# Eksperimentalna provera opravdanosti primene anemometarskih sondi sa četiri tople žice za merenje turbulentnog brzinskog polja nestišljivog fluida

*Anemometarske sonde sa toplim žicama problem nejedinstvenosti rešenja sistema jednačina odziva, koje predstavljaju matematičku formulaciju mehanizma razmene toplote žice sa okolinom. Višestrukost rešenja, posebno izražena pri nestacionarnom 3-D strujanju fluida, može prouzrokovati velike greške, ili potpuno onemogućiti izračunavanje vektora brzine fluida. U cilju ublažavanja ovih problema, razvijena je nova generacija sondi sa 4 davača (dodavanjem 4. niti sondama sa 3 žice). Međutim, do sada nisu objavljeni rezultati simultanog uporednog ispitivanja ovih sondi u cilju eksperimentalne provere njihovih svojstava. Iz tog razloga su u ovom radu prikazani razvoj anemometarskih sondi sa 4 tople žice i uporedni rezulatati kalibracije sondi sa 3 i 4 davača. Analiziranjem grešaka reprodukovanja indukovanih kalibracionih brzina, dokazan je doprinos 4. žice proširenju oblasti jedinstvenosti rešenja sistema jednačina odziva i povećanju tačnosti merenja brzine.*

*Mr Dragan V. Petrović, dipl. inž.,*
*Poljoprivredni fakultet, Beograd,*
*prof. dr Petar Vukoslavčević, dipl. inž.,*
*Mašinski fakultet, Podgorica*

## 1. Uvod

Istraživanje turbulencije je od posebne važnosti za projektovanje instalacija KGH, jer je većina tokova odgovarajućih radnih medijuma (vode i vazduha) u ovim slučajevima turbulentna po svojoj prirodi. Posebno treba naglasiti da je, između ostalog turbulencija osnovni generator buke, koja predstavlja jedan od najizraženijih problema pri projektovanju savremenih instalacija visokog pritiska. Savremeni programi istraživanja turbulencije obuhvataju izrazito 3-D tokove: opstrujavanje krupnih elemenata hrapavosti, tragove neposredno iza osnosimetričnih tela, vihorne mlazeve itd. Relativno visoki nivoi turbulencije i nepoznat pravac srednje brzine otežavaju njihovo istraživanje pomoću anemometarskih sondi sa 1 ili 2 žice [2, 3]. Iz tog razloga, u poslednje vreme je posebna pažnja posvećena razvoju anemometarskih sondi i odgovarajućih numeričkih metoda za merenje 3-D turbulentnog brzinskog polja. U ovoj oblasti je objavljen veliki broj radova [4–15].

Tumačenje anemometarskih signala sondi sa 3 davača podrazumeva simultano rešavanje 3 nelinearne jednačine odziva:

$$E_i = E_i(U_0, \phi, \theta) \qquad (1)$$

koje opisuju funkcionalnu vezu izlaznih signala $E_i$ ($i = 1, 2, 3$) pojedinih davača sa intenzitetom $U_0$ i pravcem vektora brzine fluida, određenim napadnim uglovima u vertikalnoj ("pitch" $\varphi$) i horizontalnoj ravni ("jaw" $\theta$):

$$\theta = \tan^{-1}(W/U); \quad \varphi = \tan^{-1}(V/U) \qquad (2)$$

U većini rutinskih primena, jednačine oblika (1) i (2) su prihvatljive. Ipak, kada su poprečne i bočne komponente brzine velike, javlja se veći broj kombinacija argumenata $U_0$, $\varphi$ i $\theta$, koji "proizvode iste trojke" izlaznih anemometarskih signala. Posledica ove pojave su višestruka rešenja jednačina odziva toplih žica.

## 2. "Konus jedinstvenosti"

Sondama, namenjenim merenju 3-D brzinskog polja, odgovara oblast jedinstvenosti rešenja koja se aproksimira tzv. konusom jedinstvenosti. Ose ovog konusa i pripadajuće sonde su kolinearne. Njegova širina se definiše pripadajućim poluuglom, jednakim najvećoj apsolutnoj

vrednosti napadnog ugla vektora brzine fluida prema osi sonde, pri kome se rezultati merenja brzine mogu prihvatiti. Pored konstrukcionih karakteristika sonde, veličina poluugla konusa jedinstvenosti rešenja zavisi od usvojenog zakona hlađenja tople žice i primenjene numeričke procedure za podršku kalibracije i merenja. Višeznačnost rešenja prouzrokuje divergenciju proračuna komponenata brzine, ili pojavu nedozvoljenih grešaka.

