

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Antun Šikić

Zagreb, 2008.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Antun Šikić

Zagreb, 2008.

## SAŽETAK

Tema ovog rada je analiza ubrizgavanja goriva u obliku spreja, s različitim modelima isparavanja i različitim mrežama koje se dobiva simulacijom u CFDWM/FIRE programu. Modeli isparavanja koji se ovdje koriste su Dukowicz i Abramzon, te kombinacija Abramzon modela s Frolovim korekcijama za: nestacionarno zagrijavanje, nejedinstvenu razdiobu temperature unutar kapljica, deformaciju i unutarnju cirkulaciju. Odabrani kriteriji analize ubrizgavanja su s obzirom na tlak ubrizgavanja, stanje u cilindru za vrijeme ubrizgavanja, te vremenu ubrizgavanja (to je povezano s količinom mase koja se ubrizgava). Gorivo koje se koristi je N-heksadekan (cetan) koji je po kemijskoj strukturi vrlo sličan Diesel gorivu. Mreže su isječak od 15 stupnjeva veće i manje gustoće, te isječak od 90 stupnjeva. Na njima se htjelo vidjeti koliki je utjecaj veličine i gustoće mreže na rezultate. Kalkulacije su provedene kako bi dale usporedbu ponašanja karakteristika penetracije tekuće i isparene faze spreja s rezultatima na devet mjernih točaka dobivenih od strane Sveučilišta u Valenciji (UPV). Kalkulacije su pokazale kako su rezultati za različite veličine mreža usporedivi, ali da aktivacijom Frolovih dodataka imamo izrazito djelovanje fizike na karakteristike modela (penetraciju).

---

## SUMMARY

Analysis of a injection of a fuel in a shape of a spray was done in this diploma thesis with different models of evaporation and different meshes, which are gained with a simulation in a program CFDWM/FIRE, provided by AVL-AST. Evaporation models are Dukowicz and Abramzon, and a combination of Abramzon with Frolovs corrections for: transient heating of the boundary layer, non-uniform heating, drop deformation and internal circulation. The criteria for analysis was in a regard of injection pressure, conditions in a cilindar and time of injection (mass that was injected). The fuel was N-Hexadecane (cetane), which has chemical structure very similar to Diesel fuel. Meshes are a pie of 15 degrees with lower or higher density and a quater bomb of 90 degrees. On them I wanted to see the effect of grid size. Calculations are done to see the behavior on the penetration curve for all 9 measured points, in a simulation done by UPV (University of Valencia). The calculations showed that results for varius meshes are comparable, but with activation of Frolov we can see strong effect of physics on the model characteristics (penetration).

---

## 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. , Milanu Vujanoviću, dipl. ing., Luki Perkoviću, dipl.ing. i Nebojši Gavrilovu na velikoj i nesebičnoj pomoći.*

*Zahvaljujem se također dipl.ing Eberhardu von Bergu, dr. Reinhardu Tatschlu i dr. Peteru Prieschingu iz AVL-a na podacima, te dragocjenoj pomoći i savjetima bez kojih bi nemoguće bilo dobiti bilo kakve rezultate.*

*I na kraju, zahvaljujem se mojoj majci na potpori i ljubavi koju mi je davala tijekom cijelog školovanja.*

## SADRŽAJ

<b>POPIS OZNAKA.....</b>	<b>1</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>3</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>6</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2. MATEMATIČKI MODEL SPREJA .....</b>	<b>10</b>
2.1. Uvod .....	10
2.2. Osnovne jednačbe kod modela spreja .....	11
2.2.1. Jednačba momenta.....	11
2.2.2. Isparavanje kapljice .....	13
2.2.2.1. Analogija za prijenos topline i mase.....	13
2.2.2.2. Abramzon i Sirignano model isparavanja kapljica.....	16
2.3. Podmodeli za stvaranje novih kapljica .....	18
2.3.1. Modeli razdvajanja (raspršivanja) kapljica.....	19
2.3.1.1. Standardni <i>Wave</i> model razdvajanja kapljica .....	19
2.3.1.2. <i>Wave</i> model razdvajanja sa stvaranjem manjih kapljicama ( <i>child</i> )	19
2.3.1.3. TAB model razdvajanja kapljica .....	20
2.3.2. Vrtložno raspršivanje kapljica .....	21
2.3.2.1. Enable model raspršivanja kapljica .....	22
2.3.2.2. O'Rourke model raspršivanja kapljica .....	23
2.3.3. Sraščivanje/sudar kapljica .....	25
2.3.3.1. O'Rourke model sraščivanja/sudaranja kapljica .....	25
2.4. Dodatna Frolova teorija za model spreja.....	28
2.4.1. Korekcija za prijelazno grijanje graničnog sloja izvan kapljice ( <i>transient heating of the boundary layer</i> ) .....	28
2.4.2. Korekcija za promjenjivo zagrijavanje kapljice .....	29
2.4.3. Korekcija za deformaciju kapljice.....	31
2.4.4. Korekcija za unutarnju cirkulaciju unutar kapljice.....	31
<b>3. RAČUNALNA DOMENA SA SELEKCIJAMA I RUBNIM UVJETIMA .....</b>	<b>34</b>
3.1. Uvod .....	34
3.2. Geometrija i mreže .....	34
3.3. Početni uvjeti i vremenski parametri kalkulacije .....	37

---

3.4.	Parametri zatvaranja .....	39
3.4.1.	Parametri modela isparavanja.....	39
3.4.2.	Parametri modela razdvajanja .....	39
3.4.2.1.	Parametri <i>Wave</i> modela .....	39
3.4.2.2.	Parametri TAB modela .....	42
<b>4.</b>	<b>REZULTATI.....</b>	<b>44</b>
4.1.	Utjecaj veličine domene konusnog isječka (15 i 90 stupnjeva) za Dukowicz model isparavanja uz korištenje <i>Wave</i> modela razdvajanja kapljica.....	44
4.1.1.	Analiza rezultata usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva .....	48
4.2.	Utjecaj gustoće mreže na domeni od 15 stupnjeva za Dukowicz model isparavanja uz korištenje <i>Wave</i> modela razdvajanja kapljica.....	49
4.2.1.	Analiza rezultata za usporedbu različite gustoće mreže .....	53
4.3.	Usporedba Abramzon/Sirignano i Dukowicz modela isparavanja uz korištenje <i>Wave</i> modela razdvajanja kapljica .....	54
4.3.1.	Analiza rezultata usporedbe Dukowicz i Abramzon modela isparavanja uz korištenje <i>Wave</i> modela razdvajanja kapljica .....	58
4.4.	Abramzon/Sirignano model isparavanja uz Frolovu korekciju s <i>Wave</i> modelom razdvajanja kapljica .....	59
4.4.1.	Analiza rezultata za Abramzon model isparavanja uz Frolovu korekciju s <i>Wave</i> modelom razdvajanja kapljica .....	63
4.5.	Model isparavanja Abramzon/Sirignano uz Frolovu korekciju s TAB modelom razdvajanja kapljica .....	64
4.5.1.	Analiza rezultata za Abramzon model isparavanja uz Frolovu korekciju s TAB modelom razdvajanja kapljica .....	68
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>69</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>70</b>

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$m_d$	kg	masa čestice
$x_{id}$	m	vektor položaja čestice
$u_{id}$	m/s	vektor brzine čestice
$u_{ig}$	m/s	brzina domene fluida
$D_d$	m	promjer kapljice
$r_d$	m	radijus kapljice
$g_i$	m/s <sup>2</sup>	vektor akceleracije gravitacije
$F_i$	N	vektor izvora
$T$	K	temperatura
$\lambda$	W/mK	toplinska provodnost
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prijelaza topline
$Re$	-	Reynolds-ov broj
$Nu$	-	Nusselt-ov broj
$Sc$	-	Schmidt-ov broj
$Sh$	-	Sherwood-ov broj
$Le$	-	Lewis-ov broj
$Pr$	-	Prandtl-ov broj
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\nabla$	-	nabla operator
$C_D$	-	koeficijent otpora
$D_p$	-	funkcija optora (drag)
$\dot{Q}$	W	konvektivni tok topline
$c_{pd}$	J/(kgK)	specifična toplina od kapljice
$\dot{f}_{vs}$	kg/(m <sup>2</sup> s)	tok mase spreja pare na površini čestice
$h$	J/kg	entalpija



$\dot{q}_s$	W/m <sup>2</sup>	tok topline na površini čestice
$L$	J/kg	latentna toplina
$A_s$	m <sup>2</sup>	površina čestice
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	površinska napetost
$\mu$	-	frakcija mase
$B_y$	-	broj protoka mase

Donji indeks:

---

$d,p$	kapljica, čestica
$g$	uvijeti plina (okoline)
$rel$	relativno
$s$	površina čestice
$vs$	uvijeti pare na površini čestice (oblak pare)
$gs$	uvijeti plina na površini čestice (okolina)
$\infty$	uvijeti čestice u beskonačnosti

## POPIS SLIKA

Slika 1. Jedna šestina komore za izgaranje.....	8
Slika 2. Različiti načini proizvodnje kapljica kod modela Wave. ....	20
Slika 3. Dinamika isparavanja kapljice n-tetradekana ( $C_{14}H_{30}$ ), od inicijalnog promjera $70\mu m$ u zraku na normalnom tlaku i temperaturi od 573.15 K. ....	30
Slika 4. Shema unutarnje cirkulacije [16] .....	32
Slika 5. Pretpostavljeno polje brzina u tekućoj kapljici s indikacijama relativnih vrijednosti plina i brzinama tekućine [16].....	32
Slika 6. Konvektivni način temperaturne raspodjele [16].....	32
Slika 7. Konduktivni način temperaturne raspodjele [16].....	32
Slika 8. Prijelazni način temperaturne raspodjele [16].....	32
Slika 9. Mreža od 1250 elemenata.....	35
Slika 10. Mreža od 15 stupnjeva s 1800 elemenata.....	35
Slika 11. Usporedba mreža od 15 stupnjeva (1250 i 1800 elemenata).....	36
Slika 12. Mreža od 90 stupnjeva (50 460 elemenata) .....	36
Slika 13. Usporedba mreža od 15 i 90 stupnjeva (1800 i 50 460 elemenata) .....	37
Slika 14. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za prvu mjernu točku.....	44
Slika 15. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za drugu mjernu točku.....	44
Slika 16. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za treću mjernu točku. ....	45
Slika 17. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za četvrtu mjernu točku... ..	45
Slika 18. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za petu mjernu točku .....	46
Slika 19. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za šestu mjernu točku .....	46
Slika 20. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za sedmu mjernu točku.....	47
Slika 21. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za osmu mjernu točku .....	47
Slika 22. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za devetu mjernu točku ..	48
Slika 23. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za prvu mjernu točku .....	49
Slika 24. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za drugu mjernu točku .....	49
Slika 25. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za treću mjernu točku .....	50
Slika 26. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za četvrtu mjernu točku .....	50
Slika 27. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za petu mjernu točku.....	51
Slika 28. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za šestu mjernu točku .....	51
Slika 29. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za sedmu mjernu točku .....	52

Slika 30. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za osmu mjernu točku.....	52
Slika 31. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za devetu mjernu točku.....	53
Slika 32. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za prvu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	54
Slika 33. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za drugu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	54
Slika 34. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za treću mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	55
Slika 35. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za četvrtu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	55
Slika 36. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za petu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	56
Slika 37. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za šestu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	56
Slika 38. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za sedmu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	57
Slika 39. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za osmu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	57
Slika 40. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za devetu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata).....	58
Slika 41. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) uz varijaciju parametra C2 za prvu mjernu točku .....	59
Slika 42. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za drugu mjernu točku .....	59
Slika 43. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za treću mjernu točku (C2=57) .....	60
Slika 44. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za četvrtu mjernu točku .....	60
Slika 45. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za petu mjernu točku .....	61
Slika 46. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za šestu mjernu točku .....	61
Slika 47. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za	

sedmu mjernu točku .....	62
Slika 48. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za osmu mjernu točku .....	62
Slika 49. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama ( <i>Wave</i> model) za devetu mjernu točku .....	63
Slika 50. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za prvu mjernu točku .....	64
Slika 51. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za drugu mjernu točku .....	64
Slika 52. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za treću mjernu točku .....	65
Slika 53. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za četvrtu mjernu točku .....	65
Slika 54. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za petu mjernu točku .....	66
Slika 55. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za šestu mjernu točku .....	66
Slika 56. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za sedmu mjernu točku .....	67
Slika 57. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za osmu mjernu točku .....	67
Slika 58. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za devetu mjernu točku .....	68

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci dobiveni eksperimentalnim putem (UPV) .....	38
Tablica 2. Parametri za model isparavanja (Abramzon i Dukowicz) [4] .....	39
Tablica 3. Konstante <i>Wave</i> modela razdvajanja kapljica [4] .....	40
Tablica 4. Preporučene vrijednosti za <i>Wave</i> model razdvajanja kapljica [4].....	41
Tablica 5. Konstante TAB modela razdvajanja kapljica [4] .....	42
Tablica 6. Preporučene vrijednosti za TAB model razdvajanja kapljica [4] .....	43

## 1. UVOD

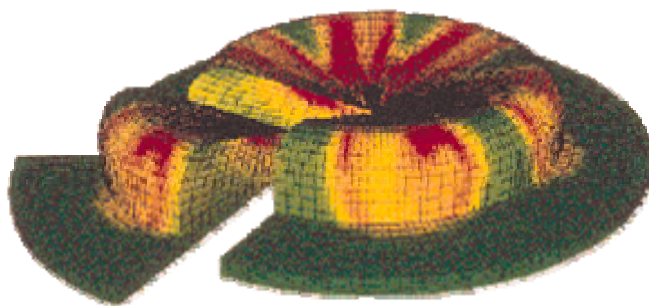
Uvodeći iznimno stroge odredbe o smanjenju emisije ispušnih plinova (kao što je EURO 5 norma), svjetske vlade stavljaju iznimno težak zadatak pred inženjere u potrazi za učinkovitim rješenjem koji neće povećati potrošnju goriva zbog te redukcije. Poznato je da su najveći problemi kod Diesel motora neizgorene čestice ugljika (čadja), te otrovnih plinova kao što su  $\text{NO}_x$ , CO i HC [1]. Zbog viška zraka u ispušnim plinovima je koncentracija CO i HC općenito niska, ali su količine  $\text{NO}_x$  i čestica čađe visoke. Čadja nam se pojavljuje pri niskim temperaturama kad nema kisika da se veže s molekulama ugljika, ili bolje rečeno molekule ugljika ne mogu doći do molekula kisika.

CO i HC se smanjuju oksidacijskim katalizatorom, dok se  $\text{NO}_x$  smanjuje u prilično ograničenoj mjeri vraćanjem dijela ispušnih plinova (do 60%) natrag u proces u cilindaru pomoću AGR ventila (za zagrijavanje ovih plinova troši se toplina izgaranja, pa to smanjuje temperaturu plinova u cilindru i time emisiju  $\text{NO}_x$ ).

Nažalost nam povratak plinova negativno utječe na toplinsku iskoristivost motora.  $\text{NO}_x$  nastaje pri visokim temperaturama (gdje se reakcija formacije zbiva endotermno) uz višak kisika, te je situacija karakteristična za djelomično opterećenje.

Veće sniženje koncentracije  $\text{NO}_x$  moguće je tek upotrebom sredstva kao što su amonijak ( $\text{NH}_3$ ) ili UREA ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) [2]. To rješenje je još od prije poznato jer se upotrebljavalo kod enegetskih postrojenja (ubrizgavala se miješavina urea-e i vode). Najjednostavnije je proces opisati kao reakciju  $\text{NO}_x$  i spojeva s amonijakom, pri čemu nastaju voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ) i dušik ( $\text{N}_2$ ). Željeni kemijski procesi se događaju na visokim temperaturama (900 do 1200 °C). Reaktant u plinovitom ili tekućem stanju se ubrizgava i miješa s plinovima u tom temperaturnom rasponu. Ovaj je proces selektivan jer reagens reagira prvenstveno s  $\text{NO}_x$ -om, a ne s kisikom ili nekom drugom važnom komponentom plina. U prošlosti su eksperimenti davali neželjene rezultate. Emisije dušičnog oksida povećavale bi se ukoliko bi se smanjila emisija čađe. Danas se koristi trodimenzionalna animirana računalna analiza. Nju su koristili znanstvenici na

Sveučilištu u Wisconsin-u, te su višestrukim ubrizgavanjem pod visokim tlakom uspjeli smanjiti i emisiju dušičnog oksida i čađe istovremeno. S obzirom na ograničenja koja nam daju kalkulacije s računalom (vrijeme potrebno za izračun se mjeri u satima, pa čak i danima), u analizama koristimo isječke od pune geometrije.



Slika 1. Jedna šestina komore za izgaranje

Da bi sačuvali vrijeme i pohranu, istraživači na Sveučilištu u Wisconsinu su koristili jednu šestinu komore za izgaranje, te su ju koristili kao domenu za računanje.

Proces izgaranja kod Diesel motora je kompleksan i teško ga je prikazati zbog različitih čimbenika koji utječu na njega: od turbulencije, karakteristika spreja, te mješanja zraka i goriva. Istraživači u Los Alamos-u su pokušavali razviti model spreja s izgaranjem na temelju hidrodinamičkih kodova zvanih KIVA. Model je obuhvaćao puno podmodela kojim su je simulirali fizikalni i kemijski procesi koji se pojavljuju u diesel-spreja izgaranju. Unutar njih turbulencija plina, prijenos topline preko zida, atomizacija spreja i isparavanje, samozapaljenje goriva i kontrolirano miješanje pri visokim temperaturama uz izgaranje.

Modeli koji su još korišteni bili su za dušični oksid, pojavljivanje čađe, te oksidacija. Kombinacija niske temperature i puno goriva je idealno mjesto za nastajanje čađe. To se događa kad se samo jednom ubrizga gorivo, dok se kod ubrizgavanja u više faza smanjuju istodobno i čađu i dušični oksid. Razlog je vrlo jednostavan: područja koja se trebaju napuniti gorivom u višestrukom ubrizgavanju su puno manja kad se ubrizgavanje zaustavi, pa nastavi itd. Gorivo se brzo troši za izgaranje, prije negoli se akumulira novo područje za nastanak čađe. Prvi oblak čađe nastavlja se oksidirati, a ne

povećava se samo novim gorivom. Razdvojeno ubrizgavanje ne ostavlja vrijeme za nastanak značajnije količine čađe zbog brzog izgaranja.

