

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Dajana Benković

**Razvoj novog rubnog uvjeta za
opisivanje procesa ubrizgavanja
kapljevito goriva**

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je napravljen na Katedri za energetska postrojenja i energetiku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom dr. sc. Zvonimira Petranovića i mentorstvom doc. dr. sc. Milana Vujanovića, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Dajana Benković

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina mlaznice
C	-	Konstanta modela turbulencije
CA	$^\circ$	Stupanj zakreta vratila
d	m	Promjer
f	N	Masena sila
f	m^2	Površina elementa
f_{fac}	-	Faktor mase
F_{idr}	N	Sila otpora
h	J/kg	Specifična entalpija
h_{fm}	m	Visina lokalnih gubitaka
H_{kl}	(J kg)/s	Izvorski član uslijed izmjene energije u kontrolnom volumenu
k	m^2/s^2	Turbulentna kinetička energija
K	-	Koeficijent kontrakcije
L	m	Turbulentna dužina
\dot{m}	kg/s	Maseni protok
m_1	kg/s	Maseni protok faze 1
m_2	kg/s	Maseni protok faze 2
m_3	kg/s	Maseni protok faze 3
m_{flux}	kg/(s m^2)	Fluks mase
m_{inj}	kg	Ukupna ubrizgana masa
m_p	kg	Masa parcele
\dot{M}	kg/(s m^2)	Fluks mase
M_{kli}	(kg m)/s	Izvorski član uslijed izmjene količine gibanja u kontrolnom volumenu
n, N	-	Broj elemenata
p	Pa	Tlak

Dajana Benković

P_k	J/kg	Proizvodnja turbulentne kinetičke energije
q	W/m ²	Toplinski tok
q_T	W/m ²	Turbulentni toplinski tok
S_1, S_2	-	Atributi strujanja
s_{ROI}	kg	Površina ispod ROI krivulje
S_φ	Promjenjiva	Izvorski član
t	s	Vrijeme
t_{fac}	-	Faktor vremena
T	s	Turbulentno vrijeme
T	K	Temperatura
u_{id}	m/s	Brzina čestice
u, v, w	m/s	Komponente brzine
v_{Ni}	m/s	Normalna komponenta brzine
V	m/s	Apsolutna brzina
$x_{cen}, y_{cen}, z_{cen}$	-	Koordinate središta elementa
$x_{nor}, y_{nor}, z_{nor}$	-	Koordinate vektora normale elementa
α	-	Volumni udio
α_{drop}	-	Volumni udio kapljica
α_{gas}	-	Volumni udio plinovite faze
α_{bl}	-	Volumni udio neraspršene kapljevine
α_{corr}	-	Faktor korekcije volumnog udjela
Γ	Promjenjiva	Difuzijski koeficijent
Γ_{kl}	kg/s	Izvorski član uslijed izmjene mase u kontrolnom volumenu
ε	m ² /s ³	Brzina disipacije turbulentne kinetičke energije
Σ_{ij}	N/m ²	Tenzor viskoznih naprezanja
μ	Pa s	Dinamička viskoznost
μ_t	Pa s	Turbulentna dinamička viskoznost
ν	m ² /s	Kinematička viskoznost

Dajana Benković

ν_t	m^2/s	Kinematička viskoznost vrtloga
ρ	kg/m^3	Gustoća
ρ_{liq}	kg/m^3	Gustoća kapljevite faze
φ, Φ	Promjenjiva	Proizvoljna skalarna veličina
χ	-	Podrelaksacijski faktor
ζ	-	Omjer brzine

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	VII
POPIS TABLICA.....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Brizgaljka dizelskog motora	3
1.2. Osnove računalne dinamike fluida.....	4
2. HIPOTEZA I SPECIJALNI CILJEVI RADA	5
3. NUMERIČKI MODEL	6
3.1. Zakon očuvanja mase.....	6
3.2. Zakon očuvanja količine gibanja	6
3.3. Zakon očuvanja energije	7
3.4. Modeliranje turbulencije	7
3.4.1. $k - \zeta - f$ model turbulencije.....	8
3.5. Euler-Lagrangeovo višefazno strujanje	9
3.6. Euler-Eulerovo višefazno strujanje.....	9
3.7. Model i konfiguracija datoteke s podacima strujanja u mlaznici.....	10
3.8. <i>Rate of Injection</i> - rubni uvjet	12
3.8.1. Određivanje brzine i dijagrama fluksa mase.....	12
3.8.2. Određivanje volumnog udjela kapljevine	14
4. IZRADA MREŽE I NUMERIČKE POSTAVKE SIMULACIJE	16
4.1. Proces ubrizgavanja goriva	16
4.1.1. Izrada mreže.....	16
4.1.2. Rubni uvjeti.....	17
4.1.3. Početni uvjeti	18
4.1.4. Postavke simulacije.....	19
4.2. Proces raspršivanja goriva	20
4.2.1. Euler Lagrangeovo višefazno strujanje.....	21
4.2.1.1. Izrada mreže.....	21
4.2.1.2. Rubni i početni uvjeti.....	21

4.2.1.3. Postavke simulacije.....	21
4.2.2. Euler Eulerovo višefazno strujanje	22
4.2.2.1. Izrada mreže.....	22
4.2.2.2. Rubni i početni uvjeti.....	23
4.2.2.3. Postavke simulacije.....	23
5. REZULTATI I RASPRAVA.....	25
5.1. Proces ubrizgavanja goriva	25
5.2. Euler Lagrangeovo višefazno strujanje.....	29
5.3. Euler Eulerovo višefazno strujanje	30
5.3.1. Pretpostavka početne brzine.....	32
6. ZAKLJUČCI.....	38
PRILOZI.....	40
ZAHVALE	47
POPIS LITERATURE	48
SAŽETAK.....	51
SUMMARY	53

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Oblici profila ROI [8].....	1
Slika 1.2	Geometrija vrha brizgaljke dizelskog motora [25,26].....	3
Slika 2.1	Dijagram toka provedenog istraživanja.....	5
Slika 3.1	Kvalitativan prikaz krivulja procesa ubrizgavanja.....	12
Slika 3.2	Brzina tijekom procesa ubrizgavanja: 1) dosadašnji pristup, 2) novi pristup.....	14
Slika 4.1	a) 2D mreža s proizvoljnom distribucijom ćelija, b) Ukupna volumna mreža.....	17
Slika 4.2	Prikaz selekcija za rubne uvjete.....	18
Slika 4.3	Prikaz inicijalizacije kapljevine kod posebnih početnih uvjeta.....	19
Slika 4.4	Cilindrična volumna mreža.....	21
Slika 4.5	Volumna mreža za simulaciju Euler Eulerovog spreja s pripadnim selekcijama.....	23
Slika 5.1	Brzina kapljevite faze goriva za različite početne uvjete inicijalizacije kapljevine.....	25
Slika 5.2	Volumni udio kapljevite faze goriva za različite početne uvjete inicijalizacije kapljevine.....	26
Slika 5.3	Fluks mase kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva.....	27
Slika 5.4	Prosječni volumni udio kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva.....	28
Slika 5.5	Brzina kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva.....	28
Slika 5.6	Razvoj spreja u početnoj fazi procesa ubrizgavanja za različite početne uvjete inicijalizacije goriva.....	29
Slika 5.7	Volumni udio kapljevite faze goriva dobiven Euler Eulerovim pristupom koristeći *.nzf datoteku kao početni uvjet za različite početne uvjete inicijalizacije goriva.....	30
Slika 5.8	Krivulja brzine ubrizgavanja goriva kroz izlazni presjek mlaznice.....	31
Slika 5.9	Volumni udio kapljevite faze goriva za osnovni slučaj a), dobiven Euler Eulerovim pristupom koristeći ulazne podatke iz *.nzf datoteke te iz krivulje ROI.....	31
Slika 5.10	Vektorski prikaz apsolutne brzine tekuće faze u mlaznici.....	32

Slika 5.11	Kvalitativni prikaz pojednostavljene geometrije brizgaljke.....	33
Slika 5.12	Brzina i volumni udio kapljevine za slučaj c) uz korištenje *.nzf datoteke, novog (C ROI _{mod}) i konvencionalnog rubnog uvjeta definiranog ROI krivuljom	35
Slika 5.13	Penetracija kapljevine koristeći volumni udio kao površinski parametar te brzinu kao atribut prikazivanja za slučaj c), koristeći ulazne parametre iz <i>Nozzle file</i> -a, modificiranog te konvencionalnog ROI rubnog uvjeta.....	36

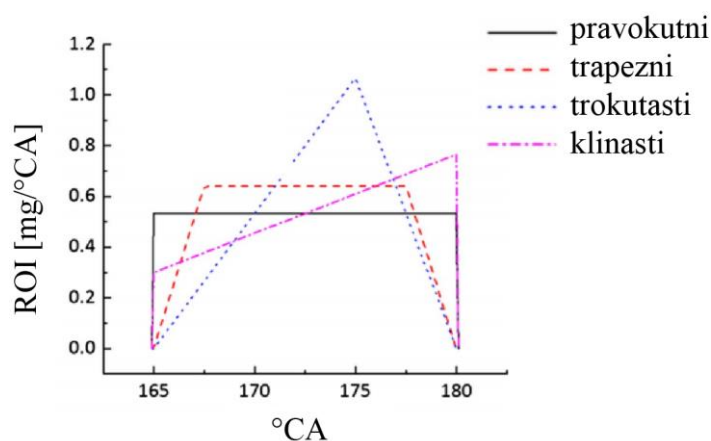
POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Klasifikacija „veličine klasa“ u Euler Eulerovom pristupu.....	10
Tablica 3.2 Svojstva fluida.....	10
Tablica 3.3 Struktura datoteke s podacima strujanja u mlaznici	11
Tablica 4.1 Podrelaksacijski faktori	20
Tablica 4.2 Kriteriji konvergencije	20
Tablica 4.3 Podrelaksacijski faktori za Euler Lagrangeov sprej	22
Tablica 4.4 Kriteriji konvergencije za Euler Lagrangeov sprej	22
Tablica 4.5 Podrelaksacijski faktori za Euler Eulerov sprej	24
Tablica 4.6 Kriteriji konvergencije za Euler Eulerov sprej.....	24

1. UVOD

Kako bi zadovoljili sve strože zahtjeve za smanjenjem emisija te potrošačke zahtjeve za što manjom potrošnjom goriva i povećanom snagom motora, dizelski su motori u konstantnom procesu usavršavanja. Performanse, učinkovitost, buka i emisije štetnih plinova dizelskog motora izravna su posljedica procesa izgaranja. Neposredan utjecaj na svojstva procesa izgaranja dizelskog motora ima način ubrizgavanja goriva čije su osnovne karakteristike brzina ubrizgavanja (engl. *Rate of Injection*, ROI) i ukupna količina goriva ubrizganog u komoru za izgaranje. Ovaj rad bavi se modeliranjem ROI krivulje, a u slijedećem dijelu teksta dan je pregled postojeće literature na tu temu.

U [1] i [2], analizirani su različiti oblici profila brzine ubrizgavanja. Slikom 1.1 dan je prikaz različitih profila ROI. Svaki profil sastoji se od faze otvaranja, stabilizacijske faze te faze zatvaranja. Analizom trajanja pojedinih faza promatrani su utjecaji na proces izgaranja. Nadalje, istraženi su efekti trajanja pojedine faze ubrizgavanja na proces izgaranja. U literaturi [3] i [4], navedeno je kako profili s kratkim trajanjem faze otvaranja te dužom stabilizacijskom fazom, poput pravokutnog i trapeznog profila, imaju najbolji omjer emisije NO_x-a i čađe. Kontrola procesa ubrizgavanja bazira se na ubrizgavanju malih količina goriva u početku samog procesa ubrizgavanja. Također, analizirani su različiti profili ROI-a u [5] i [6] te je utvrđeno da trokutasti profil doseže najvišu temperaturu uslijed velike količine goriva ubrizganog u jednoj točki procesa. Nasuprot tome, klinasti profil ima najnižu temperaturu tijekom čitavog procesa ubrizgavanja. Također, utvrđeno je da je manipulacijom profila brzine ubrizgavanja moguće smanjiti i buku uslijed izgaranja [7].



Slika 1.1 Oblici profila ROI [8]

Mjerenje brzine ubrizgavanja goriva provodi se na komercijalnim ispitnim sustavima od kojih je najpoznatiji IRDCI (engl. *Injection Rate Test Rig*), opisan u [9]. IRDCI sustav utemeljen je na Bosch mjernoj metodi čiji je princip rada zasnovan na mjerenju brzine povećanja tlaka u mjernoj cijevi. Važno je spomenuti i *Hydraulischer Druckanstieg*, HDA (engl. *Hydraulic Pressure Increase*) mjerni uređaj čiji je osnovni princip rada zasnovan na mjerenju razlike tlaka u zatvorenoj komori ispunjenoj fluidom [10]. U osnovi, HDA je unaprijeđen Zeuch-ov mjerni instrument koji osim mjerenja razlike tlaka, mjeri i brzinu zvuka, koja je funkcija tlaka u komori. Dok Zeuch-ova mjerna metoda pretpostavlja konstantnu vrijednost brzine zvuka, HDA direktno mjeri njenu stvarnu vrijednost.

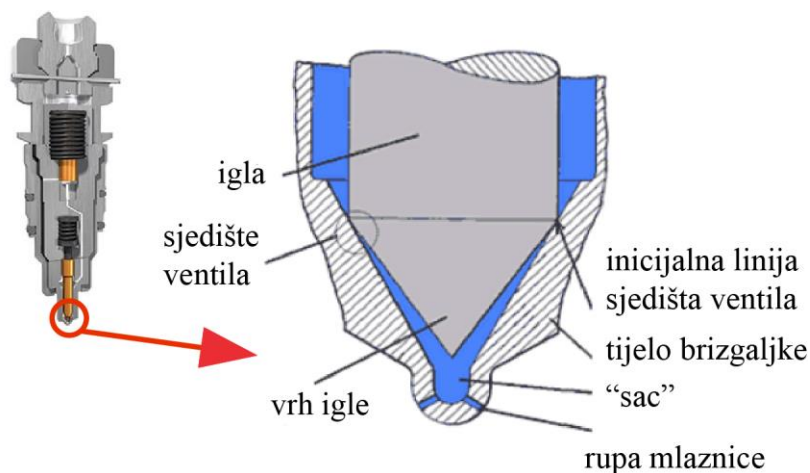
Zeuch i Bosch mjerne metode osnovne su metode mjerenja brzine ubrizgavanja goriva zbog čega služe kao validacijski modeli novijih mjernih metoda. U [11] i [12] je provedena usporedba te dvije metode te za razliku od Bosch mjerne metode, Zeuch metoda pokazuje brže opažanje početka ubrizgavanja kao i jasno određivanje kraja procesa ubrizgavanja. Mjerna metoda temeljena na mjerenju električnog naboja goriva je u [13] uspoređena s Bosch-ovom mjernom metodom te pokazuje dobro podudaranje signala u svim fazama ubrizgavanja osim u završnoj fazi gdje je karakteristika brzine ubrizgavanja „blaža“ u odnosu na Bosch metodu. Glavna prednost te metode je njena jednostavnost i pristupačnost. Razvijena je i deformacijska mjerna metoda [14] s kojom je moguće odrediti brzinu ubrizgavanja za svaku mlaznicu posebno. Princip rada baziran je na mjerenju deformacije membrane uslijed povećanja količine goriva u mjernom prostoru te tlačnih valova koji su posljedica ubrizgavanja goriva u mjerni prostor. Pojava razlike u brzini ubrizgavanja može biti uzrok različitih toplinskih opterećenja na stijenku komore izgaranja.

Na oblik profila brzine ubrizgavanja utječe i geometrija mlaznice te vrsta goriva. Prema [15], provedena su ispitivanja konvergentne i cilindrične mlaznice s varijacijom veličine ulaznog i izlaznog tlaka. U istim uvjetima, cilindrična mlaznica daje veću brzinu ubrizgavanja od konvergentne mlaznice. Kod velike razlike tlaka, u cilindričnoj mlaznici dolazi do gušenja strujanja [16,17]. U [18] su opisani kavitacijski uvjeti konvergentnih mlaznica. Usporedbom različitih vrsta goriva te mješavina goriva, pokazalo se da se viskoznost goriva uzima u obzir samo kod razlike tlakova manje od 55 MPa [19]. Najveća razlika uočena je u brzini ubrizgavanja gdje dizelsko gorivo doseže veće vrijednosti brzine u odnosu na benzin [20]. Kod mješavina, manja gustoća i viskoznost dovode do ranijeg početka ubrizgavanja te dužeg trajanja ubrizgavanja. Također, iz [21] slijedi da povećani udio benzina dovodi do smanjenja penetracije spreja i povećanja kuta konusa.

Opće je uvažena pretpostavka potpune ispunjenosti brizgaljke fluidom, no postavlja se pitanje kakvu ulogu u izgledu krivulje ubrizgavanja igra položaj inicijalizacije goriva. Krivulje ubrizgavanja, kao što je uočljivo iz pregleda literature, ustanovljene su eksperimentalno posrednim metodama mjerenja tlaka, impulsne sile i sl. Stoga, eksperimentalni podaci ne daju detaljan uvid u prijelazne procese u fazi otvaranja te se ne može sa sigurnošću reći do koje je granice brizgaljka ispunjena gorivom. Ovim radom ispituje se utjecaj ispunjenosti brizgaljke gorivom na proces ubrizgavanja te se daje detaljniji uvid u početak procesa ubrizgavanja. Također, potrebno je napomenuti da prema saznanjima autora ovog rada u literaturi ne postoje radovi koji se bave analizom profila ubrizgavanja korištenjem računalne mehanike fluida.