Willmarth [16] je dokazao da uvek postoje najmanje dva suprotna vektora brzine, kojima odgovara isti skup izlaznih anemometarskih signala, ma koliki broj davača poseduje sonda. Kao glavni uzrok ove pojave označio je neosetljivost toplih žica prema smeru strujanja fluida. Analizu je zasnovao na tzv. kosinusnom zakonu, prema kome je efektivna brzina hlađenja davača $U_e$ jednaka komponenti $U_N$ brzine fluida upravne na osu žice:

$$U_e = U_N \tag{3}$$

Dobbeling i sar. [17] su primenili Jorgensenov zakon:

$$U_e^2 = U_n^2 + k_2 \cdot U_t^2 + h_2 \cdot U_b^2 \tag{4}$$

u kome $U_e$ označava efektivnu brzinu hlađenja žice, $U_n$ normalnu, $U_t$ tangencijalnu, a $U_b$ binormalnu komponentu vektora brzine fluida u lokalnom koordinatnom sistemu davača. Zaključili su da sondama sa 3 žice odgovara 8 mogućih vektora brzine, koji "proizvode" iste odzive davača i da konus jedinstvenosti ograničava poluugao veličine 35,26°.

Anemometarske sonde sa 3 davača se obično konstruišu u vidu 3 ortogonalno postavljene tople žice. Ova geometrija maksimizira razlike odziva pojedinih žica, koje su osetljive u odnosu na normalne i bočne komponente brzine i relativno slabe osetljivosti prema tangencijalnim komponentama. Razlike izlaznih anemometarskih napona, koji odgovaraju različitim davačima, predstavljaju informaciju o pravcu brzine fluida. To je razlog što ortogonalne žice obezbeđuju najbolju ugaonu osetljivost. Roseman [18] je dokazao da konfiguracije anemometarskih sondi sa neortogonalnim žicama mogu proširiti konus jedinstvenosti, ali na račun toga dolazi do opadanja ugaone osetljivosti i porasta greške određivanja pravca vektora brzine fluida. Zato ni ova mera nije u potpunosti prihvatljiva za proširenje konusa jedinstvenosti.

## 3. Razvoj sondi sa četiri davača

Rešavajući isti problem, Samet i Einav [2], Dobbeling i sar. [17], Vukoslavčević [1] i dr., su uočili da je pored 3 jednačine, na osnovu kojih se određuju nepoznate komponente brzine, potrebna dodatna informacija za izdvajanje stvarnog iz skupa višestrukih mogućih rešenja kojima odgovaraju iste "trojke" izlaznih anemometarskih signala sondi sa 3 tople žice. To je ubrzalo razvoj postojećih anemometarskih sondi sa 4 žice i odgovarajućih procedura, namenjenih prvenstveno merenju vrtložnosti.

Prvu anemometarsku sondu sa 4 tople žice izradio je Kovasznay [19], namenivši je merenju podužne komponente brzine i vrtložnosti. Međusobna interferencija signala susednih davača, postavljenih na zajedničke šiljke, zahtevala je razvoj nove sonde sa odvojenim nosačima žica. Najveći doprinos njenom razvoju dali su Vukoslavčević i sar. [23] i Vukoslavčević [21]. Modifikovana Kovasznayeva sonda je ispoljila niz nedostataka pri merenju vrtložnosti, ali je njena pojava bila od neprocenjivog značaja za dalji razvoj brzinskih sondi sa 4 žice i vrtložnih sondi sa 12 (3 x 4) davača.

### 3.1. "Brzinske" sonde

Veća grupa istraživača je sonde sa 4 davača koristila za merenje 3-D polja brzine. Samet i Einav [2] su izradili sondu "+" konfiguracije, u vidu dve međusobno upravne X–sonde. Davače, izrađene od niti volframa dužine 0,7 mm i prečnika 2,5 um, su postavili pod uglovima od 50° prema osi sonde. Mernu zapreminu ove sonde je obuhvatala sfera prečnika 2,5 mm. Kalibracija i merenje su podržani posebnom računskom procedurom, zasnovanom na odnosima sva 4 izlazna napona anemometra izračenim u obliku zavisnosti "pitch" i "jaw" ugaonih osetljivosti toplih žica od intenziteta vektora brzine $U_0$. Poluugao konusa jedinstvenosti rešenja iznosio je 37,8°. Prosečna greška reprodukovanja brzina iz kalibracione mape nije prelazila 0,5% za napadne uglove vektora brzine prema osi sonde manje od 25°, odnosno 1,7% van ove oblasti.

