

ЦРНОГОРСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЈЕТНОСТИ
ГЛАСНИК ОДЈЕЉЕЊА ПРИРОДНИХ НАУКА, 19, 2011.

ЧЕРНОГОРСКАЈА АКАДЕМИЈА НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОДДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 19, 2011

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
GLASNIK OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 19, 2011.

UDK 533.6.08

Slobodanka Čabarkapa, Petar Vukoslavčević**

UTICAJ VERTIKALNE KOMPONENTE STRUJANJA NA TAČNOST ANEMOMETARA ZA MJERENJE BRZINE VJETRA

Sažetak

Analiziran je uticaj vertikalne komponente brzine vjetra na tačnost mjerenja anemometra sa čašicama i anemometra sa zagrijanim vlaknom i određena greška mjerenja za različite intenzitete i položaj vektora brzine vjetra. Mjerenja su obavljena na aerodinamičkom tunelu Mašinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore. Pokazano je da je anemometar sa čašicama osjetljiv na vertikalnu komponentu brzine i da greška mjerenja trenutne vrijednosti horizontalne komponente može biti i do 30% za veće vrijednosti ugla nagiba vektora brzine. Za manje vrijednosti ugla nagiba greška se kreće u granicama $\pm 5\%$. Maksimalna greška anemometra sa zagrijanim vlaknom je u opsegu $\pm 5\%$ za veće, dok je manja od 1.5% za manje uglove nagiba vektora brzine strujanja vjetra.

Abstract

An analysis of the influence of vertical velocity component of wind speed on the measurement accuracy of the vortex and hot wire anemometer has been performed and measurement error determined. The measure-

* Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica

ments were conducted in the wind tunnel at the Faculty of mechanical engineering, University of Montenegro. It has been proved that vortex anemometer is very sensitive to the influence of the vertical velocity component and that the measurement error can be up to 30% of the instantaneous wind speed, for the high values of the velocity vector angle inclination. For the smaller values of this angle it is in the range of 5%. The maximal error of the hot wire anemometer is up to $\pm 5\%$ for higher inclination angles and less than 1.5% for the smaller values of this angle.

1. UVOD

U okvirima globalne ekonomije, kojom dominira trend brzih promjena, sposobnost samostalnog zadovoljavanja energetske potrebe ima značajnu ulogu pri planiranju budućnosti svake zemlje. Kako bi se smanjila zavisnost od fosilnih goriva i izvora energije iz uvoza, mnoge zemlje su pokrenule programe istraživanja i razvoja u sektoru obnovljivih izvora energije.

Problemi tehnologije fosilnih goriva su više nego očigledni. Oslobođanja velike količine gasova izaziva nepovoljne klimatske promene, pojavu efekta staklene bašte zagađenja, i sl. To je dovelo do ekspanzije obnovljivih izvora energije, tj. primjene „čistih” ili „zelenih” tehnologija, koja je značajno uvećana posljednjih decenija. Tehnologije koje su ranije smatrane egzotičnim i neobičnim, danas su komercijalne i pariraju tehnologijama koje su bazirane na fosilnim gorivima i njihovim derivatima. Jedan od obnovljivih izvora čiji globalni potencijal višestruko prevazilazi svjetske potrebe za električnom energijom je energija vjetra.

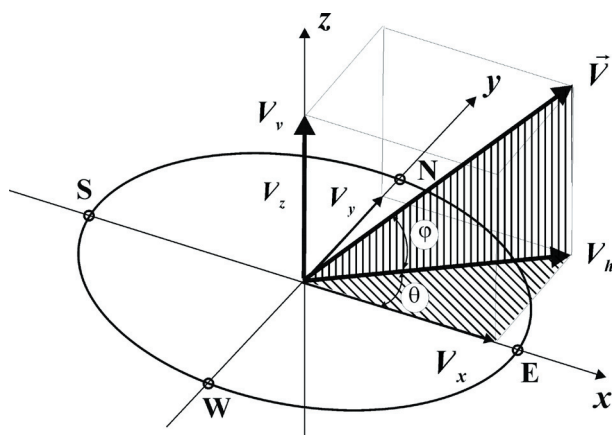
Vjetar je vazduh u kretanju koje je uslovljeno neravnomjernim zagrijavanjem Zemljine površine. Pojava, intenzitet i pravac vjetra su zavisni od velikog broja faktora: konfiguracije i vrste tla, raspodjele vodenih masa, vremenskog perioda (dan, noć, godišnje doba) i sl. Neophodno je poznavati prirodu vjetra; intenzitet, pravac i smjer brzine na datoj lokaciji prije nego što se pristupi njegovom iskorišćenju. Ovi parametri se određuju mjerenjem odgovarajućim instrumentima. Prihvatljiva greška mjerenja potencijala vjetra danas je oko 1%. Greška mjerenja zavisi od niza parametara. Jedan od njih, o čijem uticaju proizvođači instrumenata najčešće ne daju nikakve podatke, je i vertikalna komponenta brzine vjetra.

Investicija u anemometre koji obezbjeđuju visoku tačnost je zanemarljiva u poređenju sa posledicama koje bi nastale usljed loše procjene energije vjetra. S obzirom na to da su danas u upotrebi instrumenti za mjerenje

intenziteta i pravca brzine vjetra odnosno anemometri različitih tačnosti, u radu je izvršena analiza uticaja vertikalne komponente brzine vjetra za dvije od tri najčešće primjenjivane vrste anemometara; anemometra sa čašicama i anemometra sa zagrijanim vlaknom.

2. BRZINA VJETRA

Brzina strujanja vjetra je određena pravcem, smjerom i intenzitetom. Vektor brzine vjetra je prikazan u nepokretnom koordinatnom sistemu čije se ose poklapaju sa stranama svijeta, Sl. 1.