1.1. Brizgaljka dizelskog motora

Dizelski motori su motori s unutrašnjim izgaranjem čiji je cilindar ispunjen stlačenim zrakom visoke temperature u koji se pod visokim tlakom ubrizgava kapljevito gorivo [22]. Ubrizgavanje goriva u komoru za izgaranje vrši brizgaljka. Što je bolje raspršivanje goriva, bolja je učinkovitost motora, a posljedično tome i veća ušteda goriva te manje emisije štetnih plinova [23]. Prema [24], brizgaljka goriva jedan je od najkritičnijih dijelova dizelskog motora. Kompleksnost strujanja unutar mlaznice otežava poboljšavanje tehnologija izrade. Predviđanje strujanja otežano je zbog nekoliko faktora; mlaznice su vrlo malih dimenzija, duljina mlaznice iznosi približno 1 mm, dok promjer mlaznice iznosi oko 100 μm ; brzine strujanja fluida kroz mlaznice reda su veličine od nekoliko stotina metara u sekundi. Također, strujanje je nestacionarno, s kratkim vremenom trajanja ubrizgavanja. Slikom 1.2, dan je prikaz geometrije vrha brizgaljke, budući da je taj dio geometrije od interesa u nastavku rada.



Slika 1.2 Geometrija vrha brizgaljke dizelskog motora [25,26]

Princip rada brizgaljke počiva na razlici ulaznog i izlaznog tlaka. Kontrolna jedinica motora (engl. *Engine Control Unit*, ECU) preko solenoidnog ili piezoelektričnog ventila upravlja iglom brizgaljke. Njenim podizanjem se zbog velike razlike tlakova gorivo ubrizgava u komoru izgaranja. Nakon toga igla se spušta čime završava proces ubrizgavanja.

1.2. Osnove računalne dinamike fluida

Računalna dinamika fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics*, CFD) je numerički alat razvijan prvobitno u svrhe zrakoplovnog i svemirskog inženjerstva, no u današnje vrijeme primjena CFD-a postala je neophodna u većini istraživačkog i razvojnog dijela industrije. Metoda kontrolnih volumena (engl. *Finite Volume Method*, FVM) najkorištenija je numerička metoda implementirana u CFD. Prvi korak upotrebe FVM metodologije je diskretizacija proračunske domene u konačan broj kontrolnih volumena. Rezultat diskretizacije prostora naziva se geometrijskom mrežom. Potom slijedi diskretizacija parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u algebarske izraze. Jednadžbe se rješavaju iterativnim postupkom za svaki kontrolni volumen u domeni te se dobiva rješenje promatranog svojstva u svakom kontrolnom volumenu. Kako fluks svojstva kroz površinu kontrolnog volumena koji u njega ulazi, odgovara fluksu svojstva koji izlazi iz promatranog kontrolnog volumena, FVM metoda strogo je konzervativna što je čini preferiranom metodologijom u CFD-u [27].

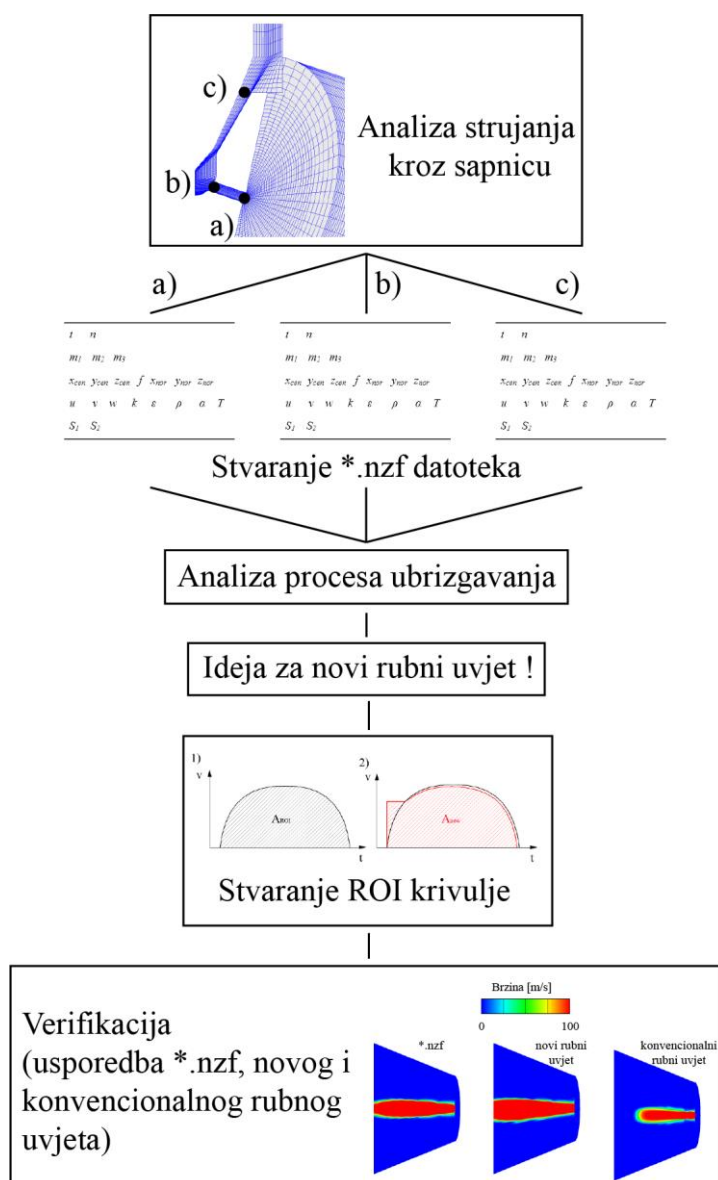
Bez obzira na brojne prednosti upotrebe numeričkih metoda, kao što su kraće vrijeme projektiranja, mogućnost simuliranja uvjeta koji nisu ostvarivi eksperimentalno, financijski prihvatljiviji pristup uz manje uložene energije, eksperimentalni pristup, iako u manjoj mjeri, i dalje je prisutan u industriji. Za problematiku gdje postoji pouzdan matematički model, računalni pristup zauzima značajnije mjesto, dok eksperimentalni pristup važniju ulogu ima u potvrđivanju odabrane metode u procesu razvoja nekog proizvoda. Kod rješavanja složenijih problema nužno je kombinirati računalni i eksperimentalni pristup [28].

U nastavku rada prikazani su numerički modeli koje je potrebno razumjeti za rješavanje problema rada, prikazani su ključni koraci u izvođenju računalnih simulacija (generiranje mreže, postavke rješavača i analiza rezultata), te su navedeni zaključci rada.

2. HIPOTEZA I SPECIJALNI CILJEVI RADA

Hipoteza ovog rada tvrdi da je moguće napraviti novi i realističniji rubni uvjet za opisivanje procesa ubrizgavanja koji uzima u obzir brzinu nastrujavanja i vrijeme protoka fluida kroz brizgaljku goriva.

Specifični ciljevi dani su u slijedećem dijagramu toka na slici 2.1, a jednom rečenicom mogu se svesti na razvoj novog rubnog uvjeta prilikom opisivanja procesa ubrizgavanja goriva. Točnost novog rubnog uvjeta najbolje se može vidjeti na slici 5.12 koja opisuje brzinu i raspršenost kapljevite faze u ranoj fazi procesa ubrizgavanja.



Slika 2.1 Dijagram toka provedenog istraživanja

3. NUMERIČKI MODEL

U ovom poglavlju opisani su matematički modeli korišteni u CFD simulacijama. Prvenstveno su opisani osnovni zakoni očuvanja korišteni u višefaznom modelu, nakon čega su predstavljeni Euler Lagrangeov te Euler Eulerov numerički modeli korišteni za simulaciju spreja. Na kraju je pobliže opisan *Nozzle file* u kojem su spremljeni podaci simulacija ubrizgavanja.

Opći oblik zakona očuvanja fizikalnog svojstva dan je izrazom (3-1) te glasi: brzina promjene sadržaja fizikalnog svojstva unutar materijalnog volumena jednaka je izvoru ili ponoru tog fizikalnog svojstva.

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = S_\varphi \quad (3-1)$$

Prvi član lijeve strane predstavlja brzinu promjene fizikalnog svojstva, dok su drugim članom opisani konveksijski i difuzijski članovi sustava. Na desnoj strani jednadžbe (3-1) nalazi se izvorski ili ponderski član.

3.1. Zakon očuvanja mase

Jednadžba očuvanja mase ili jednadžba kontinuiteta u višefaznom modelu glasi:

$$\frac{\partial(\rho\alpha_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\alpha_k v_j)}{\partial x_j} = \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl}, \quad k = 1, \dots, N \quad (3-2)$$

gdje je α_k volumni udio promatrane faze, a Γ_{kl} izvorski član zbog izmjene mase između pojedinih faza. Također mora biti ispunjen i uvjet kompatibilnosti koji govori da zbroj volumnih udjela svih faza mora biti jednak jedinici.

$$\sum_{k=1}^N \alpha_k = 1 \quad (3-3)$$

3.2. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja govori da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen. Diferencijalni oblik zakona očuvanja količine gibanja dan je formulom (3-4),

$$\frac{\partial(\rho_k \alpha_k v_{ki})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k \alpha_k v_{kj} v_{ki})}{\partial x_j} = \alpha_k \frac{\partial}{\partial x_j} (-p \delta_{ji} + \Sigma_{ji}) + \alpha_k \rho_k f_i + \sum_{l=1, l \neq k}^N M_{kli} + \sum_{l=1, l \neq k}^N v_{ki} \Gamma_{kl}. \quad (3-4)$$

Na lijevoj strani jednadžbe zapisane su vremenska i prostorna promjena količine gibanja. Izraz u zagradi prvog člana desne strane predstavlja površinske sile koje se dijele na sile uslijed djelovanja tlaka i sile uslijed viskoznosti fluida. Za Newtonovski fluid, tenzor viskoznih naprezanja računa se prema izrazu

$$\Sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (3-5)$$

Kroneckerov delta, δ_{ij} je matematički operator koji je jednak jedinici ako je $i = j$, a u slučaju $i \neq j$ jednak je nuli. Drugi član desne strane sadrži masene sile, dok treći i četvrti članovi označavaju izvorske članove, odnosno izmjenu količine gibanja između faza.

3.3. Zakon očuvanja energije

Brzina promjene zbroja kinetičke i unutarnje energije unutar materijalnog volumena jednaka je snazi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen te brzini izmjene topline između materijalnog volumena i okoline, izraz (3-6).

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k v_j h_k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k (q_{kj} + q_{kj}^T)) + \alpha_k \rho_k \Theta_k + \alpha_k \delta_k f_j \cdot v_{ki} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k v_{ki} (\tau_{kij} + \tau_{kij}^T)) + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{l=1, l \neq k}^N H_{kl} + \sum_{l=1, l \neq k}^N h_{kl} \Gamma_{kl} \quad (3-6)$$

Na lijevoj strani jednadžbe (3-6) nalaze se izmjena topline u vremenu i prostoru. Prvi članovi u zagradi desne strane označuju toplinski i turbulentni toplinski tok. Nadalje, jednadžba sadrži izvorski član specifične entalpije, izmjenu energije uslijed djelovanja masenih i površinskih sila (treći i četvrti član), promjenu tlaka pojedine faze u vremenu te izmjenu energije između faza.

3.4. Modeliranje turbulencije

Gotovo sva strujanja u većini inženjerskih primjena turbulentnog su karaktera. Za razliku od laminarnih strujanja koja su stabilna, turbulentna strujanja karakteristična su po svojoj kaotičnoj

prirodi. Direktnim numeričkim simulacijama (engl. *Direct Numerical Simulations*, DNS) moguće je izravno riješiti Navier-Stokesove jednačbe, no takav pristup još uvijek je preskup za primjenu u inženjerstvu. Iz tog se razloga koristi *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, RANS pristup. U takvom su pristupu trenutne vrijednosti turbulentnog strujanja zamijenjene s osrednjenim vrijednostima i pripadajućim oscilacijama iz čega slijede dva nova člana u zakonima očuvanja: Reynoldsov tenzor naprežanja te fluks turbulentne topline koji se rješavaju dodatnim modelima. Zbog svoje robusnosti u modeliranju snažnih vrtložnih strujanja, u ovom radu korišten je $k - \zeta - f$ model turbulencije.

3.4.1. $k - \zeta - f$ model turbulencije

Za opis turbulentnog ponašanja raspršivanja goriva korišten je $k - \zeta - f$ model. Model je baziran na Durbinovom konceptu eliptične relaksacije, te rješava dodatnu transportnu jednačbu za omjer brzine $\zeta = \overline{v^2} / k$. Model je pogodan za modeliranje procesa raspršivanja te za opis vrtložnog gibanja, karakteristično za motore s unutarnjim izgaranjem [29]. Viskoznost vrtloga određuje se iz izraza (3-7) u kojem je C_μ konstanta modela, k je turbulentna kinetička energija, a ε označava disipaciju turbulentne kinetičke energije.

$$\nu_t = C_\mu \zeta \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-7)$$

Ostale varijable određuju se iz izraza:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dk}{Dt} &= \rho (P_k - \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \\ \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \rho \frac{C_{\varepsilon 1}^* P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right], \\ \rho \frac{D\zeta}{Dt} &= \rho f - \rho \frac{\zeta}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right]. \end{aligned} \quad (3-8)$$

U formuli (3-8), f je eliptična funkcija dobivena iz izraza:

$$f - \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} L^2 = \left(C_1 + C_2 \frac{P_k}{\zeta} \right) \frac{(2/3 - \zeta)}{T}, \quad (3-9)$$

u kojem su turbulentna dužina L i turbulentno vrijeme T izračunati iz:

$$\begin{aligned}
 L &= C_L \max \left[\min \left(\frac{k^{1.5}}{\varepsilon}, \frac{k^{0.5}}{\sqrt{6} C_\mu |S| \zeta} \right), C_\eta \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{0.25} \right], \\
 T &= \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{0.6}{\sqrt{6} C_\mu |S| \zeta} \right), C_T \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{0.5} \right].
 \end{aligned}
 \tag{3-10}$$

3.5. Euler-Lagrangeovo višefazno strujanje

Višefaznim strujanjima smatraju se ona strujanja koja na razini iznad molekularne sadrže više od jedne komponente. Euler Lagrangeovim višefaznim pristupom kapljevita faza diskretizirana je mnoštvom kapljica sličnih dimenzija koje su grupirane u tzv. parcele te se prati njihova propagacija duž domene. Kapljevita faza opisana je Lagrangeovom formulacijom, dok je plinovita faza opisana Eulerovom formulacijom [30]. Međusobni utjecaj dviju faza opisuje se podmodelima, kao što su podmodeli raspadanja, isparavanja, turbulentne disperzije, itd.

Tekuće gorivo ubrizgano je u komoru izgaranja kroz mlaznicu malog promjera pri čemu je izloženo aerodinamičkim i turbulentnim silama. Te sile uzrokuju raspršivanje goriva u manje kapljice različitih oblika i veličina te stvaranje nestabilnih veza tekuće faze goriva. Poznato je da svojstva raspršivanja utječu na miješanje goriva i zraka, isparavanje te proces izgaranja, a samim time i na ukupnu učinkovitost [29].

Drugim Newtonovim zakonom pokazano je da je promjena količine gibanja kapljica jednaka sili otpora koja djeluje na kapljice:

$$m_p \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} \tag{3-11}$$

U jednadžbi (3-11) m_p označava masu parcele, u_{id} je brzina čestice, dok F_{idr} predstavlja silu otpora.

Euler Lagrangeov pristup osjetljiv je na razlučivost mreže u okolini mlaznice. Nadalje, troškovi računalne opreme rastu zajedno s brojem parcela, no Euler Lagrangeov model i dalje je najčešće korišten model za simulaciju raspršivanja u industriji.

3.6. Euler-Eulerovo višefazno strujanje

Euler Eulerovim pristupom riješeni su nedostaci Euler Lagrangeove formulacije. Pristup je baziran na višefaznom modelu kroz osrednjavanje zakona očuvanja, jednadžbe (3-2) do (3-6). Plinovita i tekuća faza promatraju se kao kontinuum kroz vlastite volumne udjele. Kapljevita

faza se nadalje razlaže na kapljice koje se klasificiraju ovisno o promjeru. Konačan broj klasa i raspon promjera kapljica određuje se iskustveno te uzimajući u obzir dostupnu računalnu podršku. Raspon promjera obično se definira ovisno o očekivanom promjeru spreja i promjeru mlaznice. Veći broj različitih vrijednosti promjera unutar raspona rezultira boljom rezolucijom raspršivanja, ali isto tako i većim opterećenjem računala [29]. Klasifikacija „veličine klasa“ za Euler Eulerov pristup prikazana je tablicom 3.1.

Tablica 3.1 Klasifikacija „veličine klasa“ u Euler Eulerovom pristupu

Klasa	1	2, ..., k-1	k
Sadržaj	plinovita faza	kapljice	neraspršena kapljevinna

Pretpostavljeno je da unutar jednog kontrolnog volumena i unutar jedne Eulerove klase, sve kapljice imaju jednaku brzinu i jednaka fizikalna svojstva.