Phailas i Cousteix [22] su predavali proceduru koja garantuje konus jedinstvenosti poluugla 40°. Roseman [18] je razvio analitičku proceduru zasnovanu na odnosima izlaznih naponskih signala dva para davača i ostvario približno isto područje jedinstvenosti.

Poslednje dve procedure su tokom eksploatacije ispoljile određene nedostatke, koje su prevazišli Dobbeling i sar. [17]. Ova grupa autora je konstruisala anemometarsku sondu sa 4 tople žice "+" konfiguracije, prečnika merne zapremine od 2 mm, sa volframovim nitima dužine 0,7 mm i prečnika 2,5 ηm, postavljenim pod uglovima od 45° prema osi sonde. Primenili su originalnu računsku proceduru, koja je postizala visoku tačnost i konus jedinstvenosti poluugla 45° u opsegu brzina od 5 do 25 m/s. Za manje brzine su preporučili postupak Sameta i Einava [2].

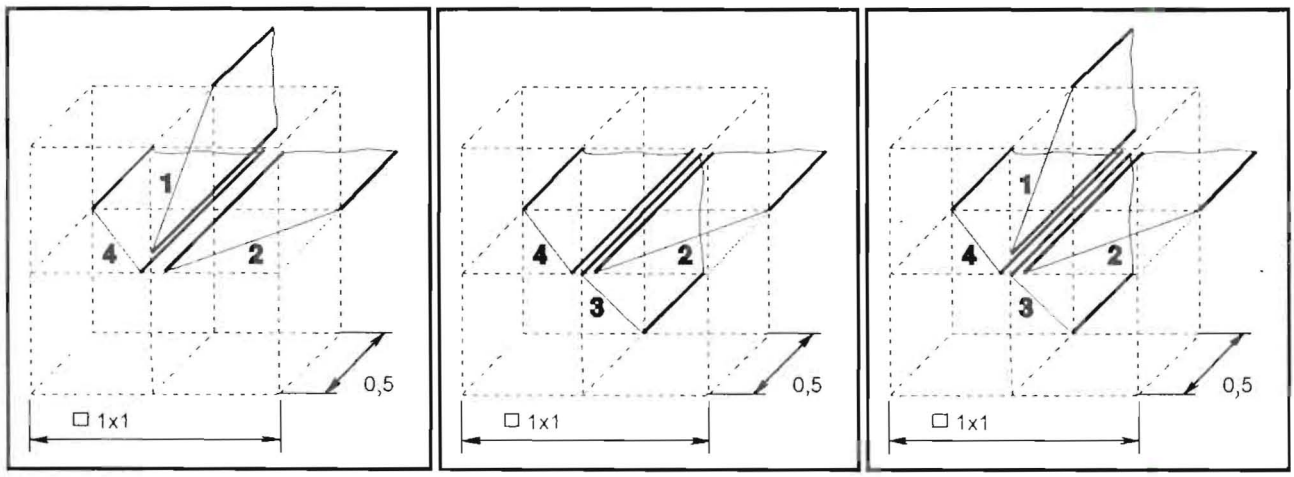
### 3.2. Strele vrtložnih sondi

Drugi pravac razvoja anemometarskih sondi sa 4 tople žice odvijao se, u okviru razvoja sondi sa 12 žica (za merenje vrtložnosti), u Laboratorijama za mehaniku fluida Univerziteta u Marylandu i Podgorici. Osnovni motiv njihovog razvoja predstavljali su nepovoljni izveštaji većeg broja istraživača o merenju vrtložnosti modifikovanom Kovasznayevom sondom. Vukoslavčević i sar. [24] su taj problem rešili konstrukcijom sonde sa devet (3 x 3) toplih žica. Merni princip ovih sondi podrazumeva merenje brzine strujanja fluida, u 3 veoma bliske tačke, strelama sa po 3 davača [23, 24]. Merenje je podržano originalnom "gradijentnom procedurom", koja prvi put do tada nije podrazumevala jednakost brzine fluida u svim tačkama merne zapremine sonde. Ova pretpostavka je zamenjena hipotezom o konstantom gradijentu brzine unutar merne zapremine, koja je potvrđena u uslovima realnog strujanja (Balint i sar. [25]) u graničnom sloju. Uski konus jedinstvenosti rešenja, poluugla ~15°, inicirao je razvoj nove sonde sastavljene od 3 merne strele sa po 4 tople žice. Zajedno sa vrtložnom, razvijena je i odgovarajuća brzinska sonda sa 4 tople žice (strela vrtložne sonde).