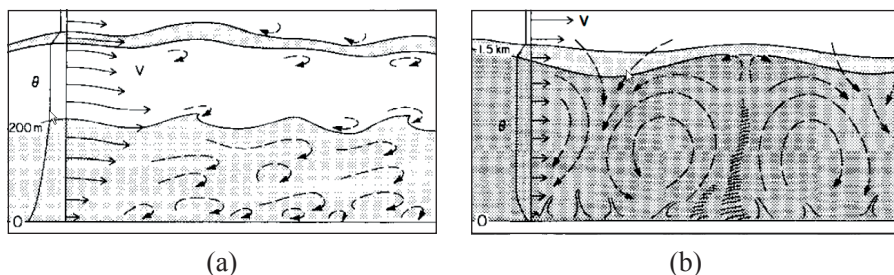


Sl. 1. Komponente vektora brzine vjetra

Vektor brzine vjetra \vec{V} se može razložiti na dvije komponente; horizontalnu komponentu V_h , koja je od posebnog značaja kada je u pitanju korisna energija vjetra i vertikalnu komponentu V_v , ili na tri komponente u pravcu osa koordinatnog sistema; V_x , V_y i V_z . Pravac vektora brzine se može definisati i u sfernom koordinatnom sistemu pomoću uglova φ i θ prikazanih na Sl. 1.

Strujanje vazduha na zemljinoj površini se odvija u tzv. atmosferskom graničnom sloju, čija je debljina reda veličine 1 km, Folz and Wallace (2010). Kada je u pitanju korisna energije vjetra, od posebnog značaja je strujanje neposredno uz zemljinu površinu u tzv. površinskom sloju, čija je debljina reda veličine 100 m. Strujna slika, u datom trenutku vremena, zavisi od niza uslova, od kojih su najvažniji: konfiguracija i vrsta površine, vremenski period (dan, noć, godišnje doba), intenzitet tur-

bulencije i sl. Na Sl. 2(a) je prikazana strujna slika u atmosferskom graničnom sloju na kojoj su uočljivi makrovtlozi koji se javljaju usljed zagrijavanja tla, a na Sl. 2(b) opšti slučaj strujanja u površinskom graničnom sloju, Wyngaard (1992).

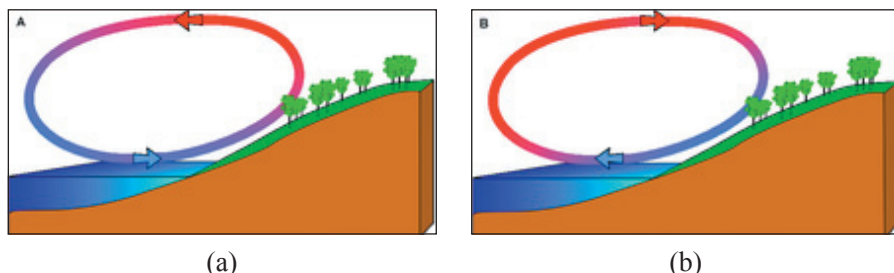


Sl. 2 Strujanje u atmosferskom (a) i površinskom graničnom sloju (b)

Uočljiv je niz vrtloga čiji se pravac, intenzitet i smjer mijenja u toku vremena. Ove promjene mogu biti lokalnog karaktera, izazvane turbulencijom na lokalnom nivou, pri čemu su srednje vrijednosti konstantne u određenom vremenskom periodu. U opštem slučaju srednja brzina, koja može imati sve tri komponente različite od nule, je funkcija vremena, sa nekim karakterističnim vrijednostima tokom dana ili godišnjeg doba.

Usljed različite vrste i konfiguracije tla dolazi do neravnomjernog zagrijavanja njegove površine, što generiše lokalne vjetrove čiji se pravac mijenja u toku noći i dana (dnevna varijacija brzine vjetra). Ovakva strujna slika je karakteristična za prelaze sa ravnih na uzdignute terene i sa vodenih površina na čvrsto tlo. Na Sl. 3 je prikazan smjer vjetra na spoju mora i kopna.

Usljed bržeg zagrijavanja tla u toku dana, dolazi do pada pritiska iznad tla u odnosu na vodenu površinu, što izaziva kretanje vazduha ka

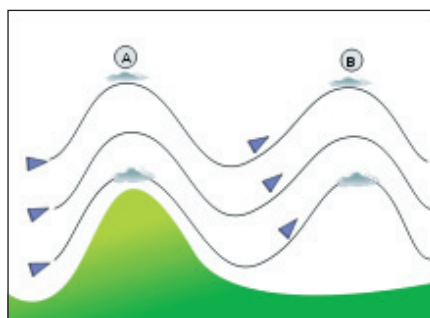


Sl. 3. Strujanje vazduha na spoju vodene površine i tla u toku dana (a) i tokom noći (b)

kopnu. Na većim visinama smjer strujanja je obrnut. Stvara se vrtlog koji može imati i vertikalnu komponentu brzine. Intenzitet ove komponente zavisi od rastojanja od obale, vrste i konfiguracije tla. Može se formirati i na potpuno ravnoj površini. Usljed trenja vazduha o površinu, stvara se otpor čiji je efekat ekvivalentan otporu neke barijere koja usmjerava vazduh u vertikalnom pravcu. U toku noći smjer strujanja je suprotan dnevnom, jer se tlo brže hladi od vodene površine, tako da je pritisak iznad tla veći od pritiska iznad vodene površine, što uslovljava strujanje vazduha ka vodenoj površini.

Postoji poseban tip dnevne varijacije brzine kod jakih vjetrova, a za njih je karakteristično da u 24 sata imaju dva minimuma i dva maksimuma brzine. Godišnja varijacija brzine vjetra je često jako složena jer istovremeno može djelovati više parametara. Osim temperature, važna je i godišnja promjena pritiska.

