



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Alen Cukrov, Tomislav Horvat, Tin Vrandečić

TEORIJSKA, EKSPERIMENTALNA I NUMERIČKA ANALIZA NEIZOTERMNOG TURBULENTNOG ZRAČNOG MLAZA

Zagreb, 2012.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na Zavodu za Termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje pod vodstvom Prof. dr. sc. Srećka Švaića i predan je na Natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2011/2012.

*„Svaki čovjek po prirodi teži znanju.“
Aristotel*

SADRŽAJ

SADRŽAJ	IV
POPIS OZNAKA	V
1. UVOD	1
1.1 Općenito	1
1.2 Motivacija.....	1
1.3 Cilj i hipoteza istraživanja.....	2
2. METODE ANALIZE NEIZOTERMNOG ZRAČNOG MLAZA	3
2.1 Teorijska analiza mlaza.....	4
2.1.1 Fizikalne osnove. Turbulentno nestlačivo strujanje.....	4
2.1.2 Turbulentni mlaz.....	8
2.1.3 Karakteristične zone strujanja slobodnog izotermnog mlaza	9
2.1.4 Jednadžbe mlaza	11
2.2 Eksperimentalna analiza.....	17
2.2.1 Principi primjenjenih eksperimentalnih metoda	18
2.2.1.1 Termoparovi.....	18
2.2.1.2 Anemometri sa žarnom niti	20
2.2.1.3 Kvantitativna infracrvena termografija	21
2.2.1.3.1 Fizikalne osnove.....	21
2.2.1.3.2 Termografski sustavi	27
2.2.1.3.3 Termografsko mjerenje.....	28
2.2.2 Elementi mjerne linije	30
2.2.3 Regulacijski elementi	32
2.3. Numerička simulacija strujanja mlaza	34
3. DISKUSIJA REZULTATA	40
4. ZAKLJUČAK.....	54
PRILOZI	56
Prilog A.....	57
Prilog B	66
Prilog C	75
LITERATURA.....	92
SAŽETAK	94
SUMMARY	95

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Ar	1	arhimedov broj
a	1	apsorpcijski faktor
b	m	širina
c_0	m/s	brzina svjetlosti
C_1	Wm ²	prva konstanta zračenja
C_2	mK	druga konstanta zračenja
C_3	mK	treća konstanta zračenja
$C_{s,t}$	m ³ /m ³	koncentracija zagađivača u dobavnom zraku
$C_{i,t}$	m ³ /m ³	srednja koncentracija zagađivača u prostoru
$C_{i,t=0}$	m ³ /m ³	početna koncentracija zagađivača u prostoru
E	W/m ²	vlastito emitirano zračenje realne površine
E_c	W/m ²	vlastito emitirano zračenje crnog tijela
$E_{\lambda,c}$	W/m ²	intenzitet zračenja crnog tijela
g	m/s ²	ubrzanje sile teže
G	W/m ²	upadno zračenje
h	Js	Planckova konstanta
$I_{\lambda,c}$	W/m ³	intenzitet vlastitog emitiranog zračenja
I_x	kgm/s ²	protok količine gibanja
K	1	koeficijent opadanja centralne brzine
k	J/K	Boltzmanova konstanta
l	m	dužina
l_m	m	duljina puta mješanja
m	1	stupanj mješanja
\bar{p}	N/m ²	statistički osrednjeni dio polja tlaka
p'	N/m ²	pulzirajući dio polja tlaka
\bar{p}_e	N/m ²	efektivni tlak
S	1	izvorski član u difuzijsko-konvekciskoj jednađbi
T	K	termodinamička temperatura
T_u	K	unutarnja temperatura
ΔT_o	K	razlika temperatura dobavnog i srednjeg zraka
t	s	vrijeme
t_{ok}	K	temperatura okoliša
t_{pr}	K	temperatura prostorije
$t_{m,x}$	K	temperatura na udaljenosti x
V	m ³	volumen prostora
$V_{con,t}$	m ³ /h	ukupna emisija zagađivača iz izvora zagađenja

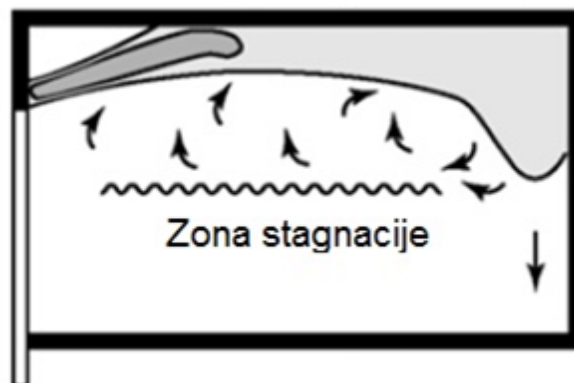
v_i	m/s	komponente vektora brzine strujanja fluida
v'_i	m/s	pulzirajući dio vektora brzine strujanja fluida
v_t	m/s	karakteristična brzina turbulentnih pulzacija
x	m	udaljenost od mjesta istrujanja
x_i	m	pravokutne koordinate
x_o	m	duljina jezgre mlaza
w_o	m/s	aksijalna brzina na mjestu istrujanja
w_i	m/s	izmjerena brzina u pojedinoj točki istrujnog otvora
λ	m	valna duljina
λ	m	valna duljina za maksimum spektralne emisije
ε	1	emisijski faktor
ε_n	1	emisijski faktor u smjeru normale
σ	J/K	Boltzmanova konstanta
ρ	kg/m ³	gustoća
δ_{ij}	1	Kroneckerov simbol
μ	Pas	dinamička viskoznost
μ_t	Pas	turbulentna dinamička viskoznost
φ	1	spesifično fizikalno svojsvo
$y_{1/2}$	m	udaljenost od simetrale na kojoj brzina v_x doseže polovinu brzine na simetralnoj osi

1. UVOD

1.1 Općenito

Za dovod zraka u klimatiziranim i ventiliranim prostorima se koriste istrujni otvori sa osnovnim zadatkom da:

- pripremljeni zrak bude što bolje i ravnomjernije raspoređen
- se osiguraju: odgovarajuća brzina strujanja zraka i homogeno temperaturno polje u zoni boravka
- ne dolazi do nekontroliranog strujanja zraka
- se razina buke održava u odgovarajućim granicama.



Slika 1. Neizotermni dobavni zrak ubacivan kroz istrujni otvor [19]

1.2 Motivacija

Razvoj istrujnih otvora za potrebe grijanja, ventilacije i klimatizacije zahtijeva dugotrajna mjerenja koja se moraju obavljati za taj razvoj. Ta bi se mjerenja mogla dobrim dijelom zamijeniti simulacijama na računalu što bi skratilo vrijeme razvoja i broj relativno skupih mjerenja.

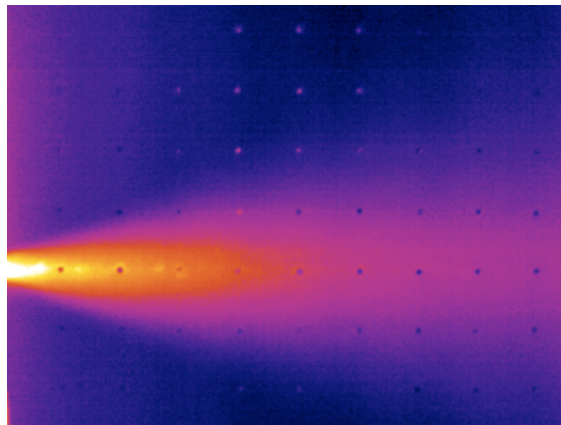
Klasični pristup mjerenju brzina istrujavanja i temperatura mlaza obuhvaća upotrebu temperaturnih osjetnika i anemometara, što podrazumijeva korištenje složene mjerne opreme i opsežnu pripremu samih mjerenja. Takav način ispitivanja mlaza često je praktično neprimjenjiv u realnim uvjetima rada, kao što su npr. industrijski pogoni. Iz tog se razloga javila inicijativa da se navedeni postupci izbjegnu uz pomoć *termografije* i *numeričkih simulacija*.

1.3 Cilj i hipoteza istraživanja

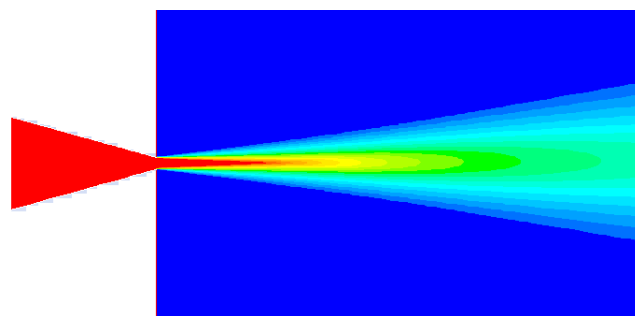
Cilj rada je dati korelaciju između teorije, eksperimenta i numerike za neizotermni mlaz zraka koji struji iz pravokutnog otvora sustava grijanja, ventilacije ili klimatizacije (GVK), kao osnovu za razvoj numeričke metode (sl. 3) kojom bi se simuliralo istrujavanje mlaza i dobilo dovoljno podataka za konstrukciju istrujnog otvora.

Hipoteza je da se termografskim mjerenjima (slika 2) mogu direktno dobiti jedino podaci o temperaturama, ali ne i o brzinama, zadatak je pronaći korelacije između snimljenih temperatura i pripadajućih brzina u samom mlazu, te da se mogu potvrditi empirijske jednadžbe iz literature.

Provedeno istraživanje daje doprinos za bolje razumijevanje načina strujanja mlaza koji horizontalno istrujava iz istrujnih otvora (slika 1).



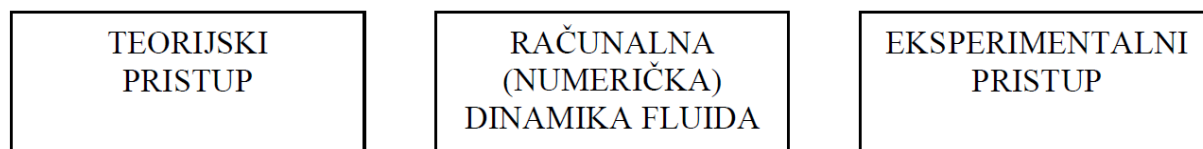
Slika 2. Termogram mlaza



Slika 3. Simulacija mlaza

2. METODE ANALIZE NEIZOTERMNOG ZRAČNOG MLAZA

Zadani problem turbulentnog strujanja fluida opisan je nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačinama, koje nemaju opće analitičko rješenje. Navedeno se strujanje zbog svoje stohastičke prirode, niti ne može analitički opisati. Analitičko rješenje Navier-Stokesovih jednačina moguće je odrediti samo za slučaj laminarnog strujanja, i to u vrlo ograničenom broju slučajeva. Stoga će u okviru teorijskog pristupa ovdje biti korištene polu-empirijske jednačine njemačkog istraživača B. Regenscheita, koje se mogu naći u priručniku [7] i u Regenscheitovim znanstvenim radovima. Vrijednosti brzina na istrujnom otvoru odabrane su prema tablici 1.



Slika 4. Grafički prikaz metoda korištenih pri istraživanju

Eksperimentalni pristup je usko vezan s teorijskim pristupom, jer se svaka metoda mjerenja temelji na teoriji. Eksperimentalnim pristupom dobivaju se informacije o nekoj pojavi, u ovom slučaju podaci o brzini i temperaturi. Mjerenja se provode primjenom termografije - temperaturno polje, raspodjela temperature u mlazu – termoparovima, anemometrima sa žarnom niti – brzine zraka. Numeričke metode, u ovom slučaju *metoda konačnih volumena*, nasuprot analitičkim metodama, razdvajaju cijelu domenu sustava („geometriju“), koja se promatra, na konačni broj kontrolnih volumena. U tim malim volumenima, i na njihovim rubovima, postavljaju se zakoni koji u njima vrijede. Numerika nam omogućava uvid u ponašanje mlaza ovisno o narinutim rubnim uvjetima i na taj način smanjuje broj pokusa. U radu je korišten računalni program FLUENT s ugrađenim matematičkim modelom, čime je omogućeno putem sučelja odabrati podvarijantu modela koji odgovara promatranom problemu.

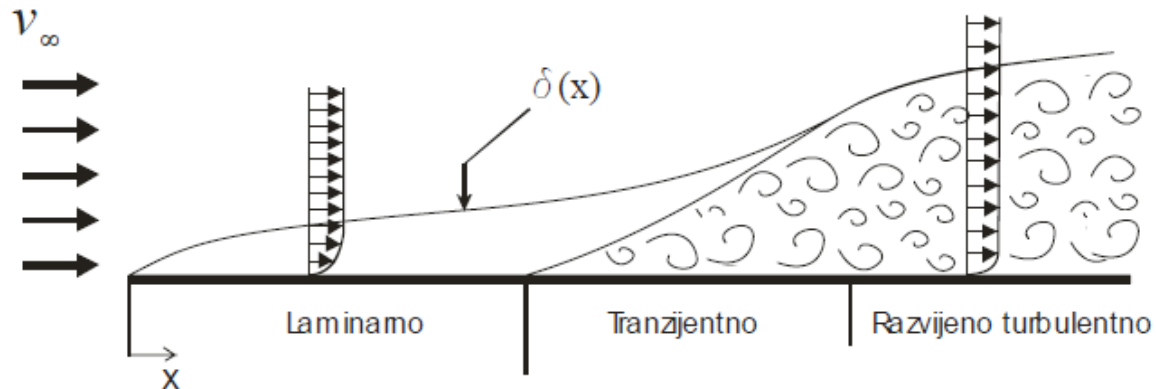
Tablica 1. Preporučljive brzine strujanja zraka kroz istrujne otvore prema [30]

Namjena	Istrujna brzina, m/s
<i>Crkve, kazališta</i>	2,5 – 3,75
<i>Kinodvorane</i>	5
<i>Radio i TV</i>	1,5 – 2,5
<i>Stambene prostorije i hotelske sobe</i>	2,5 – 3,75
<i>Male uredske prostorije</i>	2,5 – 3,75
<i>Velike uredske prostorije</i>	5 – 6,25

2.1 Teorijska analiza mlaza

2.1.1 Fizikalne osnove. Turbulentno nestlačivo strujanje

Turbulentno strujanje je izrazito nestacionarno strujanje, koje se zbog svoje stohastičke prirode teško može opisati analitički.



Slika 5. Formiranje hidrodinamičkog graničnog sloja pri turbulentnom strujanju fluida uz horizontalnu ravnu ploču prema [3].

Turbulencija (sl. 5) je to izraženija što je veći Reynoldsov broj. U razvijenom turbulentnom strujanju sve fizikalne veličine pokazuju slučajne pulsacije u širokom spektru frekvencija (gledano vremenski, sl. 6) i širokom spektru valnih duljina (gledano prostorno).

Iz tog razloga jednačbe nestlačivog turbulentnog strujanja sadrže uprosječene veličine. Riječ je o tzv. *Reynoldsovom osrednjavanju*, tj. o vremenskom uprosječenju. Nestlačivo strujanje je u danom teorijskom opisu neizotermnog zračnog mlaza opisano:

- jednačbom kontinuiteta i
- jednačbom količine gibanja,

u kojima su nepoznanice komponente polja brzine v_i i polje tlaka p .

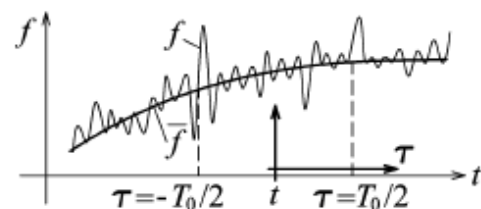
Zato se spomenute veličine prikazuju zbrojem:

- osrednjene vrijednosti ($\bar{\quad}$) i

- pulsirajućeg dijela ($'$)

$$(2) \quad v_i = \bar{v}_i + v_i'$$

$$(3) \quad p = \bar{p} + p'$$



Slika 6. Pulsiranje fizikalne veličine u vremenu [3].

Jednadžba kontinuiteta za nestlačivo strujanje glasi:

$$(4) \quad \frac{\partial(\bar{v}_j + v'_j)}{\partial x_j} = 0$$

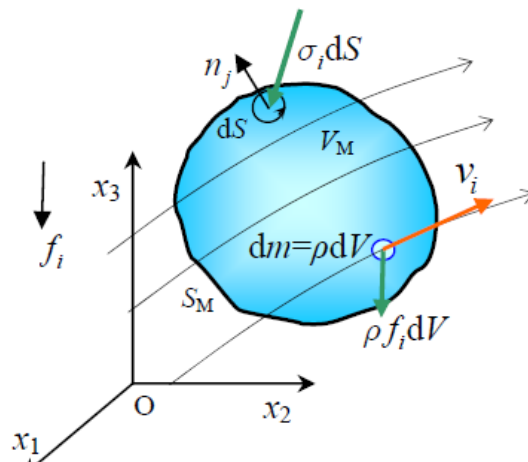
te vrijedi princip *superpozicije*.

Drugim riječima, zbroj dvaju rješenja jednadžbe je također rješenje jednadžbe.

Jednadžbu kontinuiteta za pulsirajuće strujanje nećemo promatrati jer nas zanima samo vremenski osrednjeno strujanje.

Uvažavajući navedeno, jednadžba kontinuiteta za slučaj nestlačivog turbulentnog strujanja glasi:

$$(5) \quad \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0$$



Slika 7. Fluidno tijelo uz fizikalni opis [3].

Jednadžba količine gibanja za nestlačivo strujanje glasi:

$$(6) \quad \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_j v_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

što prikazano pomoću osrednjenih i pulsirajućih dijelova polja brzine i tlaka ima oblik (7):

$$\rho \frac{\partial(\bar{v}_i + v'_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho(\bar{v}_j + v'_j)(\bar{v}_i + v'_i)] = -\frac{\partial(\bar{p} - p')}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

Budući da promatramo samo osrednjeno strujanje (što ne znači da ćemo moći upotpuniti zanemariti pulsirajuće strujanje o čemu će biti rečeno u nastavku) jednadžba količine gibanja za osrednjeno strujanje glasi:

$$(8) \quad \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \right]$$

Gdje član $-\rho \overline{v'_i v'_j}$ označava turbulentnu difuziju količine gibanja.

Taj nelinearni konvektivni član, u kojem se pojavljuje umnožak $v'_i v'_j$ ujedno je i predstavnik pulsirajućeg strujanja. Spomenuta dvostruka korelacija brzina u točki $(\overline{v'_i v'_j})$ koja fizikalno gledano opisuje prijenos količine gibanja uslijed miješanja čestica fluida naziva se još *turbulentnim* ili *Reynoldsovim naprezanjem*.

Tenzor Reynoldsovih napreznja je simetričan tenzor, u kojemu je šest nepoznanica:

$$(9) \quad -\overline{\rho v'_i v'_j} = \begin{bmatrix} -\overline{\rho v'_1 v'_1} & -\overline{\rho v'_1 v'_2} & -\overline{\rho v'_1 v'_3} \\ -\overline{\rho v'_1 v'_2} & -\overline{\rho v'_2 v'_2} & -\overline{\rho v'_2 v'_3} \\ -\overline{\rho v'_1 v'_3} & -\overline{\rho v'_2 v'_3} & -\overline{\rho v'_3 v'_3} \end{bmatrix}$$

Reynoldsove jednadžbe sadrže više nepoznanica nego što ima jednadžbi, pa takav sustav nema jednoznačno rješenje.

Očigledno je da Reynoldsove jednadžbe koje opisuju vremenski osrednjeno turbulentno strujanje fluida imaju isti oblik kao i polazne Navier-Stokesove jednadžbe, koje opisuju ukupno strujanje, s razlikom da se u Reynoldsovim jednadžbama pojavljuju vremenski osrednjene veličine.

Prikazivanjem brzine i tlaka vremenski osrednjenim poljima gubi se dio informacija koje sadrže Navier-Stokesove jednadžbe. Za povratak tih informacija potrebno je poznavati beskonačno mnogo korelacija brzina i tlaka. Iskustveno je dokazano da je dovoljno poznavati konačan broj korelacija da bi se proračunale karakteristike interesantnih polja sa stajališta inženjerske prakse, te se na toj činjenici temelje *modeli turbulencije* [3].

Zadatak modela turbulencije je usklađivanje broja jednadžbi i broja nepoznatih polja, zaustavljajući se na određenoj korelaciji. Sve više korelacije se modeliraju pomoću nižih, koje su obuhvaćene modelom turbulencije. Najjednostavniji modeli turbulencije su *modeli turbulencije prvoga reda*. U modelima prvoga reda se dvojnja korelacija brzina, odnosno tenzor Reynoldsovih napreznja, modelira uglavnom prema hipotezi Boussinesqa u obliku:

$$(10) \quad -\overline{\rho v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij}$$

gdje je μ_t koeficijent turbulencijske viskoznosti koji nije fizikalno svojstvo fluida, nego je funkcija uvjeta strujanja, a u laminarnom je strujanju jednak nuli. Član s kinetičkom energijom turbulencije $\bar{k} = \overline{v'_i v'_i} / 2$ dodan je u cilju zadovoljavanja gornje jednadžbe za slučaj kontrakcije indeksa. S obzirom na analogiju gornjeg izraza s Newtonovim zakonom viskoznosti, modeli turbulencije koji se temelje na toj pretpostavci nazivaju se newtonovskim modelima turbulencije. Hipotezom Boussinesqa šest komponenti tenzora Reynoldsovih napreznja modelirano je jednim nepoznatim poljem koeficijenata turbulentne viskoznosti.

Prema kinetičkoj teoriji plinova, viskoznost fluida je manifestacija molekularnog gibanja, kojeg opažamo u makrosvijetu. Po toj teoriji viskoznost fluida je razmjerna gustoći fluida, slobodnoj putanji molekula i karakterističnoj brzini molekula. Analogno tome se turbulencijska viskoznost definira u obliku:

$$(11) \quad \mu_t = \rho l_m v_t$$

gdje su: l_m – duljina puta miješanja čestica fluida u turbulentnom strujanju,
 v_t – karakteristična brzina turbulencijskih pulsacija

Prema tome, turbulencijska viskoznost je definirana s dvije karakteristične veličine u turbulentnom strujanju, a gornja relacija čini osnovu za veći broj modela turbulencije, koji se razlikuju po definiciji te dvije karakteristične veličine u turbulenciji. Prandtl predlaže sljedeću relaciju između puta miješanja i karakteristične brzine turbulencije:

$$(12) \quad v_t = l_m \left| \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right|$$

što uvršteno u gornju relaciju daje konačni izraz za koeficijent turbulentne viskoznosti:

$$(13) \quad \mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right|$$

u kojem se pojavljuje samo nepoznata duljina puta miješanja l_m . Duljina puta miješanja se propisuje algebarskim relacijama dobivenim na temelju eksperimentalnih mjerenja. Uvrštavanjem hipoteze Boussinesqa u Reynoldsove jednadžbe, one prelaze u oblik:

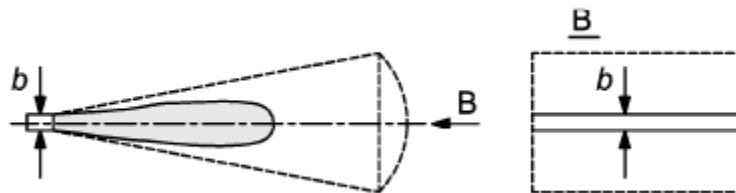
$$(14) \quad \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0$$

$$(15) \quad \rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = - \frac{\partial (\bar{p} + \frac{2}{3} \rho \bar{k})}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

Reynoldsove jednadžbe, koje opisuju vremenski osrednjeno turbulentno strujanje fluida, imaju isti oblik kao i polazne Navier Stokesove jednadžbe, koje opisuju ukupno strujanje. Razlika je u tome što se u Reynoldsovim jednadžbama pojavljuju vremenski osrednjene veličine, umjesto tlaka pojavljuje se efektivni tlak $(\bar{p} + \frac{2}{3} \rho \bar{k})$, a umjesto viskoznosti fluida pojavljuje se efektivna viskoznost $(\mu + \mu_t)$.

2.1.2 Turbulentni mlaz

Slobodni turbulentni mlaz spada u skupinu strujanja koja se nazivaju slobodnim turbulentnim smičnim strujanjima (eng. *free turbulent shear flows*). Obično nastaje istrujavanjem fluida kroz relativno mali otvor u relativno veliki prostor ispunjen istim takvim ili sličnim fluidom u mirovanju, te njegovo strujanje nije ometano nikakvim krutim tijelom. Gradijenti brzine strujanja i smičnog napreznja, uzrokovanih istim, generiraju turbulenciju [5]. Ova lokalna generacija turbulencije omogućuje formiranje kvazistacionarnih uvjeta strujanja tamo gdje se generacijom turbulencije samo nadomještaju lokalni gubici viskozne disipacije [5]. U glavnom smjeru strujanja mlaza komponenta brzine je znatno veća nego u bilo kojem drugom smjeru.

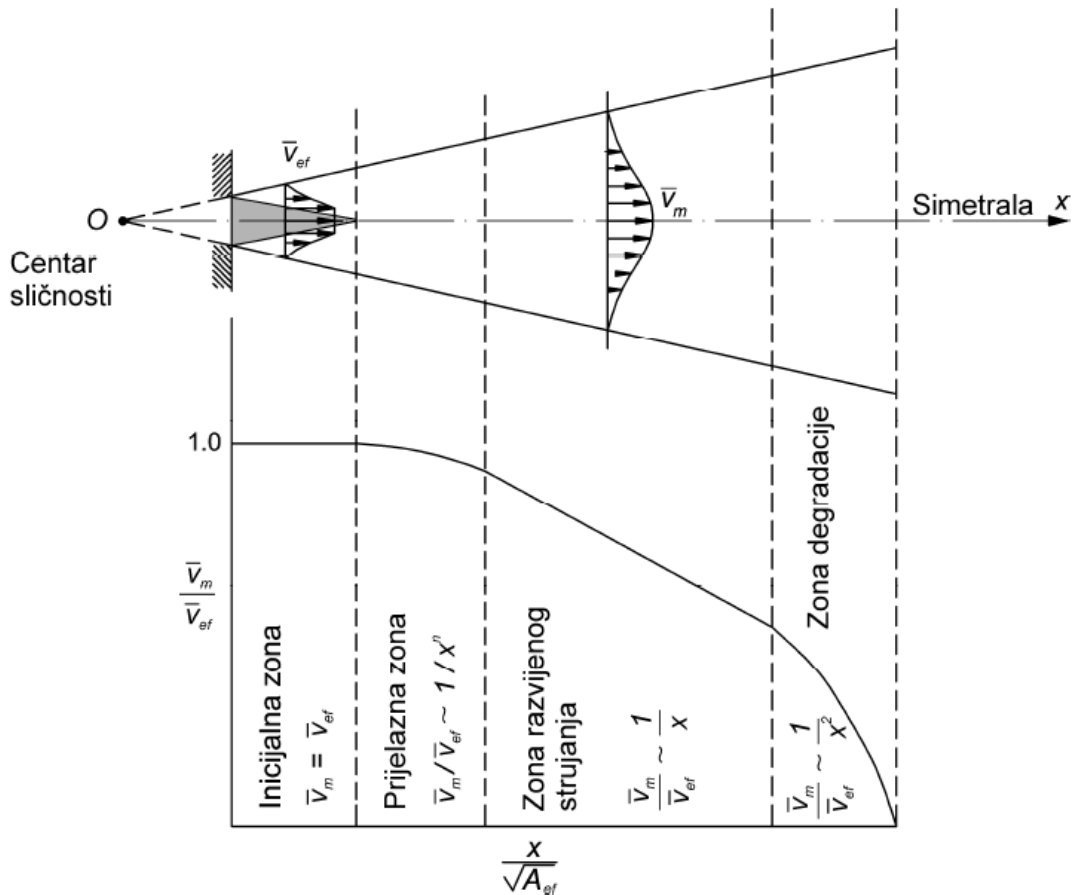


Slika 8. Prikaz analiziranog mlaza u dvije projekcije [18].

Promjena veličina strujanja u smjeru poprečnom na glavni smjer strujanja znatno je veća nego u glavnom smjeru strujanja. Spomenuta činjenica, te relativno uski i dugački oblik turbulentne zone mlaza omogućuju primjenu Prandtlovih pretpostavki, odnosno aproksimacija graničnog sloja (eng. *boundary layer approximations*). Ove aproksimacije omogućavaju smanjenje broja članova u jednačbama zanemarenjem onih članova koji se temeljem pretpostavki graničnog sloja pokazu za red veličine manjim od ostalih.

2.1.3 Karakteristične zone strujanja slobodnog izoternog mlaza

Prema [6], turbulentni zračni mlaz se dijeli na četiri karakteristične zone (slika 9).



Slika 9. Zone mlaza i karakteristični pad brzine prema [6].

Razlikujemo četiri zone: inicijalna, prijelazna, zona razvijenog strujanja i terminalna (zona degradacije).

Inicijalna zona je kratko početno područje mlaza, koje je karakteristično po postojanju jezgre u kojoj je brzina konstantna i jednaka efektivnoj istrujnoj brzini na otvoru v_0 . Dužina zone ovisi o stupnju turbulencije mlaza [7]. Pri nižim vrijednostima stupnja turbulencije, zona je duža nego pri višim iznosima. Oko jezgre nalazi zona mješanja u kojoj se jakim vrtložnim strujanjem zrak iz prostorije miješa s upuhnutim zrakom. U ovom radu je inicijalna zona izračunavana prema izrazu Regenscheita:

$$(16) \quad x_0 = \frac{h}{m}$$

Prijelazna zona je zanemarive dužine kod okruglog i kod ravninskog mlaza, ako je omjer pravokutnog otvora širina/dužina manji od 13,5 [6]. Ovdje se, završavanjem inicijalne zone i na početku prijelazne zone, aksijalna brzina zraka v_x smanjuje obrnuto proporcionalno drugom korjenu udaljenosti od istrujnog otvora [8]:

$$(17) \quad \frac{v_x}{v_0} = \frac{1}{\sqrt{x}}$$

Zona razvijenog strujanja

Za većinu ventilacijskih otvora koji se primjenjuju u praksi prve su dvije zone zanemarive dužine, u odnosu na zonu razvijenog strujanja. Ukupna količina zraka, koju pokreće upuhani mlaz zraka sa povučenim zrakom iz prostorije, tu postaje sve veća, dok njegova brzina postaje sve manja. Aksijalna brzina zraka se smanjuje obrnuto proporcionalno udaljenosti od istrujnog otvora [7]:

$$(18) \quad \frac{v_x}{v_0} = \frac{1}{x}$$

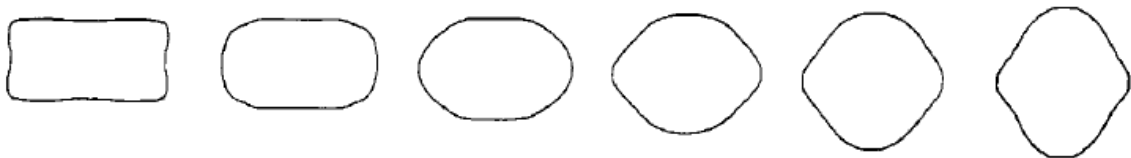
Zračni mlaz u miješajućoj ventilaciji u većini slučajeva stiže u zonu boravka u ovoj zoni, te je zato ona od velikog inženjerskog značaja.

Zona degradacije

Ovdje je prisutan nagli pad brzine zraka, za koju prema [6] vrijedi:

$$(19) \quad \frac{v_x}{v_0} = \frac{1}{x^2}$$

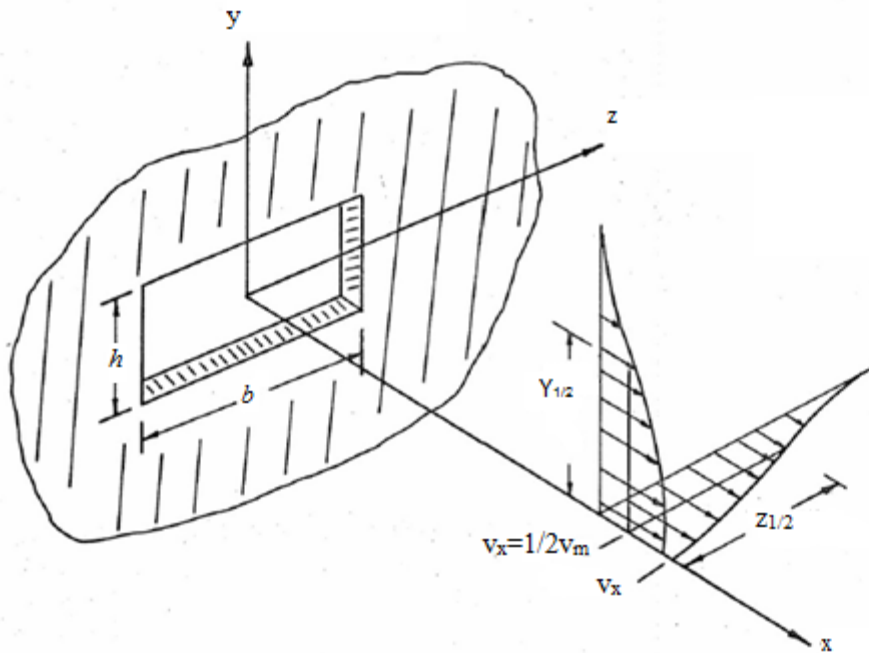
te ona postaje istog reda veličine kao brzina zraka u prostoriji.



Slika 10. Zračni mlaz s udaljavanjem od istrujnog otvora poprima kružni oblik [7], [9].

2.1.4 Jednadžbe mlaza

Promjene tlaka u glavnom smjeru strujanja dominantno ovise o distribuciji tlaka u okolnom prostoru izvan zone turbulentnog mlaza. Kako je navedena raspodjela jednolika, dakle $p = konst.$ tako je i tlak u turbulentnoj zoni mlaza u glavnom smjeru strujanja konstantan [18].



Slika 11. Profili brzine kod trodimenzionalnog turbulentnog zračnog mlaza prema [10].

Zbog konstantnog tlaka, protok količine gibanja u glavnom smjeru strujanja konstantan [4], [26], [27], [18]:

$$(20) \quad I_x = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} v_x^2(y) dy = konst.$$

Uvažavanjem (20) izjednačavamo protok količine gibanja na istrujnom otvoru i na presjeku koji se nalazi na udaljenosti x od centra istrujnog otvora:

$$(21) \quad I_0 = I_x$$

Protok količine gibanja na istrujnom otvoru glasi:

$$(22) \quad I_0 = \rho v_0^2 \cdot h$$

pri čemu je v_0 istrujna brzina na samom otvoru. Za protok količine gibanja na presjeku na udaljenosti x , vrijedi:

$$(23) \quad I_x = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} v_x^2(y) dy$$

Brojna istraživanja, koja navodi [18], pokazala su da se profil brzine u razvijenoj zoni strujanja izoternog mlaza može dobro aproksimirati koristeći oblik Gaussove funkcije (slika 11.):

$$(24) \quad \frac{v_x}{v_m} = e^{-\ln 2 \left(\frac{y}{y_{1/2}}\right)^2}$$

Gdje je v_m brzina na simetralnoj ravnini mlaza. Uvršavanjem (23), (22) i (24) u (21) dobiva se:

$$(25) \quad \rho v_0^2 h = \rho v_m^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2 \ln 2 \left(\frac{y}{y_{1/2}}\right)^2} dy$$

Integral s desne strane gornje jednadžbe nalikuje na funkciju normalne distribucije. U literaturi [26] dano je konačno rješenje ovakvih integrala koje se može dobiti pomoću inženjerskih računalnih programa poput „*Mathematica-e*“. Računalni programi za ovaj integral daju jedino konačno rješenje, bez postupka. Stoga je u radu iznesen postupak rješavanja integrala s desne strane gornje jednadžbe.

Sredena podintegralna funkcija:

$$(26) \quad e^{-2 \ln 2 \left(\frac{y}{y_{1/2}}\right)^2} dy = e^{-2 \left(\sqrt{\frac{4 \ln 2}{(y_{1/2})^2}} \cdot \frac{y}{2}\right)^2}$$

Uvodimo supstituciju:

$$(27) \quad \frac{z}{2} = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{y_{1/2}^2}} \cdot \frac{y}{2}$$

Deriviranjem gornje jednadžbe dobiva se:

$$(28) \quad \frac{1}{2} dz = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{y_{1/2}^2}} \cdot \frac{1}{2} dy$$

$$(29) \quad dy = \sqrt{\frac{y_{1/2}^2}{4 \ln 2}} \cdot \frac{1}{2} dz$$

Uvrštavanjem (27) i (29) u (25) uvažavajući (26) dobiva se jednadžba oblika:

$$(30) \quad \rho v_0^2 h = \rho v_m^2 \cdot \sqrt{\frac{y_{1/2}^2}{4 \ln 2}} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{z}{2}\right)^2} dz$$

Prema [24] za integral s desne strane vrijedi:

$$(31) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{z}{2}\right)^2} dz = 1$$

Analogno tome slijedi da je:

$$(32) \quad \rho v_0^2 h = \rho v_m^2 \cdot \sqrt{\frac{y_{1/2}^2}{4 \ln 2}} \cdot \sqrt{2\pi}$$

Zbog pretpostavke nestlačivog strujanja i rješavanjem korjena s desne strane dobiva se:

$$(33) \quad v_0^2 h = v_m^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi (y_{1/2})^2}{\ln 4}}$$

Za pad centralne brzine sada se može napisati izraz:

$$(34) \quad v_m^2 = v_0^2 \sqrt{\frac{\ln 4}{\pi}} \cdot \frac{1}{y_{1/2}} \cdot h$$

Gdje je $y_{1/2}$ udaljenost od simetrale mlaza na kojoj brzina doseže polovinu vrijednosti i prema [26] se računa kao:

$$(35) \quad y_{1/2} = \beta_G \cdot x$$

Gdje je β_G stupanj raspršenja mlaza koji se određuje eksperimentalno. [26] navodi istraživanja M. L. Albertsona (1950), L.J.S. Bradburyja (1965.), N.E. Kotsovinosa (1976.), Millera i Comingsa (1957.), koja su dala raspon vrijednosti od 0,116 do 0,154. [26] uzima vrijednost $\beta_G = 0,12$ u danim formulacijama za ravninski mlaz.

