

## ODNOSI BRZINA VJETRA I PARAMETAR HRAPAVOSTI

### Wind speed and roughness parameter relationship

BRANKO CIVIDINI

Državni hidrometeorološki zavod  
Grič 3, 41000 Zagreb, Hrvatska

*Primljeno: 3. listopada 1994, u konačnom obliku 10. studenog 1994.*

**Sažetak** – U radu su prikazani odnosi između brzina vjetra na 10 m i 50 m na mjernoj lokaciji blizu trafostanice Konjsko za različite intervale brzina vjetra. Nadenno je da se omjeri mahovitosti smanjuju s povećanjem brzine vjetra, za razliku od omjera srednjih brzina, koji rastu, dok su omjeri maksimalnih brzina izuzimajući slaba strujanja, gotovo konstantni. Posebno je razmatrana veza između omjera mahovitosti i parametra hrapavosti i mogućnost da se iz podataka vjetra na jednom nivou mjerenja može odrediti vrijednost lokalne hrapavosti za pojedine smjerove vjetra, kao što je to predložio J. Wieringa. Referentna metoda za određivanje lokalne hrapavosti temelji se na omjerima srednjih brzina vjetra  $u_{50}/u_{10}$  u slučajevima neutralne stabilnosti promatranoga sloja atmosfere. Pokazuje se da u uvjetima kompleksnoga terena Wieringina metoda nije primjenjiva, jer su dobivene vrijednosti  $z_0$  od "prave" lokalne hrapavosti veće približno za red veličine.

**Ključne riječi:** parametar hrapavosti, omjer mahovitosti, brzina vjetra.

**Abstract** – This paper shows the relation, for different wind speed classes, between wind speeds measured at 10 m and 50 m heights near the Konjsko power station. It has been found that gust factors decrease with increasing wind speed, while the mean speed ratio increases, and the gust ratio, except for weak winds, is nearly constant. The relation between gust factor and roughness has been analysed, together with the possibility of estimating local roughness length from data taken at one measurement level (Wieringa method). The reference method for estimating local roughness was based on the mean wind speed profile in the neutral boundary layer. The Wieringa method is not acceptable in complex terrain conditions because the calculated value  $z_0$  are at least one order of magnitude larger than "actual" local roughness.

**Key word index:** roughness parameter, gust factor, wind speed.

### 1. UVOD

Odnosi brzina vjetra na jednom ili više nivoa mjerenja predmet su mnogih istraživanja, od kojih kao važnije spomenimo radove G.G. Justusa i A.S. Mikhaila (1976, 1981), A.S. Mikhaila (1983), E.W. Petersona i J.P. Hennesseyja (1978), L. Sedefiana (1980), A.A.M. Holtslaga (1984) koji su istraživali relacije između srednjih brzina vjetra, a J. Wieringa (1973, 1977, 1986), P.J. Mason (1988), G. Solari (1990) razmatrali su odnose između omjera mahovitosti i hrapavosti.

Kao što je poznato, omjer maksimalne i srednje brzine vjetra na istom nivou mjerenja naziva se omjer mahovitosti, a ta veličina ovisi prvenstveno o smjeru vjetra, hrapavosti podloge i o stabilnosti atmosfere, a slično omjeru srednjih brzina, može se prikazati u obliku funkcije parametara graničnoga sloja. Ponekad se koristi pri proračunu drugih parametara, posebno za primjene u graničnom sloju i određivanju energije vje-

tra. Omjeri srednjih (ili maksimalnih) brzina s 2 nivoa mjerenja koriste se za ispitivanje promjene vjetra visinom, što je u mnogim primijenjenim i teorijskim radovima jedan od ključnih problema.

Hrapavost podloge ocjenjuje utjecaj okolnih prepreka na strujanje (oko mjernoga uređaja), na koji također djeluje i orografija. Zbog toga se danas govori o "lokalnoj" i "regionalnoj" hrapavosti, (Tieleman, 1992; Wieringa, 1986) između kojih gotovo nema razlike u uvjetima ravničnoga terena, dok se u kompleksnijim terenima mogu bitno razlikovati. U ovom se radu, pored prikaza odnosa brzina vjetra, razmatra i određivanje "lokalne" hrapavosti u uvjetima kompleksnog terena kakvi su u okolini meteorološke postaje Konjsko. Rezultati su obuhvatili omjere mahovitosti na 10 m i 50 m visine od tla, kao i omjere srednjih i maksimalnih brzina vjetra (50m/10m) u ovisnosti o smjeru vjetra i intervalu brzine vjetra za periode osred-