3.7. Model i konfiguracija datoteke s podacima strujanja u mlaznici

Za potrebe CFD simulacija, strujanje u mlaznici modelirano je Eulerovim višefaznim modelom implementiranim unutar AVL FIRE™ koda. Time je omogućeno definiranje konačnog broja faza od kojih svaka ima jedinstveno rješenje brzine i turbulencije, dok sve faze dijele rješenje tlaka [30]. U tablici 3.2, dana su svojstva faza korištenih u simulacijama. Kod postavljanja višefaznih simulacija, zbroj volumnih udjela svih faza mora biti jednak 1.

Tablica 3.2 Svojstva fluida

Svojstvo	Faza 1	Faza 2	Faza 3
	Tekuće gorivo	Plinovito gorivo	Zrak
Gustoća [kg/m ³]	830	7	20
Dinamička viskoznost [Ns/m ²]	0.00214	1e-5	1.824e-5

Općenito govoreći, proračunska mreža za simulaciju ubrizgavanja razlikuje se od mreže korištene u proračunu raspršivanja. Stoga se podaci o strujanju i geometriji moraju prebaciti iz koordinatnog sustava strujanja u mlaznici u koordinatni sustav spreja. Tijekom simulacije, podaci strujanja na izlazu iz mlaznice zapisuju se u ASCII datoteku formata *.nzf, tzv. *Nozzle*

file. Datoteka ima fleksibilnu strukturu koja ovisi o broju faza, broju elemenata promatrane selekcije, itd. [30].

Datoteke izrađene u ovom radu sastoje se od zaglavlja u kojem su sadržane osnovne informacije te podaci o geometriji i maseni tok za svaki vremenski korak. Podaci u zaglavlju dokumenta daju informacije o broju površinskih parametara, broju korištenih faza, svojstvima mlaznice, broju zapisanih podataka i slično. Informacije o geometriji te strujanju, opisani u [30], zapisani su u blokovima za svaki element promatrane površine. Struktura *nozzle* datoteke prikazana je tablicom 3.3.

Tablica 3.3 **Struktura datoteke s podacima strujanja u mlaznici**

t	n							
m_1	m_2	m_3						
x_{cen}	y_{cen}	z_{cen}	f	x_{nor}	y_{nor}	z_{nor}		
u	v	w	k	ε	ρ	α	T	
S_1	S_2							

Oznake t i n označuju vremenski korak zapisivanja i broj elemenata za koji je generirana datoteka. Termini m_1 , m_2 i m_3 vrijednosti su masenog protoka pojedine faze. Treći red bloka daje informacije o geometrijskim karakteristikama svakog elementa, gdje su x_{cen} , y_{cen} i z_{cen} koordinate središta elementa, f je površina elementa, a x_{nor} , y_{nor} , z_{nor} su komponente smjera vektora normale elementa. Komponente brzine svake faze dane su varijablama u , v i w , dok su k i ε turbulentna kinetička energija i brzina disipacije. Oznaka ρ predstavlja gustoću, α volumni udio, a T temperaturu faze. U zadnjem redu bloka zabilježenih podataka dani su atributi strujanja za sve faze, S_1 i S_2 .

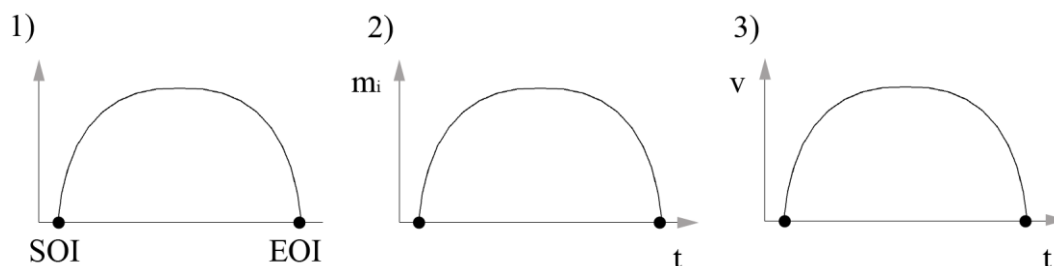
S obzirom na veliku količinu zapisanih informacija, u programskom kodu MATLAB napisana je skripta koja omogućuje grupiranje i manipulaciju podataka zapisanih u *.nzf datoteku. Generiranom skriptom moguće je u vrlo kratkom roku dohvatiti podatke o strujanju za bilo koji promatrani element te u bilo kojem vremenskom koraku. MATLAB skripta dana je u prilogu.

3.8. Rate of Injection - rubni uvjet

Za potrebe simulacije raspršivanja goriva Eulerovim pristupom nužno je definirati podatke strujanja na ulaznom dijelu geometrije. Podaci mogu biti zadani generiranom *.nzf datotekom ili krivuljom ubrizgavanja, ROI. Krivulju ubrizgavanja moguće je zadati na dva načina: unosom podataka u obliku tablice gdje su u prvom stupcu zabilježeni vremenski koraci, a u drugom bezdimenzijski maseni protok. ROI krivulja ustanovljuje se na temelju eksperimentalnih podataka. Kako ne postoji izravno mjerenje brzine strujanja kroz mlaznicu, već se ona određuje posredno preko mjerenja razlike tlaka i impulsne sile raspršivanja, poželjno je koristiti *.nzf datoteku. No u većini slučajeva *Nozzle file* datoteka nije dostupna pa je nužno tablično definiranje ulaznih podataka. U svrhu poboljšanja opisa strujanja ROI krivuljom, ovim radom razvijen je novi rubni uvjet definiran početnom brzinom strujanja i volumnim udjelom kapljevine na izlazu iz mlaznice. U nastavku ovog poglavlja opisan je postupak određivanja novog rubnog uvjeta.

3.8.1. Određivanje brzine i dijagrama fluksa mase

Postavljanjem rubnog uvjeta zadaju se konstantne vrijednosti fluida u promatranom presjeku, poput temperature, normalne brzine i volumnog udjela, iz kojih se nadalje proračunava maseni protok i zatim izrađuje krivulja ROI-a. Slikom 3.1 prikazan je postupak dobivanja brzine procesa ubrizgavanja iz eksperimentalno određene ROI krivulje. Točkama SOI i EOI označeni su početak i kraj procesa ubrizgavanja, *Start of Injection* i *End of Injection*.



Slika 3.1 Kvalitativan prikaz krivulja procesa ubrizgavanja

Uveden je faktor t_{fac} , prikazan izrazom (3-12), kojim se povezuje početak i kraj procesa ubrizgavanja iz *.nzf datoteke s odgovarajućim vremenskim trenucima iz ROI krivulje.

$$t_{fac} = \frac{t_{inj_{end}} - t_{inj_{start}}}{t_{ROI_{end}} - t_{ROI_{start}}} \quad (3-12)$$

Dajana Benković

U formuli (3-12), t_{inj_start} i t_{inj_end} odgovaraju početku i kraju procesa ubrizgavanja u simulaciji, dok t_{ROI_start} i t_{ROI_end} označuju početak i kraj ubrizgavanja određen eksperimentalnim putem. U slučaju konstantnog ubrizgavanja t_{fac} iznosi 1 jer se početak i kraj procesa podudaraju s podacima iz ROI krivulje. Trajanje ubrizgavanja kroz mlaznicu računa se prema izrazima (3-13) i (3-14), prilikom čega se krivulja ubrizgavanja može diskretizirati na željen broj elemenata t_i :

$$\begin{aligned} t_1 &= 0, \\ t_{end} &= t_{inj_end}, \end{aligned} \quad (3-13)$$

$$t_i = t_{(i-1)} + (t_i - t_{(i-1)})t_{fac}. \quad (3-14)$$

Površina ispod ROI krivulje izjednačuje se s ubrizganom masom kapljevine, a određuje se prema:

$$S_{ROI} = \sum_{i=1}^n \left[(\Phi_i - \Phi_{(i-1)}) \left(\frac{t_i - t_{(i-1)}}{2} \right) + \Phi_i (t_i - t_{(i-1)}) \right]. \quad (3-15)$$

Faktorom mase f_{ac} , definirana je poveznica normalne brzine i fluksa mase, odnosno ROI krivulje:

$$f_{ac} = \frac{m_{inj}}{S_{ROI}}, \quad (3-16)$$

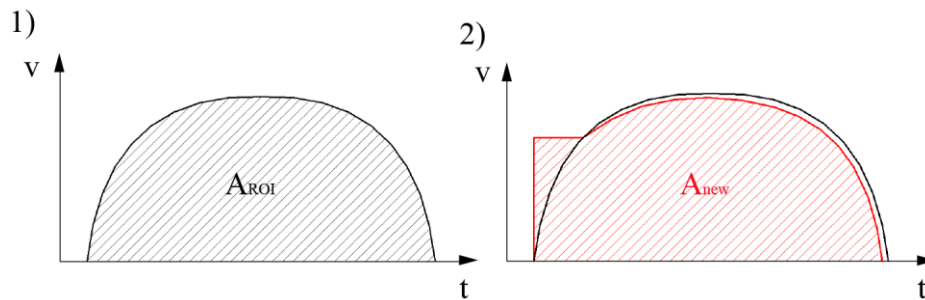
gdje je m_{inj} ukupna ubrizgana masa izražena u kg. U konačnici su prikazani izrazi koji povezuju maseni protok te normalnu komponentu brzine, a u kojima je Φ_i promatrana veličina izračunata iz ROI krivulje.

$$m_{flux_i} = f_{ac} \cdot \Phi_i, \quad (3-17)$$

$$v_{N_i} = \frac{m_{flux_i}}{\rho_{liq} A}. \quad (3-18)$$

Slikom 3.2 prikazane su krivulje brzine ubrizgavanja s brzinom kao promatranom veličinom: 1) dosadašnji pristup, 2) novi pristup. Novim pristupom određeno je da ukoliko se vrijednost brzine na početku ubrizgavanja nalazi ispod pretpostavljene brzine u početnom trenutku procesa, ona je konstantna, a nakon te vrijednosti brzina se ponovno računa iz krivulje ROI. Budući da je površina ispod krivulja 1) i 2) jednaka, $A_{ROI} = A_{new}$, te kako bi se zadržala ista

vrijednost masenog protoka, potrebno je pravilno odrediti volumni udio kapljevine i brzinu ubrizgavanja tokom cijelog procesa ubrizgavanja.



Slika 3.2 Brzina tijekom procesa ubrizgavanja: 1) dosadašnji pristup, 2) novi pristup

3.8.2. Određivanje volumnog udjela kapljevine

Uvođenjem faktora korekcije volumnog udjela α_{corr} , prema formuli (3-19), skaliran je volumni udio kapljevine s obzirom na promatranu površinu ulaza u domenu:

$$\alpha_{corr} = \frac{A_{GUI}}{A_{inlet}}. \quad (3-19)$$

U ovom slučaju ulazna površina promatrane domene, A_{GUI} , odgovara površini stvarnog poprečnog presjeka izlaza mlaznice A_{inlet} te u tom slučaju faktor korekcije volumnog udjela kapljevine iznosi 1. Ako se uzme u obzir primarni raspad spreja, klasifikacija kapljica određena je prema izrazima (3-20) gdje su α_{drop} i α_{gas} volumni udjeli kapljica i plinovite faze, a α_{bl} označava volumni udio neraspšene kapljevine, prema definiciji u tablici 3.1.

$$\begin{aligned} \alpha_{drop} &= 0.001 \\ \alpha_{gas} &= \alpha_{drop} \\ \alpha_{bl} &= \alpha_{corr} - (n_{drop} - 1)\alpha_{drop} - \alpha_{gas} \end{aligned} \quad (3-20)$$

Izrazom (3-21), povezuje se α_{corr} s izračunatom brzinom na ulazu domene:

$$\alpha_{bl} = \frac{m_{flux_i}}{\rho_{liq} A v_{N_i}}. \quad (3-21)$$

Upravo ovaj izraz prikazuje razliku u novorazvijenom rubnom uvjetu gdje dolazi do manipulacije volumnog udjela kapljevine na izlazu iz sapnice. Takav pristup zapravo uzima u obzir da je gorivu potrebno određeno vrijeme, kako god ono malo bilo, da prođe put od sjedišta

Dajana Benković

ventila do izlaza iz sapnice. Isto tako, ovakvim pristupom, omogućuje se definiranje početne brzine mlaza goriva što ujedno i više odgovara realnom procesu ubrizgavanja.

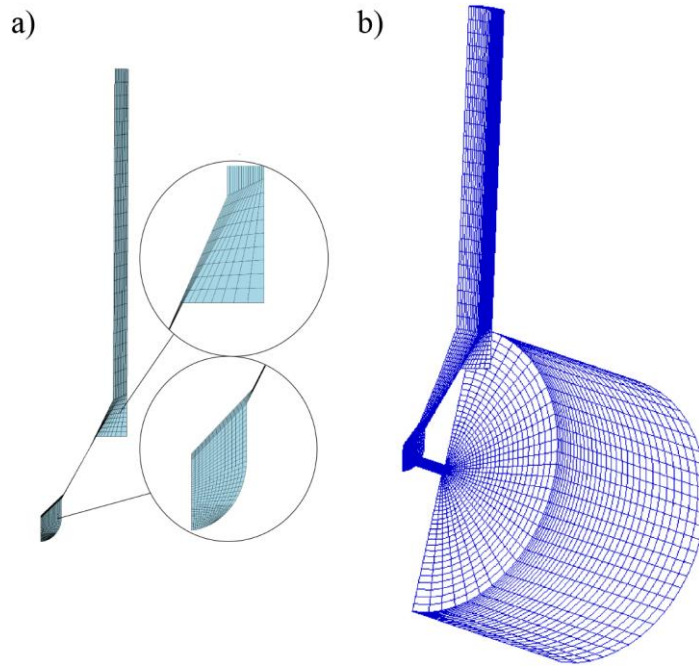
4. IZRADA MREŽE I NUMERIČKE POSTAVKE SIMULACIJE

Numeričke simulacije provedene su komercijalnom 3D CFD programskom paketu AVL FIRE™. U ovom poglavlju opisan je postupak izrade volumenske mreže cjelokupne geometrije potrebne za provođenje simulacija, nakon čega su opisani rubni i početni uvjeti te su na kraju dane numeričke postavke simulacije.

4.1. Proces ubrizgavanja goriva

4.1.1. Izrada mreže

S ciljem generiranja mreže kontrolnih volumena, postojeća površinska mreža koja je učitana u program razdvaja se na dva dijela, tijelo brizgaljke i mlaznicu, te je mreža svakog dijela izrađena zasebno. Volumna mreža bazira se na 2D metodi generiranja mreže. Koristeći opciju *Auto edge*, napravljena je površina koja obuhvaća vanjski rub cjelokupne geometrije tijela brizgaljke. Na temelju te površine pomoću alata *2D Meshing*, metodom interpolacije stvorena je dvodimenzijaska mreža s proizvoljnom distribucijom ćelija, prikazano slikom 4.1a. Nastala mreža rotirana je oko vertikalne osi za 30° čime je dobiveno 1/12 volumne mreže tijela brizgaljke. Na sličan način izrađena je i volumna mreža mlaznice. Generirana 2D mreža uvećana je u skladu sa zadanim trajektorijama te je spojena s mrežom tijela brizgaljke. Na području preklapanja dviju mreža, mreža mlaznice je profinjena. Spajanje dobivenih mreža izvedeno je alatom *Arbitrary Connect* koji služi za spajanje dviju mreža kada raspodjela ćelija koje treba ujediniti nije identična. Rezultat je jedinstvena mreža koja objedinjuje tijelo brizgaljke s mlaznicom iste. U svrhu određivanja izlaznog tlaka, a zbog točnosti simulacije i numeričke stabilnosti, potrebno je dodatno generirati i volumen pražnjenja. Volumen pražnjena obično je cilindričnog oblika te služi za definiranje fizikalnih početnih i rubnih uvjeta u komori izgaranja. Cijela mreža sadrži 100 996 kontrolnih volumena i vidljiva je na slici 4.1b.



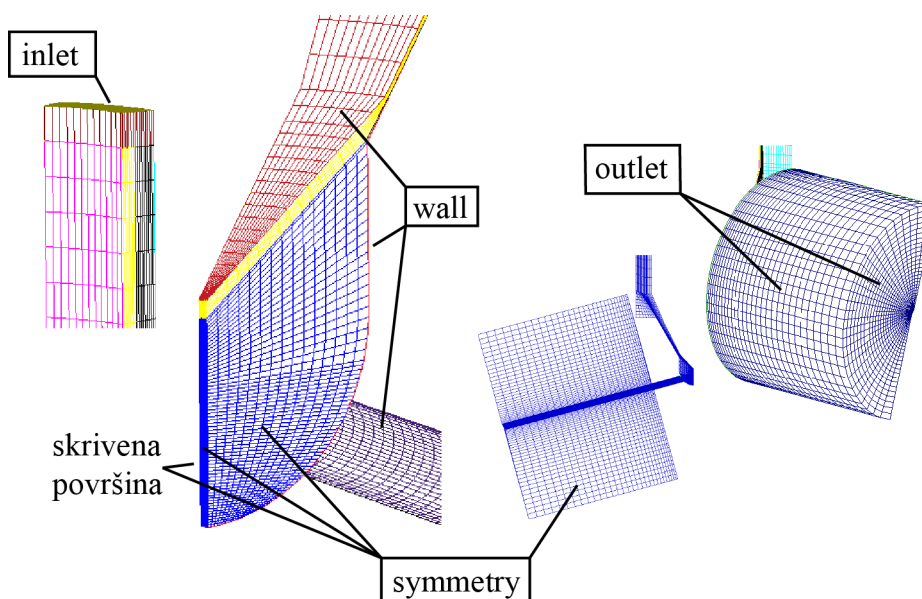
Slika 4.1 a) 2D mreža s proizvoljnom distribucijom ćelija, b) Ukupna volumna mreža

4.1.2. Rubni uvjeti

Na mreži je potrebno napraviti nekoliko selekcija kojima su pridruženi rubni uvjeti. Njima su definirana fizikalna svojstva površina mreže. Selekcije potrebne za zadavanje rubnih uvjeta prikazane su slikom 4.2. Rubni uvjeti za ovaj slučaj obuhvaćaju:

- ulaznu granicu (definiranu *inlet* selekcijom)
- izlaznu granicu (definiranu *outlet* selekcijom)
- uvjete simetrije (definirane *symmetry* selekcijom)
- zid (definiran selekcijom *wall*)

Budući da je strujanje višefazno, određeni rubni uvjeti moraju se definirati za sve 3 faze. Svojstva fluida po fazama prethodno su definirana u tablici 3.2.