Sređivanjem izraza za pad centralne brzine, te uvažavajući stupanj raspršenja mlaza dobiva se:

$$(36) \quad \frac{v_m}{v_0} = \sqrt{\sqrt{\frac{\ln 4}{\pi}} \cdot \frac{h}{\beta_G \cdot x}} = \sqrt{\sqrt{\frac{\ln 4}{\pi}} \cdot \frac{1}{\beta_G}} \cdot \sqrt{\frac{h}{x}}$$

U literaturi [18] se gornja jednadžba se prikazuje u obliku:

$$(37) \quad \frac{v_m}{v_0} = K \sqrt{\frac{h}{x}}$$

Jednadžba (37) daje informaciju o smanjenju brzine ravninskog izotermnog zračnog mlaza udaljavanjem od istrujnog otvora. Smanjenje je brzine izotermnog mlaza obrnuto proporcionalno korjenu udaljenosti od otvora x .

Centralna brzina slobodnog neizotermnog zračnog mlaza

Kod neizotermnog mlaza na trajektoriju strujanja i pad brzine uzduž centralne osi utječu uzgonske sile. Tako izraz za omjer centralne brzine neizotermnog ravninskog mlaza i brzine na istrujnom otvoru ima oblik:

$$(38) \quad \frac{v_m}{v_0} = K \sqrt{\frac{h}{x}} \pm \sqrt{\frac{Ar}{m} \left(2,83 \cdot \sqrt{\frac{x}{x_0}} - 1 \right)}$$

Konstanta K prema [7]*:

$$(39) \quad K = \sqrt{\frac{1}{m}}$$

U jednadžbi omjera centralne brzine Ar označava *Arhimedov broj* koji predstavlja omjer gravitacijskih sila i sila inercije, što se može interpretirati na način:

$$Ar = \frac{\text{slobodna konvekcija}}{\text{prisilna konvekcija}}$$

Računa se prema izrazu:

$$(40) \quad Ar = \frac{g \cdot \Delta T_0 \cdot h}{T_0 \cdot v_0^2}$$

Stupanj mješanja m ovisi o visini turbulencije direktno iza otvora, što je pak funkcija vrste otvora. Tako u analiziranom slučaju, pravokutni slobodni otvor, se kreće između vrijednosti 0,17 – 0,2 [7]. U radu je dana analiza zadanih otvora uvažavajući navedeni raspon vrijednosti stupnja mješanja.

*izdanje iz 1974. godine sadrži zapis preko konstante K dok novija izdanja ne spominju konstantu K .

Bitno je napomenuti da znak „±“ treba biti „+“ kada uzgonske sile djeluju u smjeru glavnog strujanja mlaza, a „-“ kada su suprotne smjeru glavnog strujanja mlaza.

U izrađenoj analizi uzgonske sile djeluju u smjeru glavnog strujanja mlaza, tj. mlaz koji se upuhuje u prostor je topliji od zraka u prostoru.

Indukcija

Podrazumijeva pojavu usisavanja okolnog zraka u struju mlaza što uzrokuje porast ukupnog volumenskog protoka zraka kroz poprečni presjek mlaza u glavnom smjeru strujanja. Proces kod kojeg fluid u izrazito turbulentnom strujanju usisava manje turbulentan fluid u njegovu okolišu. Za računanje indukcije pri istrujavanju mlaza iz pravokutnog istrujnog otvora, Regenscheit predlaže izraz za indukcijski omjer (*engl. entrainment ratio*):

$$(41) \quad \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}} = 2 \cdot \frac{x}{x_0} \sqrt{\frac{h}{b}} = 2 \frac{m \cdot x}{h} \sqrt{\frac{h}{b}}$$

te predstavlja omjer volumenskog protoka zraka u mlazu na nekoj udaljenosti od istrujnog otvora i volumenskog protoka zraka na istrujnom otvoru. U primjeni miješajuće ventilacije nastoji se postići što intenzivnije miješanje zraka.

U [17] dan je izraz za računanje indukcije poznavanjem temperatura u mlazu. Izraz je izveden iz *Prvog glavnog stavka termodinamike* (zakon očuvanja energije), te glasi:

$$(42) \quad \frac{V_x}{V} = \frac{t_{ok} - t_{pr}}{t_{m,x} - t_{pr}}$$

Iz gornjeg izraza dobivene su vrijednosti omjera indukcije na temelju srednjih poprečnih temperatura mlaza $t_{m,x}$ dobivenih obradom termograma.

Smanjenje temperature u neizotermnom mlazu

U [17] predložene su dvije jednadžbe za proračun temperature na udaljenosti x od istrujnog otvora. Prva jednadžba:

$$(43) \quad \frac{t_{m,x} - t_{pr}}{t_0 - t_{pr}} = \frac{3 T_u}{4 T_0} \sqrt{\frac{x_0}{x}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (4 - 1/\lambda_0)}{3 \left[1 + \left(\frac{x_0}{x} - 1\right) \frac{1}{\lambda_0} \right]}}$$

pokazala je nerealne vrijednosti kod istrujnog otvora dimenzija $b \times h = 140 \times 18$ mm u prvoj mjernoj točki na udaljenosti 6 cm od istrujnog otvora. Stoga je u proračunu korištena jednadžba:

$$(44) \quad \frac{t_{m,x} - t_{pr}}{t_0 - t_{pr}} = \frac{3 T_u}{4 T_0} \sqrt{\frac{x_0}{x}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (4 - 1/\lambda_0)}{3 \left[1 + \left(\frac{x_0}{x} - 1\right) \frac{1}{\lambda_0} \right]}}$$

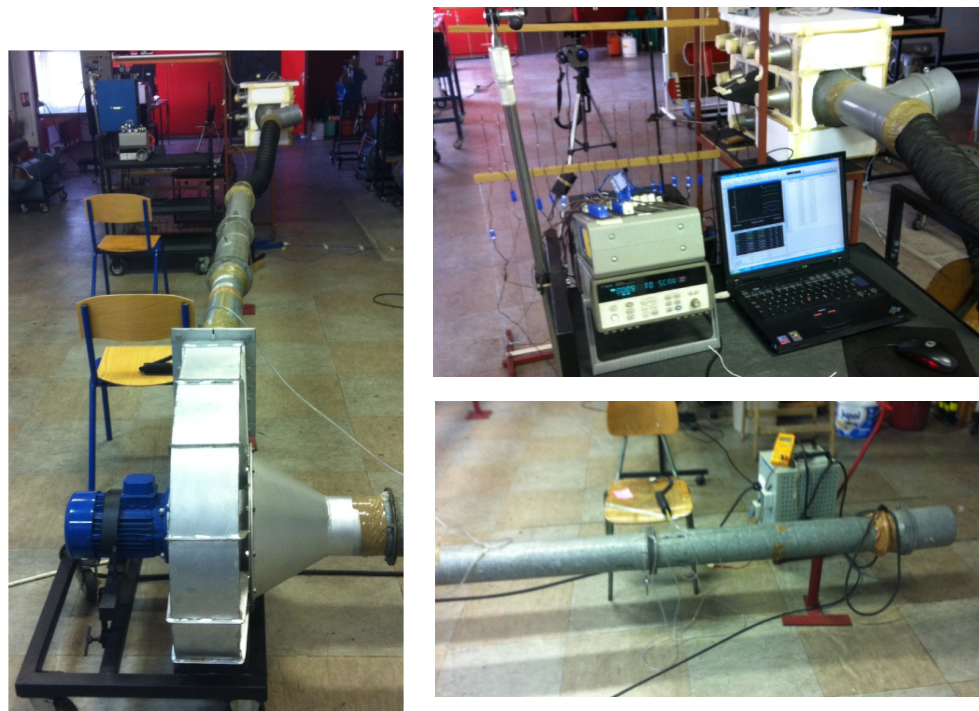
U obje jednadžbe λ_0 predstavlja omjer stranica:

$$(45) \quad \lambda_0 = \frac{b}{h}$$

Temperaturni profil, odnosno raspodjela temperatura po poprečnom presjeku mlaza prema [18] je širi od profila brzine. Uzrok većoj širini temperaturnog profila u odnosu na profil brzina [18] pronalazi u Taylorovoj teoriji vrtložnog prijenosa. Teorija vrtložnog prijenosa kaže da turbulentno miješanje uzrokuje prijenos vrtložnosti, a toplina se prenosi turbulentnom difuzijom, te su intezitet prijenosa količine gibanja i topline različitog intenziteta. Također [18] navodi istraživanje M.I. Grititlyn-a i G.M. Pozin-a koji su uočili da se u zoni razvijenog strujanja profili temperature brže razvijaju.

2.2 Eksperimentalna analiza

Mjerenja su izvršena na slobodnom neizotermnom mlazu zraka koji istrujava s osam različitih brzina (od 3 m/s do 10 m/s) iz dva tipa pravokutnog istrujnog otvora. Za određivanje karakteristika mlaza izmjerena je brzina na izlazu iz mlaznice i duž horizontalne osi, temperatura zraka na mjestu istrujavanja i duž osi, okolišnu temperaturu i prividnu reflektiranu temperaturu (temperatura ambijenta). Brzine su mjerene anemometrom sa žarnom niti. Temperatura je mjerena termoparovima postavljenim u struju zraka i termografskom kamerom (određivanje temperaturnog polja).



Slika 12. Mjerna linija

Mjerna linija prikazana je na slici 12. Osnovni dijelovi su ventilator, usisni i tlačni cjevovodi, te plenum s istrujnom mlaznicom. Protok zraka se namješta preko promjene broja okretaja ventilatora. Temperatura okolišnjeg zraka se mjeri pomoću termopara smještenog u prostoriji. Na pokretnim kolicima nalazi se montiran anemometar sa žarnom niti tip TESTO kojim se mjeri brzina zraka u istrujnom mlazu. Zrak kroz usisnu cijev dolazi do ventilatora koji ga tlači preko grijača u plenum. Na grijaču se zrak zagrijava na potrebnu temperaturu, a u plenumu smiruje, te zbog pretlaka koji vlada u plenumu, istrujava u prostoriju.

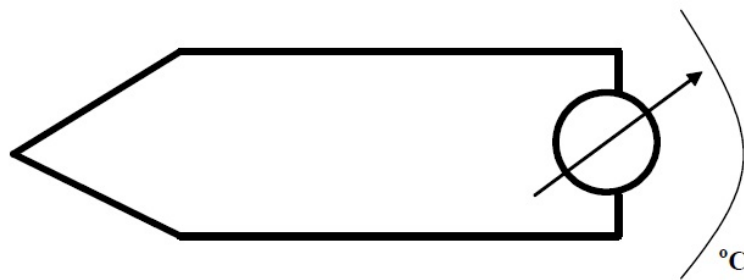
2.2.1 Principi primjenjenih eksperimentalnih metoda

2.2.1.1 Termoparovi

Prema kinetičko – molekularnoj teoriji topline, zagrijavanjem neke tvari povećava se molekularno gibanje u toj tvari. Zbog pojačanog gibanja molekula u tvari dolazi u metalima i do pojačanog gibanja slobodnih elektrona, pa se time povećava i kinetička energija tih elektrona. Tako postaju sposobni probijati potencijalnu barijeru svog metala i izlijeću iz njegove površine.

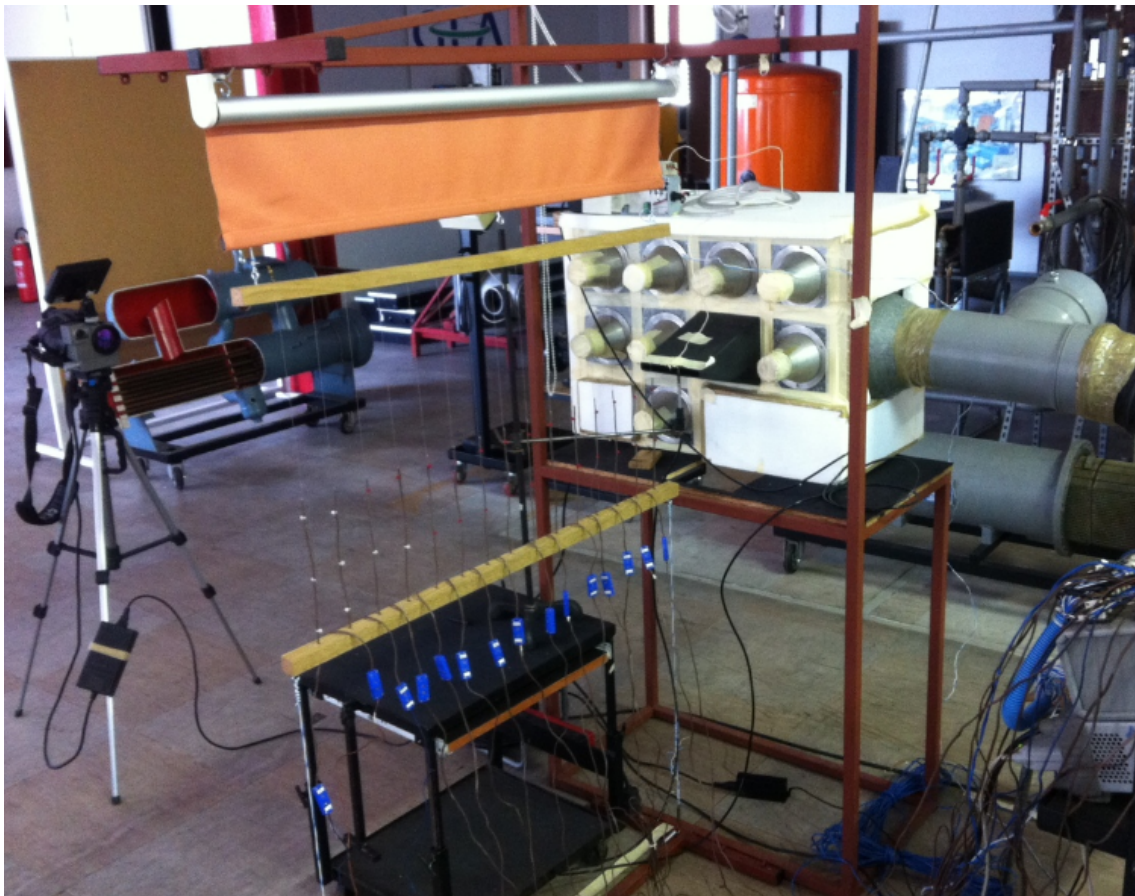
Emisija elektrona iz metala do koje dolazi zbog zagrijavanja metala, zove se termoelektronska emisija, a sama pojava zove se *termoelektrični efekt* [20]. Njemački fizičar Thomas Johann Seebeck uočio je da se u zatvorenom strujnom krugu što ga tvore dva metala inducira kontinuirana električna struja kad su spojevi ovih metala izloženi različitim temperaturama. Pomoću ampermetra beskonačno malog unutrašnjeg otpora motri se nastala termoelektrična struja ili se mjeri termoelektromotorna sila pomoću voltmetra beskonačno velikog unutrašnjeg otpora [15].

Vrijednost razvijene elektromotorne sile ovisi o materijalu od kojeg je izrađena žica i razlici temperatura. Mjerni pretvornik temperature izveden kao spoj dva različita materijala priključenih na mjerni instrument zove se *termopar* (slika 13). Drugim riječima, termoparovi stvaraju napon na neizotermnim segmentima para žica od različitih materijala.



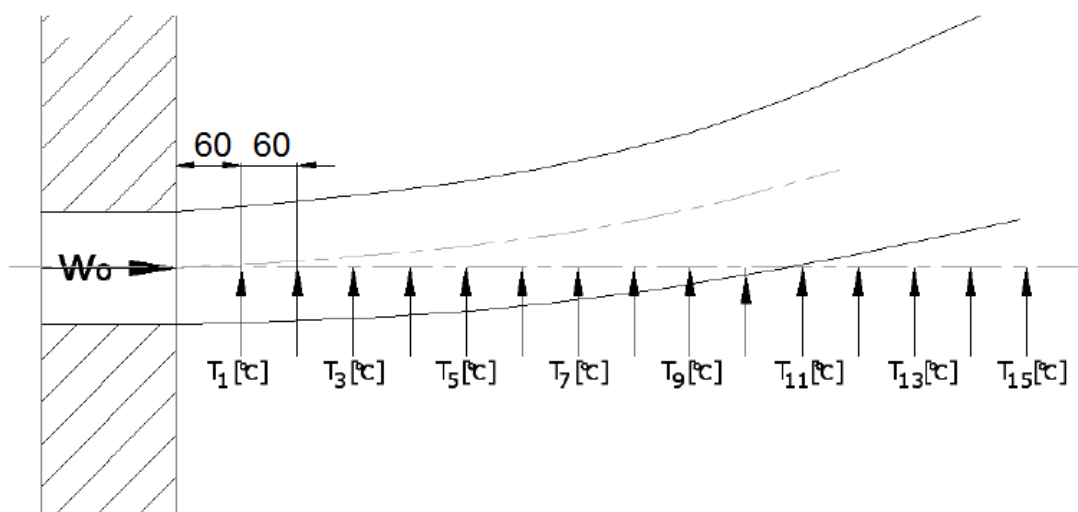
Slika 13. Shematski prikaz jednostavnog termopara

Termoparovi ili termočlanci su vrlo često upotrebljavani termometri za mjerenje temperature u laboratorijskim i industrijskim uvjetima. Različitim izborom termoparova može se pokriti veliko mjerno područje, od vrlo niskih do vrlo visokih temperatura. Glavna prednost termoparova je njihova jednostavnost i neposredni električni mjerni signal [20]. Za potrebe rada termoparovi su postavljeni horizontalno u simetralu mlaznice (slika 14).



Slika 14. Termoparovi u struji zraka.

Položaj pojedinih termoparova vidljiv je na slici 15.



Slika 15. Položaj termoparova.

Termoparovi su spojeni na računalo na kojem se očitava temperatura. Nakon pokretanja ventilatora i uključivanja grijača, praćene su temperature zraka na pojedinim pozicijama. Temperature su očitane kada je postignuto stacionarno stanje.

2.2.1.2 Anemometri sa žarnom niti

Za određivanje brzine zraka, anemometri koriste kao osjetnik električno zagrijani otpornik ili termistor. Senzor se povezuje u Wheatstoneov most. Ovisno o brzini zraka, senzor se više ili manje hladi, pri čemu se mijenja njegov električni otpor. Pri mjerenju anemometrima po principu konstantne struje, senzor se grije konstantnom električnom strujom i mjeri se otpor. Kod anemometara s konstantnom temperaturom, temperatura senzora se drži konstantnom, a za to potrebna struja mjera je brzine stujanja zraka.

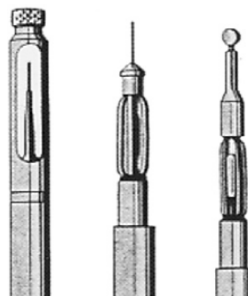


Slika 16. Anemometar sa žarnom niti korišten u radu.

Temperatura senzora je obično 10 do 70 K iznad sobne temperature. Anemometri su najčešće konstruirani tako da kompenziraju promjene sobne temperature. Osjetnik može biti u obliku cilindra, pločice ili kugle. Oblik utječe na ovisnost o smjeru strujanja.

Zbog zahtjeva na brzo prikazivanje potrebno je da masa senzora bude mala. Koriste se uglavnom za mjerenje brzine strujanja zraka u prostorijama.

Za potrebe rada, anemometar je smješten u simetralu mlaznice. Nakon postignutog stacionarnog stanja, anemometar je translatorno pomican po mjernim točkama prikazanim na slici 15.



Slika 14. Osjetnici različitih anemometara sa žarnom niti prema [7]

2.2.1.3 Kvantitativna infracrvena termografija

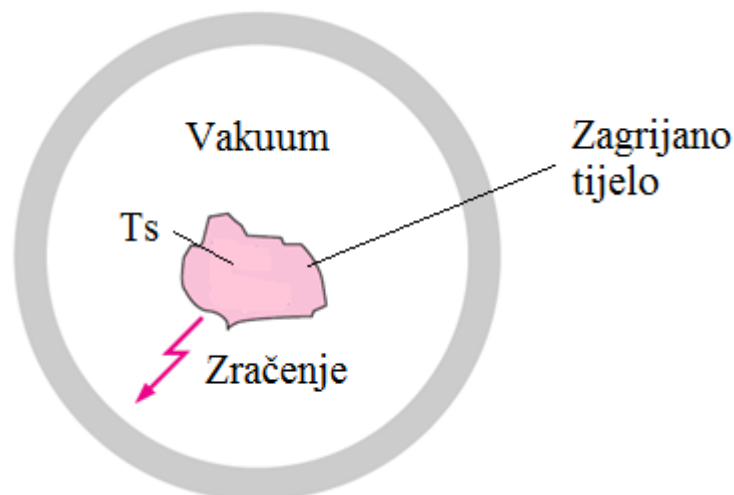
2.2.1.3.1 Fizikalne osnove

Toplina se prenosi *trima* osnovnim načinima [2]:

- *provođenjem* (kondukcijom) kroz krutine, kapljevine i plinove
- *konvekcijom* (komešanjem) kapljeviti i plinoviti čestica
- *zračenjem* (radijacijom), koje se odvija bez materijalnog posrednika (slika 15.), radi se o valnim pojavama elektromagnetske prirode.

Kako je infracrvena termografija mjerna metoda kojom se bilježi *zračenje* površina objekata u određenom području infracrvenog spektra, tako će biti detaljnije razrađen taj način prijenosa topline.

Svako tijelo u svoju okolinu odašilje elektromagnetsko zračenje, čiji intenzitet u prvom redu ovisi o temperaturi površine tijela. Ako je temperatura tijela viša od nekih 600 °C, tijelo zrači čovjeku vidljivo svjetlo, počevši od tamno crvene boje prema svjetlijim tonovima, kako mu temperatura raste. Pri nižim temperaturama zračenje je ljudskom oku nevidljivo i zove se infracrveno (lat. *infra* – ispod). [13]. Za razliku od provođenja i konvekcije, kod kojih je prijenos topline nužno *vezan* za tvar kao posrednika, širenje zračene energije može se odvijati i u vakuumu. Međutim, treba naglasiti da izvor zračene energije leži u materijalnoj supstanciji (trodimenzijskoj tvorevini). Nadalje, pri toplinskom zračenju struja energije može prolaziti kroz područja niže ili više temperature, nego što su temperature tijela između kojih se toplina prenosi [2]. S druge strane, širenje topline provođenjem i konvekcijom ide uvijek u smjeru monotonog temperaturnog pada.



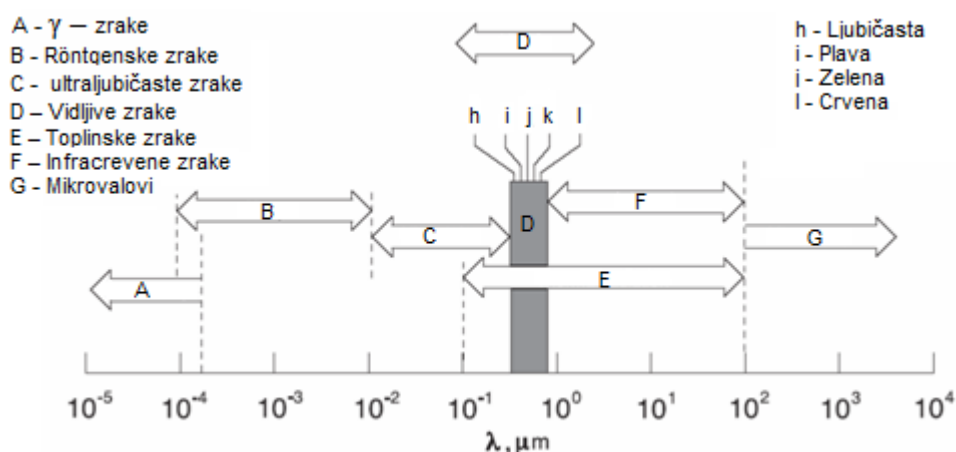
Slika 15. Pri prijenosu topline zračenjem ne treba postojanje materije kao posrednika, nego se prijenos topline zračenjem može odigravati i u vakuumu. Slika prema [23].

Elektromagnetske valove, koji nastaju kao posljedica titranja elektrona oko jezgre atoma, emitira svako tijelo čija je temperatura iznad apsolutne nule. Izmjena se energije zračenjem između tijela i njegovog okoliša odvija u izuzetno malim, nedjeljivim iznosima energije koji se nazivaju *fotoni* ili *kvanti*. Svaki se val ima svoju brzinu c , valnu duljinu λ i frekvenciju ν , koje se mogu povezati jednadžbom:

$$(46) \quad c = \lambda \nu$$

Brzina širenja vala ovisi o mediju kroz koji se val širi, ali frekvencija vala je neovisna o vrsti medija i ona je konstantna. Stoga iz jednadžbe (46) proizlazi da će se i valna duljina *mijenjati* ovisno o *mediju* širenja vala. U vakuumu brzina širenja vala odgovara brzini širenja svjetlosti i iznosi $2,998 \cdot 10^8$ m/s. Za inženjerske primjene, ta brzina će ostati praktički konstantna, pa će prema (46) ostati konstantna i *valna duljina*. Toplinski su efekti vezani za područje valnih duljina od približno $0,1 \mu\text{m}$ do oko $100 \mu\text{m}$ (slika 16). Dakle, onaj dio spektra koji je vezan za izmjenu topline obuhvaća djelomično ultraljubičasto i u potpunosti vidljivo i infracrveno zračenje. Nadalje, studija izmjene topline zračenjem zahtjeva poznavanje pojmova *vlastite emisije*, *upadnog zračenja* i *svjetloće površine* kao i koncept *crnog tijela*, te *zakone zračenja*.

Vlastita emisija (vlastita emitirana energija) promatranog tijela energija je koju tijelo emitira samo zbog svoje temperature, a ovisi isključivo o temperaturi i svojstvima promatranog tijela. Označuje se s E , a mjerna jedinica je W/m^2 .



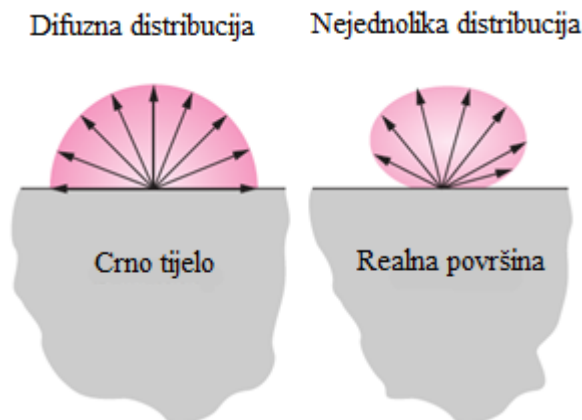
Slika 16. Spektar elektromagnetskog zračenja

Upadno zračenje (dozračena energija) je zračenje čiji izvor nije u promatranom tijelu nego negdje u njegovu okolišu. Označava se s G , W/m^2 .

Svjetloća površine je sveukupno zračenje koje dolazi s površine promatranog tijela. S obzirom da sva tijela emitiraju vlastitu energiju (vlastita emisija), ali i reflektiraju dio energije koji na tijelo dolazi iz okoliša, a mogu biti i propusna za neka zračenja iz okoliša, kad se govori o svjetloći površine treba naglasiti da se ona sastoji od vlastite emisije (izvor je zračenja promatrano tijelo), od reflektiranog i propuštenog zračenja (izvor su zračenja tijela iz okoliša). Oznaka za svjetloću površine je K , W/m^2 .

Koncept crnog tijela podrazumijeva postojanje idealiziranog tijela koje služi kao etalon pri analizi ponašanja realnih tijela. Važna svojstva crnog tijela [2] su:

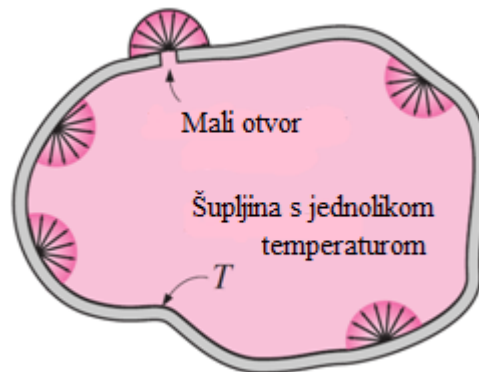
- crno tijelo u potpunosti apsorbira cjelokupno upadno zračenje svih valnih duljina i svih smjerova,
- za zadanu temperaturu i valnu duljinu ni jedna površina *ne može* emitirati više zračenja nego površina crnog tijela,
- intenzitet zračenja crnog tijela je neovisan o smjeru, tj. crno tijelo je difuzni emiter (slika 20).



Slika 20. Crno tijelo je idealni difuzni emiter koji emitira zračenje jednoliko u svim smjerovima [23]

Za potrebe kalibracije uređaja za infracrvenu termografiju moguće je umjetno napraviti tijelo koje će svojim svojstvima simulirati značajke crnog tijela. Primjer takvog tijela je *izotermna šupljina* (slika 21).

Što je otvor u omjeru prema šupljini manji, tada će broj refleksija unutar šupljine biti veći pa je intenzitet reflektirane zrake kroz otvor šupljine praktički sveden na nulu. U tom slučaju intenzitet zračenja koje napušta otvor šupljine ovisi jedino o *temperaturi* površine šupljine i korespondira zračenju crnog tijela za zadanu temperaturu [2].



Slika 21. Velika izotermna šupljina temperature T s malim otvorom kao crnim tijelom [23]

Zakoni zračenja obuhvaćaju Planckovu raspodjelu intenziteta zračenja, Stefan-Boltzmannov zakon, te Kirchhoffov stavak.

Planckova raspodjela intenziteta zračenja podrazumijeva da je intenzitet vlastitog emitiranog zračenja (spektralna raspodjela) crnog tijela (W/m^3) funkcija apsolutne temperature i valne duljine, koja se izražava Planckovom jednačbom:

$$(47) \quad I_{\lambda,c} = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

Kako je zračenje crnog tijela difuzno, tada je intenzitet zračenja s elementarne površine crnog tijela dA u čitavi poluprostor, nakon integracije jednak (48):

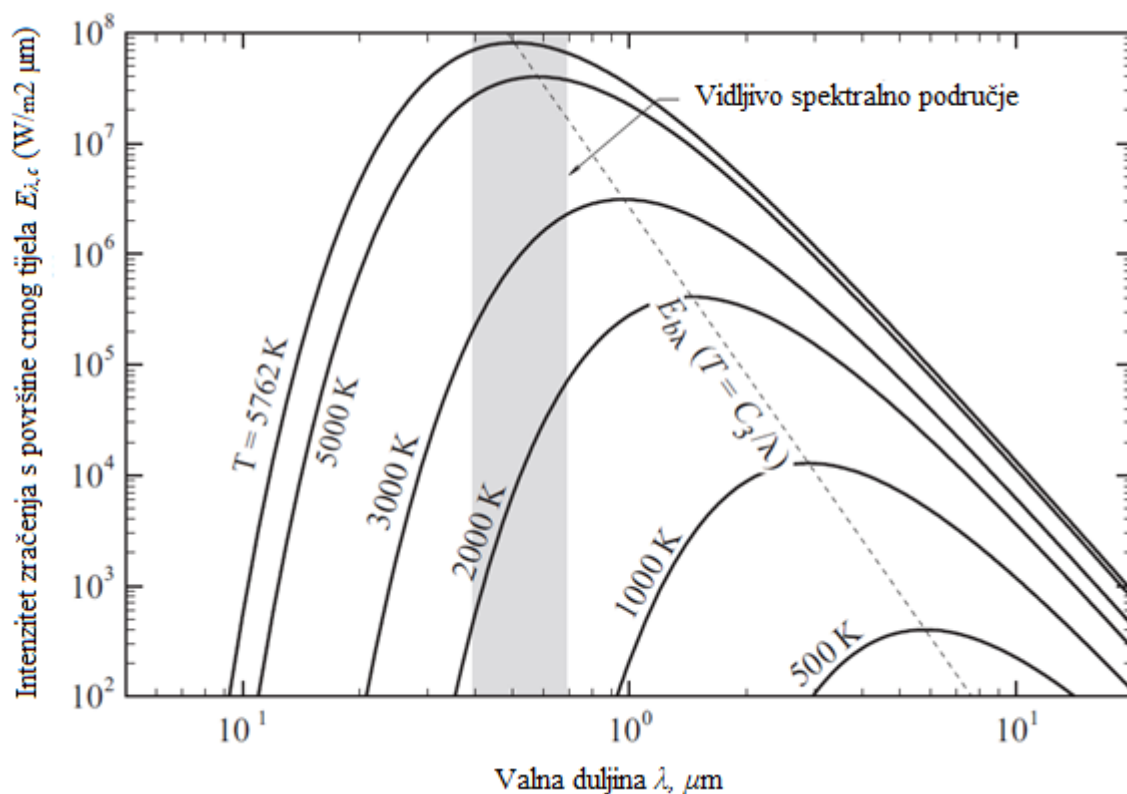
$$E_{\lambda,c}(\lambda, T) = \left(\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \right) I_{\lambda,c} = \pi I_{\lambda,c} = \frac{\pi 2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

U gornjoj jednačbi (48) su $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,742 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ i $C_2 = hc_0/k = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$ prva i druga konstanta zračenja. Gornja jednačba poznata je kao Planckova raspodjela, a prikazana je na slici 22. za odabrane temperature crnog tijela. Iz slike 22. je vidljivo da emitirano zračenje crnog tijela za odabranu temperaturu ovisi o valnoj duljini, te da se kontinuirano mijenja kroz cijeli spektar. S porastom temperature tijela raste i intenzitet emitiranog zračenja.

Glavnina se emitiranog zračenja s porastom temperature pomiče prema području kraćih valnih duljina. Tako se za svaku odabranu temperaturu može uočiti lokalni maksimum na odgovarajućoj valnoj duljini λ_m . Određivanje te valne duljine λ_m slijedi iz nužnog uvjeta postojanja ekstrema funkcije $E_{\lambda,C}$ (Planckova jednadžba), nakon čega se sređivanjem dobiva:

$$(49) \quad \lambda_m = \frac{C_3}{T}$$

gdje je $C_3 = 2897,8 \mu\text{m}$, a naziva se *trećom* konstantom zračenja. Ova se jednadžba naziva *Wienov zakon pomaka*. Shodno dobivenoj jednadžbi može se zaključiti da se maksimum spektralne gustoće zračenja s porastom temperature crnog tijela pomiče prema području kraćih valnih duljina.



Slika 22. Spektralna emisija crnog tijela za različite temperature. [29]

Prema *Stefan-Boltzmannovom zakonu*, zračenje koje crno tijelo emitira ovisi samo o njegovoj temperaturi, te vrijedi:

$$(50) \quad E_c = \sigma \cdot T^4$$

Gdje je σ Boltzmannova konstanta i iznosi $5,667 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$, a T je apsolutna temperatura u Kelvinima. Veličina E_c , $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ označava gustoću vlastitog emitiranog zračenja koju neko crno

tijelo temperature T emitira u jednu olutku prostora. Ovaj izraz omogućuje računanje gustoće vlastitog emitiranog zračenja u svim pravcima i svim valnim duljinama u polutku prostora, poznajući samo temperaturu crnog tijela.

Realna tijela se ne ponašaju prema zakonima koji vrijede za crno tijelo. Realna tijela za zadanu temperaturu emitiraju manje zračenja od crnog tijela i ono se računa prema Stefan-Boltzmannovu zakonu za realna tijela:

$$(51) \quad E_c = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

pri čemu je ε emisijski faktor površine realnog tijela i ima vrijednost između 0 i 1. Proizlazi da je emisijski faktor realnog tijela omjer vlastite emitirane energije realnog tijela pri nekoj odabranoj temperaturi i vlastite emisije crnog tijela pri toj istoj temperaturi:

$$(52) \quad \varepsilon = \frac{E(T)}{E_c(T)}$$

Emisijski faktor ovisi o vrsti materijala, temperaturi i stanju površine. Valja napomenuti da se podaci koji se navode u literaturi odnose na vrijednost emisijskog faktora u smjeru normale ε_n . Prosječna se vrijednost emisijskog faktora (srednja vrijednost za sve smjerove) dobije množenjem očitanih vrijednosti s korekcijskim faktorom. Vlastita emisija realnih tijela je funkcija i temperature tijela i emisijskog faktora. Što tijelo ima višu temperaturu i višu vrijednost emisijskog faktora više i emitira, i obrnuto.