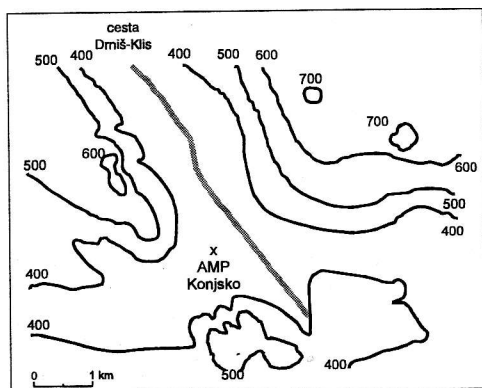
njavanja 10 minuta i 1 sat. Pored toga ispitana je mogućnost određivanja lokalne hrapavosti podloge pomoću podataka o vjetru na samo jednoj visini i pokazano je da ona vrijedi samo za ravni tereni.

## 2. OPIS LOKACIJE I MJERNOG INSTRUMENTARIJA

Meteorološki toranj visine 50 m bio je u razdoblju od listopada 1988. do rujna 1991. godine postavljen u blizini trafostanice Konjsko, koja se nalazi sjeverno od Splita u kotlini širokoj oko 1–1.5 km, a dugačkoj oko 5 km, položenoj u smjeru NNW–SSE (Slika 1). Meteorološki mjerni sustav bio je sastavljen od procesora i senzora proizvodnje J. Štefan iz Ljubljane pod nazivom META 801. Mjerenja temperature zraka, vlage zraka i vjetra obavljana su na 10 m i 50 m visine od tla, dok su tlak zraka, Sunčevo zračenje i trajanje sisanja Sunca mjereni na 2 m visine, a količina oborine na 1 m od tla. Podaci su osrednjavani u 10-minutnom periodu, a u kraćem razdoblju rada (krajem 1991) u 30-minutnom periodu. Obraden je period mjerenja siječanj 1988.–rujan 1991. godine kada je osrednjavanje bilo 10 minuta. U tom razdoblju nažalost postoje mnogi prekidi koji su uglavnom uzrokovani objektivnim razlozima vezanim uz rad motritelja i mjernoga sustava. Kontrola podataka obuhvaćala je osim standardnih postupaka i grafičku kontrolu kako bi se eliminirale greške koje su uzrokovane električnim izbijanjima unutar kruga trafostanice, a pojavile su se posebno u podacima vjetra na 50 m visine.

## 3. METODA RADA

Podaci omjera mahovitosti razdijeljeni su prema smjeru vjetra (02–32) i intervalima brzine vjetra ( $<2 \text{ ms}^{-1}$ ,  $2\text{--}6 \text{ ms}^{-1}$ ,  $6\text{--}12 \text{ ms}^{-1}$  i  $12\text{--}20 \text{ ms}^{-1}$ ). Svakoj vrijednosti omjera mahovitosti pridijeljen je smjer pripadne srednje 10-minutne brzine vjetra, a spomenuti se inter-



Slika 1. Topografski prikaz okoliša AMP Konjsko.

Figure 1. A topographical illustration of the surroundings of AMS Konjsko.

vali također odnose na srednju brzinu vjetra. Granicu intervala  $6 \text{ ms}^{-1}$  odredio je Wieringa i našao da se za vjetrove iznad nje mogu povezati podaci omjera mahovitosti i hrapavosti podloge. Granica  $2 \text{ ms}^{-1}$  odabrana je nakon provedene grafičke kontrole, a koja je pokazala da zaista postoje velike razlike u karakteristikama strujanja ispod nje i iznad nje. U tom su intervalu isključeni podaci tišina. Interval  $> 12 \text{ ms}^{-1}$  odabran je samo da bi se vidjele razlike u odnosu na prethodni ( $6\text{--}12 \text{ ms}^{-1}$ ), ali kako se vidi u poglavlju 4, uglavnom nije bilo dovoljno podataka da se mogao odrediti medijan omjera mahovitosti u tom intervalu. Medijani su određeni klasičnim načinom kao srednji podatak u nizu podataka poredanih po veličini.

## 4. ANALIZA OMJERA MAHOVITOSTI

Slijedeći Wieringino razmatranje da je, uvažavajući velik rasap podataka omjera mahovitosti, medijan bolji reprezent srednje vrijednosti uzorka nego što je to aritmetički srednjak (Wieringa, 1973), u tablicama 1. i 2. nalaze se medijani omjera mahovitosti na 10 m i 50 m visine po smjerovima, a za različite intervale brzina vjetra u periodima osrednjavanja 10 minuta i 1 sat. Prazna mjesta u tabelama znače da je broj podataka iz kojih se određuje medijan manji od 10, a takvi su slučajevi na 10 m visine zabilježeni samo iznad brzina većih od  $6 \text{ ms}^{-1}$ , a na 50 m visine tek iznad  $12 \text{ ms}^{-1}$ . Najveće vrijednosti omjera mahovitosti dobivene su za male brzine vjetra (do  $2 \text{ ms}^{-1}$ ), a njihovi se iznosi već značajno smanjuju za sljedeće intervale brzina vjetra. Općenito su iznosi medijana za isti interval brzine vjetra veći na 10 m nego iznosi na 50 m. Također se uočava da su za isti interval brzine vjetra medijani iz satnih podataka veći nego oni iz 10-minutnih podataka.