### 3.3. Uporedna analiza

Osnovne razlike sondi, nastalih u okviru pomenutih pravaca razvoja, ogledaju se u njihovim dimenzijama i širini odgovarajućih konusa jedinstvenosti. Prečnik merne zapremine Vukoslavčevićevih "+" sondi sa 4 žice iznosi 1 mm, a dužina niti 0,7 mm. Time je formirana 4 puta manja merna zapremina u odnosu na sonde Dobbelinga i sar. [17], i više od devet puta manja od sonde koju su konstruisali Samet i Einav [2]. To je proisteklo iz potrebe za ostvarivanjem zadovoljavajuće prostorne rezolucije pri merenju vrtložnosti složenom sondom koja se sastoji iz 3 strele sa po 4 tople žice.

Pri merenju brzine u gradijentnom polju, dimenzije me-




*Slika 1; a) "T" sonda; b) "⊥" sonda; c) "+" sonda*

rne zapremine sonde sa 4 davača su takođe od presudne važnosti, jer se odgovarajuće računske procedure za izračunavanje komponenatta brzine oslanjaju na pretpostavku o jednakosti brzine unutar njihove merne zapremine. Anemometarske sonde velikih dimenzija, u odnosu na prisutne vrtloge u strujnom polju, praktično osrednjavvaju merene parametre fluida. Stoga se njihova primena svodi na merenje prosečnih parametara strujnog polja, a statističke raspodele fluktuirajućih veličina se u izvesnoj meri degenerišu. Ova pojava je posebno izražena pri većim brzinama strujanja fluida, koje generišu vrtložne strukture malih razmera.

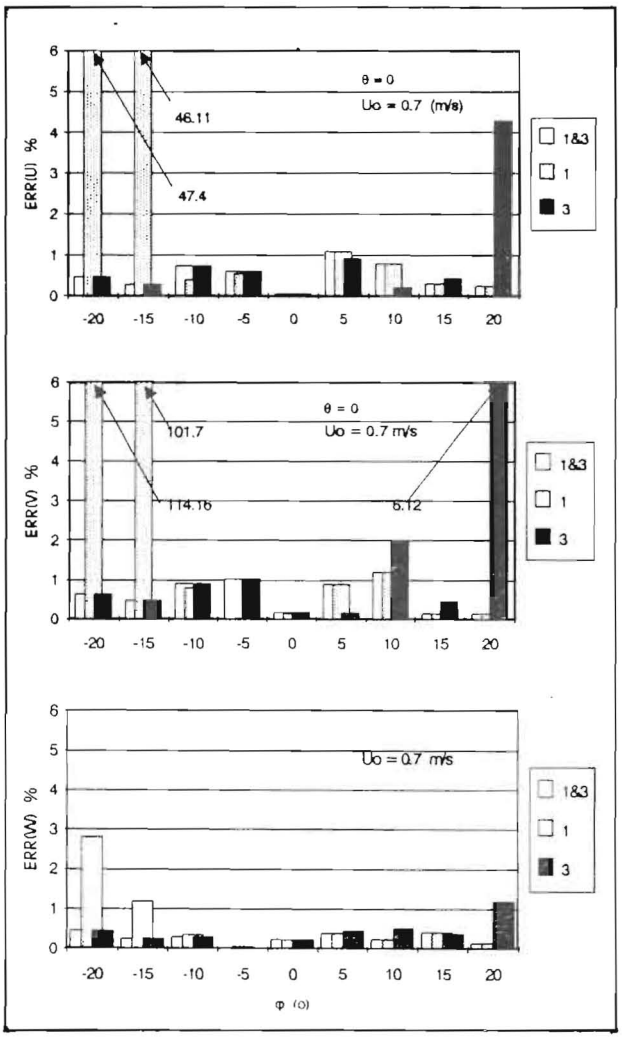
U pogledu konusa jedinstvenosti, sonde iz prve grupe, razvijene za merenje brzinskog polja, su znatno povoljnije. Dostižu uglove od 40°, za razliku od sondi druge grupe, kojima odgovara ugao od 20°. Zbog oskudnih podataka, teško je izvesti pouzdane zaključke o potencijalnim razlozima postojanja ovih razlika. Jedino se uočava da su izpitivanja "brzinskih" sondi vršena pri većim brzinama (U > 2,18 [2] i U > 5 [17] m/s) u odnosu na oblast ispitanih brzina u ovom radu (0,5 < U > 1,8 m/s). Ova činjenica je sigurno doprinela prividnom proširenju konusa jedinstvenosti "brzinskih" sondi, jer je odavno poznato da su male brzine strujanja veoma nepovoljne sa gledišta funkcionisanja anemometarskih sondi sa toplim žicama. Istraživanje malih brzina je posebno značajno za projektante instalacija KGH, s obzirom da se u standardnim uslovima kao granica promaje usvaja brzina vazduha od 0,2 m/s.

