

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Luka Perković

Zagreb, 2007



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Odbor za diplomske ispite



Povjerenstvo konstrukcijskog, procesno-energetskog i brodostrojarskog smjera

Zagreb, 7.10.2007

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Perković**

Mat. br.: 0035143773

Naslov: **Trodimenzionalna računalna simulacija strujanja unutar brizgaljke goriva za slučaj ubrizgavanja mineralnog dizel i alternativnih goriva**

Opis zadatka:

Trodimenzionalnim računalnim modeliranjem CFD programom AVL FIRE potrebno je procijeniti strujanje za različite modele sapnica s posebnim osvrtom na vrstu goriva koje se koristi. Potrebno je promatrati ponašanje mineralnog dizela kao i različita alternativna biogoriva. Trodimenzionalno modeliranje takvih vrsta strujanja nude vrijedne informacije za daljnji razvoj brizgaljki i samih procesa ubrizgavanja, primjerice oblik i broj otvora sapnice, vrijeme ubrizgavanja goriva te niz drugih parametara mogu biti predmet optimiranja. Fizikalna svojstva biogoriva ponekad značajno odstupaju od svojstava konvencionalnih goriva te je potrebno utvrditi da li postojeći sustavi ubrizgavanja mogu podnijeti nova goriva uz zadržavanje ili čak i unapređenje svojstava tih sustava s obzirom na potrošnju i emisiju štetnih plinova.

Tijekom izrade ovog diplomskog rada treba modelirati dvije geometrije, strujanje unutar kanala sa i bez nizvodno postavljene prepreke. Za strujanje unutar kanala bez prepreke potrebno je:

- na osnovi dosadašnjih kalkulacija treba odabrati najboljih pet,
- treba navesti rezultate kanala tipa I i Y za različite padove tlaka,
- ponoviti proračun s dvije alternativne vrste goriva (DME, FAME).

Za strujanje unutar kanala s nizvodno postavljenom preprekom potrebno je:

- odabrati jednu vrstu prepreke,
- odabrati dva različita pada tlaka na kanalima tipa I i Y,
- proračune provesti za slučaj mineralnog dizel goriva, kao i dva alternativna goriva iz gore navedenog slučaja.

Potrebno je izračunati sljedeće veličine:

- raspodjela faza - ocjena zona kavitacije - usporedba za eksperimentalnim podacima, profili brzina,
- maseni protok.

Geometrija i podaci za goriva kao i ostali potrebni podaci mogu se dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11.10.2007

Rok predaje rada:

13.12.2007

Predviđeni datum obrane:

19-21.10.2007

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Neven Duić

Doc. dr.sc. Zoran Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branimir Matijašević

SAŽETAK

Tema ovog rada je analiza višefaznog strujanja mineralnog dizela i dvaju alternativnih biogoriva, FAME i DME, unutar različitih modela brizgaljki i uz različite rubne uvjete simulacijama dobivenim CFDWM/FIRE programom. Odabrani kriteriji analize strujanja s obzirom na vrstu goriva su: raspodjela volumnih udjela faza uslijed kavitacije, vrijednost masenog protoka i profil brzina unutar modela brizgaljke.

Model brizgaljke se sastoji od uskog kanala s oštrim (tip I) ili zaobljenim (tip Y) ulazom, sa ili bez nizvodno postavljene prepreke.

Rezultati simulacija prikazuju jasnu razliku triju navedenih goriva, što je i očekivano s obzirom na različitost njihovih fizikalnih svojstava. Maseni protok kroz kanal tipa I je manji nego kroz kanal tipa Y za sva goriva. Maseni protok DME goriva je najmanji, unatoč najvećoj brzini strujanja, dok FAME gorivo postiže najveće masene protoke u svim slučajevima. Kavitacija je prisutna u svim slučajevima, iako je ona u kanalu tipa Y bez prepreke zanemarivo mala.

SUMMARY

In this diploma thesis multiphase flow analysis was done via simulations in CFDWM/FIRE application for standard diesel and two alternative biofuels, FAME and DME, inside different nozzle models and under various boundary conditions. Analysis criteria regarding fuel type are: phase volume fraction distribution due to cavitation, mass flow rate and velocity profile in nozzle model.

Nozzle model consists of narrow channel with sharp (type I) or rounded (type Y) inlet section, with or without downstream placed target.

Simulation results show clearly difference between three observed fuels, which was expected considering their different physical properties. Mass flow in channel type I is lower than one in Y channel type. Also, mass flow rate of DME was lowest, despite biggest flow velocity. FAME fuels achieved largest mass flow rate in all cases. Cavitation is present in all cases, but in Y channel type without target it is negligible small.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje služeći se navedenom literaturom.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Nevenu Duiću i doc. dr. sc. Zoranu Luliću na pruženoj prilici kao i na pomoći i savjetima koje su mi davali tijekom izrade ovog rada. Također zahvaljujem Marku Banu, dipl. ing. i Milanu Vujanoviću, dipl. ing. na velikoj i nesebičnoj pomoći.

Zahvaljujem se također dr. Reinhardu Tatschlu, dr. Peteru Prieschingu i dr. Davidu Greifu iz AVL-a na podacima, te dragocjenoj pomoći i savjetima bez kojih bi nemoguće bilo dobiti bilo kakve rezultate.

I na kraju, zahvaljujem se djevojci Matei na hrabrom preuzimanju uloge lektora, toliko potrebne da bi ovaj rad bio priveden kraju.

SADRŽAJ

POPIS OZNAKA.....	1
POPIS SLIKA.....	4
POPIS TABLICA.....	5
POPIS DIJAGRAMA.....	7
1. UVOD.....	8
2. KAVITACIJA U BRIZGALJKAMA.....	10
2.1. Princip nastajanja kavitacije.....	10
2.2. Kavitacijska erozija.....	11
2.3. Kavitacija u stvarnim brizgaljkama dizel motora.....	12
3. MATEMATIČKI MODEL RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA.....	15
3.1. Općenite napomene.....	15
3.2. Jednadžbe očuvanja višefaznog strujanja u <i>Multifluid</i> modelu.....	16
3.2.1. Zakon održanja mase (jednadžba kontinuiteta).....	17
3.2.2. Osrednjeni zakon količine gibanja.....	17
3.2.3. k - ϵ model turbulencije.....	18
3.2.4. Jednadžba turbulentne kinetičke energije k	20
3.2.5. Jednadžba turbulentne disipacije energije ϵ	21
3.2.6. Zidne funkcije.....	22
3.2.7. Poopćeni zapis jednadžbi održanja.....	23
3.2.8. Jednadžbe modela višefaznog strujanja u diskretiziranom obliku.....	24
3.3. <i>Multifluid</i> međupovršinski modeli.....	25
3.3.1. Međupovršinska izmjena mase: Linear Cavitation Model.....	26
3.3.2. Međupovršinska izmjena količine gibanja: Cavitation Drag Model.....	27
3.3.3. Jednadžbe gustoće broja mjehurića i veličine dodirne površine između faza.....	28
3.3.4. Koeficijenti zatvaranja i empirijski faktori matematičkog modela višefaznog strujanja.....	29
3.4. Modeliranje erozije.....	30
3.4.1. Vrijeme inkubacije.....	30
3.4.2. MDPR.....	30
3.5. Korisničke funkcije.....	31

3.6.	Parametri matematičkog modela	31
4.	RAČUNALNA DOMENA SA SELEKCIJAMA I RUBNIM UVJETIMA	33
4.1.	Selekcije i rubni uvjeti.....	33
4.2.	Geometrija i mreža	34
4.3.	Početni uvjeti i vremenski parametri kalkulacije	36
5.	FIZIKALNA SVOJSTVA GORIVA	37
6.	REZULTATI.....	38
6.1.	Usporedba simulacije strujanja mineralnog dizela sa raspoloživim eksperimentalnim rezultatima.....	38
6.1.1.	Kriteriji uspoređivanja.....	38
6.1.2.	Strujanje unutar kanala bez prepreke.....	38
6.1.2.1	<i>Analiza rezultata</i>	40
6.1.3.	Strujanje unutar kanala s preprekom	40
6.1.3.1	<i>Analiza rezultata</i>	42
6.2.	Usporedba strujanja različitih goriva u kanalu bez prepreke	43
6.2.1.	Kriteriji uspoređivanja.....	43
6.2.2.	3D: kvalitativna procjena raspodjele volumnih udjela faza	43
6.2.3.	2D: maseni protok	45
6.2.4.	3D: procjena vjerojatnosti zona erozije.....	46
6.2.5.	2D: profili brzina	50
6.2.6.	Analiza rezultata	53
6.3.	Usporedni prikaz strujanja različitih goriva u kanalu sa preprekom.....	54
6.3.1.	Kriteriji uspoređivanja.....	54
6.3.2.	3D: kvalitativna procjena raspodjele volumnih udjela faza	54
6.3.3.	2D: maseni protok	56
6.3.4.	3D: procjena vjerojatnosti zona erozije.....	56
6.3.5.	2D: profili brzina	58
6.3.6.	Analiza rezultata	59
7.	ZAKLJUČAK	61
8.	LITERATURA	62
	PRILOG: FORTRAN RAČUNALNI KOD KORISNIČKIH FUNKCIJA.....	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A''	m^2	međufazna površina
C_1	-	empirijska konstanta k- ϵ modela turbulencije
C_2	-	empirijska konstanta k- ϵ modela turbulencije
C_3	-	empirijska konstanta k- ϵ modela turbulencije
C_4	-	empirijska konstanta k- ϵ modela turbulencije
C_{CR}		Faktor redukcije kondenzacije
C_D	-	koeficijent sile otpora
C_E		Eglerov koeficijent
C_{ph}	-	koeficijent zatvaranja <i>multfluid</i> modela
C_{rc}	-	koeficijent zatvaranja <i>multfluid</i> modela
C_{sato}	-	Satov koeficijent
C_{tl}	-	koeficijent zatvaranja <i>multfluid</i> modela
C_{TD}	-	koeficijent turbulentne disperzije
C_μ	-	empirijska konstanta k- ϵ modela turbulencije
D_b	m	promjer mjehurića
D_{kl}	$kg/(m\ s^3)$	prijenos turbulentne disipacije energije na granici faza <i>k i l</i>
d_{nuc}	m	koeficijent zatvaranja <i>multfluid</i> modela
E	-	konstanta modela zidne funkcije
f	m/s^2	specifična masena sila
g	$kg\ m/s^2$	gravitacijska konstanta
k	m^2/s^2	specifična turbulentna kinetička energija
K_{kl}	$kg/(m\ s^3)$	prijenos turbulentne kinetičke energije na granici faza <i>k i l</i>
L	-	debljina otvrđenog površinskog sloja materijala
$MDPR$	m/s	stacionirana brzina erozije materijala u smjeru okomitom na plohu na kojoj erozija nastupa
M_{kl}	kg/m^2s^2	izmjena količine gibanja na granici faza <i>k i l</i>
N	-	broj udara kondenziranih mjehurića po jedinici površine

n	-	eksponent u jednadžbi Ludwiga
N'''	-	gustoća broja mjehurića
n'''	-	funkcija distribucije mjehurića
p	Pa	tlak
Ph	$\text{kg/m}^3\text{s}$	pomoćni član u <i>multifluid</i> modelu
$q_{\Phi S}$	$\text{kg}/(\text{m s}^2)$	izvor/ponor fizikalnog svojstva uslijed površinskih sila
$q_{\Phi V}$	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$	izvor/ponor fizikalnog svojstva uslijed masenih sila
r	m	vektor položaja
R	m	radijus mjehurića
Re_d	-	Reynoldsov broj s obzirom na promjer mjehurića
R_{ph}	1/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
R_{rc}	1/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
R_{T1}	1/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
S	-	jačina udara kondenziranih mjehurića
S_{Φ}	-	prijenos fizikalnog svojstva kroz međufaznu površinu
t	s	vrijeme
T_i	s	vrijeme inkubacije erozije
U_{τ}	m/s	brzina trenja
v, u, U	m/s	brzina
We	-	Webberov broj
x, y	m	prostorna koordinata
α	-	volumni udio pojedine faze
Γ_{kl}	$\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$	izmjena mase na granici između faza k i l
δ_{ij}	-	Kroneckerov delta operator
ε	m^2/s^3	turbulentna disipacija energije
ε'	-	virtualno rastezanje materijala nakon prekidne čvrstoće, računato prema jednadžbi Ludwiga
ε_U	-	deformacija kod prekidne čvrstoće
Θ	-	faktor oblika u jednadžbi koja opisuje raspodjelu deformacija unutar tvrdog sloja materijala
κ	-	von Karmanova konstanta zidnih funkcija k - ε modela turbulencije

μ	Pa s	dinamički koeficijent molekularne viskoznosti
ν	m^2/s	kinematička viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća pojedine faze
σ_p	Pa	naprezanje u materijalu, s obzirom na imploziju mjhurića isparene faze
σ	-	empirijska konsanta k- ϵ modela turbulencije
σ_k	-	empirijska konsanta k- ϵ modela turbulencije
σ_U	Pa	prekidna čvrstoća
σ_Y	Pa	granica elastičnosti
σ_ϵ	-	empirijska konsanta k- ϵ modela turbulencije
τ_{ij}	N/m^2	tenzor molekularnih naprezanja
τ_w	N/m^2	naprezanje na stijenci
Φ_{ph}	m^2/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
Φ_{rc}	m^2/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
Φ_{T1}	m^2/s	izvorski član u <i>multifluid</i> modelu
ω	rad/s	kutna brzina

Dijakritički znakovi

t	turbulentna veličina
'	fluktuirajuća komponenta kod Reynoldsovog usrednjavanja
~	egzaktna veličina
-	osrednjena komponenta kod Reynoldsovog usrednjavanja
T	transponirani tenzor
+	bezdimenzijska veličina

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Implozija mjehurića na površini materijala	11
Slika 2.2 Krivulja kavitacijske erozije..	11
Slika 2.3 Promjena brzine erozije tijekom vremena do uspostavljenog MDPR-a.....	12
Slika 2.4 Eksperimentalni prikaz kavitacijske erozije tijekom stvarnog vremena na modelu brizgaljke	12
Slika 2.5 Prikaz kavitacije pomoću neutronske radiografije.....	13
Slika 2.6 Pukotina nastala djelovanjem kavitacijske erozije.	14
Slika 2.7 Primjer oštećenja materijala nastalih na stvarnoj brizgaljki	14
Slika 3.1 Prikaz kontrolnog volumena.....	25
Slika 4.1 Geometrija modela brizgaljke za kanale tipa I i Y	34
Slika 4.2 Prikaz mreže uskog kanala tipa Y.....	35
Slika 4.3 Geometrija modela brizgaljke sa nizvodno postavljenom preprekom.....	35
Slika 4.4 Prikaz rubnih uvjeta i selekcije na kojoj se računa erozija u slučaju strujanja unutar kanala sa preprekom.....	35
Slika 6.1 Prikaz položaja linije na kojoj su snimljeni profili brzina kod kanala bez prepreke	50
Slika 6.2 Prikaz položaja linije na kojoj su snimljeni profili brzina kod kanala s preprekom.....	58

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Koeficijenti zatvaranja jednadžbi turbulentne kinetičke energije i energije disipacije.....	21
Tablica 3.2. Vrijednosti pojedinih poopćenih varijabli poopćene jednadžbe održanja.	24
Tablica 3.3. Koeficijenti zatvaranja i empirijski faktori matematičkog modela višefaznog strujanja.....	29
Tablica 3.4. Korisničke funkcije korištene u ovom radu.....	31
Tablica 3.5. Parametri modela dobiveni na osnovi prijašnjih kalkulacija.....	31
Tablica 4.1. Selekcije domene i varijable koje se zadaju	33
Tablica 4.2. Okvirne dimenzije svake pojedine mreže po zonama	36
Tablica 5.1. Fizikalna svojstva promatranih goriva.....	37
Tablica 6.1. Usporedni prikaz kvalitativne raspodjele volumnih udjela faza kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom i eksperimentom	38
Tablica 6.2. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanale tipa I i Y dobivenih simulacijom i eksperimentom	41
Tablica 6.3. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva	43
Tablica 6.4. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa Y dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.....	44
Tablica 6.5. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije u kanalu tipa I dobivenih simulacijom	46
Tablica 6.6. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom	47
Tablica 6.7. Usporedni prikaz vrijednosti MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom	48
Tablica 6.8. Usporedni prikaz vrijednosti MDPR-a u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom	49

Tablica 6.9. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa I	51
Tablica 6.10. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa Y	52
Tablica 6.11. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva	54
Tablica 6.12. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa Y dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.....	55
Tablica 6.13. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom kod pada tlaka 100-001bar za sva promatrana goriva	56
Tablica 6.14. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom kod pada tlaka 400-020bar za sva promatrana goriva	57
Tablica 6.15. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom kod pada tlaka 100-001bar za sva promatrana goriva ..	57
Tablica 6.16. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom kod pada tlaka 400-020bar za sva promatrana goriva ..	58
Tablica 6.17. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa I	58
Tablica 6.18. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa Y.	59

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 2.1 Promjena masenog protoka u ovisnosti o padu tlaka.....	10
Dijagram 6.1 Usporedni prikaz vrijednosti masenog protoka pri strujanju mineralnog dizela u kanalu tipa I bez prepreke sa eksperimentom.	40
Dijagram 6.2 Usporedni prikaz vrijednosti masenog protoka pri strujanju mineralnog dizela u kanalu tipa I i Y sa preprekom sa eksperimentom.....	42
Dijagram 6.3 Usporedni prikaz vrijednosti masenog protoka za sva tri promatrana goriva pri strujanju u kanalu tipa I dobivenih simulacijom.....	45
Dijagram 6.4 Usporedni prikaz vrijednosti masenog protoka za sva tri promatrana goriva pri strujanju u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom.	46
Dijagram 6.5 Usporedni prikaz vrijednosti masenog protoka triju promatranih vrsta goriva, međusobno pri oba pada tlaka kod kanala tipa I i Y sa preprekom	56

1. UVOD

U posljednje vrijeme alternativna goriva dobivaju sve veći značaj zbog činjenice da ne doprinose povećanju koncentracije ugljika u prirodi, ukoliko promatramo ugljikov ciklus [1]. U Europi i SAD-u goriva dobivena od uljane repice (RME) i zrna soje (SOME), zajedničkim imenom FAME goriva ili biodizel, upotrebljavaju se kao alternativa ili dodatak mineralnom dizelu. Još jedno biogorivo dobiva sve veći značaj u svijetu, DME, kojeg je moguće dobiti iz više različitih izvora. U Europi su trenutno na snazi norme koje propisuju volumni postotak udjela FAME goriva u mineralnom dizelu (EN 590 propisuje 5% udjela biodizela) kao i svojstva samog FAME goriva (EN 14214) [2]. Najveći proizvođači opreme za ubrizgavanje goriva u dizel motore potpisali su zajedničku izjavu o podupiranju zamjenjivanja postojećih dizela FAME gorivom [3].

Različitost fizikalnih svojstava gore spomenutih goriva uzrokuje različitosti njihovog strujanja unutar brizgaljki. U ovom radu je analizirana razlika strujanja dobivena računalnom simulacijom unutar nekoliko modela brizgaljki s obzirom na vrstu goriva po slijedećim kriterijima: raspodjela volumnih udjela faza s obzirom na pojavu kavitacije, vrijednost ostvarenog masenog protoka i profil brzine strujanja.

Za simulacije je korišten jedan od CFD programa koji su dostupni na tržištu, AVL CFDWM/FIRE. U njemu je moguće simulirati višefazna strujanja koristeći modul *Multiphase* sa uključenim modeliranjem erozije.

Na početku je dan opis kavitacije i problematika koja se veže uz ovu fizikalnu pojavu, dok je u nastavku dan matematički model višefaznog strujanja, prema [4], [5] i [6]. Slijedi opis računalne domene, rubnih i početnih uvjeta kao i parametara matematičkog modela, koji su određeni prema ranijim simulacijama mineralnog dizela. Geometrija modela korištena u eksperimentu i simulacijama prezentira geometriju stvarnih brizgaljki za ubrizgavanje goriva.

Prvi dio simulacija se odnosi na ocjenu valjanosti modela višefaznog strujanja, gdje se uspoređuju raspoloživi eksperimentalni podaci i rezultati dobiveni simulacijama za različite padove tlaka i modele brizgaljki (modeli sa i bez nizvodno postavljene

prepreke) za mineralni dizel. Ovdje je moguće izravno ocijeniti koliko nam je dobro poklapanje sa stvarnim strujanjem. Eksperimentalne podatke je ustupio AVL.