U tablici 3 naznačene su vrijednosti medijana omjera mahovitosti na 10 m i 50 m po godinama i ukupno. Pokazalo se da su varijacije medijana po godinama za određeni smjer vjetra vrlo male, što ukazuje na to da je medijan stabilna veličina koja se može određivati i iz kraćih perioda mjerenja (npr. bar 1 godina mjerenja), uz uvjet da za svaki smjer postoji dovoljan broj podataka. Također vidimo da se iznos medijana mijenja s obzirom na smjer vjetra, pa se omjer mahovitosti može dovesti u vezu s nekim drugim veličinama, a koje se često mogu znatno mijenjati ovisno o smjeru kao što je to npr. parametar hrapavosti.

U tablici 4 nalaze se vrijednosti medijana omjera srednjih brzina vjetra s 50 i 10 metara visine  $u_{50}/u_{10}$  za izabrane klase brzine vjetra i periode osrednjavanja podataka 10 minuta i 1 sat. Porastom brzine vjetra rastu i vrijednosti omjera srednjih brzina, za razliku od omjera mahovitosti. Iznosi omjera srednjih brzina na 50 i 10 m visine, posebno u uvjetima slabih strujanja ( $<2 \text{ ms}^{-1}$ ), jednaki su ili malo veći od 1.00, osim kod smjerova NW(28) i NNW(30), koji imaju znatno veću vrijednost (1.75 i 1.33), za što se ne vidi poseban razlog niti zbog konfiguracije terena, a niti zbog veličine prepreka iz tih smjerova (Slika 2). Fizikalne osobine slabih NW i NNW zračnih struja trebalo bi posebno ispitati.

Tablica 1. Medijani satnih i 10-minutnih omjera mahovitosti na 10 m visine (Konjsko, 1988–1991).

Table 1. Hour and 10-min medians of gust factor at 10 m height (Konjsko, 1988–1991).

smjer	10-minutni podaci, ms <sup>-1</sup>				satni podaci, ms <sup>-1</sup>			
	<2	2-6	6-12	>12	<2	2-6	6-12	>12
32	2.67	1.79	1.66		3.82	2.19	1.91	
02	3.00	1.78	1.69	1.62	4.00	2.15	1.91	1.76
04	2.91	1.82	1.73	1.70	4.00	2.20	1.99	
06	2.73	1.75	1.65		3.85	2.16	1.83	
08	2.40	1.85	1.79		3.33	2.24	2.09	
10	2.43	1.89	1.84	1.75	3.85	2.43	2.25	
12	2.50	1.79	1.70	1.69	3.56	2.23	1.95	
14	2.50	1.81	1.80		3.75	2.13	2.25	
16	2.56	1.88	2.08		3.67	2.18		
18	2.60	1.82			3.38	2.10		
20	3.00	1.71			3.67	2.06		
22	3.00	1.70			3.75	2.11		
24	3.00	1.67	1.63		4.06	2.03		
26	2.38	1.63	1.59		3.75	2.15	1.90	
28	2.00	1.55	1.63		3.33	2.06		
30	2.14	1.63	1.73		3.22	2.13		

Tablica 3. Medijani 10-minutnih omjera mahovitosti po godinama i ukupno na 10 m i 50 m visine za interval brzina vjetra 6-12 ms<sup>-1</sup> (Konjsko).Table 3. Annual and total 10-min medians of gust factor at 10 m and 50 m height and wind speed interval 6-12 ms<sup>-1</sup> (Konjsko).

smjer	10-minutni podaci				satni podaci			
	1989	1990	1991	ukup.	1989	1990	1991	ukup.
32	1.66	1.66	1.65	1.66	1.50	1.55	1.49	1.50
02	1.69	1.70	1.68	1.69	1.50	1.49	1.49	1.49
04	1.72	1.75	1.73	1.73	1.41	1.42	1.36	1.40
06	1.67	1.65	1.65	1.65	1.44	1.38	1.44	1.42
08	1.90	1.78	1.79	1.79	1.67	1.67	1.86	1.73
10	1.85	1.78	1.87	1.84	1.61	1.54	1.52	1.55
12	1.71	1.69	1.70	1.70	1.53	1.52	1.55	1.53
14	1.80	1.85	1.80	1.80	1.69	1.48	1.48	1.53
16	/	/	/	2.08	1.45	1.49	1.45	1.45
18	/	/	/	/	1.48	1.42	1.42	1.42
20	/	/	/	/	/	/	/	1.49
22	/	/	/	/	1.52	/	1.42	1.46
24	1.67	/	1.59	1.63	1.48	1.43	1.41	1.45
26	1.65	1.53	1.58	1.59	1.50	1.42	1.45	1.45
28	1.63	1.66	1.62	1.63	1.45	1.49	1.45	1.44
30	1.66	1.76	1.71	1.71	1.55	1.51	1.55	1.55