Kirchhoffov zakon povezuje faktor apsorpcije i faktor emisije. Faktor apsorpcije, kao i faktor emisije ovisi o temperaturi promatranog tijela i stanju njegove površine ali i intervalu valnih duljina toplinske zrake koja upada na površinu tijela. Faktor apsorpcije pokazuje koliki će dio zračenja koje upada na površinu tijela (izvor je zračenja neko tijelo iz okoliša temperature T') biti apsorbiran od strane promatranog tijela (temperature T).

Ako je riječ o vremenski nepromjenljivoj temperaturi tijela (stacionarno stanje), slijedi da su faktori apsorpcije i faktori emisije međusobno jednaki, tj.

$$(53) \quad a = \varepsilon$$

Materijali koji su dobri emiteri toplinskog zračenja ujedno su i dobri apsorberi, i obrnuto.

2.2.1.3.2 Termografski sustavi

Termografski sustav pretvara oku nevidljivo, infracrveno zračenje, u vidljivu sliku. Glavne komponente termografskog sustava su infracrvena kamera i računalo za obradu podataka. Termografska kamera (slika 23) pomoću sustava leća, formira slike koristeći infracrveno zračenje. Za razliku od običnih kamera koje formiraju slike u području vidljivog zračenja, infracrvene kamere rade u području valnih duljina infracrvenog zračenja. Snimak termografske kamere naziva se termogram. Tako nastala slika može biti monokromatska ili u boji. Na termogramu svakoj temperaturi možemo pridružiti određenu boju.

Razvojem mikroelektronike pojavljuju se kamere sa FPA

(Focal Plane Array) detektorima koji ne zahtijevaju nisko-temperaturno hlađenje, već je dovoljno hladiti detektore na sobnu temperaturu. Niskotemperaturno hlađenje prisutno je kod starijih termografskih kamera, te je predstavljalo prepreku pri njihovoj praktičnoj upotrebi. FPA detektori su omogućili: veću brzinu obnove slike, veću razlučivost i manje dimenzije kamere. FPA detektori ne zahtijevaju poseban optički sustav za usmjeravanje upadnog zračenja na fokusnu ravninu kamere.



Slika 23. Termografska kamera.

Važno je napomenuti da osjetnici registriraju zračenje u skladu s Planckovom razdiobom. U skladu s tim, za mjerenje određene temperature najpogodnije je koristiti osjetnik od materijala koji ima najveći odziv na zračenje one valne duljine kojoj odgovara maksimalni intenzitet zračenja za zadanu temperaturu, u skladu s Wienovim zakonom pomaka.

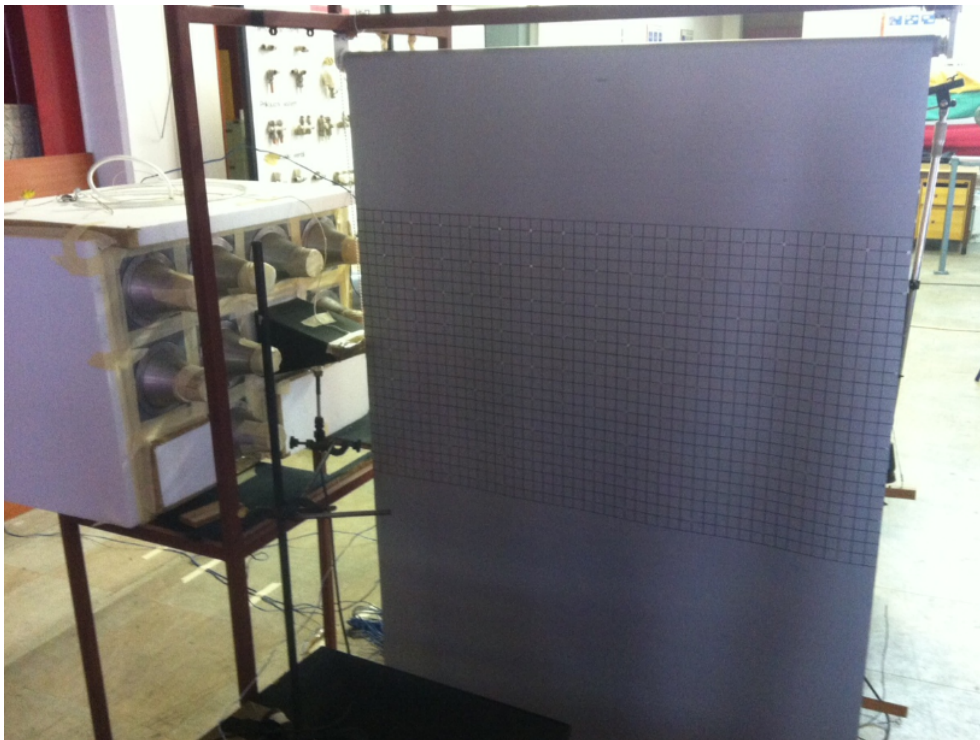
Termogram predstavlja vidljivi prikaz infracrvenog zračenja koje dolazi s površine promatranog objekta. Vidljivi prikaz infracrvenog zračenja dobiva se preko osjetnika infracrvenog zračenja. Na kvalitetu podataka dobivenih mjerenjem utječu svojstva promatranog objekta. Kod mjerenja temperature objekta s visokim emisijskim faktorom, imamo realniji prikaz na termogramu u odnosu na one s niskim emisijskim faktorom. Bolji termogram objekta s visokim emisijskim faktorom posljedica je činjenice da kamera registrira cjelokupno prispjelo zračenje koje se sastoji od reflektiranog i vlastitog emitiranog zračenja (ukoliko je promatrani objekt neproziran za infracrveno zračenje u području valnih duljina koje registrira kamera). Zbog toga što kamera registrira cjelokupno prispjelo zračenje, prikaz koji dobijemo na termogramu može biti sasvim pogrešan. Temperatura promatranog tijela je funkcija samo vlastitog emitiranog zračenja pa, ukoliko se želi dobiti realna slika, mora se eliminirati reflektirano zračenje.

Određivanjem *emisijskog faktora* promatranog objekta dolazi se do informacije od točnom udjelu reflektiranog i vlastitog emitiranog zračenja. Problem pri termografskom ispitivanju može predstavljati i prostor između promatranog objekta i infracrvene kamere. Prostor između kamere i objekta može više ili manje apsorbirati zračenje koje emitira promatrani objekt.

U radu je primjenjena *aktivna termografija*, jer je prisutna toplinska pobuda objekta dovođenjem topline. Aktivna termografija primjenjuje se u kvantitativne svrhe, najčešće u laboratorijskim uvjetima pri istraživačkim i razvojnim disciplinama. Pasivna termografija je u većini slučajeva kvalitativna. Drugi način je metoda *pasivne termografije* koja se primjenjuje u slučajevima kada se snima neki objekt u stacionarnom temperaturnom stanju kakvo je postignuto duljim boravljenjem toga objekta u okolini čija temperatura se ne mijenja. Pasivna termografija je u većini slučajeva kvalitativna.

2.2.1.3.3 Termografsko mjerenje

Za određivanje temperature, u struju zraka je postavljeno platno visokog emisijskog faktora, slika 24.



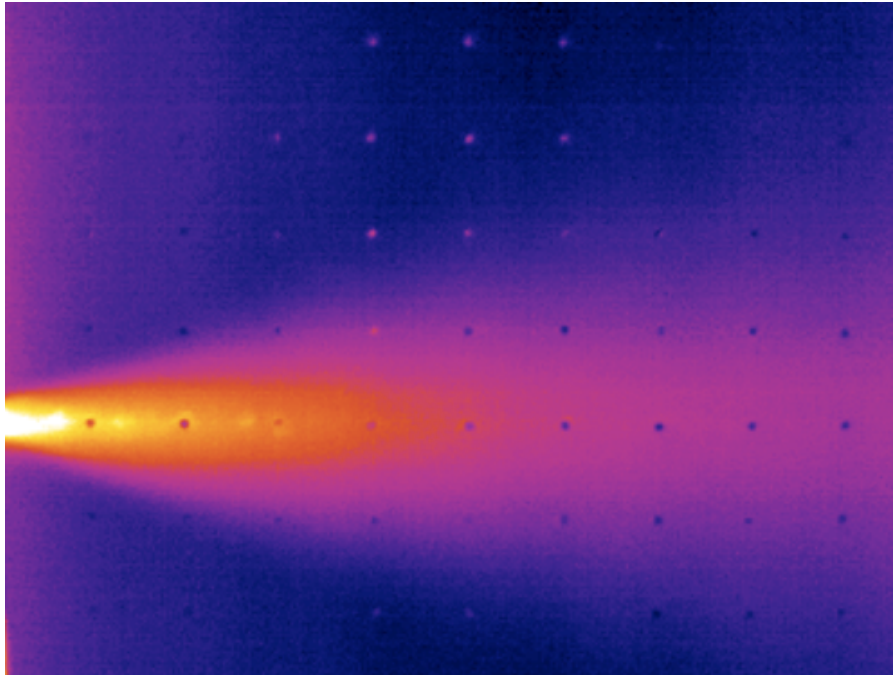
Slika 24. Platno termografskog mjerenja.

Na platno su, svakih 6 cm, nalijepljene aluminijske točke visoke refleksije kako bi se moglo odrediti udaljenosti. Na termografskoj kameri su namješteni odgovarajući parametri objekta i okoline, vidljivi u tablici 2.

Tablica 2. Parametri objekta i okoline.

Udaljenost platna od kamere	1,5 m
Emisijski faktor platna	0,97
Ambijentalna temperatura	24,56°C – 28,4 °C, ovisno o mjerenju
Relativna vlažnost	50%
Temperatura okolišnjeg zraka	24,56°C – 28,4 °C, ovisno o mjerenju

Računalnom obradom termograma (slika 25), određuju se temperature u odabranim točkama.



Slika 25. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 3 m/s.

Očitane vrijednosti, te usporedba sa podacima dobivenim termoparovima, dani su u Prilogu C.

2.2.2 Elementi mjerne linije

Usisna cijev

Dimenzije usisne cijevi:

$\phi 150 \times 1,5 \text{ mm}$

$l = 2,1 \text{ m}$

Ventilator

Ventilator Ogulin – MONTING

TIP: VDP 400/1

Snaga: $P = 2,2 \text{ kW}$

Broj okretaja: $n = 2830 \text{ min}^{-1}$

Električni grijač s termostatom

Proizvođač: Andair AG

TIP: CG 8450 Andelfingen

Snaga: 3 kW

Napajanje: 3 x 360 V

Termostat – raspon temperature

regulacije: 30 - 110°C

Tlačna cijev

Dimenzije tlačne cijevi:

$\phi 130 \times 1,5 \text{ mm}$

$l = 1,76 \text{ m}$

Cijev sa regulacijskom klapnom

Dimenzije cijevi:

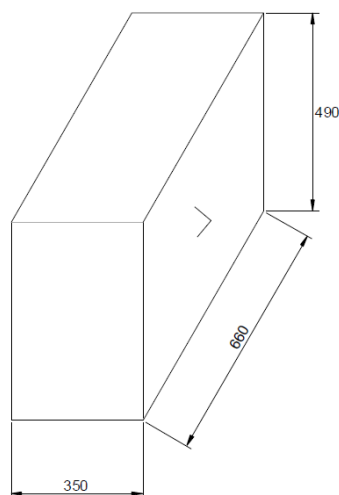
$\phi 130 \times 1,5 \text{ mm}$

$l = 1,25 \text{ m}$

Plenum

Dimenzije plenuma:

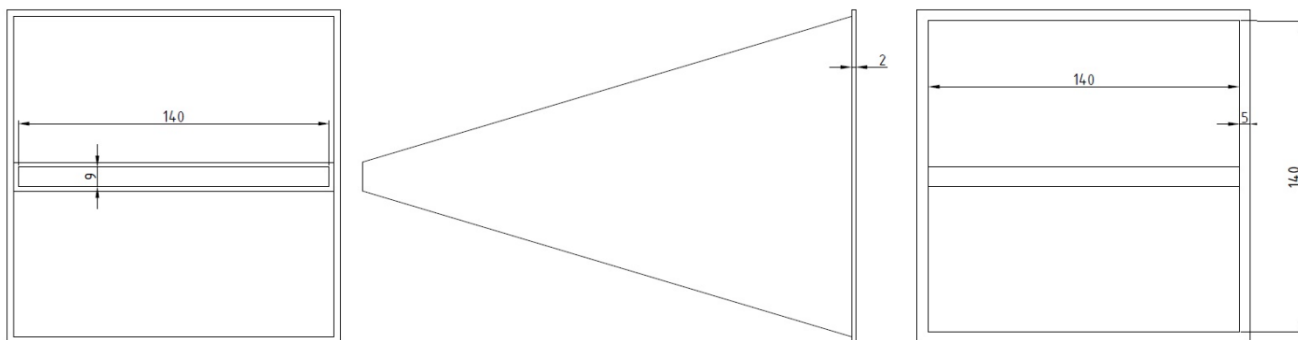
$0,35 \times 0,66 \times 0,49 \text{ m}$



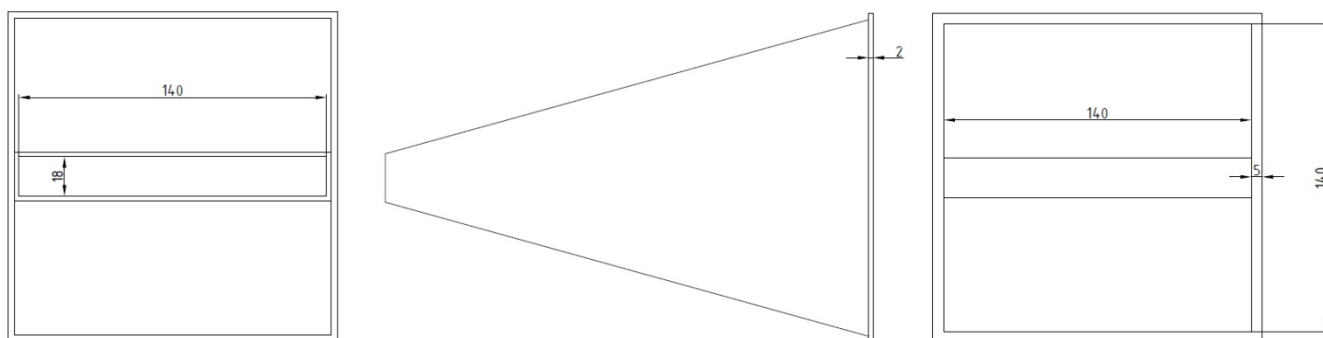
Slika 26. Plenum

Istrujni otvori

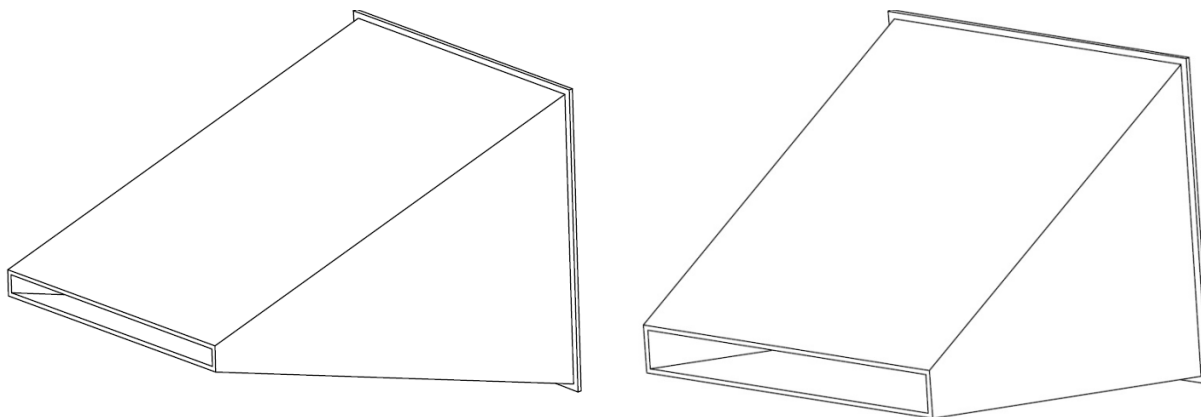
Dimenzije istrujnih otvora:

I. $l \times b = 140 \times 9 \text{ mm}$ II. $l \times b = 140 \times 18 \text{ mm}$ 

Slika 17. Prikaz istrujnog otvora dimenzija 140 x 9 mm u tri projekcije.



Slika 18. Prikaz istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm u tri projekcije.



Slika 19. Izometrijski prikaz istrujnih otvora. Prvi s lijeva je istrujni otvor dimenzija 140 x 9 mm, dok je drugi istrujni otvor dimenzija 140 x 18 mm.

2.2.3 Regulaijski elementi

Regulirane veličine su:

- istrujna brzina
- temperatura zraka.

Istrujna brzina regulira se promjenom napona na zakretnom transformatoru preko kojeg se napaja ventilator. Temperatura zraka se regulira promjenom napona na drugom zakretnom transformatoru, preko kojeg se napaja električni grijač.

Regulacijski elementi su:

Transformator ventilatora

Proizvođač: Iskra elektronika
 Tip: TRN 30 St 388
 Reg. 380 V; 4A
 Primar: 380 V; 50 Hz
 Sekundar: 450 V_{max}, 4 A_{max}

Transformator grijača

Regulacioni transformator „Iskra“
 380 U/15 A

3.3 Ostala mjerna oprema

Termografska kamera

Naziv:	FLIR ThermaCAM SC2000
Točnost:	± 2%
Osjetljivost:	< 0,08 °C kod 30°C
Vidno polje:	24° x 18°/0,5 m
Detektor:	FPA 320 x 240 piksela (nehlađeni bolometar)
Područje osjetljivosti:	7,5 – 13 μm
Video izlaz:	VH
Monitor:	Kolor LCD
PC kartica:	tip II ili tip III
Spremanje slike:	U realnom vremenu, 14 bitni digitalni zapis
Baterije:	AKU Nikal – metal hibrid
Dimenzije:	209 x 122 x 130 mm
Masa:	2,43 kg
Video kamera:	640 x 480 piksela

Temperaturna mjerna područja: - 40 °C – 120 °C, 0 °C – 500 °C, 350 °C – 1500 °C

Voltmetar

Proizvođač: AVO Tip: metar8520A

Anemometar sa žarnom niti

Mjerna jedinica: m/s
Raspon brzina: 0 – 20 m/s
Integracijska konstanta: $t_c = 10$
Nultna vrijednost: 0
Raspon: 1

Univerzalni multifunkcijski instrument za mjerenje brzine, temperature i tlaka

Proizvođač: Solomat France
Tip: S.A. 9/760 France

Agilent A/D – pretvarač ulaznog analognog signala u digitalni

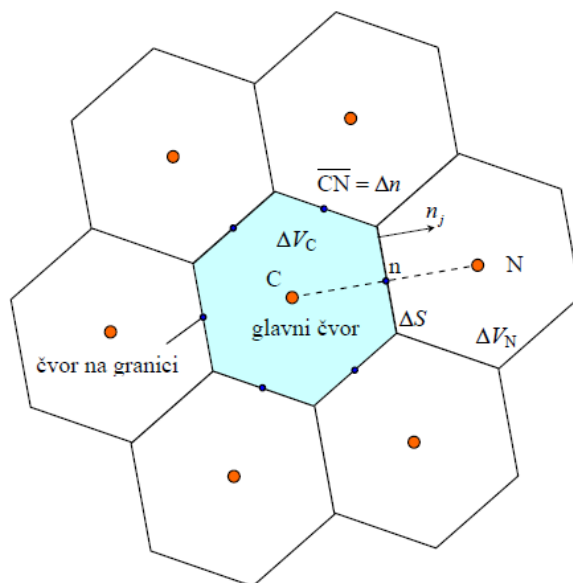
Termoparovima se mjere temperature uzduž mlaza, te se preko Agilet-a ispisuju na računalu u obliku dijagrama u ovisnosti o vremenu.

2.3. Numerička simulacija strujanja mlaza

Diskretizacijom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u metodi konačnih volumena dobivaju se sustavi koji se sastoje od velikog broja algebarskih jednadžbi s malim brojem nepoznatih varijabli u svakoj od njih (rijetka matrica koeficijenata sustava). Za rješavanje tih jednadžbi koriste se iterativne metode. Iterativne metode kreću s nekom početnom pretpostavkom rješenja koju kontinuirano poboljšavaju. Ovaj postupak završava kad se dostigne kriterij konvergencije, odnosno kad se trenutna aproksimacija rješenja dovoljno približi pravom rješenju sustava. Metoda konačnih volumena je integralna metoda koja se temelji na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednadžbi

$$(54) \quad \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j \varphi}{\partial x_j} - \Gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = S_\varphi$$

po konačnim volumenima (slika 30) na koje je podijeljeno područje proračuna.



Slika 30. Dio diskretiziranog područja proračuna prema [14]

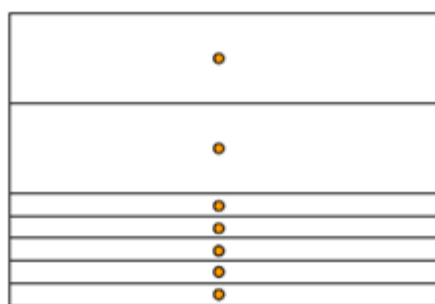
Kontrolni volumen koji predstavlja područje strujanja u kojem se traži rješenje se dijeli u veliki broj konačnih volumena koji ga potpuno ispunjavaju i međusobno se ne preklapaju. U svakom konačnom volumenu se nalazi čvor u kojem se računaju sve varijable. Konačni volumeni i čvorovi tvore mrežu konačnih volumena (geometrijsku mrežu) [14]. Računalna mreža konačnih volumena se formira na jedan od dva osnovna načina. Prvi način, koji je korišten u radu, podrazumijeva podjelu područja u kojem se traži rješenje na veliki broj konačnih volumena i postavljanje čvorova u centre tih

konačnih volumena. Drugi način podrazumijeva postavljanje čvorova i formiranje konačnih volumena oko njih (nestructurirana mreža).

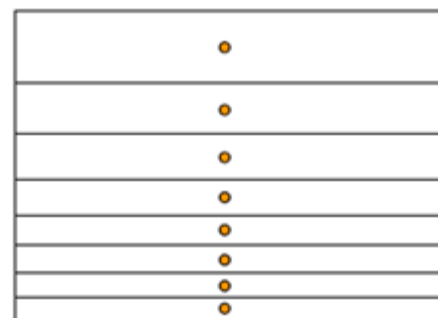
Geometrijska mreža treba omogućiti što precizniji opis ruba područja u kojem se traži rješenje i kontrolu gustoće rasporeda čvorova po rubu i u različitim dijelovima tog područja. To se prvenstveno odnosi na mogućnost zadavanja različitog načina raspoređivanja rubnih čvorova i propisivanja njihove gustoće uz ravnomjernu promjenu udaljenosti među susjednim rubnim čvorovima.

Temeljem opisa metode konačnih volumena, može se reći da bi idealna geometrijska mreža trebala imati sljedeća svojstva:

1. Čvorovi bi trebali biti u težištu konačnih volumena za potrebe što točnije aproksimacije volumenskih integrala.
2. Spojnica čvorova treba probadati stranicu konačnog volumena u njenom težištu, za potrebe što točnije aproksimacije površinskih integrala.
3. Težište stranice bi trebalo biti na polovištu spojnice susjednih čvorova, za potrebe što točnije interpolacije.
4. Spojnica čvorova bi trebala biti okomita na stranicu konačnog volumena, jer se tada difuzijski protok može modelirati bez potrebe za interpolacijom gradijenata iz centralnih čvorova na stranicu konačnog volumena.
5. Posebno, prvi čvor do granice područja proračuna treba ležati na okomici na granicu povučeno iz težišta rubne stranice, zbog točnije ugradnje rubnih uvjeta.
6. Naravno da sve ove uvjete zadovoljavaju samo mreže sastavljene iz elemenata pravilnog oblika (npr. kvadrati u 2D ili kocke 3D).



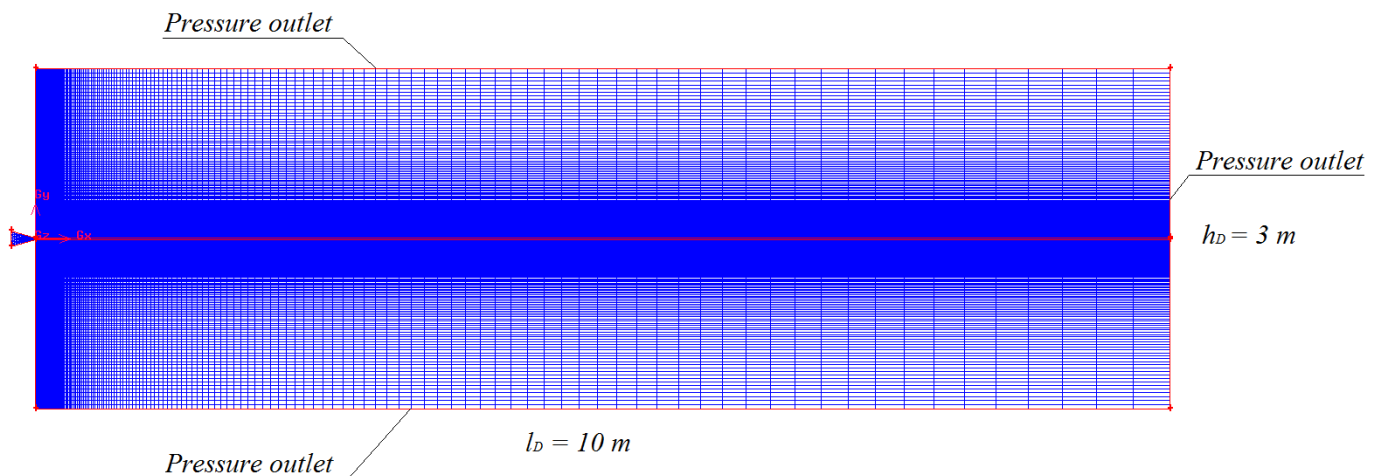
Izbjegavati: nagla promjena dimenzija volumena



Ispravno: kontinuirana promjena dimenzija volumena

Slika 31. Poželjna diskretizacija [14].

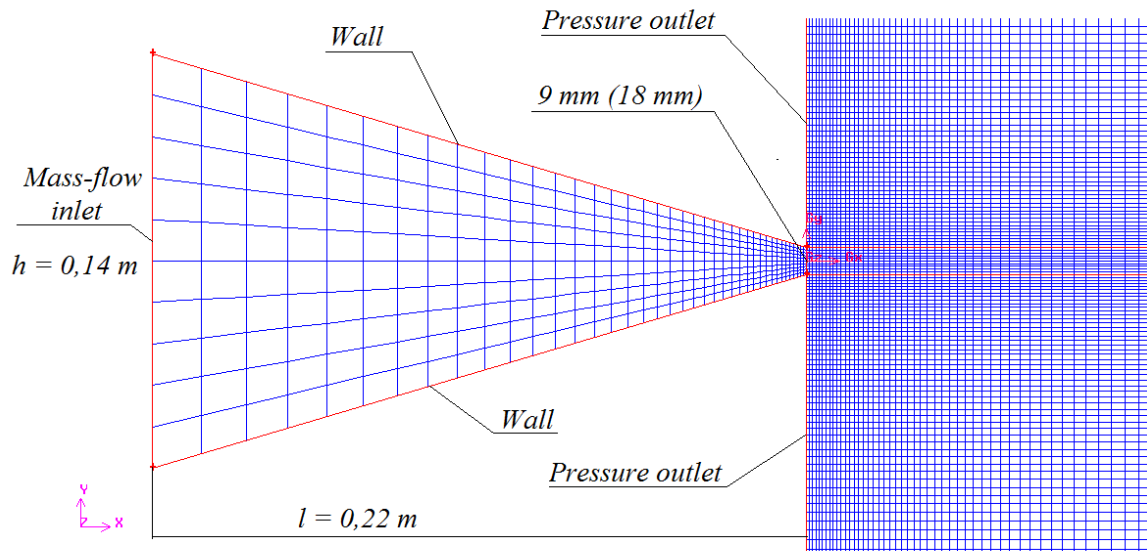
U radu je primjenjena dvodimenzionalna domena (slika 32) generirana u pretprocesoru GAMBIT. Domena je duljine 10 m i visine 3 m u svrhu dobivanja fizikalnih rješenja na interesnom području. S lijeve strane domene vidljiv je istrujni otvor dimenzija: 0,22 m duljine (slika 27. i 28.), s visinom stranice 0,14 m na rubu domene, te otvorom prema prostoru visine 9 mm, odnosno 18 mm ovisno o ispitivanom otvoru. Za istrujni otvor sa stranicom visine 9 mm generirana je mreža sa 54650 ćelija, a za istrujni otvor sa stranicom visine 18 mm generirana je mreža sa 55940 ćelija.



Slika 32. Diskretizacija modela. Nazivlje rubnih uvjeta prema predprocesoru.

Ishodište je položeno na središtu istrujnog otvora kao što je vidljivo iz slike 32. Uz sam istrujni otvor zadana je gušća mreža u svrhu dobivanja točnijih rezultata. Promatrajući domenu s lijeva na desno, te sa simetrale gornju i donju stranicu, uočavamo povećanje veličine kontrolnih volumena. Takva gradacija izrađena je s ciljem minimizacije broja kontrolnih volumena na područjima koja nisu interesantna za proračun. Na taj način bitno skraćujemo vrijeme rješavanja problema. Na slici 33. uočavamo da je i istrujni otvor diskretiziran na način da je najveća gustoća mreže na samom izlazu.

U predprocesoru su također zadani rubni uvjeti (slika 33.). S fizikalnog stajališta [14] primjenjeni su rubni uvjeti: *ulazna granica*, *izlazna granica* i *nepropusna stijenka*. Na ulazu je zadan maseni protok fluida (*mass flow inlet*) na izračunat koristeći izlaznu brzinu iz eksperimenta. Također, zadana je konstantna temperatura fluida na ulaznom bridu, odnosno Dirichletov rubni uvjet (rubni uvjet prve vrste). Iznos temperature na ulaznoj granici određen je eksperimentom. Izlazna granica, odnosno rub kroz koji fluid napušta područje proračuna definirano je rubnim uvjetom *pressure outlet*. Kao nepropusna stijenka kroz koju nema protoka fluida (*wall*), definirane su stijenske istrujnog otvora.



Slika 33. Diskretizacija uz istrujni otvor. Nazivlje rubnih uvjeta prema predprocesoru.

Procesor, program koji numerički rješava željeni matematički model sa zadanim rubnim uvjetima, koji je korišten u radu jest FLUENT 12.0.6. U procesoru problem je definiran kao dvodimenzionalno, stacionarno, ravninsko strujanje. Pošto je riječ o neizoternom mlazu, tako je aktivirana energetska jednadžba koja u sebi sadrži temperaturu fluida. Ovdje valja istaknuti značaj *modela turbulencije*.

Model turbulencije se definira kao skup jednadžbi (algebarskih ili diferencijalnih) koje određuju dodatne članove turbulentnog prijenosa u osrednjenim jednadžbama turbulentnog strujanja s ciljem zatvaranja sustava jednadžbi u matematičkom smislu. Modeli turbulencije ne opisuju detalje turbulentnog gibanja, nego samo efekte turbulencije na osrednjeno strujanje i obično sadrže empirijske konstante ili funkcije. Opći zahtjevi koji se postavljaju pred model turbulencije su univerzalnost, točnost, mogućnost ekonomičnog rješavanja i jednostavnost.

Model turbulencije koji su zastupljeni pri analizama u industriji i inženjerskim istraživanjima jesu modeli turbulencije sa dvije jednadžbe. Tu spadaju $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ model turbulencije. U radu je korišten *realizable* $k - \varepsilon$ model turbulencije odabran prema [21]. Uglavnom, $k - \varepsilon$ je model s dvije jednadžbe, što znači da uključuje dvije dodatne transportne jednadžbe za fizikalne veličine k i ε koje predstavljaju turbulentne karakteristike strujanja. Prva transportna varijabla je turbulentna kinetička energija k . Druga transportna varijabla je disipacija turbulentne kinetičke energije ε . Varijabla k determinira energiju turbulencije, dok varijabla ε determinira skalu turbulencije.

Realizable k – ε model turbulencije preporučljiv je zbog toga što:

- sadrži novu formulaciju turbulentne viskoznosti
- novu transportnu jednadžbu za disipaciju kinetičke energije turbulencije ε

Dobrobit *realizable k – ε* modela turbulencije je da efikasno simulira stupanj raspršenja kružnih i ravninskih mlazeva. Medij u simulaciji je zrak, s gustoćom zadanom u obliku polinoma:

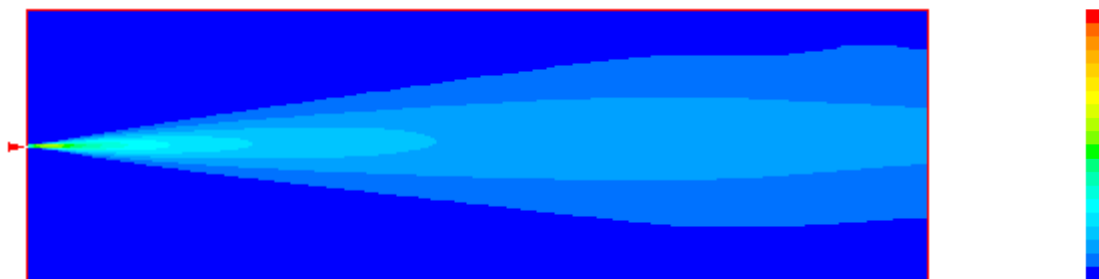
$$(55) \quad \rho(T) = 0,00005 \cdot T^2 - 0,004 \cdot T + 1,277$$

Intezitet turbulencije je bezdimenzijska veličina, te se definira kao omjer standardne devijacije određenog broja uzoraka inteziteta brzine zraka koji su uzeti u nekom vremenskom intervalu i aritmetičke sredine istih.

$$(56) \quad I_t = \frac{\sqrt{\overline{v_t'^2}}}{\overline{v_t}} = \frac{\sigma_v}{\overline{v_t}}$$

Intezitet turbulencije na ulazu fluida u domenu definiran je iskustvenom vrijednošću 5%, a na slobodnim rubovima sa 0,1% što predstavlja mirovanje fluida [22].

Za dobivanje polja brzine i polja tlaka odabran je SIMPLE algoritam. Algoritam SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) naziv je za algoritam koji iz jednadžbe kontinuiteta i jednadžbi količine gibanja dolazi do rješenja polja brzine i tlaka. U radu su zadržani preporučeni podrelaksacijski faktori 0,7 za brzinu i 0,3 za tlak. Faktori podrelaksacije služe tome da se tlak i brzine ne korigiraju odmah za cijelu vrijednost korekcije jer bi se u tom slučaju moglo dogoditi da postupak postane nestabilan. Podrelaksacija se koristi samo kod rješavanja stacionarnih problema. Postupak podrelaksacije pri rješavanju stacionarnog problema može se shvatiti kao pseudovremenska integracija, jer je uvođenje podrelaksacije ekvivalentno vremenskoj integraciji.



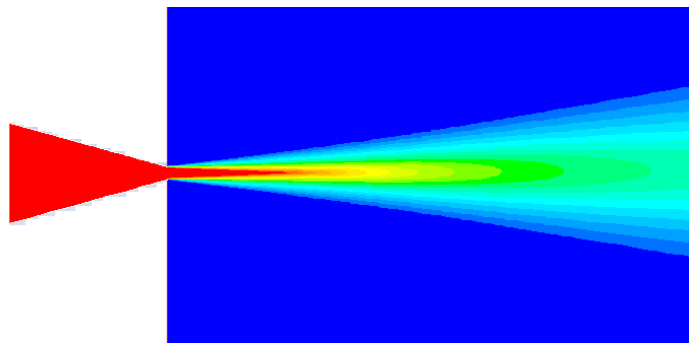
Slika 34. Temperaturne konture na izrađenoj domeni pri istrujnoj brzini 10,12 m/s, $\vartheta_p=25,8^\circ\text{C}$, $\vartheta_0=33,9^\circ\text{C}$

Točnost rezultata, za usvojeni matematički model, raste s povećanjem gustoće mreže i u pravilu s povećanjem reda točnosti numeričke sheme [11]. Iz tog razloga u radu je primjenjena linearno uzvodna shema (Second Order Upwind ili Linear Upwind Scheme). Linearno uzvodna shema je shema višeg reda i uzima u obzir veći broj računalnih točaka pa stoga daje točnije rezultate. S druge strane vrijeme rješavanja s linearno uzvodnom shemom je dulje.