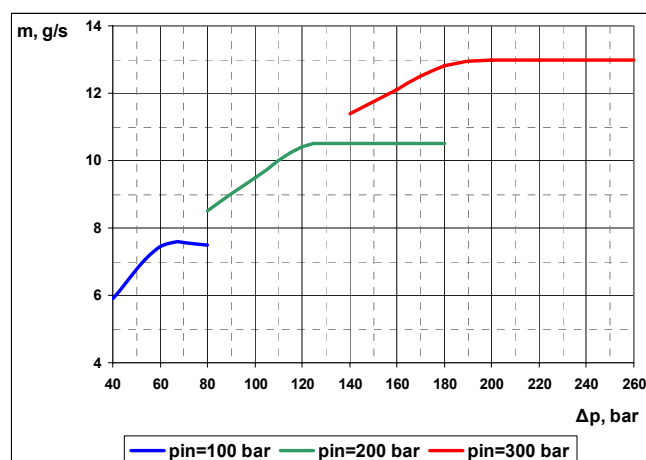
Pod pretpostavkom da rezultati simulacije za mineralni dizel zadovoljavaju, moguće je pristupiti usporednom prikazu rezultata strujanja triju različitih goriva: mineralnog dizela i dvaju alternativnih, FAME i DME goriva.

2. KAVITACIJA U BRIZGALJKAMA

2.1. Princip nastajanja kavitacije

Kavitacija nastaje unutar fluida kada tlak u njemu padne ispod tlaka isparavanja. Svaki fluid u sebi sadrži otopljene plinove koji na određenom tlaku isparavanja isparavaju, tj. mijenjaju fazu iz tekuće u plinovitu. Tlak isparavanja ovisi o svojstvima tekućine i unutar tekućine otopljenih plinova, ali i o temperaturi. Općenito porastom temperature raste i tlak isparavanja, pa će kavitacija biti izraženija. Primjerice, u motorima sa unutrašnjim izgaranjem je kod strujanja tekućine za hlađenje oko cilindarske košuljice gdje nakon nekog vremena kavitacija postaje intenzivnija jer je došlo do zagrijavanja rashladne tekućine.

Na temelju jednadžbe kontinuiteta znamo da je tlak nizak u područjima gdje je visoka brzina strujanja fluida, npr. u brizgaljkama dizel motora. Isparena faza zbog povećanog volumena radi smanjenja gustoće (gustoća plinovite faze je manja za tri reda veličine) smanjuje poprečni presjek strujanja, dodatno povećavajući brzinu strujanja unutar brizgaljke. Teoretski, maksimalna vrijednost brzine strujanja je ograničena na vrijednost brzine zvuka [7]. Eksperimentalni podaci o masenom protoku na modelu brizgaljke su dostupni i u [5], gdje je vidljivo da se maseni protok stacionira nakon što je postignuta dovoljno velika razlika tlaka ulaza i izlaza modela brizgaljke, dijagram 2.1.

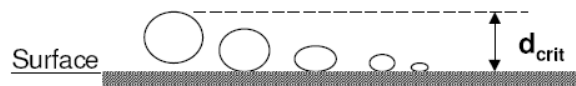


Dijagram 2.1 Promjena masenog protoka u ovisnosti o padu tlaka prema [5]

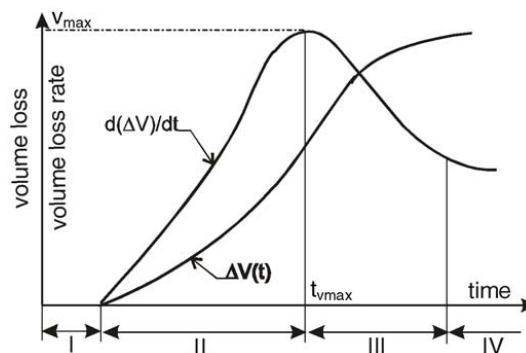
U energetici se kavitacija pojavljuje u središnjoj osi slobodnog vrtloga na izlazu iz protočnih turbina i na profilima lopatica gdje su postignute velike lokalne brzine strujanja [8].

2.2. Kavitacijska erozija

Prema [9] kavitacijska erozija nastaje zbog nagle implozije (nagle promjene tlaka i faze) kavitiranog mjehurića koji implodira brzinom i do nekoliko stotina m/s, stvarajući lokalne tlakove veće od 1 GPa u vremenu od 1 ns na površini od nekoliko μm^2 . Posljedica toga je naprezanje u materijalu ukoliko mjehurić implodira u blizini njegove površine [6].



Slika 2.1 Implozija mjehurića na površini materijala

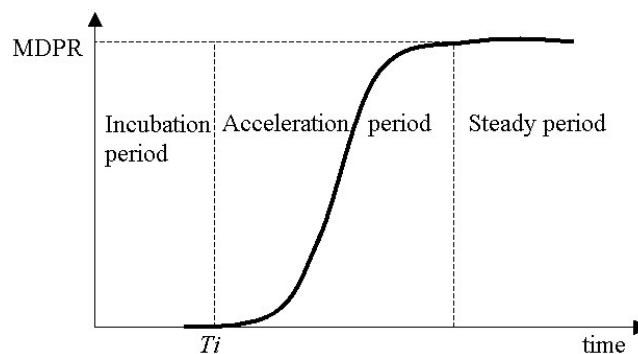


Slika 2.2 Krivulja kavitacijske erozije. Prikazana je brzina gubitka volumena materijala i ubrzanje gubitka volumena materijala uslijed kavitacijske erozije u ovisnosti o vremenu, prema [10].

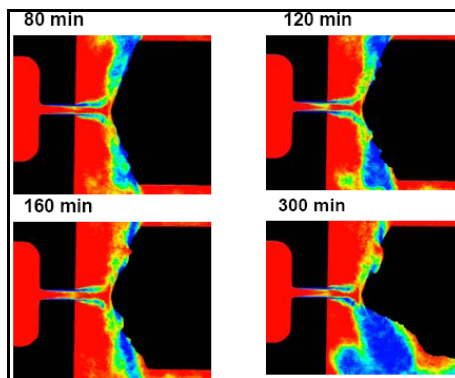
Prema [11] proces kavitacijske erozije možemo podijeliti u četiri faze. Prvi period je period inkubacije erozije, gdje gubitak volumena materijala nije moguće izmjeriti. Tijekom tog perioda materijal akumulira energiju i počinje plastična deformacija. Moguće su pojave pukotina u materijalu i povećanje njegove tvrdoće. Intenzivnije razaranje se primjećuje u drugoj fazi. Ova faza se prepoznaje po brzom povećanju ubrzanja gubitka materijala koja u jednom trenutku dostiže svoj maksimum. Nakon toga

slijedi faza usporavanja gubitka volumena a objašnjenje ove pojave je da tekuća faza popunjava mikroskopske rupice i time smanjuje udare implozije. Konačno, četvrta faza je faza konstantne brzine gubitka volumena materijala. Stacionarnu vrijednost intenziteta erozije možemo iskazati pomoću MDPR-a (eng. *Mean Depth of Penetration Rate*).

MDPR (eng. *Mean Depth of Penetration Rate*) prema [12] predstavlja inverznu mjeru otpora kavitacijskoj eroziji. Postoji više matematičkih opisa MDPR-a, a u ovom radu je prezentiran prema [6].



Slika 2.3 Promjena brzine erozije tijekom vremena do uspostavljenog MDPR-a.



Slika 2.4 Eksperimentalni prikaz kavitacijske erozije tijekom stvarnog vremena na modelu brizgaljke [14]. Crvena boja označava potpuni udio tekuće, a plava isparene faze.

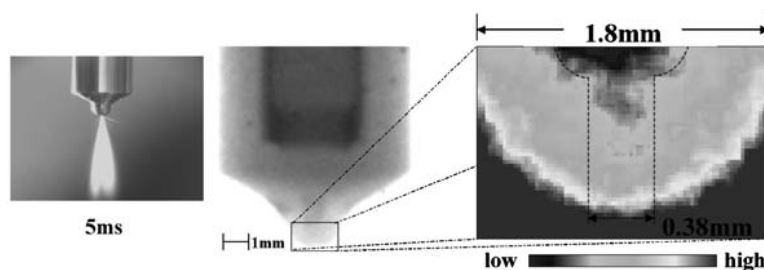
2.3. Kavitacija u stvarnim brizgaljkama dizel motora

Brizgaljka u dizel motoru služi za ubacivanje goriva u cilindar motora. Gorivo se raspršuje u obliku spreja pod visokim tlakom kako bi se ostvarilo što bolje miješanje sa

zrakom radi efikasnijeg izgaranja. Visoki tlakovi koji omogućavaju dobro raspršenje mogu izazvati kavitaciju goriva što neminovno dovodi do pogoršanja svojstava motora i oštećenja same brizgaljke [15] uslijed kavitacijske erozije. Tako osim konstrukcijskih poteškoća koje sa sobom donose kontinuirana povećavanja radnih parametara motora u obzir treba uzeti i fizikalna ograničenja samih goriva. Sve nas to navodi na zaključak da je jedan od glavnih zadataka razvoja dizel motora efikasna optimizacija parametara rada motora.

Brojne studije su dokazale postojanje kavitacije unutar brizgaljki dizel motora. Prema [16] kavitacija u brizgaljkama ima utjecaj na povećanje brzine strujanja unutar samih brizgaljki zbog smanjenog poprečnog presjeka uslijed isparene faze goriva. Posljedica je i povećanje kuta konusa spreja goriva pri ubrizgavanju u cilindar [16].

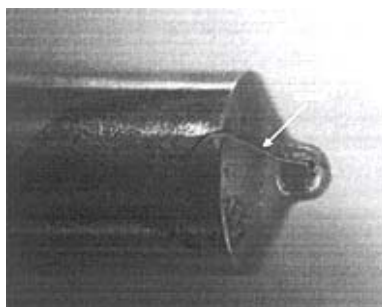
Općenito, slika strujanja unutar stvarne brizgaljke nije poznata niti ju je moguće optički snimiti [20]. Optički je moguće snimati slike strujanja unutar modela brizgaljki koje imaju isti oblik kao i stvarne brizgaljke, ali su izrađene od prozirnog materijala. Prozirni materijal može izazvati krivi signal u optičkoj opremi za snimanje, što treba uzeti u obzir kod analize rezultata. Točnije slike daje neutronska radiografija, slika 2.5 [21].



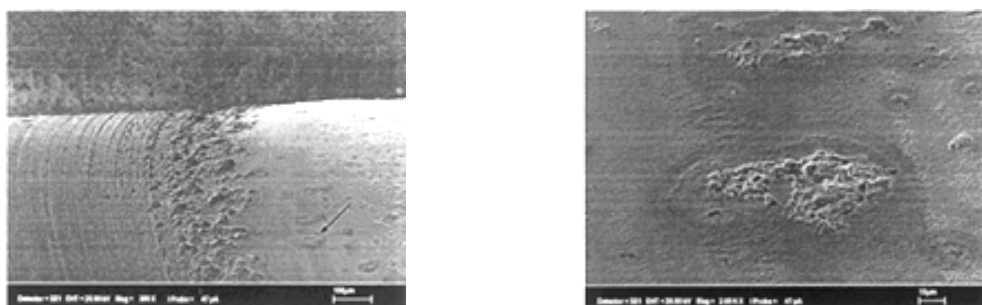
Slika 2.5 Prikaz kavitacije pomoću neutronske radiografije.

Tlakovi ubrizgavanja koji mogu izazvati kavitaciju nisu visoki, pa je kavitacija prisutna tijekom cijelog vremena ubrizgavanja (Eifler, 1990). Prema [20], u struji dizel goriva uvijek imamo netaknutu jezgru struje u kojoj nema kavitacije.

Kavitacija može uzrokovati eroziju materijala. Implzijski udari na površinu uzrokuju lokaliziranu deformaciju i pitting materijala. Oštećenja postupno napreduju te se povezuju uzrokujući hrapavost površine i eroziju materijala. Ovako nastala oštećenja se nazivaju kavitacijskim oštećenjima [19].



Slika 2.6 Pukotina nastala djelovanjem kavitacijske erozije nakon 400 sati rada [20].



Slika 2.7 Primjer oštećenja materijala nastalih na stvarnoj brizgaljki nakon 400 sati rada [20]. Desno je uvećani prikaz detalja označenog strelicom na lijevoj strani.

3. MATEMATIČKI MODEL RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA

3.1. Općenite napomene

U ovome radu tip strujanja koje se promatra je unutarnje, nestlačivo, viskozno, turbulentno i dvofazno. U svim simulacijama je korišten $k-\varepsilon$ model turbulencije zbog njegove uspješne primjene u unutarnjim strujanjima kod različitih tipova geometrija [22].

Pri pojavi kavitacije strujanje goriva postaje dvofazno, jer se osim kapljevite faze pojavljuje i plinovita faza. U tom slučaju se pojavljuje razdjelna površina između dviju faza u kojoj se pojavljuju dodatne sile površinske napetosti. U takvom strujanju bi također trebalo definirati i brzinu pretvorbe kapljevite faze u plinovitu i obrnuto.

Kod višefaznog strujanja razlikujemo kontinuiranu i isplinjenu raspršenu fazu (engl. *continuous and dispersed phase*). Simuliranje takvih strujanja unutar CFDWM/FIRE programskog paketa omogućava nam *Multiphase* modul. Pomoću njega izračunavamo raspodjelu volumenskih udjela u višefaznim strujanjima kao dodatak drugim veličinama strujanja (tlak, brzina, turbulentna kinetička energija i energija disipacije).

U CFDWM/FIRE programskom paketu postoje dva pristupa simuliranja višefaznog strujanja:

- Euler-Euler pristup - koristi se u *Multiphase* modulu
- Euler-Lagrange pristup - koristi se u slučajevima kada imamo jako raspršenje isparene faze u, primjerice, *Spray* modulu

Modul *Multiphase* koristi Euler-Euler pristup. U tom slučaju imamo spregu jednadžbi tekuće i isparene faze (engl. *coupled equations*) čime je postupak rješavanja složeniji u odnosu na Euler-Lagrange pristup gdje su jednadžbe nespregnute.

Unutar *Multiphase* modula koristimo *Multifluid* model. U tom modelu se sve jednadžbe očuvanja računaju za svaku fazu posebno. Kao alternativa *Multifluid* modela na

raspolaganju su nam još i *Homogenous* (ravnotežni) model i *VOF* model slobodne površine.

3.2. Jednadžbe očuvanja višefaznog strujanja u *Multifluid* modelu

U jednadžbe očuvanja matematičkog modela ulaze jednadžba kontinuiteta i jednadžba održanja impulsa (količine gibanja) kao vremenski osrednjene jednadžbe općih zakona očuvanja kontinuiteta i impulsa. Vremensko osrednjavanje je napravljeno pomoću Reynolds-ove dekompozicije koja pretpostavlja da se svaka fizikalna veličina može zapisati pomoću njene vremenski osrednjene veličine i njene pulzacije. Primjerice, za brzinu vrijedi:

$$\overline{v_i} = v_i + v_i' \quad (1)$$

Vrijeme osrednjavanja treba odabrati tako da vrijedi:

$$\overline{v_i} = v_i \quad (2)$$

$$\overline{v_i'} = 0 \quad (3)$$

Navedeni izrazi nam govore da vrijeme osrednjavanja brzine treba odabrati da srednja vrijednost osrednjene brzine bude jednaka osrednjenoj brzini. Nasuprot tome, srednja vrijednost pulzirajuće brzine mora biti jednaka nuli. Tada možemo govoriti o pravilno odabranom vremenu osrednjavanja.

Također je potrebno napomenuti i da vrijedi pravilo:

$$\overline{v_i' v_j'} \neq 0 \quad (4)$$

Ovo pravilo nam govori da srednji umnožak pulzirajućih brzina nije jednak nuli, unatoč jednadžbi (3). Razlog leži u nelinearnom karakteru diferencijalnih jednadžbi u kojima se takve veličine pojavljuju. Ovaj član opisuje turbulentnu difuziju količine gibanja, odnosno prijenos količine gibanja uslijed miješanja čestica fluida. Analogno ovome mogu se primijeniti iste jednadžbe za druge fizikalne veličine, npr. tlak, gustoću itd.

Uz spomenute jednadžbe koristimo još i jednadžbe održanja turbulentne kinetičke energije (k) i turbulentne energije disipacije (ϵ) koje pripadaju k - ϵ modelu turbulencije.

3.2.1. Zakon održanja mase (jednadžba kontinuiteta)

Za svaku fazu s indeksom k možemo pisati:

$$\frac{\partial(\alpha\rho)_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho v_i)_k = \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, N \quad (5)$$

Pri tome mora biti zadovoljen uvjet:

$$\sum_{k=1}^N \alpha_k = 1 \quad (6)$$

3.2.2. Osrednjeni zakon količine gibanja

Za svaku fazu sa indeksom k vrijedi zakon o održanju količine gibanja:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho v_i)_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho v_i v_j)_k = & -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot (\alpha(\tau_{ij} + \tau'_{ij}))_k + (\alpha\rho)_k f_i + \\ & + \sum_{l=1, l \neq k}^N M_{kl} + (v_i)_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, N \end{aligned} \quad (7)$$

Ova jednadžba je poznata kao Reynolds-ova osrednjena Navier-Stokesova jednadžba (engl. *Reynolds-averaged Navier Stokes - RANS*).

Masena sila f se računa kao zbroj gravitacijske i inercijske masene sile:

$$f_i = g_i - \omega \times \omega \times r_i - 2\omega \times v_i \quad (8)$$

Pretpostavljeno je da tlak p ima jednaku vrijednost u svim fazama. Tlak je jedina varijabla koja ima jednaku vrijednost u svim jednadžbama za određenu ćeliju (eng. *coupled variable*).

$$p = p_k, \quad k=1, \dots, N \quad (9)$$

Simetrični tenzor viskoznih naprezanja τ za svaku fazu k iznosi:

$$(\tau_{ij})_k = \left\{ \mu \left[(\nabla v_i + \nabla^T v_i) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v_i \delta_{ij} \right] \right\}_k, \quad k=1, \dots, N \quad (10)$$

Tenzor Reynolds-ovih (turbulentnih) napreznja τ^t je član koji se pojavljuje kao posljedica Reynolds-ove dekompozicije:

$$(\tau_{ij}^t)_k = (-\overline{\rho v_i v_j})_k, \quad k=1, \dots, N \quad (11)$$

Prema EVM (engl. *Eddy Viscosity Model*) skupini modela turbulencije (modeli prvog reda) tenzor turbulentnih napreznja se prikazuje analogno tenzoru viskoznih napreznja, što predstavlja Boussinesq-ovu aproksimaciju:

$$(\tau_{ij}^t)_k = (-\overline{\rho v_i v_j})_k = \left\{ \mu^t \left[(\nabla v_i + \nabla v_i^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v_i \delta_{ij} \right] \right\}_k - \frac{2}{3} (\rho k \delta_{ij})_k, \quad k=1, \dots, N \quad (12)$$

Turbulentna viskoznost μ_t svake faze se modelira prema izrazu:

$$\mu_k^t = \left(\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right)_k, \quad k=1, \dots, N \quad (13)$$

Turbulentna viskoznost nije fizikalno svojstvo fluida, već svojstvo toka fluida. Prema njemu možemo klasificirati strujanje. Primjerice, ukoliko je $\mu^t \gg \mu$, imamo strujanje sa velikim Re brojem gdje molekularna viskoznost nije značajna, osim u blizini stjenke gdje su turbulencije prigušene tj. unutar laminarnog viskoznog podsloja.. Zbog malog Re broja u blizini stjenke strujanje se modelira na drugačiji način, najčešće putem zidnih funkcija, kako je objašnjeno u poglavlju 3.2.6.

Promatrajući jednačbe (10) i (12) vidimo da one imaju isti oblik. To je vrlo pogodno za računanje računalom jer se primjenjuje isti algoritam i računalni kôd pri turbulentnom i laminarnom strujanju. Problem se sada svodi na računanje turbulentne viskoznosti, koja se računa prema izrazu (13). Turbulentna viskoznost se u k - ε modelu turbulencije računa pomoću dvije nove diferencijalne transportne jednačbe, za k i ε .

3.2.3. k - ε model turbulencije

Ovaj model turbulencije spada u skupinu diferencijalnih EVM (engl. *Eddy Viscosity Model*) modela sa dvije jednačbe. EVM modeli su modeli prvog reda koji pretpostavljaju postojanje direktne analogije između molekularnog i turbulentnog toka

količine gibanja (također i topline i vrsta) prema Boussinesq-ovom principu, kao što to prikazuje jednadžbe (10) i (12).

Diferencijalima se nazivaju zbog diferencijalnog karaktera jednadžbi koje čine taj model, što omogućava uzimanje u obzir vremensko razvijanje strujanja u nekoj proizvoljnoj točki s obzirom na uzvodne poremećaje ili poremećaje rubnih uvjeta.

Kako je već spomenuto, u modelu postoje dvije diferencijalne jednadžbe, a to su jednadžbe turbulentne kinetičke energije i energije disipacije.