/broj podataka manji od 10

Tablica 2. Medijani satnih i 10-minutnih omjera mahovitosti na 50 m visine (Konjsko, 1988–1991).

Table 2. Hour and 10-min medians of gust factor at 50 m height (Konjsko, 1988–1991).

smjer	10-minutni podaci, ms <sup>-1</sup>				satni podaci, ms <sup>-1</sup>			
	<2	2-6	6-12	>12	<2	2-6	6-12	>12
32	2.63	1.66	1.50	1.43	3.67	2.00	1.71	1.57
02	3.00	1.65	1.49	1.43	3.69	2.00	1.68	1.57
04	2.78	1.57	1.40	1.36	3.63	1.97	1.56	1.48
06	2.40	1.59	1.42	1.43	3.20	1.98	1.60	
08	2.27	1.71	1.73	1.74	3.00	2.17	1.98	
10	2.40	1.76	1.55	1.53	3.19	2.23	1.76	1.72
12	2.50	1.62	1.53	1.44	3.46	2.02	1.80	1.60
14	2.38	1.59	1.53		3.00	1.86	1.77	
16	2.17	1.53	1.45		3.00	1.76	1.75	
18	2.40	1.47	1.42		3.11	1.74		
20	2.83	1.54	1.49		3.25	1.86		
22	2.55	1.54	1.46		3.50	1.84		
24	3.00	1.52	1.45		2.87	1.89	1.67	
26	2.38	1.48	1.45		3.09	1.91	1.77	
28	1.67	1.44	1.44		2.71	1.91	1.66	
30	2.20	1.71	1.55		3.60	2.07	1.87	

Tablica 4. Medijani satnih i 10-minutnih omjera srednjih brzina  $u_{50}/u_{10}$  (Konjsko, 1988–1991).Table 4. Hours and 10-min medians of mean wind speed ratio  $u_{50}/u_{10}$  (Konjsko, 1988–1991).

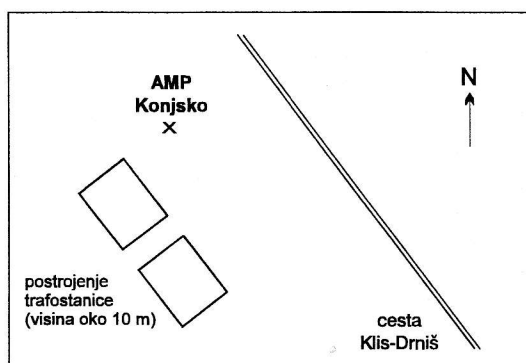
smjer	10-minutni podaci, ms <sup>-1</sup>				satni podaci, ms <sup>-1</sup>			
	<2	2-6	6-12	>12	<2	2-6	6-12	>12
32	1.08	1.17	1.21	1.24	1.25	1.18	1.21	1.24
02	1.08	1.26	1.31	1.30	1.16	1.27	1.30	1.30
04	1.13	1.39	1.43	1.34	1.25	1.45	1.43	1.33
06	1.00	1.28	1.43	1.44	1.06	1.29	1.41	
08	1.00	1.18	1.33	1.31	1.00	1.20	1.33	
10	1.00	1.24	1.27	1.28	1.14	1.26	1.27	1.29
12	1.06	1.20	1.28	1.31	1.08	1.25	1.28	1.30
14	1.00	1.25	1.42		1.07	1.24	1.41	
16	1.20	1.34	1.50		1.31	1.32	1.51	
18	1.17	1.30	1.41		1.27	1.31		
20	1.00	1.25	1.30		1.23	1.25		
22	1.00	1.19	1.16		1.15	1.20		
24	1.00	1.10	1.14		1.06	1.12	1.15	
26	1.13	1.11	1.15		1.17	1.12	1.15	
28	1.75	1.17	1.20		1.67	1.18	1.22	
30	1.33	1.15	1.17		1.28	1.15	1.17	

Tablica 5. Medijani satnih i 10-minutnih omjera maksimalnih brzina  $u_{m50}/u_{m10}$  (Konjsko, 1988–1991).  
Table 5. Hour and 10-min medians of maximum wind speed ratio  $u_{m50}/u_{m10}$  (Konjsko, 1988–1991).