Eventualne doprinose numeričkih procedura nije bilo moguće proveriti, ali se uočavaju dva principijelno različita pristupa.

1) Vukoslavčević je koristio modifikovani Jorgensenov zakon hlađenja i proceduru koja u proračun uključuje samo signale 3 davača najpovoljnijeg položaja prema trenutnom vektoru brzine fluida. Postupak izbora se svodi na upotrebu davača maksimalne osetljivosti prema trenutnom pravcu vektora brzine.

) Ostali autori su koristili signale svih davača, ne vodeći računa o njihovoj osetljivosti. Kalibracione tabele su formalno, regresijom ili interpolacijom, prevodili u pogodne funkcionalne oblike. Proširenje konusa jedinstvenosti su objašnjavali prednostima sopstvenih, u odnosu na procedure koje koriste Jorgensenov zakon.

Vukoslavčević [1] je pokazao da uključivanje davača male osetljivosti ne stvara veće probleme pri merenju brzine u




*Slika 2. Greške reprodukovanja komponenata brzine, pri θ = 0*

nevrtložnom toku. Nasuprot tome, u turbulentnom toku, gradijenti brzine u mernoj zapremini sonde, u kombinaciji sa davačima male osetljivosti prema pravcu brzine fluida, mogu prouzrokovati greške merenja.

Sada je sasvim jasno da se konačna ocena sondi i primenjenih numeričkih procedura može dati samo na osnovu

*Tabela 1. Greške reprodukovanja indukovanih kalibracionih brzina: (1&3) "+" sonda; (1) "⊥" sonda i (3) "T" sonda*

| ϕ | θ | errU | | | errV | | | errW | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | % | | | % | | | % | | |
| | | 1&3 | 1 | 3 | 1&3 | 1 | 3 | 1&3 | 1 | 3 |
| 0 | 0 | −0,43 | −0,43 | −0,39 | 0,07 | 0,07 | −0,52 | 0,20 | 0,20 | 0,23 |
| 0 | 5 | −0,36 | −0,36 | −0,32 | −0,32 | −0,32 | −1,12 | −0,36 | −0,36 | −0,31 |
| 0 | 10 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,38 | 0,38 | −0,13 | −0,62 | −0,62 | −0,59 |
| 0 | 15 | −1,73 | −1,83 | −1,51 | 0,19 | 0,19 | −0,31 | −0,73 | −0,73 | −0,91 |
| 0 | 20 | 1,50 | 1,50 | 0,97 | −0,07 | −0,07 | 0,48 | −0,24 | −0,24 | 0,26 |
| 0 | −5 | −0,46 | −0,49 | −0,46 | −0,51 | −0,48 | −0,51 | 0,32 | 0,29 | 0,32 |
| 0 | −10 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | −0,24 | −0,24 | −0,05 | 1,03 | 1,03 | 1,03 |
| 0 | −15 | 0,38 | 0,38 | 0,64 | 0,51 | 0,51 | 0,28 | 0,10 | 0,10 | 0,14 |
| 0 | −20 | 0,21 | 0,21 | −0,30 | −0,16 | −0,16 | 0,24 | −0,42 | −0,42 | −0,79 |
| 0 | 0 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | −0,15 | −0,15 | −0,19 | −0,25 | −0,25 | −0,25 |
| 5 | 0 | 1,09 | 1,09 | 0,93 | −0,89 | −0,89 | 0,17 | −0,39 | −0,39 | −0,45 |
| 5 | 5 | 0,14 | 0,14 | 0,00 | −0,98 | −0,98 | −0,26 | −0,81 | −0,81 | −0,84 |
| 5 | −5 | 0,25 | 0,25 | −0,07 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 0,69 | 0,69 | 0,59 |
| 10 | 0 | 0,80 | 0,80 | −0,21 | −1,22 | −1,22 | 1,97 | −0,25 | −0,25 | −0,50 |
| 10 | 10 | 0,94 | 0,94 | −0,09 | −0,55 | −0,55 | 2,46 | −0,56 | −0,56 | −0,56 |
| 10 | −10 | 0,94 | 0,94 | 0,10 | −1,97 | −1,97 | 0,29 | 2,07 | 2,07 | 1,84 |
| 15 | 0 | 0,29 | 0,29 | 0,43 | −0,16 | −0,16 | −0,46 | −0,41 | −0,41 | −0,37 |
| 15 | 15 | 1,78 | 1,78 | 0,87 | −0,03 | −0,03 | 1,94 | −0,68 | −0,68 | −0,86 |
| 15 | −15 | 0,38 | 0,38 | 0,13 | −0,38 | −0,38 | 0,29 | 0,01 | 0,01 | −0,05 |
| 20 | 0 | −0,25 | −0,25 | −4,29 | 0,15 | 0,15 | 6,12 | −0,14 | −0,14 | −1,19 |
| 20 | 20 | −1,41 | −1,41 | 2,00 | 0,30 | 0,30 | −6,57 | 0,46 | 0,46 | 0,91 |
| 20 | −20 | −0,56 | −0,56 | 5,35 | 0,63 | 0,63 | −12,88 | −0,32 | −0,32 | 1,37 |
| 0 | 0 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | −0,43 | −0,39 | −0,43 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| −5 | 0 | −0,59 | −0,54 | −0,59 | −1,03 | 0,04 | −1,03 | 0,01 | −0,06 | 0,01 |
| −5 | 5 | −0,28 | −0,24 | −0,28 | −0,79 | 0,61 | −0,79 | −0,30 | −0,37 | −0,30 |
| −5 | −5 | −0,74 | −0,66 | −0,74 | −1,28 | −0,31 | −1,28 | 0,45 | 0,41 | 0,45 |
| −10 | 0 | −0,73 | −0,39 | −0,73 | −0,92 | 0,80 | −0,92 | −0,29 | −0,36 | −0,29 |
| −10 | 10 | 1,18 | 1,26 | 1,18 | −1,44 | 0,16 | −1,44 | 0,04 | −0,03 | 0,04 |
| −10 | −10 | −0,37 | −0,18 | −0,37 | 0,05 | 0,70 | 0,05 | 0,72 | 0,74 | 0,72 |
| −15 | 0 | 0,28 | −47,40 | 0,28 | 0,48 | 101,70 | 0,48 | 0,27 | −1,19 | 0,27 |
| −15 | 15 | −0,04 | −43,71 | −0,04 | −0,46 | 98,16 | −0,46 | −0,20 | −5,09 | −0,20 |
| −15 | −15 | 0,30 | 0,43 | 0,30 | −0,31 | 0,07 | −0,31 | 0,87 | 0,90 | 0,87 |
| −20 | 0 | 0,47 | −46,11 | 0,47 | 0,63 | 114,16 | 0,63 | −0,45 | −2,81 | −0,45 |
| −20 | 20 | −0,46 | −36,39 | −0,46 | −0,34 | 109,14 | −0,34 | 0,20 | −5,03 | 0,20 |
| −20 | −20 | −0,54 | −26,92 | −0,54 | −0,35 | 98,42 | −0,35 | −0,74 | −14,79 | −0,74 |