Prema definiciji, turbulentna kinetička energija k predstavlja kinetičku energiju pulzirajuće brzine:

$$k = \frac{1}{2} \overline{v_i' v_i'} \quad (14)$$

Turbulentna disipacija energije ε je prema definiciji jednaka:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \quad (15)$$

Točnu jednadžbu za k dobijemo skalarnim množenjem transportne jednadžbe pulzirajuće brzine sa samom pulzirajućom brzinom:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv_j'}{Dt} \cdot v_j' &= \rho \frac{D \left[\frac{1}{2} (v_j')^2 \right]}{Dt} = \rho \frac{Dk}{Dt} = \underbrace{\rho \frac{\partial k}{\partial t}}_L + \underbrace{\rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j}}_K \\ &= \underbrace{\rho \overline{f_i v_i'}}_{\rho G} - \underbrace{\rho \overline{v_i' v_j'} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}}_{\rho P} - \underbrace{\mu \left(\frac{\partial v_i'}{\partial x_j} \right)^2}_{\rho \varepsilon} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho \overline{k v_i'} - \overline{p v_i' \delta_{ij}} \right)}_D \end{aligned} \quad (16)$$

Gornja jednadžba predstavlja jednadžbu izmjene turbulentne kinetičke energije neke materijalne točke. Pojedini članovi imaju slijedeća značenja:

- L → lokalna promjena k
- K → konvektivna promjena k
- G → produkcija/destrukcija k putem masenih sila

- P → produkcija k prijenosom energije strujanja u turbulentne fluktuacija putem Reynolds-ovih naprezanja
- ε → disipacija k u toplinu putem viskoznog (molekularnog) naprezanja
- D → difuzni transport k putem viskoznosti, pulzirajuće brzine i tlaka

Sada možemo pisati modelsku jednadžbu za k :

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \rho(P + G - \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (17)$$

Za razliku od jednadžbe za k , modelska jednadžba za ε se manje oslanja na točnu derivaciju utjecajnih članova, a više na faktore zatvaranja koji su ovisni o empirijskim pretpostavkama:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \left(C_1 P - C_2 \varepsilon + C_3 G + C_4 k \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (18)$$

Vidljiva je sličnost između zapisa jednadžbi (17) i (18). Veličine P i G su jednako definirane unutar jednadžbi, a veličina ε/k predstavlja recipročnu vrijednost karakteristične turbulentne vremenske veličine.

Ovako zapisana jednadžba za ε je vrlo jednostavna i lako ju je implementirati unutar CFD koda, ali i vrlo ograničena po pitanju prezentacije fizikalnih zbivanja. Zbog toga je tijekom godina predloženo više modifikacija modelske jednadžbe, ali niti danas ne postoji univerzalna modifikacija koja bi davala prihvatljive rezultate za sve tipove strujanja.

U nastavku teksta dane su jednadžbe k i ε u onom obliku u kojem se koriste u *Multifluid* modelu *Multiphase* modula.

3.2.4. Jednadžba turbulentne kinetičke energije k

Za svaku fazu sa indeksom k vrijedi jednadžba turbulentne kinetičke energije:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho v_i k)_k = \nabla \cdot \left[\alpha \left(\mu + \frac{\mu^t}{\sigma} \right) \nabla k \right]_k + (\alpha P)_k - \\ - (\alpha\rho\varepsilon)_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N K_{kl} + k_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, N \end{aligned} \quad (19)$$

Izvor uslijed Reynolds-ovog naprezanja P za svaku fazu k iznosi:

$$P_k = \left(\tau_{ij}^t : \nabla v_i \right)_k, \quad k=1, \dots, N \quad (20)$$

3.2.5. Jednadžba turbulentne disipacije energije ε

Za svaku fazu sa indeksom k vrijedi jednadžba turbulentne disipacije energije

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho v_i \varepsilon)_k = \nabla \cdot \left[\alpha \left(\mu + \frac{\mu^t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right]_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N D_{kl} + \varepsilon_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} + \\ + C_1 \left(\alpha P \frac{\varepsilon}{k} \right)_k - C_2 \left(\alpha \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right)_k - C_4 (\alpha\rho\varepsilon \nabla \cdot v_i)_k, \quad k=1, \dots, N \end{aligned} \quad (21)$$

Kinematička turbulentna viskoznost tekuće faze se računa po formuli:

$$v_c^t = v_c^{t,SI} + v_c^{t,BI} \quad (22)$$

Prvi član s desne strane jednakosti predstavlja turbulentnu viskoznost nastalu djelovanjem smičnih sila, dok drugi član predstavlja turbulentnu viskoznost na granici dviju faza nastalu uslijed mjehurića parne (raspršene) faze.

$$v_c^{t,SI} = C_\mu \frac{k_c^2}{\varepsilon_c} \quad (23)$$

$$v_c^{t,BI} = C_{Sato} D_b \left| \overline{v_r} \right| \alpha_d \quad (24)$$

Tablica 3.1. Koeficijenti zatvaranja jednadžbi turbulentne kinetičke energije i energije disipacije:

σ	σ_ε	C_1	C_2	C_4	C_μ	C_{Sato}
1.0	1.3	1.44	1.92	-0.33	0.09	0.6

3.2.6. Zidne funkcije

Modelske jednadžbe turbulencije nisu pogodne za područja gdje je Re broj mali, tj. gdje je izraženiji utjecaj molekularne (viskozne) u odnosu na turbulentnu viskoznost. Uobičajeni pristup rješavanja tog problema je korištenje zidnih funkcija.

Princip se temelji na izbjegavanju rješavanja jednadžbi turbulencije u spomenutom obliku unutar viskoznog podsloja (molekularnog sloja) i prijelaznog podsloja uz stjenku. Rješavanje je pravilno ukoliko se prva ćeliju od zida koja nalazi unutar potpuno turbulentnog područja, a to uvjetuje mrežu. Zidne funkcije su skup polu-empirijskih funkcija koje su izvedene iz eksperimentalnih podataka i bezdimenzijskih varijabli.

Za osrednjene jednadžbe količine gibanja zidne funkcije se temelje na pretpostavljenoj logaritamskoj raspodjeli brzine koja se prezentira u mjerilu brzine trenja i viskoznosti za srednju brzinu. Brzinu trenja računamo prema izrazu:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = C_\mu^{\frac{1}{4}} k_p^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Za bezdimenzijsku brzinu koristimo slijedeće vrijednosti:

$$U^+ = y^+ \quad \text{za} \quad y^+ < 11.63 \quad (26)$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad \text{za} \quad y^+ \geq 11.63 \quad (27)$$

U gornjim jednadžbama imamo Von Karmanovu konstantu κ (vrijednost je 0.41), konstantu modela E (vrijednost je 9) te bezdimenzijske veličine: bezdimenzijska udaljenost od stjenke

$$y^+ = C_\mu^{\frac{1}{4}} \frac{\rho k_p^{\frac{1}{2}} y_p}{\mu} \quad (28)$$

i bezdimenzijska brzina:

$$U^+ = C_\mu^{\frac{1}{4}} \frac{k_p^{\frac{1}{2}}}{U_\tau} U_p \quad (29)$$

Indeks „ p “ označava središnju točku zidu najbliže ćelije. Ukoliko se ta točka nalazi unutar područja $y^+ < 11.63$ model koristi linearni profil U^+ , što nije preporučljivo. Najbolje bi bilo bezdimenzijsku veličinu y^+ držati u slijedećim granicama:

$$20 < y^+ < 200 \quad (30)$$

unutar kojih je bezdimenzijski profil brzina pretpostavljen kao logaritamski.

U blizini zida koristimo modificirani izraz za molekularnu viskoznost:

$$\mu_w = \frac{y^+}{U^+} \mu \quad (31)$$

Jednadžba za k , koja se primjenjuje na prve ćelije do zida ne mijenja svoj oblik, već samo koristi rubni uvjet nultog gradijenta k na zidu. To znači da nema protoka fizikalnog svojstva k (fluksa od k) na prvom čvoru uz zid. Međutim, produkcijski član sa oznakom P , jednadžba (19), računa se koristeći gradijent brzine dobiven iz zakona logaritamske promjene brzine iz jednadžbe (27) i modificirani izraz za molekularnu viskoznost prema jednadžbi (31):

$$P \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{C_\mu^{\frac{1}{4}} k_p \rho k_p^{\frac{1}{2}} y_p} \quad (32)$$

Također, u jednadžbi za k u obzir uzimamo i ε , te ga za čvor unutar prve ćelije do zida računamo prema jednadžbi:

$$\varepsilon_p = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k_p^{\frac{3}{2}}}{\kappa y_p} \quad (33)$$

3.2.7. Poopćeni zapis jednadžbi održanja

Uspoređujući jednadžbe održanja dolazimo do poopćenog zapisa jednadžbi održanja u diferencijalnom obliku:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha\rho\phi)_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho v_i \phi)_k = \\ = \nabla \cdot (\alpha\Gamma_\phi \nabla \phi)_k + \nabla \cdot (\alpha q_{\phi S,i})_k + (\alpha q_{\phi V})_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N S_{\phi,kl} + \phi_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl}, \quad k=1, \dots, N \end{aligned} \quad (34)$$

Tablica 3.2. Vrijednosti pojedinih poopćenih varijabli su prikazane u slijedećoj tablici:

JEDNADŽBA	ϕ	$\Gamma_{\phi,k}$	$q_{\phi S,i}$	$q_{\phi V}$
kontinuiteta	1	0	0	0
količine gibanja	v_i	$\mu_k + \mu_k^t$	$(\mu + \mu^t)_k \left[\nabla v_i^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot v_i \delta_{ij} \right]_k - \frac{2}{3} (\rho k)_k \delta_{ij}$	$-\nabla p + \rho_k f_i$
turbulentna kinetička energija	k	$\mu_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_k}$	0	$P_k + P_{B,k} - (\rho \varepsilon)_k$
turbulentna disipacija energije	ε	$\mu_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_\varepsilon}$	0	$C_1 \left(\frac{P}{k} \right)_k - C_2 \left(\rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right)_k - C_4 [\rho \varepsilon \nabla \cdot v_i]_k$

3.2.8. Jednadžbe modela višefaznog strujanja u diskretiziranom obliku

Poopćenu jednadžbu održanja u diferencijalnom obliku možemo integrirati po kontrolnom volumenu čime dobivamo poopćenu jednadžbu održanja u integralnom obliku:

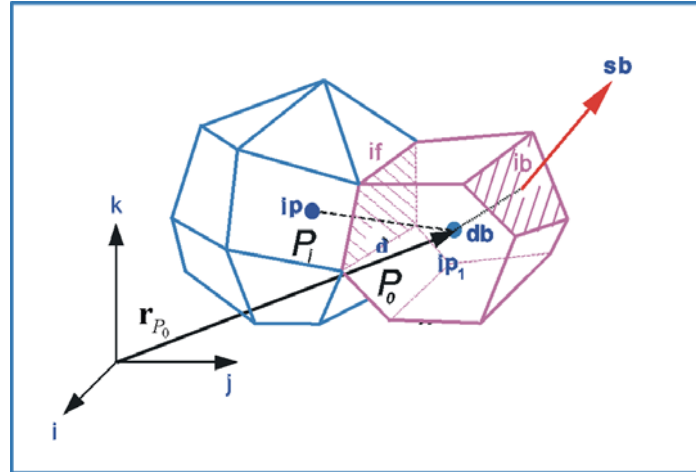
$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_{KV} (\alpha \rho \phi)_k dV + \int_{KV} [\nabla \cdot (\alpha \rho v_i \phi)]_k dV = \int_{KV} \nabla \cdot (\alpha \Gamma_\phi \nabla \phi)_k dV + \\
+ \int_{KV} \nabla \cdot (\alpha q_{\phi S,i})_k dV + \int_{KV} \left[(\alpha q_{\phi V})_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N S_{\phi,kl} + \phi_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} \right] dV \quad (35)
\end{aligned}$$

$k=1, \dots, N$

Integracijom po volumenu ćelije prema slici 3.1, te pretvorbom volumenskih integrala koji sadržavaju površinske izvore u površinske integrale dolazimo do slijedećeg oblika:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_{KV} (\alpha \rho \phi)_k dV + \sum_{j=1}^{n_f} \int_{S_j} (\alpha \rho v_i \phi)_k \cdot ds_i = \sum_{j=1}^{n_f} \int_{S_j} (\alpha \Gamma_\phi \nabla \phi)_k \cdot ds_i + \\
+ \sum_{j=1}^{n_f} \int_{S_j} (\alpha q_{\phi S,i})_k \cdot ds_i + \int_{KV} \left[(\alpha q_{\phi V})_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N S_{\phi,kl} + \phi_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} \right] dV \quad (36)
\end{aligned}$$

$k=1, \dots, N$



Slika 3.1 Prikaz kontrolnog volumena.

Varijabla na površini ćelije definirana je na sredini površine i predstavlja prosječnu vrijednost s obzirom na tu istu površinu. Sukladno tome gornju jednadžbu možemo zapisati u obliku:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{KV} (\alpha \rho \phi)_k dV + \sum_{j=1}^{n_f} (\alpha^* \rho^* v_i^* \phi^*)_{k,j} \cdot s_{i,j} = \sum_{j=1}^{n_f} (\alpha^* \Gamma_\phi^* \nabla \phi^*)_{k,j} \cdot s_{i,j} + \\ + \sum_{j=1}^{n_f} (\alpha^* q_{\phi S,i}^*)_{k,j} \cdot s_{i,j} + \int_{KV} \left[(\alpha q_{\phi V})_k + \sum_{l=1, l \neq k}^N S_{\phi,kl} + \phi_k \sum_{l=1, l \neq k}^N \Gamma_{kl} \right] dV \end{aligned} \quad (37)$$

k=1,...,N

3.3. *Multifluid* međupovršinski modeli

S obzirom na različita područja primjene *Multifluid* modela, postoje i različiti modeli međufazne interakcije. Modele međufazne interakcije razlikujemo prema tipu strujanja a u ovome radu su, s obzirom na kavitacijski tip višefaznog strujanja, korišteni:

- za međupovršinsku izmjenu mase: Linearni kavitacijski model (eng. *Linear Cavitation Model*)
- za međupovršinsku izmjenu količine gibanja: Model kavitacijskog otpora (eng. *Cavitation Drag Model*)

Oba modela impliciraju postojanje dviju veličina koje zbog svojeg prostorno i vremenski promjenjivog karaktera zahtijevaju dvije dodatne diferencijalne transportne jednadžbe, a to su: gustoća broja mjehurića (eng. *Bubble number density*) i veličina dodirne površine (eng. *Interfacial area*). Ove dodatne transportne jednadžbe

dozvoljavaju zatvaranje matematičkog međupovršinskog modela preko koeficijenata zatvaranja. Koeficijenti zatvaranja obuhvaćaju specifične veličine unutar modela koje za sada nije moguće modelirati, već je korisniku dozvoljeno da ih sam mijenja referirajući se na eksperimentalne podatke. Modeliranje takvih veličina bi vjerojatno zahtijevalo uvođenje novih transportnih jednadžbi koje bi sadržavale nove nepoznanice, pa bi broj novih nepoznanica rastao brže nego broj novih jednadžbi.

Uz koeficijente zatvaranja u matematičkom modelu imamo i empirijske faktore koje korisnik također može varirati. Vrijednosti svih koeficijenata zatvaranja i empirijskih faktora nalazi u poglavlju 3.3.4.

3.3.1. Međupovršinska izmjena mase: Linear Cavitation Model

Izmjena mase na međupovršinski faza se prema linearnom kavitacijskom modelu bazira na slijedećem izrazu:

$$\Gamma_c = \rho_d N^m 4R^2 \frac{\partial R}{\partial t} = -\Gamma_d \quad (38)$$

Vremenska derivacija radijusa mjehurića je dobivena iz Rayleigh-ove jednadžbe:

$$R \frac{\partial^2 R}{(\partial t)^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{\Delta p}{\rho_c} \quad (39)$$

Linearizacijom gornje jednadžbe i zanemarivanjem inercijskog člana dobivamo:

$$\Gamma_c = \frac{1}{C_{CR}} \text{sign}(\Delta p) 3.85 \frac{\rho_d}{\sqrt{\rho_c}} (N^m)^{\frac{1}{3}} (\alpha_d)^{\frac{2}{3}} |\Delta p|^{\frac{1}{2}} = -\Gamma_d \quad (40)$$

Razlika tlaka Δp iznosi:

$$\Delta p = p_{isp} - \left(p - C_E \frac{2}{3} \rho_c k_c \right) \quad (41)$$

Koeficijent zatvaranja C_E , koji se naziva Eglerovim koeficijentom, ovisi o lokalnoj razini turbulencije. Faktor odgode kondenzacije C_{CR} je empirijski koeficijent koji se koristi za smanjenje kondenzacije isparene faze tijekom kavitacije.

Broj koji definira gustoću mjehurića označava se sa N''' i njegova vrijednost se dobiva rješavanjem dodatne transportne jednadžbe. Opis ove veličine se nalazi u poglavlju 3.3.3.

3.3.2. Međupovršinska izmjena količine gibanja: Cavitation Drag Model

Međupovršinski izvori količine gibanja u *Multifluid* modelu općenito se sastoje od sile otpora i sile uslijed turbulentne disperzije:

$$\overline{M}_c = \underbrace{C_D \frac{1}{8} \rho_c A_i^m \overline{v}_r |\overline{v}_r|}_{\text{sila otpora}} + \underbrace{C_{TD} \rho_c k_c \nabla \alpha_d}_{\text{sila uslijed turbuletnog raspršenja}} = -\overline{M}_d \quad (42)$$

Relativna brzina v_r je definirana prema izrazu:

$$\overline{v}_r = \overline{v}_d - \overline{v}_c \quad (43)$$

Uvodimo pojam Reynolds-ovog broja definiranog na promjeru mjehurića:

$$\text{Re}_d = \frac{v_r D_b}{\nu_c} \quad (44)$$

Koeficijent otpora C_D je funkcija Reynolds-ovog broja:

$$C_D = \begin{cases} \frac{192}{\text{Re}_b} (1 + 0.1 \text{Re}_b^{0.75}) & \text{Re}_b < 1000 \\ 0.438 & \text{Re}_b \geq 1000 \end{cases} \quad (45)$$

Koeficijent sile uslijed turbulentnog raspršenja C_{TD} opisuje difuziju parne faze uslijed turbulentnog miješanja i predstavlja još jedan empirijski faktor.

Broj koji definira veličinu dodirne površine između faza označava se sa A''' i njegova vrijednost se dobiva rješavanjem dodatne transportne jednadžbe. Opis ove veličine se nalazi u poglavlju 3.3.3.

3.3.3. Jednadžbe gustoće broja mjehurića i veličine dodirne površine između faza

Ukoliko sa n''' označimo funkciju distribucije mjehurića, koja ovisi o prostornim koordinatama, vremenu, količini gibanja i pretpostavci da su mjehurići u obliku sfere, N''' možemo računati prema:

$$N''' = \int n'''(x_i, M_i, t, r) dx_i dM_i dt dr \quad (46)$$

Liouville-ov teorem nam daje transportnu jednadžbu za n''' :

$$\frac{\partial n'''}{\partial t} + \nabla \cdot (n''' M_i) + \frac{\partial}{\partial r} \left(n''' \frac{dr}{dt} \right) = \underbrace{\sum S_j}_{\text{izvor/ponor uslijed interakcija između mjehurića}} + \underbrace{S_{ph}}_{\text{doprinos preko promjene faze}} \quad (47)$$

Prethodnu jednadžbu možemo riješiti momentnom metodom.

Slijede transportne jednadžbe za gustoću broja mjehurića i veličine dodirne površine između faza:

$$\frac{\partial N'''}{\partial t} + \nabla \cdot (N''' M_{0,i}) = \sum R_j + R_{ph} \quad (48)$$

$$\frac{\partial A'''}{\partial t} + \nabla \cdot (A''' M_{2,i}) = \sum \phi_{j2} + \phi_{ph2} \quad (49)$$

Izvorski članovi na desnoj strani prethodnih jednadžbi uključuju slijedeće mehanizme (uz napomenu da koeficijenti C_{rc} , C_{TI} , C_{ph} i d_{nuc} predstavljaju koeficijente zatvaranja matematičkog modela):

Srašćivanje mjehurića uslijed slučajnih sudara

$$R_{rc} = 4.4 \cdot 10^{-3} C_{rc} \frac{\varepsilon^{\frac{1}{3}} A^{\frac{11}{3}}}{\alpha \alpha_{\max}^{\frac{2}{3}}} \left[1 - \exp \left(-C_{rc} \frac{\alpha^{\frac{1}{3}} \alpha_{\max}^{\frac{1}{3}}}{\alpha_{\max}^{\frac{1}{3}} - \alpha^{\frac{1}{3}}} \right) \right] \quad (50)$$

$$\phi_{rc} = -0.17 C_{rc} \frac{\varepsilon^{\frac{1}{3}} \alpha^{\frac{1}{3}} A^{\frac{5}{3}}}{\alpha_{\max}^{\frac{1}{3}} \left(\alpha_{\max}^{\frac{1}{3}} - \alpha^{\frac{1}{3}} \right)} \left[1 - \exp \left(-C_{rc} \frac{\alpha^{\frac{1}{3}} \alpha_{\max}^{\frac{1}{3}}}{\alpha_{\max}^{\frac{1}{3}} - \alpha^{\frac{1}{3}}} \right) \right] \quad (51)$$

Član α_{max} je najveći volumni udio raspršene faze u kontinuiranoj. Preporučena vrijednost α_{max} je 0.62.