Ukupno je izvršeno po 7 simulacija (slika 34, 35) po istrujnom otvoru što je ukupno 14 simulacija. U svakoj simulaciji provedeno je minimalno 10000 iteracija. Tako je primjerice u 11205-toj iteraciji (istrujni otvor dimenzija 140x18, pri 10,12 m/s) vrijednosti reziduala padale su na vrijednosti:

- 10^{-4} – jednažba kontinuiteta
- 10^{-6} – komponenta brzine u smjeru osi x
- 10^{-6} – komponenta brzine u smjeru osi y
- 10^{-8} – energetska jednažba
- 10^{-6} – kinetička energija turbulencije k
- 10^{-7} – disipacija kinetičke energije turbulencije ε

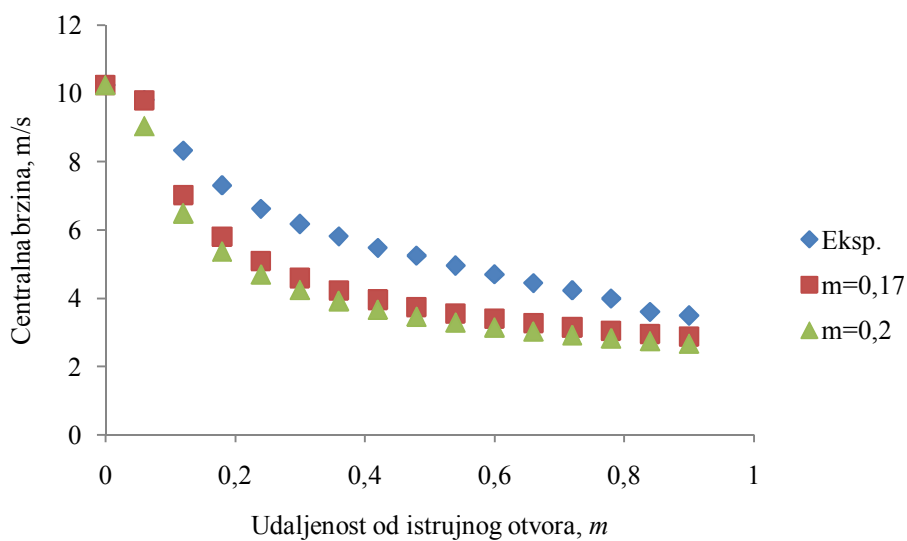
Diskusija dobivenih rješenja obrazložena je u slijedećem poglavlju.



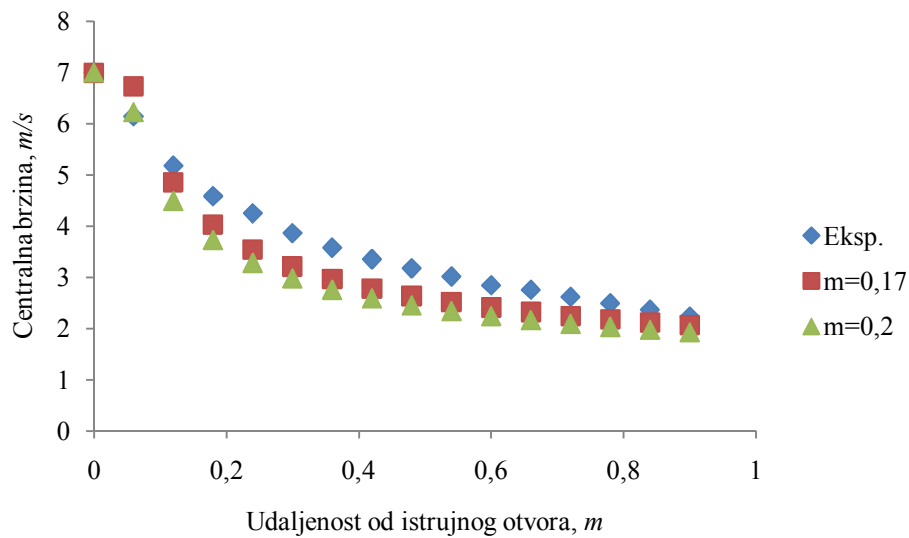
Slika 35. Prikaz konture jezgre mlaza pri parametrima sa prethodne slike.

3. DISKUSIJA REZULTATA

Teorijski proračun (poglavlje 2) kao varijablu sadrži faktor m , odnosno stupanj miješanja (engl. *mixing number* [12]). Za pravokutne istrujne otvore poprima vrijednosti od 0,17 do 0,2 [7]. Istraživanje na istrujnom otvoru dimenzija 140 x 9 mm pokazalo je kako su pri brzinama većim od 6 m/s najtočniji rezultati dobiveni uz vrijednost stupnja miješanja 0,17 što upućuje na veću duljinu jezgre.

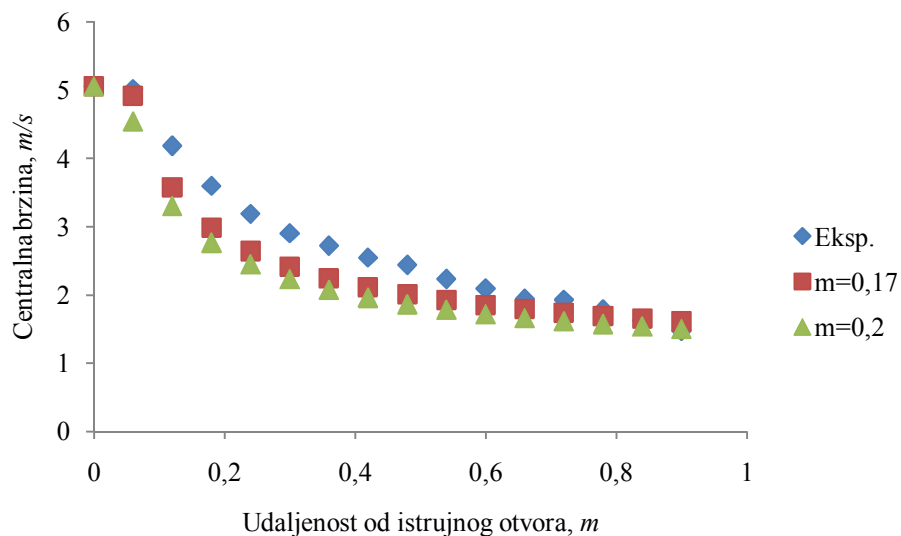


Slika 36. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 10 m/s.

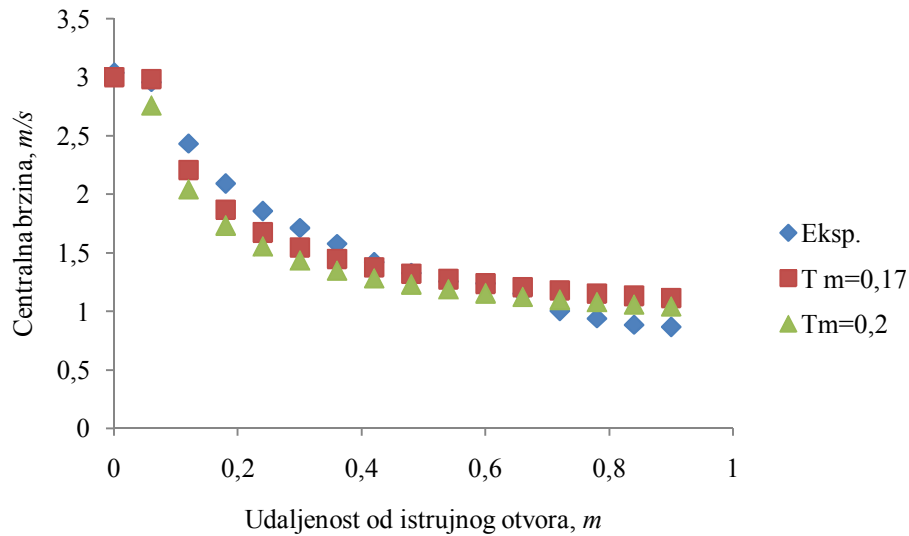


Slika 37. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 7 m/s.

Nadalje, pri brzinama od 5 m/s i nižim (slika 38) uočava se da se pri udaljenostima višim od nekih 0,78 m eksperimentalni podaci bolje slažu s proračunatim uz stupanj mješanja 0,2, odnosno kraću duljinu jezgre mlaza za iste ostale uvjete (temperature zraka u prostoru i temperature istrujavanog zraka).



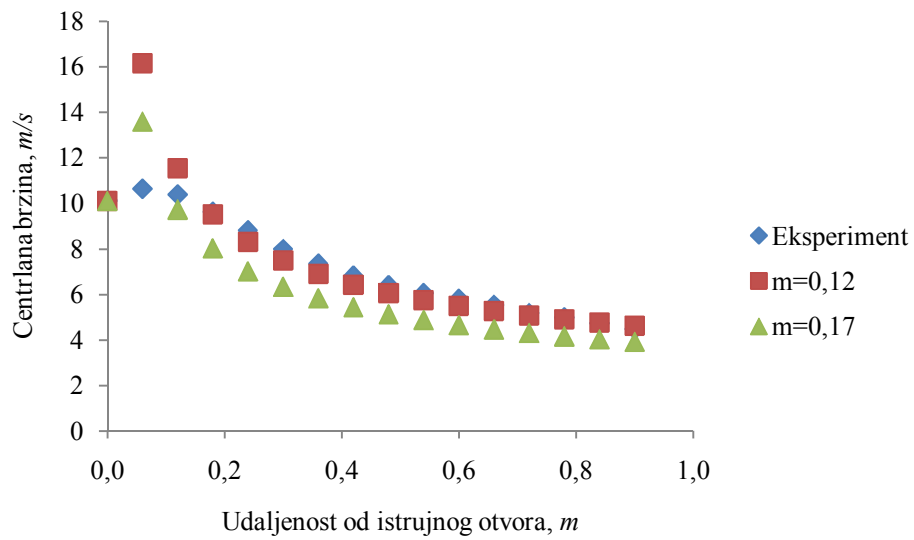
Slika 38. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 5 m/s.



Slika 39. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 3 m/s.

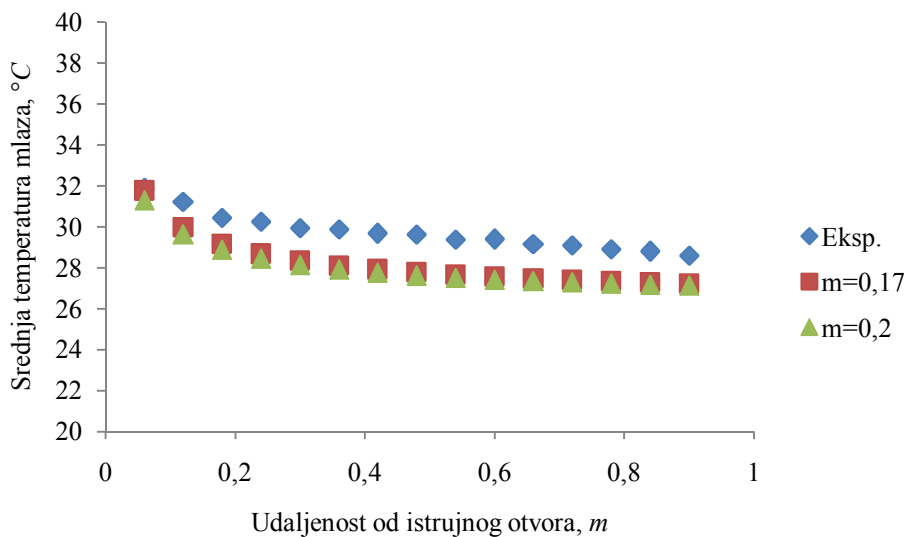
Iz priloženih dijagrama (slike 36, 37, 38 i 39) zaključuje se da je potrebno pri višim istrujnim brzinama računati sa nižim vrijednostima stupnja miješanja m . Niže vrijednosti stupnja miješanja m upućuju na veću duljinu jezgre mlaza.

Bolje poklapanje teorijskih i eksperimentalnih rješenja vidljivo je na sljedećoj slici (slika 40) uvažavajući pritom udaljenosti od 0,2 m od istrujnog otvora, i veće. Kako je zona boravka definirana na udaljenosti od 0,5 m od zida i 1 m od zida s toplinskim izvorom ili ponorom (prozor, vrata, radiator), tako su područja od 0,2 m na više, mnogo interesantnija.



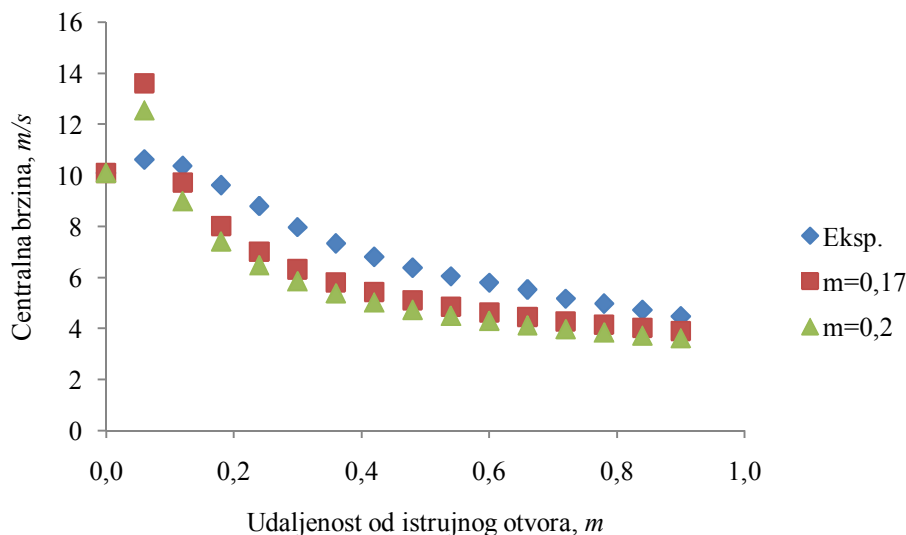
Slika 40. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 10 m/s.

Teorijska temperaturna raspodjela neznatno je bliža eksperimentalnoj uz niže vrijednosti stupnja miješanja, što je vidljivo iz slike slika 41.

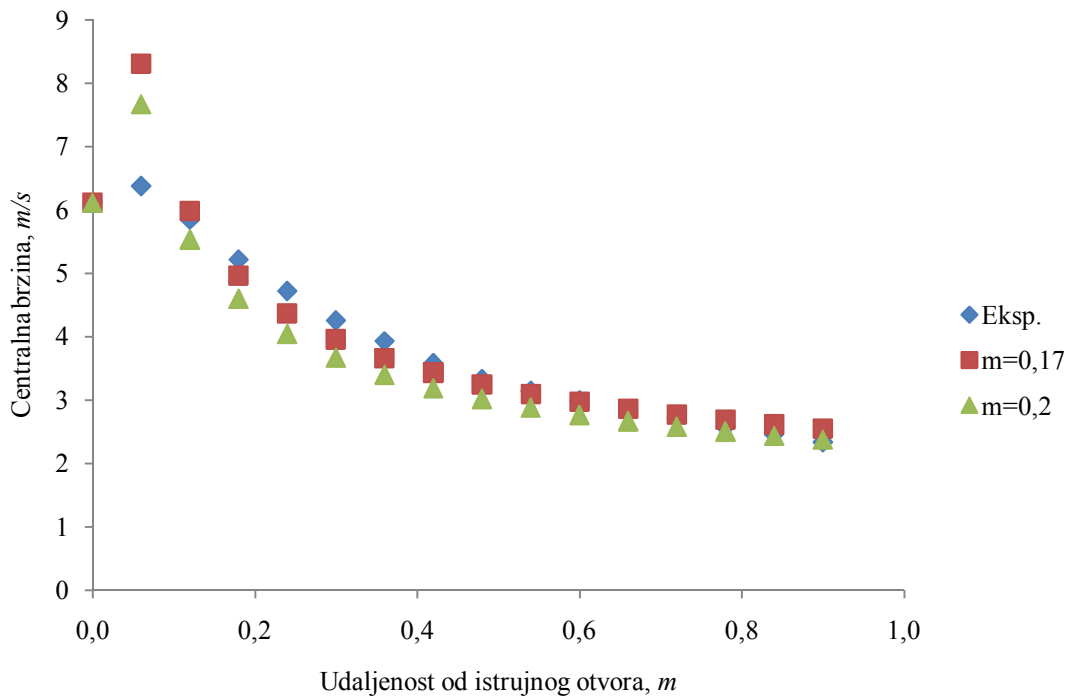


Slika 41. Opadanje temperature mlaza uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 6 m/s.

Drugi istrujni otvor, dimenzija 140 x 18 mm, pokazuje slične pojavnosti.



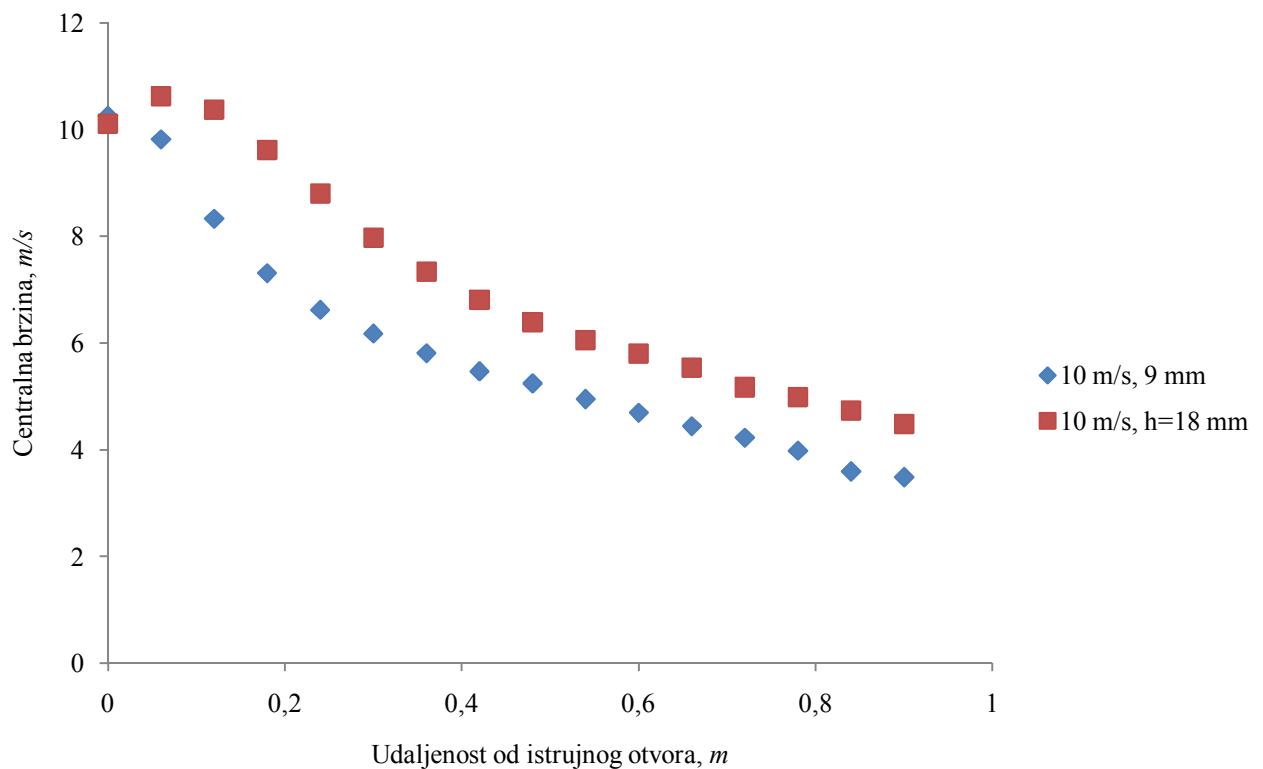
Slika 42. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 10 m/s na istrujnom otvoru dimenzija 140 x 18 mm.



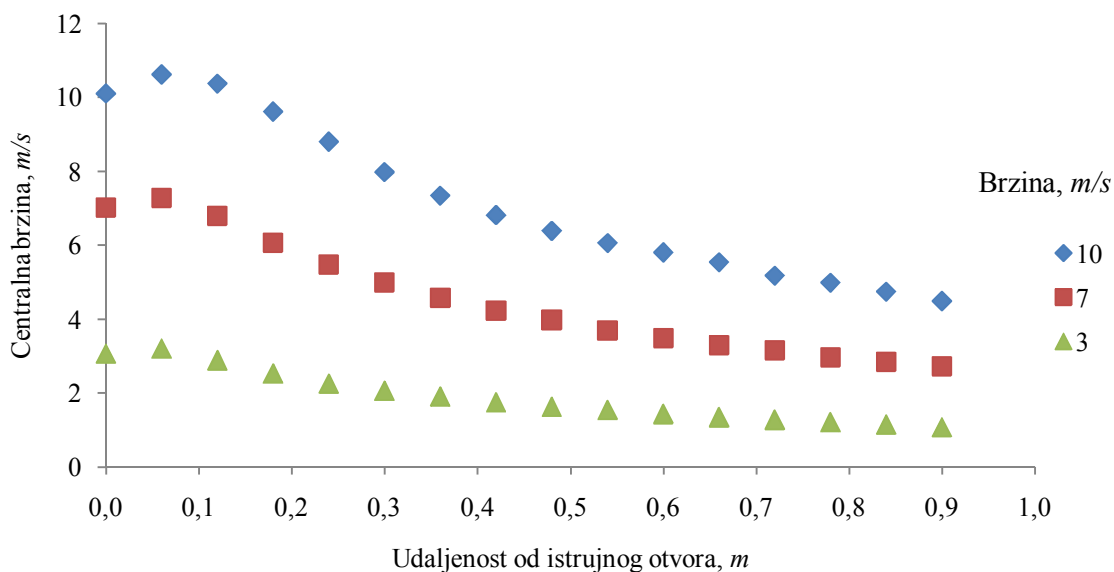
Slika 43. Opadanje centralne brzine uz dvije različite duljine jezgre u odnosu na eksperiment. Podaci za istrujnu brzinu 6 m/s na istrujnom otvoru dimenzija 140 x 18 mm.

Kao i kod prethodnog istrujnog otvora, tako se i ovdje uočava da pri brzini 6 m/s po prvi puta dolazi do boljeg poklapanja teorijskih i eksperimentalnih vrijednosti uz manju duljinu jezgre (slika 43.), odnosno stupanj mješanja 0,2. Razlika je što u ovom slučaju se poklapanje događa na nešto većoj udaljenosti.

Uočava se maksimum srednje centralne brzine na udaljenostima do 0,2 m od istrujnog otvora. Ispupčenje potvrđuje prisutnost *vene contracte*. Otvor s oštrim rubovima je poznat kao uvjet za generiranje maksimalne srednje centralne brzine mlaza nedaleko nakon istrujavanja iz mlaznice, kao što je vidljivo iz priloženih teoretskih, eksperimentalnih i numeričkih razmatranja. Numeričko rješenje daje najviše vrijednosti maksimalne centralne brzine, ali zbog toga ima i veće opadanje centralne brzine udaljavajući se od ekstrema. Spomenuti je ekstrem funkcija omjera dimenzija širine i visine otvora. Što je omjer stranica veći, to je ekstrem niži (slika 44). Tako za otvor dimenzija 140 x 9 mm ekstrem eksperimentalno gotovo da i nije zabilježen, dok je kod otvora dimenzija 140 x 18 mm ekstrem mnogo izraženiji.

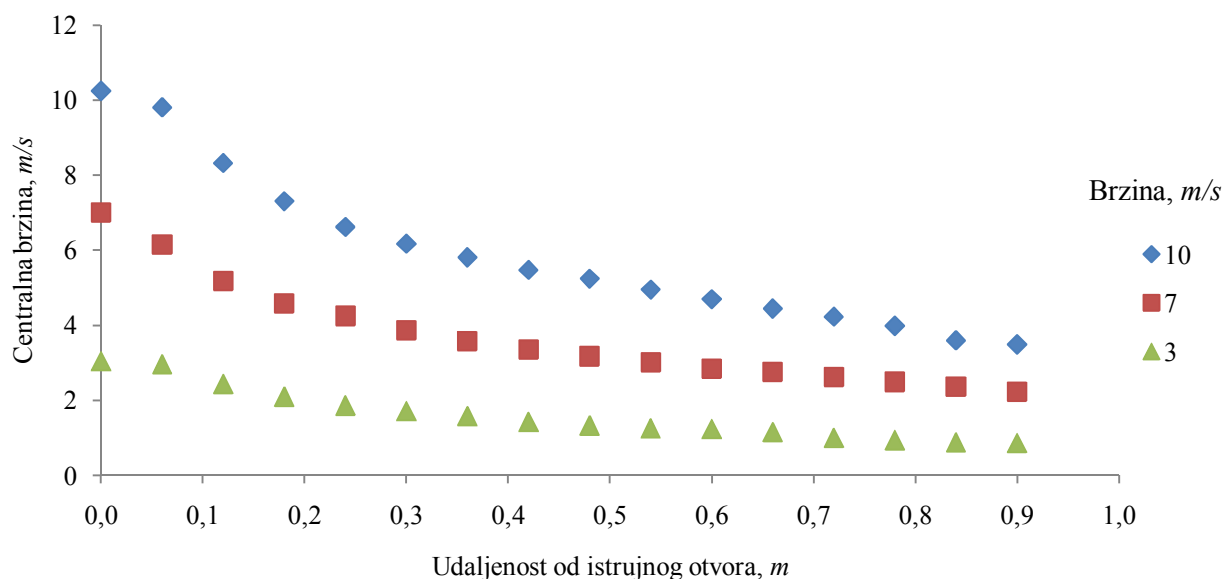


Slika 44. Uočavamo da manji omjer stranica daje veću maksimalnu prosječnu centralnu brzinu.



Slika 45. Prikaz utjecaja brzine istrujavanja na tendenciju opadanja prosječne centralne brzine prema eksperimentalnim podacima za istrujni otvor 140x18 mm.

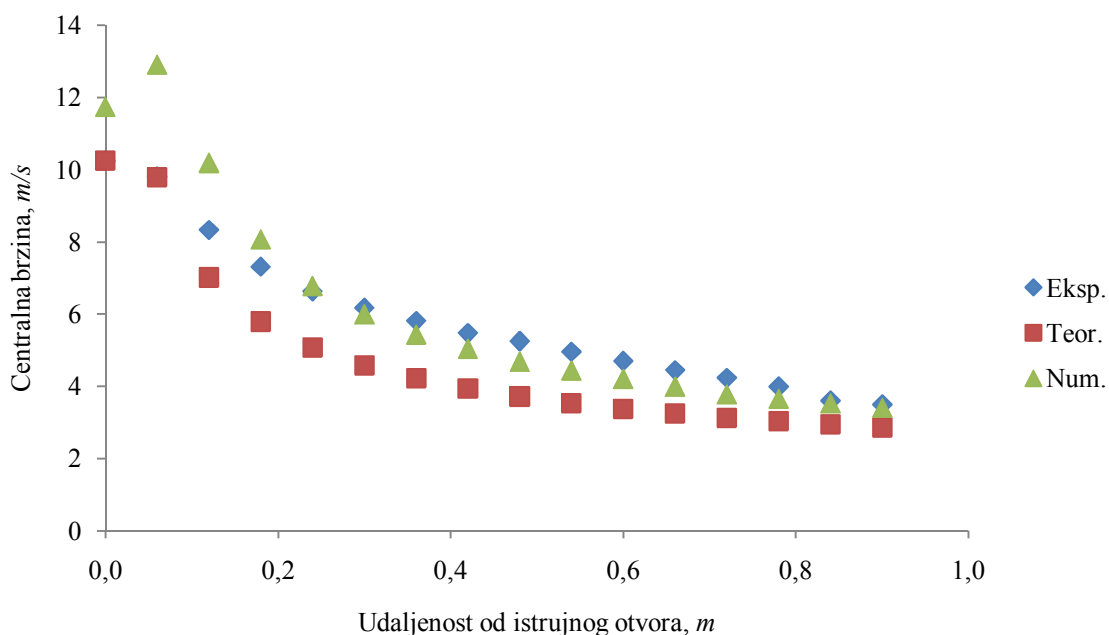
Niža istrujna brzina uzrokuje veće raspršenje mlaza na područjima uz istrujni otvor što dovodi do intezivnijeg opadanja centralne brzine (slika 45). Tako se pri istrujnoj brzini 3 m/s na udaljenosti 0,9 m vidi pad brzine za 64,8%, dok pri istrujavanju mlaza brzinom 10 m/s na istoj udaljenosti brzina padne za 55,6%. Dakle, ukoliko mlaz ulazi u prostor s većom istrujnom brzinom to je manje raspršenje mlaza na udaljenostima do 0,9 m.



Slika 46. Smanjenje brzine kod istrujavanja iz istrujnog otvora dimenzija 140x9 mm.

Uočava se na slici 46. da se povećanjem omjera širine i visine stranica otvora (u ovom slučaju smanjenje visine otvora za istu širinu) povećava i smanjenje brzine. Tako uočavamo da ono sada iznosi 71,4% pri istrujavanju mlaza sa 3 m/s, te 65,9% uz istrujnu brzinu 10 m/s.

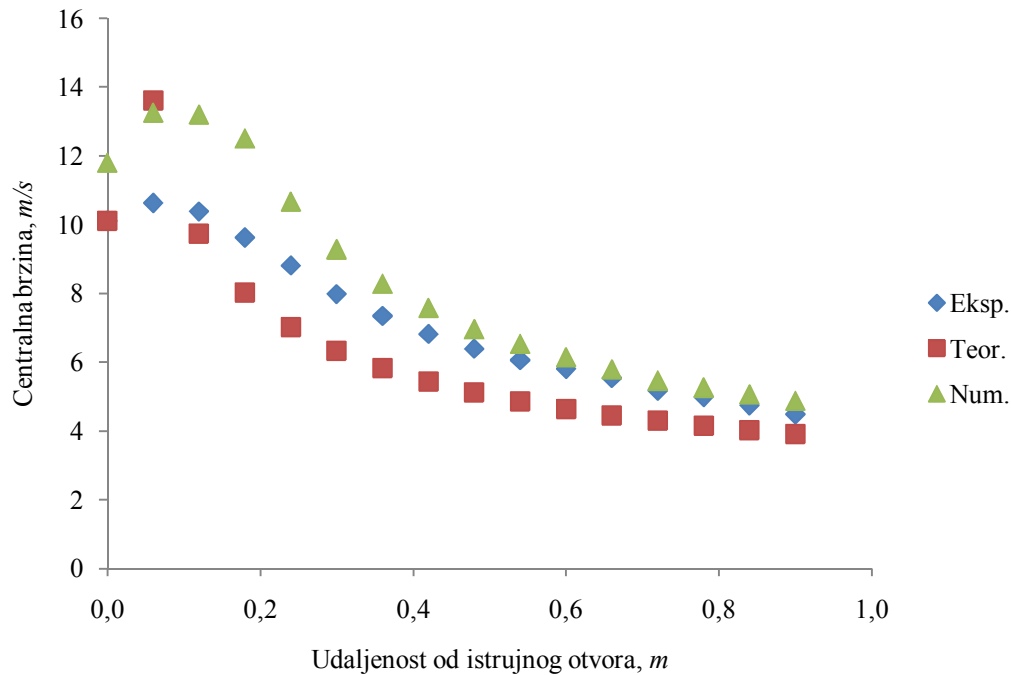
Na slijedećoj slici (slika 47) je vidljiva usporedba eksperimentalnih, teorijskih i numeričkih vrijednosti brzina za istrujni otvor dimenzija 140 x 9 mm. Centralna brzina mlaza opada udaljavanjem od istrujnog otvora.



Slika 47. Opadanje centralne brzine mlaza uslijed istrujavanja brzinom 10 m/s kod istrujnog otvora dimenzija 140 x 9 mm za tri ispitne metode.

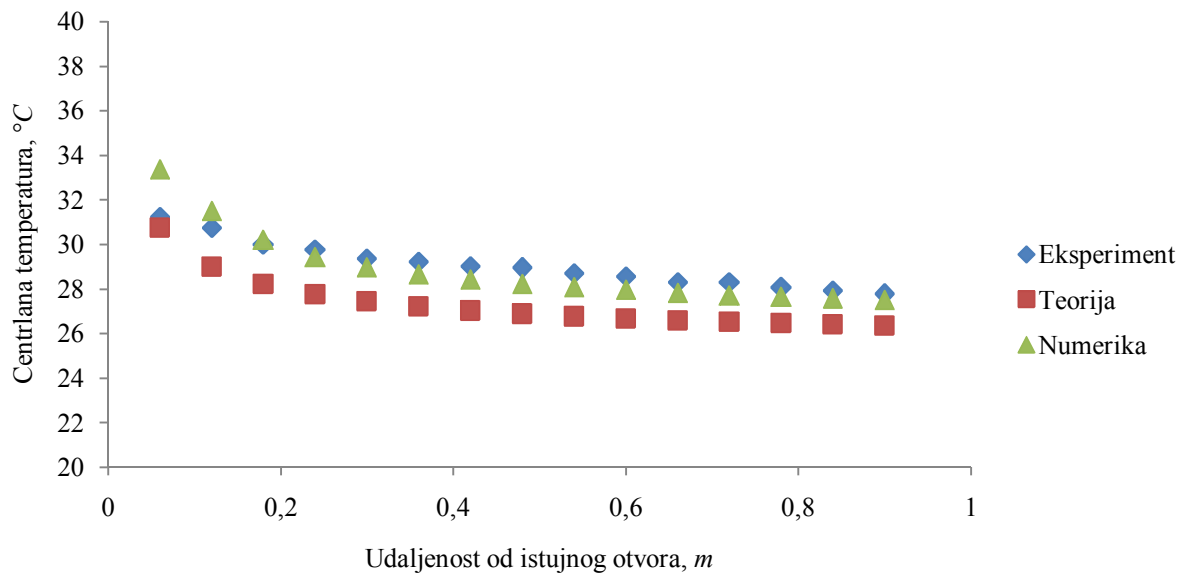
Dobiveno teorijsko opadanje centralne brzine, uvažavajući pritom iste uvjete kao i u eksperimentu, pokazuje slaganje vrijednosti u prvoj mjernoj točki nakon čega je zabilježena niža brzina u odnosu na eksperiment u rasponu 16 – 28%. Valja uočiti da se nakon udaljenosti od 0,6 m, teorijski rezultati počinju približavati eksperimentalnima tako da je u zadnjoj mjernoj točki vrijednost centralne brzine niža za 18% od eksperimentalne. Numeričko rješenje zbog izraženije prisutnosti vena contracta-e kod dvodimenzionalnog modela daje ekstrem koji rezultira 31% višom vrijednošću brzine. Daljnjim razvojem mlaza, mješanjem istrujavanog zraka sa okolišnjim uslijed jakog vrtložnog strujanja, bilježi se dobro poklapanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata sa bitno nižim odstupanjima (2 – 11%) koja u zadnjoj točki iznose svega 2,5%. Valja napomenuti da povećanjem utjecaja uzgonskih sila pri brzinama od 3 m/s i nižim, numeričko rješenje pokazuje veća odstupanja od teorije kod istrujnog otvora sa visinom stranice 9 mm.

Slično ponašanje pokazuje i mlaz istrujavan iz otvora dimenzija 140 x 18 mm (slika 48.) uz napomenu da su sada numeričke vrijednosti nešto više od eksperimentalnih, ali i dalje se veoma dobro poklapaju s eksperimentalnim na udaljenostima većim od 0,6 m uz odstupanja koja se kreću oko 5%. Teorijski rezultata bilježe odstupanja u rasponu 12 – 20% na udaljenostima većim od 0,6 m.



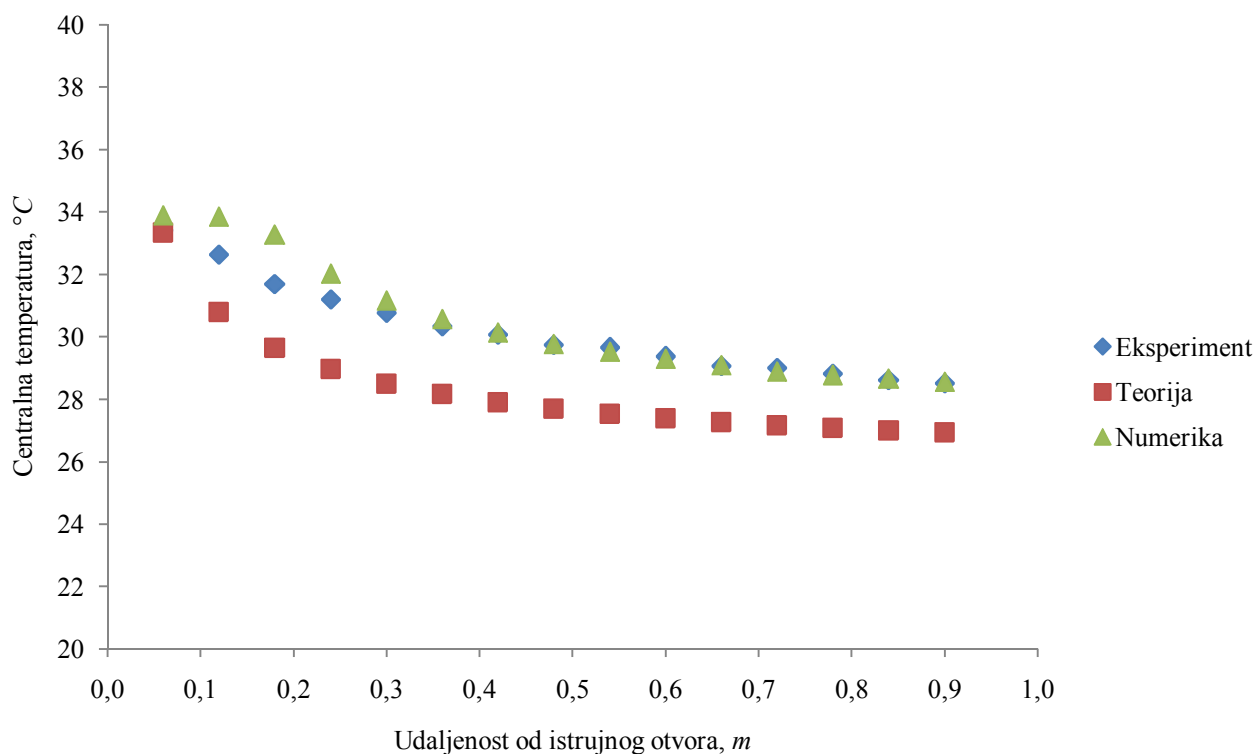
Slika 48. Opadanje centralne brzine mlaza uslijed istrujavanja brzinom 10 m/s kod istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm za tri ispitne metode.