10-minutni podaci, ms <sup>-1</sup>	satni podaci, ms <sup>-1</sup>							
	smjer <2	2-6	6-12	>12	<2	2-6	6-12	>12
32	1.25	1.09	1.09	1.10	1.17	1.08	1.07	1.10
02	1.25	1.13	1.12	1.11	1.13	1.11	1.10	1.10
04	1.25	1.17	1.16	1.11	1.29	1.15	1.14	1.09
06	1.13	1.09	1.14	1.12	1.07	1.07	1.13	
08	1.07	1.07	1.17	1.17	1.02	1.06	1.13	
10	1.15	1.15	1.14	1.15	1.14	1.13	1.13	1.14
12	1.15	1.07	1.13	1.15	1.13	1.08	1.12	1.14
14	1.08	1.07	1.17		1.08	1.06	1.15	
16	1.20	1.10	1.17		1.20	1.08	1.19	
18	1.18	1.09	1.13		1.17	1.08		
20	1.17	1.11	1.07		1.25	1.09		
22	1.11	1.07	1.03		1.15	1.05		
24	1.11	1.02	1.03		0.98	1.01	1.04	
26	1.18	1.04	1.04		1.13	1.04	1.03	
28	1.45	1.09	1.06		1.33	1.08	1.04	
30	1.33	1.08	1.08		1.24	1.06	1.07	

Za brzine vjetra veće od 2 ms<sup>-1</sup> omjeri srednjih brzina znatno su veći od 1.00, pa katkad uvriježeno mišljenje da kod jačih strujanja gotovo nema promjene brzine vjetra visinom očito ne vrijedi u najnižem dijelu graničnog sloja.

U tablici 5 navedene su vrijednosti medijana omjera maksimalnih brzina vjetra (maksimalni udari) s 50 m i 10 m visine iznad tla. Ako izuzmемо slaba strujanja, onda se može uočiti da su ti medijani gotovo konstantni u odnosu na porast brzine vjetra za najveći broj smjerova vjetra, a posebno ako razma-



Slika 2. Prikaz važnijih prepreka oko AMP Konjsko.

Figure 2. A illustration of the most important shelters surrounding AMS Konjsko.

tramo satne podatke. To bi moglo ukazivati na to da za određeni smjer vjetra maksimalni udari na višem nivou (50 m) kod umjerenoga i jačega strujanja zadržavaju sličan odnos prema maksimalnoj brzini vjetra na nižem nivou mjerenja (10 m).

Ta bi se činjenica mogla koristiti u slučajevima kad iz bilo kojih razloga trebamo podatak o maksimalnoj brzini na nekoj visini višoj od nivoa mjerenja, a postoje podaci maksimalnih brzina i pripadnih prevladavajućih smjerova vjetra npr. na 10 m od tla, kao i vrijednosti odnosa maksimalnih brzina na toj lokaciji ili u uvjetima sličnim takvu mjernom mjestu.

## 5. OMJER MAHOVITOSTI I HRAPAVOST PODLOGE

Vjetar na neki način "pamti" informaciju o hrpavosti, odnosno o karakteru podloge preko koje prolazi struja zraka, a ona je "sakrivena" u podacima srednje i maksimalne brzine vjetra. Ipak, najčešće je teško odrediti parametar hrpavosti  $z_0$  jer se mjerenje vjetra na većini meteoroloških postaja u Hrvatskoj obavlja samo na jednom nivou, a ako i postoji na dvije različite visine od tla, onda vrlo rijetko postoje mjerenja temperature zraka na tim nivoima ili ne postoje mjerenja nekih drugih veličina na osnovi kojih bi se moglo relativno pouzdano odrediti stabilnost promatranog graničnog sloja atmosfere. Potrebno je ustvari odrediti slučajeve neutralne stabilnosti i u takvim se uvjetima na osnovi podataka brzina vjetra s 2 nivoa mjerenja može izračunati vrijednost parametra hrpavosti  $z_0$ . Ako ne raspoložemo takvim podacima, onda se eventualno mogu koristiti jednostavnije metode, od kojih ćemo ovdje razmotriti samo onu koju je predložio Wieringa (1973, 1977).