Računalno modeliranje pomaže kao dodatak eksperimentalnim istraživanju i radu na modelu (prototipu) tako da nam daje jednostavne smjernice i odluke u razvoju, te da nam skрати sveukupno vrijeme razvoja. Kod koji se ovdje koristi, FIRE, je do sada uglavnom korišten za aplikacije unutar cilindra, gdje se izgaranje uglavnom odvija na visokim temperaturama i tlakovima. Zbog toga je vrijeme postojanja kapljice u tekućem stanju vrlo kratko. Standardni modeli predviđaju vrlo dug proces isparavanja. To se događa zbog izrazito pojednostavljenih pretpostavka, a ako su one i razumne, one mogu dati nefizikalne rezultate u aplikacijama kao što je ubrizgavanje sredstva kao što je UREA karakteriziranim dužim vremenom postojanja. U postojećim modelima zanemaruje se efekt deformacije, unutarnje cirkulacije, nejedinstvena razdioba temperature unutar kapljice i nestacionarno zagrijavanje kapljice. Svi ovi efekti su otprije opisani i primijenjeni u drugom modelu isparavanja od strane prof.dr. Frolov-a s Instituta Semenov za kemijsku fiziku u Moskvi.

Korekcijske funkcije uvode se preko potprograma (*subroutine*), koje se uvodi preko sučelja kojim se upravlja za dobijanje rješenja (*Solver Steering interface*).



## 2. MATEMATIČKI MODEL SPREJA

### 2.1. Uvod

Sprej simulacije uključuju fenomen višefaznog strujanja i kao takav traže numeričko rješenje od jednadžbi očuvanja i za plinsku i tekuću fazu istovremeno. Poštivajući tekuću fazu, gotovo sve kalkulacije za sprej u inženjerskom okruženju se zasnivaju na statističkoj metodi koja se naziva DDM (*Discrete Droplet Method*) [3]. Ona funkcionira na način da rješava obične diferencijalne jednadžbe za trajektoriju, moment i transfer mase pojedine kapljice, gdje je svaka dio grupe od identičnih neovisnih kapljica koje nazivamo parcelom (*parcel*). Stoga jedan član grupe predstavlja ponašanje cijele parcele [4].

Parcele kapljica se uvode u domenu toka s početnim uvjetima pozicije, veličine, brzine, temperature i broja čestica u parceli. FIRE podržava uvod kapljica, koje izlaze iz sapnice kao spreja i ulaze u domenu toka kroz zone ulaza kao plinsko/tekuća mješavina. Proces atomizacije spreja je dodijeljen za karakteristične podmodele. Moment izmjene za kapljicu/plin, turbulentno raspršenje, isparavanje kapljice, sekundarni raspad, sudaranje kapljica i interakcija između kapljice/zida je obuhvaćen iscrpnim setom modela koji omogućavaju korištenje modula za puno režima toka. Para od isparenih kapljica se koristi kao termin izvora za dodatnu jednadžbu transporta za frakciju vođenja pare u Eulerovim formulacijama. Čvrste (*solid*) čestice se mogu izračunati s DDM pristupom s gašenjem određenih modela, kao što je model isparavanja.

Kapljice se prate u Lagrange-vim načinom kroz računalnu mrežu koja se koristi za rješavanje plinske faze parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Potpuna dvosmjerna sprega (*coupling*) između plinske i tekuće faze se uzima u obzir. U slučajevima zanemarivog utjecaja raspršene (disperzirane) faze na onu kontinuiranu, tok plinske faze može se simulirati unaprijed i simulacija kapljice se može izvršiti poslije.

## 2.2. Osnovne jednadžbe kod modela spreja

Diferencijalne jednadžbe za trajektoriju i brzinu parcele čestice su:

- jednadžba momenta
- jednadžbe modela isparavanja

Iz jednadžbe momenta dolazimo do položaja kapljice, dok iz modela isparavanja dobijemo prosječnu temperaturu između lokalne domene temperature fluida i temperature površine kapljice.

### 2.2.1. Jednadžba momenta

Jednadžba momenta nam govori da je promjena količine gibanja jednako sumi svih sila koje djeluju na kapljicu.

$$m_d \frac{du_{id}}{dt} = F_{idr} + F_{ig} + F_{ip} + F_{ib} \quad (1)$$

Gdje je  $F_{idr}$  je sila otpora (drag):

$$F_{idr} = D_p \cdot u_{irel} \quad (2)$$

$D_p$  je funkcija otpora definirana:

$$D_p = \frac{1}{2} \rho_g A_d C_D |u_{rel}| \quad (3)$$

$C_D$  je koeficijent otpora koji je obično funkcija Reynolds-ovog broja kapljice i  $A_d$  je površina presjeka čestice. Iz različitih formulacija iz literature za koeficijent otpora pojedine sfere, FIRE koristi slijedeće formulacije od strane Schiller-a and Naumann-a [5].

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_d} (1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) & \text{Re}_d < 10^3 \\ 0.44 & \text{Re}_d \geq 10^3 \end{cases} \quad (4)$$

Reynolds-ov broj za česticu je prikazan u slijedećoj jednadžbi gdje  $\mu_g$  je viskoznost domene fluida.

$$\text{Re}_d = \frac{\rho_g |u_{rel}| D_d}{\mu_g} \quad (5)$$

Ostale formulacije za koeficijente otpora su implementirane i mogu biti aktivirane preko odgovarajućih funkcija, ali pričuva je napravljena za ubacivanje od strane korisnika.  $F_{ig}$  je sila koja uključuje efekte gravitacije i uzgona

$$F_{ig} = V_p \cdot (\rho_p - \rho_g) g_i \quad (6)$$

$F_{ip}$  je sila tlaka dana kao:

$$F_{ip} = V_p \cdot \nabla p \quad (7)$$

$F_{ib}$  sumira sve ostale vanjske sile kao što su tzv. virtualne sile mase, magnetske sile ili elektrostatičke sile ili slično. Pričuva je napravljena za ubacivanje od strane korisnika. Sile koje su standardno uzete u obzir su sila otpora  $F_{idr}$  i gravitacijska sila  $F_{ig}$ , ova druga samo ako je također aktivirana gravitacijska sila za domenu toka.

Uspoređujući veličinu svih sila, sila otpora je jedina relevantna sila za ubrizgavanje goriva u obliku spray-a i računanja izgaranja.

Stoga, ubacivanjem gornjih sila i relacija u jednadžbu (1) i dijeleći je s masom čestice  $m_d$ , jednadžba za ubrzanje čestice se koristi standardno kao:

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_d} |u_{ig} - u_{id}| (u_{ig} - u_{id}) + \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}\right) g_i \quad (8)$$

Koja se može integrirati da bi se dobila brzina čestice, a iz toga trenutni vektor pozicije čestice se može dobiti nakon integracije:

$$\frac{dx_{id}}{dt} = u_{id} \quad (9)$$

### 2.2.2. Isparavanje kapljice

Postoje tri dostupna modela za zagrijavanje i isparavanje kapljice. Koeficijenti za prijenos topline i mase su podešeni prema zakonima fizike, ali zbog finog podešavanja s eksperimentalnim podacima, dva parametra za podešavanje za prijenos topline i mase su omogućena za svaki model (E1 i E2).

#### 2.2.2.1. Analogija za prijenos topline i mase

Procesi prijenosa topline i mase su opisani originalno od strane Dukowicz-a.

U osnovi sadrži ove pretpostavke:

- sfernu simetriju
- kvazi-stacionarni film plina oko kapljice
- ravnomjernu temperaturu kapljice duž promjera kapljice
- ravnomjerna fizikalna svojstva fluida koji je okružuje
- toplinska ravnoteža kapljevine/pare na površini kapljice

S pretpostavkom ravnomjerne temperature kapljice, promjena temperature kapljice je određen preko jednadžbe ravnoteže energije, koja govori da provedena energija do kapljice ili zagrije kapljicu ili dobavlja toplinu za njezino isparavanje.

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = L \frac{dm_d}{dt} + \dot{Q} \quad (10)$$

Konvektivni tok topline  $\dot{Q}$  dobiven od plina prema površini kapljice je

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_s \cdot (T_\infty - T_s) \quad (11)$$

Gdje je  $\alpha$  koeficijent konvektivnog prijelaza topline kroz film koji okružuje kapljicu u odsustvu prijenos mase, dok je  $A_s$  površina kapljice.

Model isparavanja po Dukowicz-u [6] uzima u obzir da kapljica isparava u nekondezirajućem plinu.

Dakle, uzima se dvokomponentni sustav u parnoj fazi, sastavljen od pare i nekondezirajućeg plina, iako svaka komponenta može sadržavati mješavinu različitih vrsta.

Uvodeći lokalni prijelaz topline ( $\dot{q}_s$ ) i tok mase pare ( $\dot{f}_{vs}$ ) s pretpostavkom identičnosti uvjeta površine kapljice, glavna jednadžba za tok mase se piše kao:

$$\frac{dm_d}{dt} = \dot{Q} \cdot \frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s} \quad (12)$$

Te se jednadžba energije kapljice može izraziti kao:

$$m_d \cdot c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \dot{Q} \cdot \left(1 + L \frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s}\right) \quad (13)$$

Ovo su jednadžbe koje definiraju jednadžbu promjene mase (12), i stoga nestacionaran promjer kapljice i jednadžbe temperature kapljice (13), doprinose toplinskom

površinskom toku  $\dot{Q}$  i omjer  $\frac{\dot{f}_{vs}}{\dot{q}_s}$  je tada poznat. Omjer toka mase pare prema površini

se može tada ponovno izraziti kao:

$$\frac{\dot{f}_{v,s}}{q_s} = \frac{\rho\beta}{k} \left( \frac{1}{1-\mu_{v,s}} \right) \frac{\nabla_s \mu_v}{\nabla_s T} \quad (14)$$

Omjere u jednadžbi (14) određen s uzimanjem u obzir analogije koja se bazira na sličnosti prijenosa diferencijalnih jednadžbi topline, mase i graničnih uvjeta.

To rezultira:

$$\frac{\nabla_s \mu_v}{\nabla_s T} = \frac{Le}{c_p} \left[ \frac{h_{sv} - h_s}{\mu_{v,sv} - \mu_{v,s}} - h_{v,s} + h_{g,s} \right] \quad (15)$$

S pretpostavkom da je Lewis-ov broj jednak jedinici ( $Le=1$ ), omjer toka u svojoj posljednjem obliku izgleda:

$$\frac{\dot{f}_{v,s}}{q_s} = \frac{-B_y}{h_\infty - h_s - (h_{vs} - h_{gs})(\mu_{v,\infty} - \mu_{vs})} \quad (16)$$

gdje je

$$B_y = \frac{\mu_{v,\infty} - \mu_{vs}}{1 - \mu_{vs}} \quad (17)$$

broj prijenosa mase. Konvektivnom prijenosu topline u jednadžbi (11) radimo supstituciju s Nusselt-ovim brojem, pa je konvektivni tok topline  $\dot{Q}$  dobiven od plina na površinu kapljice:

$$\dot{Q} = D_d \cdot \pi \cdot \lambda \cdot Nu(T_\infty - T_s) \quad (18)$$

Za sferne kapljice toplinski tok  $\dot{Q}$  dobiven je iz odnosa koeficijenata prijenosa topline.

Nusselt-ov broj je dobiven iz slijedećih odnosa predloženih od Ranz-a i Marshall-a [7] za pojedine kapljice, i potvrđen za korištenje u određenim tipovima spreja od strane Bose-a i Pei-a [8].

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (19)$$

Ovdje su Reynolds-ovi (Re) i Prandtl-ovi (Pr) brojevi uzeti iz klasičnih izraza. Referentna temperatura za procjenu svojstava transporta kao viskoznost pare, specifična toplina, toplinska provodnost itd., je prosječna temperatura između lokalne domene temperature fluida i temperature površine kapljice:

$$\bar{T} = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (20)$$

#### 2.2.2.2. Abramzon i Sirignano model isparavanja kapljica

Ovaj pristup [9] odnosi se na teoriju klasičnog filma, gdje se otpori prijenosu topline i mase modeliraju na principu zamišljenog sloja filma konstantne debljine  $\delta_T$  i  $\delta_M$ .

U slučaju kapljice koja isparava, ovi vrijednosti debljine sloja moraju biti ispravljene faktorima  $F_T$  i  $F_M$ . Iznos promjene mase se može opisati Sherwood-ovim i Nusselt-ovim brojem

$$\dot{m} = 2\pi \bar{\rho}_g \bar{\beta}_g r_d Sh^* \ln(1 + B_Y) \quad (21)$$

$$\dot{m} = 2\pi \frac{\bar{k}_g}{c_{pF}} r_d Nu^* \ln(1 + B_T) \quad (22)$$

Gdje su vrijednosti s crticom iznad njih procijenjene na referentnoj temperaturi i referentnim koncentracijama goriva.

$$\bar{T} = T_S + A_r(T_\infty - T_S) \quad \bar{Y}_S = Y_{V,S} + A_r(Y_{V,\infty} - Y_{V,S})$$

$B_T$  je broj prijenosa topline, a parametri  $Nu^*$  i  $Sh^*$  se računaju s brojevima  $Nu_0$  i  $Sh_0$  neisparavajuće kapljice i odgovarajućim korekcijskim faktorima za debljinu filma  $F_T$  i  $F_M$ .

$$Nu^* = 2 + \frac{(Nu_0 - 2)}{F_T}; \quad Nu_0 = 2 + 0.552 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (23)$$

$$Sh^* = 2 + \frac{(Sh_0 - 2)}{F_M}; \quad Sh_0 = 2 + 0.552 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (24)$$

Točna funkcija je ista za  $F_T$  i  $F_M$

$$F(B) = (1 + B)^{0.7} \frac{\ln(1 + B)}{B} \quad (25)$$

Konačni algoritam za kalkulaciju prijelaza mase i energije je:

- procijeniti  $Y_{VS}$  na površini kapljice
- naći prosječne vrijednosti fizikalnih svojstava  $\bar{\rho}, \bar{c}_{pF}, \bar{c}_{pG}, \bar{k}_g, \bar{\mu}_g, \bar{\beta}_g$
- izračunati  $Nu_0$  i  $Sh_0$
- dobiti  $B_Y, F_M, Sh^*$  i promjenu izmjene mase iz jednadžbe (21)
- pogoditi vrijednost  $B_T$  tako da koristimo vrijednost iz prijašnjeg koraka
- izračunati izmijenjeni Nusselt-ov broj  $Nu^*$  i promijeniti vrijednost broja prijenosa topline  $B_T$  tako da usporedimo dvije promjene toka mase iz jednadžbe (21) i (22)

$$B_T = (1 + B_Y)^\phi - 1 \quad (26)$$

Gdje je  $\phi$



$$\phi = \frac{\overline{c_{pF}}}{\overline{c_{pg}}} \frac{Sh^*}{Nu^*} \frac{1}{Le} \quad (27)$$

Ako je korekcija za  $B_T$  prevelika, vraćamo se na korak broj 5. Izračunamo izmjenu topline  $s$

$$Q_s = m \left( \frac{\overline{c_{pF}} (T_\infty - T_S)}{B_T} - L(T_S) \right) \quad (28)$$

Prednost ovoga modela je da nema ograničenja od strane Lewis-ovog broja, dok je nedostatak iteracijski proces.

### 2.3. Podmodeli za stvaranje novih kapljica

Današnje 3D simulacije za gibanje modela spreja rješavaju jednadžbe za masu, moment i promjene uslijed međudjelovanja između kapljica i plina, ali također uzimaju u obzir fenomene sudara i srašćivanja. Modeli spreja koji se najviše koriste za razdvajanje kapljica baziraju se na analizi i nestabilnosti stupca ubrizgane tekućine iz otvora sapnice (kod Wave modela), ili po analogiji prigušenog sistema masa-opruga i stupca tekućine (za TAB model). Oba modela traže definiranje određenih empirijskih konstanti. Uzimajući u obzir da mehanizam koji kontrolira atomizaciju još uvijek nije u potpunosti shvaćen, sljedeće usporedbe kalkulacija i eksperimentalnih podata duž različitih radnih uvjeta ubrizgavanja mogle bi pomoći kod shvaćanja utjecaja konstanti modela razdvajanja i njihovo predviđanje. Primjećeno je da se osjetljivost oba modela razdvajanja uglavnom primjeti kod konstante vremena razdvajanja, dok je utjecaj drugih konstanti minimalan. Unatoč što je fizika kod oba modela drugačija, najbolja podešavanja konstanti upada u iste granice.

### 2.3.1. Modeli razdvajanja (raspršivanja) kapljica

Preporučeno je da početni promjer kapljice treba uvijek biti u rangu promjera otvora sapnice (*blob injection*). Za sapnice s oštrim uvodnicima promjer kapljice treba biti smanjen s obzirom na kavitaciju.

Dva se modela razdvajanja kapljica koriste u ovim kalkulacijama:

- *Wave*
- TAB

#### 2.3.1.1. Standardni *Wave* model razdvajanja kapljica

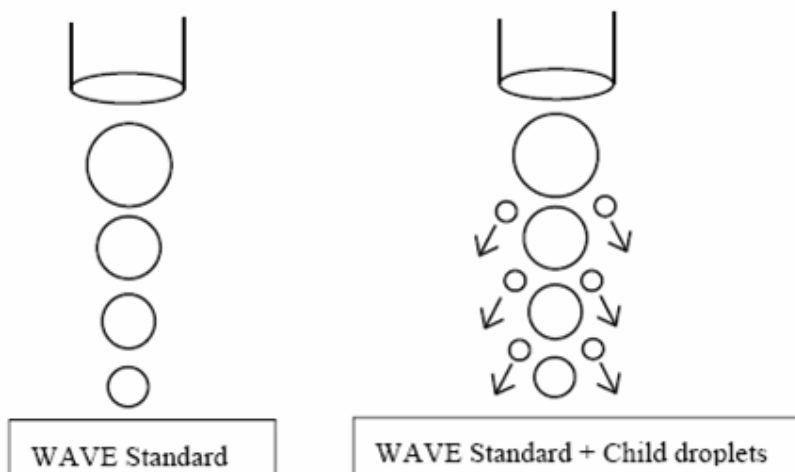
Rast početnog narušavanja reda na površini tekućine je povezan s njenom valnom duljinom i drugim fizikalnim i dinamičkim parametrima od ubrizganog goriva i domene fluida [10]. Postoje dva režima razdvajanja. Jedan za velike brzine i jedan za male brzine razdvajanja Rayleigh-ovog tipa. Za prvi slučaj veličina nastalih kapljica je postavljena jednaka valnoj duljini najbrže rastućoj ili najvjerojatnijoj nestabilnoj površini vala. Rayleigh-ov tip razdvajanja proizvodi kapljice koje su veće od originalnih roditeljskih kapljica (parent drops). Ovaj režim nije važan za sisteme ubrizgavanja visokog tlaka.