uporednog testiranja u strujnom polju sa poznatim i konstantnim gradijentima, što nije učinio nijedan konstruktor sondi. Svi dosadašnji testovi su izvedeni u nevrtložnom polju fluida, te se odgovarajući rezultati moraju prihvatiti sa ozbiljnim rezervama.

## 4. Cilj istraživanja

Do sada nigde u svetu nije izvršeno simultano uporedno ispitivanje anemometarskih sondi sa 3 ("T" i "⊥") i 4 davača ("+"), prikazanih na sl. 1, pri istim uslovima. Doprinos 4. davača povećanju tačnosti i proširenju konusa jedinstvenosti anemometarskih sondi sa 3 tople žice je prvi put eksperimentalno potvrđen u ovom radu, što je i bio osnovni cilj istraživanja.

## 5. Eksperimentalni uslovi

Uporedno ispitivanje sondi sa 3 i 4 žice izvršeno je obradom kalibracionih podataka "+" sonde (sl. 1c), izrađene u Laboratoriji za mehaniku fluida Mašinskog fakulteta u Podgorici. Davači od volframovih niti, prečnika 2,5 ηm i dužine 0,7 mm, postavljeni su pod uglovima od 45° prema osi sonde. Tople žice su zavarene za sopstvene nosače od nerđajućeg čelika, dužine 44,5 mm (kraći) i 45 mm (duži), i inicijalnog prečnika 0,254 mm. Šiljci su naknadnim hemijskim nagrizanjem i brušenjem naoštreni do 30 ηm na vrhu. Sonde sa 3 davača, ranije korišćene kao elementi (strele) sonde sa 9 davača, simulirane su softverski.

Kalibracija sonde je izvršena u potencijalnom jezgru mlaza koji je isticao iz mlaznice tipa "Smith i Wang klasa

C", izlaznog pečnika 130 mm i stepena kontrakcije poprečnog preseka 1 : 25.