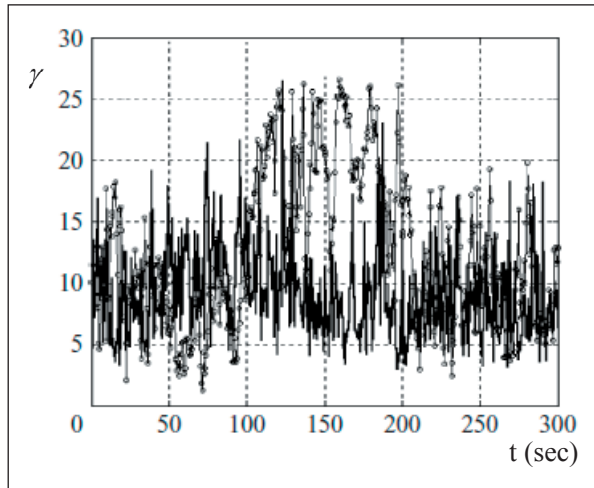
Pored nagiba tla i pojave makrovrtloga, komponentu brzine u vertikalnom pravcu može izazvati i prepreka koja se nalazi na relativno velikom rastojanju od mjernog mjesta. Na Sl. 4 je prikazan poremećajni talas koji generiše uzvišenje i koji se prostire u glavnom pravcu strujanja vjetra, sa vertikalnom komponentom brzine iznad relativno ravnog tla.



Sl. 4. Prostiranje poremećajnog talasa izazvanog lokalnim uzvišenjem

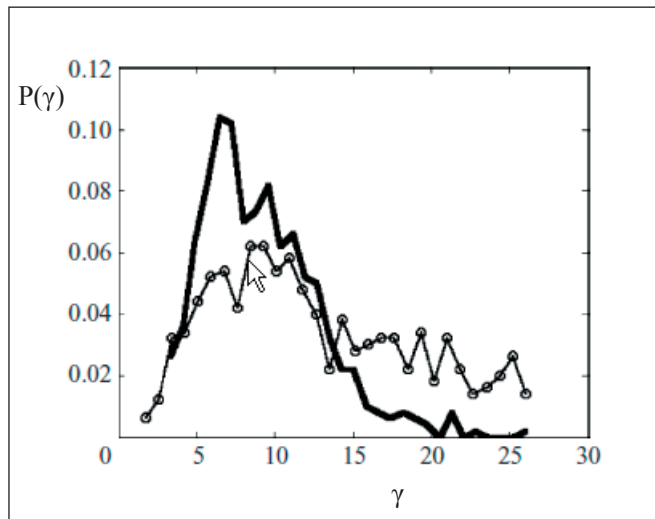
Čak i pri strujanju preko ravne površine, sa dominantnim strujanjem u jednom (horizontalnom) pravcu, vektor brzine mijenja intenzitet, pravac i smjer usljed pojave turbulencije koja se generiše na ravnoj površini, Sl. 5.

Na slici je prikazana promjena ugla γ vektora brzine u odnosu na glavni pravac strujanja u toku vremena na rastojanju od 1 do 10 m od relativno ravnog tla pri srednjoj brzini vjetra od približno 7 m/s.



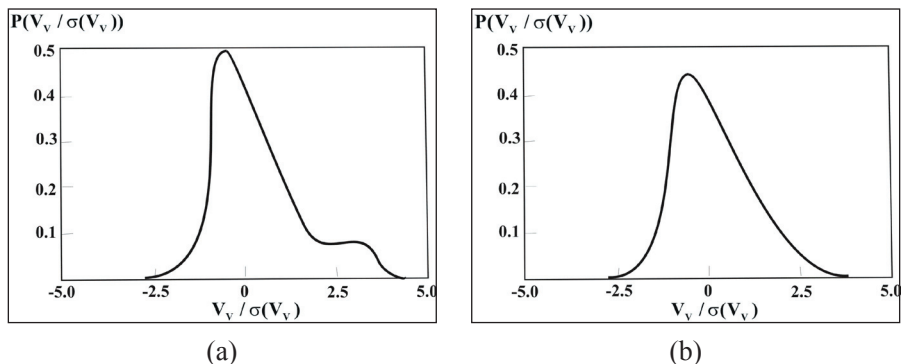
Sl. 5. Ugađ odstupanja vektora brzine γ od glavnog pravca strujanja u funkciji vremena t : — kontinentalna oblast, \circ morska obala

Na Sl. 6 je prikazana vjerovatnoća pojave određene vrijednosti ugla vektora brzine. Mjerenja su obavljena u neposrednoj blizini morske obale i u kontinentalnom dijelu na nadmorskoj visini od 1800 m, Gulitski et al. (2007).



Sl. 6. Vjerovatnoća pojave ugla određene vrijednosti: — kontinentalna oblast, \circ morska obala

Sa Sl. 5 se vidi da odstupanje vektora brzine od glavnog pravca strujanja može biti i do 30° a sa Sl. 6 da je najveća vjerovatnoća pojave ugla od 5 do 10° . Iako su srednja odstupanja intenziteta i pravca brzine usljed turbulencije na lokalnom nivou praktično zanemarljiva, ona mogu imati uticaja na tačnost mjerenja horizontalne komponente brzine vjetra, naročito ako se ima u vidu da je raspodjela intenziteta vertikalne komponente brzine u graničnom sloju asimetrična. Vjerovatnoća pojave pozitivnih i negativnih vrijednosti vertikalne komponente brzine nije ista. Stepen asimetrije se prema Le Mone (1990) kreće u granicama $0 < S < 1.2$. Uticaj stepena asimetrije na vjerovatnoću raspodjele vertikalne komponente brzine je prikazan na Sl. 7, Shuming Du et all. (1993)), na kojoj je data vjerovatnoća raspodjele vertikalne komponente brzine, normalizovane sa njenom standardnom devijacijom.



Sl. 7. Vjerovatnoća raspodjele vertikalne komponente brzine u površinskom graničnom sloju: (a) stepen asimetrije $S=0.65$, (b) stepen asimetrije $S=1.0$.

Sa slike se vidi da je u ovom slučaju pojava visokih pozitivnih vrijednosti znatno veća od pojave visokih negativnih vrijednosti vertikalne komponente brzine.

3. INSTRUMENTI ZA MJERENJE BRZINE VJETRA

Postoji više vrsta instrumenata – anemometara za mjerenje brzine vjetra. Jedna od mogućih podjela je na mehaničke i nemehaničke anemometre.

Kod mehaničkih anemometara postoje pokretni, odnosno djelovi koji mogu da rotiraju. Pokretanje ovih djelova vrši sila otpora struji vazduha. U ovu grupu spadaju anemometri sa čašicama, koji se najčešće koriste, kao i propelerni anemometri.