Teorijske vrijednosti temperatura pokazuju odstupanja koja se kreću od 5 – 7% gdje su niža odstupanja pri većim udaljenostima od otvora dimenzija 140 x 9 mm. Numeričke vrijednosti bilježe odstupanja 1,5 – 2,5% gdje su bolja poklapanja na većim udaljenostima od istrujnog otvora da bi u zadnjoj mjernoj točki odstupanje imalo vrijednost 1% (slika 49).



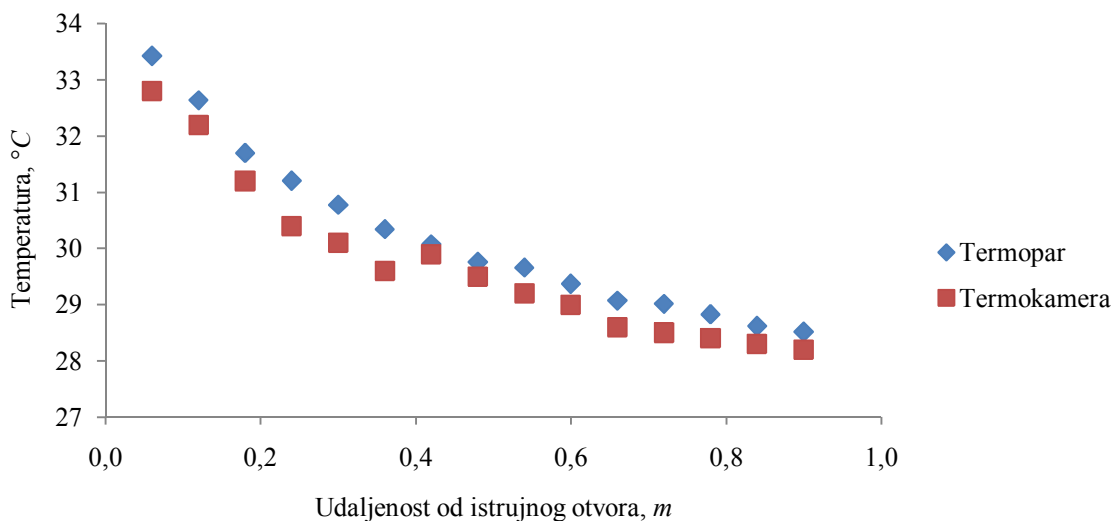
Slika 49. Opadanje temperature mlaza uslijed istrujavanja brzinom 10 m/s kod istrujnog otvora dimenzija 140 x 9 mm za tri ispitne metode.

Teorijska rješenja temperaturne raspodjele istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm pokazuju odstupanja od eksperimenta ne veća od 7,4% koliko iznosi odstupanje na 0,3 m od istrujnog otvora. Većim prodiranjem mlaza u prostor, vrijednosti temperatura imaju sve manja odstupanja od eksperimentalnih što u zadnjoj mjernoj točki iznosi 5,5%. Numeričko rješenje daje zadovoljavajuće poklapanje, tako da neposredno uz otvor maksimalno odstupanje iznosi 5% dok udaljavanjem od istrujnog otvora odstupanja ne prelaze 0,7% (slika 50.).



Slika 50. Opadanje temperature mlaza uslijed istrujavanja brzinom 10 m/s kod istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm za tri ispitne metode.

Temperature dobivene termokamerom se zadovoljavajuće poklapaju sa temperaturama izmjerenim termoparovima. Najveća odstupanja zabilježena su na rubovima područja mjerenja.



Slika 51. Usporedba temperatura dobivenih mjerenjem termokamerom sa temperaturama mjerenim termoparovima.

Odstupanja na rubovima i sredini termografskog platna je posljedica snimanja termografskog platna s dvije snimke. Uslijed snimanja platna sa dvije snimke, bio je kut otklona simetrale termografske kamere najveći prema rubovima snimke. To je uzrokovalo odstupanja termografskih rezultata sa rezultatima dobivenim termoparovima.

Najveće odstupanje rezultata termografskog ispitivanja zabilježeno je kod istrujne brzine 5 m/s u mjernoj točki koja se nalazi na 0,24 m od istrujnog otvora. Ostala odstupanja dana su u tablici 3.

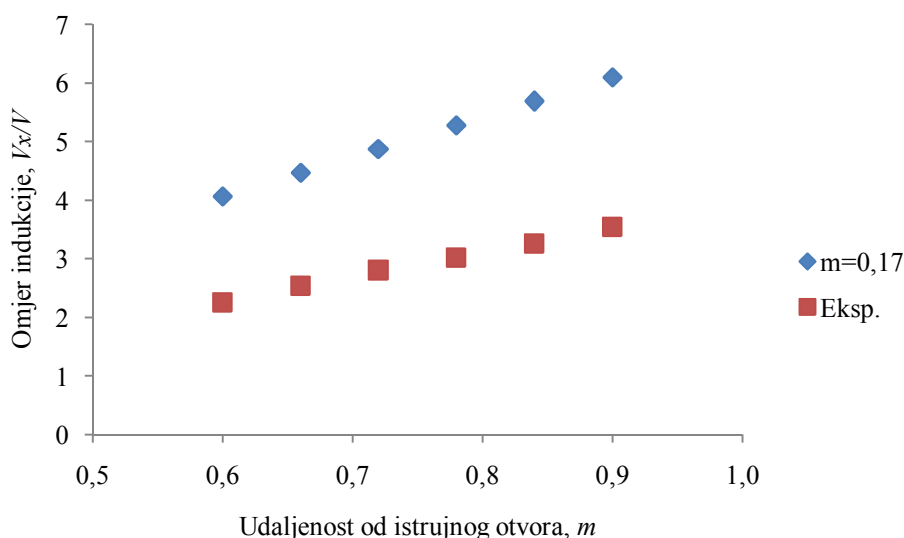
Tablica 3. Točke sa maksimalnim odstupanjima termografskog ispitivanja

Istrujna brzina, <i>m/s</i>	Udaljenost od istrujnog otvora, <i>m</i>	Odstupanje, %
3,07	0,54	3,61
4,01	0,36	3,44
5,02	0,24	5,42
6,12	0,06	4,66
7,03	0,24	4,63
8,08	0,06	5,40
9,01	0,06	1,57
10,12	0,24	2,59

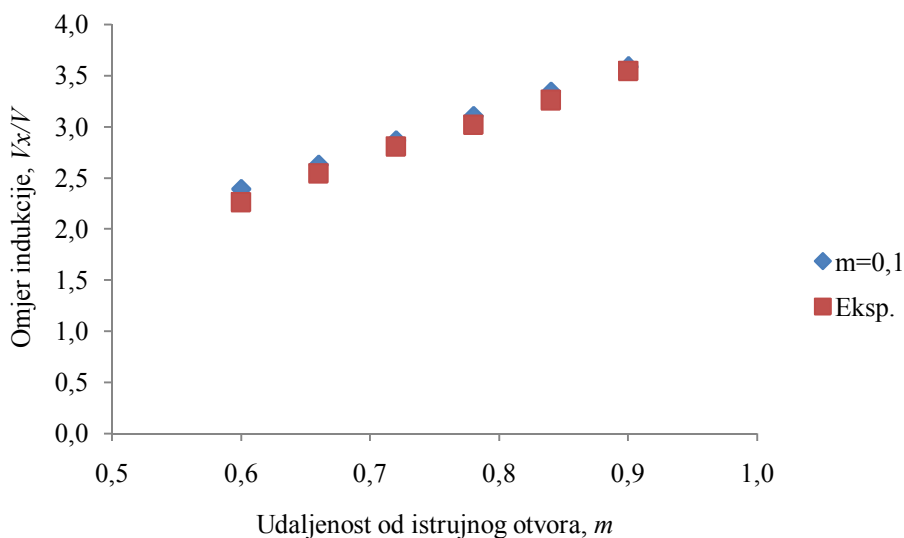
Na osnovu provedenih termografskih istraživanja istrujnog otvora dimenzija 140 x 18 mm u Prilogu C dane su funkcijske veze polja brzina u ovisnosti od polja temperatura.

Povećavanje omjera indukcije udaljavanjem od istrujnog otvora posljedica je raspršenja mlaza uslijed izmjene količine gibanja sa okolnim fluidom [25]. Napredovanjem strujanja, zona miješanja se širi. Širenjem zone miješanja brzina u simetrali mlaza opada, a intezitet turbulencije raste [25].

Kao i kod brzina, tako i kod indukcije, zabilježno je bolje preklapanje teorijskih i eksperimentalnih rezultata računajući s većom jezgrom odnosno manjom turbulencijom. Pritom su promatrana područja od 0,6 – 0,9 m koja su interesantna sa stajališta uvjeta u zoni boravka.



Slika 52. Usporedba teorijskog i eksperimentalnog omjera indukcije prilikom proračuna sa stupnjem miješanja 0,17 pri istrujnoj brzini 10,12 m/s na istrujnom otvoru dimenzija 140 x 18 mm.



Slika 53. Usporedba teorijskog i eksperimentalnog omjera indukcije prilikom proračuna sa stupnjem miješanja 0,1 pri istrujnoj brzini 10,12 m/s na istrujnom otvoru dimenzija 140 x 18 mm.

4. ZAKLJUČAK

Opisanim istraživanjima, provedenim u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, ispitane su dvije vrste istrujnih otvora, pri osam različitih brzina istrujavanja. Zadane brzine istrujavanja odgovaraju onim brzinama kakve se koriste u realnim sustavima grijanja, hlađenja i ventilacije (GVK).

Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti:

- Usporedbom teorijskih i eksperimentalnih rezultata došlo se do zaključka kako pri višim brzinama valja računati s većom duljinom jezgre, odnosno s nižim vrijednostima stupnja miješanja. Također, uočeno je da se pri nižim istrujnim brzinama točniji rezultati dobivaju uz manje duljine jezgre, a više stupnjeve miješanja.
- Uočeno je da je s povećavanjem omjera stranica, odnosno smanjenjem visine otvora uz konstantnu širinu, veće smanjenje brzine u odnosu na smanjenje brzine kod otvora s nižim omjerom stranica
- *Vena contracta* izraženija je kod nižih omjera stranica, te je tada manje raspršenje mlaza.
- Termografska analiza daje zadovoljavajuće rezultate, te je dana korelacija između brzina i temperatura. Korelacijom između brzina i temperatura želi se unaprijediti razvoj, dijagnoza i upravljanje postojećih i budućih komponenti GVK sustava na jednostavan, jeftin i učinkovit način.
- Razrađen je postupak numeričkog rješavanja problema strujanja zračnog mlaza. *Realizable k-ε* model turbulencije, koji sadrži novu formulaciju turbulენტne viskoznosti i novu transportnu jednadžbu za disipaciju kinetičke energije turbulencije, pokazao je jako dobro poklapanje na udaljenostima od istrujnog otvora većim od 0,3 m

Provedena i u ovom radu opisana istraživanja mogu se nastaviti u nekoliko smjerova:

- Ispitivanje Coanda efekta (priljubljeni mlaz). Istrujavanjem iz otvora koji se nalazi u blizini stjenke (zida, stropa, poda), u prostoru između mlaza i stjenke pojavljuje se ubrzano vrtložno strujanje. Prema Bernoullijevom zakonu veće brzine su povezane sa nižim statičkim tlakom, te zona u blizini stjenke postaje zona nižeg tlaka u odnosu na slobodnu stranu mlaza. Priljubljivanje mlaza tako nastaje kao posljedica razlike statičkih tlakova. Istraživanje [28] pokazalo je da priljubljeni mlaz može dublje

prodrijeti u prostor od slobodnog. Primjena Coandinog efekta imala bi velik značaj za aplikacije u kojima je zona boravka na većim udaljenostima od samog otvora.

- Snažnijim računalnim resursima, numeričkom modeliranju mlaza u tri dimenzije
- U svrhu postizanja što boljeg miješanja istrujanog zraka i okolnog zraka [25] navodi postojanje dokaza da je u klasi nekružnih (kakvi su analizirani u ovom radu) otvora, najbolje miješanje postignuto kod otvora trokutastog oblika. Stoga bi bilo zanimljivo praktično razmotriti i takve slučajeve.
- Snimanjem mlaza s više od dvije termografske snimke umanjila bi se ionako mala greška koja nastaje zbog neokomitosti kamere na trajektoriju mlaza.

Na osnovi provedenih istraživanja može se zaključiti da je dobiveno dovoljno elemenata koji ukazuju na podobnost korištene metode u procesu razvoja novih istrujnih otvora za GVK uz znatno manji broj eksperimenata.

PRILOZI

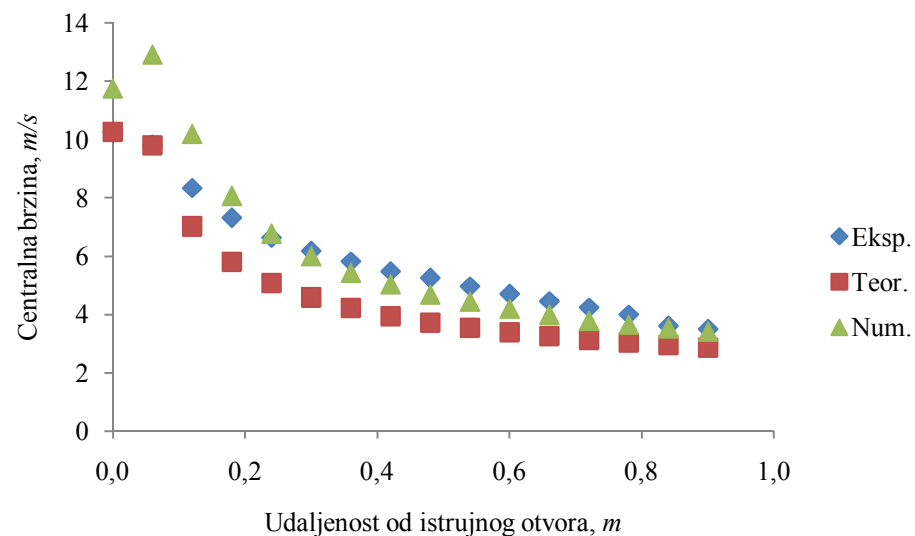
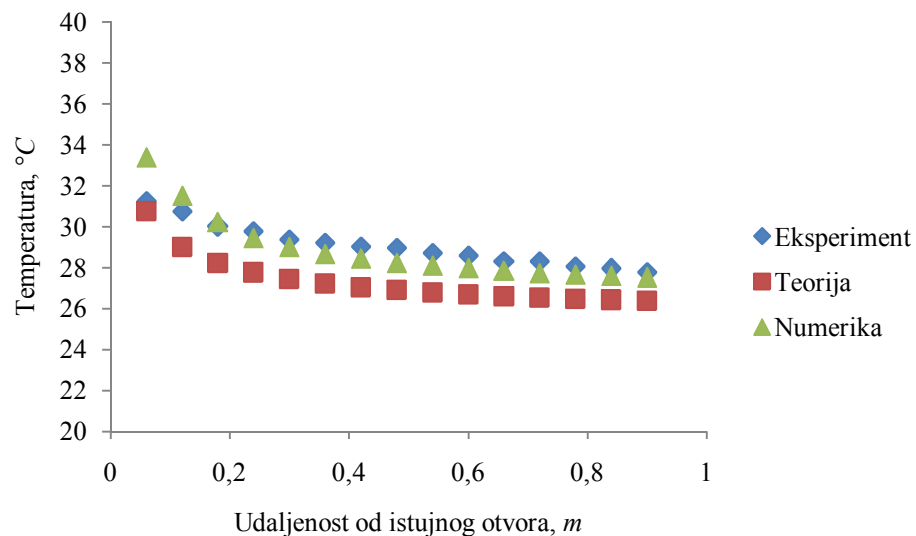
- I. Prilog A
- II. Prilog B
- III. Prilog C

Prilog A

Istrujni otvor dimenzija 140 x 9 mm.

Tablica 4. Istrujna brzina 10,25 m/s, $t_{ul}=25,6$ °C, $dt=8,1$ °C, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	31,24	30,76	30,02	29,78	29,38	29,23	29,05	28,97	28,72	28,59	28,31	28,32	28,07	27,95	27,79
Teorija	30,75	29,02	28,23	27,77	27,45	27,22	27,04	26,90	26,78	26,69	26,60	26,53	26,47	26,42	26,37
Numerika	33,39	31,51	30,22	29,45	28,99	28,67	28,44	28,23	28,09	27,96	27,84	27,73	27,65	27,58	27,52



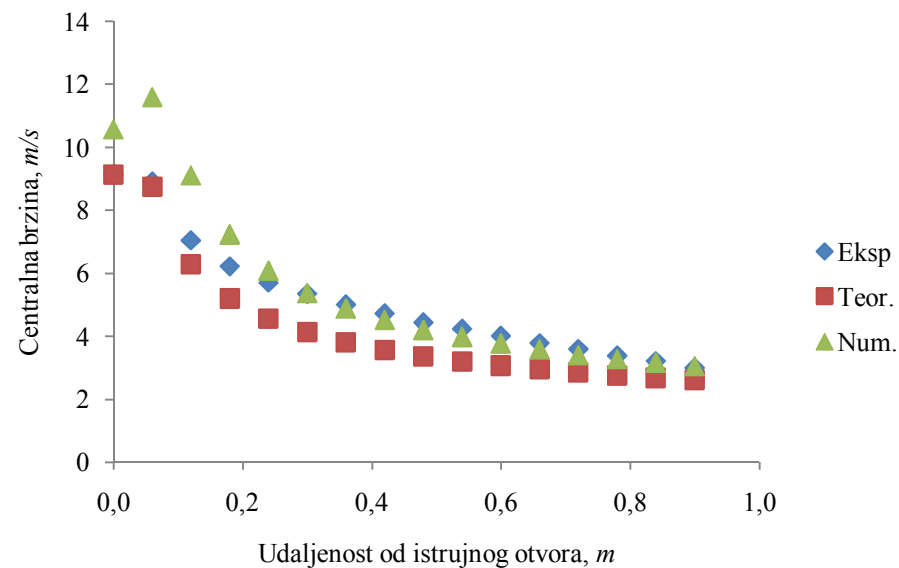
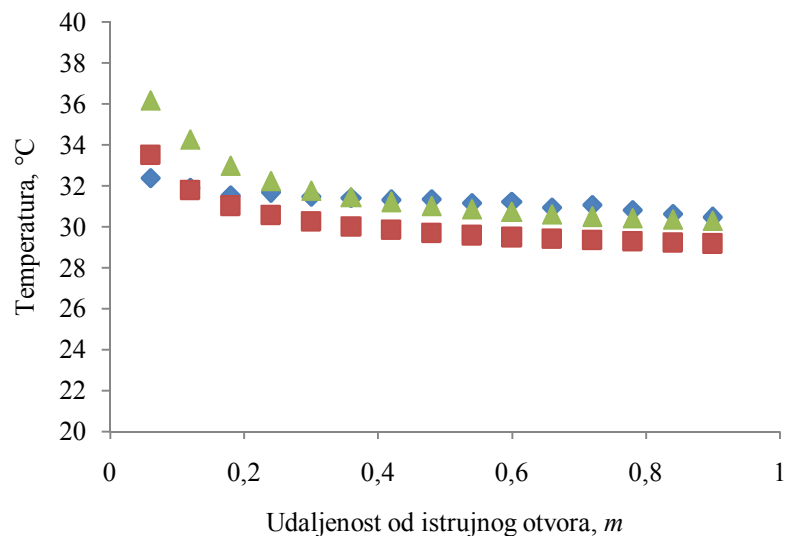
Tablica 5. Istrujna brzina 10,25 m/s, $t_{ul}=25,6$ °C, $dt=8,1$ °C brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	10,25	9,82	8,33	7,31	6,63	6,18	5,82	5,48	5,25	4,96	4,70	4,45	4,23	3,99	3,60	3,50
Teorija	10,25	9,80	7,02	5,80	5,08	4,59	4,23	3,95	3,73	3,54	3,39	3,26	3,14	3,04	2,95	2,87
Numerika	11,75	12,92	10,19	8,07	6,78	5,99	5,43	5,04	4,68	4,43	4,20	3,99	3,78	3,66	3,53	3,41

Slika 53. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 6. Istrujna brzina 9,14 m/s, $t_{ul}=28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	32,39	31,91	31,55	31,68	31,47	31,42	31,30	31,35	31,17	31,23	30,94	31,06	30,81	30,62	30,46
Teorija	33,51	31,79	31,02	30,56	30,24	30,01	29,84	29,70	29,58	29,49	29,41	29,34	29,28	29,22	29,18
Numerika	36,18	34,27	32,99	32,22	31,76	31,44	31,21	31,00	30,86	30,73	30,61	30,49	30,42	30,35	30,28



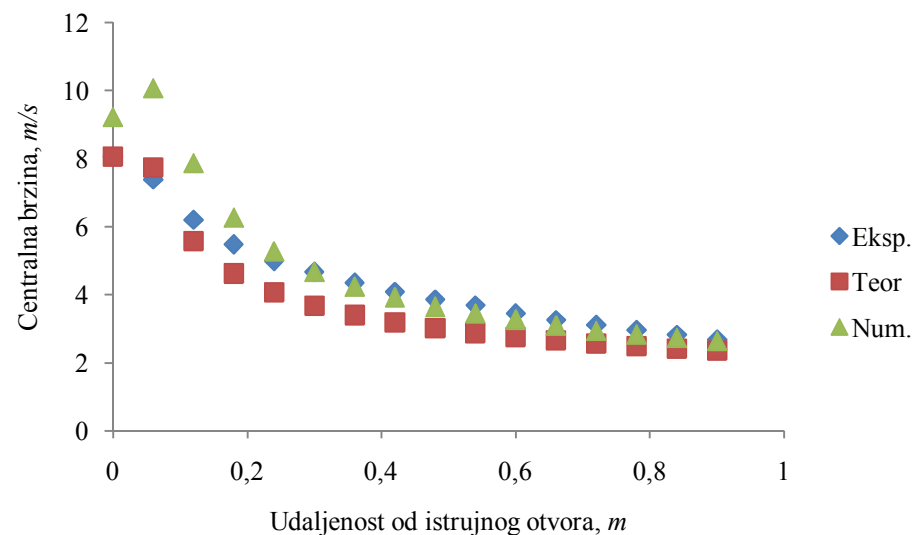
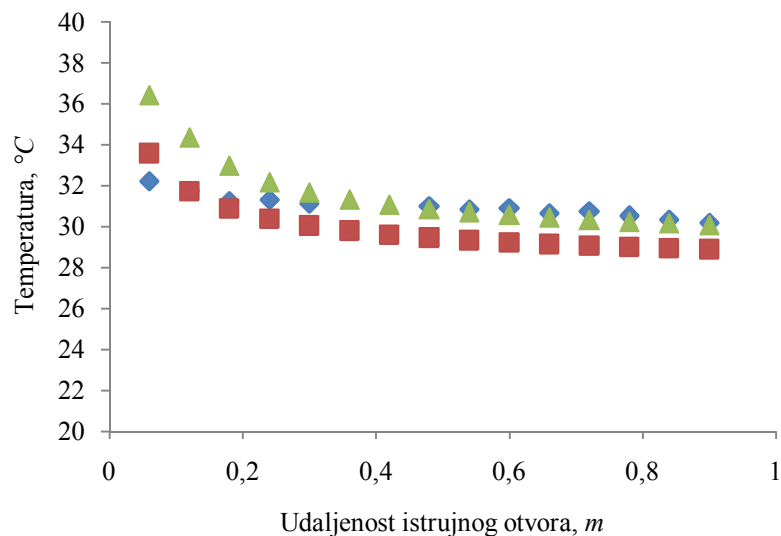
Tablica 7. Istrujna brzina 9,14 m/s, $t_{ul}=28,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	9,14	8,91	7,05	6,21	5,70	5,34	5,00	4,72	4,43	4,23	4,00	3,77	3,58	3,38	3,20	2,98
Teorija	9,14	8,75	6,28	5,20	4,55	4,12	3,80	3,55	3,36	3,19	3,06	2,94	2,84	2,75	2,67	2,60
Numerika	10,57	11,58	9,11	7,23	6,08	5,38	4,88	4,52	4,20	3,98	3,77	3,58	3,39	3,28	3,17	3,06

Slika 54. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzine.

Tablica 8. Istrujna brzina 8,06 m/s, $t_{ul}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt_{pr}=8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	32,22	31,75	31,25	31,33	31,12	*	*	31,01	30,85	30,92	30,65	30,74	30,52	30,35	30,19
Teorija	33,59	31,73	30,89	30,39	30,05	29,80	29,61	29,46	29,33	29,23	29,14	29,07	29,00	28,95	28,89
Numerika	36,42	34,34	32,98	32,17	31,67	31,33	31,08	30,86	30,71	30,56	30,43	30,31	30,23	30,15	30,08



Tablica 9. Istrujna brzina 8,06 m/s, $t_{ul}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

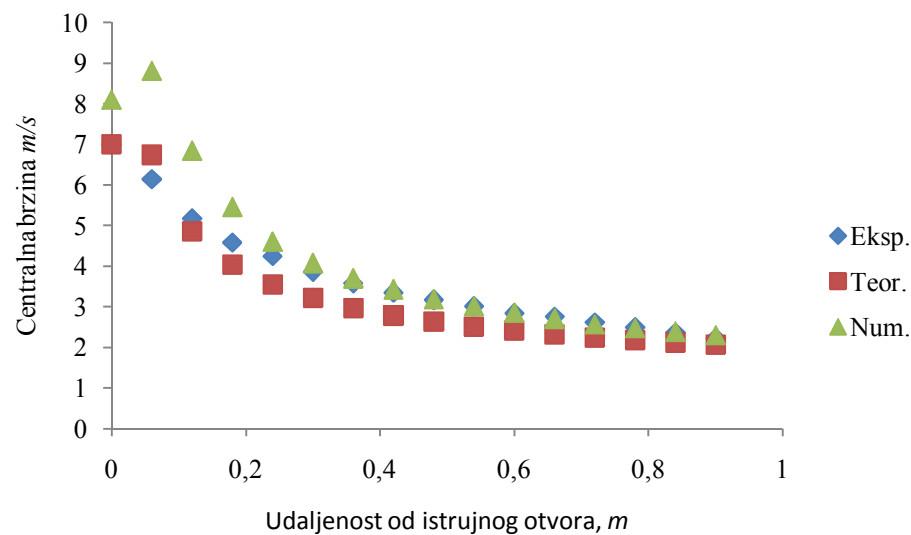
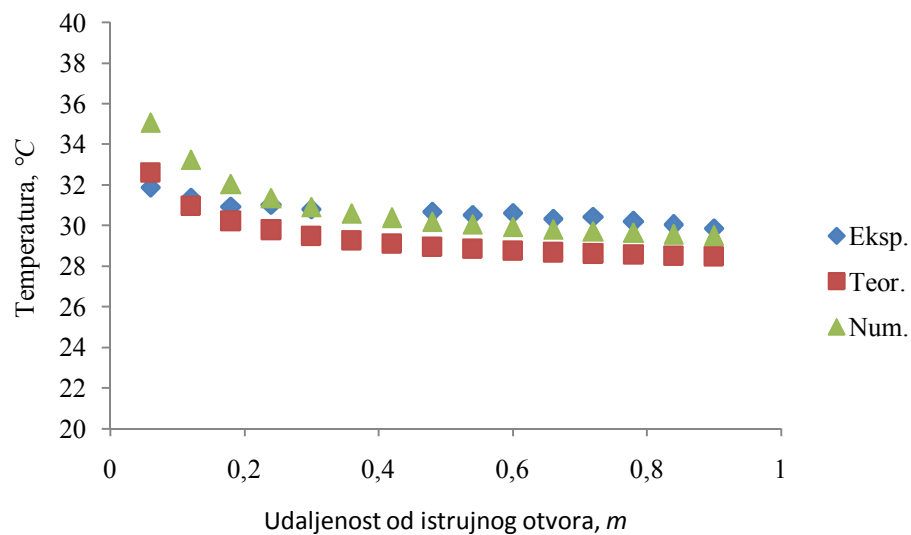
Slika 55. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	8,06	7,39	6,21	5,49	4,99	4,68	4,36	4,09	3,86	3,69	3,46	3,26	3,12	2,97	2,83	2,68
Teorija	8,06	7,74	5,57	4,62	4,06	3,68	3,40	3,18	3,01	2,87	2,75	2,65	2,56	2,48	2,42	2,35
Numerika	9,23	10,08	7,88	6,27	5,28	4,67	4,24	3,93	3,65	3,46	3,28	3,11	2,95	2,84	2,74	2,65

Tablica 10. Istrujna brzina 7 m/s, $t_{ul}=27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	31,87	31,37	30,94	31,02	30,81	*	*	30,69	30,54	30,63	30,35	30,42	30,20	30,04	29,88
Teorija	32,61	30,97	30,23	29,79	29,49	29,27	29,10	28,96	28,86	28,76	28,69	28,62	28,56	28,51233	28,46765
Numerika	35,07	33,23	32,05	31,34	30,91	30,60	30,39	30,19	30,06	29,93	29,82	29,71	29,64	29,57	29,50

*isključen termopar



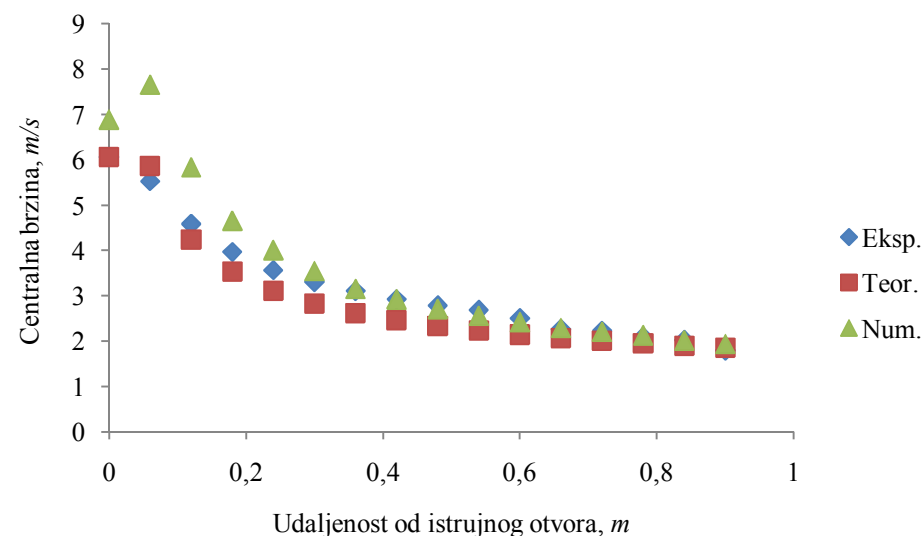
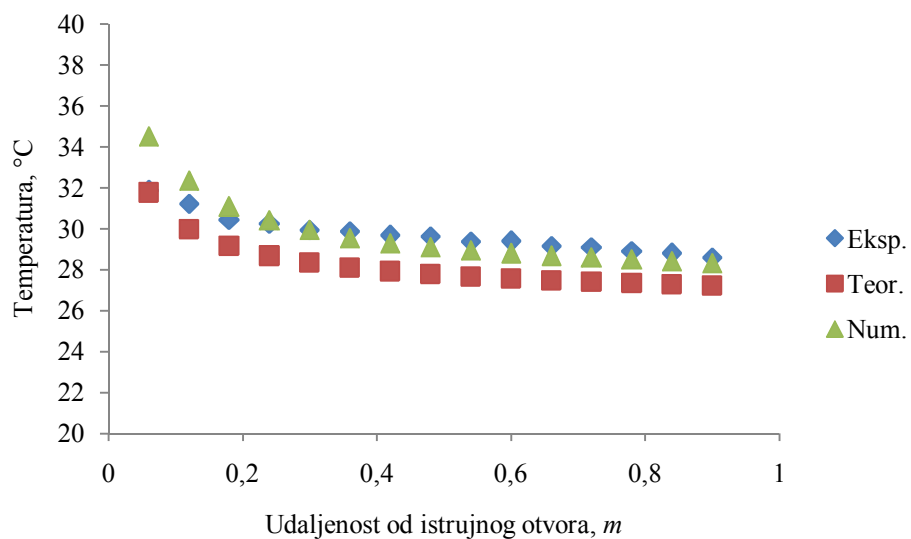
Tablica 11. Istrujna brzina 7 m/s, $t_{ul}=27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Slika 56. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	7,00	6,15	5,18	4,59	4,25	3,87	3,59	3,36	3,18	3,02	2,85	2,76	2,63	2,50	2,37	2,24
Teorija	7,00	6,74	4,86	4,03	3,55	3,22	2,98	2,79	2,64	2,52	2,42	2,33	2,25	2,19	2,13	2,07
Numerika	8,09	8,81	6,85	5,46	4,60	4,08	3,70	3,43	3,19	3,02	2,86	2,71	2,57	2,48	2,39	2,31

Tablica 12. Istrujna brzina 6,06 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	31,87	31,22	30,45	30,26	29,94	29,88	29,67	29,63	29,38	29,39	29,16	29,09	28,92	28,80	28,59
Teorija	31,77	29,97	29,16	28,68	28,35	28,11	27,92	27,78	27,66	27,56	27,47	27,40	27,34	27,28	27,23
Numerika	34,50	32,34	31,08	30,41	29,93	29,53	29,30	29,08	28,94	28,80	28,67	28,59	28,51	28,40	28,33



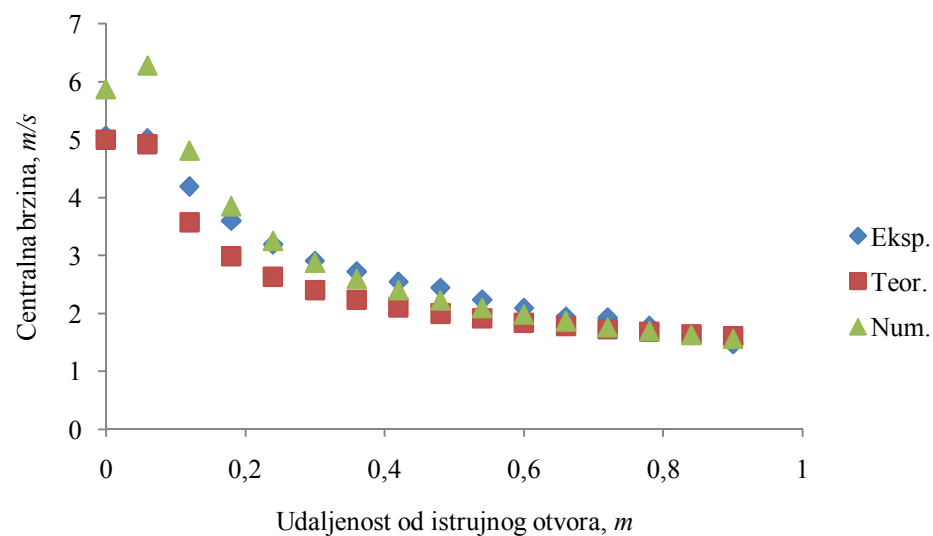
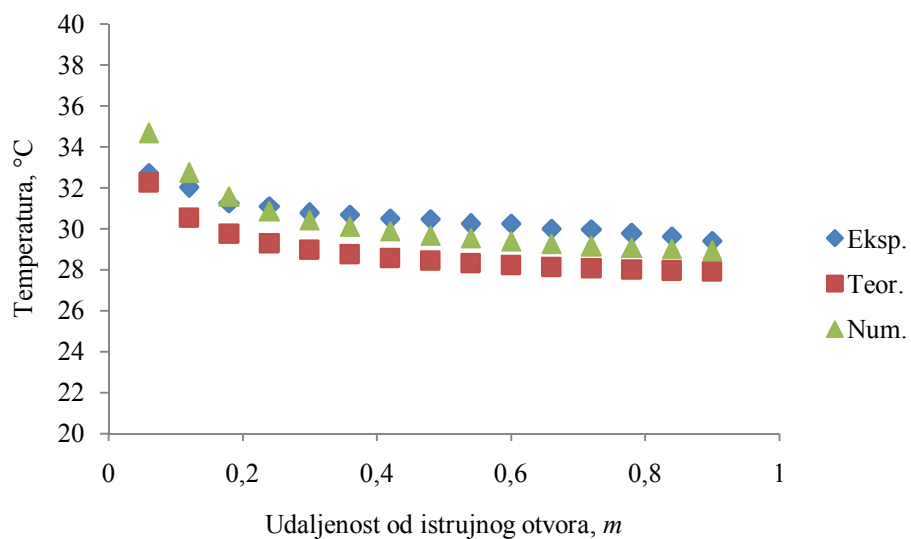
Tablica 13. Istrujna brzina 6,06 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	6,06	5,53	4,59	3,97	3,57	3,31	3,11	2,92	2,79	2,69	2,51	2,27	2,23	2,09	2,03	1,80
Teorija	6,06	5,86	4,24	3,53	3,12	2,83	2,63	2,47	2,34	2,24	2,15	2,08	2,01	1,96	1,91	1,86
Numerika	6,89	7,66	5,84	4,66	4,01	3,55	3,15	2,92	2,71	2,56	2,42	2,29	2,21	2,13	2,01	1,94

Slika 57. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzine.