Konstanta  $C_2$  popravlja karakteristično vrijeme razdvajanja i varira od jedne brizgaljke do druge, gdje bi vrijednost od konstante  $C_1$  trebala ostati na vrijednosti od 0.61.

#### 2.3.1.2. *Wave* model razdvajanja sa stvaranjem manjih kapljicama (*child*)

Ako se koristi standardni *WAVE* model s *blob* ubrizgavanjem (početne kapljice imaju promjer otvora sapnice) za simulaciju, često se događa da nema skoro ništa pare oko blizine sapnice. To je zbog toga što su kapljice još uvijek velike na početku i zbog toga teško isparavaju. Jedan od načina proizvodnje pare blizu sapnice je da se ubrizga spektar u dva načina s oko 90% mase u obliku *bloba*, a 10% kao vrlo male kapljice koje bi trebale doći od procesa razdvajanja. Opcija *Wave child* manje ili više to čini

automatski. Ako određeni korisnik definira količinu mase koja mora biti odvojena od roditeljske kapljice (*parent drop*), stvara se nova kapljica tipa *child* sa stabilnim promjerom.



Slika 2. Različiti načini proizvodnje kapljica kod modela *Wave*.

Lijevo standardni model, a desno s dodatnim kapljicama (djeca)

### 2.3.1.3. TAB model razdvajanja kapljica

Razdvajanje se modelira po analogiji između oscilirajuće kapljice i sistema mase pomoću opruge [11]. Vanjska sila je pretpostavljena prema analognoj aerodinamičnoj sili, sila opruge koja je analogna površinskoj napetosti, a prigušene sile su analogne viskoznosti tekućine.

$$\ddot{y} = \frac{C_F}{C_b} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y} \quad (29)$$

$y$  je bezdimenzijsko pomicanje ekvatora kapljice od njezinog ravnotežnog položaja,  $\rho_g$  i  $\rho_l$  su gustoća plina i tekućine,  $u$  je relativna brzina između plina i kapljice,  $r$  je polumjer kapljice,  $\sigma$  naprezanje na površini plin-tekućina,  $\mu_l$  viskoznost tekućine,

$C_F, C_k, C_d$  i  $C_b$  su bezdimenzijske konstante određene (utvrđene) matematičkom analizom i eksperimentima.

Roditeljska kapljica oscilira u smjeru normale prema smjeru ubrizgavanja, ukoliko je  $y > 1$  roditeljska kapljica se razdvaja i nastaju manje kapljice. Njihova brzina u smjeru normale je jednaka normalnoj oscilirajućoj brzini od roditeljske kapljice u trenutku razdvajanja. Način na koji se kut spreja računa je po svojem modelu i nije potrebno da ga se definira od strane korisnika. Produkt srednji Sauter polumjer se dobiva iz jednadžbe očuvanja energije.

$$\frac{r}{r_{32}} = 1 + \frac{8 \cdot K}{20} + \frac{\rho_1 r^3}{\sigma} y^2 \left( \frac{6 \cdot K - 5}{120} \right) \quad (30)$$

Koristeći taj novi polumjer, chi-square distribucija se formira i na kraju se dobiva stvarna *child* (dijete) kapljica iz ove funkcije. Konstanta  $K$  za omjer odnosa roditelja prema djetetu se da podesiti. Veća vrijednost znači manje kapljice poslije razdvajanja. Osim toga moguće je izabrati između dva stupnja slobode *chi-square* funkcija za zahvaćanje uzoraka od veličina dječjih kapljica [12].

### 2.3.2. Vrtložno raspršivanje kapljica

Popis naziva:

$k$	turbulentna kinetička energija
$\varepsilon$	mjera rasipanja
$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}k}$	standardno odstupanje po Gauss-u
$l_e = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$	mjerilo turbulentne dužine ( <i>Eddie</i> veličina)
$t_{tr} = \frac{l_e}{u_{rel}}$	vrijeme prijelaza kapljice
$t_{turb} = \min(t_e, t_{tr})$	vrijeme turbulentne interakcije

$t_e = C_\tau \frac{k}{\varepsilon}$	vrijeme po Eddie-u
$t_{per}$	trajanje turbulencije
$u_{rel} =  u_g + u' - u_d $	relativna brzina
$C_\mu = 0.09$	konstanta modela turbulencije
$C_\tau$	konstanta zbog Lagrangian-ove mjere vremena
$D_p$	funkcija otpora (odnosi se na jednadžbu (3))

Kako čestice prolaze kroz tok pretpostavlja se da su one u međusobnoj interakciji s pojedinačnim turbulentnim *eddie*-ima. Svaka interakcija skreće česticu kao da je dirigrirana trenutnom brzinom turbulentnog eddie-a i inercijom čestice. Ovi dodatni turbulentni efekti na čestice spreja ne mogu biti riješeni poljem toka u detalju, pa se koristi turbulentni model raspršenja. Trajektorija čestice je okončana slično normalnom hodu računanja sve dok čestica ne izađe iz područja koje se razmatra. Trenutna brzina plina unutar turbulentnog eddie-a se očuva iz brzine fluida glavne domene  $u_{ig}$  i turbulentne kinetičke energije. Oboje su znani iz rješenja jednadžbi plinske faze. Vrijeme interakcije čestice s individualnim *eddie*-ima je procijenjena iz dva kriterija, vremena turbulentnog *eddie*-a i vremena potrebnog da čestica prođe *eddie*-a.

Dva su modela raspršivanja implementirana u FIRE i mogu se aktivirati kao

- Enable
- O'Rourke

### 2.3.2.1. Enable model raspršivanja kapljica

U slučajnoj metodi raspršivanja uporabljenog od strane Gosman-a i Ioannidis-a [12], efekti turbulencije na čestice spreja se modeliraju dodavanjem mijenjajuće brzine  $u_i'$  srednjoj brzini plina  $u_{ig}$ .

S pretpostavkom izotropne turbulencije, komponente od mijenjajuće brzine  $u_i'$  se

određuju slučajno od Gauss-ove distribucije sa standardnom devijacijom  $\sigma = \sqrt{2k/3}$  gdje je  $k$  turbulentna kinetička energija od plina na lokaciji čestice.

$$u_i' = \left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2} \cdot \text{sign}(2R_{ni} - 1) \cdot \text{erf}^{-1}(2R_{ni} - 1) \quad (29)$$

$R_{ni}$  je slučajan broj u rangu od  $0 \leq R_{ni} \leq 1$  za svaku komponentu vektora, a  $\text{erf}^{-1}$  je obrnuta funkcija Gauss-a.

Kolebanje brzine  $u_i'$  je odabrano kao po dijelovima konstantna funkcija vremena, i dopunjena je kad prođe turbulentno vrijeme korelacije  $t_{turb}$ . Turbulentno vrijeme korelacije  $t_{turb}$  je minimum vremena potrebnog za razdvajanje po *eddie-u* i vrijeme da čestica bude poprečna na *eddie-a*, a dana je izrazom

$$t_{turb} = \min\left(C_\tau \frac{k}{\varepsilon}, C_1 \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \frac{1}{\varepsilon |u_g' + u_d' - u_d|}\right) \quad (30)$$

Gdje su  $C_\tau = 1$  i  $C_1 = 0.16432$  konstante modela.

U slučaju kada je vrijeme koraka računanja  $\delta t$  veće od vremena turbulentne korelacije  $t_{turb}$ , vrijeme koraka integracije spreja se smanji na vrijeme  $t_{turb}$ .

### 2.3.2.2. O'Rourke model raspršivanja kapljica

Kada je vremenski korak računanja veći od vremena turbulentne korelacije  $\delta t > t_{turb}$ , čestica prolazi više od jednog turbulentnog *eddie-a* i dakle vidi više od jedne turbulentne brzine  $u_i'$ . Fluktuacijska brzina  $u_i'$  više nije konstantna tijekom cijelog vremenskog integracijskog ciklusa.

Metoda koja se koristi u ovim slučajevima bazira se na radu O'Rourke [13]. Umjesto da

se smanji vrijeme koraka integracije, ovaj pristup postavlja promjenjive komponente na vrijednost nula, ali računa novu poziciju čestice i novu brzinu čestice. Za svaku komponentu distribucija brzine i pozicije su preko Gauss-a i distribucije imaju odstupanje:

$$\begin{aligned}\sigma_{u_i'}^2 &= \sigma^2 \cdot \frac{1 - e^{-D_p t_{turb}}}{1 + e^{-D_p t_{turb}}} \cdot \left[ 1 - e^{-2D_p \delta x} \right] \\ \sigma_{x_i'}^2 &= \frac{\sigma_{u_i'}^2}{D_p^2} + \sigma^2 \cdot \left[ t_{turb} \cdot \Delta t - \frac{2t_{turb}}{D_p} \cdot \left( 1 - e^{-D_p \delta x} \right) \right]\end{aligned}\quad (31)$$

Dopuna brzine čestice i njezina pozicija:

$$u_{pi}^{n+1} = u_{pi}^n + \delta u_i' \quad (32)$$

$$x_{pi}^{n+1} = x_{pi}^{n+1} + \delta x_{bi}' + \delta u_i' \cdot t_{per} \quad (33)$$

Zbog ovisnosti između brzine i promjene pozicije, definira vrijeme turbulentne postojanosti  $t_{per}$ , te se računa kao:

$$t_{per} = \frac{\sigma^2}{\sigma_{u_i'}^2} \cdot t_{turb} \left( 1 - e^{-D_p \delta x} \right) - \frac{1}{D_p} \quad (34)$$

$\delta u_i'$  i  $\delta x_{bi}'$  su turbulentna brzina i promjena pozicije. Komponente od  $\delta u_i'$  se računaju iz Gauss-ove distribucije  $\sigma_{u_i}'$  a komponente od  $\delta x_{bi}'$  iz Gauss-ove distribucije s odstupanjem:

$$\sigma_{x_{bi}'} = \sigma_{x_i'} - \sigma_{u_i'} \cdot t_{per} \quad (35)$$

ovaj model je sposoban smanjiti vrijeme računanja kada je  $t_{turb}$  vrlo malo, s obzirom da nije potrebno smanjiti korak vremena integracije kod spreja.

### 2.3.3. Srašćivanje/sudar kapljica

Popis naziva:

- $\nu$  frekvencija sudara
- $R_n$  slučajan broj
- $P$  vjerojatnost sudara
- $b$  parametar utjecaja sudara
- $b_{crit}$  kritični parametar utjecaja sudara
- $N_1, N_2$  broj čestica u parceli 1 i parceli 2
- $d_1, d_2$  dijаметar čestice
- $\bar{n}$  broj očekivanih sudara
- $u_{d1}, u_{d2}$  brzina čestice

#### 2.3.3.1. O'Rourke model srašćivanja/sudaranja kapljica

S gledišta statističke metode čestice (Dukowicz [3]) koja čini bazu trenutnog modula simulacije spreja, sudaranje čestica se obično modelira po statističkom radije negoli po determinističkom pristupu (O'Rourke [14]). Vjerojatnost sudara  $P$  koja upravlja s brojem i prirodom sudara između čestica se uzimaju statistički.

Računanje sudara se izvodi za parove čestica samo ako se nalaze u istoj računalnoj ćeliji. Pretpostavlja se da čestice povezane s pojedinom parcelom se jednoliko distribuiraju unutar promatranog volumena (računalne ćelije) u kojoj se nalaze. Za opis se čestice većeg radijusa zovu kolektori, a one s manjim radijusom se zovu kapljice.

Frekvencija sudara  $\nu$  između čestice od parcele 1 i svih čestica povezanih s drugom parcelom, unutar računalnog volumena, koristi se za računanje vjerojatnosti  $P$  da će se čestica parcele 1 sudariti s česticom druge parcele (odnosi se na parove).

Prema statističkoj metodi parcele, sve čestice unutar parcele imaju ista svojstva i ponašaju se na isti način, stoga nije potreban nastanak novih čestica; samo se manipulira s brojem čestica po parceli.



Frekvencija sudara  $\nu$  od kolektora sa svim okružujućim kapljicama se može računati prema:

$$\nu = \frac{N_2}{V_{cell}} \frac{\pi}{4} (d_1 + d_2)^2 |u_1 - u_2| \quad (36)$$

oznake 1 i 2 se odnose na svojstva kolektora i kapljica.  $N_2$  je broj čestica u parceli 2 i  $V_{cell}$  je volumen računalne ćelije u kojoj se nalaze obje parcele.

Vjerojatnost  $P$  koja se podvrgava  $n$  broju sudara s kapljicama prati Poisson-ovu distribuciju:

$$P_n = e^{-\bar{n}} \frac{\bar{n}^n}{n!} \quad (37)$$

sa srednjom vrijednosti (očekivanom broju sudara)  $\bar{n} = \nu \cdot \Delta t$ , gdje je  $\Delta t$  korak računalnog vremena. Stoga je vjerojatnost da neće biti sudara  $P_0 = e^{-\bar{n}}$ . Slučajan broj  $R_{n1}$  se uzima u rangu  $0 \leq R_{n1} \leq 1$  da se vidi da li nastupa sudar ili ne. Ukoliko je  $R_{n1} < P_0$  tada se sudari računaju za određeni par čestica u združenim parcelama. Ukoliko je  $R_{n1} > P_0$  tada će svi kolektori biti podvrgnuti jednom ili više sudara s kapljicama, gdje je svaki sudar istog tipa. U slučaju sudara drugi slučajni broj  $R_{n2}$ , koji je također u rangu  $0 \leq R_{n2} \leq 1$ , se koristi za određivanje vrste sudara.

Za ovo se definira parametar utjecaja sudara kao:

$$b = (d_1 + d_2) \sqrt{R_{n2}} \quad (38)$$

Ukoliko je  $b < b_{cr}$ , gdje je  $b_{cr}$  parametar kritičnog utjecaja ispod kojeg može doći do srašćivanja, tada je rezultat svakog sudara srašćivanje. Ukoliko je  $b > b_{cr}$ , tada je svaki sudar kao da je došlo do okrznuća, tj. čestice zadržavaju svoju veličinu i temperature, ali

dolazi do promjene brzine. Vrijednost  $b$  - a ovisi o promjeru čestice, relativnoj brzini između čestica, te koeficijentu površinske napetosti:

$$b_{cr}^2 = (d_1 - d_2)^2 \min[1.0, 2.4(f(\gamma)/We_d)] \quad (39)$$

$$f(\gamma) = \gamma^3 - 2.4\gamma^2 + 2.7\gamma, \quad \gamma = \frac{d_2}{d_1}, \quad d_2 > d_1 \quad (40)$$

$$We_d = \frac{\rho_d |u_{d1} - u_{d2}|^2}{2\sigma} d_1 \quad (41)$$

Slučajan broj  $R_{n2}$  se koristi za određivanje broja srašćivanja  $n$  za svaki kolektor.

$$\sum_{k=0}^{n-1} P_k \leq R_{n2} \leq \sum_{k=0}^n P_k \quad (42)$$

Za svaki kolektor čestica se uklanja  $n$  broj kapljica iz njihove povezane parcele, i svojstva čestica kolektora, promjer, brzina i temperature se prikladno modificiraju zbog očuvanja mase, momenta i energije. Ukoliko ne postoji dovoljan broj kapljica koja imaju  $n$  srašćivanja s kolektorom, tada se  $n$  ponovo računa tako da sve  $N_2$  kapljice srašćuju, a parcela povezana s kapljicama se uklanja iz kalkulacije.

U slučaju okrznuća kod sudara, računa se samo jedan sudar za svaku česticu. Sudari s okrznućem se računaju između  $N$  parova čestica, gdje je  $N$  minimum od  $N_1$  i  $N_2$ .  $N$  kolektori i kapljice se onda vraćaju u njihove parcele na takav način da masa, moment i energija su očuvani. Izraz koji daje brzinu za svaku česticu nakon sudara je:

$$u_{d1}^* = \frac{u_{d1}d_1^3 + u_{d2}d_2^3 + d_2^3(u_{d1} - u_{d2})R_{n3}}{d_1^3 + d_2^3} \quad (43)$$

Gdje je  $R_{n3}$  slučajan broj koji se definira kao:

$$R_{n3} = \frac{b - b_{cr}}{(d_1^3 + d_2^3) - b_{cr}} \quad (44)$$

## 2.4. Dodatna Frolova teorija za model spreja

Standardni modeli isparavanja kod ubrizgavanja goriva u obliku spreja zasnivaju se nekoliko pojednostavljenih pretpostavka, kao što su: postojanost graničnog sloja plina koji okružuje kapljicu, nema temperaturnih profila unutar kapljice, nema deformacije oblika kapljice i nema unutarnje cirkulacije unutar kapljice. Temeljeno na analitičkim rješenjima za pojedine kapljice i detaljnih numeričkih modela za pojedine kapljice napravljeni su različiti korekcijski faktori od strane prof. Sergey-a Frolov-a (Semenov Institute, Moscow) koje uzimaju u obzir gore navedene korekcije u standardne modele spreja [15] i [16]. Metoda u kojoj se koriste korekcijski faktori s ispravnim rješenjima je odlučan za dobivanje brze i čvrste implementacije u model spreja, gdje se korekcije moraju primijeniti na tisuće i tisuće skupina kapljica (*parcels*) u svakom vremenskom koraku.