U drugu grupu spadaju anemometri sa zagrijanim vlaknom, ultrasonični, laserski i dr. Anemometar sa zagrijanim vlaknom sadrži tanku zagrijanu nit od wolframa ili legura platine, čiji intenzitet hlađenja zavisi od brzine vjetra. Ultrasonični anemometri detektuju promjenu faze zvuka a laserski faze koherentne svjetlosti odbijene od molekula vazduha. Za razliku od mehaničkih anemometara koji mjere samo horizontalnu komponentu brzine vjetra, ovi anemometri mogu, zavisno od broja senzora, mjeriti sve tri komponente brzine vjetra. Takođe su pogodni za mjerenje izrazito nestacionarne brzine strujanja jer mogu registrovati i promjene brzine čija je frekvenca nekoliko kHz. Anemometri sa zagrijanim vlaknom imaju najbolju prostornu rezoluciju, koja je za red veličine veća od ultrasoničnih anemometara.

S obzirom na to da se analiza greške mjerenja usljed uticaja vertikalne komponente brzine odnosi samo na anemometar sa čašicama i anemometar sa zagrijanim vlaknom, slijedi kraći opis principa rada ovih anemometara.

3. 1. Anemometri sa čašicama

Anemometar sa čašicama, Sl. 8, je uprkos jednostavnoj tehnici mjerenja, danas najrasprostranjeniji anemometar za in-situ mjerenja brzine vjetra.

Prvobitni anemometar imao je četiri čašice. Danas se najčešće koristi anemometar sa tri čašice, dok broj čašica može biti četiri ili šest. One su postavljene na nosače, koji su montirani na vertikalnoj osovine. Osa rotacije čašica je normalna u odnosu na horizontalnu ravan u kojoj se vrši mjerenje brzine vjetra. Kada se nađu u struji vazduha, konkavne površine čašica pružaju veći otpor u odnosu na konveksne, što ima za posljedicu pojavu obrtnog momenta u centru ose anemometra odnosno njegove rotacije.

Broj obrtaja anemometra je proporcionalan brzini strujanja vjetra. Funkcija proporcionalnosti se određuje baždarenjem. Prenosni mehanizam na odgovarajućoj skali pokazuje intenzitet brzine.

Anemometar se koristi za mjerenje horizontalne komponente brzine vjetra, V_h . Pokazivanje anemometra ne zavisi od pravca horizontalne komponente odnosno od ugla θ (vidi Sl. 1), koji se može mjeriti posebnim uređajem montiranim na obrtnom postolju. Smatra se da je uticaj vertikalne komponente brzine na tačnost mjerenja horizontalne komponente zanemarljiv. Tačnost ove pretpostavke zavisi od intenziteta vertikalne komponente brzine i predmet je analize u ovom radu.



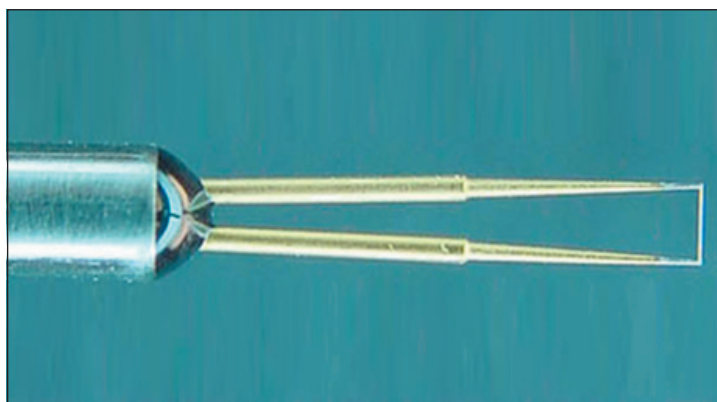
Sl. 8. Anemometar sa čašicama firme NRG Systems

Da bi se smanjila inercija čašica i time povećala tačnost i omogućilo mjerenje najmanjih brzina, čašice se prave od laganih i dodatno ojačanih materijala, kao što su plastika, polistirenska pjena, plastika ojačana ugljeničnim vlaknima i od nekih drugih sličnih kompozitnih materijala.

3. 2. Anemometri sa zagrijanim vlaknom

Davači ovih instrumenata su tanki metalni elementi cilindričnog oblika (tzv. zagrijane žice, vlakna, odnosno niti), čiji je električni otpor funkcija temperature, učvršćeni na dva nosača (Sl. 9).

Griju se električnom strujom, koja kroz njih protiče, uz istovremeno hlađenje preko više različitih mehanizama među kojima je dominantna prinudna konvekcija opstrujavanim fluidom. Količina toplote odvedena



Sl. 9. Senzor anemometra sa zagrijanim vlaknom

putem prinudne konvekcije se može odrediti na osnovu poznate Newton-ove formule,

$$Q = hS(T_w - T_f), \quad (1)$$

u kojoj je $h[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ koeficijent konvektivnog prenosa toplote, $S[m^2]$ površina senzora a T_w i T_f temperature senzora i fluida. Koeficijent konvektivnog prenosa toplote se može definisati u bezdimenzionom obliku pomoću Nusselt-ovog broja,

$$N_u = \frac{hD}{\lambda_f}, \quad (2)$$

u kome je $D[m]$ prečnik senzora a $\lambda_f[W/m \cdot ^\circ C]$ koeficijent kondukcije vazduha.

Prema Kramers-u (1946), Nussel-ov broj se može izraziti kao funkcija Reynolds-ovog, $R_e = \frac{VD}{\nu}$, i Prandtl-ovog, $P_r = \frac{\nu}{a}$, broja:

$$N_u = M(P_r) + N(P_r)R_e^n. \quad (3)$$

U ovom izrazu su: $V[m/s]$ brzina strujanja u pravcu normale na senzor, $D[m]$ prečnik senzora, $\nu[m^2/s]$ koeficijent kinematske viskoznosti vazduha i $a[m^2/s]$ koeficijent toplotne difuzije vazduha.

Energija generisana u senzoru se može odrediti na osnovu Jule-ovog zakona,

$$P = E^2 / R, \quad (4)$$

u kome je $E[V]$ napon na krajevima senzora a $R[\Omega]$ otpor senzora.