Raspad mjehurića uslijed utjecaja turbulencije

$$R_{T1} = 5.2 \cdot 10^{-3} C_{T1} (1 - \alpha) \frac{\varepsilon^{\frac{1}{3}} A^{\frac{11}{3}}}{\alpha^{\frac{8}{3}}} \exp\left(-\frac{We_{c,T1}}{We}\right) \sqrt{1 - \frac{We_{c,T1}}{We}} \quad (52)$$

$$\phi_{T1} = 0.12 C_{T1} \varepsilon^{\frac{1}{3}} (1 - \alpha) \frac{\varepsilon^{\frac{1}{3}} A^{\frac{5}{3}}}{\alpha^{\frac{2}{3}}} \exp\left(-\frac{We_{c,T1}}{We}\right) \sqrt{1 - \frac{We_{c,T1}}{We}} \quad (53)$$

Član We_c je kritični Weber-ov broj i iznosi 2.3.

Porast broja parnih mjehurića uslijed fazne promjene

$$R_{ph} = C_{ph} \frac{6Ph}{\rho \pi d_{nuc}^3} \quad (54)$$

$$\phi_{ph} = C_{ph} \frac{6Ph}{\rho d_{nuc}} \quad (55)$$

Međupovršinska izmjena mase i količine gibanja može biti modelirana jednadžbom:

$$Ph = \text{sign}(\Delta p) \frac{\rho_d}{\sqrt{\rho_c}} (N^m)^{\frac{1}{3}} (\alpha_d)^{\frac{2}{3}} |\Delta p|^{\frac{1}{2}} \quad (56)$$

3.3.4. Koeficijenti zatvaranja i empirijski faktori matematičkog modela višefaznog strujanja

Tablica 3.3. Koeficijenti zatvaranja i empirijski faktori matematičkog modela višefaznog strujanja.

Oznaka u modelu	Oznaka u korisničkom sučelju	Preporučena vrijednost
C_E	<i>Egler factor</i>	1÷1.4
C_{CR}	<i>Condensation reduction factor</i>	1÷10
C_{rc}	CC1	0.0001÷1
C_{T1}	CB1	0.01÷10
C_{ph}	CB4	0.1÷1

d_{nuc}	CB5	1e-008÷1e-006
C_{Sato}	<i>Sato's coefficient</i>	0.6
C_{TD}	<i>Dispersion coefficient</i>	0.1÷10

3.4. Modeliranje erozije

Teškoća pri modeliranju erozije leži u činjenici da je potrebno kombinirati dinamiku fluida sa veličinama vezanim uz svojstva materijala.

Erozija se u *Multiphase* modulu modelira pomoću matematičkog modela dviju veličina: jednačba vremena inkubacije i jednačba MDPR-a, a temelje se na [9] i [10]. Jednačbe prezentirane u nastavku teksta vrijede samo za duktilne materijale. Ovdje treba napomenuti da su vrijednosti modela erozije bile unaprijed definirane u AVL-u i nisu mijenjane, ali nama je to manje važno jer nas ne zanima kavitacijska erozija različitih materijala, već kavitacijska erozija istog materijala pri višefaznom strujanju različitih vrsta goriva.

Model pretpostavlja Ludwig-ovu jednačbu za matematičko opisivanje krivulje „naprezanje-deformacija“ materijala.

3.4.1. Vrijeme inkubacije

$$T_i = \frac{1}{NS} \left[\frac{\sigma_U - \sigma_Y}{\sigma_P - \sigma_Y} \right]^{\frac{1+\Theta}{n\Theta}} \frac{(1+n)(1+\Theta+n\Theta)\sigma_Y + (1+\Theta)(\sigma_U - \sigma_Y)}{(1+n)(1+\Theta+n\Theta)\sigma_Y + (1+\Theta)(\sigma - \sigma_Y)} \quad (57)$$

3.4.2. MDPR

$$MDPR = NS\Delta L = NSL \left[\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_U} \right)^{\frac{1}{\Theta}} - 1 \right] \quad (58)$$

3.5. Korisničke funkcije

Kvalitativna raspodjela volumnih udjela plinovite faze u tekućoj kod eksperimenta je snimana kamerom po cijeloj dubini kanala u vremenu 400 ns [12]. Kako bi bilo moguće rezultate simulacije prikazati na isti način, trebalo je napisati korisničke funkcije koje provode „snimanje“ rezultata na gore navedeni način. Pisanje korisničkih funkcija uvelike je olakšano činjenicom da je u svim slučajevima mreža strukturirana s obzirom na koordinatu z , tj. mreža je strukturirana po dubini domene.

Algoritmom korisničkih funkcija prvo se određuju ćelije uz plohu simetrije, a potom se u njih sprema najveća vrijednost udjela isparene faze u kontinuiranoj, s obzirom na prostor (uspoređivanje s vrijednostima unutar ćelija koje imaju istu x_1 i x_2 koordinatu, tj. koje se nalaze na istom pravcu u x_3 smjeru) i vrijeme (uspoređivanje vrijednosti u ćelijama koje imaju iste koordinate s prethodnim vremenskim korakom).

CFDWM/FIRE aplikacija dozvoljava unos korisničkih funkcija napisanih u *Fortran* ili C++ kodu, koji se po pokretanju kalkulacija kompiliraju i povezuju sa glavnim kodom.

Tablica 3.4. Korisničke funkcije korištene u ovom radu:

allocating modul	definiranje varijabli koje treba alocirati, izvršava se na početku kalkulacije
useini podrutina	inicijalizacija matrice koja adresira ćelije i nove varijable VF_max , izvršava se na početku kalkulacije
useout podrutina	pod-rutina koja obavlja zadane operacije sa fizikalnim veličinama s obzirom na njihovu vrijednost unutar ćelija koje su prethodno adresirane
useplo podrutina	zapisivanje varijable VF_max u datoteku koja sadrži rezultate kalkulacije

3.6. Parametri matematičkog modela

Tablica 3.5. Parametri modela dobiveni na osnovi prijašnjih kalkulacija:

Oznaka u korisničkom sučelju	Odabrana vrijednost
<i>Egler factor</i>	1.2
<i>Condensation reduction factor</i>	10
CC1	1
CB1	0.1

CB4	1
CB5	1e-006
<i>Sato's coefficient</i>	0.6
<i>Dispersion coefficient</i>	0.5

4. RAČUNALNA DOMENA SA SELEKCIJAMA I RUBNIM UVJETIMA

4.1. Selekcije i rubni uvjeti

Selekcije su iste u svim domenama bez obzira na tip mreže. Rubni uvjeti se zadaju za svaku fazu posebno, osim u slučaju tlaka koji je vezana varijabla pa ga je dovoljno zadati za samo jednu (kontinuiranu) fazu.

Rubni parametri turbulencije i volumnog udjela faza se određuju na ulaznim i izlaznim rubnim područjima (selekcijama). Dok parametre turbulencije možemo zadati kao nepromjenjive ili promjenjive (u tom slučaju ovise o uzvodnim parametrima strujanja), volumni udio faza zadajemo isključivo kao nepromjenjivu vrijednost. Smjer strujanja se zadaje samo na ulaznoj selekciji. Vrijednosti parametara turbulencije su bili unaprijed određeni od strane AVL-a.

Tablica 4.1. Selekcije domene i varijable koje se zadaju.

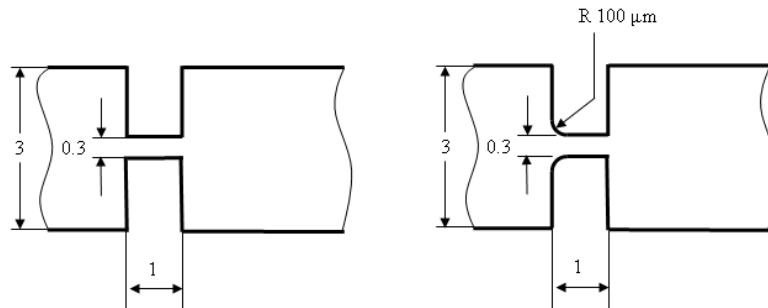
<i>naziv selekcije</i>	<i>varijable koje se zadaju</i>	<i>tekuća faza (1)</i>	<i>Isparena faza (2)</i>	<i>kratak opis</i>
inlet	statički tlak	ovisi o slučaju	-	ulaz fluida
	smjer strujanja	x=1, y=0, z=0	-	
	turbulentna kin. energija	0.1	0.3	
	karakt. turbulentna duljina	2e-04	2e-04	
	turbulentna dis. energije	25	125	
	nepromjenjivi volumni udio	0.99999	1e-06	
outlet	statički tlak	ovisi o slučaju	-	izlaz fluida
	parametri turbulencije su promjenjivi	-	-	
	nepromjenjivi volumni udio	0.99999	1e-06	
symmetry	-	-	-	simetrija strujanja, $\frac{\partial \square}{\partial x_3} = 0$
erosion	-	-	-	ploha na kojoj

				se računaju jednadžbe <i>erosion</i> modela
--	--	--	--	---

Ovdje treba napomenuti da sve granične površine domene koje nisu posebno obuhvaćene selekcijama imaju rubni uvjet *wall*, tj. zida.

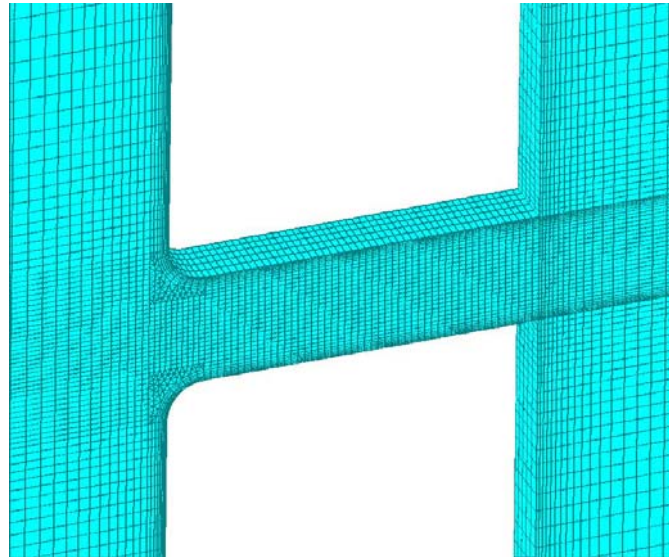
4.2. Geometrija i mreža

S obzirom da su modeli brizgaljki simetrični, domena unutar koje promatramo strujanje sastoji od samo jedne polovine modela. Ravnina presjeka modela ima uvjet simetrije s obzirom na x - y plohu koja siječe polovinu dubine modela, pri čemu je dubina modela definirana z -koordinatom. Takav pristup mreži nam omogućava upola manji broj ćelija, što u konačnici rezultira bržom kalkulacijom uz neznatno smanjenu točnost rezultata. Općenito, promatramo strujanje unutar modela brizgaljke koji se sastoji od uskog kanala sa oštrim (tip I) ili zaobljenim (tip Y) ulaznim bridom, slika 4.1. Također promatramo i modele brizgaljki sa preprekom koja je postavljena nizvodno u odnosu na uski kanal, slika 4.3.

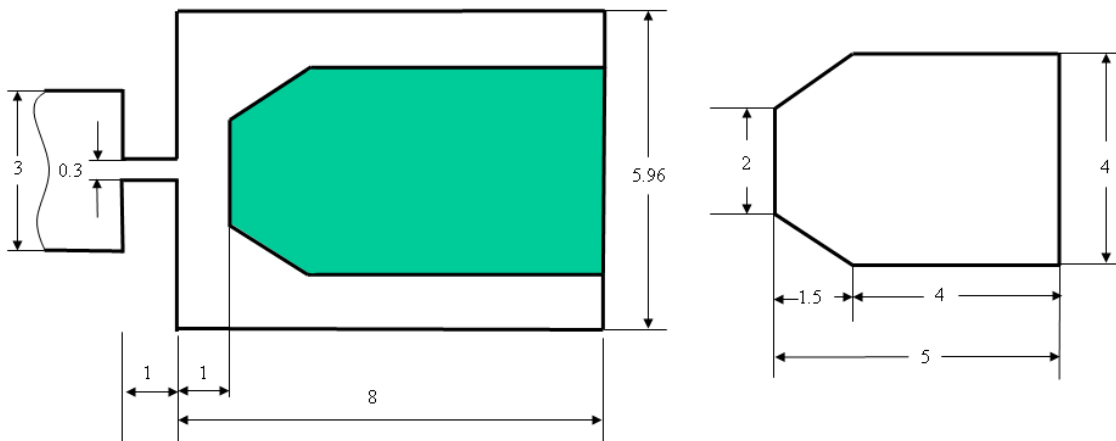


Slika 4.1 Geometrija modela brizgaljke. Lijevo je kanal tipa I a desno kanal tipa Y. Debljina modela brizgaljke je ista za sve i iznosi 0.3 mm.

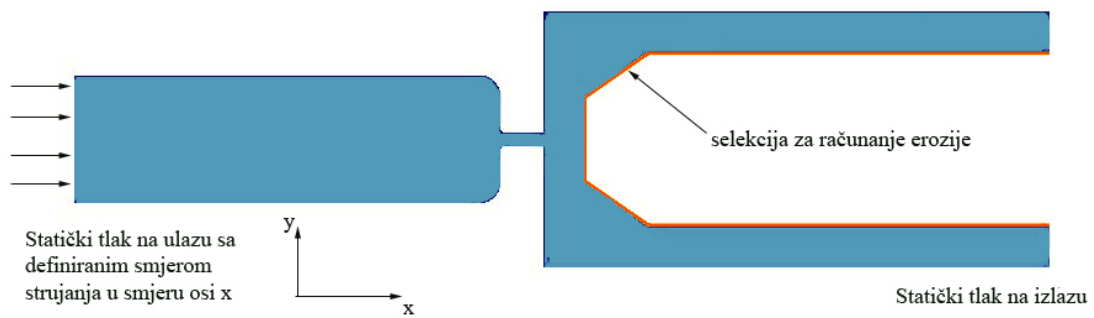
Mreža zone uskog kanala prikazana je na slici 6.1 za kanal bez prepreke, te na slici 6.2 za kanal sa preprekom.



Slika 4.2 Prikaz mreže uskog kanala tipa Y.



Slika 4.3 Geometrija modela brizgaljke sa nizvodno postavljenom preprekom. Debljina modela brizgaljke je 0.3 mm. Veličine su iste i u strujanju unutar kanala tipa Y.



Slika 4.4 Prikaz rubnih uvjeta i selekcije na kojoj se računa erozija u slučaju strujanja unutar kanala sa preprekom.

Tablica 4.2. Okvirne dimenzije svake pojedine mreže po zonama u mm:

<i>zona</i>	<i>model brizgaljke</i>	<i>dužina (x)</i>	<i>visina (y)</i>	<i>širina (z)</i>
ulaz	bez prepreke	10	3	0.15
	sa preprekom	10	3	0.15
uski kanal	bez prepreke	1	0.3	0.15
	sa preprekom	1	0.3	0.15
izlaz	bez prepreke	12	3	0.15
	sa preprekom	21	5.96	0.15

Dimenzije koje trebaju biti točne su dimenzije uskog kanala tipa I i Y, kao i dimenzija prepreke i poprečne površine strujanja duž domene. Dužina ulazne zone mora biti odabrana na način da na ulazu u uski kanal imamo razvijeno strujanje. Isto tako dužina izlazne zone mora biti takva da omogućava stabilnu kalkulaciju s obzirom na vrtloženja u izlaznoj zoni domene.

4.3. Početni uvjeti i vremenski parametri kalkulacije

S obzirom da računamo nestacionarno strujanje, moramo odrediti početne uvjete i parametre kalkulacije nestacionarnog strujanja. Početni uvjeti određuju da je u svim ćelijama brzina jednaka nuli, dok je tlak u svim ćelijama jednak ulaznom. Snimanje slike strujanja korisničkim funkcijama provedeno je nakon što je u svim slučajevima oblik strujanja postao kvazistacionaran, što se očituje u neznatnim varijacijama masenog protoka.

Tablica 4.3. Vremenski parametri kalkulacije

<i>veličina</i>	<i>vrijednost</i>	<i>jedinica</i>	<i>opis</i>
vremenski korak	1e-08	s	Vremenski korak mora biti odabran tako da kalkulacija bude stabilna i dovoljno brza.
vrijeme trajanja kalkulacije	4e-07	s	Ova veličina je jednaka vremenu u kojem je sniman eksperiment prema [12].

5. FIZIKALNA SVOJSTVA GORIVA

Promatramo strujanje mineralnog dizela i dva biogoriva: FAME i DME. Njihova fizikalna svojstva koja su nam bitna, s obzirom na matematički model, zapisana su u slijedećoj tablici:

Tablica 5.1. Fizikalna svojstva promatranih goriva.

				Dizel	DME	FAME
tekuća faza	gustoća	ρ	kg/m ³	828	661	880
	dinamička viskoznost	μ	Pas	2.14E-03	1.558E-04	3.52E-03
	tlak isparavanja	p_{isp}	Pa	892	892 (pretpostavka)	892 (pretpostavka)
plinovita faza	gustoća	ρ	kg/m ³	7	11.23	11.5
	dinamička viskoznost	μ	Pas	1E-05	1.028E-05	1E-05 (pretpostavka)

Svojstva FAME goriva su slična mineralnom dizelu, dok su svojstva DME goriva slična svojstvima ukapljenog naftnog plina [20].

6. REZULTATI

6.1. Usporedba simulacije strujanja mineralnog dizela sa raspoloživim eksperimentalnim rezultatima

6.1.1. Kriteriji uspoređivanja

Eksperimentalni rezultati koji su dani služe kao glavni pokazatelj valjanosti višefaznog modela. Na raspolaganju su bili eksperimentalni podaci za mineralni dizel, i to za strujanje unutar kanala tipa I bez prepreke i strujanje unutar kanala tipa I i Y sa preprekom, za određene padove tlaka.