Tablica 14. Istrujna brzina 5,06 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	32,72	32,02	31,27	31,10	30,77	30,70	30,50	30,48	30,24	30,27	29,99	29,97	29,77	29,62	29,41
Teorija	32,25	30,53	29,75	29,29	28,98	28,75	28,57	28,43	28,31	28,22	28,14	28,07	28,01	27,95	27,91
Numerika	34,68	32,74	31,57	30,85	30,41	30,09	29,87	29,66	29,52	29,39	29,26	29,14	29,07	28,99	28,92



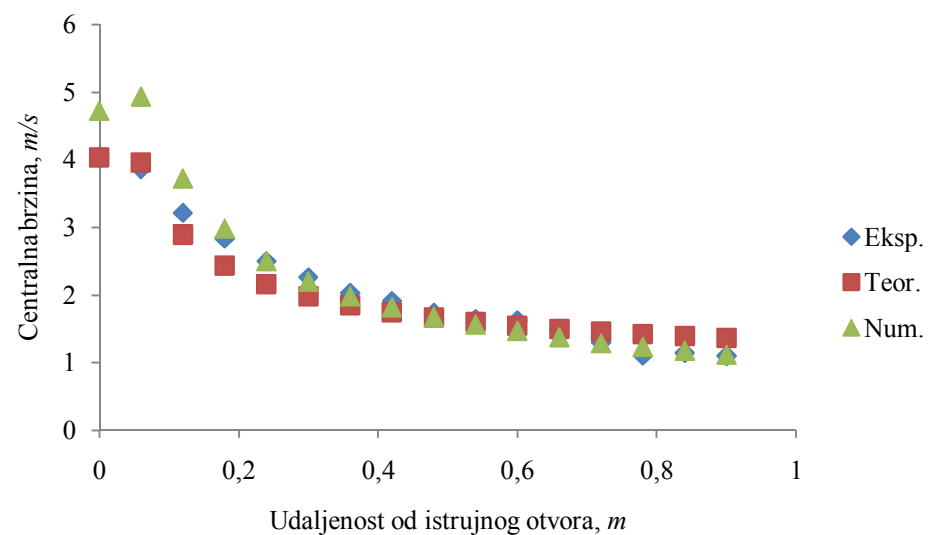
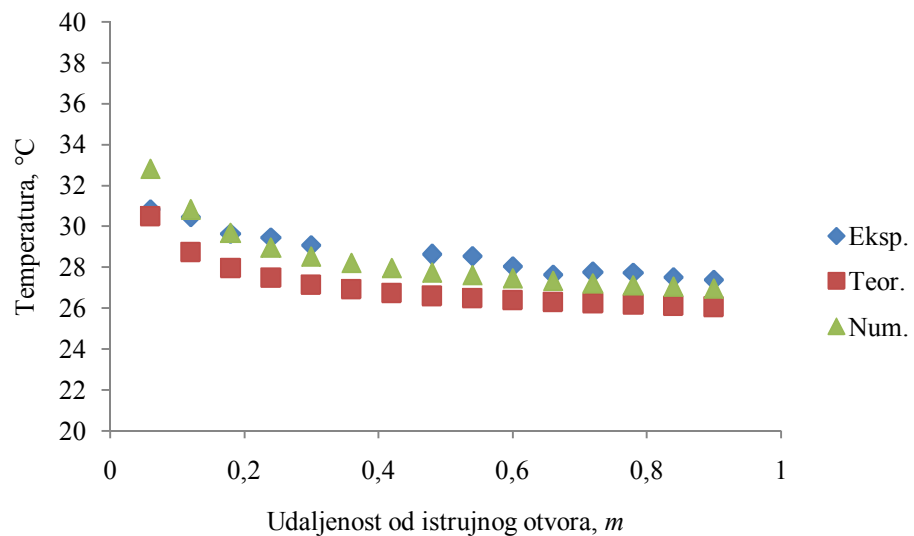
Tablica 15. Istrujna brzina 5,06 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	5,06	5,02	4,19	3,60	3,19	2,91	2,73	2,55	2,45	2,24	2,10	1,95	1,94	1,79	1,63	1,48
Teorija	5,00	4,92	3,58	2,99	2,64	2,41	2,24	2,11	2,00	1,92	1,85	1,79	1,73	1,69	1,65	1,61
Numerika	5,87	6,27	4,81	3,85	3,25	2,87	2,60	2,41	2,23	2,10	1,98	1,87	1,76	1,70	1,63	1,57

Slika 58. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzine.

Tablica 16. Istrujna brzina 4,04 m/s, $t_{ul}=26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	30,83	30,45	29,63	29,45	29,07	*	*	28,62	28,55	28,05	27,64	27,75	27,73	27,51	27,40
Teorija	30,50	28,74	27,94	27,47	27,15	26,91	26,73	26,59	26,47	26,37	26,29	26,22	26,16	26,10	26,06
Numerika	32,80	30,82	29,68	28,96	28,51	28,19	27,96	27,74	27,60	27,46	27,32	27,19	27,11	27,03	26,96



Tablica 17. Istrujna brzina 4,04 m/s, $t_{ul}=26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

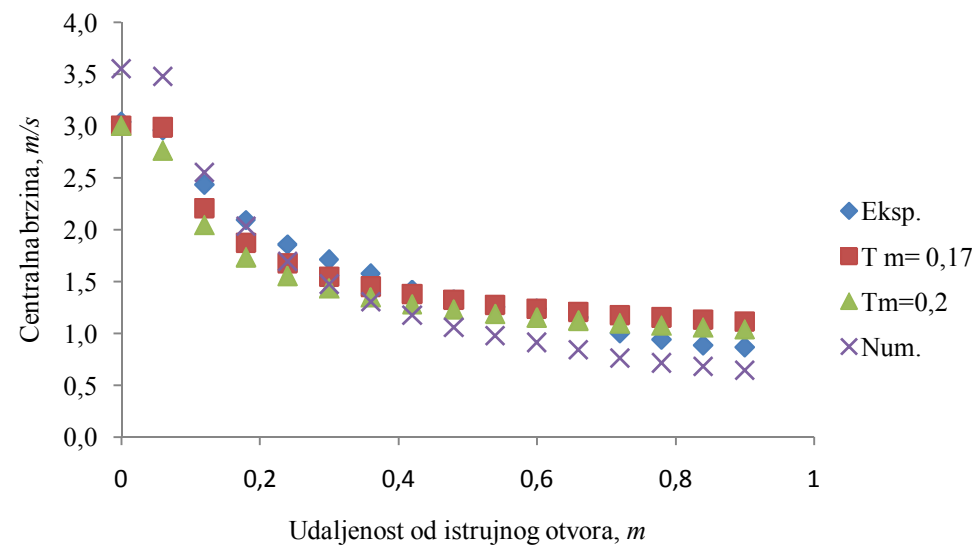
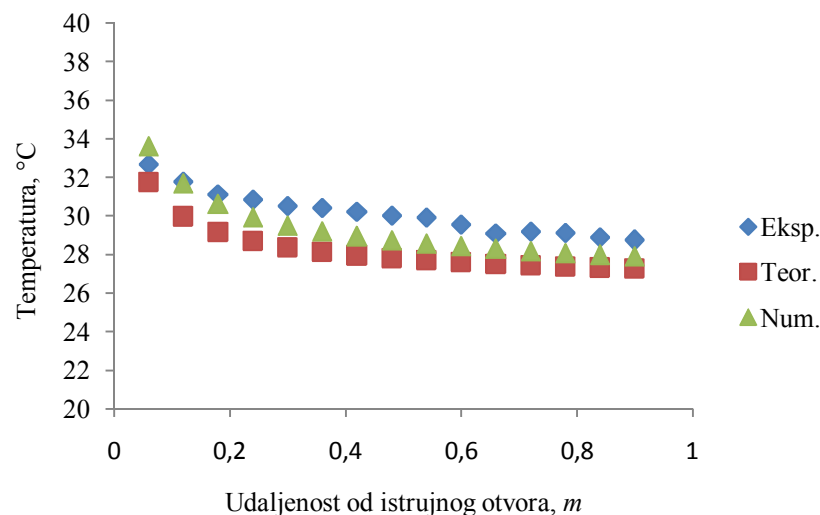
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	4,04	3,87	3,22	2,84	2,50	2,27	2,04	1,92	1,74	1,65	1,63	1,51	1,31	1,11	1,15	1,11
Teorija	4,04	3,97	2,90	2,44	2,17	1,98	1,85	1,75	1,67	1,60	1,55	1,50	1,46	1,43	1,40	1,37
Numerika	4,73	4,94	3,73	2,99	2,51	2,20	1,98	1,82	1,68	1,57	1,47	1,38	1,29	1,23	1,18	1,13

Slika 59. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

*isključen termopar

Tablica 18. Istrujna brzina 3,04 m/s, $t_{ul}=25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	32,67	31,78	31,11	30,84	30,52	30,41	30,21	30,03	29,91	29,54	29,09	29,20	29,13	28,88	28,74
Teorija	31,74	29,97	29,17	28,69	28,36	28,13	27,94	27,80	27,68	27,58	27,50	27,43	27,37	27,31	27,26
Numerika	33,60	31,69	30,62	29,93	29,49	29,17	28,94	28,72	28,57	28,42	28,29	28,16	28,07	27,98	27,89



Tablica 19. Istrujna brzina 3,04m/s, $t_{ul}=25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	3,04	2,96	2,43	2,09	1,86	1,71	1,58	1,42	1,33	1,25	1,24	1,15	1,00	0,94	0,88	0,87
Teorija $m=0,17$	3,00	2,99	2,21	1,87	1,67	1,54	1,45	1,38	1,32	1,27	1,24	1,20	1,18	1,15	1,13	1,11
Teorija $m=0,2$	3,00	2,76	2,04	1,73	1,55	1,43	1,35	1,28	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,08	1,06	1,04
Numerika	3,55	3,48	2,55	2,03	1,69	1,47	1,30	1,18	1,06	0,98	0,91	0,84	0,76	0,71	0,68	0,64

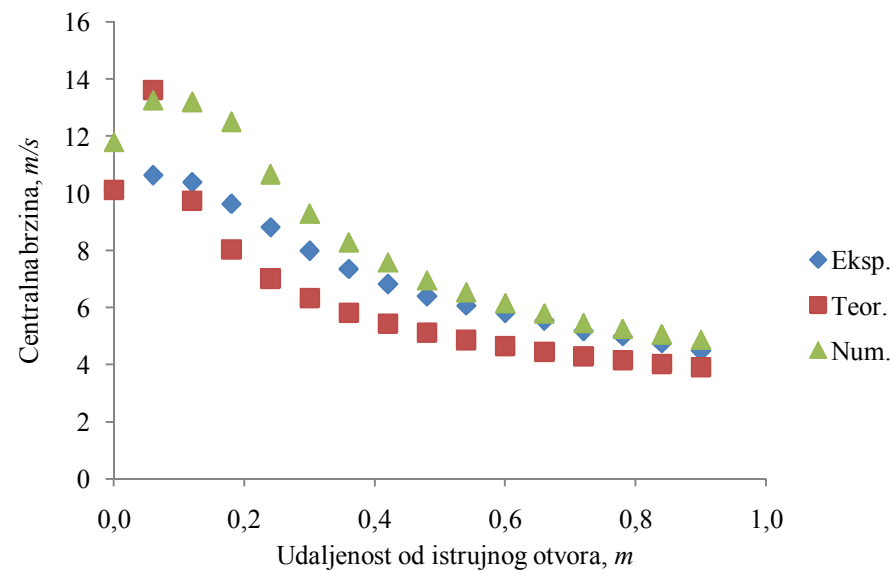
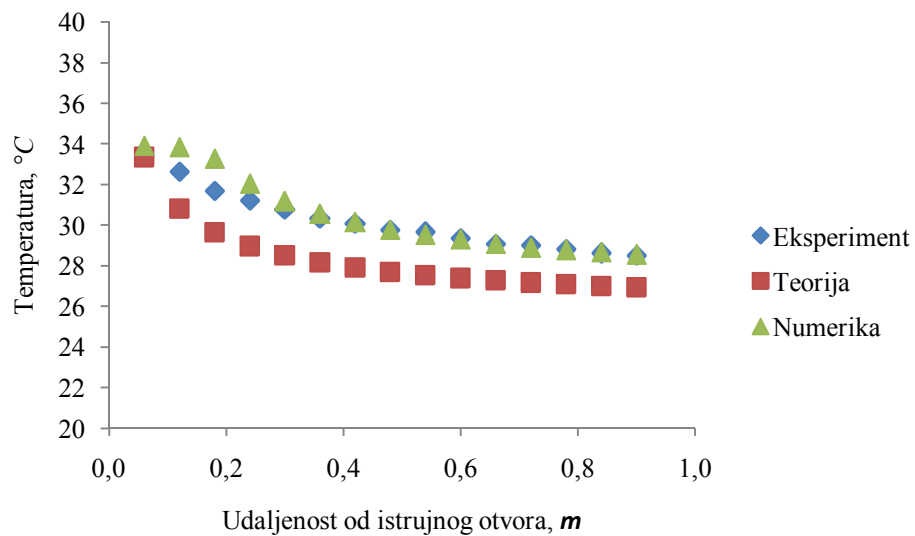
Slika 60. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzine.

Prilog B

Istrujni otvor dimenzija 140 x 18 mm.

Tablica 20. Istrujna brzina 10,12 m/s, $t_{ul}=25,82\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	33,43	32,64	31,70	31,21	30,78	30,34	30,08	29,76	29,66	29,37	29,07	29,02	28,83	28,62	28,52
Teorija	33,35	30,80	29,65	28,97	28,50	28,17	27,91	27,70	27,53	27,39	27,28	27,17	27,09	27,01	26,94
Numerika	33,90	33,85	33,27	32,03	31,17	30,57	30,15	29,78	29,53	29,30	29,09	28,90	28,78	28,67	28,56



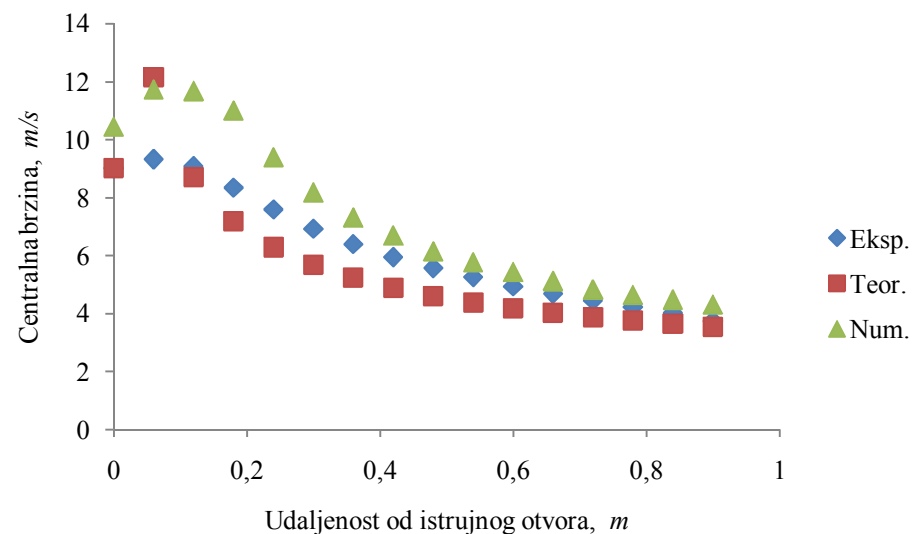
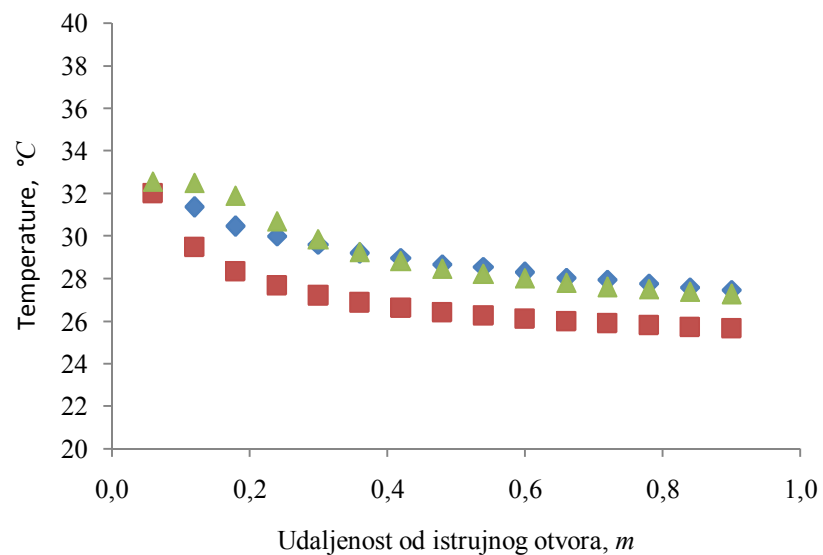
Tablica 21. Istrujna brzina 10,12 m/s, $t_{ul}=25,82\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	10,12	10,63	10,39	9,63	8,81	7,98	7,34	6,82	6,39	6,06	5,81	5,54	5,17	4,99	4,74	4,49
Teorija	10,12	13,62	9,74	8,03	7,02	6,33	5,83	5,44	5,12	4,86	4,65	4,46	4,30	4,16	4,03	3,92
Numerika	11,81	13,27	13,21	12,52	10,68	9,29	8,29	7,58	6,96	6,54	6,15	5,79	5,46	5,26	5,06	4,88

Slika 62. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzine.

Tablica 22. Istrujna brzina 9,01 m/s, $t_{ul}=24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	32,11	31,36	30,46	30,00	29,61	29,20	28,96	28,66	28,55	28,30	28,04	27,95	27,77	27,60	27,47
Teorija	32,01	29,49	28,35	27,68	27,22	26,88	26,62	26,42	26,25	26,12	26,00	25,90	25,81	25,73	25,67
Numerika	32,56	32,50	31,89	30,68	29,84	29,24	28,83	28,47	28,22	28,00	27,79	27,60	27,49	27,38	27,27



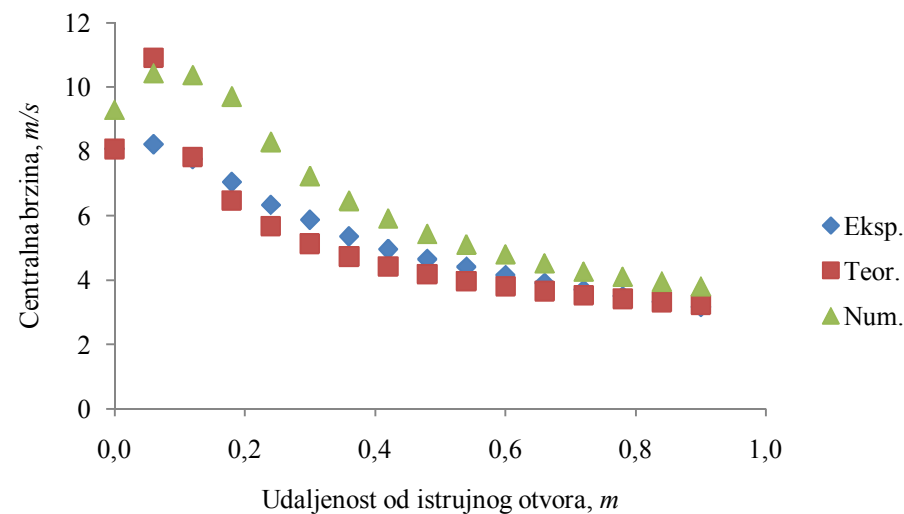
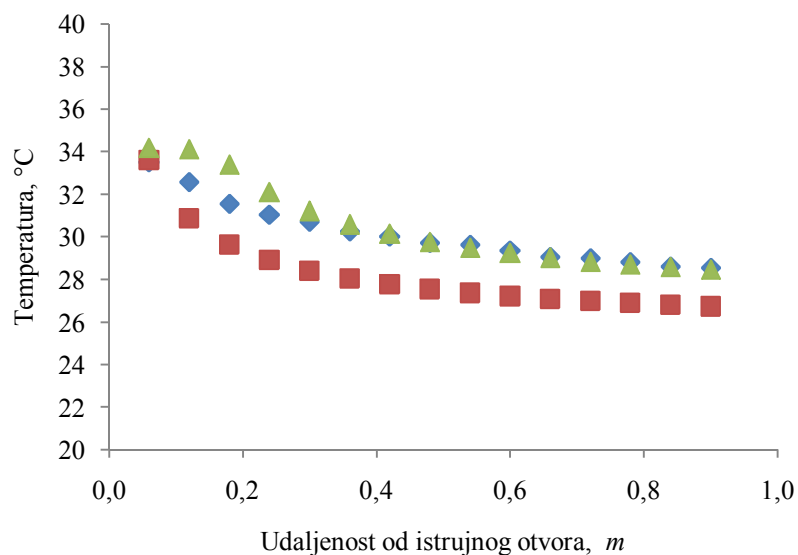
Tablica 23. Istrujna brzina 9,01 m/s, $t_{ul}=24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	9,01	9,33	9,09	8,35	7,59	6,93	6,40	5,95	5,58	5,26	4,94	4,68	4,46	4,24	4,02	3,75
Teorija	9,01	12,15	8,70	7,18	6,29	5,68	5,23	4,88	4,61	4,38	4,18	4,02	3,88	3,75	3,64	3,54
Numerika	10,45	11,73	11,68	11,01	9,39	8,18	7,31	6,69	6,14	5,77	5,43	5,11	4,82	4,64	4,47	4,31

Slika 63. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 24. Istrujna brzina 8,08 m/s, $t_{ul}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	33,51	32,59	31,55	31,06	30,71	30,27	30,02	29,73	29,64	29,35	29,07	29,01	28,82	28,62	28,56
Teorija	33,60	30,86	29,64	28,90	28,41	28,04	27,77	27,54	27,36	27,22	27,09	26,98	26,89	26,80	26,73
Numerika	34,19	34,12	33,39	32,11	31,21	30,58	30,14	29,75	29,48	29,24	29,02	28,82	28,69	28,57	28,46



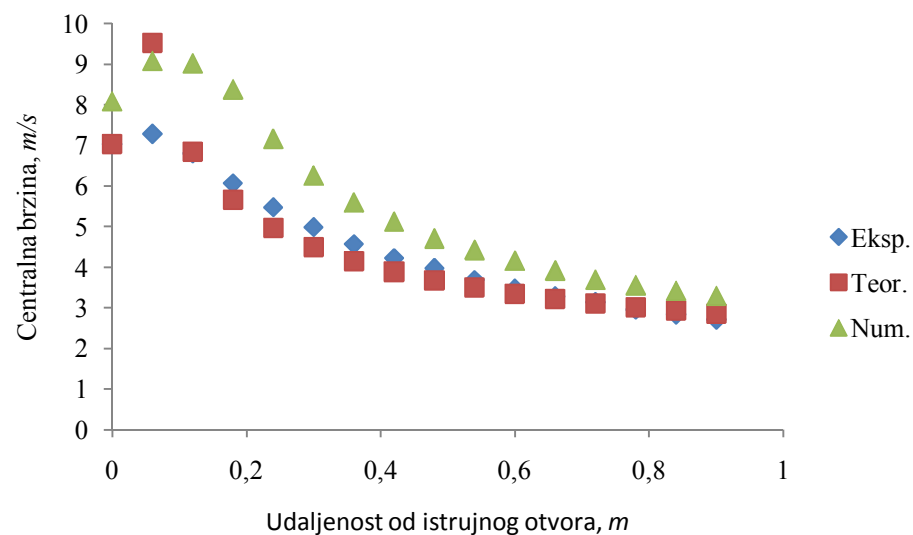
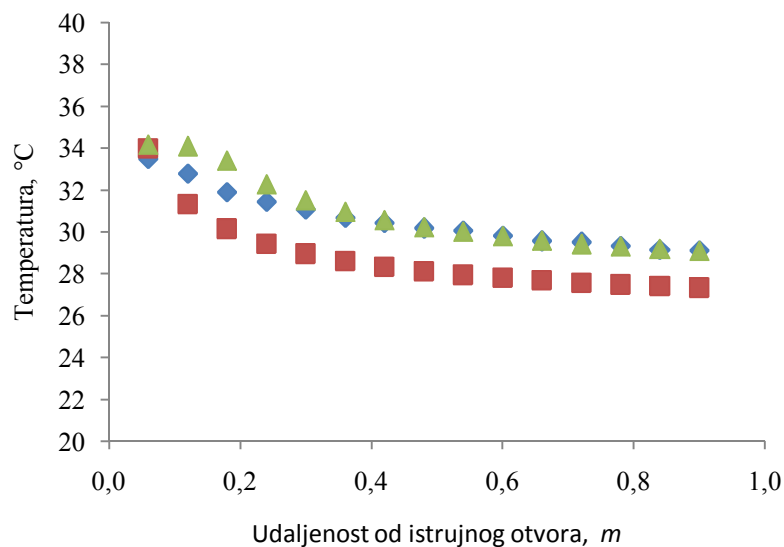
Tablica 25. Istrujna brzina 8,08 m/s, $t_{ul}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	8,08	8,23	7,78	7,06	6,35	5,89	5,37	4,97	4,66	4,43	4,17	3,93	3,71	3,51	3,35	3,18
Teorija	8,08	10,92	7,84	6,48	5,68	5,14	4,74	4,43	4,18	3,98	3,81	3,66	3,53	3,42	3,32	3,24
Numerika	9,30	10,44	10,39	9,72	8,31	7,25	6,47	5,93	5,45	5,12	4,81	4,54	4,28	4,12	3,97	3,82

Slika 64. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 26. Istrujna brzina 7,03 m/s, $t_{ul}=27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	31,24	30,76	30,02	29,78	29,38	29,23	29,05	28,97	28,72	28,59	28,31	28,32	28,07	27,95	27,79
Teorija	30,75	29,02	28,23	27,77	27,45	27,22	27,04	26,90	26,78	26,69	26,60	26,53	26,47	26,42	26,37
Numerika	33,39	31,51	30,22	29,45	28,99	28,67	28,44	28,23	28,09	27,96	27,84	27,73	27,65	27,58	27,52



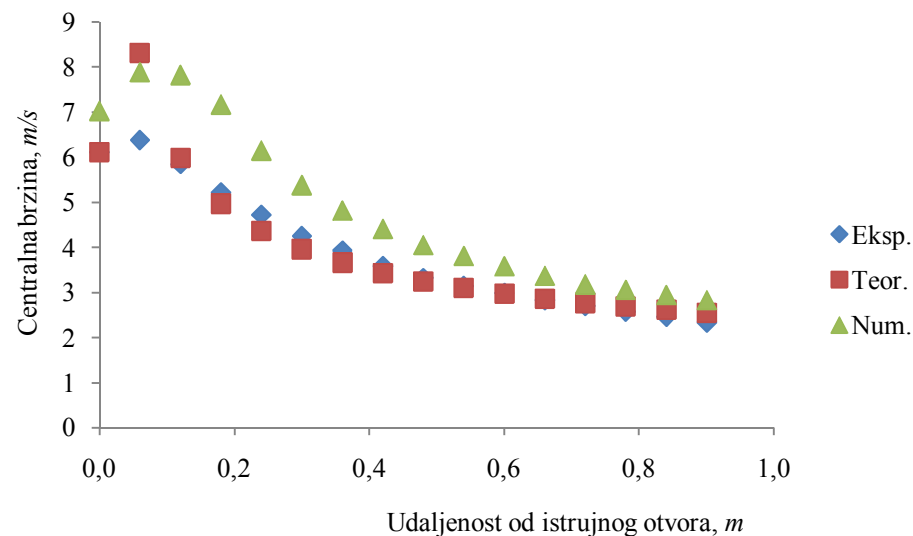
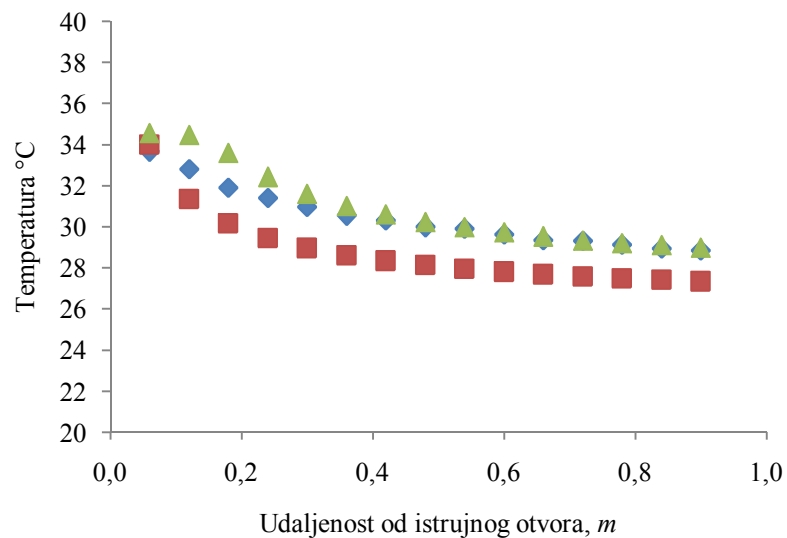
Tablica 27. Istrujna brzina 7,03 m/s, $t_{ul}=27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	7,03	7,29	6,81	6,07	5,48	4,99	4,57	4,23	3,98	3,69	3,48	3,29	3,15	2,96	2,84	2,72
Teorija	7,03	9,52	6,84	5,67	4,97	4,50	4,15	3,89	3,67	3,50	3,35	3,23	3,12	3,02	2,93	2,86
Numerika	8,10	9,09	9,03	8,39	7,17	6,26	5,60	5,13	4,72	4,43	4,17	3,93	3,71	3,57	3,43	3,31

Slika 65. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 28. Istrujna brzina 6,12 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	33,67	32,82	31,90	31,40	30,98	30,55	30,31	29,99	29,90	29,64	29,34	29,31	29,14	28,96	28,85
Teorija	33,99	31,34	30,15	29,44	28,96	28,61	28,34	28,13	27,95	27,81	27,68	27,58	27,49	27,41	27,34
Numerika	34,55	34,45	33,59	32,42	31,60	31,01	30,59	30,22	29,97	29,74	29,52	29,33	29,21	29,09	28,98



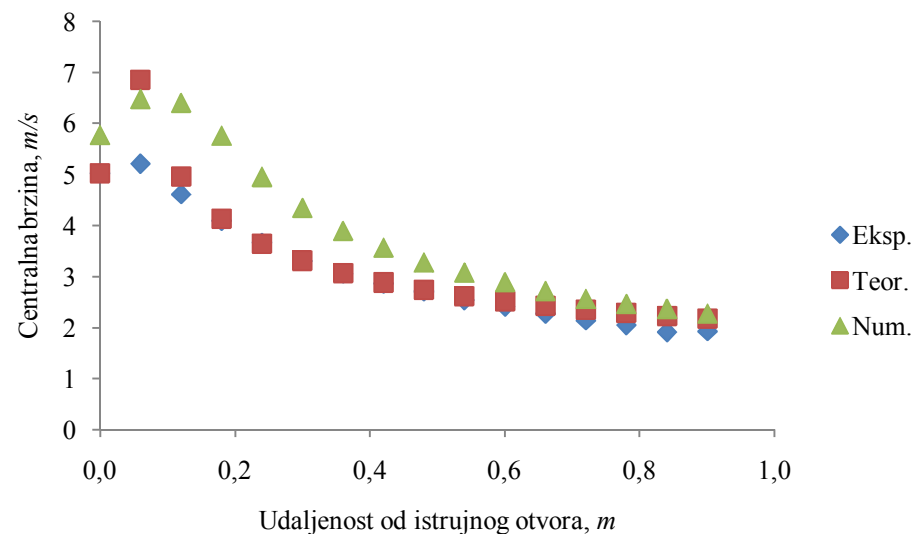
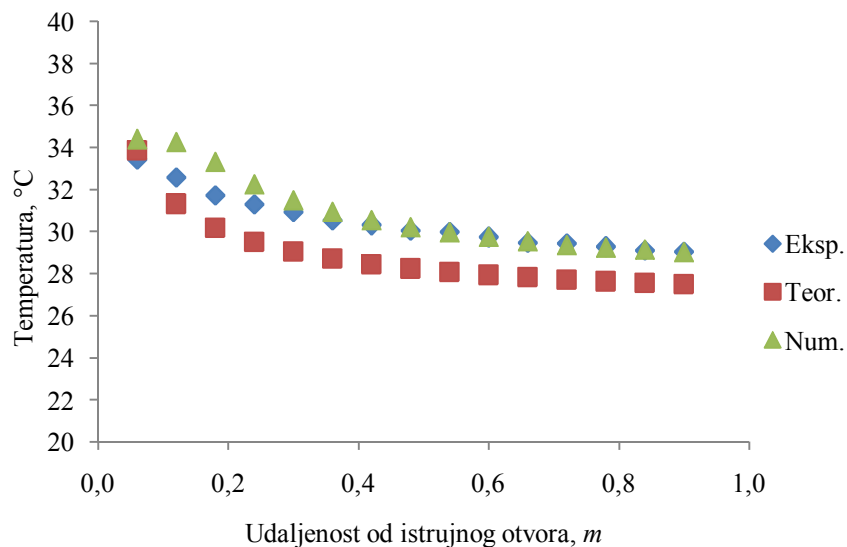
Tablica 29. Istrujna brzina 6,12 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	6,12	6,39	5,85	5,22	4,73	4,26	3,94	3,59	3,33	3,15	3,00	2,83	2,71	2,58	2,46	2,34
Teorija	6,12	8,31	5,99	4,97	4,37	3,97	3,67	3,44	3,26	3,11	2,98	2,87	2,78	2,70	2,62	2,56
Numerika	7,04	7,89	7,83	7,18	6,16	5,39	4,82	4,42	4,06	3,82	3,59	3,38	3,19	3,07	2,95	2,84

Slika 66. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 30. Istrujna brzina 5,02 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	33,43	32,58	31,75	31,30	30,94	30,56	30,32	30,07	29,99	29,74	29,49	29,44	29,28	29,10	29,05
Teorija	33,85	31,32	30,19	29,51	29,05	28,71	28,45	28,25	28,08	27,95	27,83	27,73	27,64	27,56	27,50
Numerika	34,40	34,26	33,32	32,26	31,50	30,95	30,56	30,21	29,97	29,75	29,55	29,36	29,25	29,14	29,03



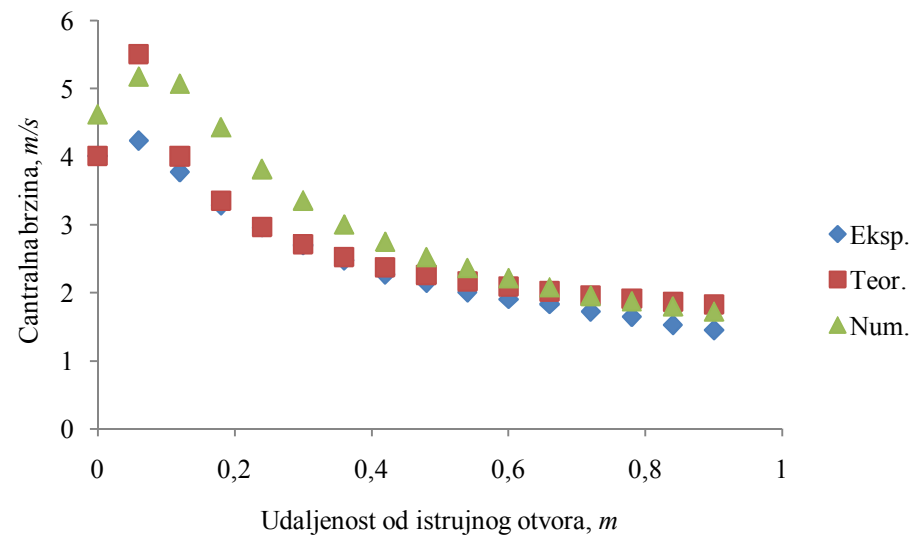
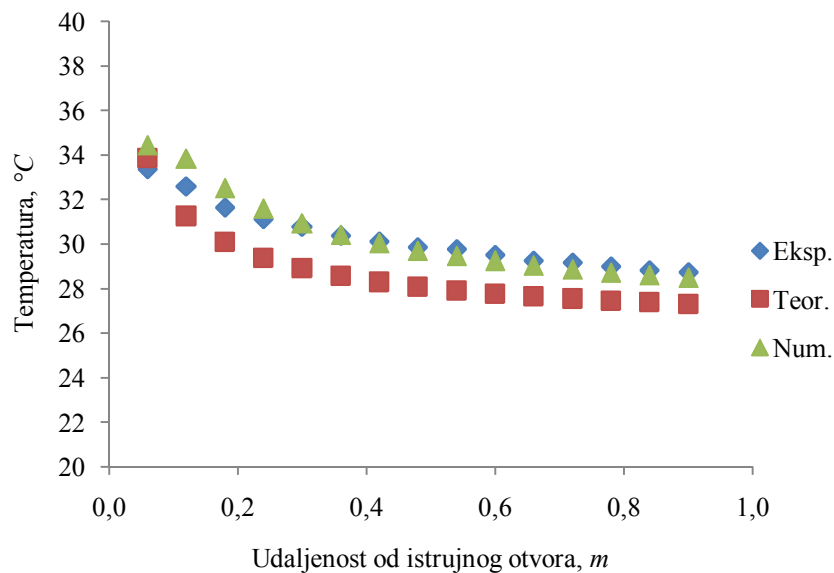
Tablica 31. Istrujna brzina 5,02 m/s, $t_{ul}=26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	5,02	5,21	4,61	4,09	3,67	3,31	3,06	2,86	2,71	2,53	2,41	2,27	2,14	2,04	1,91	1,93
Teorija	5,02	6,85	4,96	4,13	3,64	3,31	3,07	2,88	2,74	2,62	2,51	2,43	2,35	2,29	2,23	2,18
Numerika	5,78	6,48	6,41	5,76	4,96	4,35	3,90	3,57	3,28	3,08	2,90	2,73	2,57	2,47	2,37	2,28