On je metodu razradio na osnovi poznatih podataka o medijanu omjera mahovitosti za brzine vjetra veće od 6 ms<sup>-1</sup> samo s jednoga nivoa mjerenja iz relacija (1a):

$$\ln(z/z_0) = u/\sigma_u, \quad (1a)$$

$$G = u_m/u$$

Nakon razmatranja (detaljno obrazložena u Wieringa, 1973), dobivene su za smjer  $\theta$  sljedeće relacije za medijan omjera mahovitosti  $\langle G(\theta) \rangle$  i hrpavost  $z_0(\theta)$ :

$$\langle G(\theta) \rangle = 1 + \{ [1.42 + 0.3 \ln(-4 + 1000/U_t)] / \ln(z/z_0) \} \quad (1b)$$

$$z_0(\theta) = z \exp \{ - [1.42 + 0.3 \ln(-4 + 1000/U_t)] / [ \langle G(\theta) \rangle - 1 ] \} \quad (1c)$$

U tim relacijama  $\sigma_u$  označava standardnu devijaciju brzine vjetra,  $u$  srednju brzinu vjetra, a  $t$  vrijeme u kojem se bilježi maksimalni udar. Ovisno o izabranom mjernom uređaju vrijeme  $t$  kreće se 1 do 5 sekundi. Smjer vjetra označen je s  $\theta$ , pri čemu  $\langle G(\theta) \rangle$  (u nastavku  $G(\theta)$ ) označava medijan omjera mahovitosti za smjer vjetra  $\theta$ .

Metodu je Wieringa poboljšao tako da se uvažavaju podaci i o mjernom uređaju i periodu osrednjavanja, a  $z_0$  može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$z_0(\theta) = z \exp\{-Af_T[1.42 + 0.3 \ln(-4 + 1000/U_i)] / [G(\theta) - 1 + A - f_{TA}]\} \quad (2)$$

gdje je  $z$  visina mjerenja,  $A$  i  $U_i$  karakteristike mjernog sustava, a  $f_T$  je faktor koji ovisi o periodu osrednjavanja ( $f_T=1.00$  za 10 min,  $f_T=1.10$  za satne podatke).  $A$  označava amplitudu prigušenja maksimalnog udara  $u_m$  od mjernoga uređaja (anemometra i pisača) i kreće se oko 0.9 (Wieringa, 1977).  $U_i$  je srednja duljina vala najvećega zabilježenoga maksimalnoga udara  $u_m$ , koji je Wieringa odredio u rasponu od 31 do 90 za brzine vjetra  $>6 \text{ ms}^{-1}$ , a ovisi o tipu anemografa na mjernom mjestu. Naravno da spomenute karakteristike ovise i o standardnim veličinama mjernoga uređaja kao što su konstanta pređenoga puta  $L$  i vrijeme odziva pisača  $t_R$  (pisač je ovdje dio mjernog uređaja koji zapisuje podatke na papir, magnetski medij i sl.), što također neće biti detaljno obrazloženo, jer nije predmet ovoga rada. Napomenimo da je za prije spomenut anemograf (u sklopu automatske meteorološke postaje) u Konjskom nađeno u tehničkoj dokumentaciji i na osnovi kontakata s proizvođačem da  $L$  iznosi 2 m,  $t_R=0.05$  sek, a za takve karakteristike Wieringa navodi da je  $A=0.93$  i  $U_i=31$ .

U tablici 6 nalaze se vrijednosti medijana parametra hrapavosti  $z_0$  (u cm) po smjerovima vjetra (02–32) koji su određeni prema relaciji (3) samo za neutralno stanje graničnoga sloja, osim za Wieringinu metodu (1, 2, 3, 4) koja obuhvaća sve podatke brzine vjetra veće od  $6 \text{ ms}^{-1}$  bez obzira na stabilnost, a koristeći relaciju (2).

$$u_{50}/u_{10} = \ln(50/z_0)/\ln(10/z_0) \quad (3)$$

Neutralna stabilnost u sloju 10–50 m određivana je prema metodama Pasquilla (5), Vogta (6) i Richardsona broja (7). Razlike u tako dobivenim vrijednostima  $z_0$  su vrlo male, osim za  $z_0$  iz (5), koji nešto više odstupa od referentne metode (7). Richardsonov broj (7) je izabran kao referentna metoda za određivanje neutralne stabilnosti jer jedini uvažava podatke temperature zraka i vjetra s oba mjerna nivoa.

Očito je (Slika 2) da prepreke iz južnih i jugozapadnih smjerova (postrojenje trafostanice) utječu na povećanje hrapavosti, ali takvih prepreka nema iz smjerova NE(04)–E(08). Međutim, na hrapavost ima utjecaj konfiguracija terena koja je u NE kvadrantu upravo takva da parametar hrapavosti ima iznos znatno veći od nekoliko cm.

Vrijednosti  $z_0$  iz podataka vjetra s 10 m (1) su za gotovo sve smjerove za red veličine veće od "prave" hrapavosti (7), dok na osnovi podataka samo sa 50 m (2) ne bi trebalo proračunavati hrapavost ovom metodom, jer dobivene vrijednosti ne pokazuju vezu između omjera mahovitosti i lokalne hrapavosti.