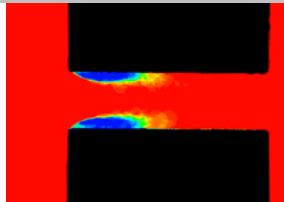
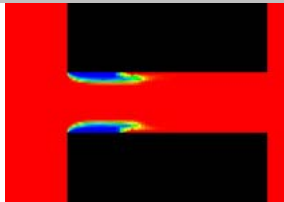
Imamo dva kriterija uspoređivanja:

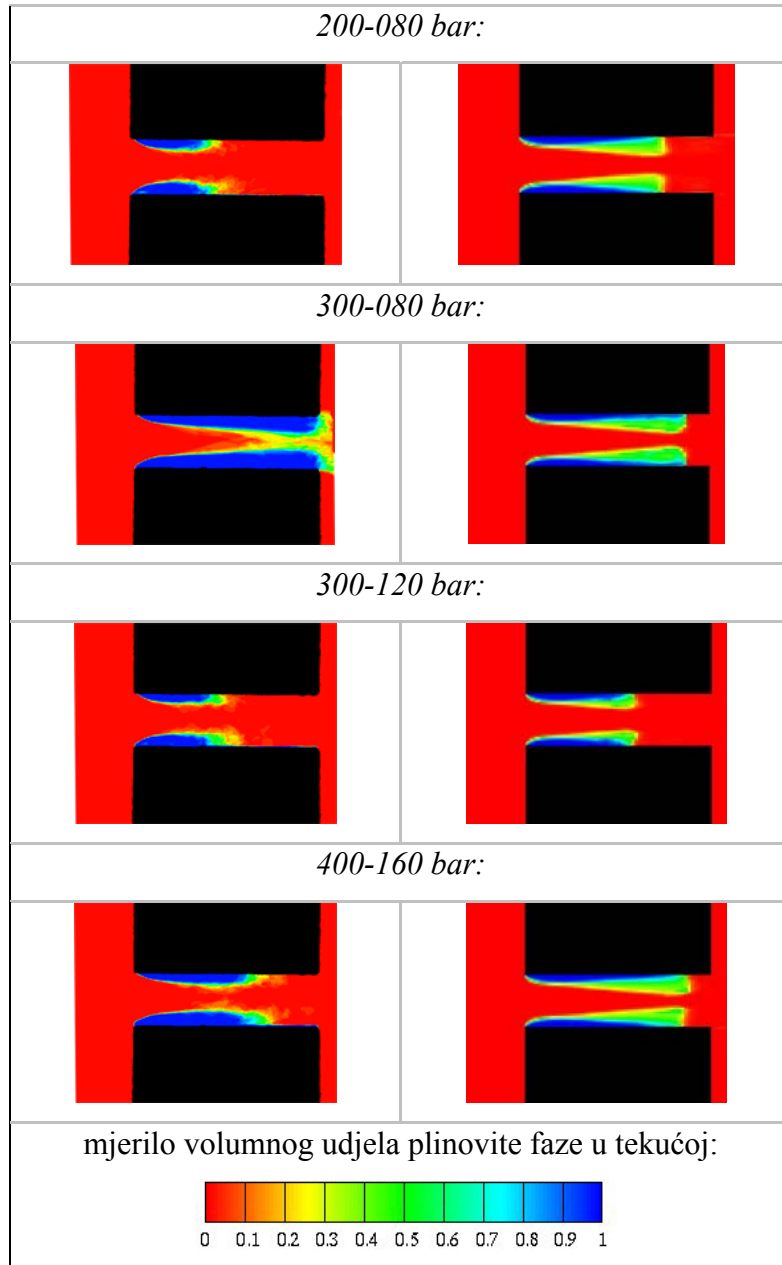
- kvalitativni → raspodjela faza u domeni projicirana na poprečnu ravninu
- kvantitativni → maseni protok kroz domenu u smjeru strujanja

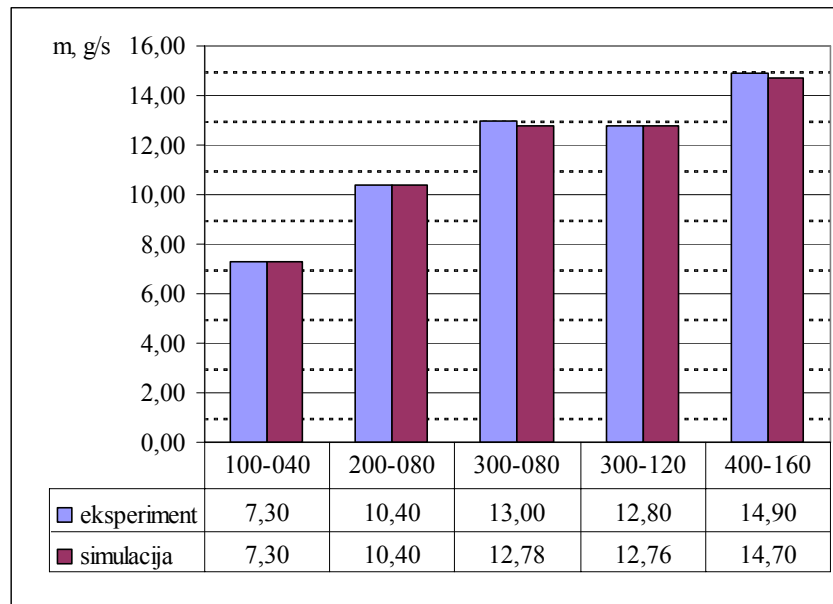
6.1.2. Strujanje unutar kanala bez prepreke

Numerička simulacija provedena je za pet odabranih padova tlaka a rezultati simulacija su u nastavku prikazani usporedno s eksperimentalnima.

Tablica 6.1. Usporedni prikaz kvalitativne raspodjele volumnih udjela faza kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom i eksperimentom.

Eksperiment	Numerička simulacija
<i>100-040 bar:</i>	
	





Dijagram 6.1 Usporedni prikaz strujanja dobivenih simulacijom i eksperimentom. Uspoređuje se maseni protok pri strujanju mineralnog dizela u I kanalu bez prepreke.

6.1.2.1 Analiza rezultata

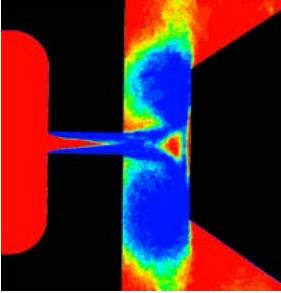
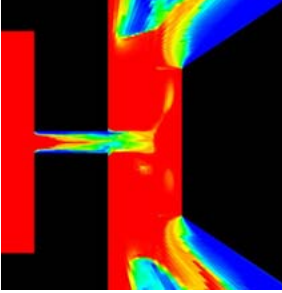
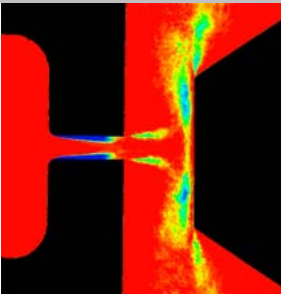
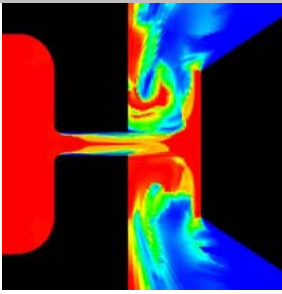
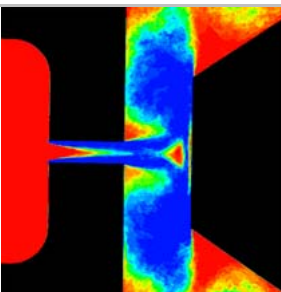
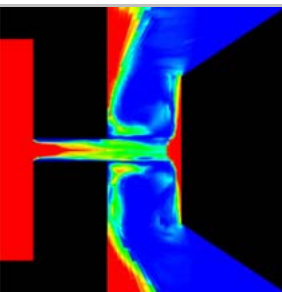
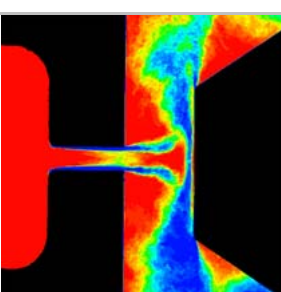
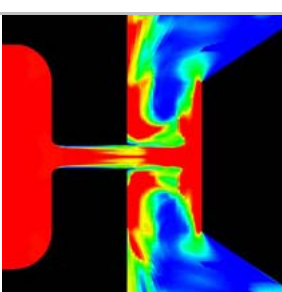
Iz tablice 6.1 vidimo da kvalitativna raspodjela volumnih udjela faza dobivena simulacijom dobro opisuje eksperimentalni prikaz. To možemo zaključiti na temelju dužine kavitacije i njene širine. Ovdje treba napomenuti da koeficijenti zatvaranja i empirijski faktori modela navedeni u tablici 3.2 značajno utječu na oblik kavitacije.

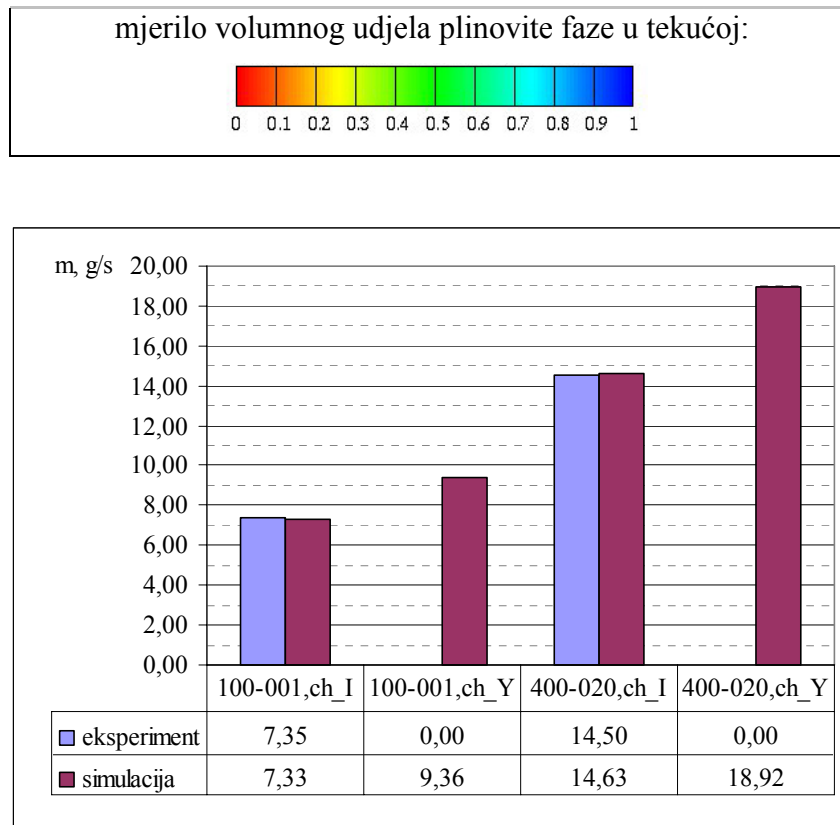
Također, dijagram 6.1 prezentira dobru podudarnost vrijednosti masenih tokova eksperimenta i simulacije.

6.1.3. Strujanje unutar kanala s preprekom

Kod kanala sa preprekom odabrana su dva pada tlaka za slučaj strujanja u I i Y kanalu.

Tablica 6.2. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanale tipa I i Y dobivenih simulacijom i eksperimentom.

Eksperiment	Numerička simulacija
<i>100-001 bar, kanal I:</i>	
	
<i>100-001 bar, kanal Y:</i>	
	
<i>400-020 bar, kanal I:</i>	
	
<i>400-020 bar, kanal Y:</i>	
	



Dijagram 6.2 Usporedni prikaz strujanja dobivenih simulacijom i eksperimentom. Uspoređuje se maseni protok pri strujanju mineralnog dizela kanala tipa I i Y sa preprekom. Nisu raspoloživi eksperimentalni podaci za strujanje u Y kanalu.

6.1.3.1 Analiza rezultata

Prema tablici 6.2 kvalitativna raspodjela volumnih udjela faza dobivena simulacijom dobro opisuje eksperiment u zoni uskog kanala i područja između njega i prepreke. Međutim, nakon što fluid napusti to područje u njemu je previše isparene faze i rezultati se više ne poklapaju. Objašnjenje možda leži u činjenici da iste vrijednosti odabranih parametara matematičkog modela ne mogu dobro opisivati strujanje unutar i izvan uskog kanala.

Maseni protok se dobro podudara sa eksperimentom, dijagram 6.2. To je i razumljivo, s obzirom na činjenicu da je za maseni protok kritični presjek onaj u uskome kanalu, a slika strujanja unutar njega dobro se podudara sa eksperimentalnom slikom strujanja.

6.2. Usporedba strujanja različitih goriva u kanalu bez prepreke

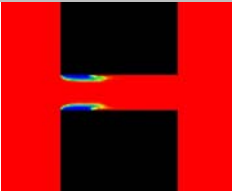
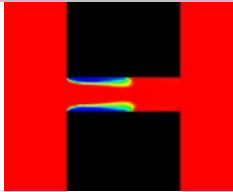
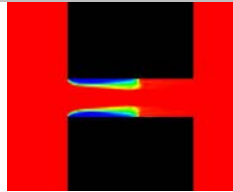
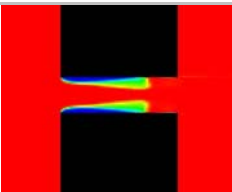
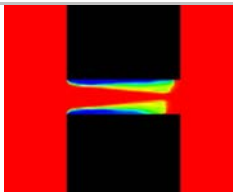
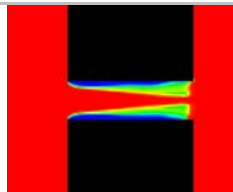
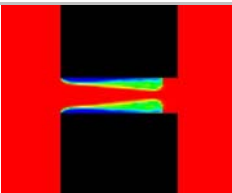
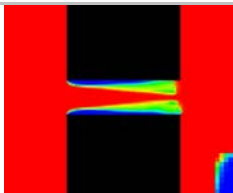
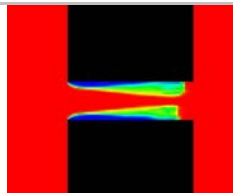
6.2.1. Kriteriji uspoređivanja

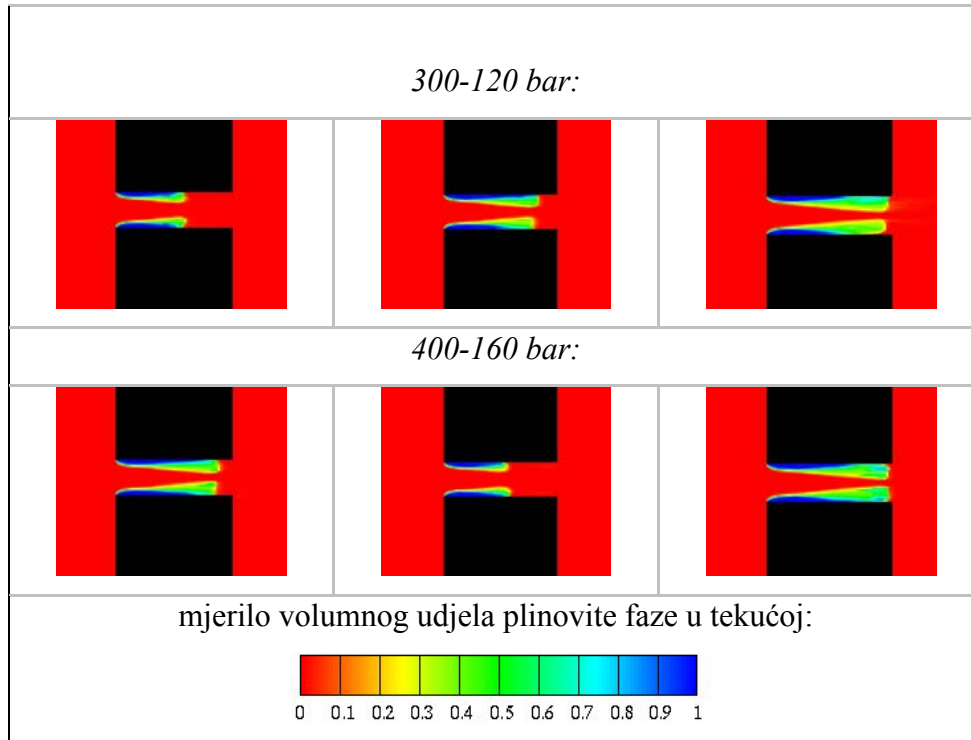
Imamo četiri kriterija uspoređivanja između triju promatranih goriva:

- kvalitativna raspodjela faza u domeni projicirana na poprečnu ravninu
- maseni protok kroz domenu u smjeru strujanja
- kvalitativna raspodjela vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a na plohama gdje je erozija računata
- prikaz profila brzina unutar uskog kanala

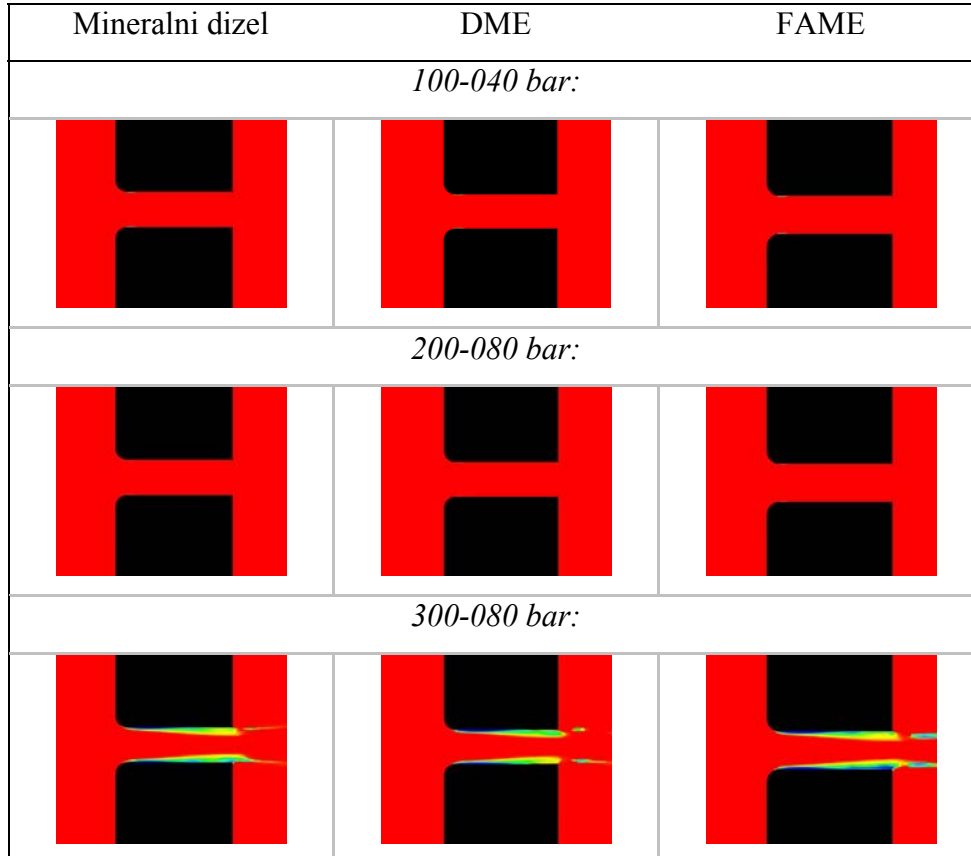
6.2.2. 3D: kvalitativna procjena raspodjele volumnih udjela faza

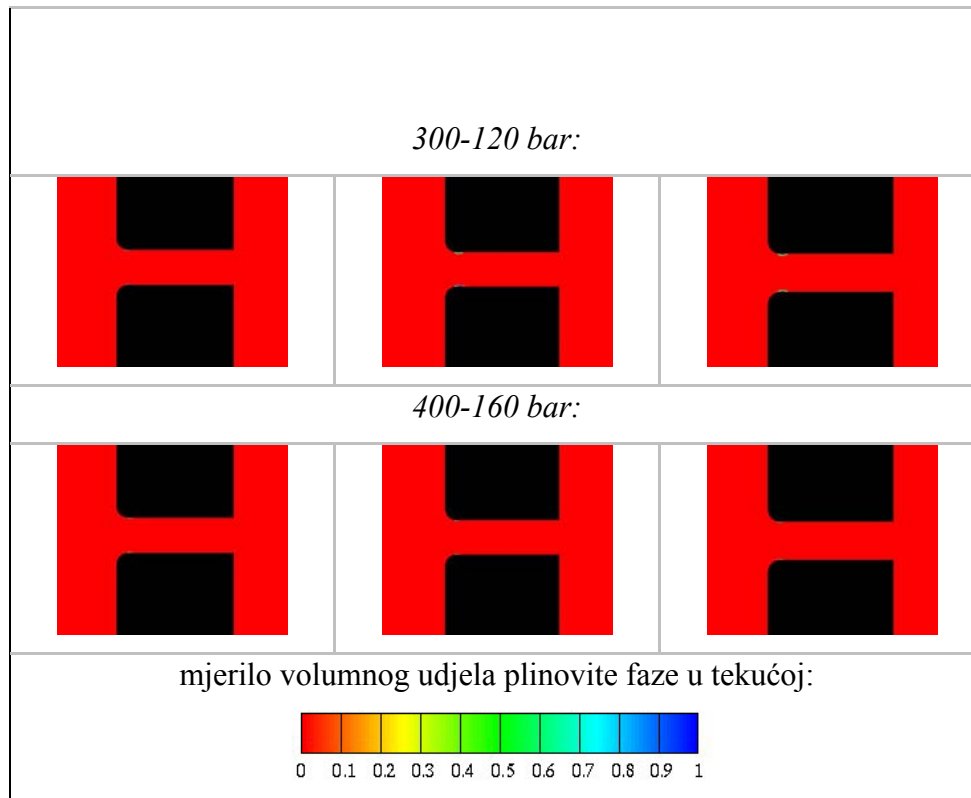
Tablica 6.3. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.

Mineralni dizel	DME	FAME
<i>100-040 bar:</i>		
		
<i>200-080 bar:</i>		
		
<i>300-080 bar:</i>		
		

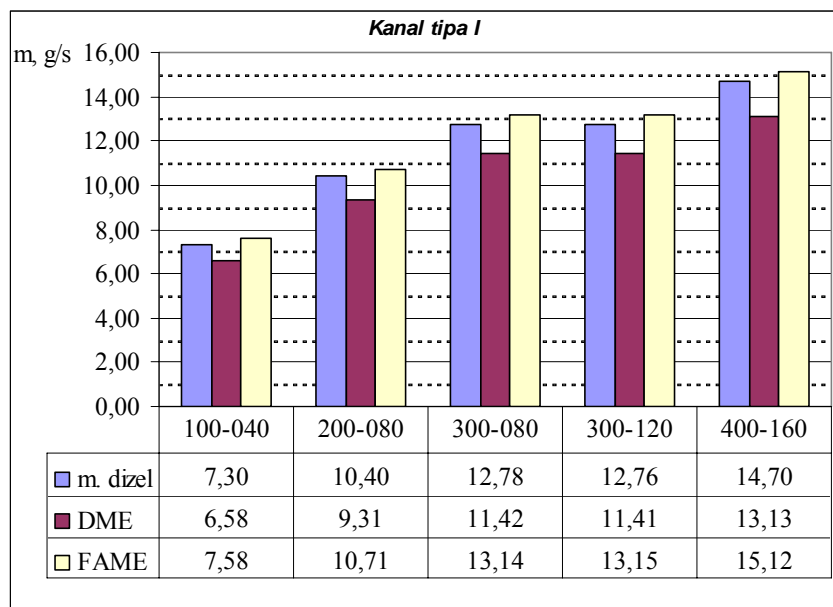


Tablica 6.4. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa Y dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.