### 2.4.1. Korekcija za prijelazno grijanje graničnog sloja izvan kapljice (*transient heating of the boundary layer*)

Newtonov zakon za konvektivni prijenos topline odnosi se na stacionarne uvjete grijanja. Međutim, zagrijavanje kapljice spreja u mehanizmu spreja je krajnje prijelazni proces. Iz analitičkog rješenja problema prijenosa topline od hladne kapljice na beskonačno parno okruženje, možemo izvesti distribuciju temperature u graničnom sloju izvan kapljice:

$$T = T_g + \frac{r_d}{r} (T_{ds} - T_g) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{r - r_d}{2 \sqrt{\frac{\lambda_g t}{\rho_g c_{pg}}}} \right) \right] \quad (45)$$

Gustoća toka gustoće na površini kapljice može se postići iz prostorne derivacije kao

$$q = \lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_g \frac{T_g - T_{ds}}{r_s} \left( 1 + \frac{r_d}{\sqrt{\frac{\pi \lambda_g t}{\rho_g c_{pg}}}} \right) \quad (46)$$

U usporedbi s Newton-ovim zakonom

$$q = h(T_g - T_{ds}) \text{ s } h = \frac{\lambda_g}{r_d} \quad (47)$$

Dopušta da se izvuče korekcijski faktor koji se može razumjeti kao povećani koeficijent toplinske kondukcije u plinu koji okružuje kapljicu.

$$\lambda_{eff} = \lambda_g \left( 1 + \beta r_d \sqrt{\frac{\rho_g c_{pg}}{\pi \lambda_g t}} \right) \quad (48)$$

Ova korekcija uzrokuje povećano zagrijavanje kapljice, osobito u početku procesa prijelaza topline. Singularitet kod  $t=0$  ne ulazi direktno u energetska jednadžbu, ali se transformira u dodatni pojam zagrijavanja koji je proporcionalan za  $t^{0.5}$  za vrijeme integracije.

#### 2.4.2. Korekcija za promjenjivo zagrijavanje kapljice

Postoji analitičko rješenje za temperaturnu distribuciju unutar kapljice.

Iz ovoga izraz za temperature u centru kapljice može dobiti iz serija razvoja s vremenom

$$T_{dc} = T_{ds} + 2(T_{ds} - T_{d0}) \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \exp\left(-\pi m \frac{at}{r_d^2}\right) \quad (49)$$

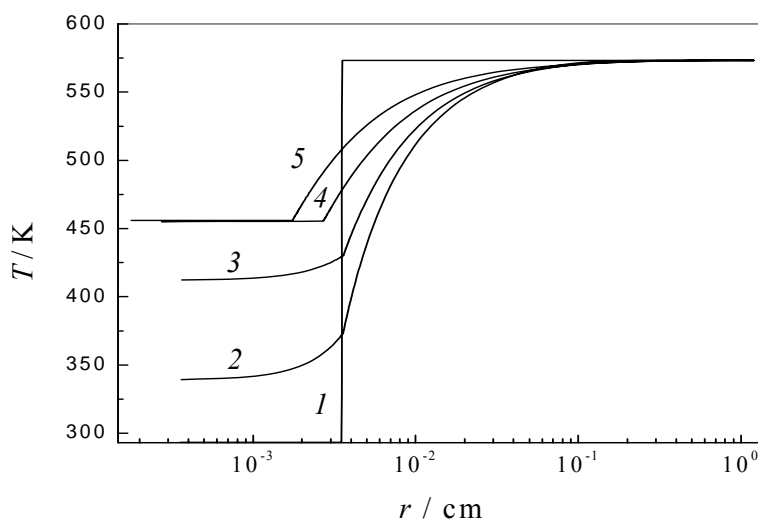
Dalje se može naći aproksimacijska formula između temperature u centru kapljice, temperature površine kapljice i prosječne temperature kapljice iz poklapanja numeričkog rješenja

$$T_d \approx T_{dc} + \frac{3}{4}(T_{ds} - T_{dc}) \quad (50)$$

Ovo dozvoljava razvoj izraza za temperature površine kapljice zasnovano na promjeni temperature u centru i prosječnoj temperaturi kapljice

$$T_{ds} \approx \frac{4}{3}T_d - \frac{1}{3}T_{dc} \quad (51)$$

Korekcija za temperature površine se koristi za procjenu termodinamičkih svojstava površine, kao i temperaturne razlike koja usmjerava prijelaz topline u kapljicu. Fenomen koji je pokriven korekcijskim funkcijama raspravljenim gore prikazan je na slici 3.



Slika 3. Dinamika isparavanja kapljice n-tetradekana ( $C_{14}H_{30}$ ), od inicijalnog promjera  $70\mu\text{m}$  u zraku na normalnom tlaku i temperaturi od  $573.15\text{ K}$ .

Pretpostavljena distribucija temperature:

1 —  $t = 0\text{ ms}$ ; 2 —  $5\text{ms}$ , 3 —  $14\text{ms}$ , 4 —  $39.2\text{ms}$

5 —  $t = 54\text{ ms}$

### 2.4.3. Korekcija za deformaciju kapljice

Zbog različitih tlačnih sila koje djeluju na kapljicu u strujanju plina u točki stagnacije i na ekvatoru kapljice, inicijalno sferična kapljica počinje se deformirati u elipsoidni oblik. Ovo uvjetuje na jednu ruku promijenjen prijenos topline preko povećane površine.

$$\dot{Q} = \varphi \left( \frac{a}{R} \right) S_{ds} q \quad . \quad (52)$$

S korekcijskim faktorom  $\varphi \left( \frac{a}{R} \right) = \frac{S_{de}}{S_{ds}}$  koji je izračunat iz

$$\begin{aligned} S_{ds} &= 4\pi R^2 \quad \text{za sfernu kapljicu} \\ S_{de} &= 2\pi b^2 + \frac{\pi a^2}{\varepsilon} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad \text{za obli ellipsoid i} \\ S_{de} &= 2\pi b^2 + \frac{2\pi ab}{\varepsilon} \arcsin(\varepsilon) \quad \text{za proladni ellipsoid s } \varepsilon = 4\sqrt{1-(a/b)^2} . \end{aligned} \quad (53)$$

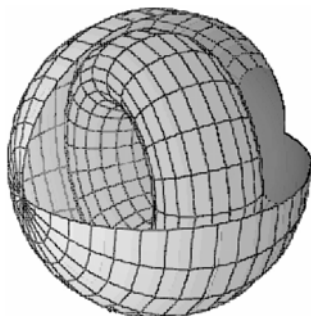
Dodatno postoji i modificirani koeficijent prijelaza topline zbog deformacije izražene preko Nusselt-ovog broja, koji je dobiven iz poklapanja s eksperimentalnim podacima kao:

$$\frac{Nu_q}{Nu_{sq}} = \exp \left[ -2.22 \left( \frac{d_s}{d} - 1 \right) \right], \quad d_s = \frac{6V_d}{S_{de}} \quad \text{i} \quad \frac{d_s}{d} = \frac{4\sqrt{1-\varepsilon^2}}{2 + \frac{1-\varepsilon^2}{\varepsilon} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}} \quad (54)$$

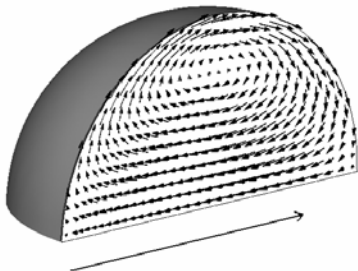
### 2.4.4. Korekcija za unutarnju cirkulaciju unutar kapljice

Unutarnja cirkulacija također može poboljšati prijelaz topline između plinovitog okruženja i kapljice. Postoje različite moguće vodilje unutarnjeg toka poznatog kao konduktivnog, prijelaznog i konvektivnog načina. Slike 5 i 6 prikazuju distribuciju brzine za konvektivni način, dok slike 6, 7 i 8 prikazuju tipične oblike temperaturne

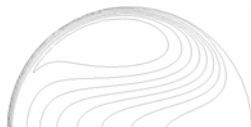
raspodjele za različite načine.



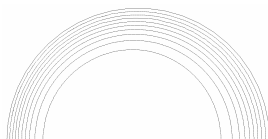
Slika 4. Shema unutarnje cirkulacije [16]



Slika 5. Pretpostavljeno polje brzina u tekućoj kapljici s indikacijama relativnih vrijednosti plina i brzinama tekućine [16]



Slika 6. Konvektivni način temperaturne raspodjele [16]



Slika 7. Konduktivni način temperaturne raspodjele [16]



Slika 8. Prijelazni način temperaturne raspodjele [16]

Korekcije za unutarnju cirkulaciju je podešena koristeći dva korekcijska koeficijenta koji ulaze u prijelaz topline za kapljicu

$$Q_{i-} = \theta_1^{-1} \theta_f^{-1} Q_{i-}^o \quad . \quad (55)$$

Prva korekcija se odnosi za cirkulaciju od sferne kapljice

$$\theta_1 = \begin{cases} 1 & \text{za } Re_d < Re_d^* \\ C_1 \log(Re_d) + C_2 & \text{za } Re_d^* \leq Re_d \leq Re_d^{**} \\ C_3 \log(Re_d) + C_4 & \text{za } Re_d > Re_d^{**} \end{cases} \quad . \quad (56)$$

Koeficijenti C1, C2, C3, C4 koji su korišteni u jednadžbi (56) ovise o vrsti goriva. Oni su tabelirani za sva goriva od verzije 8.4 (Fire), a za verzije 8.5 i 8.6 uzima se prosječna vrijednost od goriva verzije 8.4, ako je neko novo gorivo izabrano.

Druga korekcija se koristi kada se uzima u obzir cirkulacija u već deformiranoj kapljici

$$\theta_f = \begin{cases} -0.78 + 3.67 \frac{a}{R} - 1.89 \left( \frac{a}{R} \right)^2 & \text{za } a/R < 1 \text{ oblate} \\ 0.65 + 0.77 \frac{a}{R} - 0.42 \left( \frac{a}{R} \right)^2 & \text{za } a/R > 1 \text{ prolate} \end{cases} \quad (57)$$



### **3. RAČUNALNA DOMENA SA SELEKCIJAMA I RUBNIM UVJETIMA**

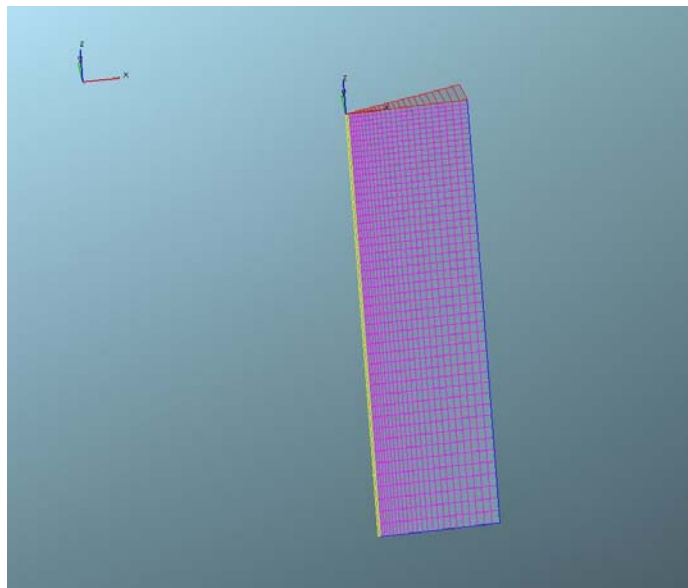
#### **3.1. Uvod**

Da bi se moglo izvršiti simulacija ubrizgavanja u obliku spreja, moralo se krenuti od nekih pretpostavki. Prvo kako se ne zna puna geometrija prostora za izgaranje, moralo se uzeti u obzir kakva će mreža biti zadovoljavajuća za kalkulacije. Mreža bi trebala biti dovoljno velika (da bi rezultati bili usporedivi sa eksperimentalnim podacima), a da pri tomu ne bude prevelika (predugo vrijeme računanja). Zbog tih uvjeta se i išlo na promatranje utjecaja veličine mreže (isječak od 15 i 90 stupnjeva), te na utjecaj različite gustoće mreže na mreži od 15 stupnjeva.

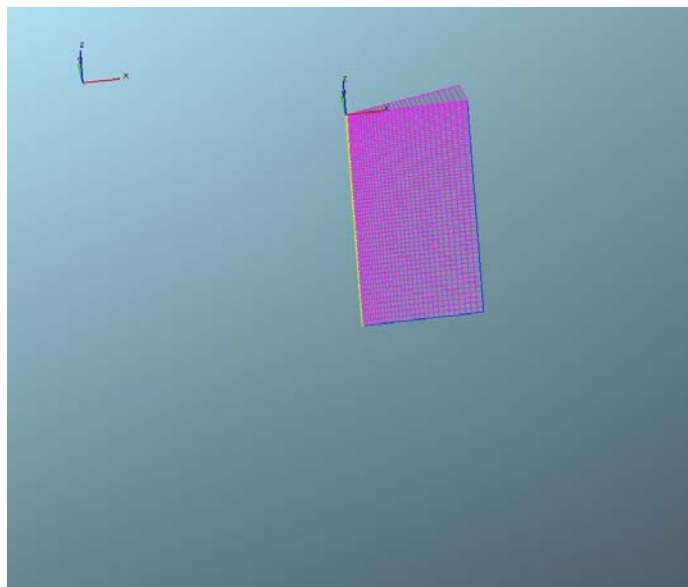
#### **3.2. Geometrija i mreže**

S obzirom da nam je vrijeme kalkulacije od iznimnog značaja, provjereni su uvjeti na mreži od 15 i 90 stupnjeva kako bi vidjeli da li možemo koristiti mrežu od 15 stupnjeva (1800 ćelija) u svim kalkulacijama koje obuhvaćaju modele isparavanja s i bez dodatka Frolov-a.

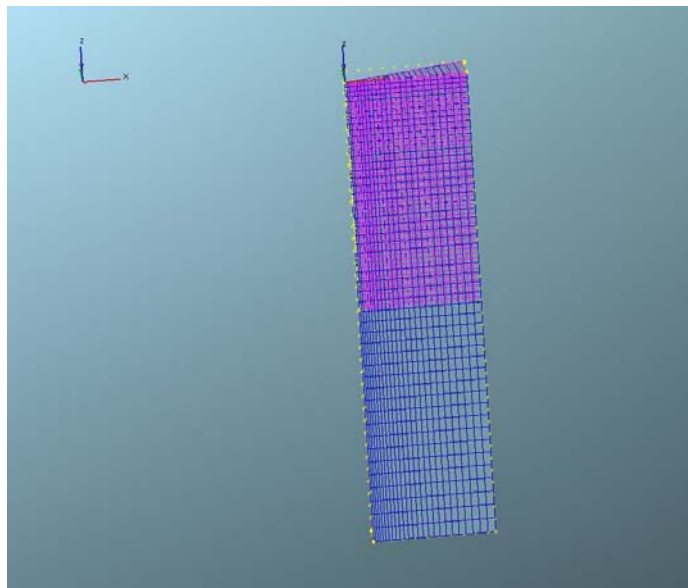
Važno je da odstupanje rezultata ne bude previše izraženo kod te usporedbe, jer ukoliko bi razlike kod računanja bile velike koristila bi se veća mreža koja iziskuje duže vrijeme računanja (ima 6 puta više elemenata za računati). Osim usporedbe mreža od 15 i 90 stupnjeva, provjerava se i utjecaj gustoće mreže na rezultate kod mreže od 15 stupnjeva (isprobavaju se mreže od 1250 i 1800 ćelija). Mreže koje se koriste su dobivene od strane AVL-a.



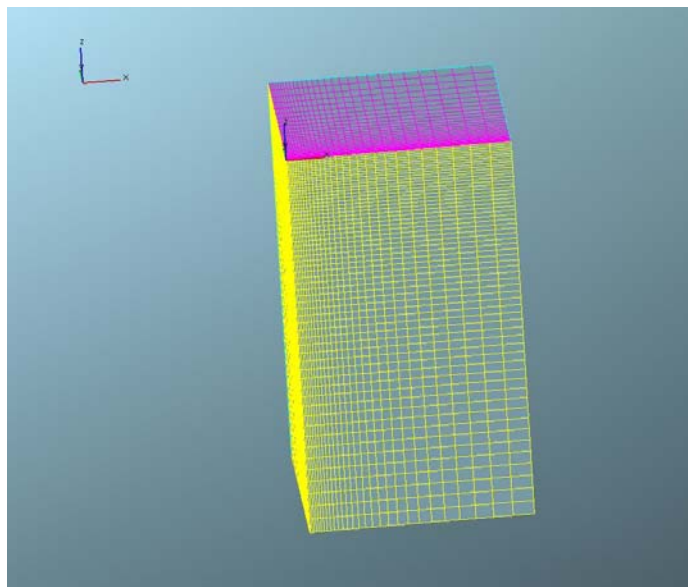
Slika 9. Mreža od 1250 elemenata



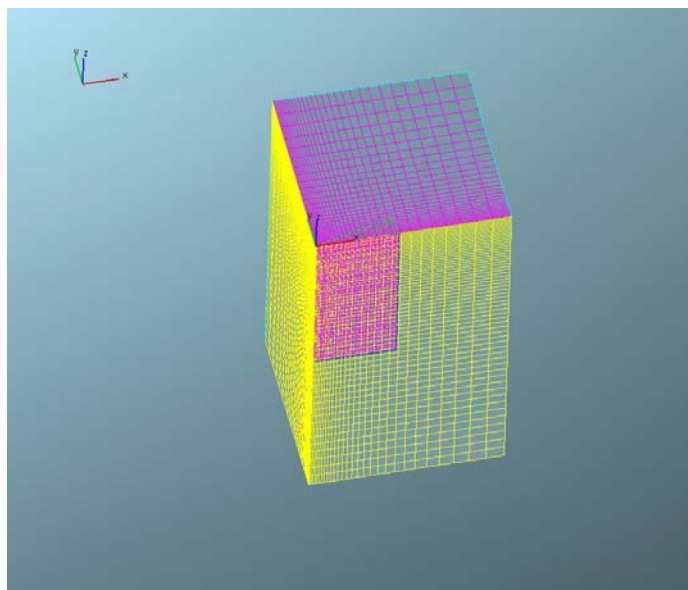
Slika 10. Mreža od 15 stupnjeva s 1800 elemenata



Slika 11. Usporedba mreža od 15 stupnjeva (1250 i 1800 elemenata)



Slika 12. Mreža od 90 stupnjeva (50 460 elemenata)



Slika 13. Usporedba mreža od 15 i 90 stupnjeva  
(1800 i 50 460 elemenata)

### 3.3. Početni uvjeti i vremenski parametri kalkulacije

Uvjeti simetrije su stavljeni na površine koje su u dodiru s osi spreja. Uvjeti zida su postavljeni na gornjoj plohi iznad sapnice, a na ostalim površinama su postavljeni uvjeti stanja izlaznog tlaka (*pressure outlet*).

Vremenski korak je postavljen na  $2.5e-06$  sekundi, što je manje od uobičajenog koraka koji se koristi kod diesel motora, da se dobiju točne karakteristike spreja tako da se češće izvlače podaci za svojstva plina. Vrijeme ubrizgavanja je konstantno tijekom cijelog vremena ubrizgavanja.