S druge strane postoji problem određivanja karakteristika elektronskoga mjernoga instrumenta  $A$  i  $U_i$ . Kako se amplituda zapisa  $A$  kreće u usku intervalu između

0.84 i 0.93 za razne načine mjerenja i registriranja podataka vjetra pretpostavimo da je  $A=0.93$  dovoljno dobra procjena. Ostaje problem određivanja parametra  $U_i$  (prosječna duljina vala maksimalnog udara), koji je proračunat prema (1) iz poznatih podataka s 10 i 50 m visine,  $G(\theta)$  i  $z_0$  (iz 7), a dobivani iznosi za pojedine smjerove nalaze se u tablici 7.

Dobivene vrijednosti za  $U_{i10}$  kreću se od 0.01 do 52.33, a za  $U_{i50}$  između 0.02 i 117.83, pa izlazi da parametar  $U_i$  nije konstanta koja je ovisna samo o izabranom mjernom sustavu i načinu bilježenja podataka, već se ona proteže u tako široku intervalu da je bar za ovu lokaciju i ovaj mjerni sustav upitna Wieringina pretpostavka o konstantnosti parametara  $A$  i  $U_i$ . To znači da se u uvjetima kompleksnoga terena postavlja pitanje primjenjivosti ove metode, a onda i pitanje kako u takvim uvjetima proračunati lokalnu hrapavost  $z_0$ . Pored toga Wieringa navodi da ovu metodu ne bi trebalo koristiti u slučajevima kada  $z/z_0 < 25$  (Wieringa, 1973), a što je za Konjsko ispunjeno samo za smje-

Tablica 6. Medijani parametra hrapavosti  $z_0$  (cm) određenih metodama: 1, 3 – Wieringa (10 m), 2, 4 – Wieringa (50 m), 5 – Pasquill, 6 – Vogt, 7 – Richardsonov broj [1, 2 – iz relacije (1c); 3, 4 – iz relacije (2), 5, 6, 7 – neutralno stanje atmosfere (stabilnost D) – iz relacije (3)].

Table 6. Roughness parameter medians  $z_0$  (cm) estimated with the following methods: 1, 30 – Wieringa (10 m), 2, 4 – Wieringa (50 m), 5 – Pasquill, 6 – Vogt, 7 – Richardson number [1, 2 – relation (1c); 3, 4 – relation (2), 5, 6, 7 – neutral condition of atmosphere (stability D) – relation (3)].

metoda	1	2	3	4	5	6	7
32	13	16	33	56	0	1	1
02	15	14	39	46	2	4	4
04	20	5	48	16	7	15	13
06	12	4	32	24	23	32	30
08	29	115	65	356	10	34	32
10	32	26	67	61	3	8	7
12	17	18	40	67	2	3	3
14	26	58	63	67	11	14	19
16	54	(32)	125	34	76	50	68
18	(102)	(247)	171	24	75	58	63
20	(93)	(203)	161	51	12	19	23
22	(29)	10	65	38	0	15	7
24	10	8	28	42	0	3	4
26	7	7	21	34	0	0	1
28	10	13	28	30	0	3	2
30	15	25	42	84	0	1	2

(102) - broj podataka manji od 10

(102) - number of data less than 10

Tablica 7. Vrijednosti parametra  $U_i$  po smjerovima iz podataka s 10 m i 50 m.

Table 7. Estimated value of parameter  $U_i$  for different wind direction from 10 m and 50 m data.

smjer	$U_{10}$	$U_{50}$
32	0.03	0.08
02	0.36	1.28
04	3.62	48.55
06	52.33	69.99
08	10.70	0.62
10	0.18	2.03
12	0.15	0.30
14	1.14	4.28
16	2.38	78.53
18	0.68	117.83
20	0.01	12.22
22	1.20	14.69
24	0.59	1.04
26	0.19	0.33
28	0.59	2.16
30	0.01	0.02

rove S(16) i SSW(18). Za ostale smjerove mogla se dakle ispitati primjenjivost ove metode, ali kako pokazuju dobiveni rezultati, lokalna hrapavost se ne može pouzdano odrediti na osnovi mjerenja vjetera samo na jednom nivou mjerenja.

Prema istraživanjima Tielemana (1992) treba strogo razlikovati pojmove "lokalne" i "regionalne" hrapavosti, a u uvjetima kompleksnog terena vrijedi da je "regionalna" hrapavost od "lokalne" hrapavosti veća najmanje za jedan red veličine. Rezultati dobiveni Wieringinom metodom upućuju na to da su proračunate vrijednosti  $z_0$  bliže vrijednostima "regionalne" hrapavosti nego "lokalne".