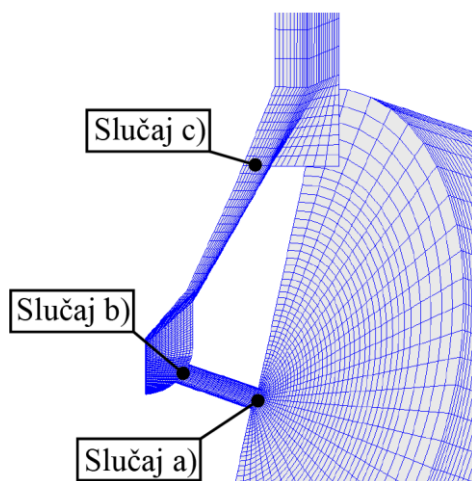


Slika 4.2 Prikaz selekcija za rubne uvjete

4.1.3. Početni uvjeti

Početni uvjeti također se definiraju kroz selekcije na volumnoj mreži. Postavljanjem generalnog početnog uvjeta definira se stanje u cijeloj domeni. Tim uvjetom kapljevita faza smjese sadržana je po čitavoj domeni. Generalni početni uvjet definiran je tlakom prve faze, iznosa 200 MPa. Kao i kod rubnih uvjeta, početni tlak jednak je za sve faze. Zadana temperatura svih faza je 293.15 K, kinetička energija turbulencije iznosi $0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$, a komponente brzine u sva tri smjera su 0 m/s. Volumni udio prve faze je 0.999998, dok su volumni udjeli druge i treće faze $1e-6$ definirani radi numeričke stabilnosti. Selekcije za definiranje specifičnih početnih uvjeta služe za različitu definiciju inicijalizacije tekuće faze goriva. Upravo se promjenom tih specifičnih početnih uvjeta dobivaju različita rješenja fizikalnih veličina na izlazu iz mlaznice.

Za slučaj a), posebni početni uvjet (inicijalizacija kapljevite faze) zadan je u cijeloj brizgaljki, od vrha do izlaza iz mlaznice. Takav rubni uvjet predstavlja uobičajenu praksu u definiranju krivulja ubrizgavanja. Za slučajeve b) i c) granica kapljevine postavljena je do ulaza u mlaznicu odnosno sjedišta ventila. Za sva tri slučaja, iznos tlaka plinovite faze je 500 kPa, dok su volumni udjeli prilagođeni kapljevitoj fazi: $1e-6$ za prve dvije faze te 0.999998 za treću fazu. Slikom 4.3 prikazane su točke inicijalizacije kapljevine kod posebnih početnih uvjeta.



Slika 4.3 Prikaz inicijalizacije kapljavine kod posebnih početnih uvjeta

4.1.4. Postavke simulacije

Promatrano je nestacionarno, viskozno, turbulentno strujanje. Korak numeričke integracije moguće je zadati na dva načina: kutom zakreta vratila i vremenskim korakom. U ovom slučaju početak i kraj simulacije određen je kutom zakreta vratila (engl. *Crank Angle*), odnosno 0°CA i 360°CA . Brzina okretanja motora postavljena je na 30000 1/min kako bi se simuliralo stvarno vrijeme ubrizgavanja goriva u komoru izgaranja, što iznosi 2 ms. Aktiviran je višefazni modul unutar kojeg su definirane 3 faze, opisane u tablici 3.2.

Za rješavanje jednadžbe količine gibanja, jednadžbe očuvanja energije te jednadžbe kompatibilnosti korištena je Upwind diferencijska shema, UDS, dok se jednadžba kontinuiteta rješava shemom centralne diferencije, CDS (engl. *Central Differencing Scheme*). Podrelaksacijski faktori χ zadaju se u svrhu sprječavanja divergencije rješenja. Iterativne metode rade na principu da se uzima komad rješenja promatranog svojstva prethodne iteracije, φ^{old} te se dodaje novom rješenju φ^{new} , opisano izrazom (4-1). Podrelaksacijskim faktorima navedenim u tablici

Tablica 4.1, definiramo koliki dio prethodnog rješenja ulazi u proračun. Vrijednost im se kreće između 0 i 1, a što je ona niža, to se više pridonosi stabilnosti numeričke simulacije, ali isto tako se produžuje vrijeme trajanja simulacije.

$$\varphi = \varphi^{old} + \chi(\varphi^{new} - \varphi^{old}) \quad (4-1)$$

Tablica 4.1 Podrelaksacijski faktori

Tlak	0.15
Količina gibanja	0.4
Turbulentna kinetička energija	0.2
Brzina disipacije turbulencije	0.2
Energija	0.6
Volumni udio	0.8

Rješavanje nelinearnih algebarskih jednadžbi svodi se na iterativno rješavanje lineariziranog sustava jednadžbi sve dok rješenje ne dosegne zadanu točnost. Dakle, nakon što normalizirani reziduali padnu ispod zadane vrijednosti, numerički postupak se zaustavlja. U tablici 4.2 navedeni su kriteriji konvergencije.

Tablica 4.2 Kriteriji konvergencije

Maksimalan broj iteracija	100
Minimalan broj iteracija	3
Tlak	0.001
Količina gibanja	0.001
Turbulentna kinetička energija	0.005
Brzina disipacije turbulencije	0.005
Volumni udio	0.005

4.2. Proces raspršivanja goriva

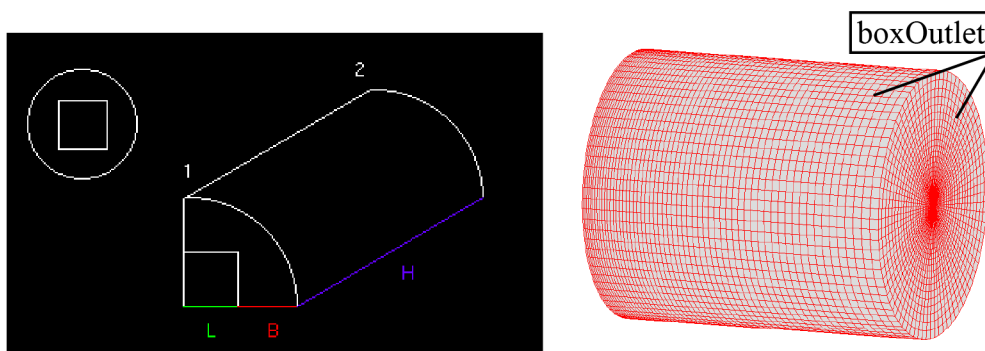
Jedan od glavnih faktora u razvoju i konstruiranju motora je predviđanje propagacije spreja goriva. Raspršivanje goriva izravno utječe na svojstva, performanse, izdržljivost te emisije motora. Za ulazne podatke u proračunu raspršivanja goriva, korištena je *.nzf datoteka generirana u simulaciji ubrizgavanja goriva u dva pristupa. Prvi pristup predstavlja direktno korištenje *.nzf datoteke dok se u drugom pristupu ta ista datoteka koristi za izradu ROI krivulje koja se zatim postavlja kao rubni uvjet na ulaznoj selekciji goriva.

4.2.1. Euler Lagrangeovo višefazno strujanje

Euler Lagrangeov pristup korišten je za izračun procesa raspršivanja goriva kako bi se uvjerali da razlike u inicijalizaciji domene mlaznice utječu na proces ubrizgavanja neovisno o odabranom pristupu opisivanja spreja.

4.2.1.1. Izrada mreže

Kod računalnog modeliranja procesa raspršivanja, generirana je jednostavna geometrija u obliku cilindra. Izrađena je koristeći *Fame Hexa* alat na način da se, poznavajući promjer mlaznice zadaje duljina $L1$ i na temelju nje, dimenzija $B1$. Unosi se i veličina H te proizvoljna distribucija ćelija, kao i kompresijski faktori istih. Slika 4.4 prikazuje shemu izrade te generiranu cilindričnu volumnu mrežu sa 144 000 ćelija.



Slika 4.4 Cilindrična volumna mreža

4.2.1.2. Rubni i početni uvjeti

U simulaciji raspršivanja zadan je jedan rubni uvjet, na selekciji *boxOutlet*, slika 4.4. Rubnim uvjetom zadan je tlak iznosa 100 kPa na izlazu volumena te je zrak jedini fluid definiran u promatranom volumenu.

U početnom trenutku tlak također iznosi 100 kPa, gustoća zraka definirana je iznosom 1.19 kg/m^3 , dok je temperatura zraka zadana vrijednošću od 500 K. Vrijednosti komponenta brzine postavljene su na 0 m/s. Kod simuliranja raspršivanja potrebno je definirati i transport kemijskih vrsta.

4.2.1.3. Postavke simulacije

Početak i kraj simulacije raspršivanja zadaje se definiranjem vremenskog koraka, koji u ovom slučaju iznosi $5e-6$, te završetka simulacije, 2.5 ms. Trajanje ubrizgavanja postavljeno je na 2

ms, a ubrizgana masa goriva uzima se iz *.nzf datoteke. Ulazna temperatura fluida postavljena je na 293.15 K.

Za rješavanje sustava algebarskih jednadžbi korišten je SIMPLE algoritam. Jednadžba kontinuiteta i količine gibanja diskretizira se CDS-om, a za rješavanje jednadžbe turbulencije, energije te jednadžbe kompatibilnosti odabran je UDS. Podrelaksacijski faktori zadani za simulaciju raspršivanja Euler Lagrangeovim pristupom dani su u tablici 4.3, a kriteriji konvergencije prikazani su u tablici 4.4.

Tablica 4.3 Podrelaksacijski faktori za Euler Lagrangeov sprej

Tlak	0.2
Količina gibanja	0.6
Turbulentna kinetička energija	0.4
Brzina disipacije turbulencije	0.4
Energija	0.8
<i>Species</i> transportne jednadžbe	0.8

Tablica 4.4 Kriteriji konvergencije za Euler Lagrangeov sprej

Maksimalan broj iteracija	100
Minimalan broj iteracija	3
Tlak	1e-5
Količina gibanja	0.0001

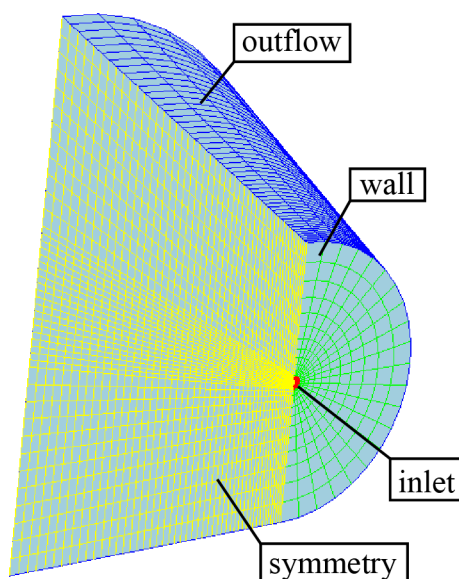
4.2.2. Euler Eulerovo višefazno strujanje

Kako je navedeno u uvodu rada, Euler Eulerov pristup alternativa je Euler Lagrangeovom pristupu opisivanja procesa raspršivanja. Unutar ovog rada, novi rubni uvjet razvijen je upravo za ovaj pristup, ali se može prilagoditi i na Euler Lagrangeovo sučelje.

4.2.2.1. Izrada mreže

Mreža za računalno modeliranje Euler Eulerovog (EE) spreja izrađena je koristeći iste alate kao i mreža Euler Lagrangeovog (EL) spreja. Volumna mreža oblika je krnjeg stošca radi smanjenja broja kontrolnih volumena, ali je odabrana tako da izlazna selekcija nema velik utjecaj na

promatrani problem. Također, postavljen je i uvjet simetrije te se razmatra samo polovina mreže. EE pristup je nekoliko puta računalno sporiji od EL metodologije pa se teži ka smanjenju broja kontrolnih volumena što je više moguće. Naravno, uzimajući u obzir i simetričnost *.nzf datoteke, takav pristup moguće je primijeniti i na promatrani problem. Za potrebe ovog istraživanja od najvećeg interesa je ubrizgavanje goriva u kontrolni volumen. Mreža kontrolnog volumena za EE proračune prikazana je na slici 4.5 i sadrži 19 500 kontrolnih volumena.



Slika 4.5 Volumna mreža za simulaciju Euler Eulerovog spreja s pripadnim selekcijama

4.2.2.2. Rubni i početni uvjeti

Rubni uvjeti simetrije i rubni uvjet zida pridodani su odgovarajućim selekcijama na izlaznom volumenu, *symmetry* i *wall*. U selekciji *outflow* zadan je tlak zraka od 5 kPa, koji je jednolik po cijeloj površini. Rubnim uvjetom *inlet* propisani su ulazni podaci iz *.nzf datoteke. Početnim uvjetom postavljeno je stanje kao i kod EL modela: tlak iznosa 5 kPa, temperatura zraka 293.15 K te komponente brzine čija je početna vrijednost 0 m/s.

4.2.2.3. Postavke simulacije

Kraj proračuna zadan je s 2 ms, a vremenski korak zapisivanja podataka zadan je tablično. Rješavanje sustava jednadžbi provedeno je SIMPLE algoritmom. Jednadžba količine gibanja riješena je kombinacijom CDS-a i UDS-a s faktorom miješanja 0.5, dok je jednadžba kontinuiteta riješena CDS-om. Jednadžbe turbulencije, energije i kompatibilnosti rješavane su

UDS-om. Postavljeni podrelaksacijski faktori za fazu 1 (zrak) te fazu 2 (kapljevito gorivo) prikazani su u tablici 4.5, dok tablica 4.6 daje kriterije konvergencije proračuna.

Tablica 4.5 Podrelaksacijski faktori za Euler Eulerov sprej

	Faza 1 (zrak)	Faza 2 (kapljevito gorivo)
Tlak	0.2	-
Količina gibanja	0.4	0.4
Turbulentna kinetička energija	0.4	0.4
Brzina disipacije turbulencije	0.4	0.4
Energija	0.8	0.8
Volumni udio	1	1

Tablica 4.6 Kriteriji konvergencije za Euler Eulerov sprej

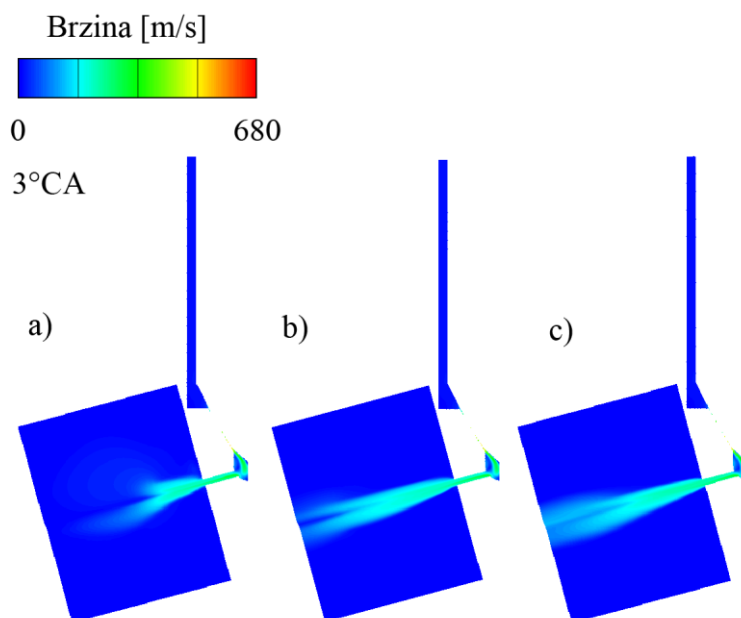
Maksimalan broj iteracija	100
Minimalan broj iteracija	3
Tlak	0.0004
Količina gibanja	0.0004
Volumni udio	0.0004

5. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati strujanja kroz mlaznicu te rezultati raspršivanja kapljevite faze goriva. Rezultati ubrizgavanja goriva prikazani su u obliku grafičkih rezultata te u obliku dijagrama, dok su EL te EE procesi raspršivanja goriva dani u obliku grafičkih rezultata. Najveći naglasak potrebno je staviti na rezultate usporedbe novo razvijenog rubnog uvjeta za ubrizgavanje kapljevite faze goriva.