U eksperimentima ubrizgano gorivo je bilo smjesa od 90% heksadekana i 10% aditiva, koji su bili potrebni za tehniku mjerenja pomoću lasera. U simulacijama se koristi čisti heksadekan (cetan) kao gorivo.

Eksperimentalni podaci sastoje se od devet točaka mjerenja, na tri različita tlaka ubrizgavanja goriva i tri različita tlaka u komori izgaranja. Temperatura komore je 884 K za svih devet slučajeva.

Tablica 1. Podaci dobiveni eksperimentalnim putem (UPV)

Točka	Tlak ubrizgavanja (bar)	Gustoća ( $\text{kg/m}^3$ )	Tlak u komori (bar)	Temperatura komore (K)	Maseni tok ubrizgavanja (kg/s)	Trajanje ubrizgavanja (s)	Polovina kutastošća (stupnjevi)
1.	300	22.65	59.42	884	0.003	0.0019	7
2.	700	22.65	59.42	884	0.0048	0.0019	8
3.	300	26.38	69.18	884	0.003	0.0019	6.5
4.	700	26.38	69.18	884	0.0048	0.0019	8
5.	300	30.36	79.64	884	0.003	0.0019	7
6.	700	30.36	79.64	884	0.0048	0.0019	7.7
7.	1100	22.65	59.42	884	0.006	0.0014	6.8
8.	1100	26.38	69.18	884	0.006	0.0014	6
9.	1100	30.36	79.64	884	0.006	0.0014	6.5

Inicijalni kut spreja se mora koristiti kao parametar dodavanja. U našem slučaju je izveden iz srednjih vrijednosti eksperimentalnih podataka. Zbog toga što se koriste srednje vrijednosti tijekom cijelog vremena ubrizgavanja, gdje su se koristile i točke daleko od sapnice, procedura možda i nije u potpunosti točna. 216 parcela se uvodi u svakom koraku s promjerom koji je jednak promjeru sapnice (kap ubrizgavanje - *blob injection*). Kapljica je veličine 150 mikrona.

Na početku je penetracija tekuće faze brža zbog velikih brzina kapljica. Isparavanje i razdvajanje kapljica smanjuju veličinu kapljice, a time i inerciju fluida. Sprej se usporava zbog sile otpora od plina koji ga okružuje, jer on djeluje kontra penetracije spreja. To se vidi po nagibu krivulje. Nakon tog smanjenja nagiba, penetracija dolazi u stanje konstantne vrijednosti (nakon dosizanja maksimuma u simulacijama). U tom stanju ubrizgavanje je razmjerno isparavanju goriva. Pri računanju koristi se korisničke funkcije date od AVL-a za praćenje penetracije tekuće i plinske faze (*useout.f*), te limiter za deformaciju (*cyevabr.f*).

### 3.4. Parametri zatvaranja

Parametri koji se podešavaju preko korisničkog sučelja su:

- parametri za model isparavanja (E1 i E2)
- parametri za model razdvajanja (od C1 do C8 kod *Wave* modela i od C1 do C9 kod TAB modela)

#### 3.4.1. Parametri modela isparavanja

Tablica 2. Parametri za model isparavanja (Abramzon i Dukowicz) [4]

E1	Parametar izmjene topline (umnožni faktor koji djeluje na prijenosni koeficijent)	1
E2	Parametar izmjene mase (umnožni faktor koji djeluje na prijenosni koeficijent)	1

Parametri modela isparavanja se aktiviraju preko korisničkog sučelja, samo je potrebno izabrati potrebni model isparavanja. Standardno su postavljeni na vrijednost 1. Aktivacija se Frolovih korekcija također aktivira preko sučelja, i tu nam je moguće izabrati pojedini model od četiri ponuđena ili ih sve aktivirati odjednom. U kalkulacijama svi parametri Frolovih korekcija su postavljeni na vrijednost 1.

#### 3.4.2. Parametri modela razdvajanja

##### 3.4.2.1. Parametri *Wave* modela

Ukoliko se koristi standardni *Wave* model jedini parametri su C1, C2 i C3.

Jedini parametar koji se varira za visoki tlak ubrizgavanja je C2. Za aktivaciju dječijih kapljica potrebno je povećati vrijednost C4 i C5 na vrijednost veću od nula.

Tablica 3. Konstante *Wave* modela razdvajanja kapljica [4]

C1	Obično je konstantna i ne mijenja se.	0.61
C2	Ova konstanta se varira kako bi se podesilo razdvajanje za različite sapnice. C2 utječe na vrijeme razdvajanja i penetracije za različite sapnice. Manja vrijednost smanjuje vrijednost penetracije.	30
C3	Vrijednost nula nam računa razdvajanje za neviskoznu tekućinu. Obično se postavi na vrijednost 1 kako bi računali za viskoznu tekućinu	1
C4	Kontrolira broj novih statističkih parcela. Niža vrijednost daje više novih parcela. Ova konstanta nam ne kontrolira količinu mase koja će biti ispuštana.	0
C5	Ova konstanta kontrolira masu u parcelama. Niža vrijednost će dati manje mase iz koje će nastati dječije kapljice. Ukoliko je moguće smanjiti ili povećati ispareni dio u blizini sapnice, to je konstanta koju treba mijenjati	0

C6 se postavlja na vrijednost nula, dok su C7 i C8 konstante modela za Wakisaka korekciju. C7 i C8 su ovisni o tlaku u komori izgaranja.. C8 ima puno jači utjecaj na penetraciju i tekuće i plinske faze od C7. C2 i C8 su izravno povezani zbog Wakisakinih jednadžbi:

$$B_0 = C_1 + C_7(p_g - 0.1)$$

$$B_1 = C_2 + C_8(p_g - 0.1)$$

Gdje je  $p_g$  tlak u komori izgaranja. Mnoge informacije i danas nisu poznate za Wakisakine korekcije.

Tablica 4. Preporučene vrijednosti za *Wave* model razdvajanja kapljica [4]

	C1	C2	C3	C4	C5
Gornja granica	Nema granice	Nema granice	1.0	1.0	1.0
Donja granica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Preporučene vrijednosti	0.61	5.0-60.0	1/0	0.1-0.5	0.01-0.3
Početna vrijednost ( <i>default</i> )	0.61	30.0	1.0	0.0	0.0



### 3.4.2.2. Parametri TAB modela

Tablica 5. Konstante TAB modela razdvajanja kapljica [4]

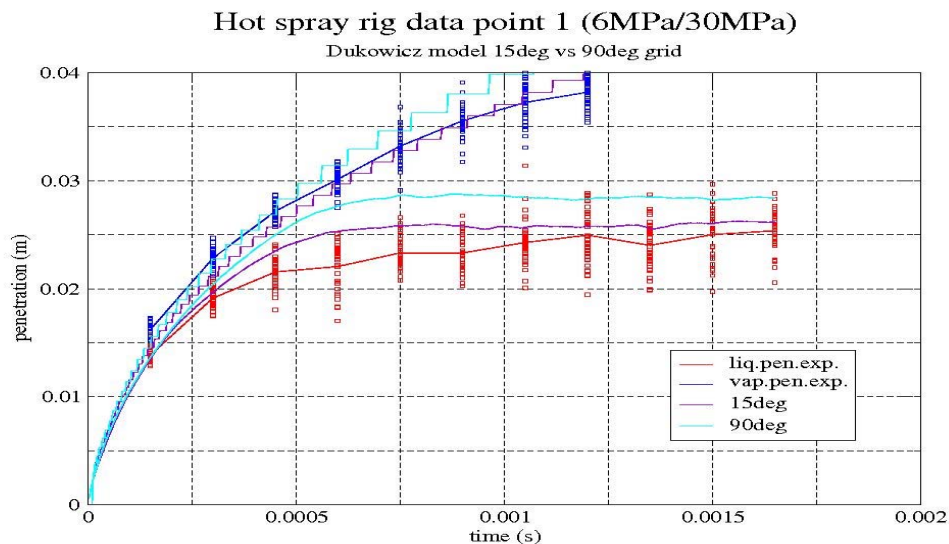
C1	To je početna vrijednost brzine distorzije na njenom izlazu iz sapnice. Negativne vrijednosti će odgoditi vrijeme razdvajanja kapljica, a pozitivne vrijednosti će ga ubrzati.	1
C2	Određuje da li se koristi Chi Square ili Rosin-Rammler distribucija pri razdvajanju kapljica. Manje vrijednosti daju kraću penetraciju i manji <i>Sauter Mean Diameter</i> .	2
C3	Vrsta veličine distribucije. 0= Chi Square / 1= Rosin-Rammler	0
C4	Određuje omjer veličine roditeljskih naspram dječijih kapljica poslije razdvajanja u jednadžbi (30). Veća vrijednost daje manje kapljice nakon razdvajanja.	3.33333
C5	To je konstanta opruge koja je eksperimentalno povezana s C8 preko $C_8=C_5/24$ . ova konstanta pripada $C_K$ u jednadžbi (29). Niža vrijednost će produžiti karakteristično vrijeme razdvajanja. Povećanje C5 dovodi do sporijeg razdvajanja.	8
C6	Bezdimenzijska konstanta pripada $C_b$ u jednadžbi (29), koja karakterizira kritičnu amplitudu od temeljnog načina. C6 je postavljen na vrijednost 0.5	0.5
C7	Konstanta koja pripada $C_d$ u jednadžbi (29) za modeliranje sile trenja (viskozno kvašenje). S povećanom vrijednosti razdvajanje je usporeno.	10
C8	Konstanta koja pripada $C_F$ u jednadžbi (29) za modeliranje padajućeg tlaka. Postavna vrijednost je dobivena usklađujući je s osnovnomfrekvencijom oscilacije. Manje vrijednosti znače kraći stupanj razdvajanja.	0.3333
C9	Konstanta koja određuje novu brzinu kapljice poslije razdvajanja	1

Tablica 6. Preporučene vrijednosti za TAB model razdvajanja kapljica [4]

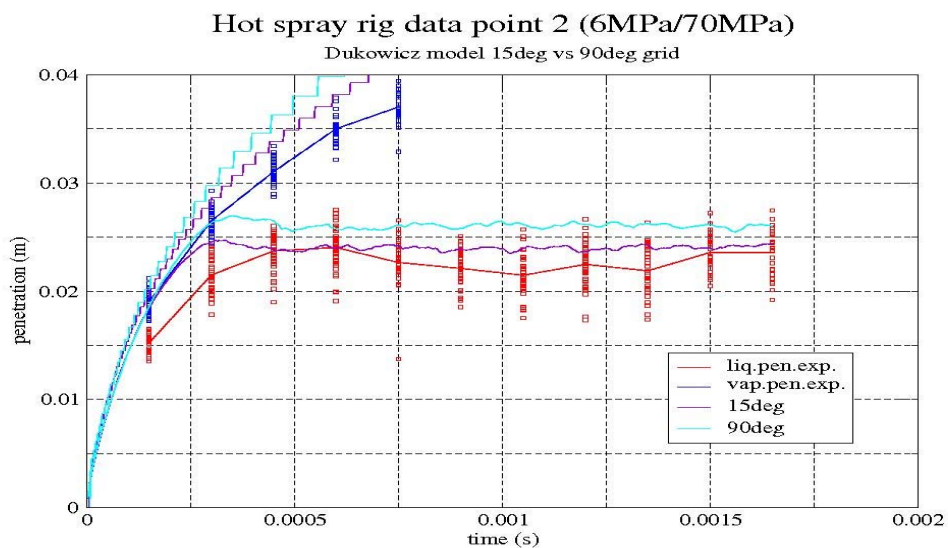
	C1	C2 Chi/R	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Gornja granica	Nema granice	7/30	1	Nema granice	Nema granice	1	Nema granice	Nema granice	Nema granice
Donja granica	Nema granice	0/3	0	0.833	0.1	0	Nema granice	Nema granice	Nema granice
Preporučene vrijednosti	-	-	0.0	1-8	1-16	0.3-0.7	5-10	0.1-0.5	0.0-5
Početna vrijednost ( <i>default</i> )	1	2/3.5	0.0	3.3333	8.0	0.5	10.0	0.333	1.0

## 4. REZULTATI

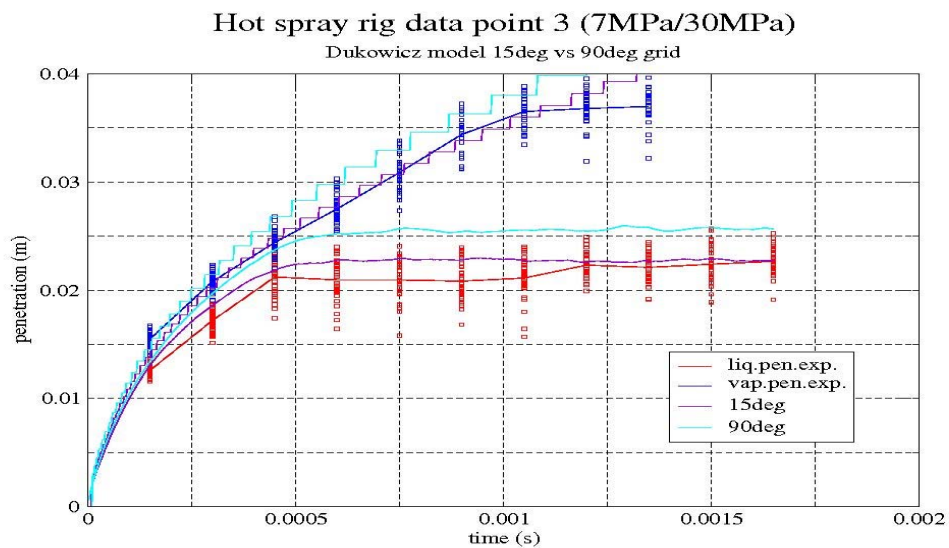
### 4.1. Utjecaj veličine domene konusnog isječka (15 i 90 stupnjeva) za Dukowicz model isparavanja uz korištenje Wave modela razdvajanja kapljica



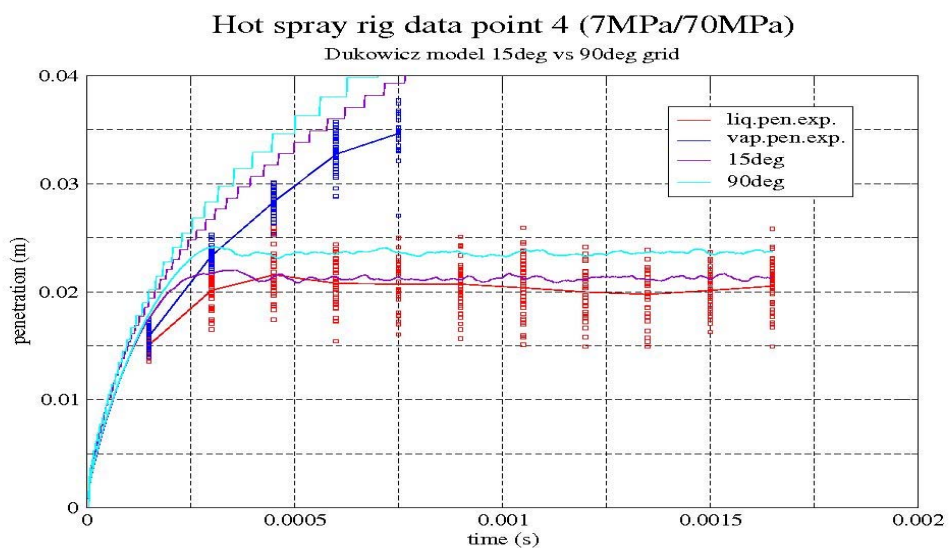
Slika 14. Rezultati usporedbe isječka od 15 i 90 stupnjeva za prvu mjernu točku



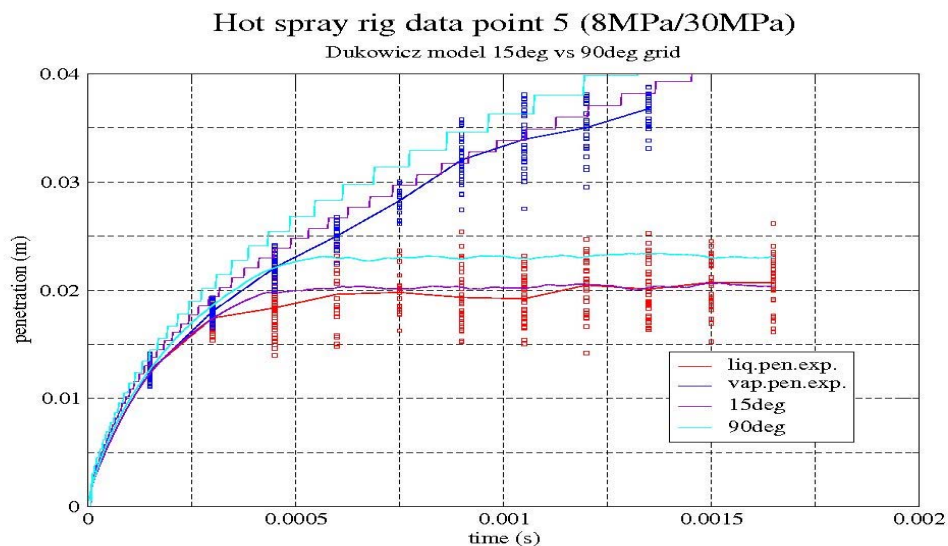
Slika 15. Rezultati usporedbe isječka od 15 i 90 stupnjeva za drugu mjernu točku



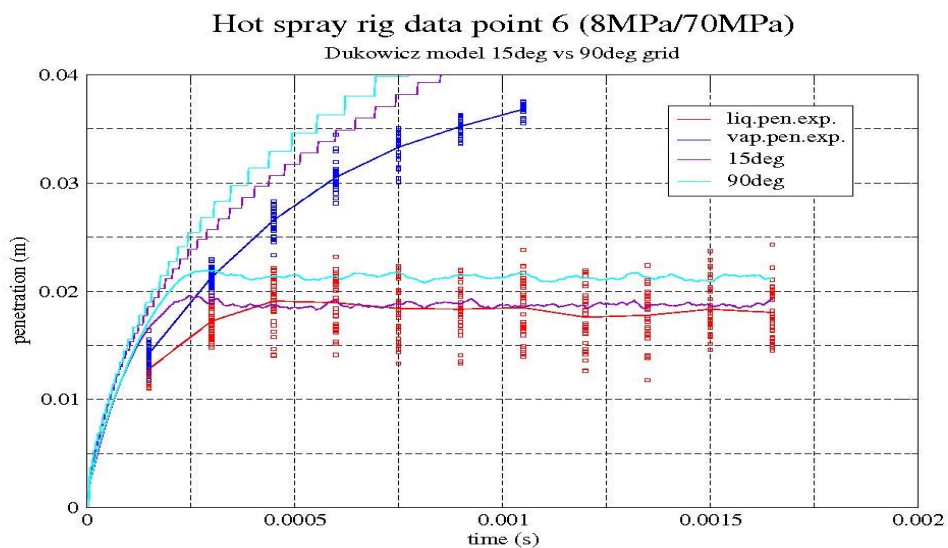
Slika 16. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za treću mjernu točku