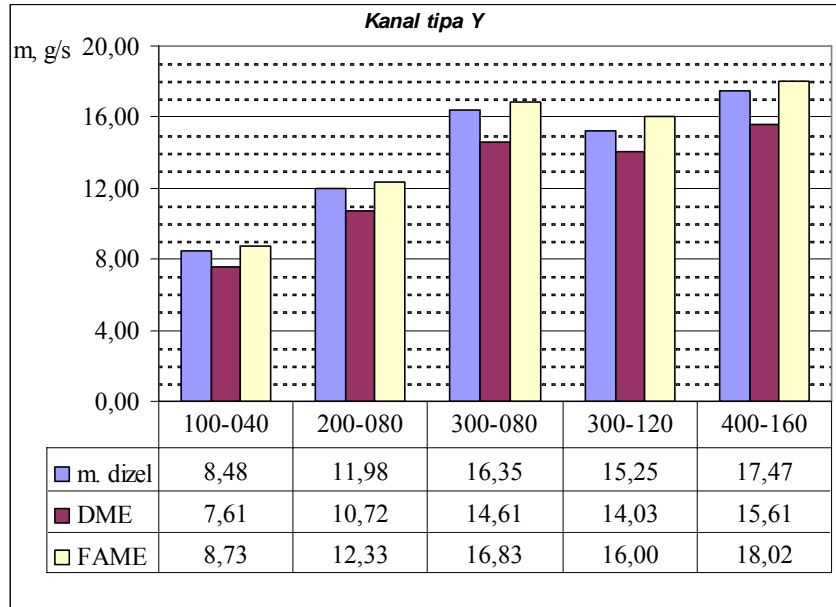




6.2.3. 2D: maseni protok



Dijagram 6.3 Usporedni prikaz rezultata dobivenih simulacijom. Uspoređuju se vrijednosti masenog protoka za sva tri promatrana goriva pri strujanju u kanalu tipa I.

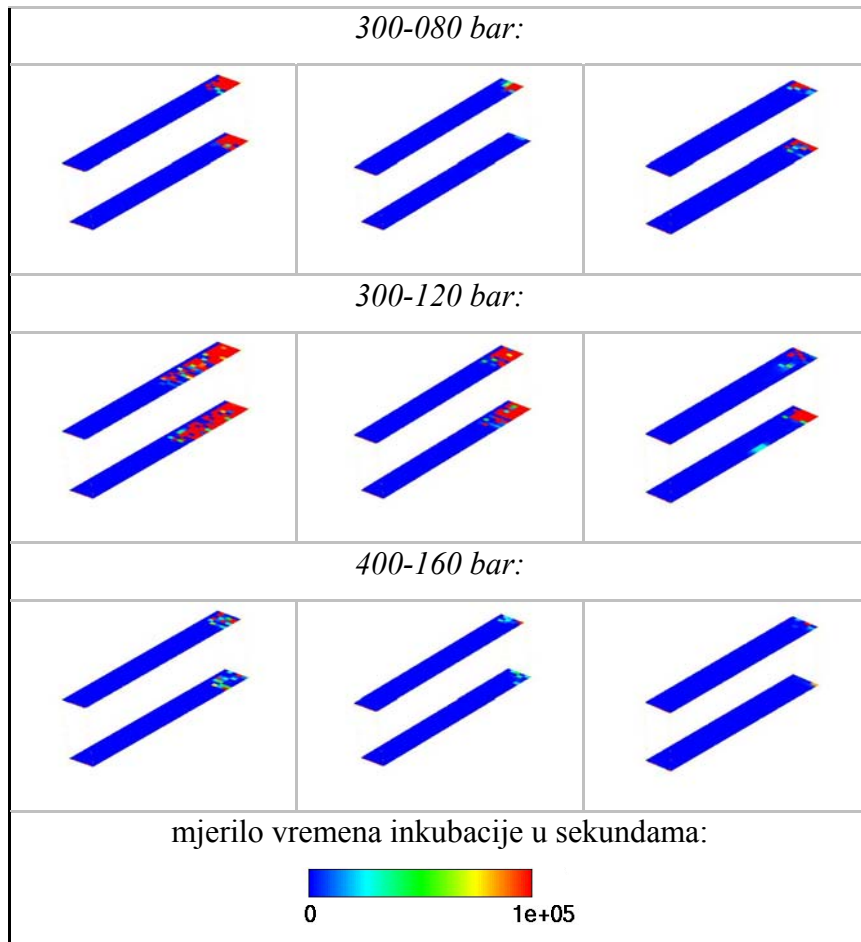


Dijagram 6.4 Usporedni prikaz rezultata dobivenih simulacijom. Uspoređuju se vrijednosti masenog protoka za sva tri promatrana goriva pri strujanju u kanalu tipa Y.

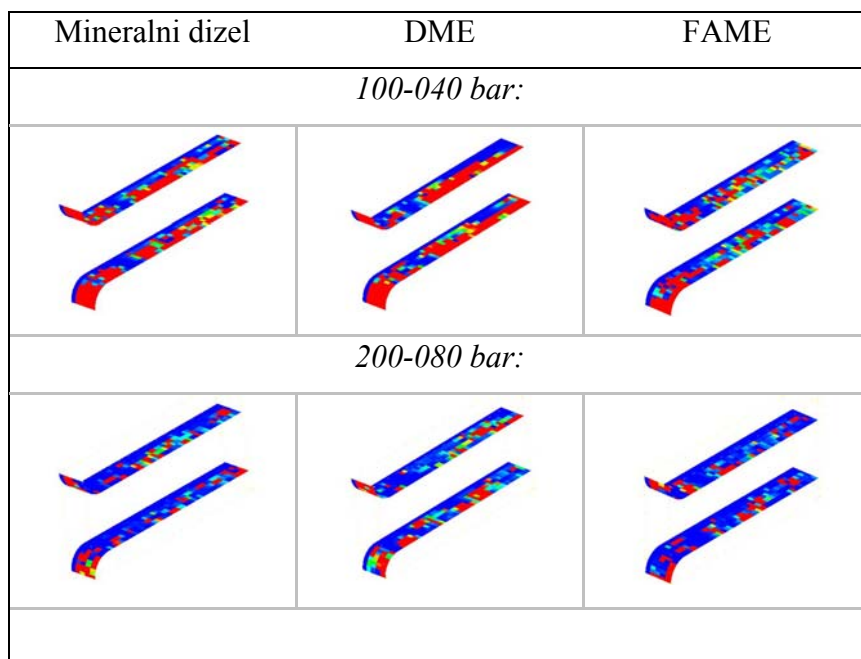
6.2.4. 3D: procjena vjerojatnosti zona erozije

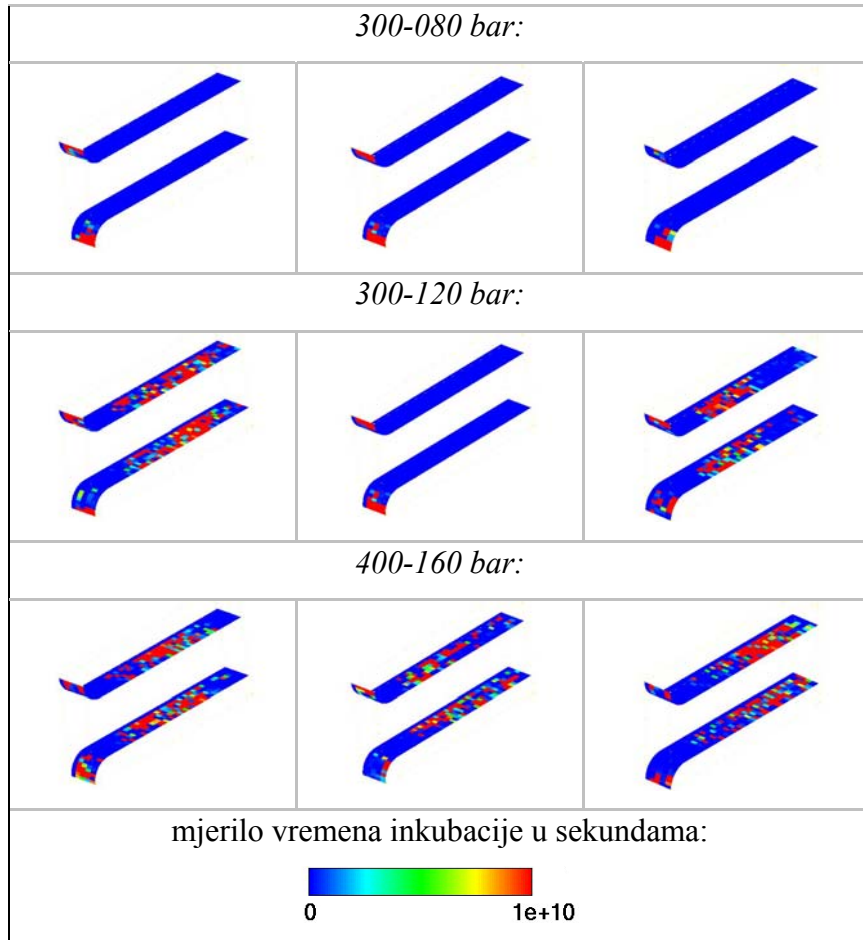
Tablica 6.5. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije u kanalu tipa I dobivenih simulacijom.

Mineralni dizel	DME	FAME
<i>100-040 bar:</i>		
<i>200-080 bar:</i>		

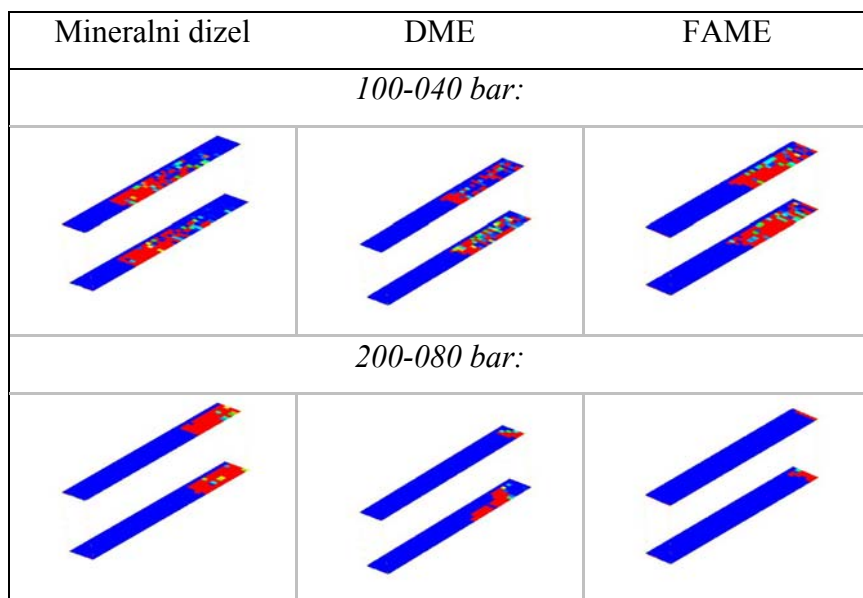


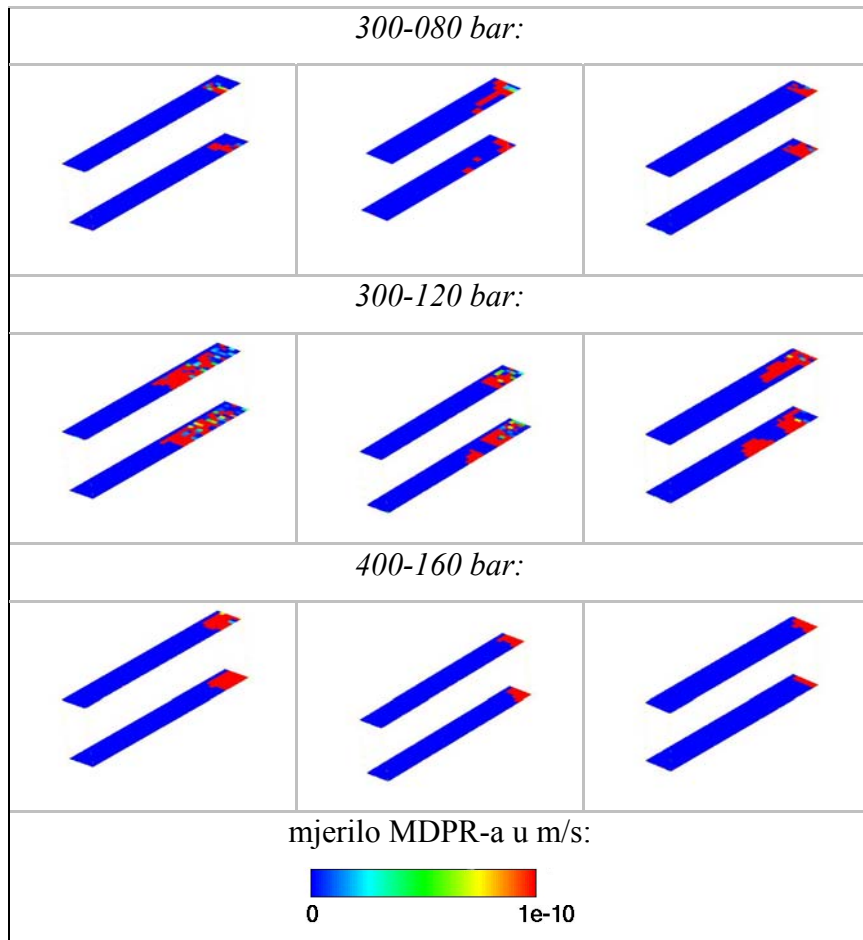
Tablica 6.6. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom.



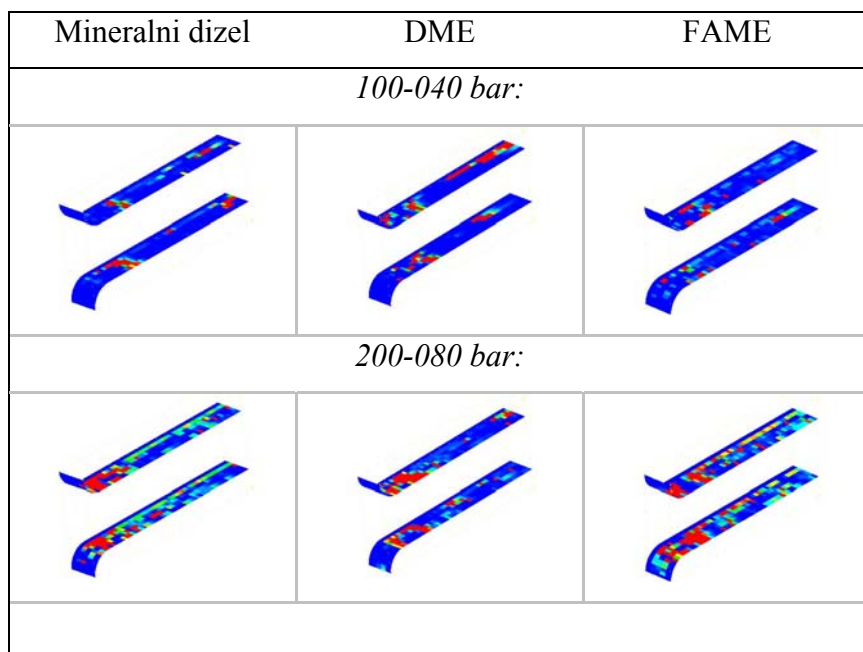


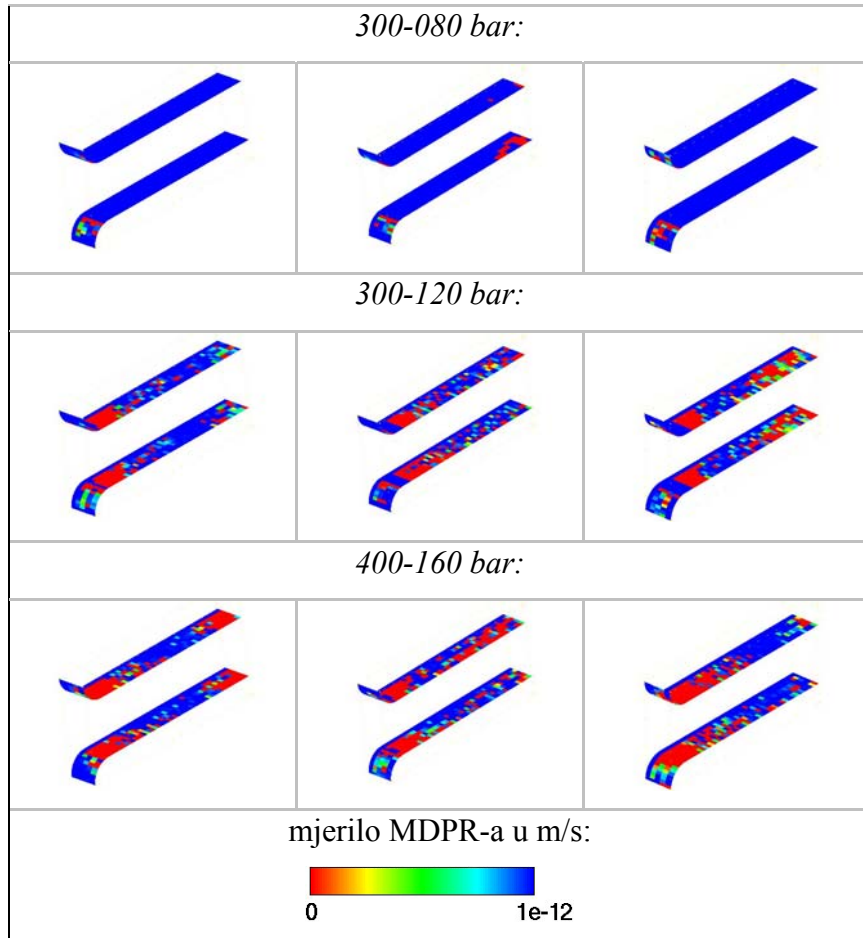
Tablica 6.7. Usporedni prikaz vrijednosti MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom.





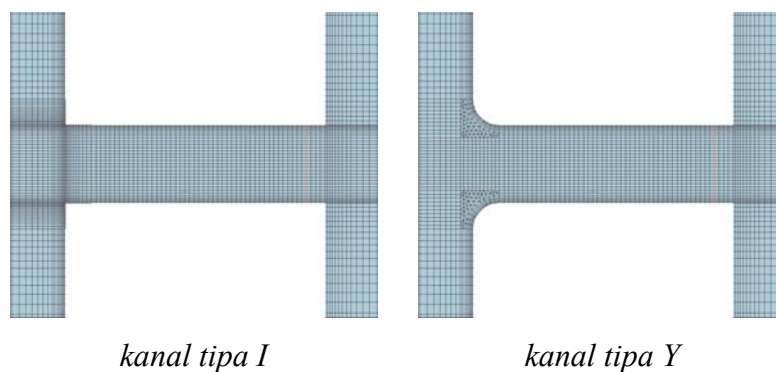
Tablica 6.8. Usporedni prikaz vrijednosti MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom.