## 6. Rezultati

Ispitivanjem su obuhvaćene brzina opsega 0,5–1,8 m/s. Pregled grešaka reprodukovanja brzina iz kalibracione mape, koja je odgovarala najmanjoj brzini, prikazan je u tabeli 1. Odgovarajući grafički prikazi dati su za kalibracione brzine indukovane variranjem "pitch" ugla u vertikalnoj ravni na slici 2. Prikazani podaci jasno pokazuju da primena anemometarskih sondi sa 3 davača, "T" i "^ " konfiguracije, mora biti ograničena na strujanja u kojima napadni ugao vektora brzine odstupa manje od 15° prema osi sonde. To je posebno istaknuto na dijagramima predstavljenim na slici 2, koji predstavljaju greške reprodukovanja brzina indukovanih variranjem "pitch" ugla sonde u vertikalnoj ravni. Greške naglo rastu za vrednosti $\varphi = -15^\circ$ u slučaju isključivanja davača broj 3, jer 1. davač zbog nepovoljnog položaja ima lošu ugaonu osetljivost prema vektorima brzine u toj oblasti. Obrnut je slučaj pri velikim pozitivnim vrednostima istog ugla ($\varphi > 15^\circ$). Uključivanjem pripadajućih signala svih davača u proračun, što odgovara "+" sondi sa 4 tople žice, uspešno merenje brzine postaje moguće i pri napadnim uglovima od 20°. U oblasti "pitch" uglova $-15^\circ < \varphi < 15^\circ$ greške reprodukovanja su u svim slučajevima približno iste, jer su osetljivosti oba "kritična" davača (1 i 3) prema indukovanom vektoru kalibracione brzine fluida zadovoljavajući.

## 7. Zaključak

Dodavanje 4. davača anemometarskim "T" ("^ ") sondama sa 3 žice proširuje poluugao konusa jedinstvenosti rešenja karakterističnih jednačina odziva toplih žica najmanje sa 5°. U području "pitch/jaw" uglova manjih od 10°, dodatni davač praktično ne utiče na grešku reprodukovanja kalibracionih brzina.

Iz navedenog proizilazi da je uvođenje 4. davača opravdano u tokovima visokih nivoa turbulencije.

## 8. Literatura


[1] **Vukoslavčević, P.** (1993), *Uticaj 4. senzora na tačnost mjerenja karakteristika strujnog polja,* Kongres teorijske i primenjene mehanike i mehanike fluida, Vrnjačka Banja

[2] **Samet, M. i Einav S.** (1987), *A hot-wire technique for simultaneous measuring of instantaneous velocities in 3-D flows*, J. Phus. E: Sci. Instrum. 20, p. 683–690

[3] **Petrović, D. i Vukoslavčević, P.** (1994), *Razvoj procedure za merenje brzinskog polja fluida anemometarskom sondom sa 4 davača,* Poljotehnika, br 5/6, str. 31–33

[4] **Moffat, R. J.** et al. (1978), *Real time measurements of turbulence quantities with triple hot-wire system,* Proc. Dynamic Flow Conference on Dynamic Measurements in Unsteady Flows, p. 1013–1035

[5] **Fabris, G.** (1978), *Probe and method for simultaneous measurements of true instantaneous temperature and 3 velocity components in turbulent flow,* Rev. Sci. Instrum., 49, p. 654–664

[6] **Acrivellis, M.** (1979), *A new evaluation method of hot-wire anemometer measurements in low and highly turbulent flows*, Karlsruhe Univ., Inst. of Flow Mechanics and Flow Machinery, Karlsruhe

[7] **Huffmann, G. D.** (1980), *Calibration of triaxial hot-wire probes using numerical search algorithm,* J. Phus. E: Sci. Instrum. 13, p. 1177–1182

[8] **Lakshminarayana, B.** (1982), *Three sensor hot wire/film technique for three dimensional mean and turbulance flow field*, TSI Q. 8, p. 3–13

[9] **Andreopulos, J.** (1983), *Improvements of the performance of 3 hot wire probes,* Rev. of Sci. Instrum. 54, p. 733–740

[10] **Butller, T. L. & Wagner, J. W.** (1983), *Application of a three-sensor hot-wire probe for incompressible flow,* AIAA J. 21, p. 726–732

[11] **Chang, P. H.** et al. (1983), *Comp. between triple and X-wire measurement techniques in high intensity turb. shear flow,* 8th Bien. Symp. on Turbulence, Univ. ov Misourri–Rolla

[12] **Mathioudakis, H. & Breugelmans, F.** (1984), *Use of triple hot wires to measure unsteady flows with large direction changes,* J. Phys, E: Sci. Instrum. 18, p. 414–410

