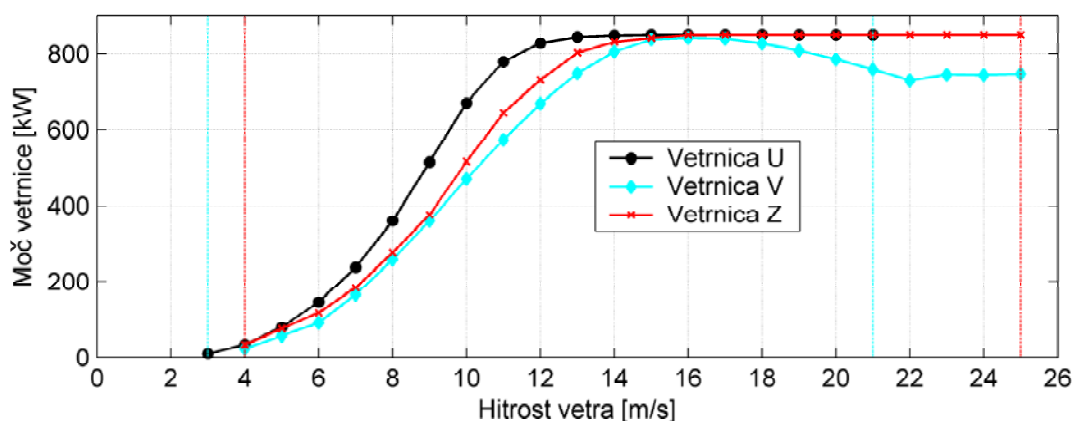
Na sliki 5 so prikazane značilnice za omenjene vetrnice U, V in Z z imenskimi močmi 850 (U in Z) in 800 kW (V). S slike lahko razberemo, da so vklopne hitrosti vetra 3 (U) oziroma 4 m/s (V in Z), izklopne hitrosti 21 (U) oziroma 25 m/s (V in Z), medtem ko imensko moč vetrnice dosežejo pri 15 (U), 14 (V) oziroma 16 m/s (Z). Značilnica moči vetrnice U je najbolj strma, kar pomeni, da ta vetrnica pridobiva večjo električno moč od vetrnic V in Z na celotnem

svojem območju delovanja, ki pa je krajše od območij delovanja vetrnic V in Z.

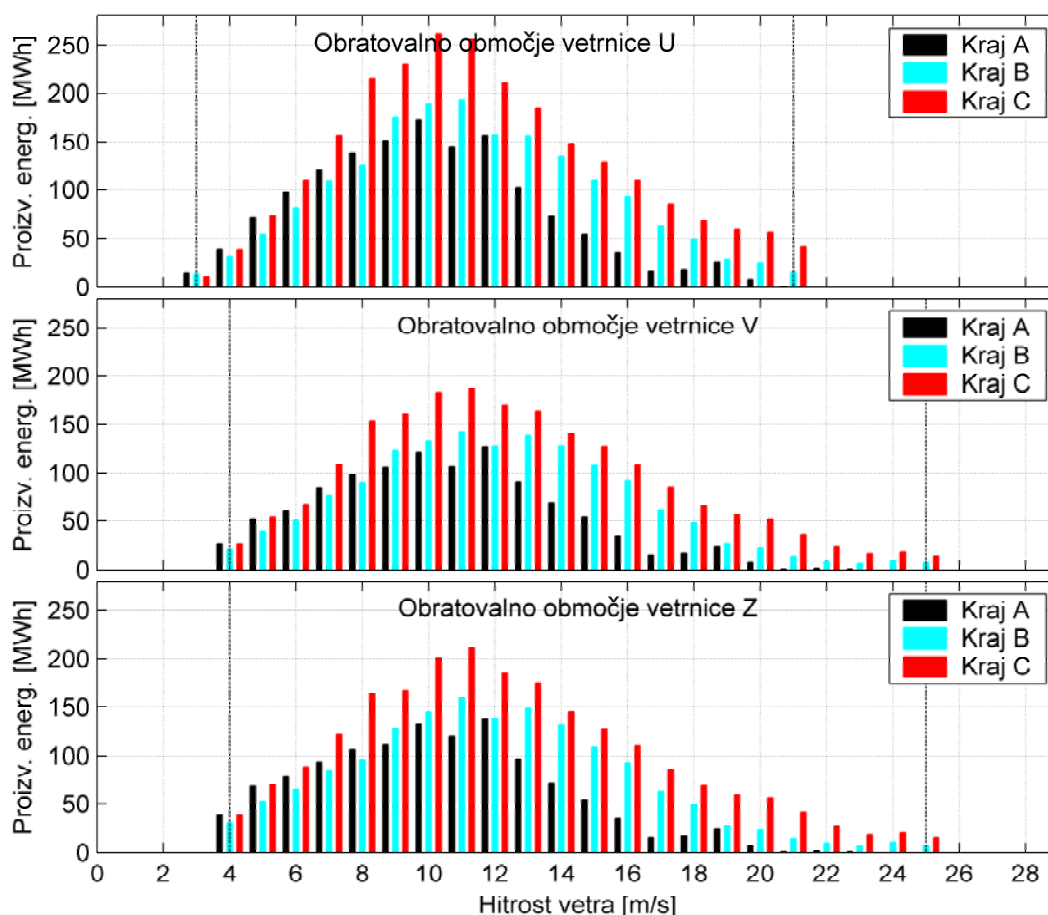
Pridobljeno električno energijo pri določeni hitrosti vetra izračunamo kot zmnožek električne moči vetrnice pri tej hitrosti in pogostosti te hitrosti. Odvisnost pridobljene električne energije z vetrnicami U, V in Z od hitrosti vetra na krajih A, B in C je prikazana s histogrami na sliki 6. Vse tri vetrnice pridobijo največ električne energije na kraju C, sledita kraja B in A. Za vse tri kraje je najučinkovitejša vetrnica U, ki ji sledita vetrnici Z in V.