U budućem razmatranju bilo bi interesantno obraditi i analizirati podatke mjerenja vjetera u uvjetima relativno homogenog terena (npr. podatke AMP Sisak) i ispitati primjenjivost Wieringine metode. Očito je da vezu između podataka vjetera i hrapavosti treba još detaljnije razraditi, a posebno kada se mjerenja obavljaju u uvjetima terena sličnih Konjskom. Dok se ne nađe dovoljno dobro rješenje za taj problem, nužno je, ukoliko ne raspoložemo podacima specijalnih mjerenja turbulentnih fluksova, koristiti bar podatke mjerenja temperature zraka i vjetera s 2 ili više nivoa u uvjetima neutralne stratifikacije graničnog sloja. Iz podataka s jednoga nivoa mjerenja treba vrlo pažljivo procijeniti može li izabrana metoda dati dovoljno prihvatljive rezultate, koji se onda mogu upotrijebiti u daljnjoj analizi.

#### 4. ZAKLJUČAK

Medijani omjera mahovitosti s 10 m i 50 m pokazuju najveće vrijednosti u uvjetima slabih strujanja, koje se smanjuju povećanjem intervala brzine vjetera, za razliku od medijana omjera srednjih brzina (50 m/10 m), koji s porastom brzine rastu. Medijani omjera maksimalnih brzina s 50 i 10 metara visine jesu, izuzimajući slaba strujanja, gotovo konstantni za veći broj smjerova vjetera, a osobito kod satnih podataka. To znači da maksimalni udari na višem nivou mjerenja zadržavaju približno sličan odnos prema maksimalnoj brzini mjerenju na nižem nivou za određeni smjer vjetera, pa bi se to moglo koristiti za razne potrebe, npr. kod projektiranja kada su potrebni podaci o maksimalnim udarima jakih ili olujnih vjetrova (bura, jugo) na nekoj visini većoj od uobičajenih 10 m od tla.

U drugom dijelu rada prikazani su neki postupci za određivanje parametra hrapavosti, koji se može procijeniti na osnovi gore prikazanih podataka, omjera srednjih brzina ili omjera mahovitosti. Nađeno je da relacija za određivanje lokalne hrapavosti koju je predložio J. Wieringa ne zadovoljava u uvjetima tako kompleksnog terena, pa je potrebno, gdje je god to moguće, određivati hrapavost iz mjerenja vjetera bar s 2 različite visine od tla u uvjetima neutralne stabilnosti.

**Zahvala:** Ovaj rad je izrađen uz veliku potporu Zvonka Žibrata i dr Nade Pleško. Autor se posebno zahvaljuje dr Nadeždi Šinik na korisnim primjedbama i sugestijama.

**Acknowledgment:** The author thanks Mr. Zvonko Žibrat and Ms Nada Pleško for their generous support. In particular, he would like to thank Ms Nadežda Šinik for contributing detailed comments and suggestions.

#### LITERATURA:

- Holtstag A. A. M., 1984: Estimates of diabatic wind speed profiles from near-surface weather observations, *Boundary-Layer Met.*, **29**, 225–250.
- Justus C. G. & A. S. Mikhail, 1976: Height variation of wind speed and wind distribution statistics, *Geoph. Res. Lett.*, **3**, 261–264.
- Mason P. J., 1988: The formation of areally-averaged roughness lengths, *Quart. J.R.M.S.*, **114**, 399–420.
- Mikhail A. S., 1983: Height extrapolation of short and long-term averaged wind data, *Annual Meeting of the American Solar Energy Society*, Minneapolis, Minnesota, June 1983, pp 7.
- Mikhail A. S. & C. G. Justus, 1981: Comparison of height extrapolation models and sensitivity analysis, *Wind Eng.*, **5**, 377–397.
- Peterson E. W. & J. P. Jr. Hennessey, 1978: On the use of power laws for estimates of wind power potential, *J. Appl. Met.*, **17**, 390–394.
- Sedefian L., 1980: On the vertical extrapolation of mean wind power density, *J. Appl. Met.*, **19**, 488–493.

- Solari G., 1990: A generalized definition of gust factor, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **36**, 539–548.
- Tieleman H. W., 1992: Wind characteristics in the surface layer over heterogeneous terrain, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **41–44**, 329–340.
- Wieringa J., 1973: Gust factors over open water and built-up country, *Boundary-Layer Met.*, Vol **3**, 424–441.
- Wieringa J., 1977: Wind representativity increase due to an exposure correction, obtainable from past analog station wind records, *Proc. WMO Tehn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO)*, Hamburg, July 1977 (WMO-No. 480), 39–44.
- Wieringa J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages, *Quart. J. R. M. S.*, **112**, 867–889.