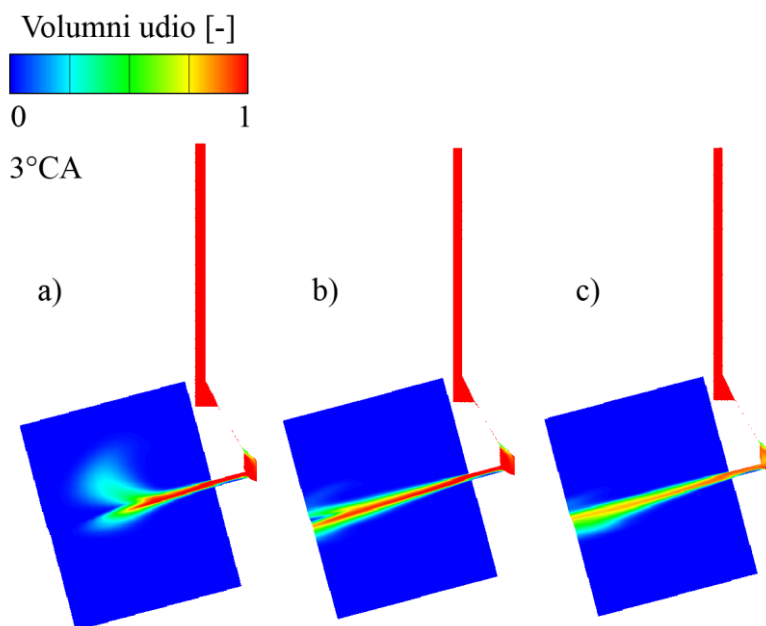
5.1. Proces ubrizgavanja goriva

Provedene su 3 simulacije ubrizgavanja goriva s varijacijom početnih uvjeta inicijalizacije kapljevite faze, opisano u poglavlju 4.1.3. Na slikama 5.1 i 5.2 dan je grafički prikaz rezultata proračuna za 3 slučaja početnih uvjeta u trenutku 3°CA , koji odgovara vremenskom periodu od 0.017 ms. U slučaju a), prikazano na slici 5.1, vrijedi pretpostavka nulte brzine u početnoj fazi procesa ubrizgavanja te do povećanja brzine dolazi zbog djelovanja tlaka uslijed podizanja igle. Slučaj b) pokazuje veću penetraciju goriva u komori izgaranja, što je u skladu sa zadanim početnim uvjetima. Očekivano, inicijalizacijom kapljevite faze goriva do sjedišta ventila, slučaj c), postiže se slična distribucija brzine kao pod b). Iz ovog prikaza jasno se vidi važnost pravilnog odabira početnih uvjeta računalnog proračuna strujanja kroz sapnicu.



Slika 5.1 Brzina kapljevite faze goriva za različite početne uvjete inicijalizacije kapljevine

Slika 5.2 prikazuje utjecaj inicijalizacije goriva na razvoj kapljevine. Postavljanjem kapljevine do izlaznog presjeka mlaznice u početnom trenutku, penetracija kapljevine je najmanja, dok je disperzija faze 1 najveća. Sličnim predviđanjem pojave kavitacije u mlaznici u slučajevima b) i c) dolazi se do zaključka da utjecaj početne inicijalizacije kapljevine goriva unutar mlaznice brzo iščezava. No u komori izgaranja rezultati se znatno razlikuju, osobito uspoređujući slučaj a) s druga dva slučaja. Tup, nesimetričan vrh spreja goriva pripisuje se radijalnom gibanju kapljevine do kojeg dolazi uslijed ubrizgavanja goriva nulte početne brzine u komoru ispunjenu komprimiranom plinskom mješavinom.



Slika 5.2 Volumni udio kapljevite faze goriva za različite početne uvjete inicijalizacije kapljevine

U nastavku su dijagramskim prikazom dani rezultati fluksa mase, volumnog udjela te apsolutne brzine faze 1. Varijable prikazane dijagramima izračunate su iz podataka spremljenih u *.nzf datoteku prema izrazima:

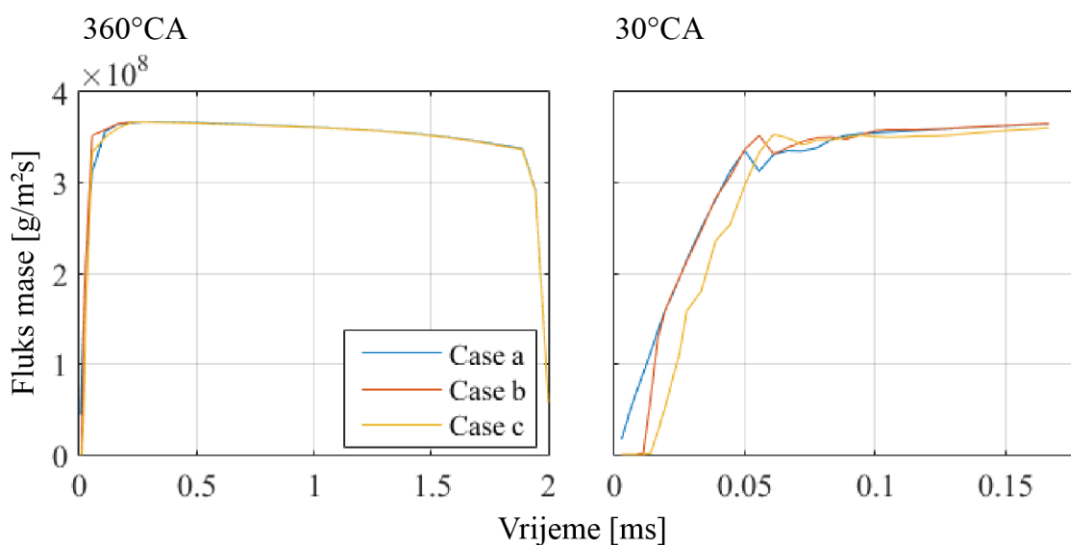
$$\dot{M} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho \alpha_i v_i A_i}{A}, \quad (5-1)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i A_i}{A}, \quad (5-2)$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N v_i A_i}{A}. \quad (5-3)$$

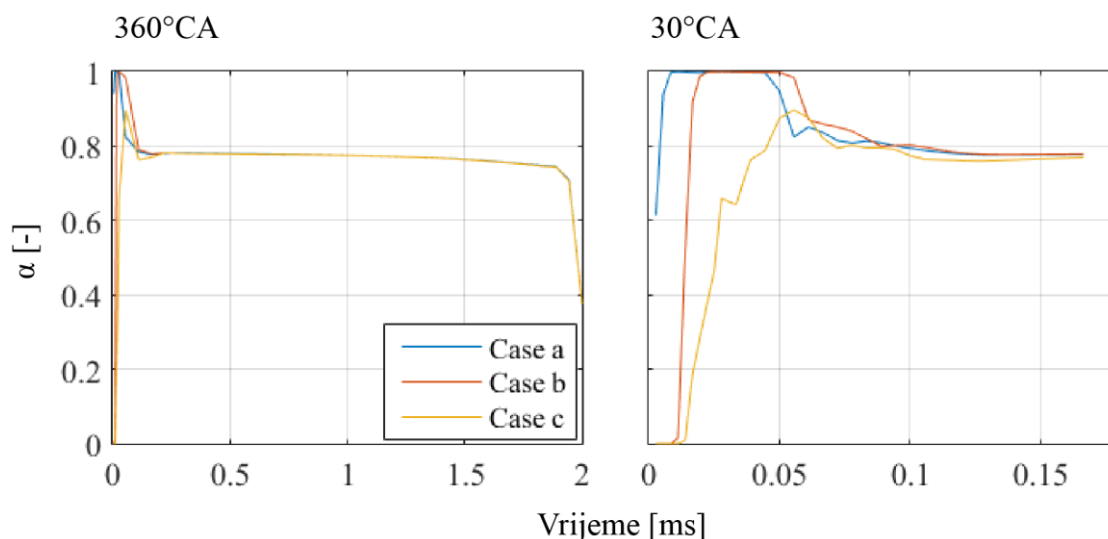
U jednadžbama (5-1), (5-2) i (5-3), N označuje broj elemenata promatrane površine, ρ je gustoća kapljevine, α_i predstavlja volumni udio kapljevite faze, s v_i je označena apsolutna brzina te je A_i površina pojedinog elementa.

Lijevi dijagrami na slikama 5.3, 5.4 i 5.5 prikazuju rezultate za cijeli proces ubrizgavanja, odnosno za 360°CA. Vidljivo je dobro podudaranje krivulja u stabilizacijskoj fazi te fazi zatvaranja ventila, dok se varijable u početnoj fazi procesa razlikuju od slučaja do slučaja. Rezultati prikazani dijagramima dobiveni su obradom podataka spremljenih u *.nzf datoteke koje su automatski generirane po završetku simulacija. Budući da su u početnom dijelu procesa očekivane najveće razlike, frekvencija zapisivanja podataka nešto je veća usporedno s ostatkom procesa ubrizgavanja te generirana *.nzf datoteka sadrži podatke o strujanju za ukupno 41 vremenski korak. S ciljem boljeg razumijevanja rezultata u početnoj fazi procesa ubrizgavanja, proveden je novi krug simulacija s još većom frekvencijom zapisivanja podataka te trajanjem proračuna do 30°CA, što odgovara približno 0.17 ms, prikazano desnim dijagramima slika 5.3, 5.4 i 5.5. Slika 5.3 prikazuje rezultate za fluks mase kroz izlazni presjek mlaznice. Uočeno je slično ponašanje krivulja uz malo kašnjenje zbog različitih točaka inicijalizacije tekuće faze goriva u početnom trenutku. Sličnost se može pripisati jednolikom razlikom tlaka ubrizgavanja i komore u sva tri promatrana slučaja.

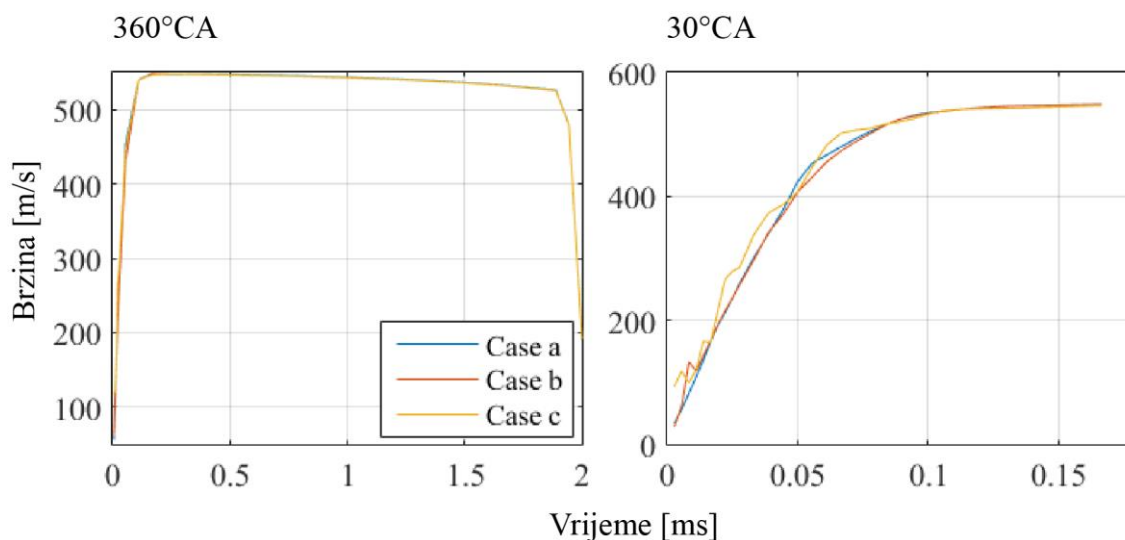


Slika 5.3 Fluks mase kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva

Najveći utjecaj početnih uvjeta vidljiv je kroz prosječni volumni udio kapljevine, prikazan dijagramima na slici 5.4. Usporedno s početnim slučajem a), najveće odstupanje u razvoju krivulje te u samim vrijednostima volumnog udjela kapljevine događa se kada je gorivo inicijalizirano u najvišoj točki geometrije, odnosno do sjedišta ventila. Fluktuacije brzine u fazi otvaranja prikazane su dijagramima na slici 5.5.



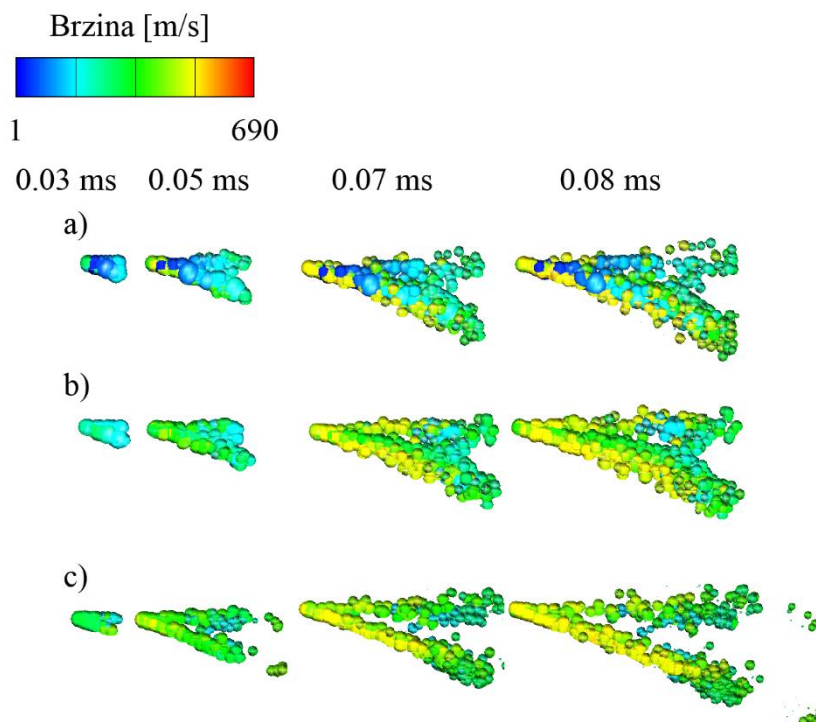
Slika 5.4 Prosječni volumni udio kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva



Slika 5.5 Brzina kapljevite faze kroz izlazni presjek mlaznice za različite početne uvjete inicijalizacije goriva

5.2. Euler Lagrangeovo višefazno strujanje

Računalni proračuni strujanja kroz mlaznicu provedene su s ciljem stvaranja *.nzf datoteke u koju su spremljeni podaci o strujanju na izlaznom presjeku mlaznice. Te datoteke korištene su kao ulazni podaci za proračun Euler Lagrangeovog spreja koji je korišten da se vidi postoje li razlike u procesu spreja, prilikom različite inicijalizacije u simulaciji sapnice, neovisno o korištenom pristupu opisivanja spreja.

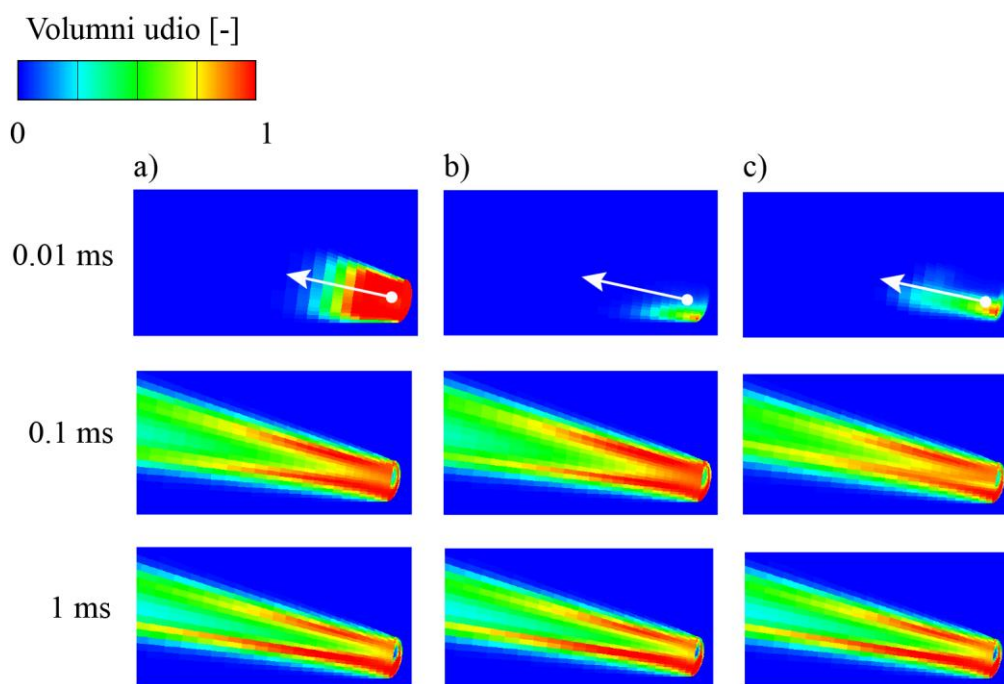


Slika 5.6 Razvoj spreja u početnoj fazi procesa ubrizgavanja za različite početne uvjete inicijalizacije goriva

Korištenjem *.nzf datoteke, ubrzan je proračun raspršivanja goriva budući da nije potrebno provoditi čitavu simulaciju ubrizgavanja kroz mlaznicu brizgaljke. Na slici 5.6 prikazan je razvoj spreja u početnoj fazi procesa ubrizgavanja. Početni slučaj rezultira pojavom neželjenih sporijih i većih čestica, tzv. *dummy parcels*, u odnosu na druga dva slučaja, te je utjecaj ulaznih podataka evidentiran kroz nesimetričnost spreja. Otklanjanjem čestica koje sadržavaju nultu brzinu, rezultati su vjerodostojniji. Ovi rezultati daju nam sigurnost da se novi rubni uvjet može razviti za Euler Eulerov pristup i da će se moći primijeniti i na druge pristupe opisivanje procesa raspršivanja goriva.