Skupna letna količina pridobljene električne energije za preučevane kraje in vetrnice je podana v preglednici 3. Največ električne energije lahko z vsemi vetrnicami pridobimo na kraju C, kar je pričakovano, saj smo zanj ocenili tudi največji vetni potencial. Iz preglednice lahko razberemo, da ni vseeno, katero vetrnico postavimo na določenem kraju, saj je količina pridobljene energije na enem kraju odvisna od porazdelitve hitrosti vetra in značilnice moči vetrnice. Razlika med najbolj in najmanj primernima vetrnicama je največja na kraju A in znaša 30 %. Z vidika pridobivanja električne energije je najučinkovitejša kombinacija vetrnica U na kraju C, ki bi v opazovanem letu pridobila 2,44 GWh energije.

Poudarimo, da smo vse izračune izvedli s hitrostmi vetra, izmerjenimi na višini 15 m. Hitrosti na višinah vetrnih turbin (60 m), ki bi jih izračunali z metodo WAsP, bi bile zanesljivo vsaj za 10 % večje, zato bi bile ustrezno večje tudi količine pridobljene električne energije. Nadalje bi se z višino lahko spremenile tudi porazdelitve hitrosti



Sl. 5. Značilnice moči vetrnic U, V in Z. Navpične črtkaste črte označujejo vklopne in izklopne hitrosti vetra.



Sl. 6. Pridobljena električna energija z vetrnicami U, V in Z v odvisnosti od hitrosti vetra na krajih A, B in C

Preglednica 3. Letna količina pridobljene električne energije (v GWh) z vetrnicami U, V in Z na krajih A, B in C

	Kraj A	Kraj B	Kraj C
vetrnica U	1,43	1,80	2,44
vetrnica V	1,09	1,47	2,02
vetrnica Z	1,21	1,59	2,20

vetra, tako da kombinacija kraja C in vetrnice U ne bi bila več najučinkovitejša za pridobivanje električne energije.

5 SKLEP

V prispevku smo predstavili nekatere rezultate študije vetrovnosti na Primorskem z vidika možnosti pridobivanja električne energije iz vetra. Študija je bila razdeljena na tri faze. V prvi fazi smo s pomočjo dveh fizikalnih modelov napovedovali veter na različnih območjih. Ugotovili smo, da so napovedi modelov nezanesljive, še posebej na Primorskem, kjer na značilnosti vetra izrazito vpliva razgiban relief pokrajine, ki ga z modeloma ne moremo dobro opisati. Modela sta uporabna za oceno relativnih razlik v vetrovnosti med posameznimi območji.

V drugi fazi smo izmerjene hitrosti vetra v letih 1999 in 2000 primerjali z rezultati dolgoletnih meritev, da bi ugotovili, ali lahko omenjeni leti obravnavamo kot značilni za daljše časovno obdobje. Zaradi pomanjkanja dolgoletnih meritev na krajih, primernih za pridobivanje električne energije iz vetra, smo statistično primerjavo izvedli za kraj, za katerega so takšni podatki bili na voljo. Ugotovili smo, da je leto 1999 v povprečju podobno prejšnjim, medtem ko je bila povprečna hitrost vetra v letu 2000 značilno večja od dolgoletnega povprečja. Povečane najmanjše in zmanjšane največje hitrosti vetra v letih 1999 in 2000 glede na dolgoletne vrednosti tudi kažejo na določene spremembe porazdelitve hitrosti vetra, česar pa zaradi pomanjkanja podatkov nismo mogli podrobneje preveriti.