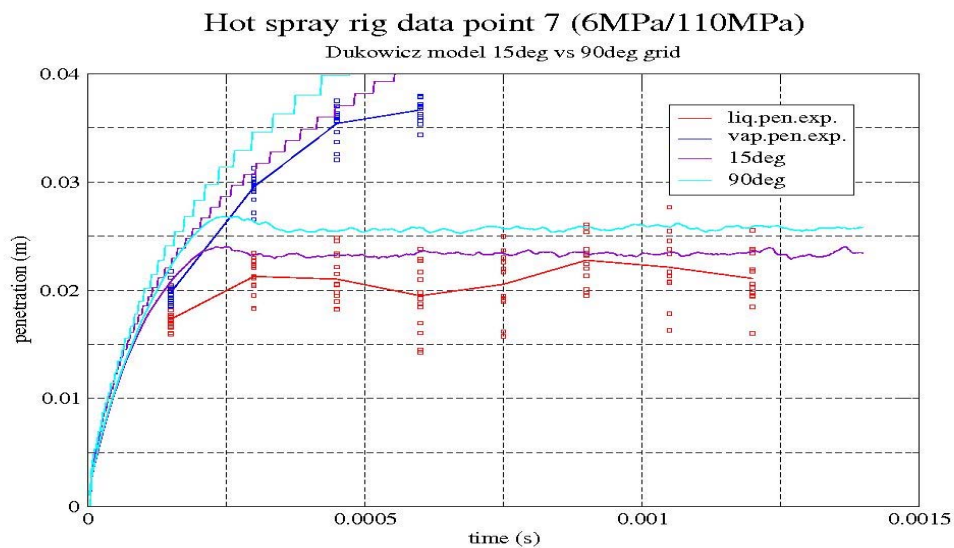
Slika 17. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za četvrtu mjernu točku



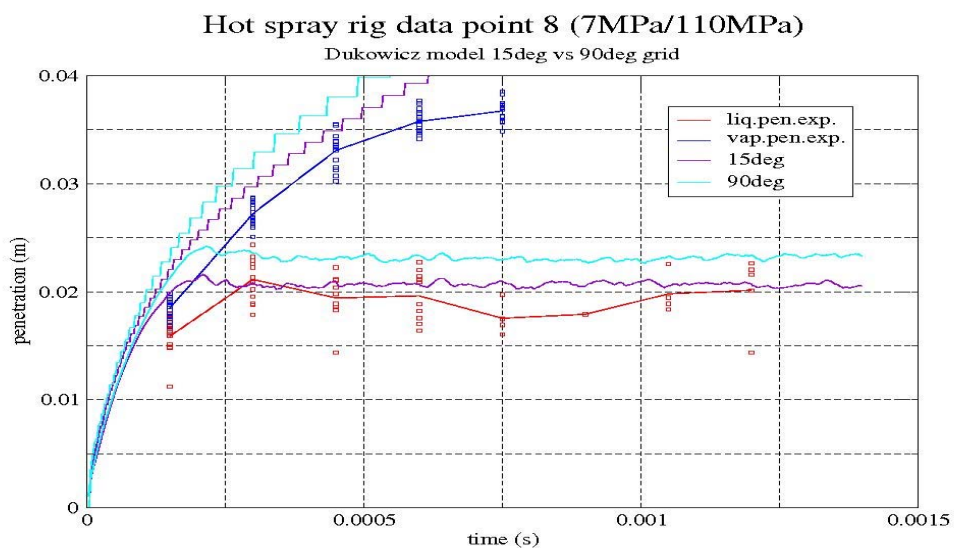
Slika 18. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za petu mjernu točku



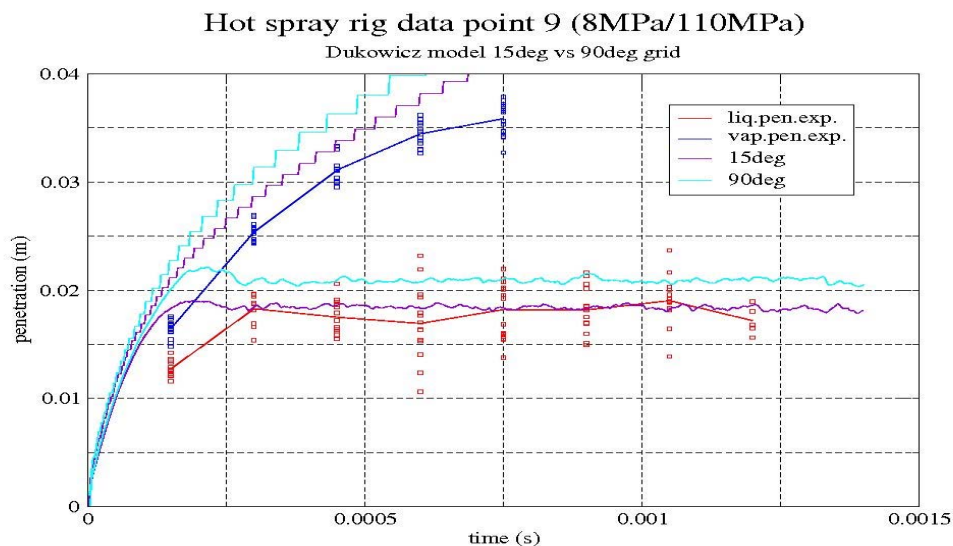
Slika 19. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za šestu mjernu točku



Slika 20. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za sedmu mjernu točku



Slika 21. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za osmu mjernu točku

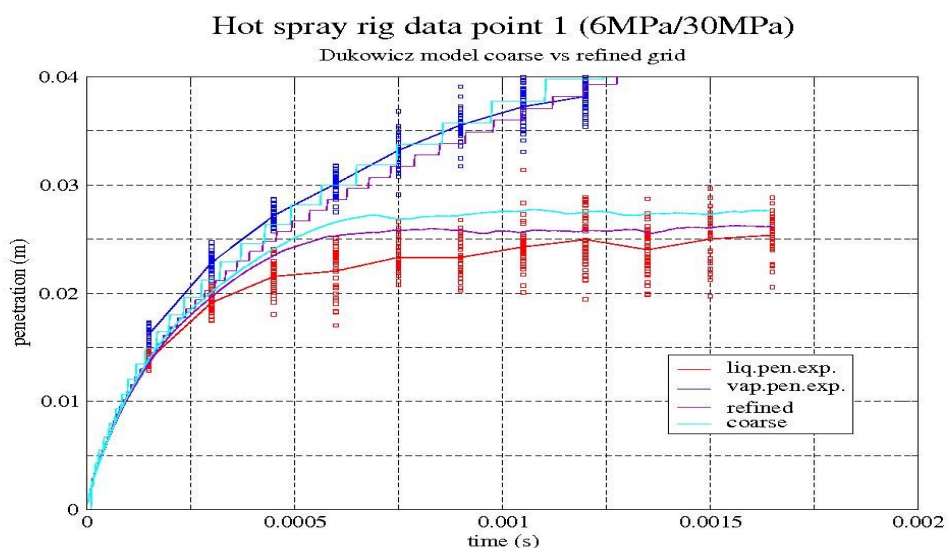


Slika 22. Rezultati usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva za devetu mjernu točku

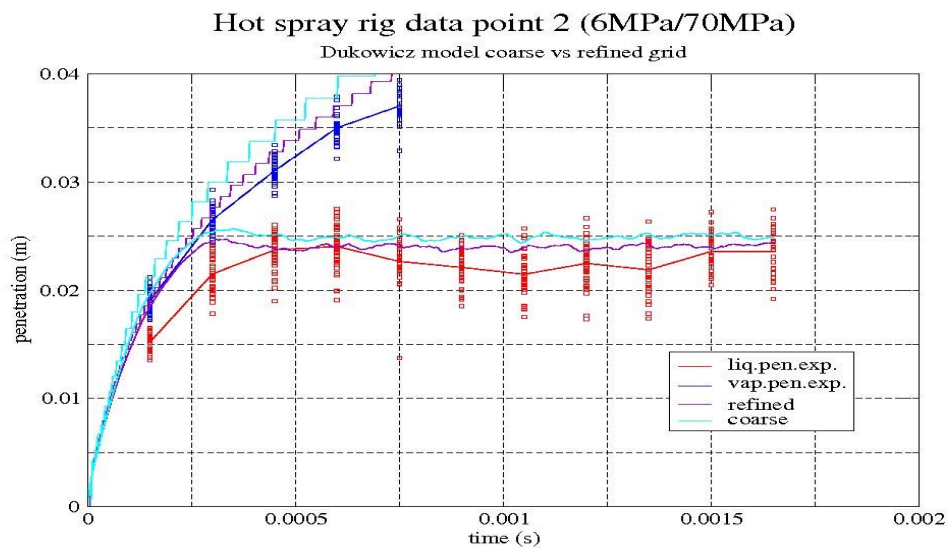
#### 4.1.1. Analiza rezultata usporedbe isječaka od 15 i 90 stupnjeva

Rezultati pokazuju da je penetracija i tekuće i plinovite faze veća kod modela od 90 stupnjeva, ali nam je trend identičan za svih devet točaka. Razlike su primjetne, ali nisu prevelike. Ovo nam opravdava da uzmemo isječak od 15 stupnjeva kao računalnu domenu. Primjetno je da rezultati za drugu, četvrtu i šestu mjernu točku za obje mreže nam prelaze iznad vrijednosti eksperimentalnih rezultata. Uzrok tome bi mogao biti za drugu i četvrtu točku u većem tlaku ubrizgavanja (veće brzine ubrizgavanja kapljica, a time i veća penetracija), dok kod šeste mjerne točke bi razlog mogao biti gustoća goriva. S obzirom da nam je za model od 15 stupnjeva korištena gušća mreža (1800 elemenata), razlog veće penetracije bi mogao biti da sa manjom mrežom imamo finije korekcije za određivanje položaja i brzine kapljice.

#### 4.2. Utjecaj gustoće mreže na domeni od 15 stupnjeva za Dukowicz model isparavanja uz korištenje *Wave* modela razdvajanja kapljica

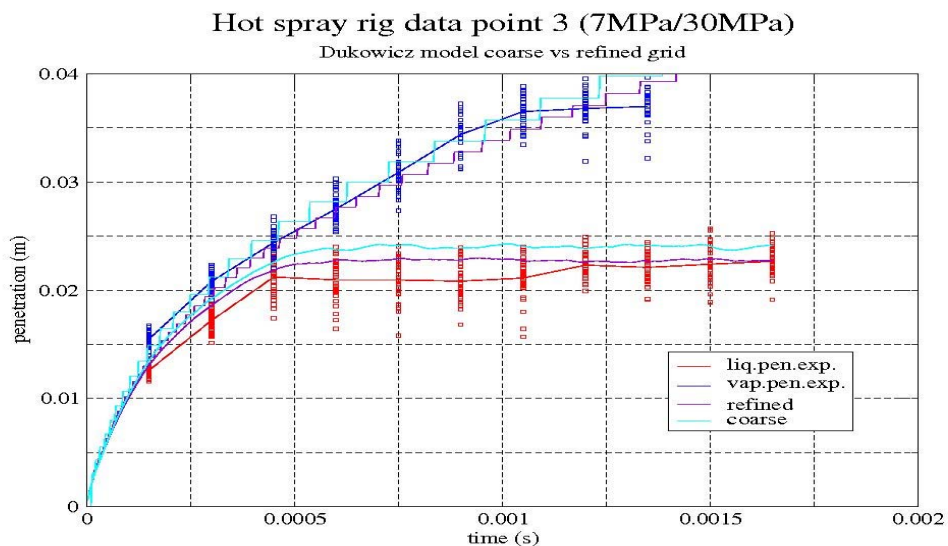


Slika 23. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za prvu mjernu točku

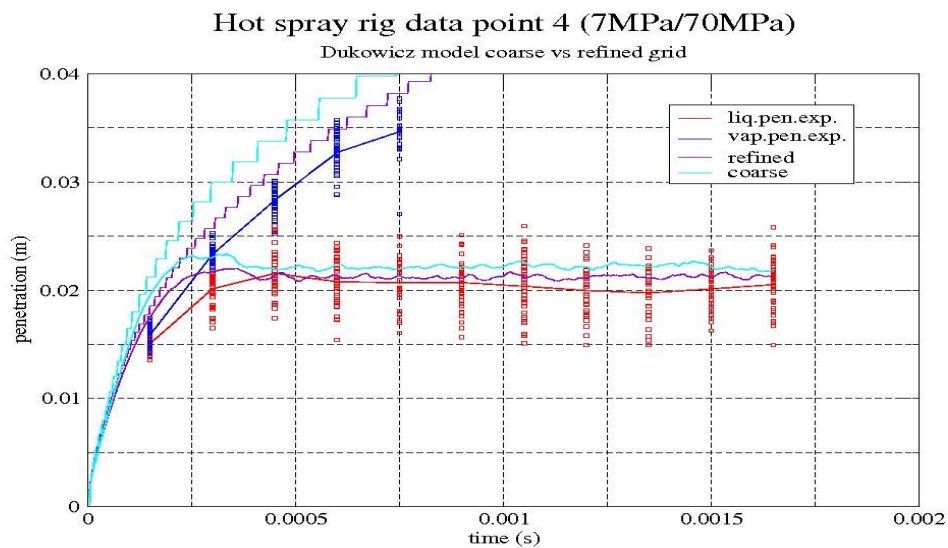


Slika 24. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za drugu mjernu točku

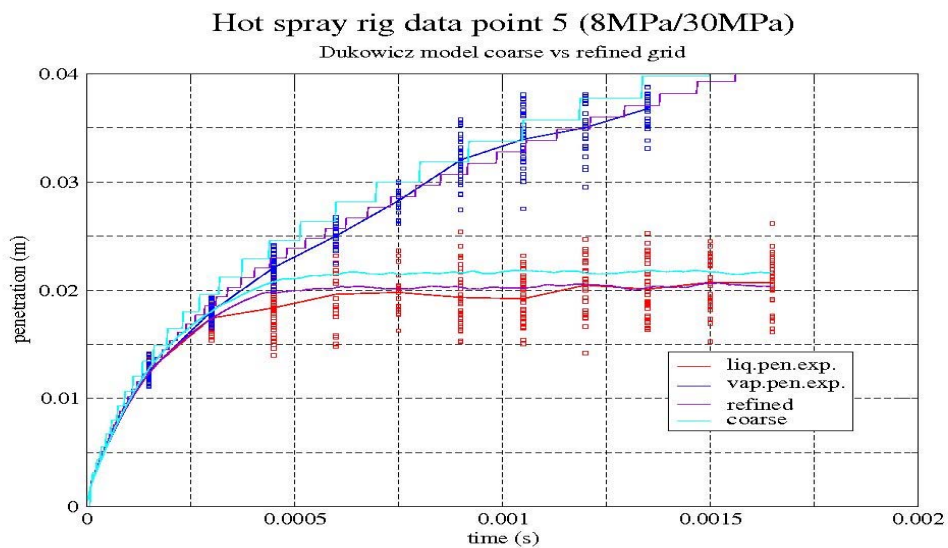




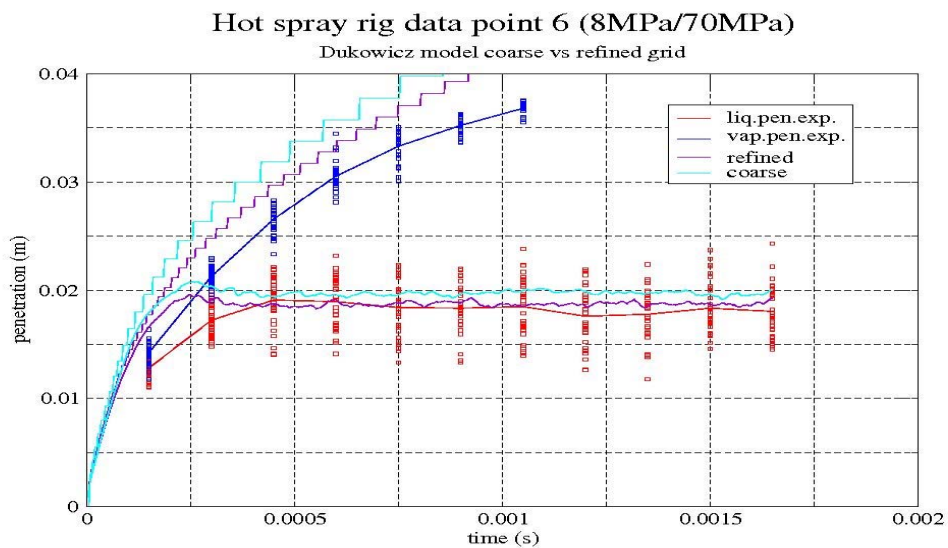
Slika 25. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za treću mjernu točku



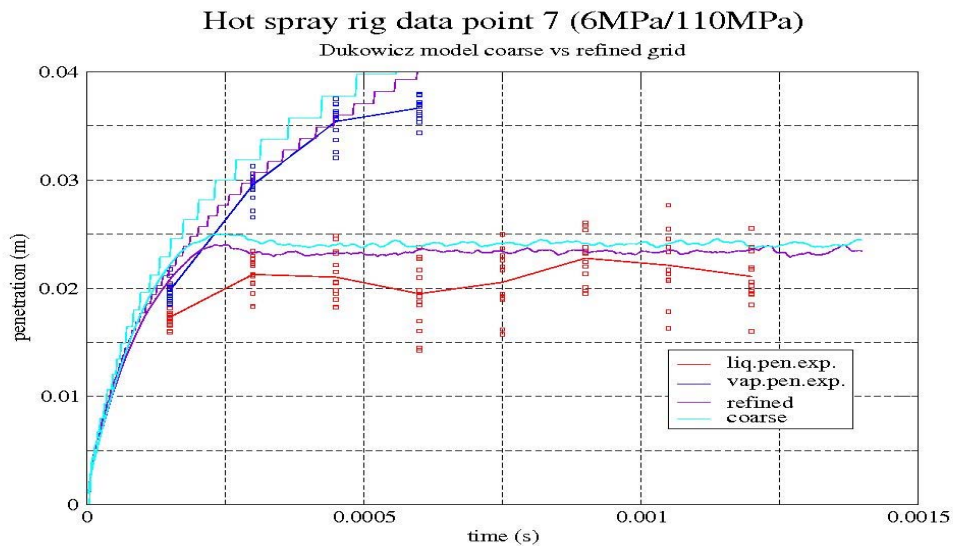
Slika 26. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za četvrtu mjernu točku