Slika 67. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 32. Istrujna brzina 4,01 m/s, $t_{ul}=26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	33,36	32,60	31,65	31,13	30,78	30,39	30,12	29,88	29,78	29,52	29,26	29,17	29,01	28,82	28,74
Teorija	33,87	31,26	30,09	29,39	28,92	28,57	28,31	28,10	27,92	27,78	27,66	27,56	27,47	27,39	27,32
Numerika	34,43	33,83	32,51	31,59	30,93	30,42	30,05	29,71	29,47	29,25	29,05	28,85	28,73	28,61	28,50



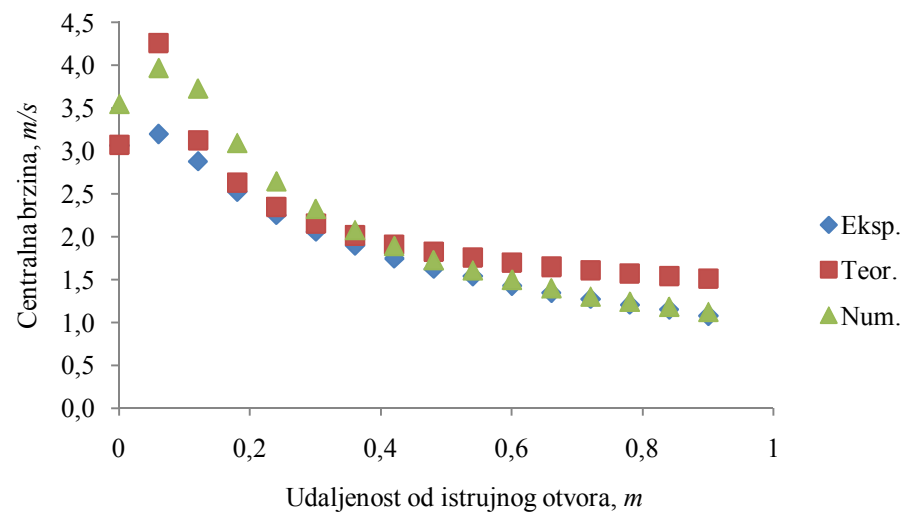
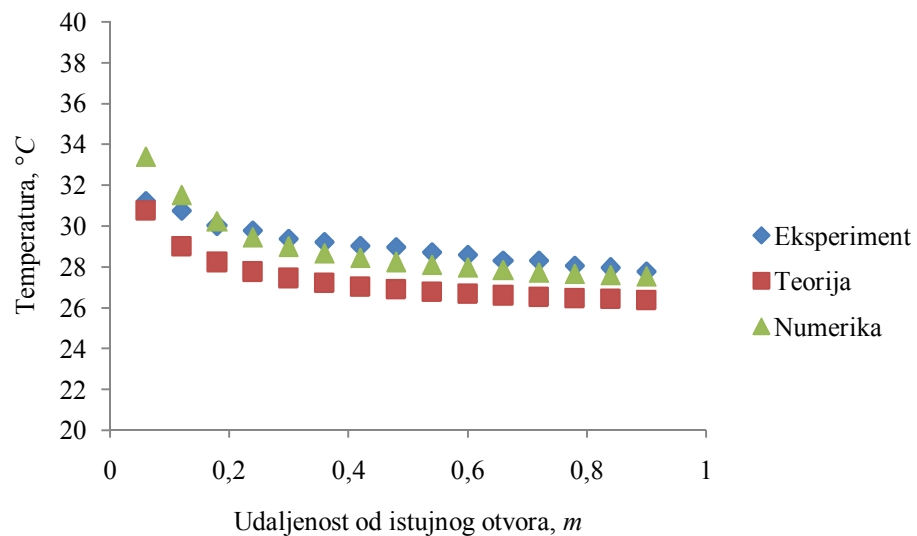
Tablica 33. Istrujna brzina 4,01 m/s, $t_{ul}=26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	4,01	4,24	3,78	3,29	2,96	2,70	2,48	2,27	2,15	2,01	1,91	1,84	1,73	1,65	1,53	1,46
Teorija	4,01	5,51	4,01	3,35	2,97	2,71	2,52	2,38	2,26	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,87	1,83
Numerika	4,63	5,18	5,07	4,43	3,82	3,36	3,00	2,75	2,52	2,36	2,21	2,08	1,95	1,87	1,80	1,72

Slika 68. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

Tablica 34. Istrujna brzina 3,07 m/s, $t_{ul}=25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Eksperiment	31,24	30,76	30,02	29,78	29,38	29,23	29,05	28,97	28,72	28,59	28,31	28,32	28,07	27,95	27,79
Teorija	30,75	29,02	28,23	27,77	27,45	27,22	27,04	26,90	26,78	26,69	26,60	26,53	26,47	26,42	26,37
Numerika	33,39	31,51	30,22	29,45	28,99	28,67	28,44	28,23	28,09	27,96	27,84	27,73	27,65	27,58	27,52



Tablica 35. Istrujna brzina 3,07 m/s, $t_{ul}=25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ brzine

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m															
	0,00	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90
Eksperiment	3,07	3,20	2,88	2,53	2,25	2,06	1,90	1,75	1,63	1,54	1,43	1,35	1,28	1,21	1,15	1,08
Teorija	3,07	4,26	3,12	2,63	2,34	2,15	2,01	1,91	1,82	1,75	1,70	1,65	1,61	1,57	1,54	1,51
Numerika	3,55	3,96	3,73	3,09	2,64	2,32	2,07	1,89	1,72	1,61	1,50	1,39	1,30	1,24	1,18	1,12

Slika 69. Dijagramski prikaz razdiobe temperatura i brzina.

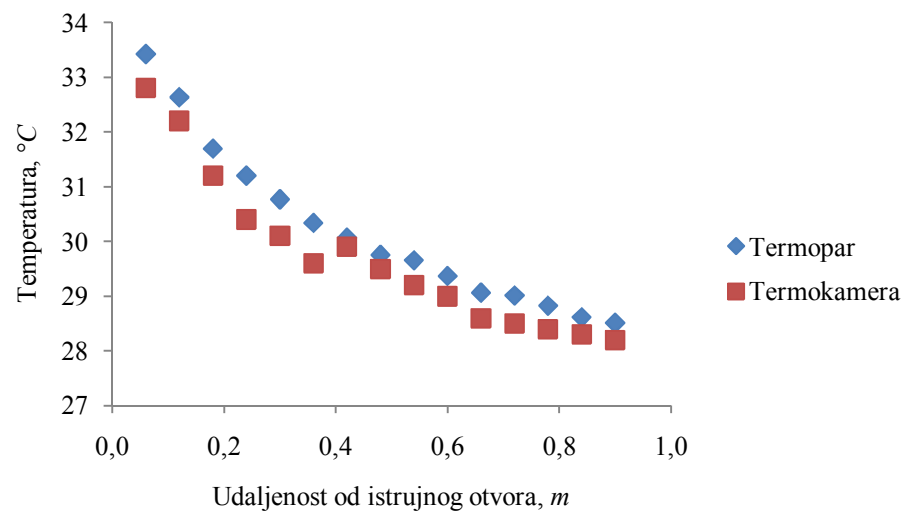
Prilog C

Usporedba eksperimentalnih rezultata dobivenih mjerenjem termoparova i rezultata dobivenih primjenom termografije.

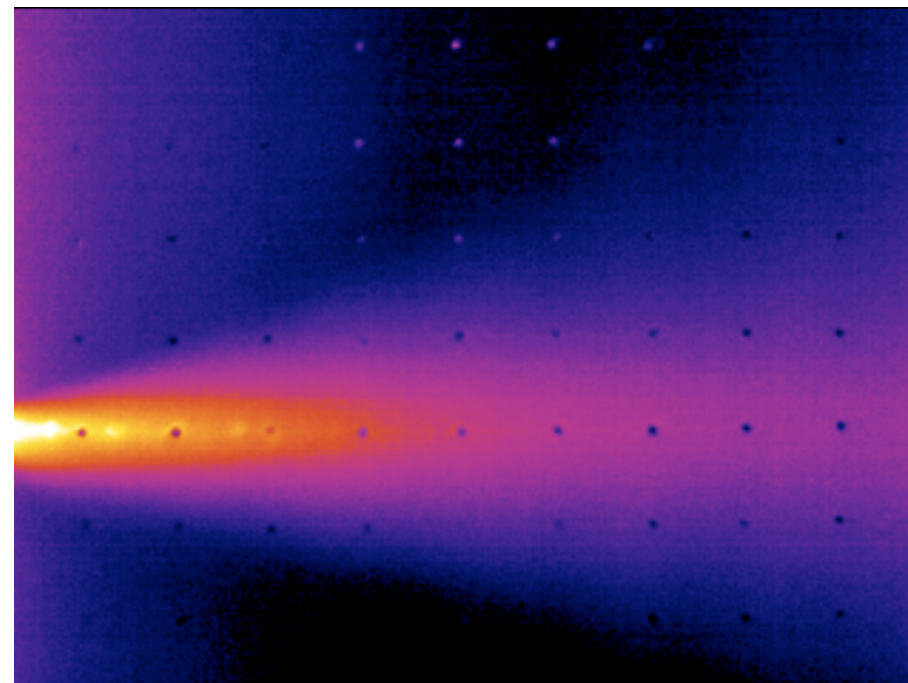
Korelacija brzina i temperatura dobivenih IC termografijom.

Tablica 36. Istrujna brzina 10,12 m/s, $t_{ul}=25,82\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,43	32,64	31,70	31,21	30,78	30,34	30,08	29,76	29,66	29,37	29,07	29,02	28,83	28,62	28,52
Termokamera	32,80	32,20	31,20	30,40	30,10	29,60	29,90	29,50	29,20	29,00	28,60	28,50	28,40	28,30	28,20



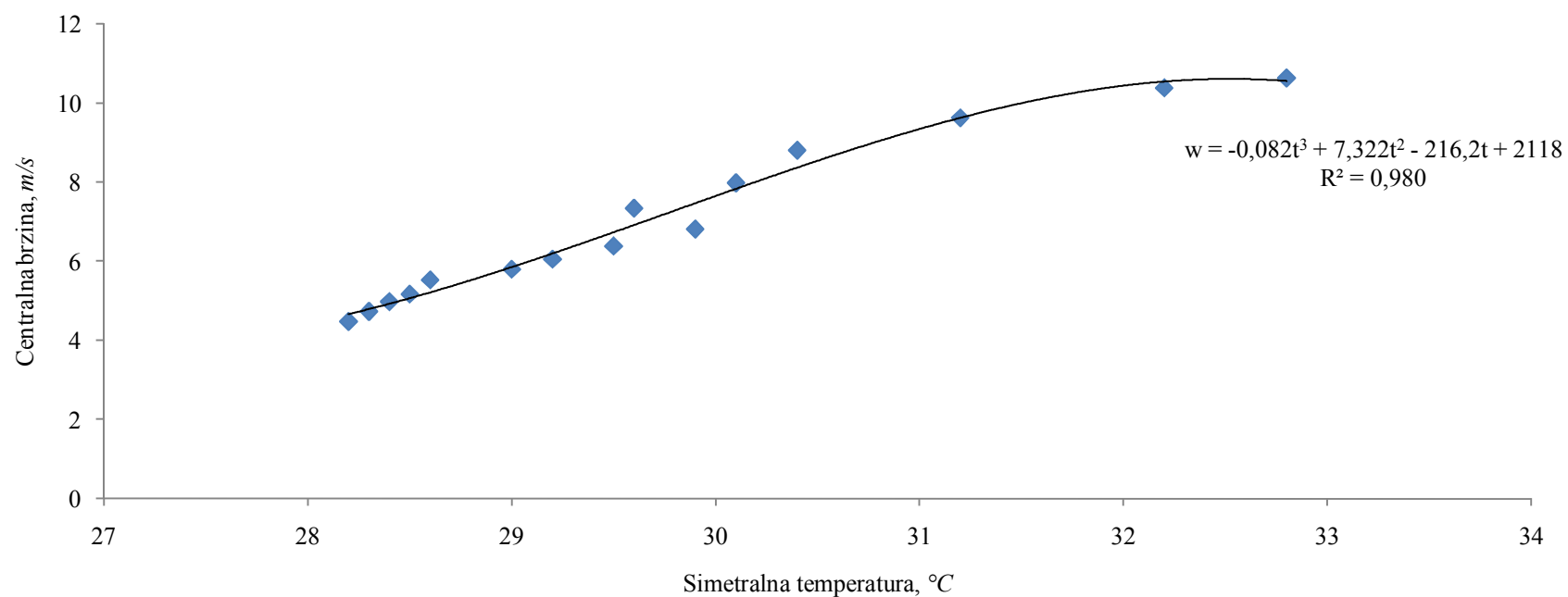
Slika 70. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 71. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 10 m/s.

Tablica 37. Istrujna brzina 10,12 m/s, $t_{ul}=25,82\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temeperature sa poljem brzina.

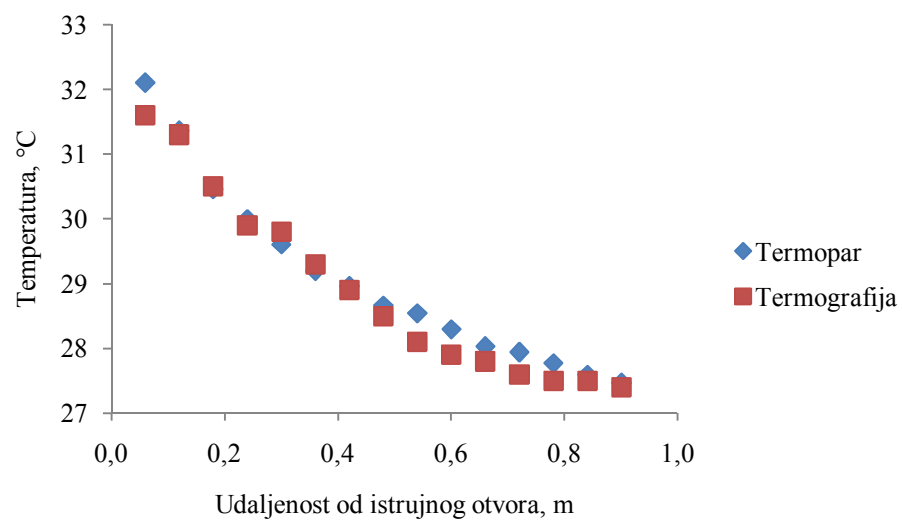
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	10,63	10,39	9,63	8,81	7,98	7,34	6,82	6,39	6,06	5,81	5,54	5,17	4,99	4,74	4,49
Temperature (termokamera)	32,80	32,20	31,20	30,40	30,10	29,60	29,90	29,50	29,20	29,00	28,60	28,50	28,40	28,30	28,20



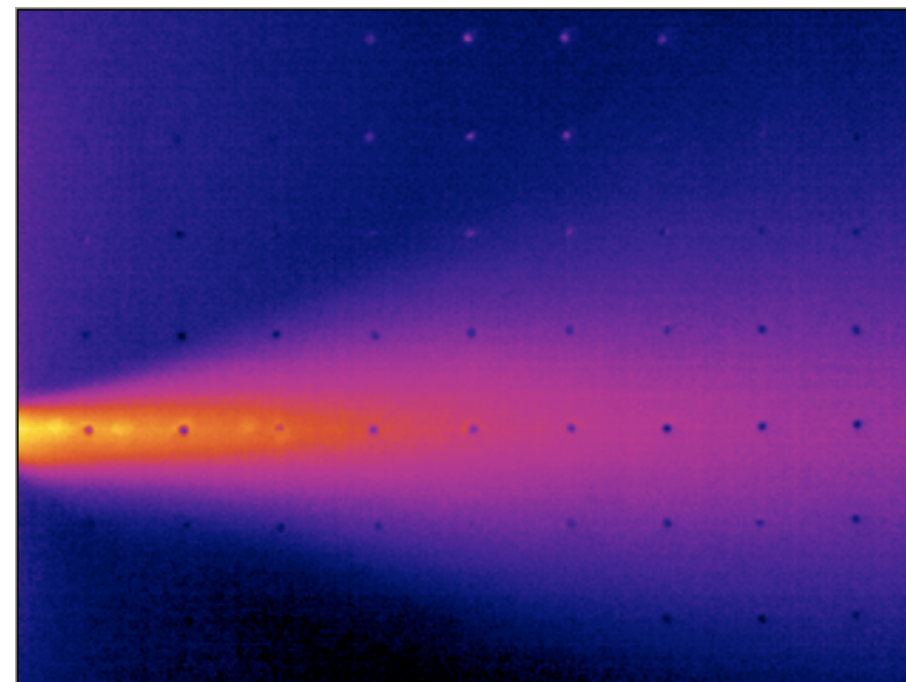
Slika 72. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 38. Istrujna brzina 9,01 m/s, $t_{ul}=24,56\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	32,11	31,36	30,46	30,00	29,61	29,20	28,96	28,66	28,55	28,30	28,04	27,95	27,77	27,60	27,47
Termokamera	31,60	31,30	30,50	29,90	29,80	29,30	28,90	28,50	28,10	27,90	27,80	27,60	27,50	27,50	27,40



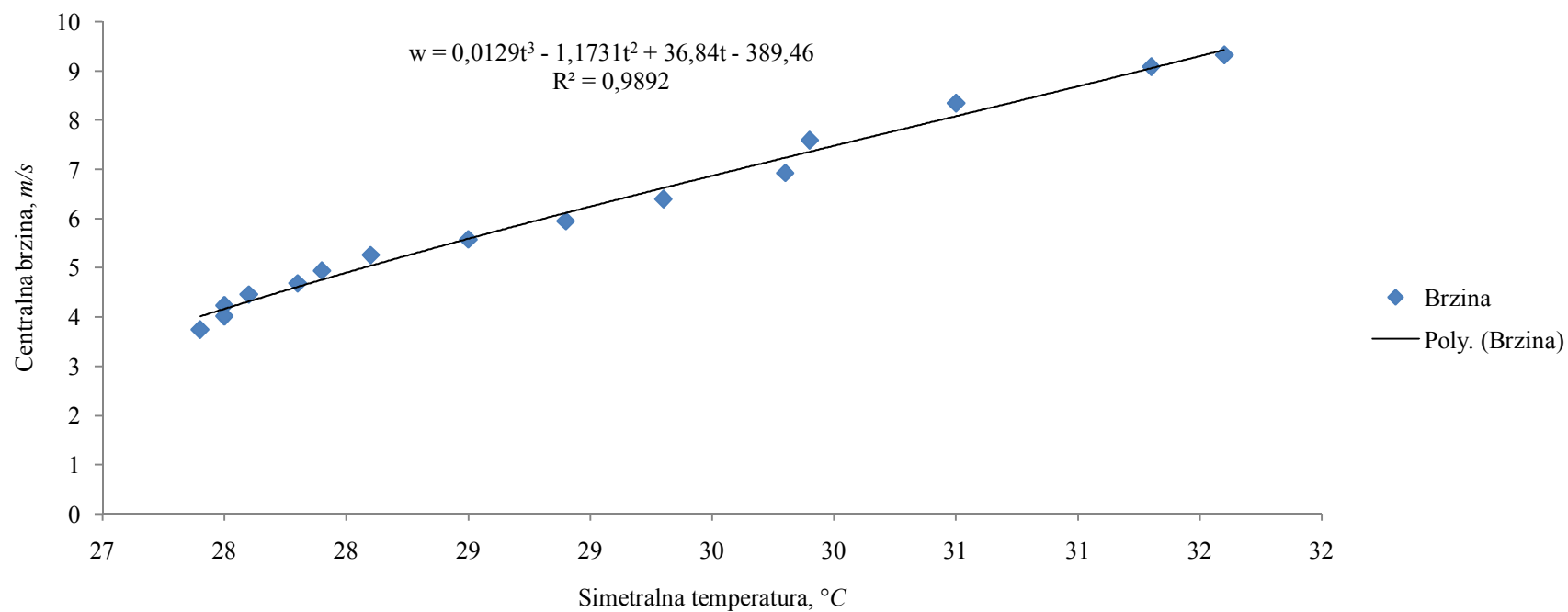
Slika 73. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 74. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 9 m/s.

Tablica 39. Istrujna brzina 9,01 m/s, $t_{ul}=24,56\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

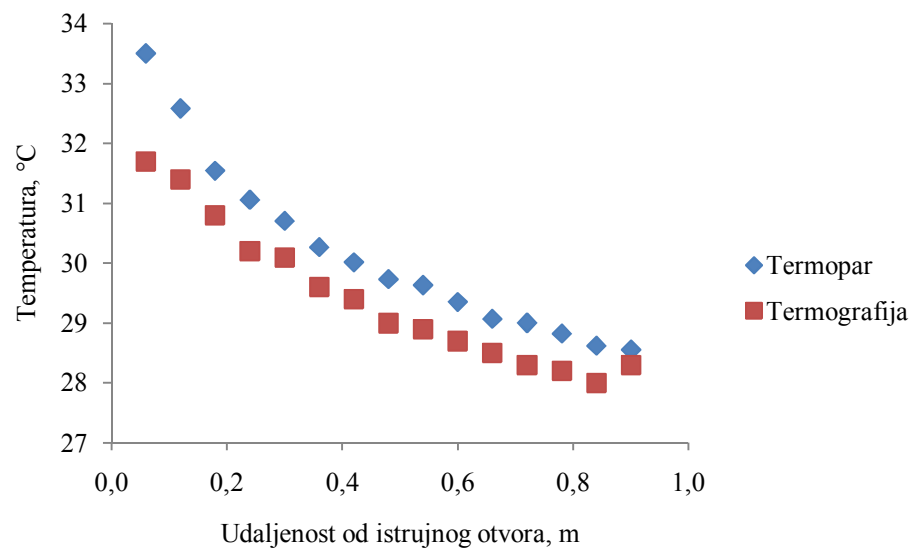
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	9,33	9,09	8,35	7,59	6,93	6,40	5,95	5,58	5,26	4,94	4,68	4,46	4,24	4,02	3,75
Temperature (termokamera)	31,60	31,30	30,50	29,90	29,80	29,30	28,90	28,50	28,10	27,90	27,80	27,60	27,50	27,50	27,40



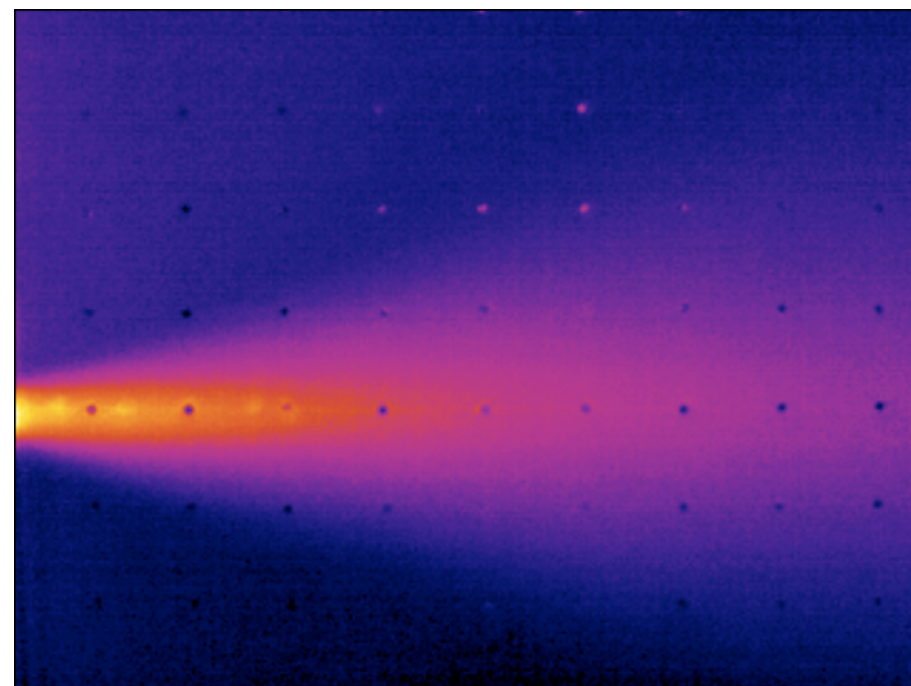
Slika 75. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 40. Istrujna brzina 8,08 m/s, $t_{ul}=25,53\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,66\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,51	32,59	31,55	31,06	30,71	30,27	30,02	29,73	29,64	29,35	29,07	29,01	28,82	28,62	28,56
Termokamera	31,70	31,40	30,80	30,20	30,10	29,60	29,40	29,00	28,90	28,70	28,50	28,30	28,20	28,00	28,30



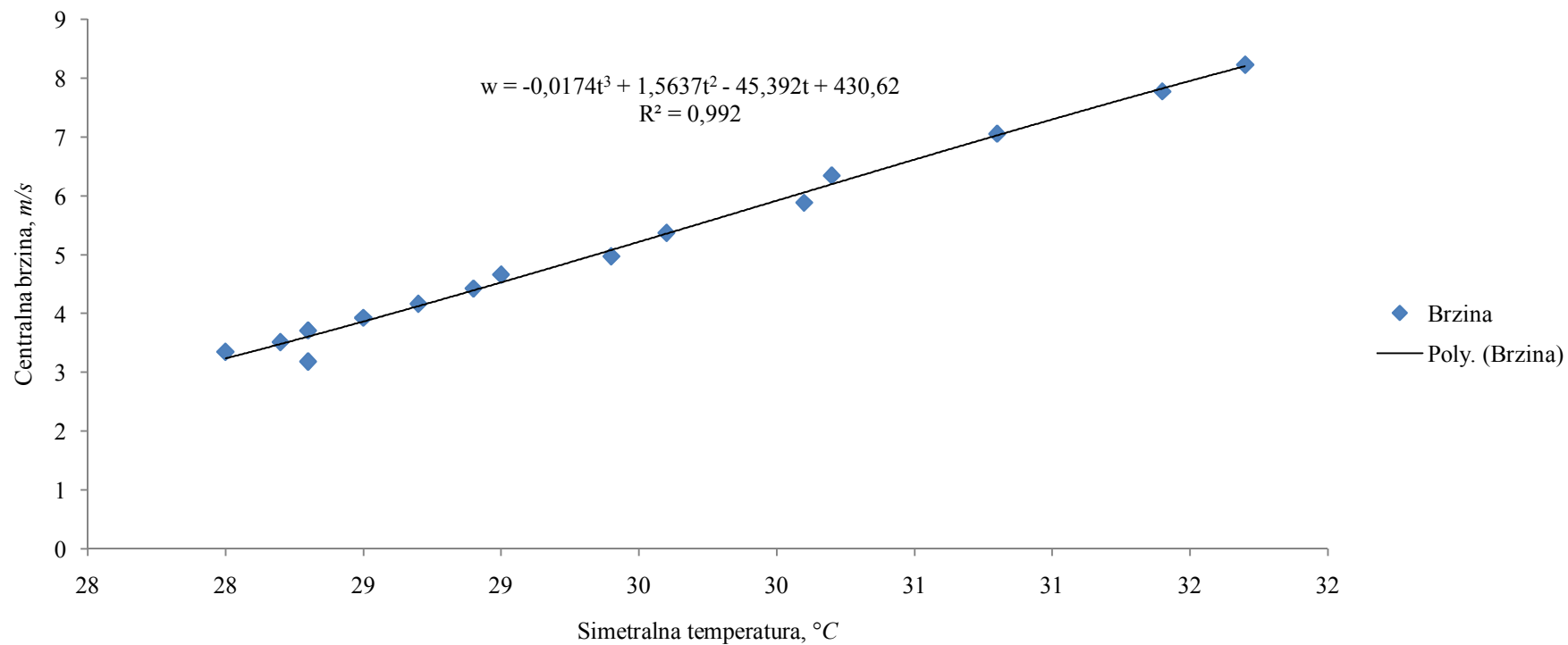
Slika 76. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 77. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 8 m/s.

Tablica 41. Istrujna brzina 8,08 m/s, $t_{ul}=25,53\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,66\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

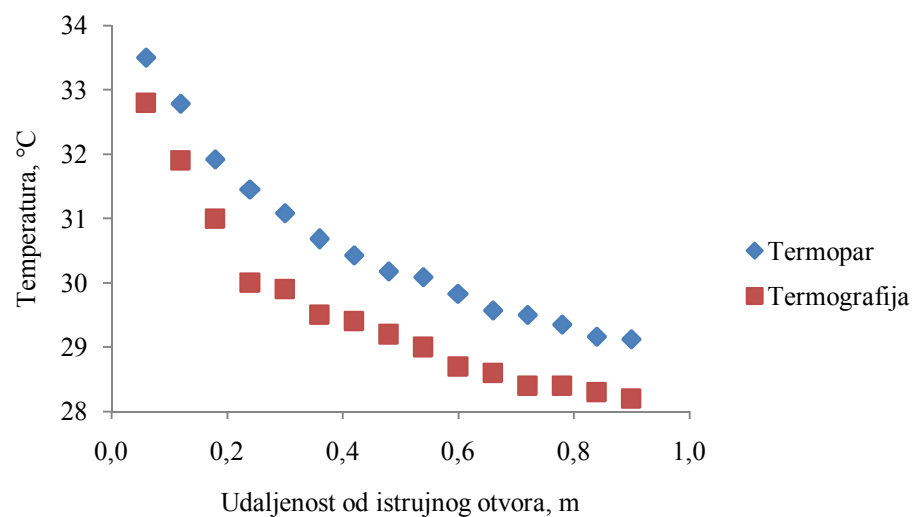
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	8,23	7,78	7,06	6,35	5,89	5,37	4,97	4,66	4,43	4,17	3,93	3,71	3,51	3,35	3,18
Temperature (termokamera)	31,70	31,40	30,80	30,20	30,10	29,60	29,40	29,00	28,90	28,70	28,50	28,30	28,20	28,00	28,30



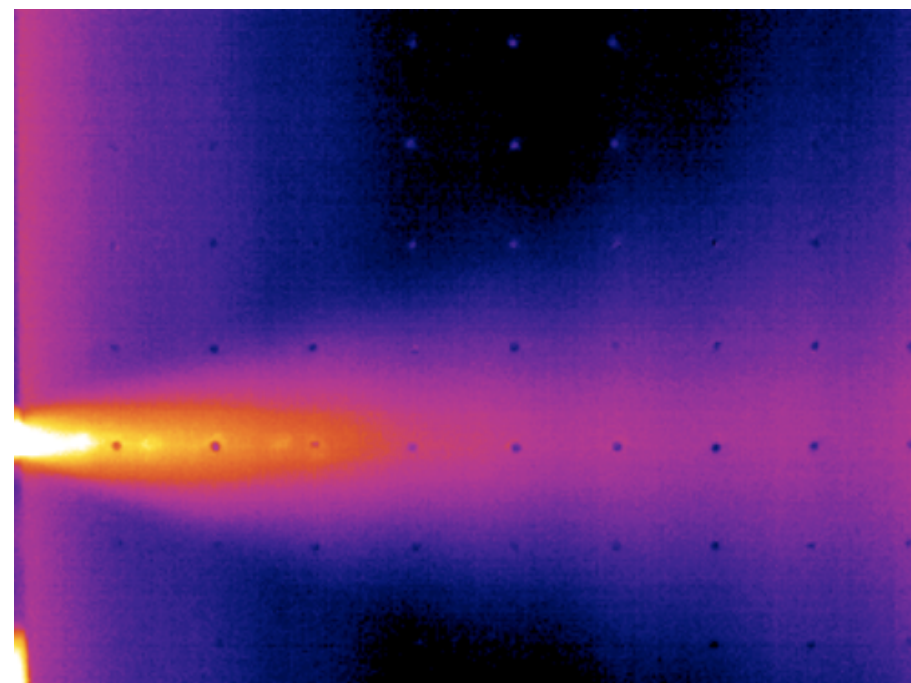
Slika 78. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 42. Istrujna brzina 7,03 m/s, $t_{ul}=26,52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,50	32,79	31,92	31,46	31,08	30,68	30,43	30,18	30,09	29,83	29,57	29,51	29,35	29,17	29,13
Termokamera	32,80	31,90	31,00	30,00	29,90	29,50	29,40	29,20	29,00	28,70	28,60	28,40	28,40	28,30	28,20



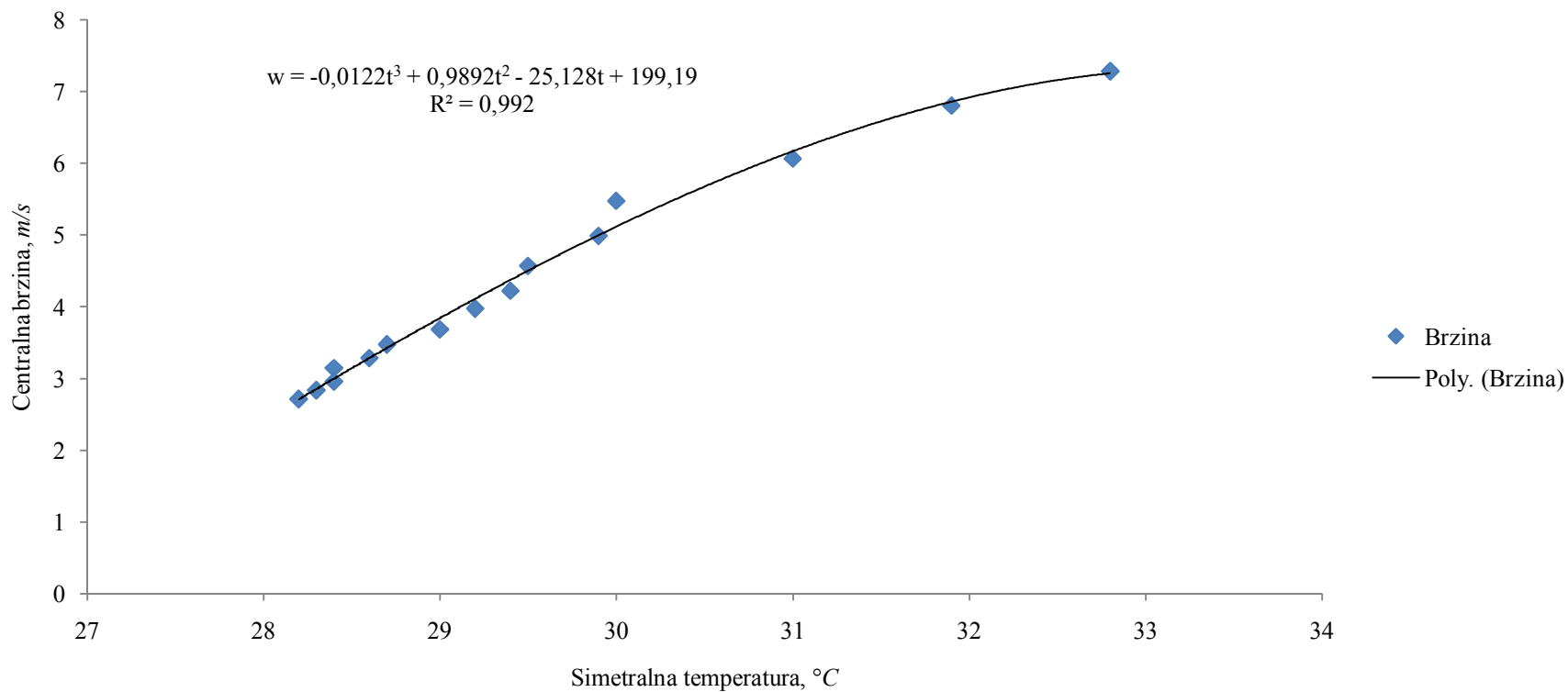
Slika 79. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 80. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 7 m/s.