V zadnji fazi smo natančneje analizirali meritve vetra na treh izbranih krajih. Primerjava rož vetra in pogostosti smeri vetra za značilne nebesne smeri je pokazala, da se smeri najmočnejšega vetra dobro ujemajo z najpogostejšimi smermi vetra, kar je ugodno za pridobivanje električne energije. Nadalje smo izmerjene porazdelitve hitrosti vetra primerjali s prilagojenimi Weibullovimi porazdelitvami in ugotovili statistično značilne razlike, ki kažejo, da je vetrni potencial smiselno ocenjevati neposredno iz meritev in ne iz parametrov Weibullove porazdelitve. Ocene vetrnega potenciala izbranih treh krajev se precej razlikujejo. Razlika med potencialoma najbolj in najmanj vetrovnih krajev je kar 2,7-kratna. Na koncu smo za izbrane tri tipe vetrnic izračunali količino električne energije, ki bi jo v preučevanem letu pridobili na izbranih treh krajih. Zaradi različnih porazdelitev hitrosti vetra na izbranih krajih in različnih značilnic moči izbranih tipov vetrnic je količina pridobljene energije na določenem kraju močno odvisna od tipa vetrnice. Razlika v količini pridobljene energije med najbolj in najmanj primerno vetrnico je lahko tudi 30 %. Z najprimernejšo kombinacijo kraja in tipa vetrnice bi v preučevanem letu pridobili 2,44 GWh električne energije.

Glede na ugotovljeno sklepamo, da je na Primorskem v povprečju dovolj vetrnega potenciala za pridobivanje električne energije. Vetrni potencial se od kraja do kraja lahko precej razlikuje, zato so pred postavitvijo vetrnic nujne dolgoletne meritve vetra na vsakem od možnih krajev, izbor tipa vetrnice pa mora temeljiti na podrobni analizi izmerjene porazdelitve hitrosti vetra.

6 SEZNAM SIMBOLOV

E	energija vetra
f	porazdelitvena funkcija
m	masa
n	število meritev v vzorcu
P	moč vetra
p	vrednost statističnega testa p
S	prerez vetrnice
V	prostornina
v	hitrost vetra
β	parameter oblike Weibullove verjetnostne porazdelitve
δ	parameter velikosti Weibullove verjetnostne porazdelitve
Γ	gama funkcija
ρ	gostota

7 LITERATURA

- [1] Elektro Primorska (2003) Interna gradiva o meritvah vetra 1999–2003. Nova Gorica.
- [2] Peršolja, K. P. (2003) Pilotski projekt vetrnih elektrarn v Sloveniji. Specialistična naloga, *Fakulteta za management*, Koper.
- [3] WEPI – Wind energy potential (2003) Study of wind potential in five European regions. EHN, Spain.
- [4] Rakovec, J., G. Gregorič (2001) Veter na Primorskem. Univerza v Ljubljani, *Fakulteta za matematiko in fiziko; Oddelek za fiziko*, Ljubljana.
- [5] Bertalanič, R., M. Dolinar, T. Cegnar, B. Zupančič (2001) Veter na Primorskem. *Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje*, Ljubljana.
- [6] NCEP/NCAR reanalysis 1948–1997 monthly means. <http://dss.ucar.edu>
- [7] Montgomery, D. C., G.C. Runger (1994) Applied statistics and probability for engineers. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, ZDA.
- [8] Jones, B. (1996) Statistics toolbox for Matlab, *The Mathworks Inc.*, Massachusetts, ZDA
- [9] Novak, P., S. Medved (2000) Varstvo okolja in obnovljivi viri energije, Univerza v Ljubljani, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [10] Wind atlas analysis and application program (WAsP). <http://www.wasp.dk>
- [11] <http://www.gamesa.es>
- [12] <http://www.nordex-online.com>
- [13] <http://www.vestas.com>

Avtorjev naslov: Karlo Peter Peršolja
Elektro Primorska, d.d.
5000 Nova Gorica
Karlo.Persolja@elektro-primorska.si

Prejeto:
Received: 20.1.2004

Sprejeto:
Accepted: 18.6.2004

Odprto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year