[13] **Müller, U. R.** (1987), *Developments in measuring Reynolds stresses,* Perspectives in Turbulence studies (ed. H. U. Meier & P. Bradshaw), Springer, Berlin

[14] **Lekakis, C.** et al. (1989), *Measurements of velocity vectors with orthogonal & non-orthogonal triple-sensor probes,* Exp. in Fluids 7. p. 228–232

[15] **Vukoslavčević, P. i Petrović, V. D.** (1994), *Generalizovani zakon hlađenja toplih žica malih anemometarskih multisenzorskih sondi,* 25. kongres o KGH, Beograd, p. 299–306

[16] **Willmarth, W. W.** (1985), *Geometric interpretation of the possible velocity vectors obtained with multiple sensor probe,* Phys. Fluids 28, p. 462–465

[17] **Dobbeling, K.** et al. (1990), *Basic considerations concerning the construction and usage of multiple hot-wire probes for highly turbulent 3-D flows*, Meas. Sci. Technol. 1, p. 924–933

[18] **Roseman, H.** (1989), *Einfluß der geometrie von mehrfachhitzdraht-sonden auf die mebergebnisse in turbulenten stromungen,* Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt Forschungsbericht DLR-FB 89–26, Göttingen

[19] **Kovasznay, L. S. G.** (1950), *Q. Prog. Rep. Aero. Dept.* Contract NORD-8036-JHB-39, The J. Hopkins University

[20] **Vukoslavčević, P.** et al. (1980), *A Hot Wire Probe for measuring the streamwise vorticity and the velocity components,* EUROMECH 132, Hot Wire, Hot Film Anemometry and conditional measurements, Lyon

[21] **Vukoslavčević, P.** (1981), *Razvoj anemometarskih sondi sa X-vlaknima i odgovarajućih metoda mjerenja longitudinalnih komponenti vrtložnosti i brzine pri turbulentnom strujanju fluida,* doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Titograd

[22] **Phailas, G. & Cousteix, J.** (1986), *Methode d'exploitation des donnes d'une sonde anemometrique a quartre fils chauds*, La Recherche Aerospatiale 2, p. 161–168

[23] **Vukoslavčević, P.** et al. (1989), *A Multi-Sensor Hot-Wire Probe to Measure Vorticity and Velocity in Turbulent Flows,* Trans. of ASME J. of Fluids Eng., vol. 111, p. 220–224

[24] **Vukoslavčević, P.** i sar. (1990), *The velocity and vorticity vector fields of a turbulent boundary layer*, Part 1,

Simultaneous measurement by hot-wire anemometry, J. Fluid Mech. vol. 228, p. 25–51

[25] Ballint, J. L. et al. (1991), *The velocity and vorticity fields of a turbulent boundary layer,* Part 2: Statistical properties, J. Fluid Mech., vol. 228, p. 53–86.

kgh

ENERGOPROJEKT

OPREMA D.D.

11070 BEOGRAD, P. FAH 20
TEL (011) 146-477, 146-415 • FAX 2222-660 • TLX 12184 ENERGO YU

IZVODJENJE RADOVA I INŽENJERING U

PROIZVODNJI, PRENOSU I DISTRIBUCIJI EL. ENERGIJE
OPREMANJU OBJEKATA VISOKOGRADNJE
MAŠINSKOM I ELEKTRO OPREMOM
RUDARSTVU
INDUSTRIJI
EKOLOGIJI

OPREMA

PRISUTNI U JUGOSLAVIJI I VIŠE OD 50 ZEMALJA SVETA
VEĆ 40 GODINA

FRIGORIA

PREDUZEĆE ZA KONSALTING, INŽENJERING
I PROJEKTOVANJE RASHLADNIH, TERMIČKIH
I KLIMA INSTALACIJA SA P.O.

21000 Novi Sad, Vere Pavlović 12
Tel.: 021/363-588, Tel/Fax 021/363 792

- Projektovanje kompletnih objekata u prehrambenoj i hemijskoj industriji, rashladnih instalacija i uređaja, elektro-instalacija, termoizolacija
- Racionalizacija potrošnje energije u rashladnim i termičkim instalacijama
- Isporuka i montaža: rashladnih, termičkih, klimatizacionih i električnih instalacija, instalacija vodovoda i kanalizacije
- Isporuka i montaža računarske opreme za vodenje i kontrolu rada postrojenja
- Servisiranje i remont rashladnih instalacija i uređaja, kompresora, pumpi i dr.
- Periodično ispitivanje sudova pod pritiskom i sigurnosnih ventila