5.3. Euler Eulerovo višefazno strujanje

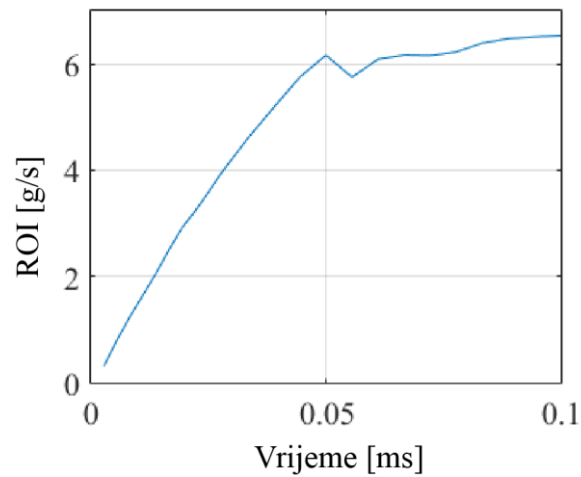
Euler Eulerov proračun također kao ulazne podatke koristi datoteke s informacijama o strujanju generirane provedbom simulacija procesa ubrizgavanja kroz mlaznicu. Prikazani rezultati na slici 5.7, prikazuju slučaj Eulerovog spreja u sprezi s *.nzf datotekom, a odnose se na volumni udio kapljevite faze. Izraženom točkom je označena je *inlet* selekcija, a strelica pokazuje smjer propagacije goriva, odnosno smjer raspršivanja. U prvom prikazanom trenutku između osnovnog slučaja a) te druga dva slučaja vidljive su znatne i očekivane razlike u skladu s proračunima ubrizgavanja goriva. Ponovno, razlike u rezultatima iščezavaju po završetku faze otvaranja, odnosno u stabilizacijskom periodu.



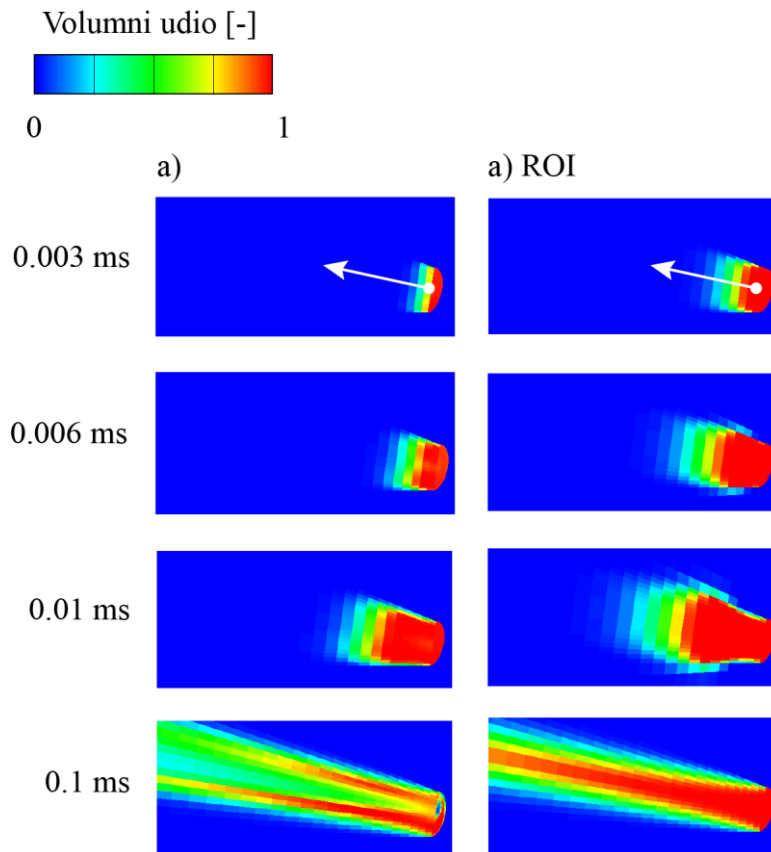
Slika 5.7 Volumni udio kapljevite faze goriva dobiven Euler Eulerovim pristupom koristeći *.nzf datoteku kao početni uvjet za različite početne uvjete inicijalizacije goriva

Slikom 5.9 dana je usporedba rezultata dviju simulacija, korištenje *.nzf datoteke i korištenje ROI krivulje, osnovnog slučaja ubrizgavanja a). U slučaju ROI, kao ulazni podatak za proračun koristi se krivulja brzine ubrizgavanja, prikazana slikom 5.8 koja je izračunata prema izrazu (5-4). ROI krivulja prikaza je samo za period podizanja ventila.

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^N \rho \alpha_i v_i A_i \quad (5-4)$$



Slika 5.8 Krivulja brzine ubrizgavanja goriva kroz izlazni presjek mlaznice



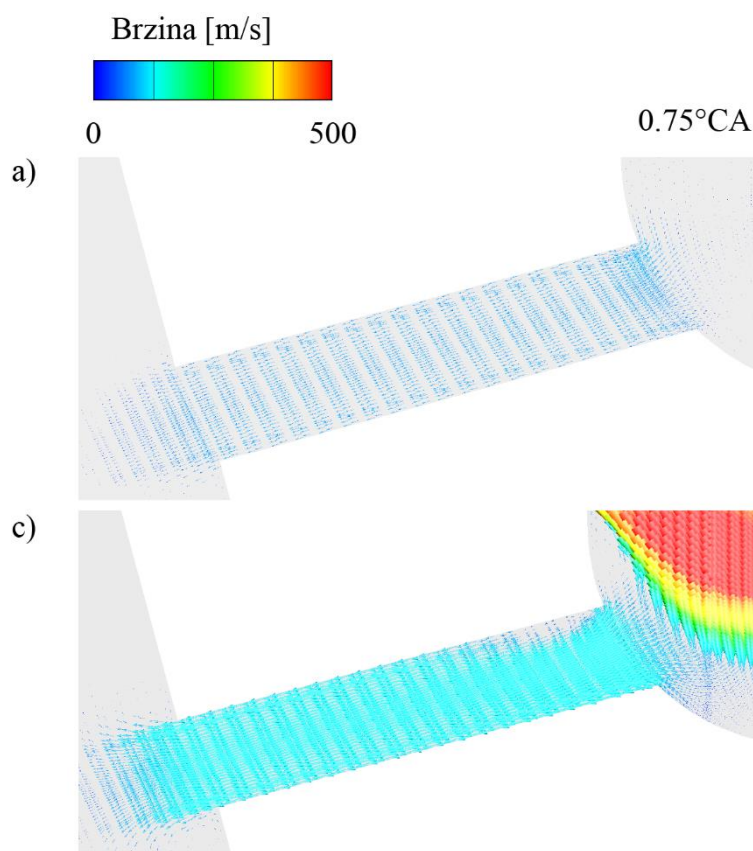
Slika 5.9 Volumni udio kapljevite faze goriva za osnovni slučaj a), dobiven Euler Eulerovim pristupom koristeći ulazne podatke iz *.nzf datoteke te iz krivulje ROI

Vidljivo je da u usporedbi sa slučajem gdje je kao ulazni podatak korištena *.nzf datoteka, razlika u rezultatima ostaje kroz cijeli proračun, ne nestaje sa završetkom faze otvaranja. Detalji

procesa na samom ulazu domene su izgubljeni, no poznat je fluks mase, a to je prihvatljivo prilikom proračuna motora s unutrašnjim izgaranjem koji se provode u praksi. ROI krivulja uobičajeno se utvrđuje iz eksperimentalnih istraživanja te se kao takva koristi za računalne proračune inženjerskih sustava opremljenih s brizgaljkom. Ovim prikazom, želi se pokazati kako je ROI krivulja pravilno generirana iz *.nzf datoteke, a to se i potvrđuje jednakom količinom ubrizganog goriva u oba slučaja.

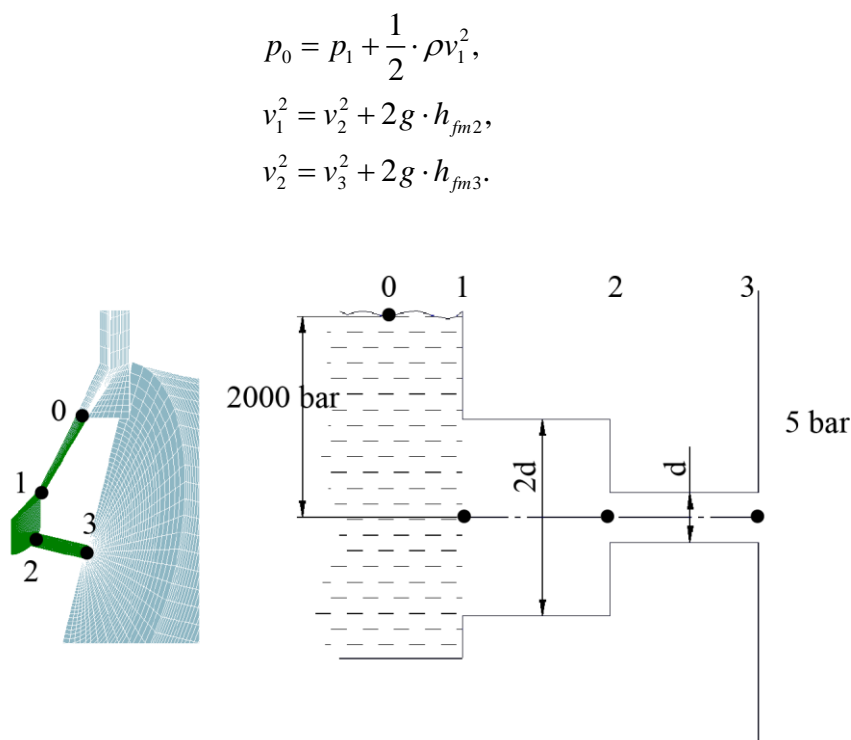
5.3.1. *Pretpostavka početne brzine*

Slučaj a) pretpostavlja nultu početnu brzinu na izlazu iz mlaznice jer se mirujuće gorivo nalazi unutar cijele domene brizgaljke. Kako novi početni uvjeti diktiraju inicijalizaciju kapljevine podalje od izlaznog presjeka mlaznice, ta pretpostavka u stvarnosti ne vrijedi. Slikom 5.10, dan je vektorski prikaz brzine u mlaznici za 0.75°CA , odnosno $1.66667e-5$ s nakon početka simulacije. Vidljivo je kako je vrijednost početne brzine u slučaju c) znatno veća od nule. Kada je faza 1 inicijalizirana do ulaza u mlaznicu, slučaj b), brzina se ne razlikuje bitno od osnovnog slučaja, a), te je brzina u početnom trenutku pretpostavljena samo za c).



Slika 5.10 Vektorski prikaz apsolutne brzine tekuće faze u mlaznici

Pretpostavka početne brzine bazirana je na modeliranju strujanja kroz cijevi različitog poprečnog presjeka uz lokalne gubitke kod naglog proširenja i suženja površine. Slika 5.11 kvalitativno prikazuje presjeka potrebne za izračun početne brzine. Točka 1 predstavlja sjedište igle brizgaljke iznad koje je pretpostavljen veliki spremnik ispunjen kapljevitom fazom goriva pod tlakom od 2000 bar. Na slici 5.11, od točke 1 do točke 2 uzima se u obzir putanja od sjedišta igle do ulaza u mlaznicu i taj se volumen aproksimira s cijevi promjera dva puta većeg od promjera mlaznice. Točkom 3 označen je izlazni presjek mlaznice. Izračunavanje brzine v_3 na izlaznom presjeku, odnosno u točki 3, izvršeno je rješavanjem sustava Bernoulijevih jednadžbi, postavljenih za presjeka: od točke 0 – 1, 1 – 2, i 2 – 3, dane izrazima (5-5).



Slika 5.11 Kvalitativni prikaz pojednostavljene geometrije brizgaljke

U gornjem sustavu jednadžbi, h_{fm2} i h_{fm3} predstavljaju lokalne gubitke dobivene prema formulama:

$$h_{fm2} = K_2 \frac{v_2^2}{2g},$$

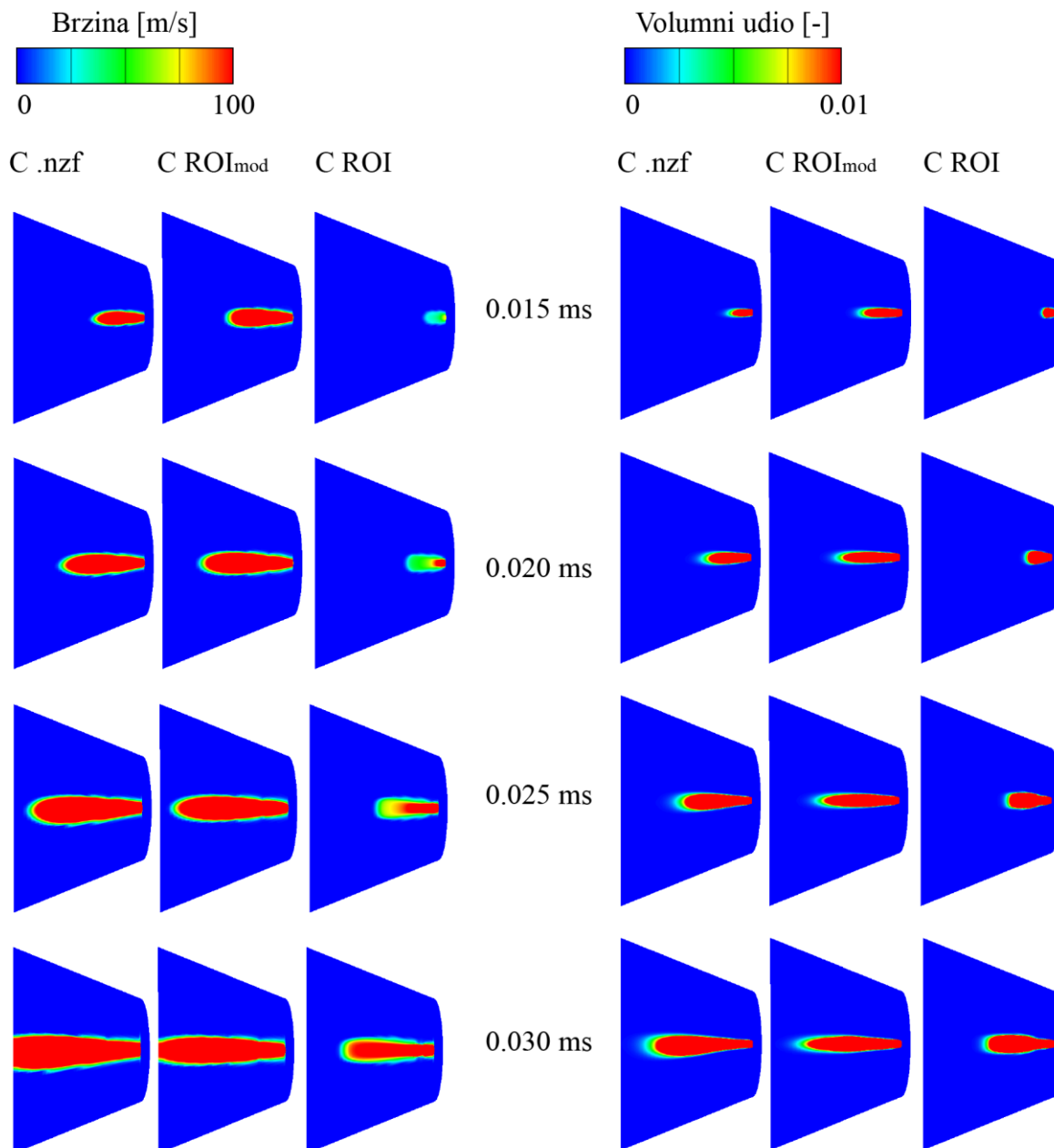
$$h_{fm3} = K_3 \frac{v_3^2}{2g},$$
(5-6)

gdje su K_2 i K_3 koeficijenti kontrakcije te iznose 9 i 1.