Polazeći od zakona o održanju energije, za senzor čija je unutrašnja energija U slijedi,

$$\frac{dU}{dt} = P - Q. \quad (5)$$

Kombinujući prethodne izraze i imajući u vidu da je promjena unutrašnje energija senzora $dU = \rho c \frac{D^2 \pi}{4} L dT$ ($\rho[kg/m^3]$ – gustina materijala senzora, $c[J/kg \cdot ^\circ C]$ – specifična toplota senzora, $L[m]$ – dužina senzora, $T[^\circ C]$ – temperatura senzora, iz zakona o održanju energije (5) se dobija da je:

$$\frac{E^2}{R} = \lambda \pi L \left[M(P_r) + N(P_r) R_c^n \right] (T - T_f) + c \rho \frac{D^2 \pi}{4} L \frac{dT}{dT}. \quad (6)$$

Senzor se povezuje u električno kolo koje obezbjeđuje održavanje konstantne temperature T senzora. Imajući to u vidu, prethodni izraz se svodi na oblik,

$$E^2 = A(T_f) + B(T_f) V^n, \quad (7)$$

koji je poznat kao King-ov zakon, King (1914).

Slijedi da se mjerenjem promjene napona na senzoru može odrediti brzina strujanja vazduha ako je poznata njegova temperatura T_f . Funkcije A i B se određuju baždarenjem u aerotunelima sa poznatom brzinom strujanja vazduha. One su konstante za datu temperaturu vazduha. Ukoliko je temperatura vazduha promjenljiva, uticaj temperature, koji nije izrazito velik, se može lako kompenzovati.

Kada brzina strujanja nije u pravcu normale na senzor, on pokazuje tzv. efektivnu brzinu strujanja koja je određena sljedećim izrazom (Jorgensen (1971)):

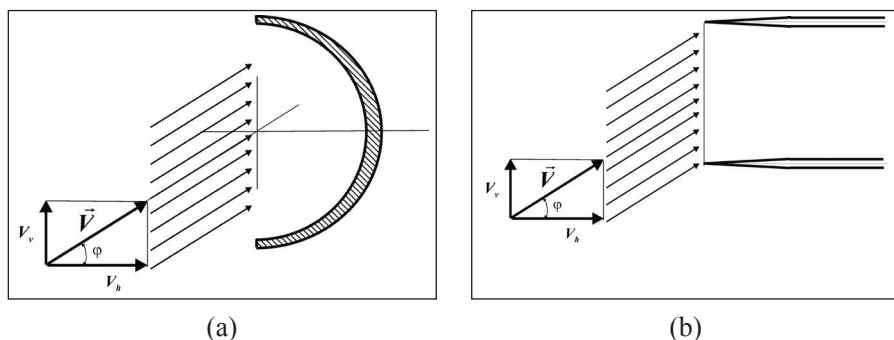
$$V_{ef}^2 = V_n^2 + k_t V_t^2 + k_n V_b^2, \quad (8)$$

u kome su: V_n – brzina u pravcu normale na senzor u ravni senzora i nosača, V_t – brzina duž senzora i V_b – brzina normalna na ravan koju obrađuje senzor sa svojim nosačima.

4. ODREĐIVANJE GREŠKE MJERENJA USLJED UTICAJA VERTIKALNE KOMPONENTE BRZINE

Sila otpora koja pokreće čašice je funkcija koeficijenta otpora čašice koji zavisi od ugla nagiba vektora brzine u odnosu na osu čašice, Sl. 10(a).

Zavisnost ovog koeficijenta od ugla nagiba i intenziteta vektora brzine, za čašicu odgovarajućeg presjeka, se određuje eksperimentalnim putem. Iako se na osnovu ovog koeficijenta može odrediti sila otpora čašice i njen obrtni moment, obrtni moment anemometra od koga zavisi brzina njegovog obrtanja je složena funkcija istovremenog dejstva sila otpora više čašica koje mijenjaju svoj položaj u toku obrtanja.



Sl. 10. Struja vazduha pod uglom φ u odnosu na horizontalnu osu anemometra sa čašicom (a) i anemometra sa zagrijanim vlaknom (b)

Imajući to u vidu, uticaj vertikalne komponente brzine, odnosno ugla nagiba vektora brzine na tačnost mjerenja se najjednostavnije određuje eksperimentalnim putem, mjerenjem odziva anemometra pri različitim uglovima φ u aerodinamičkim tunelima i upoređivanjem indukovane i izmjerene horizontalne komponente brzine vjetra.

Senzor anemometra sa zagrijanim vlaknom, Sl. 10(b), postavlja se u vertikalnoj ravni, na obrtno postolje koje se okreće pod dejstvom binormalne komponente vjetra, tako da mu je $V_n = V_h$, $V_t = V_v$ i $V_b = 0$. Efektivna odnosno izmjerena brzina strujanja vjetra će biti:

$$V_g = V_m = \sqrt{V_h^2 + k_t V_v^2} \quad (9)$$

Očigledno je da će se u zavisnosti od veličine koeficijenta k_t i vertikalne komponente brzine V_v izmjerena (efektivna) i horizontalna komponenta brzine razlikovati. Eksperimentalnim putem je utvrđeno da ovaj koeficijent prvenstveno zavisi od odnosa dužine i prečnika vlakna i da se kreće u granicama 0.01-0.04. Iako se, koristeći izraz (9), uticaj ovog koeficijenta na grešku mjerenja može lako odrediti, greška mjerenja zavisi i od drugih parametara kao što su npr. dimenzije nosača senzora (prečnik i dužina), prečnik držača sonde, uticaj prirodne konvekcije pri malim brzinama i sl. Imajući to u vidu, najpouzdaniji metod određivanja greške mjerenja je, kao i u slučaju anemometra sa čašicama, upoređivanje indukovane i izmjerene komponente brzine u aerodinamičkom tunelu.