Tablica 43. Istrujna brzina 7,03 m/s, $t_{ul}=26,52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=7,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

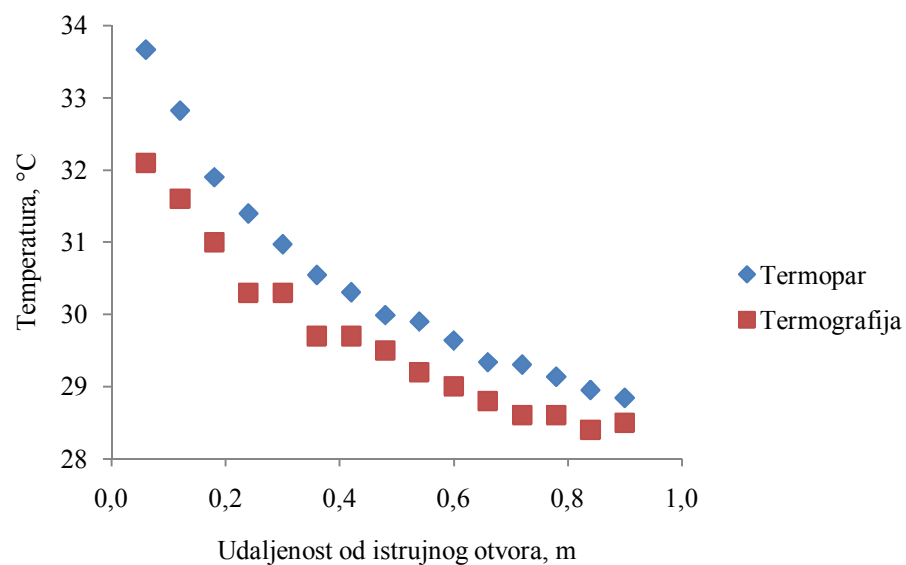
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	7,29	6,81	6,07	5,48	4,99	4,57	4,23	3,98	3,69	3,48	3,29	3,15	2,96	2,84	2,72
Temperature (termokamera)	32,80	31,90	31,00	30,00	29,90	29,50	29,40	29,20	29,00	28,70	28,60	28,40	28,40	28,30	28,20



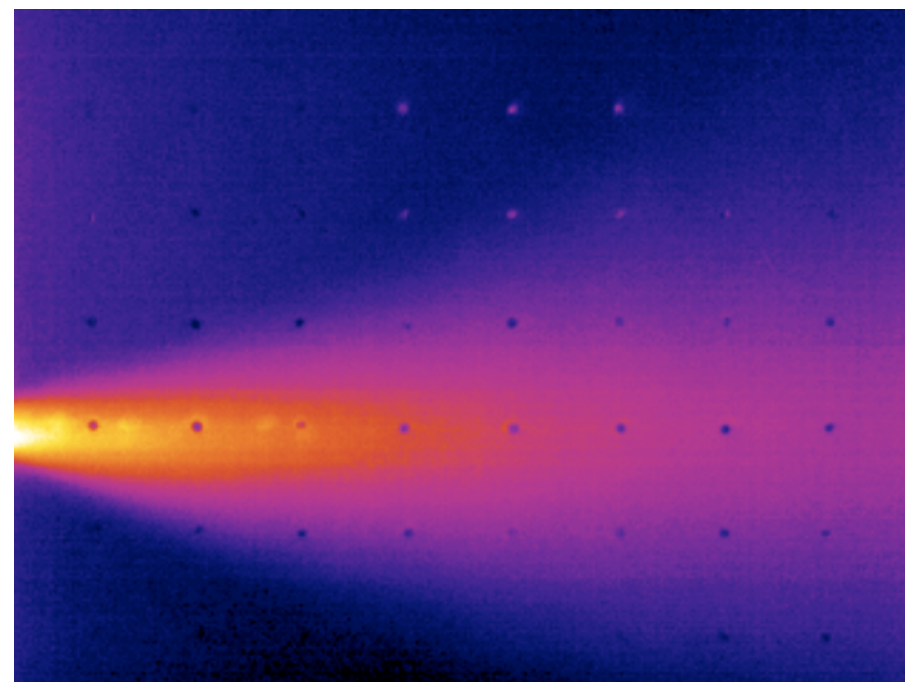
Slika 81. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 44. Istrujna brzina 6,12 m/s, $t_{ul}=26,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,39\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,67	32,82	31,90	31,40	30,98	30,55	30,31	29,99	29,90	29,64	29,34	29,31	29,14	28,96	28,85
Termokamera	32,10	31,60	31,00	30,30	30,30	29,70	29,70	29,50	29,20	29,00	28,80	28,60	28,60	28,40	28,50



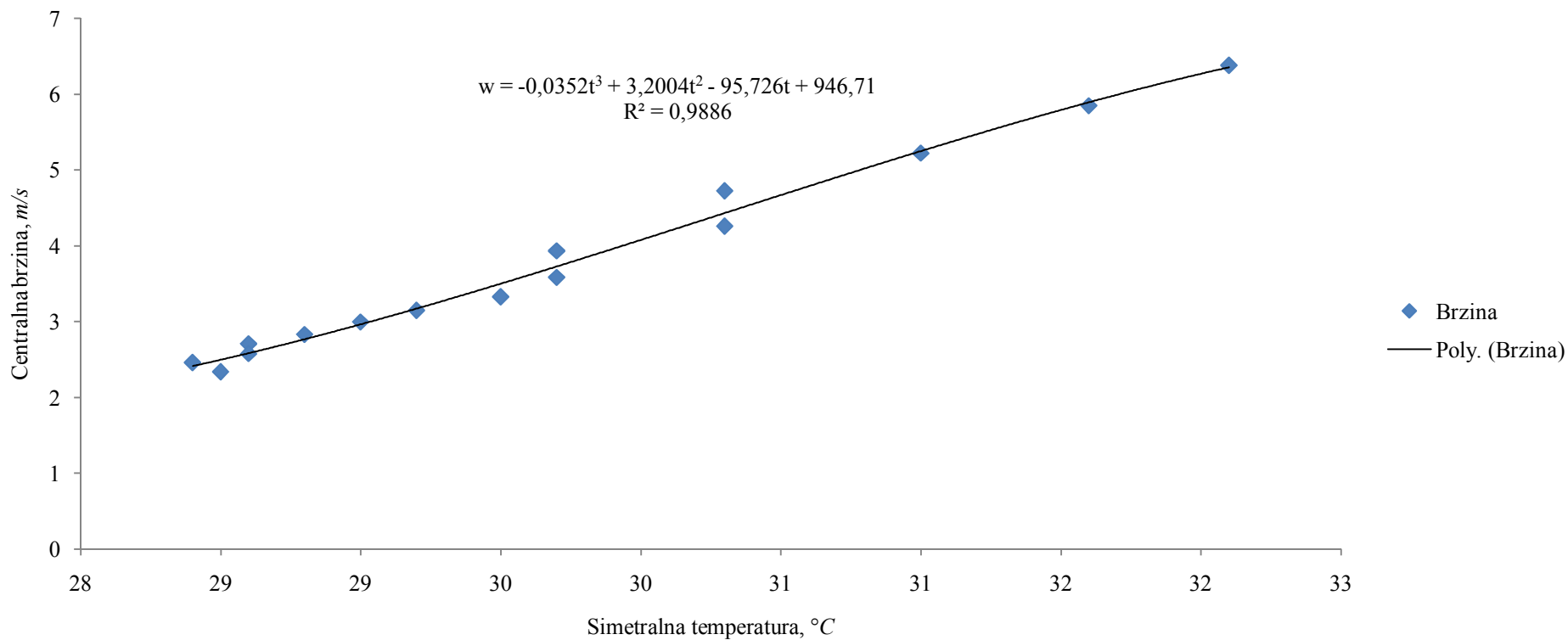
Slika 82. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 83. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 6 m/s.

Tablica 45. Istrujna brzina 6,12 m/s, $t_{ul}=26,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,39\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

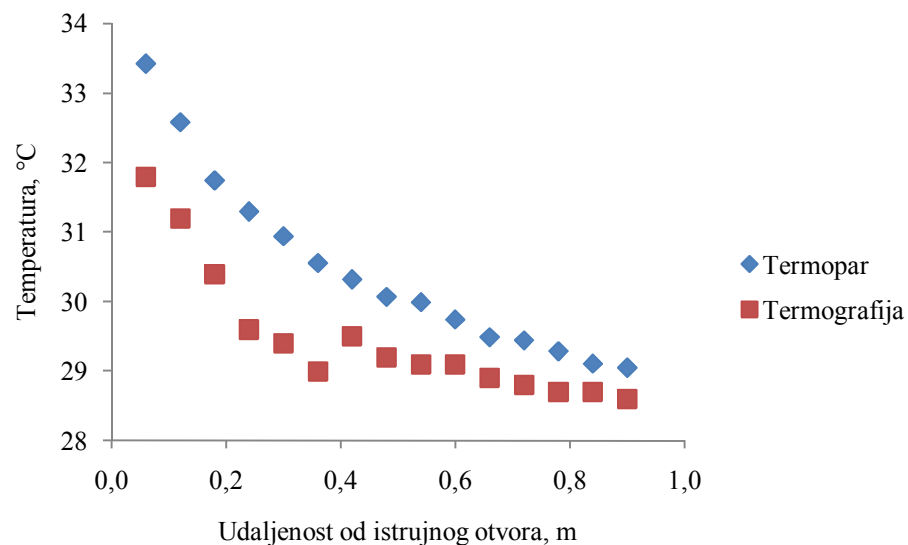
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	6,39	5,85	5,22	4,73	4,26	3,94	3,59	3,33	3,15	3,00	2,83	2,71	2,58	2,46	2,34
Temperature (termokamera)	32,10	31,60	31,00	30,30	30,30	29,70	29,70	29,50	29,20	29,00	28,80	28,60	28,60	28,40	28,50



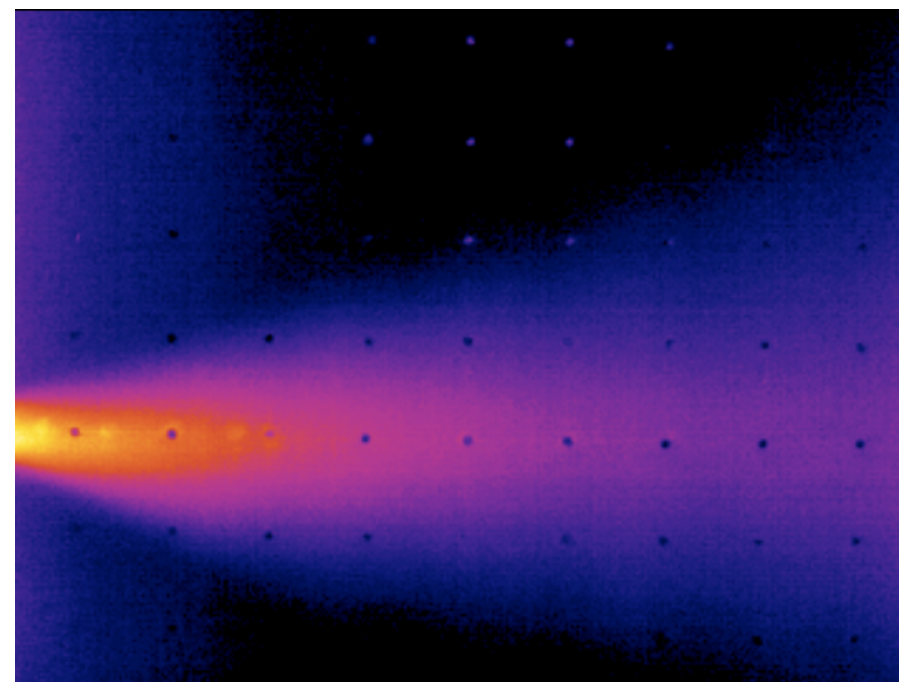
Slika 84. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 46. Istrujna brzina 5,02 m/s, $t_{ul}=26,38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,43	32,58	31,75	31,30	30,94	30,56	30,32	30,07	29,99	29,74	29,49	29,44	29,28	29,10	29,05
Termokamera	31,80	31,20	30,40	29,60	29,40	29,00	29,50	29,20	29,10	29,10	28,90	28,80	28,70	28,70	28,60



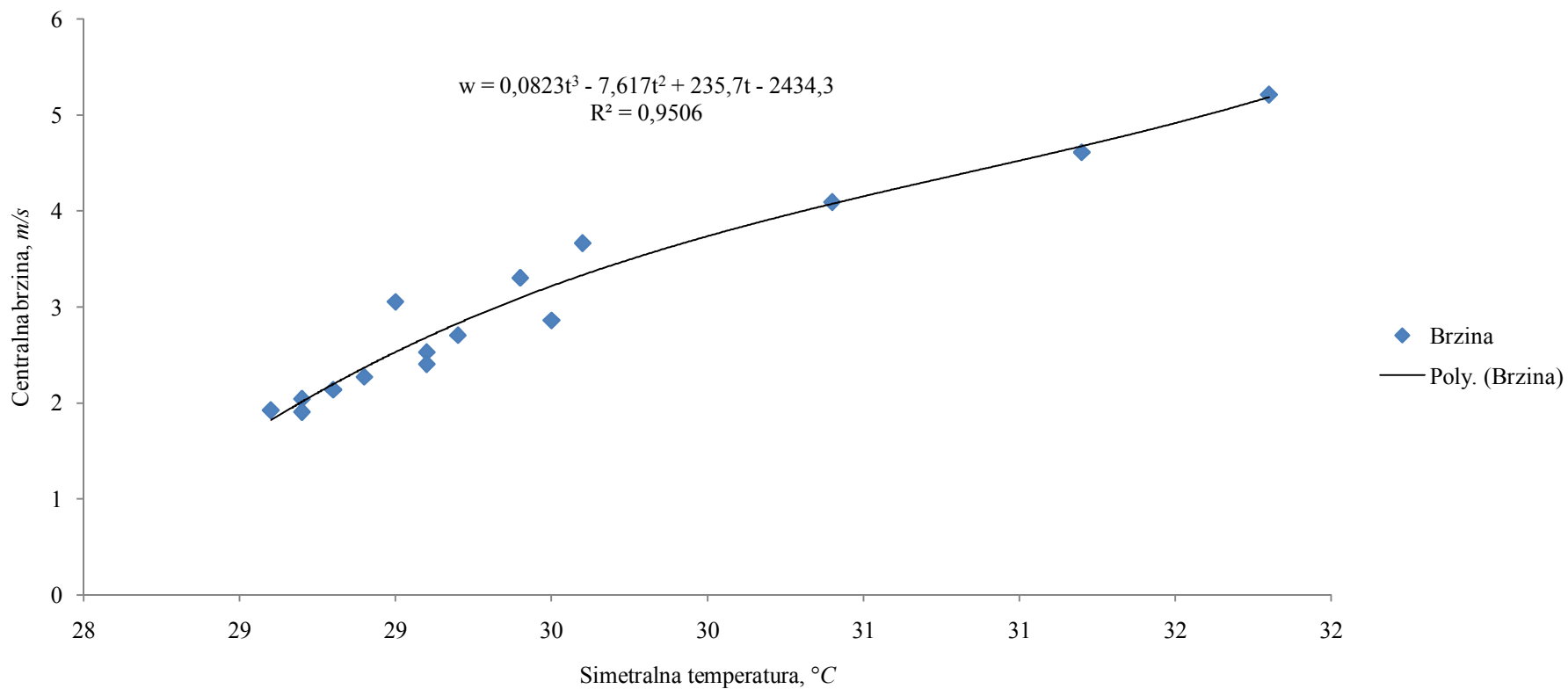
Slika 85. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 86. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 5 m/s.

Tablica 47. Istrujna brzina 5,02 m/s, $t_{ul}=26,38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

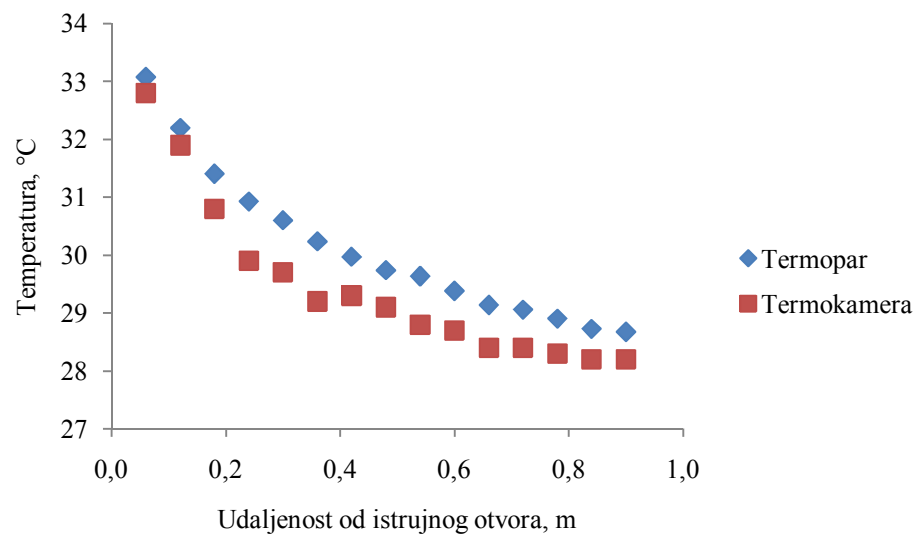
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	5,21	4,61	4,09	3,67	3,31	3,06	2,86	2,71	2,53	2,41	2,27	2,14	2,04	1,91	1,93
Temperature (termokamera)	31,80	31,20	30,40	29,60	29,40	29,00	29,50	29,20	29,10	29,10	28,90	28,80	28,70	28,70	28,60



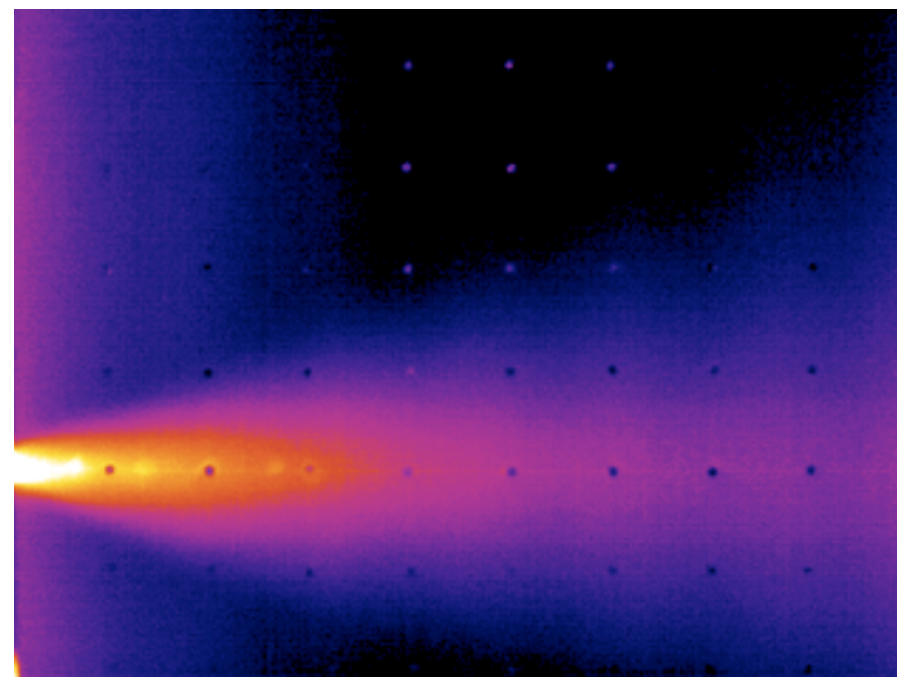
Slika 87. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 48. Istrujna brzina 4,01 m/s, $t_{ul}=26,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,08	32,21	31,41	30,93	30,61	30,24	29,98	29,74	29,64	29,39	29,14	29,06	28,91	28,73	28,68
Termokamera	32,80	31,90	30,80	29,90	29,70	29,20	29,30	29,10	28,80	28,70	28,40	28,40	28,30	28,20	28,20



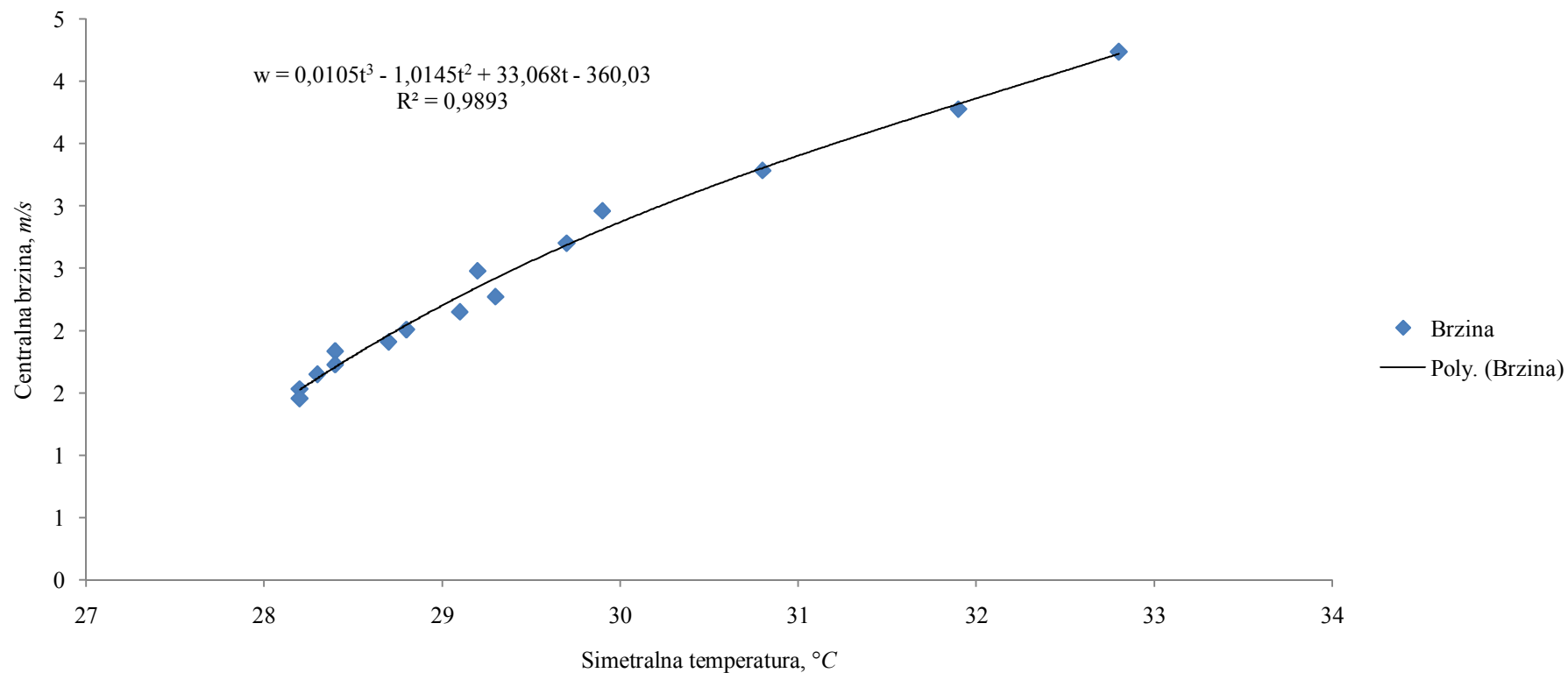
Slika 88. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 89. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 4 m/s.

Tablica 49. Istrujna brzina 4,01 m/s, $t_{ul}=26,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temeprature sa poljem brzina

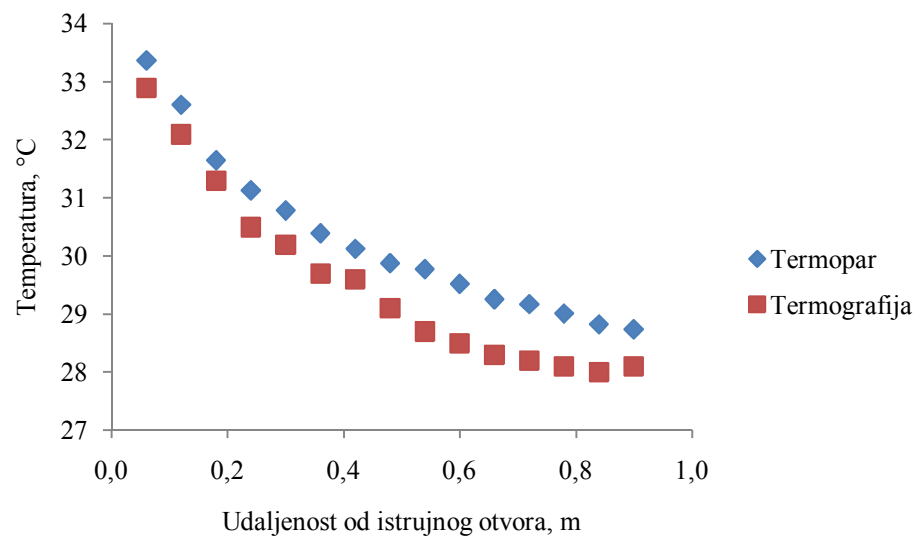
Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	4,24	3,78	3,29	2,96	2,70	2,48	2,27	2,15	2,01	1,91	1,84	1,73	1,65	1,53	1,46
Temperature (termokamera)	32,80	31,90	30,80	29,90	29,70	29,20	29,30	29,10	28,80	28,70	28,40	28,40	28,30	28,20	28,20



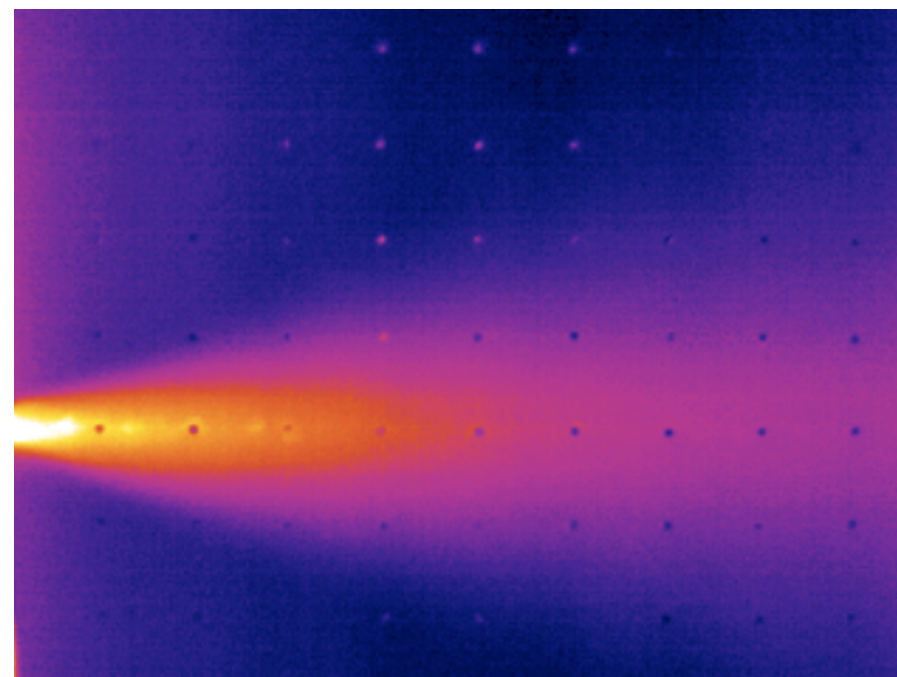
Slika 90. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

Tablica 50. Istrujna brzina 3,07 m/s, $t_{ul}=26,17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,27\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperature

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Termoparovi	33,36	32,60	31,65	31,13	30,78	30,39	30,12	29,88	29,78	29,52	29,26	29,17	29,01	28,82	28,74
Termokamera	32,90	32,10	31,30	30,50	30,20	29,70	29,60	29,10	28,70	28,50	28,30	28,20	28,10	28,00	28,10



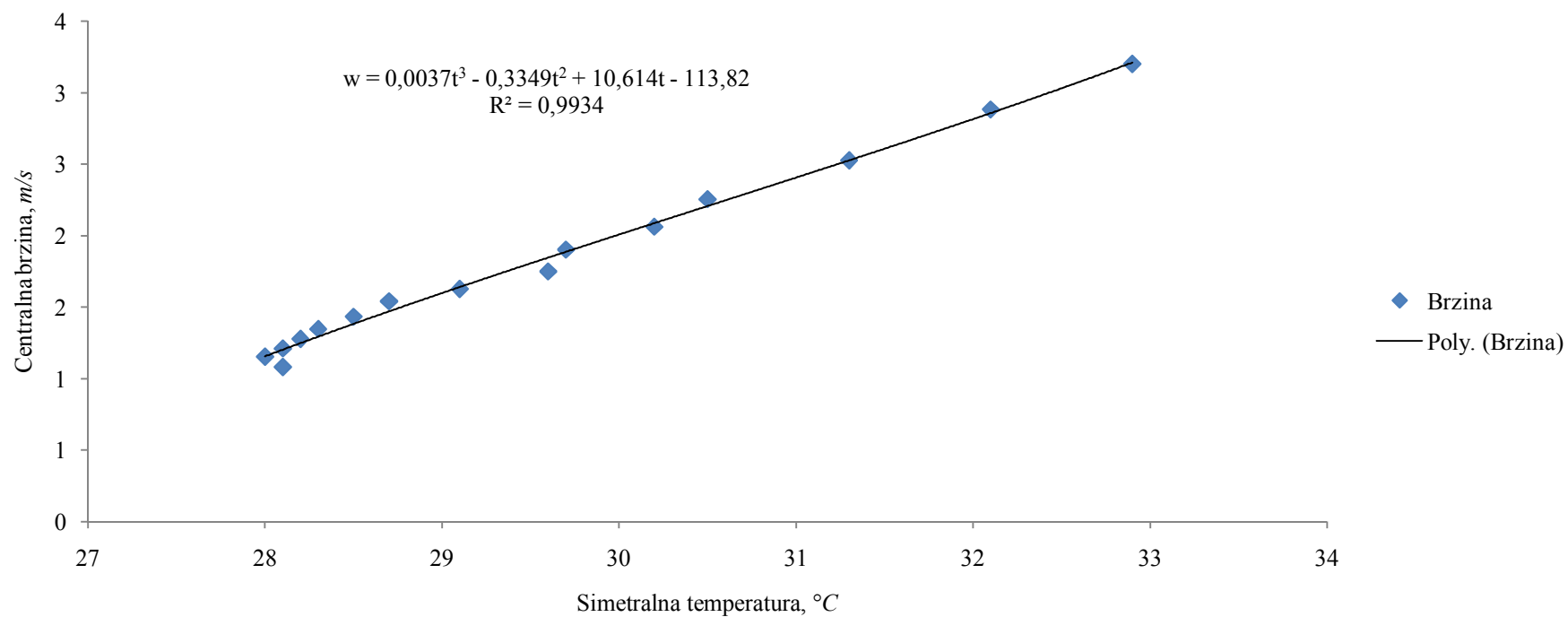
Slika 91. Usporedba vrijednosti temperatura dobivenih termokamerom sa vrijednostima dobivenim termoparovima



Slika 92. Termogram zračnog mlaza pri istrujnoj brzini 3 m/s.

Tablica 51. Istrujna brzina 3,07 m/s, $t_{ul}=26,17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt=8,27\text{ }^{\circ}\text{C}$, funkcijska veza polja temperature sa poljem brzina

Metoda	Udaljenost od istrujnog otvora, m														
	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9
Brzine	3,20	2,88	2,53	2,25	2,06	1,90	1,75	1,63	1,54	1,43	1,35	1,28	1,21	1,15	1,08
Temperature (termokamera)	32,90	32,10	31,30	30,50	30,20	29,70	29,60	29,10	28,70	28,50	28,30	28,20	28,10	28,00	28,10



Slika 93. Brzine u funkciji temperature. Polinom za udaljenosti od otvora do 0,9 m

LITERATURA

- [1] Balen, Igor; **Sustavi ventilacije i klimatizacije**, Priručnik za energetska certificiranje zgrada, Zagreb, 2010.
- [2] Galović, Antun: **Termodinamika II**, IV. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [3] Virag, Zdravko; **Mehanika fluida II**, Predavanja, FSB, Zagreb
- [4] H. Schlichting, **Boundary Layer Theory**, McGraw-Hill Book Company inc., New York, 1960.
- [5] Hinze, J.O.: **Turbulence**, McGraw-Hill Book Company inc., New York, 1987.
- [6] Awbi, H.B. **Ventilation of Buildings**, Chapman & Hall, London, 1991.
- [7] E. Recknagel, H.W. Sprenger, **Taschenbuch für Heizung – und Klimatechnik**, Munchen: R. Oldenbourg Verlag, 2005.
- [8] Z. Yue; **Air jets in ventilation applications**, Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2001.
- [9] R. S. Miller; **Numerical Simulation of Non-circular Jets**, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Buffalo USA, 1994.
- [10] Nicholas Trentacoste and Pasquale M. Sforza; **Some remarks on three-dimensional wakes and jets**, Polytechnic institute of Brooklyn, 1968.
- [11] Džijan, Ivo; **Numerička metoda za analizu strujanja fluida na nestrukturiranoj mreži**, Doktorski rad, Zagreb, 2004.
- [12] Daan. W.L. Jansen; **Boundary conditions for natural supply ventilation**, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2007.
- [13] Andrassy M., Boras I., Švaić S., **Osnove termografije s primjenom**, Kigen d.o.o., Zagreb, 2008.
- [14] Džijan, Ivo; **Računalna dinamika fluida**, FSB, Zagreb, 2010.
- [15] Ratimir Žanetic; Stipišić Renato; **Mjerni pretvornici u procesnoj industriji**, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2005.
- [16] Ravinesh Deo; **Experimental investigations of the influence of Reynolds number and boundary conditions on a plane air jet**, The University of Adelaide, Australia, 2005.
- [17] B. Regenscheit; **Berechnung for radial stormenden Frei- und Wandstrahlen, sowie von Rechteckstrahlen**, Gesundheits-ingenieur, 1971.

- [18] Smoljan, Darko; **Razvoj matematičkog modela za ocjenu toplinske ugodnosti u spojenom mlazu**, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [19] Amer Soc of Heating, Refrigerating & A-C Engineers **ASHRAE Handbook Fundamentals (SI Edition)**, Atlanta, 2001.
- [20] Vuković, B.; **Praktikum iz osnova fizike I**, Fakultet elektrotehnike i računalstva, Zagreb, 2006.
- [21] ANSYS FLUENT 12.0, **Theory Guide**, ANSYS, Inc. 2009.
- [22] ANSYS FLUENT 12.0, **User's Guide**, ANSYS, Inc. 2009.
- [23] Cengel, Yunus; **Heat Transfer: A practical approach**; McGraw-Hill Company, New York, 2002.
- [24] Sarapa, Nikola; **Teorija vjerojatnosti**; Školska knjiga, Zagreb, 2002.
- [25] Mohammed Hamed Alnahhal; **Turbulent rectangular jets**; University of Patras, Patras, 2010.
- [26] Joseph H. W. Lee, Vincent H. Chu; **Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach**; Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [27] Ronald L. Panton; **Incompressible Flow**; John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [28] S.S. Aloysius, L. C. Wrobel; **Comparison of Flow and Dispersion Properties of Free and Wall Turbulent Jets for Source Dynamic Characterisation**, Brunel University, 2009.
- [29] Adrian Bejan, Allan D. Kraus; **Heat Transfer Handbook**; John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- [30] Boris Labudović; **Priručnik za klimatizaciju i ventilaciju**; Energetika marketing, Zagreb, 2000.

SAŽETAK

Cilj rada je dati korelaciju između teorije, eksperimenta i numerike za neizotermni mlaz zraka koji struji iz pravokutnog otvora sustava grijanja, ventilacije ili klimatizacije (GVK). Teoretski dio preuzet je iz literature dok su se eksperimentalno određivale brzine zraka anemometrijom, temperature termografijom i termoparovima a numerikom je simuliran mlaz.

Radom su obuhvaćeni svi parametri koji karakteriziraju mlaz. Teorijska, eksperimentalna i numerička analiza primijenjene su na dva istrujna otvora dimenzija 140x9 mm i 140x18 mm (širina x visina).

Eksperiment je pokazao mogućnost uspješne primjene termografije za određivanje karakteristika mlaza a što je potvrđeno mjerenjima preko termoparova. Za svaku brzinu istrujavanja napravljena je funkcijska veza temperature i brzine u mlazu što je potvrđeno kasnije numerikom.

Numerička simulacija rađena je u softveru Fluent 12.0.6 gdje je problem riješen pomoću modela turbulencije k-ε. Simulacija je pokazala dobro poklapanje s teoretskim i eksperimentalnim rezultatima. Na osnovi provedenih istraživanja može se zaključiti da je dobiveno dovoljno elemenata koji ukazuju na podobnost korištene metode u procesu razvoja novih istrujnih otvora za GVK uz znatno manji broj eksperimenata.

Ključne riječi: neizotermni zračni mlaz, stupanj miješanja, IC termografija, računalna dinamika fluida

SUMMARY

The goal of the work was to find the correlation between theory, experiment and numerical simulation for non isothermal air jet streaming from the rectangular outlet aimed for heating ventilating and air conditioning systems (HVAC).

Theoretical part of the work is based on the data taken from literature, while the velocities in the jet stream were measured by anemometry and temperatures by means of thermography and thermocouples. The characteristic of the jet was simulated by means of software FLUENT.

In the study the whole characteristics of the air jet were taken into account. Theoretical, experimental and numerical analysis were performed on two outlets having dimensions 180x9 mm and 180x18 mm (width x high).

It was shown during the experimental work that thermography is very successful method for determination the jet characteristic which was validated by measurements with thermocouples.

For each outlet velocity the correlation with temperature was found and the results were confirmed by numerical analysis. Numerical analysis was performed in software FLUENT 12.0.6 and the problem has been solved using model of turbulence k-ε.

It can be concluded that the researches carried out gives enough elements which shows the advantages of the methods applied and which can be used in the process of design of the new air outlets in HVAC systems.

Key words: non-isothermal air jet, mixing number, infra-red thermography, CFD

Izražavamo zahvalnost svima koji su pripomogli izradi ovoga rada i bili poticaj u teškim trenucima.