$$K_2 = \left(1 - \frac{(2d)^2}{d^2} \right) = 9, \quad (5-7)$$
$$K_3 = 1.$$

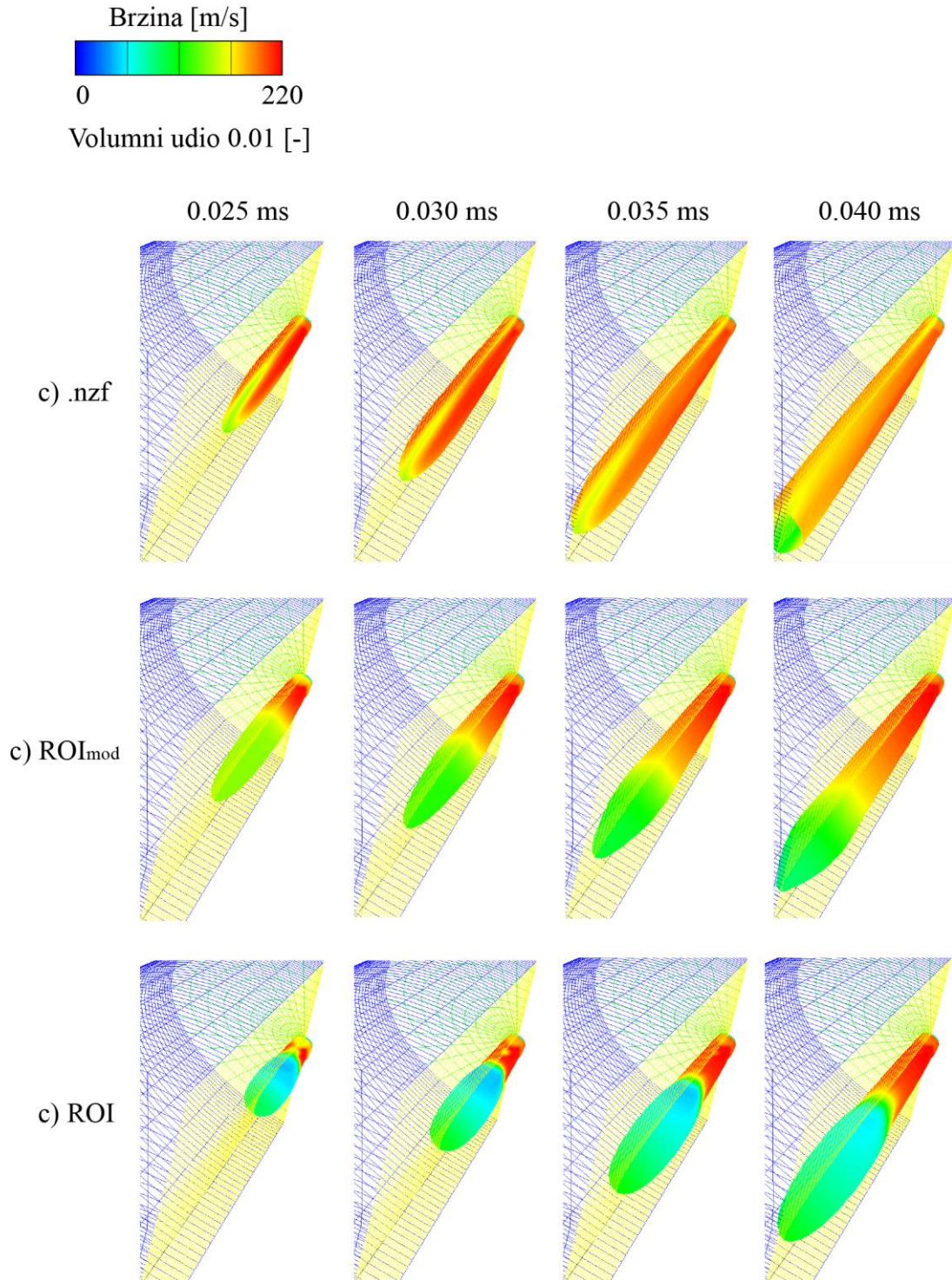
Brzina ubrizgavanja dobivena iz gore navedenih jednadžbi korištena je kao pretpostavljena početna brzina u novo razvijenom rubnom uvjetu prilikom ubrizgavanja kapljevite goriva.

U svrhu validacije novog modela opisanog u poglavlju 3.8, provedeni su EE proračuni s varijacijom ulaznih podataka. Ispitan je proces vremenskog i prostornog širenja kapljevite faze u slučaju inicijalizacije faze 1 do sjedišta ventila kada se kao rubni uvjet ubrizgavanja koristi *.nzf datoteka, konvencionalan pristup korištenja ROI krivulje te rubni uvjet razvijen unutar ovog rada. Slika 5.12 prikazuje rezultate brzine i volumnog udjela kapljevine za sva tri navedena slučaja. U prikazanim rezultatima, vidljivo je kako je brzina kapljevite faze točnije opisana korištenjem rubnog uvjeta razvijenog unutar ovog rada (slučaj C ROI_{mod}). Kod modificiranog rubnog uvjeta, u obzir se uzima početnu brzinu na izlaznom presjeku mlaznice za prvotni period ubrizgavanja, što je objašnjeno u poglavlju 0. Na taj način, volumni udio postaje skalirana veličina, dok brzina zadržava konstantnu vrijednost što zapravo opisuje nastrojavanje kapljevite faze određenom brzinom i postepeno ispunjavanje mlaznice. Ukoliko je vrijednost brzine, izračunata iz ROI krivulje, veća od početne vrijednosti brzine, koristi se dosadašnji konvencionalni pristup, tj. vrijednost brzine računa se iz krivulje ubrizgavanja. Modificirani profil ROI pokazao se boljom zamjenom od postojećih ROI krivulja. Na prikazanim rezultatima jasno se može vidjeti važnost ovog rada i snaga novorazvijenog rubnog uvjeta ubrizgavanja goriva, koji može služiti za točnije opisivanje procesa ubrizgavanja u ranoj fazi podizanja ventila sapnice.



Slika 5.12 Brzina i volumni udio kapljevine za slučaj c) uz korištenje *.nzf datoteke, novog (C ROI_{mod}) i konvencionalnog rubnog uvjeta definiranog ROI krivuljom

Volumni udio kapljevine, prikazan na desnoj strani slike 5.12, u slučaju konvencionalnog ROI rubnog uvjeta na ulaznoj selekciji iznosi 1, što odgovara potpunoj ispunjenosti mlaznice gorivom, dok je u slučaju modificiranog rubnog uvjeta te u slučaju *.nzf datoteke, ta vrijednost mnogo niža. Niža vrijednost volumnog udjela kapljevine predstavlja ispravan način računanja rubnog uvjeta kod ubrizgavanja koji predviđa vrijeme toka fluida kroz sapnicu i brzinu nastrojavanja.



Slika 5.13 Penetracija kapljevine koristeći volumni udio kao površinski parametar te brzinu kao atribut prikazivanja za slučaj c), koristeći ulazne parametre iz *Nozzle file-a*, modificiranog te konvencionalnog ROI rubnog uvjeta

Slikom 5.13 prikazano je vremensko i prostorno širenje kapljevite faze koristeći volumni udio kao iznos izo-površine te brzinom kao obojanim atributom za slučaj inicijalizacije kapljevine

Dajana Benković

do sjedišta ventila c), koristeći podatke spremljene u *.nzf datoteku, te modificiran i konvencionalni rubni uvjet. Iz prikazanih rezultata, ponovno je vidljivo odlično, a i točnije poklapanje rezultata korištenjem novog rubnog uvjeta s rezultatima dobivenih korištenjem *.nzf datoteke kao ulaznih podataka.

6. ZAKLJUČCI

U ovome radu razvijen je novi rubni uvjet za proces ubrizgavanja kapljevite goriva. Prvo su provedene simulacije ubrizgavanja goriva kroz mlaznicu s različitim definicijom početnih uvjeta te je promotren njihov utjecaj na krivulju ubrizgavanja goriva. Nadalje, pobliže je analiziran utjecaj faze otvaranja ventila te su provedene računalne simulacije raspršivanja kapljevite faze koristeći Euler Lagrangeov pristup i podatke iz izrađene *.nzf datoteke kao ulazne rubne uvjete. Najveći dio rada posvećen je provedbi računalnog Euler Eulerovog višefaznog strujanja u svrhu ispitivanja različitih početnih uvjeta, nakon čega je razvijen i verificiran novi rubni uvjet kojim su ulazni podaci određeni modificiranom krivuljom ROI-a.

Promatranjem rezultata polja brzina, u slučaju a) penetracija kapljevite faze je najmanja, što je i u skladu s pretpostavkom nulte brzine na promatranom izlaznom presjeku mlaznice na samom početku procesa ubrizgavanja. Najznačajnija razlika vidljiva je u krivuljama volumnog udjela fluida. U slučaju c), kapljevita faza inicijalizirana je u najvišoj geometrijskoj točki pa je samim time i najdulje zabilježena nulta vrijednost brzine, koja se očitava kao kašnjenje krivulje u odnosu na osnovni slučaj a). Krivulje fluksa mase i apsolutne brzine kapljevine pokazuju slično ponašanje u početku procesa za sva tri slučaja, s malim fluktuacijama uspoređujući slučajeve b) i c) sa slučajem a).

Analizom rezultata brzine raspršivanja goriva koristeći Euler Lagrangeov pristup, također su uočene znatne razlike. U slučajevima b) i c) ne pojavljuju se parcele s nulatom brzinom, čime rezultati proračuna postaju vjerodostojniji.

Euler Eulerovim pristupom uspoređeni su i rezultati osnovnog slučaja a), kada su ulazni podaci definirani *.nzf datotekom te krivuljom ROI. Postavljanjem *.nzf datoteke kao rubnog uvjeta na ulazu domene, razlike u rezultatima iščezavaju po završetku faze otvaranja, dok su kod korištenja ROI krivulje razlike vidljive do kraja procesa ubrizgavanja. Uvođenjem pretpostavke pozitivne početne brzine na ulaznom presjeku domene, simulira se ubrizgavanje kapljevine od točke inicijalizacije, odnosno od sjedišta ventila do izlaznog presjeka mlaznice. Uspoređeni su rezultati proračuna c) koristeći tri pristupa zadavanja ulaznih podataka, *.nzf datotekom te modificiranim i konvencionalnim rubnim uvjetom gdje se ROI krivulja koristi za izračunavanje brzine i volumnog udjela. Uočeno je dobro podudaranje rezultata apsolutne brzine dobivenih *.nzf pristupom s rezultatima gdje je za definiranje ulaznih podataka korišten novorazvijeni rubni uvjet.

Kako podaci o strujanju zabilježeni u *.nzf datoteku nisu uvijek dostupni ili poznati, ulazni podaci za proračune raspršivanja zadaju se ROI krivuljom. Novorazvijeni rubni uvjet pokazao se boljom zamjenom za *.nzf datoteku, nego dosad korišten pristup pri čemu je pokazana važnost definiranja početne brzine nastrujavanja fluida i pravilnog izračuna volumnog udjela kapljevite faze. Budući da je kontroliranje procesa ubrizgavanja jedan od glavnih faktora koji utječu na proces izgaranja, novi rubni uvjet uveden u ovom radu može doprinijeti poboljšanju proračuna procesa ubrizgavanja, isparavanja te izgaranja, a samim time i cjelokupnoj efikasnosti sustava gdje postoje procesi raspršivanja izgaranja.

PRILOZI

noz_reading.m

```
clear all
format short e

fid=fopen('case1_360.nzf'); % upisati ime *.nzf dokumenta
% fileID
% varijabla pomocu koje funkcija textscan prolazi kroz dokument
% fid=fopen('naziv .nzf dokumenta')

cac01=textscan(fid,'%f', 1, 'HeaderLines', 12, 'CollectOutput', true,
'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
x01=cell2mat(cac01);
numberOfPhases=x01; % broj faza

cac02=textscan(fid,'%f', 1, 'HeaderLines', 27, 'CollectOutput', true,
'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
x02=cell2mat(cac02);
numOfTsteps=x02; % broj vremenskih koraka

cac03=textscan(fid,'%f', 1, 'HeaderLines', numOfTsteps+2, 'CollectOutput',
true, 'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);

Block=1;
while ~feof(fid)

    % 'textscan' prolazi kroz dokument identificiran 'fid' varijablom.
    % textscan(fid, 'tip podataka (floating number)', 'naslovna linija',
    % broj naslovnih linija koje zelimo preskociti,
    % 'spremanje skeniranih podataka', 'razdjelnik podataka', '',
    % 'prazne vrijednosti upisuje kao 0')

    cac1(Block)=textscan(fid, '%f%f', 1, 'HeaderLines', 1, 'CollectOutput',
true, 'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
    x1=cac1(cellfun(@isempty, cac1)==0); % Pronalazenje i eliminiranje
    % praznih cell-ova
    x11=cell2mat(x1(:, :)'); % Pretvaranje podataka iz array u matrice
    t=x11(:, 1); % Vremenski koraci zapisivanja podataka
    step=x11(1, 2); % Broj face-ova promatrane geometrije

    cac2(Block)=textscan(fid, '%f%f%f', 1, 'CollectOutput', true, 'Delimiter',
'', 'EmptyValue', 0);
    x2=cac2(cellfun(@isempty, cac2)==0);
    x22=cell2mat(x2(:, :)');
    m1=x22(:, 1); % Maseni protok faze 1
    m2=x22(:, 2); % Maseni protok faze 2
    m3=x22(:, 3); % Maseni protok faze 3

    cac3(Block)=textscan(fid, '%f%f%f%f%f%f', step, 'CollectOutput', true,
'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
    x3=cac3(cellfun(@isempty, cac3)==0);
    x33=cell2mat(x3(:, :)');
    x_cen=x33(:, 1); % x koordinata sredista elementa
```

Dajana Benković

```
y_cen=x33(:,2); % y koordinata sredista elementa
z_cen=x33(:,3); % z koordinata sredista elementa
f=x33(1:step,4); % površina elementa
x_nor=x33(:,5); % x koordinata vektora normale
y_nor=x33(:,6); % y koordinata vektora normale
z_nor=x33(:,7); % z koordinata vektora normale

cac4(Block)=textscan(fid, '%f%f%f%f%f%f%f', numberOfPhases*step,
'CollectOutput', true, 'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
x4=cac4(cellfun(@isempty, cac4)==0);
x44=cell2mat(x4(:,:));

cac5(Block)=textscan(fid, '%f%f*f*f*f*f*f*f*f', step, 'CollectOutput',
true, 'Delimiter', '', 'EmptyValue', 0);
x5=cac5(cellfun(@isempty, cac5)==0);
x55=cell2mat(x5(:,:));
S1=x55(:,1); S2=x55(:,2); % 'attribute data'

Block=Block+1;
end

[~]=fclose(fid);

numberOfTimesteps=length(t); % Broj vremenskih koraka
numberOfFaces=step;

% u v w k epsilon ro alfa T
% Koristenje: red cell arraya oznacava timestep, stupac fazu; u{2,3}- faza
% 3 timestepa 2 varijable u

for timestep=1:numberOfTimesteps % loop po timestepu
    for phase=1:numberOfPhases % loop po fazi
        index=(numberOfPhases*numberOfFaces)*(timestep-
1)+numberOfFaces*(phase-1)+1;
        u{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,1);
        v{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,2);
        w{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,3);
        k{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,4);
        epsilon{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,5);
        rho{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,6);
        alpha{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,7);
        T{timestep,phase}=x44(index:index+numberOfFaces-1,8);
    end
end

u_ph1=[u{:},1]; u_ph2=[u{:},2]; u_ph3=[u{:},3]; % u komponenta brzine
pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)
v_ph1=[v{:},1]; v_ph2=[v{:},2]; v_ph3=[v{:},3]; % v komponenta brzine %
pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)
w_ph1=[w{:},1]; w_ph2=[w{:},2]; w_ph3=[w{:},3]; % w komponenta brzine %
pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)
k_ph1=[k{:},1]; k_ph2=[k{:},2]; k_ph3=[k{:},3]; % 'turbulence kinetic
energy' pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)
epsilon_ph1=[epsilon{:},1]; epsilon_ph2=[epsilon{:},2];
epsilon_ph3=[epsilon{:},3]; % 'dissipation rate' pojedine faze za sve
timestep-ove (stupce)
rho_ph1=[rho{:},1]; rho_ph2=[rho{:},2]; rho_ph3=[rho{:},3]; % gustoća
pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)
```

Dajana Benković

```
alpha_ph1=[alpha{:,1}]; alpha_ph2=[alpha{:,2}]; alpha_ph3=[alpha{:,3}]; %  
volumni udio pojedine faze za sve timestep-ove (stupce)  
T_ph1=[T{:,1}]; T_ph2=[T{:,2}]; T_ph3=[T{:,3}]; % temperatura pojedine  
faze za sve timestep-ove (stupce)
```

```
% pozivanje skripte za racunanje prosjecnih vrijednosti  
avrValues
```

avrValues.m

```
nF=numberOfFaces;
nTs=numberOfTimesteps;

for nTime=1:nTs

    for nface=1:nF

        alpha_f1(nface,nTime)=alpha_ph1(nface,nTime)*f(nface,1);
        alpha_f2(nface,nTime)=alpha_ph2(nface,nTime)*f(nface,1);
        alpha_f3(nface,nTime)=alpha_ph3(nface,nTime)*f(nface,1);

        velocity_ph1(nface,nTime)=sqrt(u_ph1(nface,nTime).^2+v_ph1(nface,nTime).^2+
w_ph1(nface,nTime).^2);

        velocity_ph2(nface,nTime)=sqrt(u_ph2(nface,nTime).^2+v_ph2(nface,nTime).^2+
w_ph2(nface,nTime).^2);

        velocity_ph3(nface,nTime)=sqrt(u_ph3(nface,nTime).^2+v_ph3(nface,nTime).^2+
w_ph3(nface,nTime).^2);

        mflux_ph1_sum(nface,nTime)=alpha_ph1(nface,nTime)*f(nface,1)*rho_ph1(nface,
nTime)*velocity_ph1(nface,nTime);

        mflux_ph2_sum(nface,nTime)=alpha_ph2(nface,nTime)*f(nface,1)*rho_ph2(nface,
nTime)*velocity_ph2(nface,nTime);

        mflux_ph3_sum(nface,nTime)=alpha_ph3(nface,nTime)*f(nface,1)*rho_ph3(nface,
nTime)*velocity_ph3(nface,nTime);

        vel_ph1_areasum(nface,nTime)=velocity_ph1(nface,nTime)*f(nface,1);
        vel_ph2_areasum(nface,nTime)=velocity_ph2(nface,nTime)*f(nface,1);
        vel_ph3_areasum(nface,nTime)=velocity_ph3(nface,nTime)*f(nface,1);

    end

    alpha_avr_ph1(:,nTime)=(sum(alpha_f1(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
volumni udio faze 1, [-]
    alpha_avr_ph2(:,nTime)=(sum(alpha_f2(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
volumni udio faze 2, [-]
    alpha_avr_ph3(:,nTime)=(sum(alpha_f3(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
volumni udio faze 3, [-]

    mflux_avr_ph1(:,nTime)=(sum(mflux_ph1_sum(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
fluks mase faze 1, [kg/(s m^2)]
    mflux_avr_ph2(:,nTime)=(sum(mflux_ph2_sum(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
fluks mase faze 2, [kg/(s m^2)]
    mflux_avr_ph3(:,nTime)=(sum(mflux_ph3_sum(:,nTime)))/(sum(f)); % Prosjecni
fluks mase faze 3, [kg/(s m^2)]

    velocity_avr_ph1(:,nTime)=(sum(vel_ph1_areasum(:,nTime)))/(sum(f)); %
Prosjecna apsolutna brzina faze 1, [m/s]
```