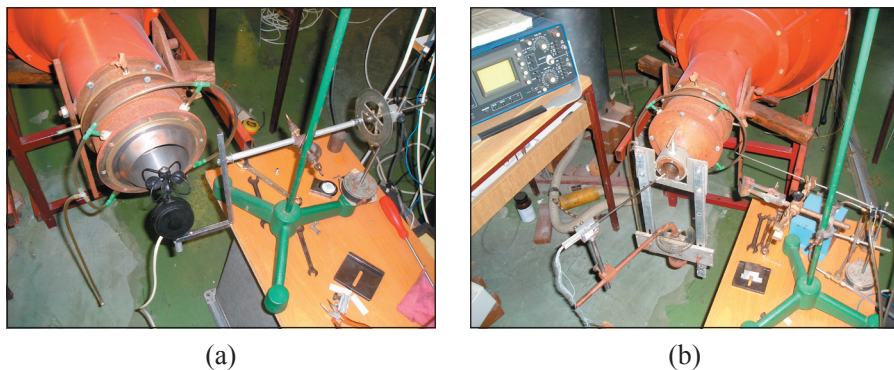
4. 1. Eksperimentalna instalacija

Eksperimenti su obavljani u aerodinamičkom tunelu Mašinskog fakulteta u Podgorici. Na izlaznim mlaznicama ovog tunela se može indu-

kovati uniformno strujno polje sa brzinom strujanja u opsegu 0-20 m/s. Na Sl. 11(a) je prikazan položaj anemometra sa čašicama, a na Sl. 11(b) anemometra sa zagrijanim vlaknom u struji vazduha ispred mlaznika tunela. Pomoću odgovarajućih mehanizama, prikazanih na slici, anemometri se mogu okretati u vertikalnoj ili horiontalnoj ravni za odgovarajući ugao □.

Ako je brzina strujanja vazduha na izlazu iz mlaznika V , horizontalna i vertikalna komponenta brzine u odnosu na anemometar će, kao što je prikazano na Sl. 10, biti:

$$V_h = V \cos \varphi, \quad V_v = V \sin \varphi. \quad (10)$$



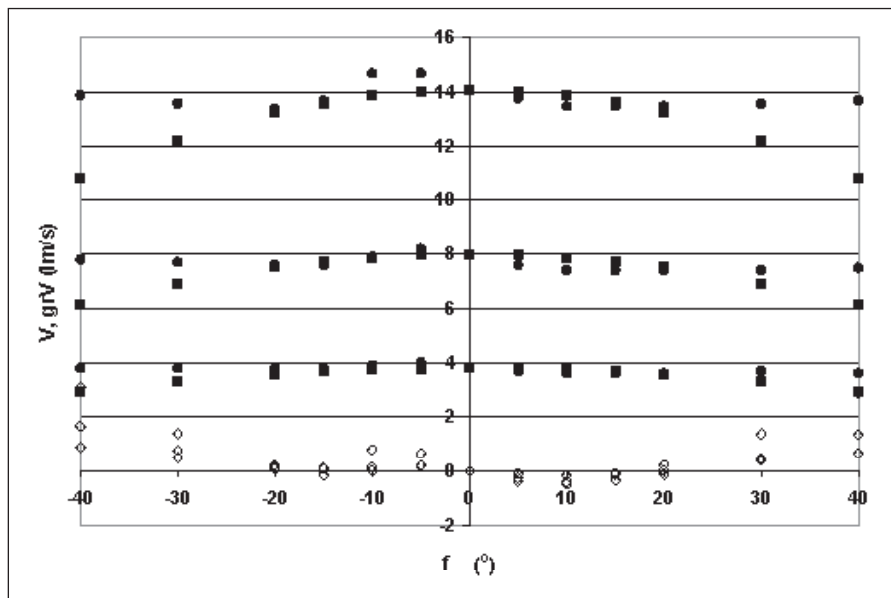
Sl. 11. Anemometar sa čašicama u struji vazduha na izlazu iz mlaznika aerodinamičkog tunela (a) i anemometar sa zagrijanim vlaknom (b)

Brzina strujanja na izlazu iz mlaznika je mijenjana u opsegu od približno 2 do 20 m/s sa korakom od približno 2 m/s. Za svaku vrijednost brzine variran je ugao obrtanja anemometra u opsegu od -40° do 40° sa korakom od 5° .

4. 2. Eksperimentalni rezultati

Na Sl. 12 su prikazane indukovane i izmjerene vrijednosti horizontalne komponente brzine vjetrova u funkciji ugla nagiba φ vektora brzine za tri karakteristične vrijednosti intenziteta brzine vjetrova; približno 4 m/s, 8 m/s i 14 m/s, dobijene mjerenjem anemometrom sa čašicama.

Sa slike se vidi da postoje značajna odstupanja indukovane i izmjerene horizontalne komponente brzine sa porastom ugla φ i da je trend razlika isti za sve vrijednosti vektora brzine. Na Sl. 13 su prikazane relativne greške mjerenja u funkciji ugla φ za vektor brzine intenziteta 2-15 m/s.



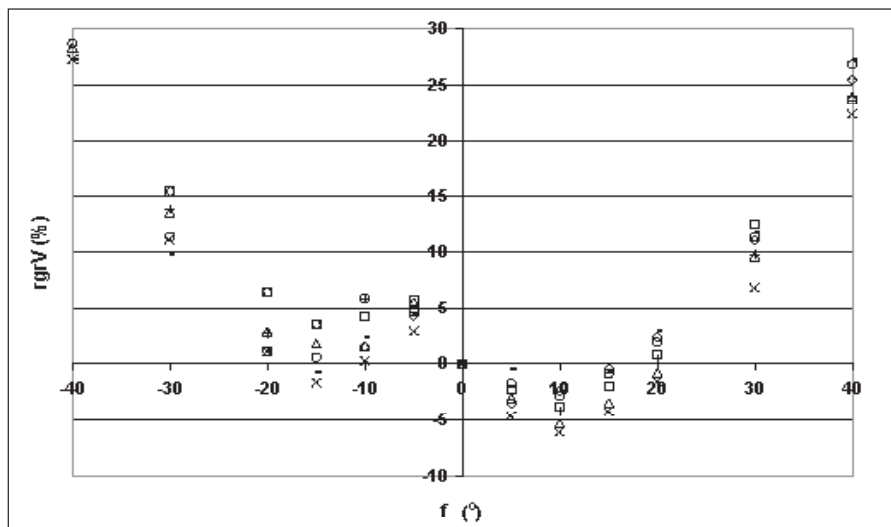
Sl. 12. Indukovane – ■ i izmjerene – ● vrijednosti horizontalne komponente brzine vjetra dobijene mjerenjem anemometrom sa čašicama. Apsolutna greška mjerenja – ◇.