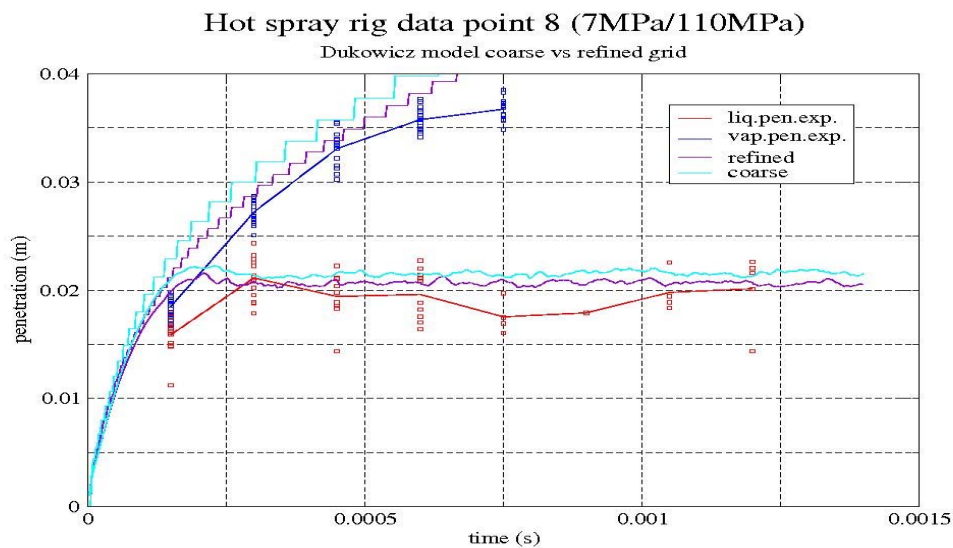
Slika 27. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za petu mjernu točku



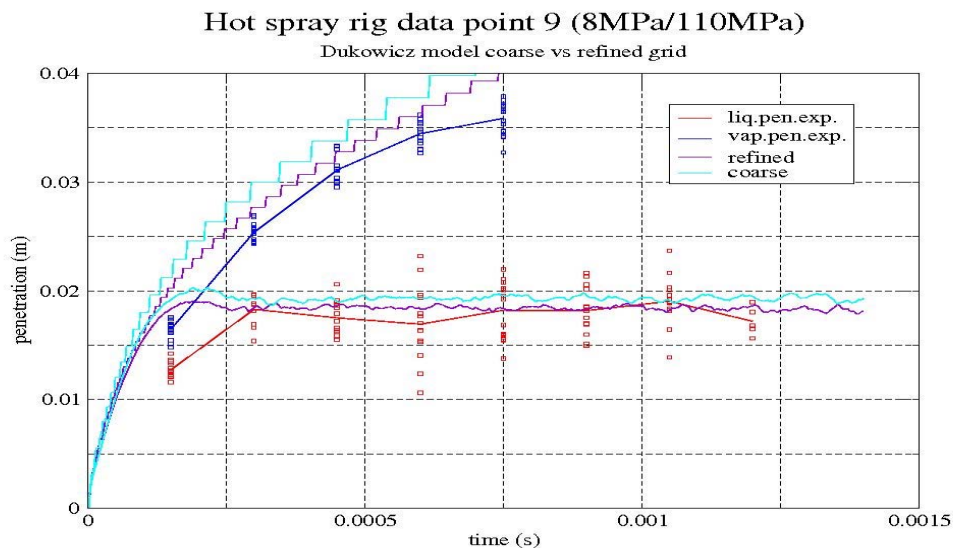
Slika 28. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za šestu mjernu točku



Slika 29. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za sedmu mjernu točku



Slika 30. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za osmu mjernu točku

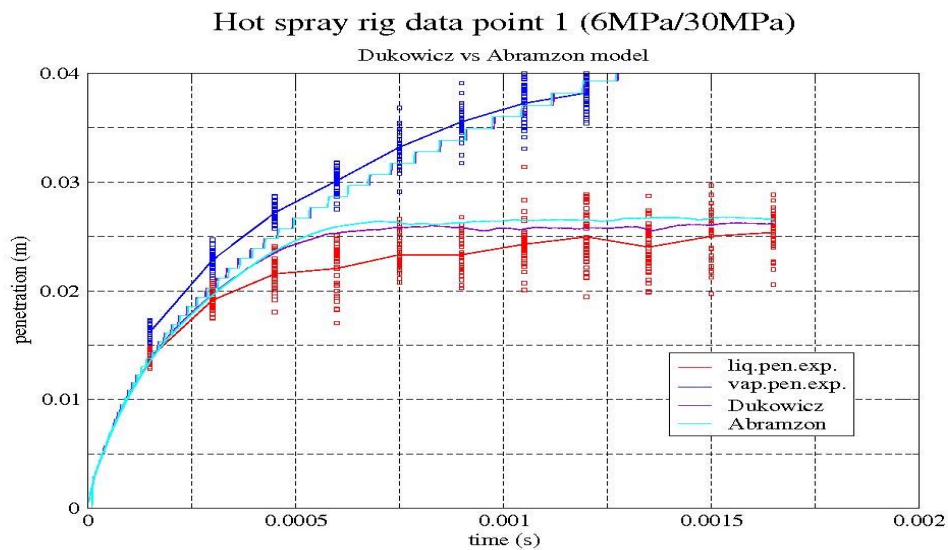


Slika 31. Rezultati usporedbe različite gustoće mreže za devetu mjernu točku

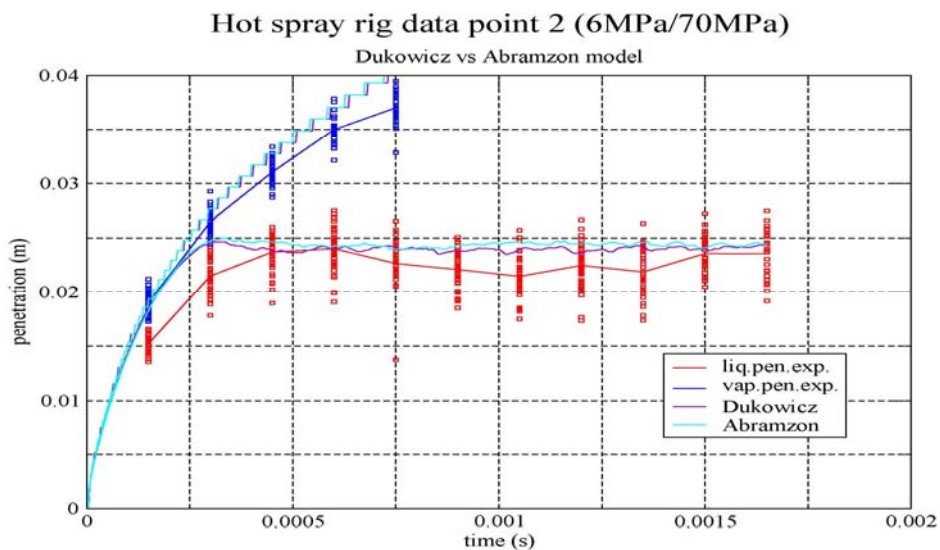
#### 4.2.1. Analiza rezultata za usporedbu različite gustoće mreže

Rezultati su skoro identični. Malo veće razlike se primjete kod nižeg tlaka ubrizgavanja, dok se kod tlaka ubrizgavanja od 1100 bara skoro poklapaju. Manje gusta mreža (*coarse grid*) daje nešto veću penetraciju i tekuće i plinske faze. S obzirom na manje elementa vrijeme računanja je nešto brže za *coarse* mrežu u odnosu na gušću (*refined*). Osim što je vrijeme računanja kraće kod mreže manje gustoće, računanje položaja i brzine je i nešto nepreciznije. Penetracija isparenog goriva nam često prelazi preko vrijednosti eksperimentalnih mjerenja. Razlog bi mogao biti u nepoznavanju prave geometrije komore izgaranja, s obzirom da mi koristimo samo manji dio te komore za računanje. Razlog za nijansu lošije rezultate za drugu i četvrtu točku bi mogao biti u višem tlaku ubrizgavanja.

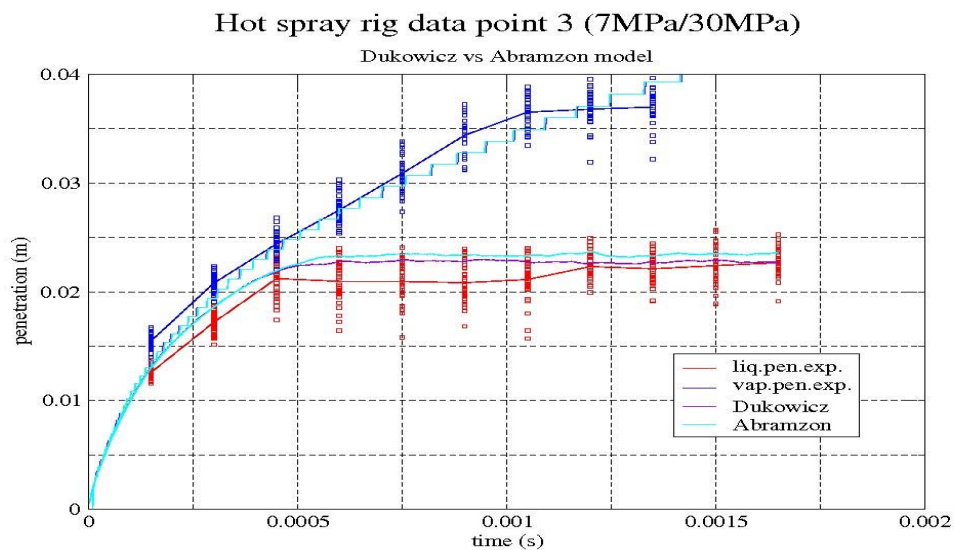
### 4.3. Usporedba Abramzon/Sirignano i Dukowicz modela isparavanja uz korištenje Wave modela razdvajanja kapljica



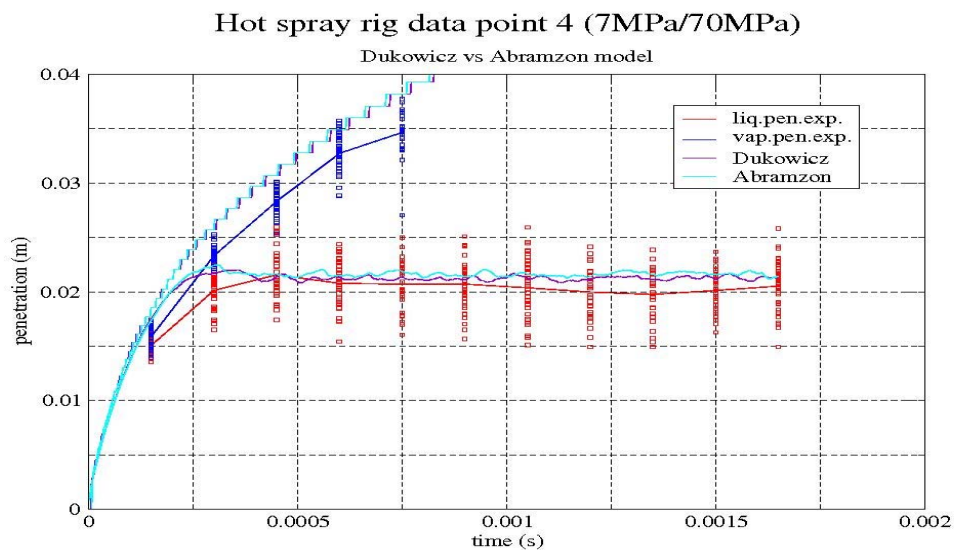
Slika 32. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za prvu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)



Slika 33. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za drugu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)

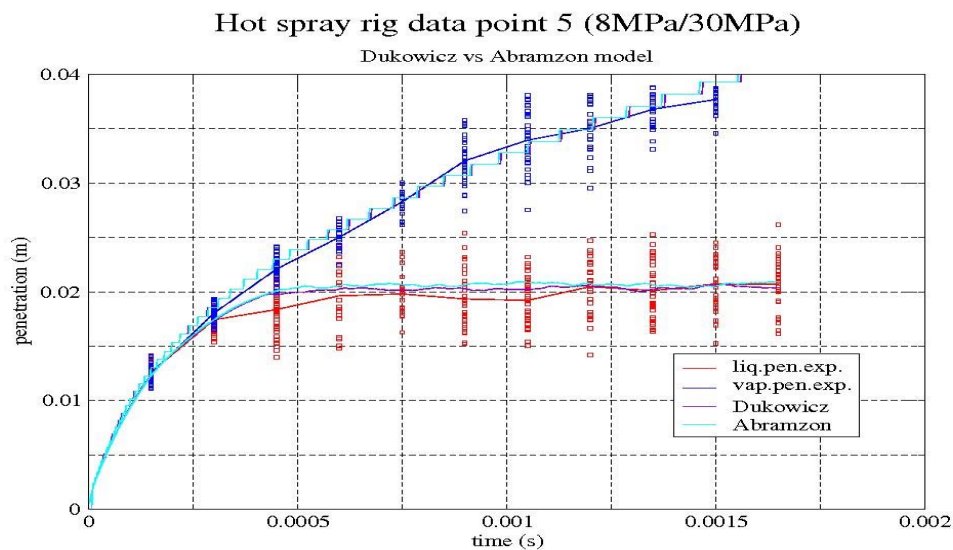


Slika 34. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za treću mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)

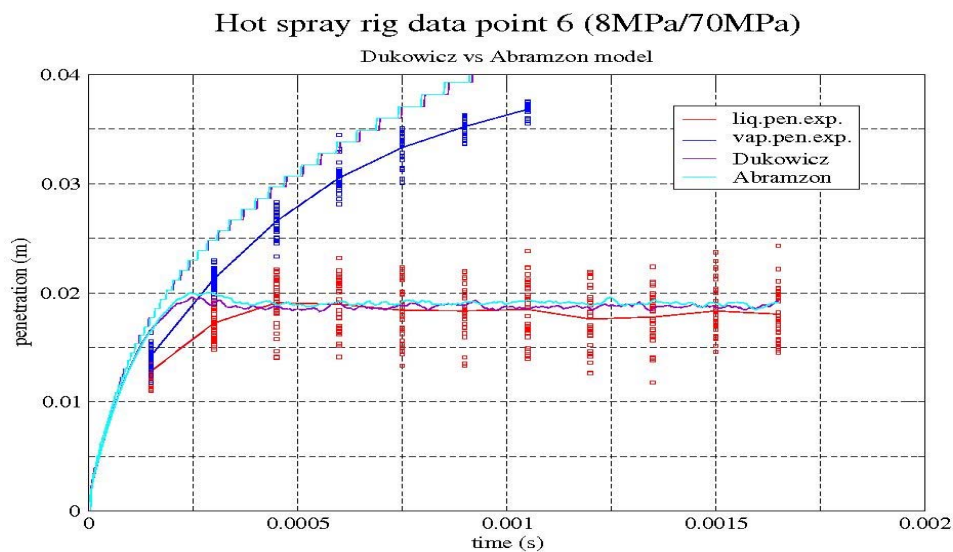


Slika 35. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za četvrtu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)

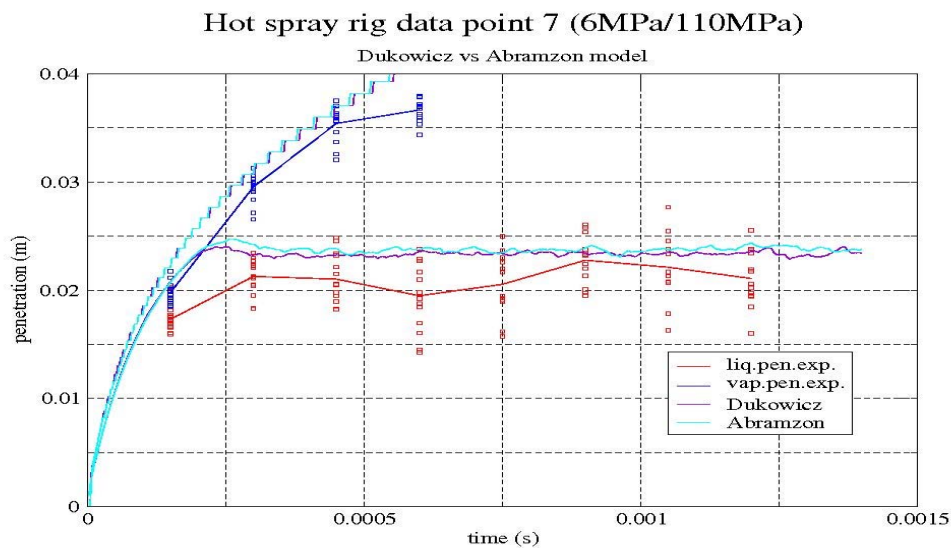




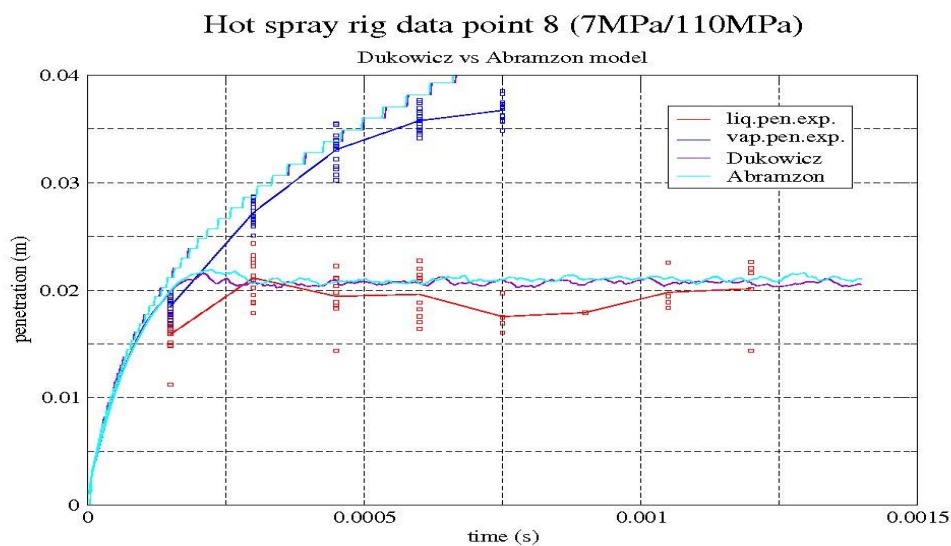
Slika 36. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za petu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)