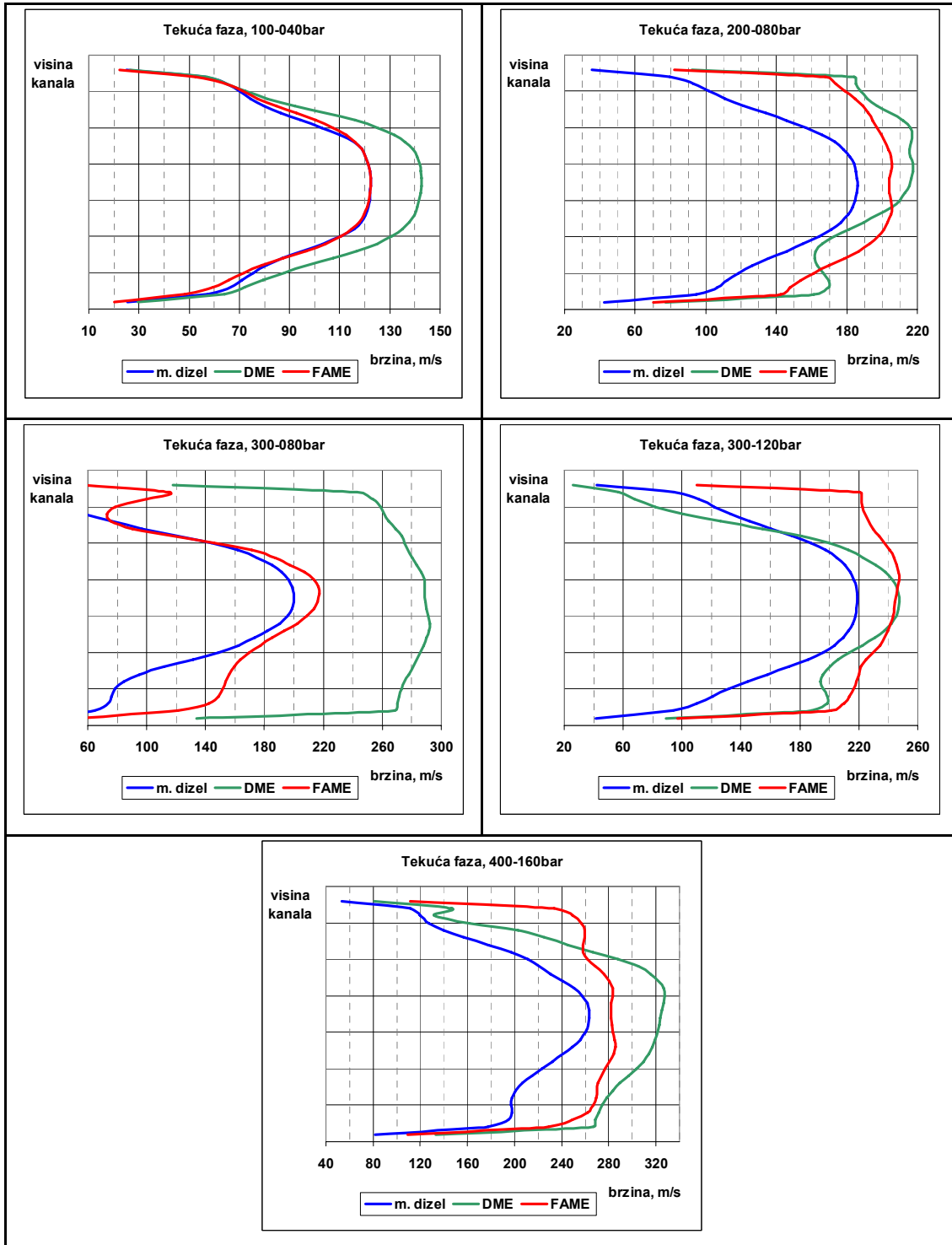
6.2.5. 2D: profili brzina

Profili brzina su snimljeni na liniji koja se nalazi na plohi simetrije unutar uskog kanala, kako prikazuje slijedeća slika:

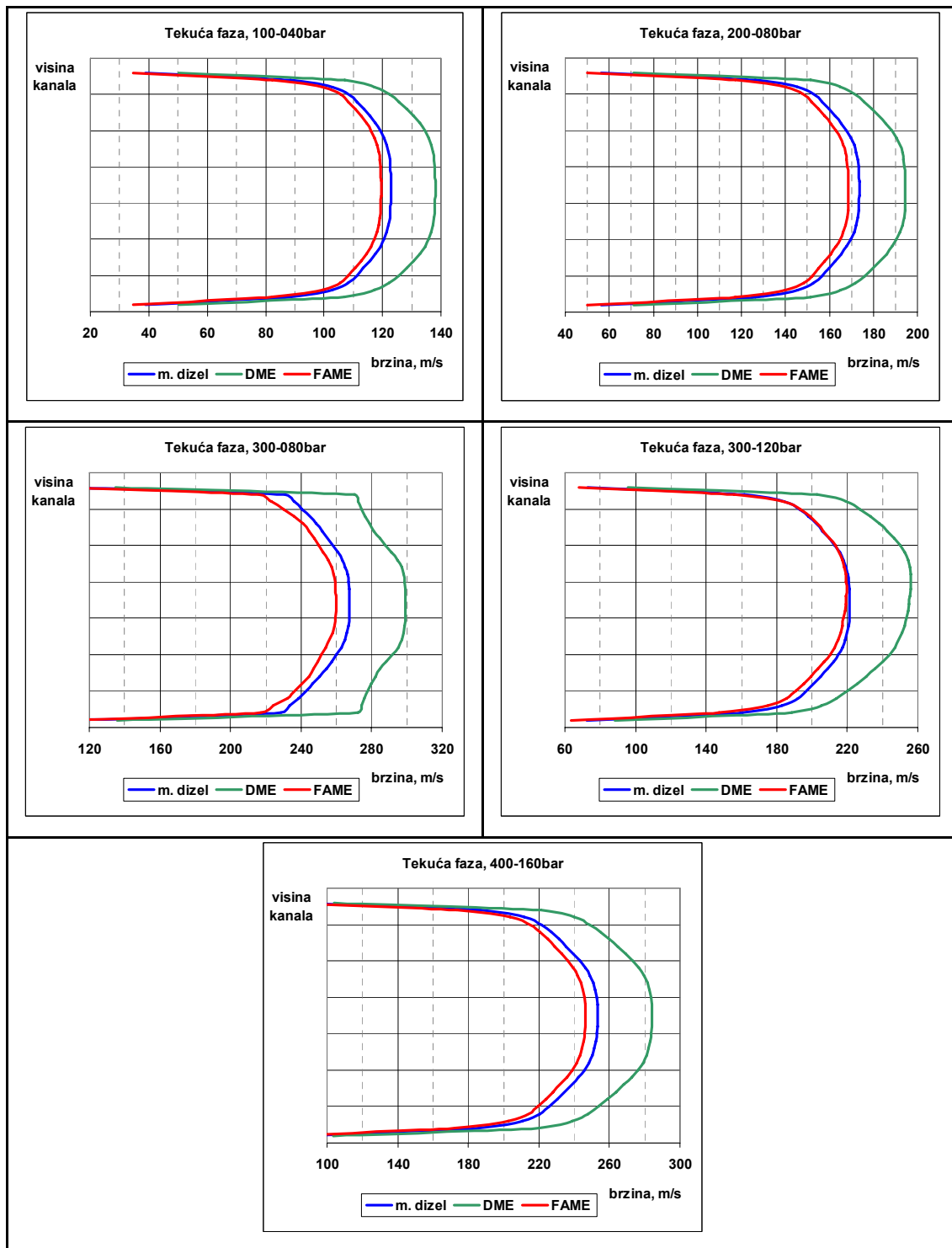


Slika 6.1 Prikaz položaja linije na kojoj su snimljeni profili brzina.

Tablica 6.9. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa I.



Tablica 6.10. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa Y.



6.2.6. Analiza rezultata

Raspodjela faza pri strujanju unutar kanala tipa I ne pokazuje neki određeni uzorak s obzirom na strujanje mineralnog dizela i DME goriva, dok je pri strujanju FAME goriva kavitacija bila najveća. Pri strujanju unutar kanala tipa Y kavitacije je neznatno malo, osim u slučaju 300-080 bar pada tlaka.

Dijagrami masenih protoka 6.3 i 6.4 pokazuju da FAME gorivo pod istim uvjetima ima najveći maseni protok, a DME najmanji. Ova tvrdnja vrijedi i za strujanje unutar kanala tipa I i Y.

Kod kanala tipa I vrijeme inkubacije erozije je manje na početku kanala, gdje su ćelije s najvećim udjelom isparene faze, a općenito najveće na izlazu iz kanala (tablica 6.5), pa sukladno tome na početku kanala možemo očekivati raniju pojavu erozije. Ukoliko uspoređujemo razliku između promatranih goriva, FAME gorivo ima najmanje područje s velikim vremenom inkubacije, dok je kod mineralnog dizela tih ćelija najviše. Strujanje unutar Y kanala pokazuje kvalitativno isti trend (tablica 6.6).

MDPR pokazuje veće vrijednosti na području gdje je vrijeme inkubacije najmanje kod strujanja unutar kanala tipa I (tablica 6.7), dok je kod Y kanala najmanji na ulazu i pri izlazu iz kanala (tablica 6.8).

Uspoređivanjem profila brzina dolazimo do zaključka da DME gorivo ima najveću brzinu, dok je profil mineralnog dizela malo veći od FAME goriva. Takav rezultat je logičan zbog toga što FAME gorivo ima najveću, a DME gorivo najmanju viskoznost. Također treba napomenuti da je kod strujanja u kanalu tipa I (tablica 6.9) vidljivo kolebanje brzine po visini kanala za sva goriva, što se može objasniti velikim kolebanjima strujanja zbog oštrog ruba na ulazu u kanal. Kod strujanja u kanalu tipa Y tih kolebanja nema jer zbog manjeg i ravnomjernijeg pada tlaka, ali i manje količine isparene faze imamo i manje kolebanje strujanja.

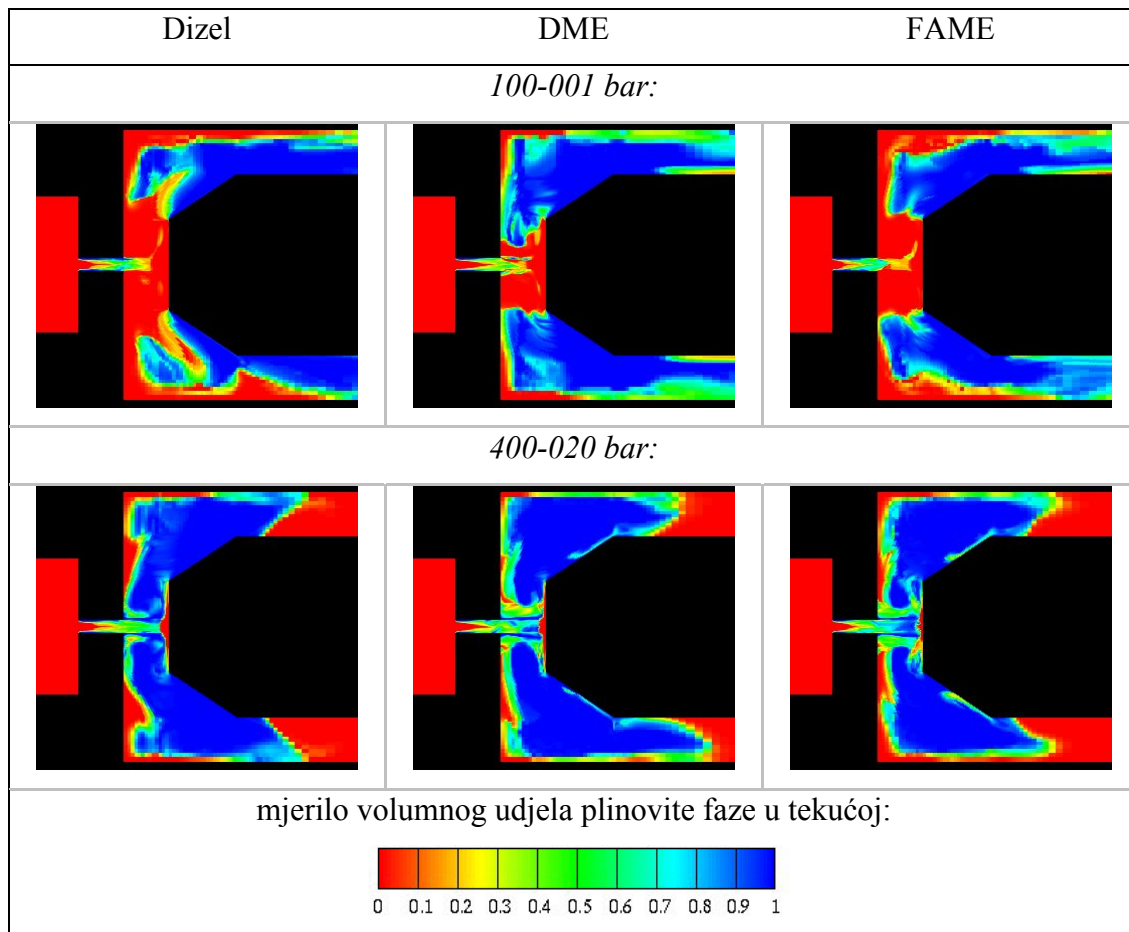
6.3. Usporedni prikaz strujanja različitih goriva u kanalu sa preprekom

6.3.1. Kriteriji uspoređivanja

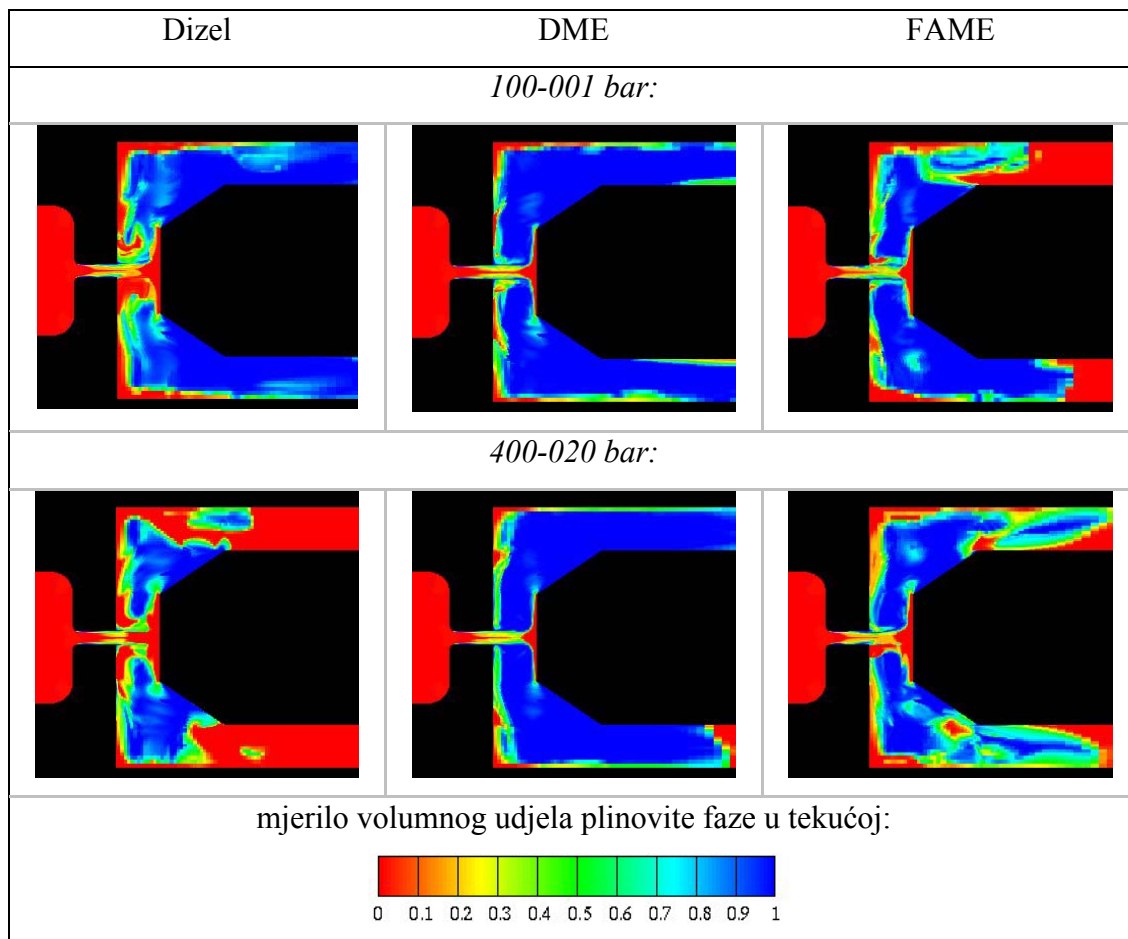
Kriteriji uspoređivanja su jednaki kao i u poglavlju 6.2, uz napomenu da selekcija na kojoj se računala erozija nije unutar uskog kanala, već na prepreci.

6.3.2. 3D: kvalitativna procjena raspodjele volumnih udjela faza

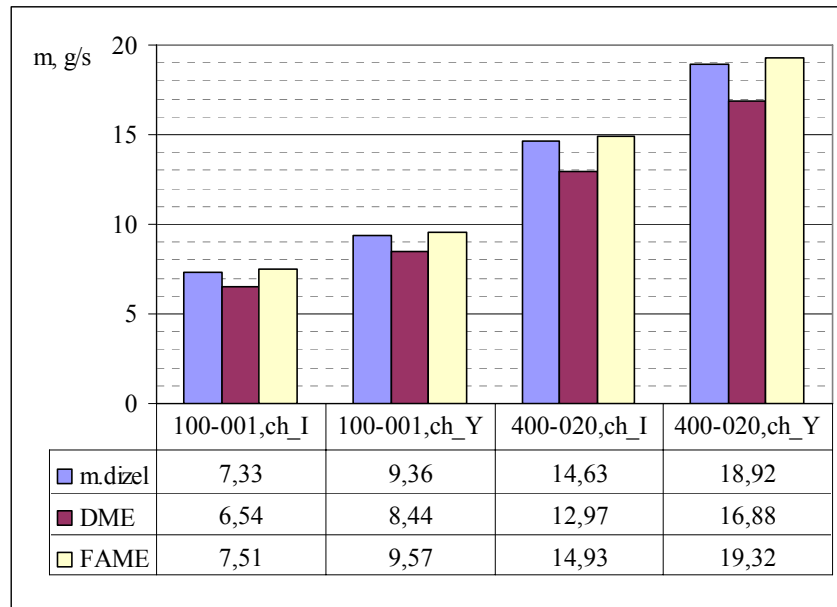
Tablica 6.11. Usporedni prikaz raspodjele volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa I dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.



Tablica 6.12. Usporedni prikaz raspodjela volumnih udjela faza pri strujanju kroz kanal tipa Y dobivenih simulacijom za sva tri promatrana goriva.



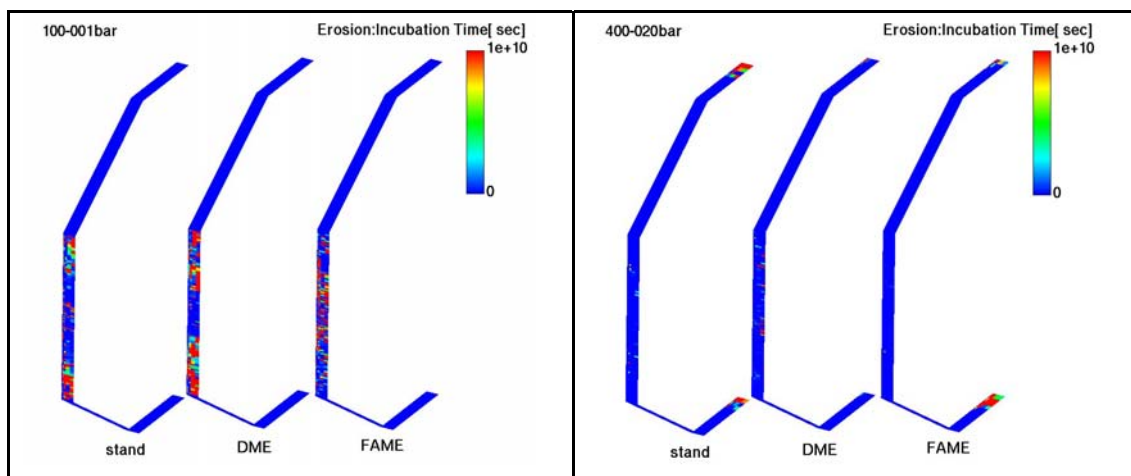
6.3.3. 2D: maseni protok



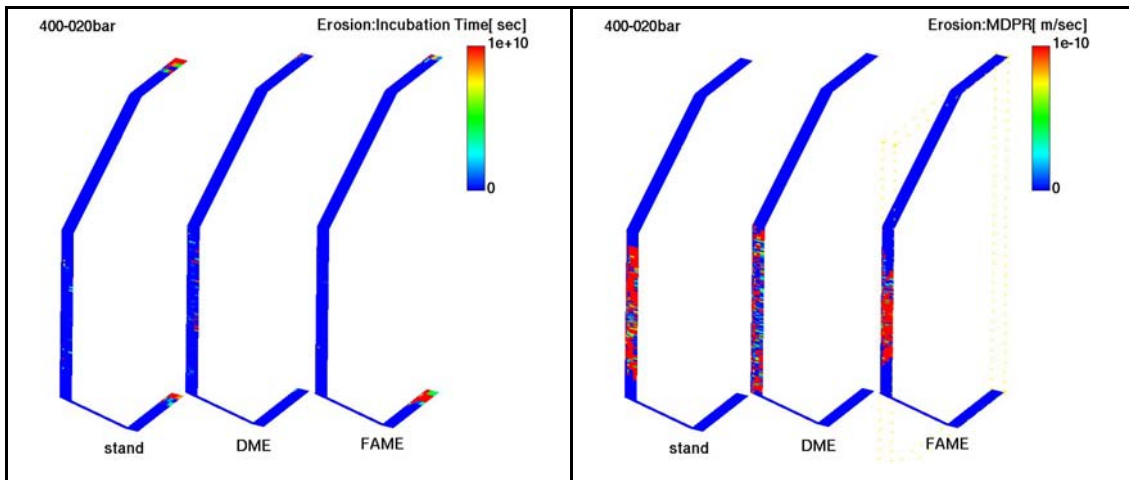
Dijagram 6.5 Usporedni prikaz rezultata dobivenih simulacijom. Uspoređuje se maseni protok svih triju vrsta goriva međusobno pri oba pada tlaka i oba tipa kanala.