U oblasti $-10^{\circ} < \varphi < 10^{\circ}$ greška mjerenja se kreće u opsegu od 5% do -5%. Pozitivna je za negativne vrijednosti vertikalne komponente brzine odnosno ugla φ i obratno. Za uglove φ čija je apsolutna vrijednost veća od 10° , greška je uvijek pozitivna i kreće se i do 30%.

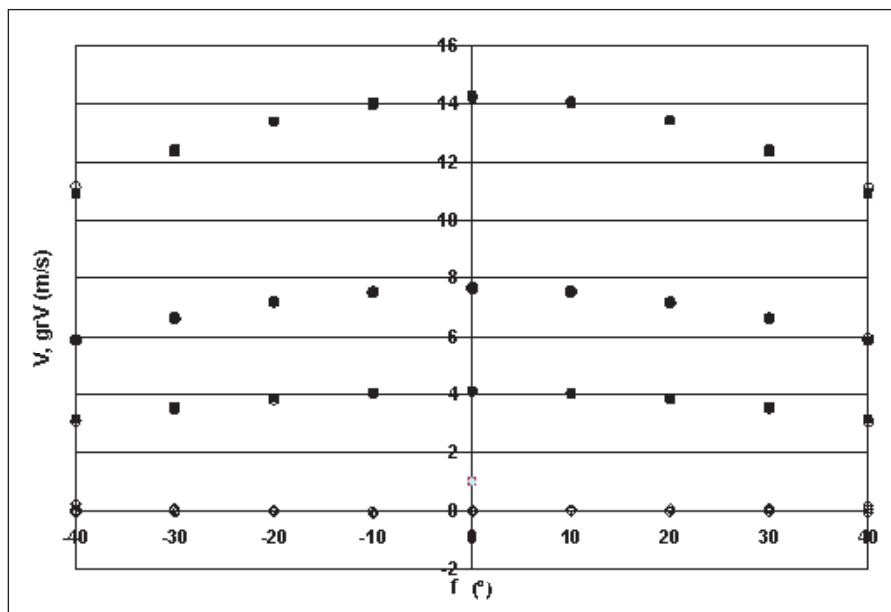
Očigledna asimetrija greške mjerenja u funkciji ugla φ , za njegove male vrijednosti, je vjerovatno posljedica različitog uticaja pozitivne i negativne vertikalne komponente brzine na trenja u ležištima rotora. Promjena greške mjerenja u funkciji ugla φ ima isti trend za sve vrijednosti intenziteta vektora brzine. Iako se uočava određeno rasipanje od približno 5%, može se konstatovati da će srednja relativna greška mjerenja biti približno nezavisna od intenziteta brzine.

Na Sl. 14 su prikazane izmjerene i indukovane vrijednosti horizontalne komponente brzine vjetra u funkciji ugla φ , za različite vrijednosti intenziteta vektora brzine, dobijene mjerenjem anemometrom sa zagrijanim vlaknom.

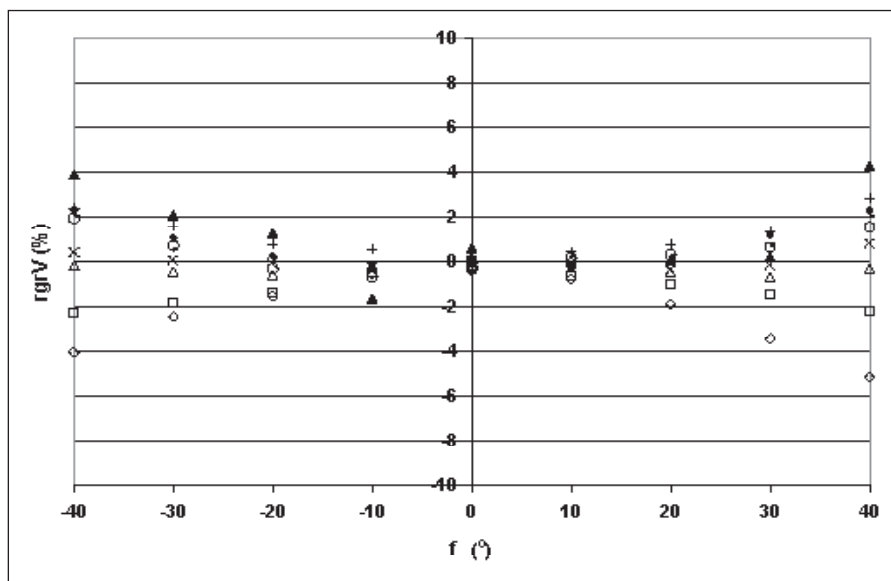
Očigledno je da je, za razliku od anemometra sa čašicama, greška mjerenja praktično zanemarljiva. Na Sl. 15 je prikazana relativna greška mjerenja u opsegu 2-20 m/s.