Dajana Benković

```
velocity_avr_ph2(:,nTime)=(sum(vel_ph2_areasum(:,nTime)))/(sum(f)); %  
Prosjecna apsolutna brzina faze 2, [m/s]  
velocity_avr_ph3(:,nTime)=(sum(vel_ph3_areasum(:,nTime)))/(sum(f)); %  
Prosjecna apsolutna brzina faze 3, [m/s]  
  
end  
  
x_t=t;  
y_mflux=mflux_avr_ph1;  
Area_mflux=cumtrapz(x_t,y_mflux);  
A_uk=Area_mflux(length(Area_mflux)); % Ukupna površina ispod krivulje  
fluksa mase za fazu 1, [kg/m^2]  
mass_ph1=A_uk*sum(f)*2; % Ubrizgana masa faze 1 (tekuće faze goriva), [kg]  
mFlow_ph1=mflux_avr_ph1*sum(f); % Maseni protok faze 1, [kg/s]  
  
% Crtanje 'Maseni protok - t' dijagrama za fazu 1  
figure  
plot(t.*1000,mFlow_ph1.*1000)  
grid on  
xlabel('Vrijeme [ms]')  
ylabel('Maseni protok [g/s]')  
  
massFlow_ph1=mFlow_ph1';  
A_noz=sum(f); % Površina poprečnog presjeka mlaznice, [m]  
  
t_mFlow=[x_t massFlow_ph1];  
dlmwrite('t_massFlow3.dat',t_mFlow,'delimiter','\t'); % spremanje matrice  
u .dat oblik  
  
% Crtanje 'alpha - t' dijagrama  
figure  
plot(t.*1000,alpha_avr_ph1,t.*1000,alpha_avr_ph2,t.*1000,alpha_avr_ph3)  
grid on  
xlabel('Vrijeme [ms]')  
ylabel('\alpha_{avr} [-]')  
legend('faza 1_{liquid}','faza 2_{gas}','faza 3_{air}')  
xlabel('Time [ms]')  
ylabel('\alpha [-]')  
legend('liquid','gas','air')  
  
% Crtanje 'Mass flux - t' dijagrama za fazu 1  
figure  
plot(t.*1000,mflux_avr_ph1.*1000)  
grid on  
xlabel('Vrijeme [ms]')  
ylabel('Mass flux_{avr} [g/m^2s]')  
  
% Crtanje 'Mass flux - t' dijagrama  
figure  
plot(t.*1000,mflux_avr_ph1.*1000,t.*1000,mflux_avr_ph2.*1000,t.*1000,mflux_  
avr_ph3.*1000)  
grid on  
xlabel('Vrijeme [ms]')  
ylabel('Mass flux_{avr} [g/m^2s]')  
legend('faza 1_{liquid}','faza 2_{gas}','faza 3_{air}')  
  
% Crtanje 'Brzina - t' dijagrama  
figure
```

Dajana Benković

```
plot(t.*1000,velocity_avr_ph1,t.*1000,velocity_avr_ph2,t.*1000,velocity_avr_ph3)
grid on
xlabel('Vrijeme [ms]')
ylabel('Brzina_{avr} [m/s]')
legend('faza 1_{liquid}','faza 2_{gas}','faza 3_{air}')
```



Subject: Letter of recommendation for Miss Dajana Benković

Miss Dajana Benković is a student at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

She performed the numerical simulation of nozzle flow and fuel spray injection. Initially, she created the computational meshes of the theoretical nozzle where she performed analyses and produced nozzle files, where the flow field properties at the nozzle orifice is stored. Afterwards, the nozzle file data were adequately transferred to the rate of injection diagram. With the rate of injection curves, Dajana produced ideas and verified the newly developed rate of injection boundary condition for the Eulerian spray simulation. The novelty in this approach is the scaling of the liquid volume fraction instead of scaling only the injection velocity. This new approach ensures mass and momentum conservation, and it showed excellent agreement in the process of verification.

Dajana showed a good knowledge of thermodynamics and fluid mechanics, and got insight into the CFD simulations. She became a user of Matlab and FIRE™ tools. In addition, she showed a good ability for resolving tasks on her own.

I have no doubt that regarding her diligence, motivation and creativity. Thus, in my opinion Dajana will be the appropriate candidate for the award.

I wish to express my satisfaction to be able to recommend the performed work for the award.

Sincerely Yours,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Wilfried Edelbauer', written over a light blue horizontal line.

Dr. Wilfried Edelbauer
Senior Project Leader - Multiphase Flow
Advanced Simulation Technologies

E-mail: wilfried.edelbauer@avl.com
Phone: +43/316/787-7258
Fax: +43/316/787- 777

AVL LIST GMBH
8020 Graz, Hans-List-Platz 1
AUSTRIA
<http://www.avl.com>

Dajana Benković

ZAHVALE

Rad je podržan od Hrvatske zaklade za znanost projektom IP-2016-06-1488.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Zvonimiru Petranoviću na implementaciji računalnog koda u CFD sučelje, te mentoru doc. dr. sc. Milanu Vujanoviću, na ukazanom povjerenju, susretljivosti te pomoći i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se na potpori razvojne CFD grupe iz AVL-AST, Graz, Austria.

Dajana Benković

POPIS LITERATURE

- [1] Javier López J, Salvador FJ, De La Garza OA, Arrègle J. A comprehensive study on the effect of cavitation on injection velocity in diesel nozzles. *Energy Convers Manag* 2012;64:415–23. doi:10.1016/j.enconman.2012.03.032.
- [2] He Z, Xuan T, Xue Y, Wang Q, Zhang L. A numerical study of the effects of injection rate shape on combustion and emission of diesel engines. *Therm Sci* 2014;18:67–78. doi:10.2298/TSCI130810013H.
- [3] Desantes JM, Benajes J, Molina S, González CA. The modification of the fuel injection rate in heavy-duty diesel engines. Part 1: Effects on engine performance and emissions. *Appl Therm Eng* 2004;24:2701–14. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.05.003.
- [4] Shuai S, Abani N, Yoshikawa T, Reitz RD, Park SW. Evaluation of the effects of injection timing and rate-shape on diesel low temperature combustion using advanced CFD modeling. *Fuel* 2009;88:1235–44. doi:10.1016/j.fuel.2009.01.012.
- [5] Branch PM. Numerical Investigation of the Effect of Fuel Injection Mode on Spray / Wall Interaction and Emission Formation 2010;14:1039–49. doi:10.2298/TSCI10041039J.
- [6] Nishimura T, Satoh K, Takahashi S, Yakota K. Effects of Fuel Injection Rate on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine. 14th Int Combust Syst Symp 1998;981929. doi:10.1155/2017/9702625.
- [7] Mohan B, Yang W, Chou S. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines — A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;28:664–76. doi:10.1016/j.rser.2013.08.051.
- [8] Guo C, Song Y, Feng H, Zuo Z, Jia B, Zhang Z, et al. Effect of fuel injection characteristics on the performance of a free-piston diesel engine linear generator: CFD simulation and experimental results. *Energy Convers Manag* 2018;160:302–12. doi:10.1016/j.enconman.2018.01.052.
- [9] Payri R, García JM, Salvador FJ, Gimeno J. Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel* 2005;84:551–61. doi:10.1016/j.fuel.2004.10.009.
- [10] Busch S, Miles PC. Parametric Study of Injection Rates With Solenoid Injectors in an Injection Quantity and Rate Measuring Device. *J Eng Gas Turbines Power*

- 2015;137:101503. doi:10.1115/1.4030095.
- [11] Postrioti L, Buitoni G, Pesce FC, Ciaravino C. Zeuch method-based injection rate analysis of a common-rail system operated with advanced injection strategies. *Fuel* 2014;128:188–98. doi:10.1016/j.fuel.2014.03.006.
- [12] Glenn R. Bower and David E. Foster. A Comparison of the Bosch and Zuech Rate of Injection Meters. *SAE Tech Pap* 1991;298:1–12. doi:10.4271/910724.
- [13] Marčič M. A new method for measuring fuel-injection rate. *Flow Meas Instrum* 1999;10:159–65. doi:10.1016/S0955-5986(98)00053-3.
- [14] Mari M. Deformational injection rate measuring method. *Rev Sci Instrum* 2002;73:3373. doi:10.1063/1.1499534.
- [15] Benajes J, Pastor J V., Payri R, Plazas AH. Analysis of the Influence of Diesel Nozzle Geometry in the Injection Rate Characteristic. *J Fluids Eng* 2004;126:63. doi:10.1115/1.1637636.
- [16] Duan L, Yuan SQ, Hu LF, Yang WM, Yu J Da, Xia XL. Injection performance and cavitation analysis of an advanced 250 MPa common rail diesel injector. *Int J Heat Mass Transf* 2016;93:388–97. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.028.
- [17] Payri R, Salvador FJ, Gimeno J, De la Morena J. Influence of injector technology on injection and combustion development - Part 1: Hydraulic characterization. *Appl Energy* 2011;88:1068–74. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.012.
- [18] Desantes JM, López JJ, Carreres M, López-Pintor D. Characterization and prediction of the discharge coefficient of non-cavitating diesel injection nozzles. *Fuel* 2016;184:371–81. doi:10.1016/j.fuel.2016.07.026.
- [19] Dernote J, Hespel C, Foucher F, Houillé S, Mounaïm-Rousselle C. Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector. *Fuel* 2012;96:153–60. doi:10.1016/j.fuel.2011.11.073.
- [20] Payri R, García A, Domenech V, Durrett R, Plazas AH. An experimental study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system. *Fuel* 2012;97:390–9. doi:10.1016/j.fuel.2011.11.065.
- [21] Han D, Wang C, Duan Y, Tian Z, Huang Z. An experimental study of injection and spray characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail injection system. *Energy*

2014;75:513–9. doi:10.1016/j.energy.2014.08.006.

- [22] Diesel Engine n.d. <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>.
- [23] Nozzles n.d.
- [24] Schmidt DP. The internal flow of diesel fuel injector nozzles: A review. *Int J Engine Res* 2001;2:1–22. doi:10.1243/1468087011545316.
- [25] Diesel Injecotr n.d. <http://www.fleetequipmentmag.com/stiction-solution-diesel-engine/>.
- [26] Diesel Fuel Injector Nozzles n.d. https://www.dieselnets.com/tech/engine_fi_nozzle.php.
- [27] Moukalled F, Mangani L, Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. vol. 113. 2016. doi:10.1007/978-3-319-16874-6.
- [28] Virag Z, Džijan I. *Računalna dinamika fluida - skripta predavanja*. Zagreb: 2014.
- [29] Petranović Z. *Numerical modelling of spray and combustion processes using the euler eulerian multiphase approach*, University of Zagreb 2016.
- [30] AVL LIST GmbH. *Avl Fire* 2016:1–4.

SAŽETAK

Autor: Dajana Benković
Naslov rada: Razvoj novog rubnog uvjeta za opisivanje procesa ubrizgavanja kapljevito goriva

Povećanje učinkovitosti i smanjenje emisija glavni su razlozi konstantnog usavršavanja dizelskih motora. Jedan od faktora koji izravno utječu na proces izgaranja je način ubrizgavanja goriva u komoru izgaranja. Proces ubrizgavanja okarakteriziran je brzinom ubrizgavanja ili krivuljom ubrizgavanja, ROI (engl. *Rate of Injection*). Kontrolom upravo tog parametra moguće je kontrolirati i proces izgaranja goriva, a samim time i emisije koje su posljedica kvalitete procesa izgaranja. Krivulje ubrizgavanja utvrđene su eksperimentalnim putem na temelju mjerenja razlike tlaka i impulsne sile raspršivanja. Konvencionalni izgled krivulje ubrizgavanja određen je pretpostavkom nulte početne brzine, što fizikalno odgovara potpunoj ispunjenosti brizgaljke fluidom. U ovom radu, koristeći komercijalni programski paket AVL FIRE™, ispitan je utjecaj početnog položaja inicijalizacije goriva na proces ubrizgavanja goriva. Provedene su simulacije procesa ubrizgavanja s ciljem izrade datoteke u kojoj su spremljeni podaci o strujanju, tzv. *Nozzle file*. Nadalje, analizirani su i višefazni procesi raspršivanja goriva koristeći Euler Lagrangeov i Euler Eulerov pristup te su uspoređeni rezultati za različite početne uvjete inicijalizacije goriva. Najveće razlike pokazale su se u volumnom udjelu kapljevine osnovnog slučaja a), gdje je kapljevita faza inicijalizirana do izlaznog presjeka mlaznice, i slučaja c), u kojem je na početku procesa ubrizgavanja kapljevina zadana do sjedišta igle brizgaljke.

Razvijen je novi rubni uvjet kojim je u obzir uzeta brzina nastrujavanja kapljevine na promatranom izlaznom presjeku mlaznice. Postojećim pristupom brzina ubrizgavanja računa se iz krivulje ROI, dok se novim rubnim uvjetom skalira volumni udio kapljevine te se pretpostavlja početna vrijednost brzine znatno veća od nule. Ta vrijednost drži se konstantnom sve dok je brzina ubrizgavanja prema postojećem pristupu manja od postavljene vrijednosti. Nakon što brzina prijeđe zadanu vrijednost, proračun se nastavlja prema postojećem konvencionalnom pristupu. Na taj je način simulirano ubrizgavanje goriva do izlaznog presjeka mlaznice na kojem su bilježeni podaci o strujanju. Provedeni su proračuni Euler Eulerovog višefaznog strujanja kako bi se usporedio utjecaj rubnih uvjeta na tijek procesa. Analizom rezultata ustanovljeno je da modificirani rubni uvjet ubrizgavanja rezultira poljem brzine sličnom onome dobivenim korištenjem *.nzf datoteke kao baze ulaznih podataka.

Dajana Benković

S obzirom da je poželjno kada je god to moguće, kao ulazne podatke koristiti *.nzd datoteku, a u većini slučajeva ona nije dostupna, novi rubni uvjet pokazao se kao dobra zamjena iste te daje vjerodostojnije rezultate usporedno s postojećim pristupom.

Ključne riječi: CFD, višefazno strujanje, ubrizgavanje, strujanje u mlaznici, ROI rubni uvjet

SUMMARY

Author: Dajana Benković
Title: Development of a new boundary condition for description of a liquid fuel injection process

Efficiency increase and emission decrease are one of the main reasons for constant improvements of Diesel engines. One of the factors that have a direct influence on combustion process is the way fuel is delivered into the combustion chamber. The injection process is characterized by Rate of Injection curve, ROI. By taking into account that particular parameter, it is possible to control the process of fuel combustion and, consequently, emissions that are the result of the quality of the combustion process. ROI curves are determined experimentally by the pressure difference and spray impulse force measurements. Conventional ROI profile is characterized by the initial zero-velocity assumption, which physically corresponds to the injector being completely filled with fuel. In this work, using the commercial software AVL FIRE™, the impact of the initial fuel position on the injection process has been investigated. The simulations of the injection process have been carried out with the aim of generating of the so-called *Nozzle file*, where information about nozzle flow and geometrical characteristics are recorded. Afterwards, multiphase spray processes using the Euler Lagrangian and Euler Eulerian approach have been analysed, and the results with fuel initialization variation have been compared. The greatest difference is seen by the volume fraction comparison of the baseline case a), where the liquid phase is initialized up to the nozzle exit, and case c), in which the liquid fuel phase is set up to the injector needle seat.

A new boundary condition, which takes into account the fuel velocity on the observed outlet section, has been implemented. Within the current approach, the injection velocity is calculated from the ROI curve, while in the new boundary condition, the volume fraction of the liquid phase is scaled and positive velocity value on the inlet is assumed. This value is kept constant, while the injection velocity, according to the current conventional approach, is lower than set values. Once the speed exceeds the default value, the calculation continues according to the current procedure. This way, the fuel injection up until the outlet section of the nozzle, where the flow data are written, is simulated. Euler Eulerian multiphase calculations have been carried out with the aim to investigate the influence of the boundary condition on the injection process development. By analyzing the results, it was found that the modified boundary condition resulted in a velocity field similar to that obtained by the usage of the *.nzf file as an input data.

Dajana Benković

Since it is desirable whenever possible to use the *.nzb file as an input data, and in most cases it is unavailable, the new boundary condition has proven to be a good substitute and gives credible results in comparison with the old approach.

Key words: CFD, Multiphase, Injection, Nozzle flow, ROI boundary condition