6.3.4. 3D: procjena vjerojatnosti zona erozije

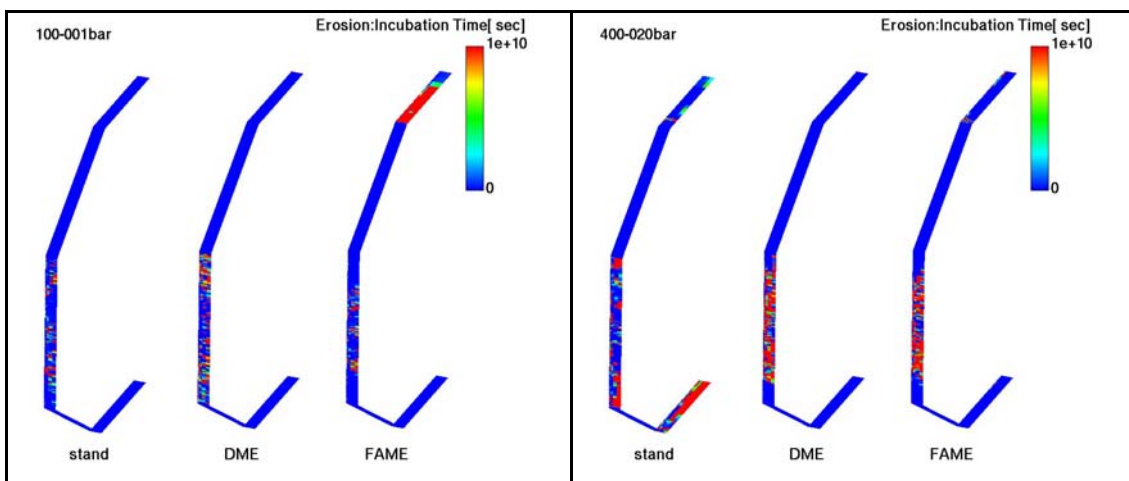
Tablica 6.13. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom kod pada tlaka 100-001 bar za sva tri promatrana goriva.



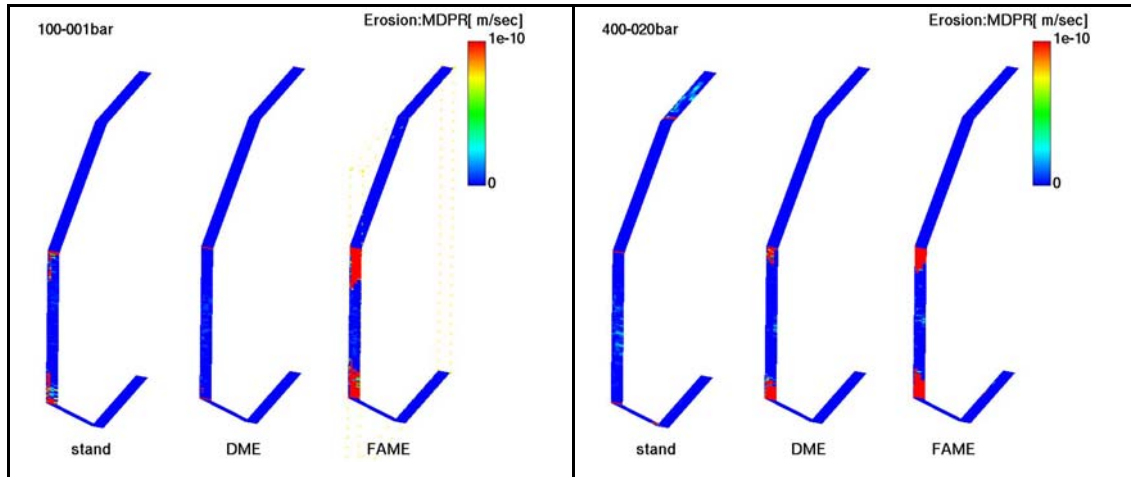
Tablica 6.14. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa I dobivenih simulacijom kod pada tlaka 400-020 bar za sva tri promatrana goriva.



Tablica 6.15. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom kod pada tlaka 100-001 bar za sva tri promatrana goriva.

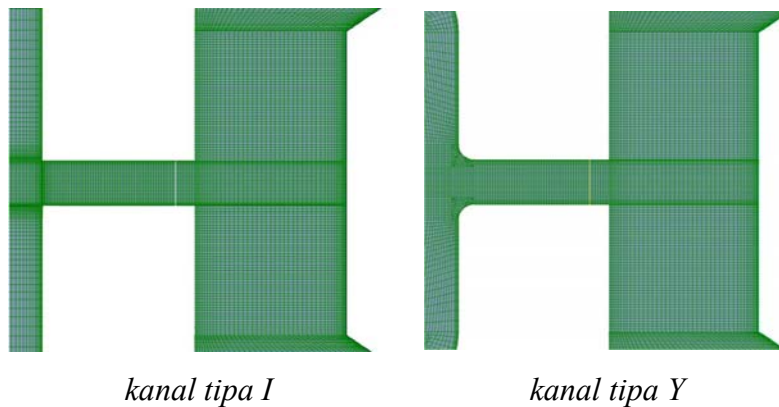


Tablica 6.16. Usporedni prikaz vrijednosti vremena inkubacije i MDPR-a u kanalu tipa Y dobivenih simulacijom kod pada tlaka 400-020 bar za sva tri promatrana goriva.



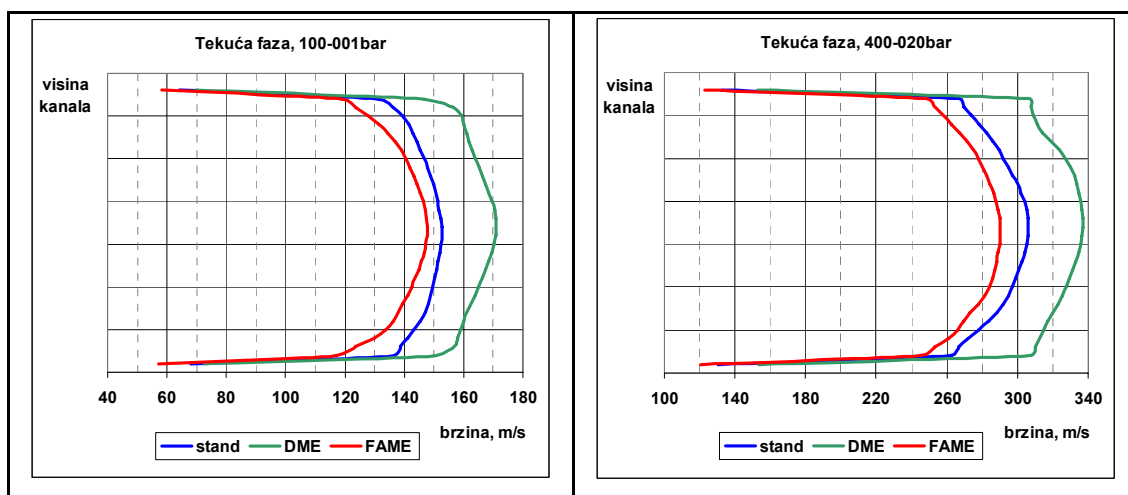
6.3.5. 2D: profili brzina

Profili brzina su snimljeni na liniji koja se nalazi na plohi simetrije unutar uskog kanala, kako prikazuje slijedeća slika:

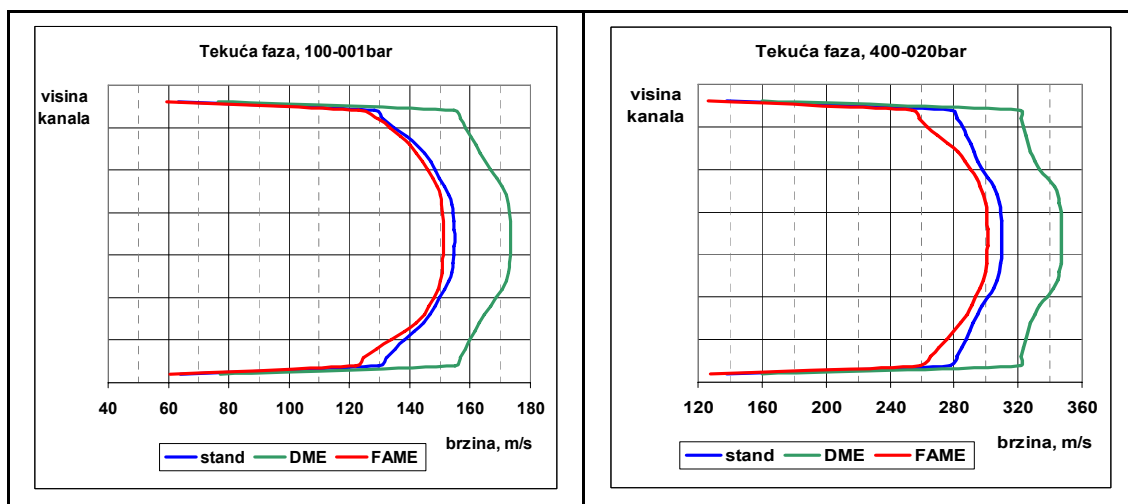


Slika 6.2 Prikaz položaja linije na kojoj su snimljeni profili brzina.

Tablica 6.17. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa I.



Tablica 6.18. Usporedni prikaz profila brzina tekuće faze za sva tri goriva dobivenih simulacijom pri strujanju u kanalu tipa Y.



6.3.6. Analiza rezultata

Dijagram 6.5 nam pokazuje kvalitativno isti trend masenog protoka triju vrsta goriva kao i kod strujanja bez prepreke. Maseni protok u kanalu tipa Y je veći nego u kanalu tipa I, što je također logično i već je analizirano ranije. Isto vrijedi i za profile brzina (tablice 6.17 i 6.18).

Tablica 6.13 nam pokazuje da će kod pada tlaka 100-001 bar vrijeme inkubacije čeonog dijela prepreke imati veće vrijeme inkubacije od skošenih dijelova prepreke, bez obzira na vrstu goriva. Općenito možemo primijetiti da je vrijeme inkubacije u

svim slučajevima kraće u područjima gdje imamo ćelije s većim udjelima isparene faze.

MDPR pokazuje veće vrijednosti na području gdje je vrijeme inkubacije najmanje, tablice 6.16 i 6.14.

Ovakvi rezultati za vrijeme inkubacije erozije i MDPR već su analizirani kod strujanja u kanalu bez prepreke, pa možemo reći da pokazuju konzistentnost s obzirom na raspodjelu volumnih udjela faza.

7. ZAKLJUČAK

CFDWM/FIRE *Multiphase* modul može dati vrijedne informacije o višefaznom kavitacijskom strujanju različitih vrsta goriva.

Uspoređujući rezultate dobivene simulacijom sa eksperimentalnima, vidimo da parametri modela mogu u određenom slučaju dobro pogoditi sliku strujanja. Međutim, kod modela brizgaljki s preprekom rezultati su se poklapali samo do izlaska iz uskog kanala i u ograničenom području do prepreke. U području oko prepreke prema izlazu nemamo niti približno dobro poklapanje sa eksperimentom. Očito je da u tom području postojeći parametri modela više ne mogu kvalitetno opisivati strujanje, pa se kao rješenje nameće promjena parametara modela u cilju dobivanja slike strujanja koja se više podudara sa eksperimentalnom.

Neovisno o kvaliteti prikaza raspodjele volumnih faza, model erozije pokazuje konzistentnost s rezultatima volumnih udjela faza, što znači da na područjima ploha (na kojima računamo eroziju) koje su izložene ćelijama s velikim udjelima isparene faze imamo kraće vrijeme inkubacije. Takvo rješenje je logično s obzirom na činjenicu da u takvim ćelijama veći broj isplinjanih mjehurića ima priliku implodirati smanjujući time vrijeme inkubacije i povećavajući brzinu erozije.

Ukoliko se osvrnemo na analizu obavljenu u prethodnim poglavljima, možemo zaključiti da FAME gorivo u odnosu na mineralni dizel struji sporijim profilom brzina, ostvaruje veću kavitaciju (promatrajući samo kanal bez prepreke) ali i uz iste rubne uvjete ostvaruje veće masene tokove bez obzira na tip kanala ili pad tlaka.

DME gorivo, koje od gore spomenutih goriva najviše odudara s obzirom na fizikalna svojstva, ostvaruje najmanji maseni protok, ali i najveću brzinu.

Time zaključujemo da je gustoća fluida značajnije fizikalno svojstvo goriva od dinamičke viskoznosti u jednadžbi masenog protoka.

8. LITERATURA

- [1] Hammond G.P., Kallu S., McManus M.C., *Development of biofuels for the UK automotive market*, Applied Energy, 2006.
- [2] Mulqueen S., *The European Alternative Fuel Market And The Role Of Fuel Additives*, Biofuels Conference, Greece 2007
- [3] Diesel Fuel Injection Equipment Manufacturers Common Position Statement, *Fatty Acid Methyl Ester Fuels As a Replacement or Extender for Diesel Fuels*, 2004, objavljeno na:
http://www.ufop.de/downloads/FAME_Statement_June_2004.pdf
- [4] AVL FIRE v.8, *Multiphase Flow*, AVL, Graz, 2004
- [5] AVL FIRE, *New Cavitation Model: a parametric variation of coefficients*, AVL, Graz, 2006
- [6] Greif D., Wang D.M., *Aspects Of Modelling Cavitation Effects Within Injecton Equipment Using Advanced Two-Fluid Techniques*, Turbulence, Heat and mass transfer 5
- [7] Hanjalić K., *Dinamika stišljivog fluida*, 1970
- [8] Franjić, K., *Hidraulički strojevi i postrojenja*, FSB skripta
- [9] Asi O., *Failure of a Diesel Engine Injector Nozzle by cavitation damage*, Engineering Failure Analysis, 2006.
- [10] Dular M., Bachert B., Stoffel B., Sirok B., *Relationship between cavitation structures and cavitation damage*, Wear, 2004
- [11] Szkodo M., *Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials*, Journal of Materials Processing Technology, 2005.
- [12] Berchiche N., Franc J.P., Michel J.M., *A Cavitation Erosion Model for Ductile Materials*, Journal of Fluids Engineering, 2002
- [13] Franc J.P., Riondet M., *Incubation Time and Cavitation Erosion Rate of Work-Hardening Materials*, CAV2006 simposium, 2006

- [14] Greif D., Morozov A., Winklhofer E., Tatschl R., *Experimental and Numerical Investigation of Erosive Effects Due to Cavitation Within Injection Equipment*, ICCHMT, 2005
- [15] Payri F., Bermudez V., Payri R., Salvador F.J., *The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles*, Fuel, 2004
- [16] Chaves H., Knapp M., Kubitzek A., *Experimental study of cavitation in the nozzle hole of diesel injectors using transparent nozzles*, SAE Paper, 1995
- [17] ASM handbook vol.11., Failure Analysis and prevention, 1986
- [18] Semelsberger, T.A, Borup R.L. Greene, H.L., *Dimethyl Ether (DME) as an Alternative Fuel*, Journal of Power Sources, 2005.
- [19] Hansen J.B., Mikkelsen S., *DME as a Transportation Fuel*, 2001.
- [20] Badock C., Wirth R., Fath A., Leipertz A., *Investigation of cavitation in real size diesel injection nozzles*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999
- [21] Takenakaa N., Kadowakia T., Kawabatab Y., Limc I.C., Simc C.M., *Visualization of cavitation phenomena in a Diesel engine fuel injection nozzle by neutron radiography*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005.
- [22] AVL FIRE v.8, *CFD Solver v.8.3*, AVL, Graz, 2004

PRILOG: FORTRAN RAČUNALNI KOD KORISNIČKIH FUNKCIJA

```
-----
      module allocating
      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: vfmax_cell
      INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: vfmax_bnd
      INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION (:,:) :: cell_id

      end module allocating

-----

      SUBROUTINE useini(mat,mph)

c      *****
c      1. dynamic allocation of vfmax_cell i vfmax_bnd- 1D allocation
c      2. dynamic allocation of cell_id - 2D allocation
c      3. creation of cell_id matrix
c
c      INPUT VARIABLES:
c      ip3          number of mesh cells in z direction, unit (-)
c      z_value      cell centre z coordinate on highest z value, unit m
c
c      *****

      USE comm1
      USE allocating
      INCLUDE 'com0.inc'

      print*,'Number of cells is ',ncell
      if(.not.ALLOCATED(vfmax_cell)) ALLOCATE(vfmax_cell(ncell))
      vfmax_cell(:)=0.

      if(.not.ALLOCATED(vfmax_bnd)) ALLOCATE(vfmax_bnd(nbfac))
      vfmax_bnd(:)=0.

      ip3=5
      z_value=(-0.00003)
      ncell_2=ncell/ip3

      if(.not.ALLOCATED(cell_id)) ALLOCATE(cell_id(ncell_2,ip3))
      cell_id(:,:)=0

      print*,''
      print*,'cell_id matrix'
      print*,''
      ixx=0
      do ip=nsp(mat),nep(mat)
         if (xp(3,ip).gt.(z_value))then
            ixx=ixx+1
            iyy=2
            cell_id(ixx,1)=ip
            do ip2=nsp(mat),nep(mat)
               if (abs(xp(2,ip2)-xp(2,ip)).lt.(0.0000001).and.
x      abs(xp(1,ip2)-xp(1,ip)).lt.(0.0000001).and.ip2.ne.ip) then
                  cell_id(ixx,iyy)=ip2
                  iyy=iiy+1
            end do
         end if
      end do
```

```
        end if
    end do
    print*,   ix,   cell_id(ix,:)
    end if
end do

c   print*,   cell_id(1,:)

print*, 'Initialization finished!'
print*, ''
print*, ''
RETURN
END

-----
SUBROUTINE useout(mat,mph,ifile)

USE comm1
USE allocating
INCLUDE 'com0.inc'

c   *****
c   1. Comparison of volume fraction in z direction, where max value
of volume fraction is placed in cell with highest z value.
c   This is used when simulating transparent optical measurement, in
c   this case volume fraction.
c
c   2. Limitation ok TKE (listing or listing+limitation)
c
c   INPUT VARIABLES:
c   ip3           number of mesh cells in z direction, unit (-)
c   limit_TKE     TKE value limitation, unit (m/s)2
c   *****

print*, 'Useout routine started!'
c   ip4=0
c   ip3=5
c   ncell_2=ncell/ip3

do ip=1,ncell_2
    vfm=vf(cell_id(ip,1))
    ip4=ip4+1
c   print*,   ip4,   vfm
    do ip2=2,ip3
        if (vf(cell_id(ip,ip2)).gt.vfm) then
            vfm=vf(cell_id(ip,ip2))
        end if
c   print*,   ip4,   vfm
    end do
    vfmmax_cell(cell_id(ip,1))=vfm
end do

c   *****

c   limit_TKE=100
c   print *, limit_TKE, '000000000000000000'
c   icount_1=0
c   icount_2=0
```



```
c      do ip6=nsp(mat),nep(mat)
c      if (te(ip6).ge.limit_TKE) then
c          icount_2=icount_2+1
c          te(ip6)=limit_TKE
c          print*,   te(ip6),  'in cell no.',   ip6
c      end if
c  end do
c  print*,''
c  print*,  'There was', icount_2,'cells with TKE over',
ilimit_TKE
c  print*,  'There was', icount_2,'cells with TKE limited to',
limit_TKE
c  print*,''

print*,'Useout routine finished!'

RETURN
END
```

```
-----
SUBROUTINE useplo(mat,mph,ifile)

USE comm1
USE allocating
INCLUDE 'com0.inc'

call Write_User_Fl3(mat,mph,ifile,'max_VF','- ',
x                    ncell,nbfac,vfmax_cell,vfmax_bnd)

print*, 'Successfully written to *.Fl3 file.'

RETURN
END
```