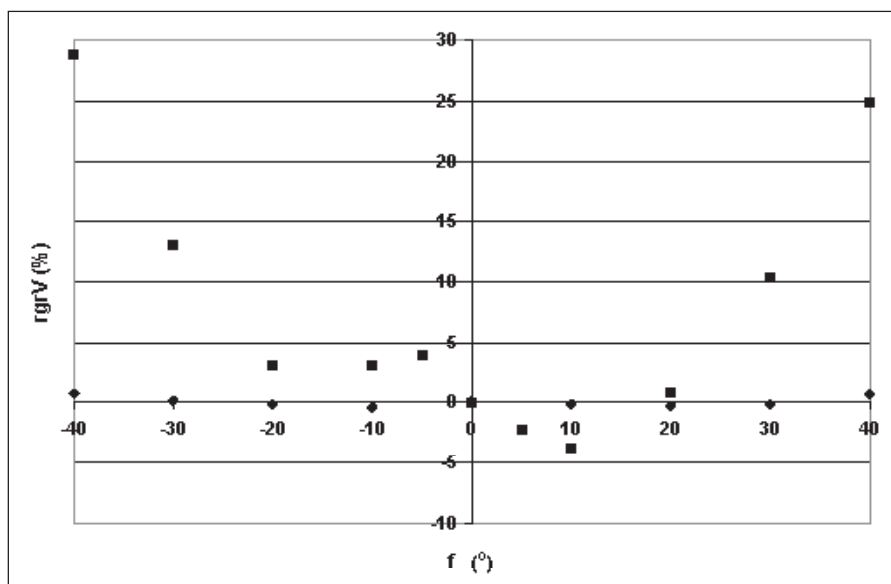
Sl. 13. Relativna greška mjerenja anemometra sa čašicama u funkciji ugla φ za različite vrijednosti vektora brzine V : $\diamond \rightarrow 2.5$ m/s, $\square \rightarrow 4$ m/s, $\Delta \rightarrow 6$ m/s, $x \rightarrow 8$ m/s, $* \rightarrow 9.8$ m/s, $- \rightarrow 12.2$ m/s, $o \rightarrow 14.1$ m/s $+ \rightarrow 15$ m/s.



Sl. 14. Indukovane – \blacksquare i izmjerene – \bullet vrijednosti horizontalne komponente brzine vjetra dobijene mjerenjem anemometrom sa zagrijanim vlaknom. Apsolutna greška mjerenja, \diamond .



Sl. 15. Relativna greška mjerenja anemometra sa zagrijanim vlaknom u funkciji ugla φ za različite vrijednosti vektora brzine V : ◇ → 2.2 m/s, □ → 4.1 m/s, △ → 6 m/s, x → 7.7 m/s, - → 12.2 m/s, o → 14.3 m/s, ◆ → 17.7 m/s, ▲ → 20 m/s.



Sl. 16. Srednja vrijednost relativne greške mjerenja: ■ → anemometar sa čašicama, ◆ → anemometar sa zagrijanim vlaknom.

U opsegu od $-10^{\circ} < \varphi < 10^{\circ}$ greška se kreće do 1%, dok je maksimalna vrijednost greške oko 4% za $\varphi = 40^{\circ}$, znatno manje nego u slučaju anemometra sa čašicama (do 30%). Greška mjerenja je simetrična u odnosu na ugao nagiba vektora brzine, negativna za male brzine strujanja i pozitivna za visoke brzine strujanja. Greška je praktično jednaka nuli za brzine strujanja oko 8 m/s. Može se prema tome očekivati da će i srednja vrijednost greške mjerenja biti praktično zanemarljiva. Na Sl. 16 su prikazane vrijednosti srednje greške mjerenja za anemometar sa čašicama i anemometar sa zagrijanim vlaknom u opsegu 2-20 m/s.

Kao što se moglo i pretpostaviti na osnovu prethodnih rezultata, srednja relativna greška mjerenja horizontalne komponente brzine anemometra sa zagrijanim vlaknom je praktično zanemarljiva, dok se za anemometar sa čašicama kreće do 5% za male i raste do 30% za relativno velike vrijednosti vertikalne komponente brzine. Konačan uticaj na rezultate mjerenja brzine zavisi od frekvence pojave vertikalnih komponenti brzine određenog intenziteta, što je predmet posebne analize za koju je neophodan niz eksperimentalnih podataka.

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu izložene analize mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Tačnost anemometra sa zagrijanim vlaknom je znatno veća u odnosu na anemometar sa čašicama.

2. Srednja vrijednost relativne greške mjerenja trenutne horizontalne komponente brzine anemometra za zagrijanim vlaknom je praktično zanemarljiva dok se kod anemometra sa čašicama kreće i do 30%.

3. Pojava dominantnih pozitivnih ili negativnih vrijednosti vertikalne komponente brzine može izazvati grešku mjerenja i do 5%, za anemometar sa čašicama, čak i pri relativno malim vrijednostima vertikalne komponente brzine, dok je za anemometar sa zagrijanim vlaknom praktično zanemarljiva.

4. Pri upotrebi anemometra sa čašicama mora se voditi računa da se izbjegniju konfiguracije terena koje generišu vertikalnu komponentu brzine čija je srednja vrijednost različita od nule u dužem vremenskom periodu.

5. Usljed asimetrije vjerovatnoće raspodjele vertikalne komponente brzine, može se očekivati određena greška mjerenja kod anemometra sa čašicama čak i u slučaju kada je srednja vrijednost vertikalne komponente brzine jednaka nuli.

6. S obzirom na to da u praktičnoj primjeni anemometri mjere osrednjene vrijednosti brzine u datom periodu, konačna greška mjerenja će zavisiti od intenziteta i frekvence pojave vertikalne komponente brzine strujanja.

Literatura

- [1] Du S., Wilson D. Probability density function for velocity in the convective boundary layer, and implied trajectory models, Atmospheric Environment, vol. 28, 1211-1217, 1994.
- [2] Folz A., Wallace J. M. Near surface turbulence in the atmospheric boundary layer, Physica D. Nonlinear Phenomena, Volume 239, 14, 1305-1317, 2010.
- [3] Gulitsky G., Kholmyansky W., Kinzelbach W., Luthi B., Tsinober A., Yorish S. Velocity and temperature derivatives in high Re-number turbulent flows in the atmospheric surface layer. J. Fluid Mechanics, vol. 589, 57-81, 2007.
- [4] Jorgensen F. E., Directional sensitivity of wire and fiber film probes, DISA inform, 11, 31-37.
- [5] Kramers H., Heat transfer from spheres to flowing media, Physica 12, 1946.
- [6] King L. V., On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid, Phil. Trans. Roy. Soc. A 214, 373-432, 1914.
- [7] LeMone M. A. Some observations of vertical velocity skewness on the convective planetary boundary layer, Journal of Atmosph. Sci. 47, 1163-1169, 1990.
- [8] Wyngaard J. C. Atmospheric turbulence, Annual review of Fluid Mechanics, 24, 205-233, 1992.

Istraživanja izvedena u okviru ovog rada je finansiralo Ministarstvo prosvjete i nauke Crne Gore.