Slika 37. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za šestu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)

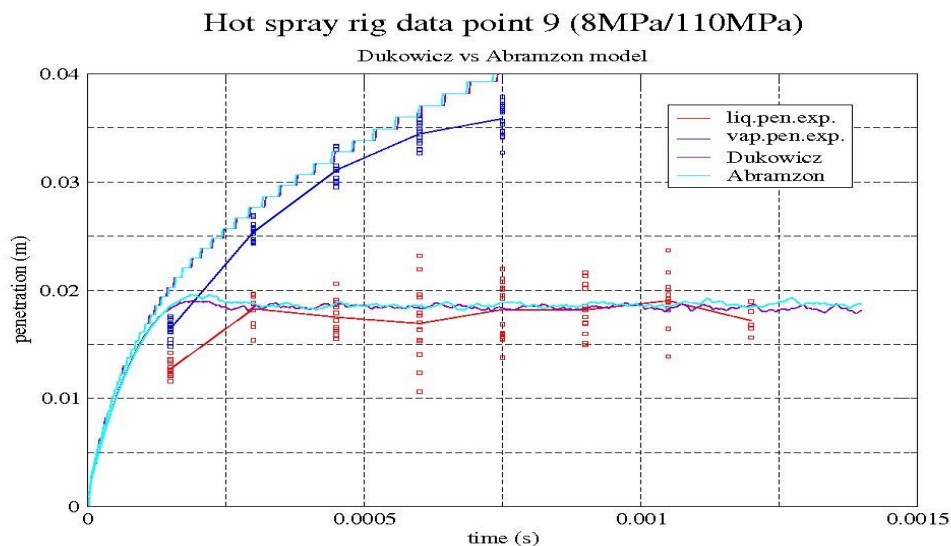


Slika 38. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za sedmu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)



Slika 39. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za osmu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)



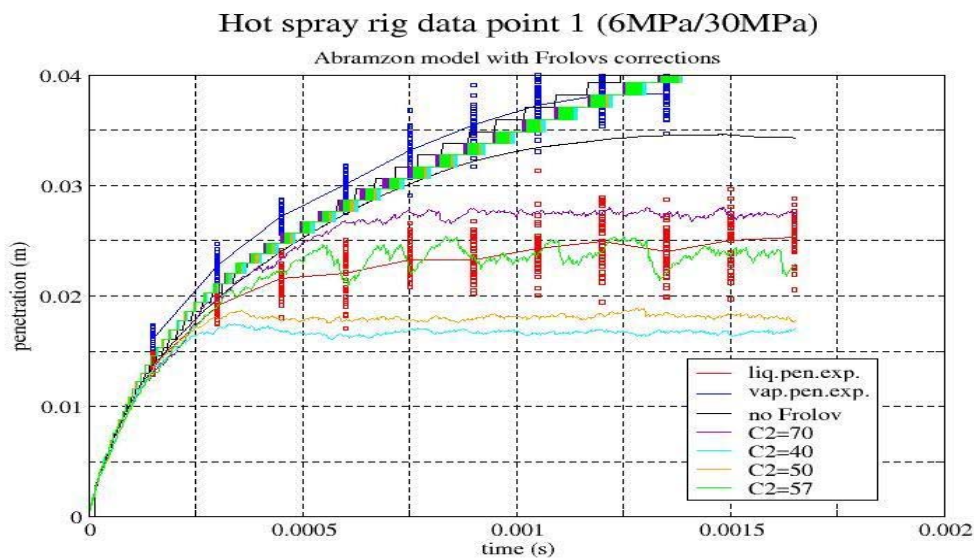


Slika 40. Rezultati usporedbe Dukowicz i Abramzon modela za devetu mjernu točku na mreži od 15 stupnjeva (1800 elemenata)

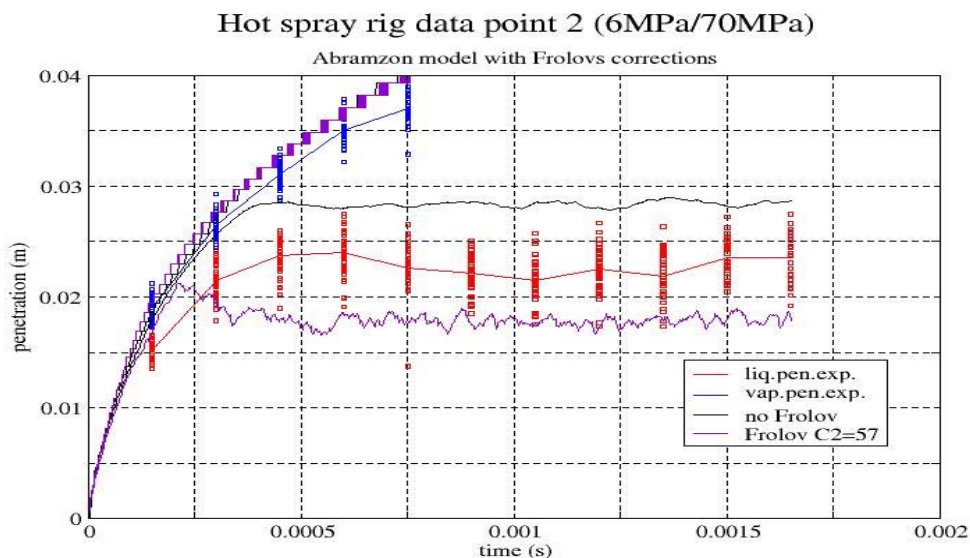
#### 4.3.1. Analiza rezultata usporedbe Dukowicz i Abramzon modela isparavanja uz korištenje *Wave* modela razdvajanja kapljica

Rezultati se skoro poklapaju. Vrijeme računanja je nešto duže za Abramzon model zbog svojeg iterativnog postupka. Veće odstupanje je primjetno kao i kod svih kalkulacija do sada kod šeste točke, gdje je penetracija isparene faze veća od eksperimentalnih podataka. Teško je reći zašto se rezultati tako dobro poklapaju. Razlog bi mogao biti u veličini mreže za računanje ubrizgavanja goriva i njene penetracije, odnosno kod pune geometrije bi rezultati možda bili nešto drugačiji. Kod sedme mjerne točke je primjetno da je penetracija tekuće faze najveća. To je zbog najvećeg tlaka ubrizgavanja i najmanjeg tlaka u komori za izgaranje, što dakle doprinosi većoj penetraciji. Isto tako je primjetno da penetracija za prvu i treću mjernu točku čak i prelaze vrijednost penetracije za sedmu mjernu točku, a to se može objasniti tako što za manje kapljice (veći tlak ubrizgavanja) unutarnje cirkulirajuće gibanje brzo biva nadjačano u odnosu na viskoznost (viskoznost raste). Male kapljice imaju kraće vrijeme zagrijavanja zbog svoje mase.

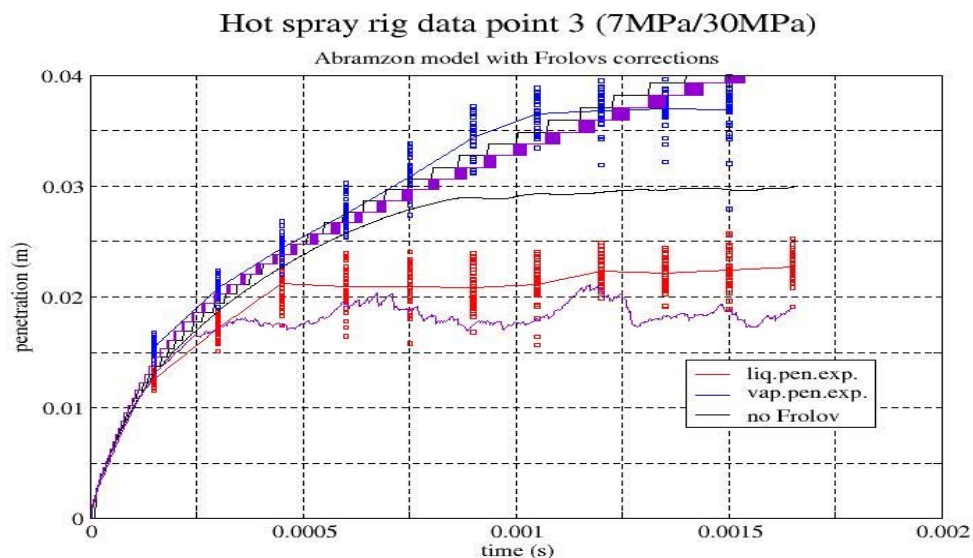
#### 4.4. Abramzon/Sirignano model isparavanja uz Frolovu korekciju s *Wave* modelom razdvajanja kapljica



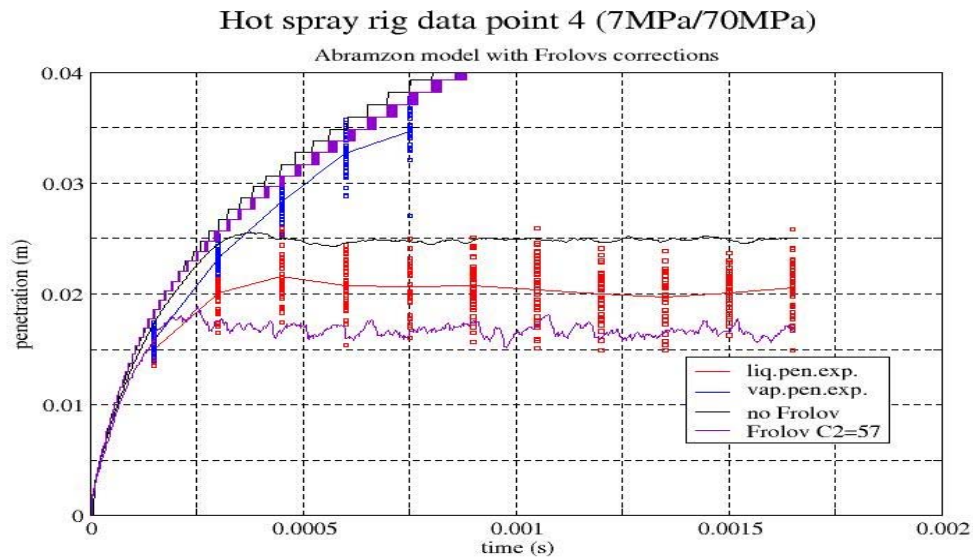
Slika 41. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) uz varijaciju parametra C2 za prvu mjernu točku



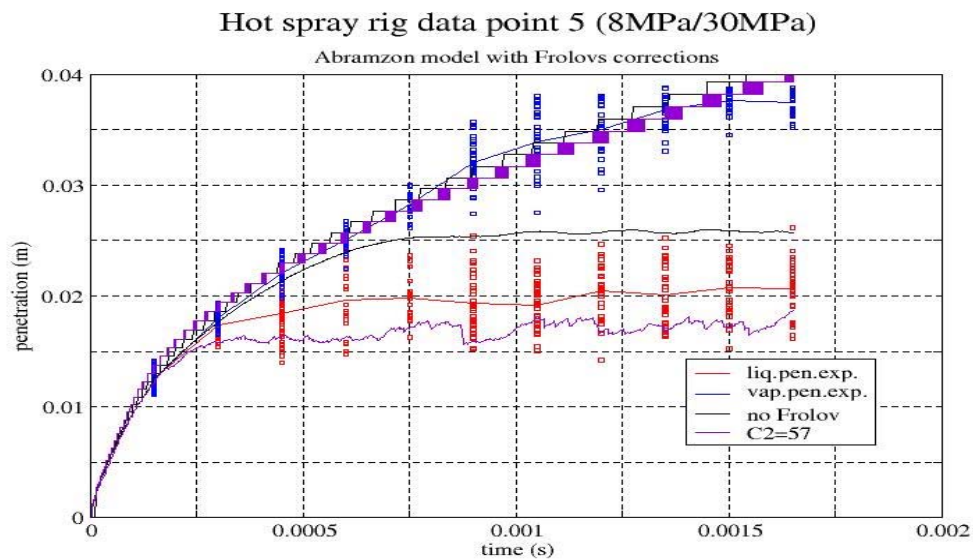
Slika 42. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za drugu mjernu točku



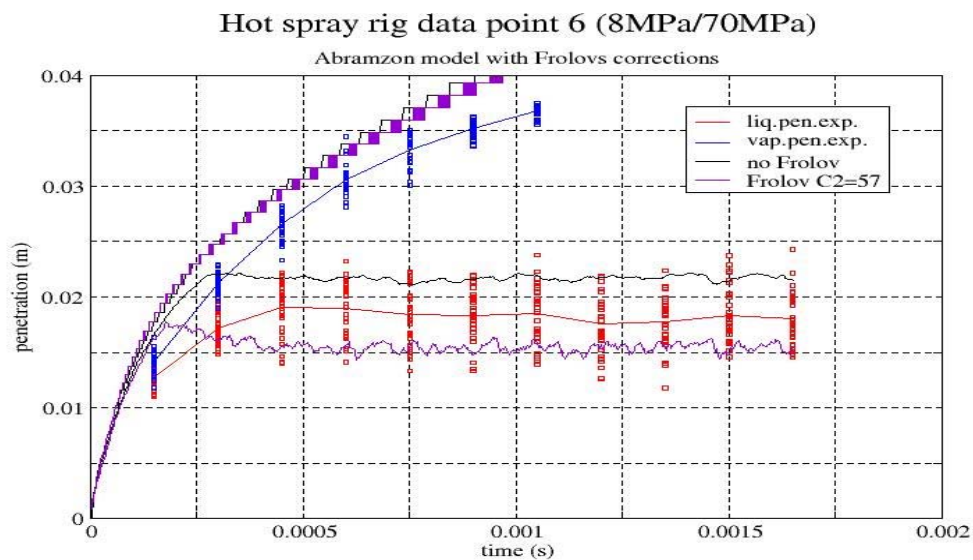
Slika 43. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za treću mjernu točku ( $C2=57$ )



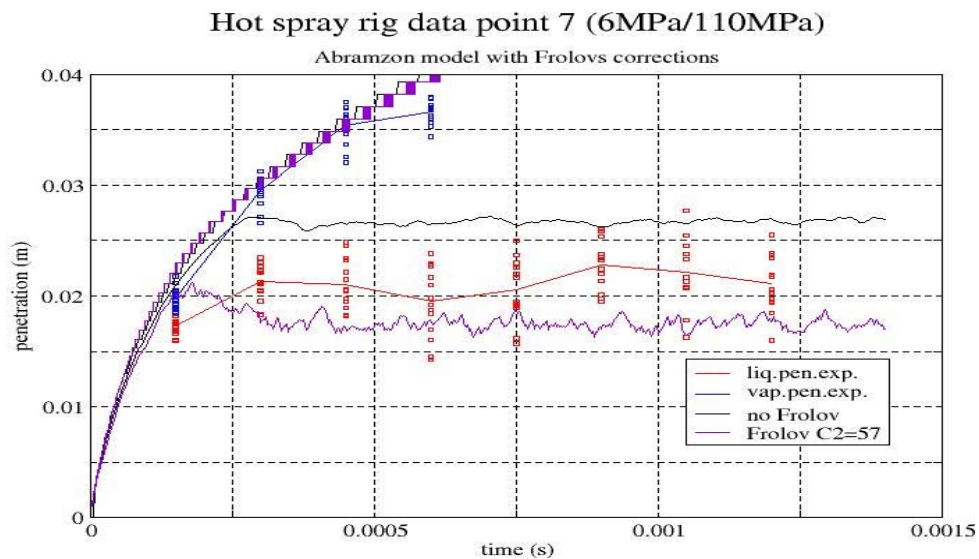
Slika 44. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za četvrtu mjernu točku



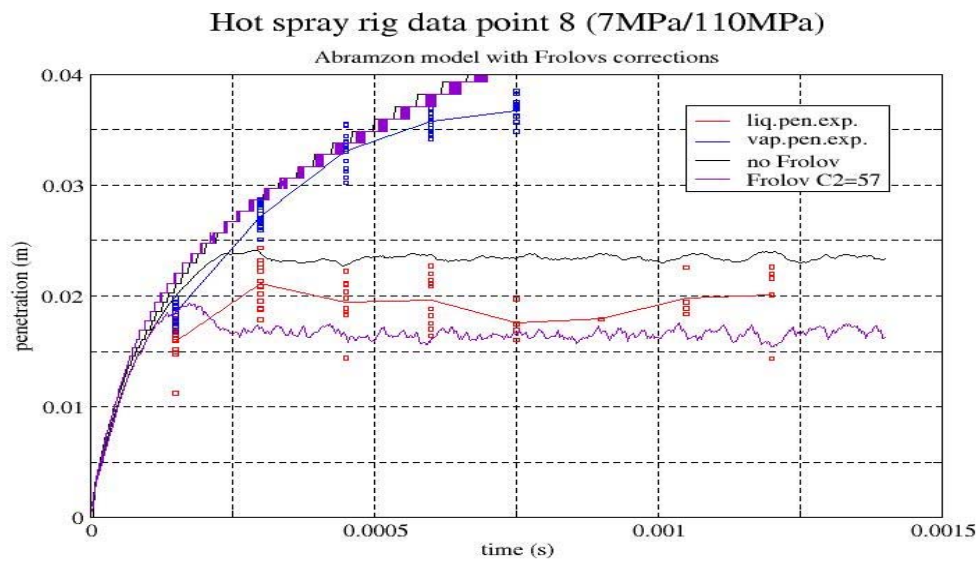
Slika 45. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za petu mjernu točku



Slika 46. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za šestu mjernu točku

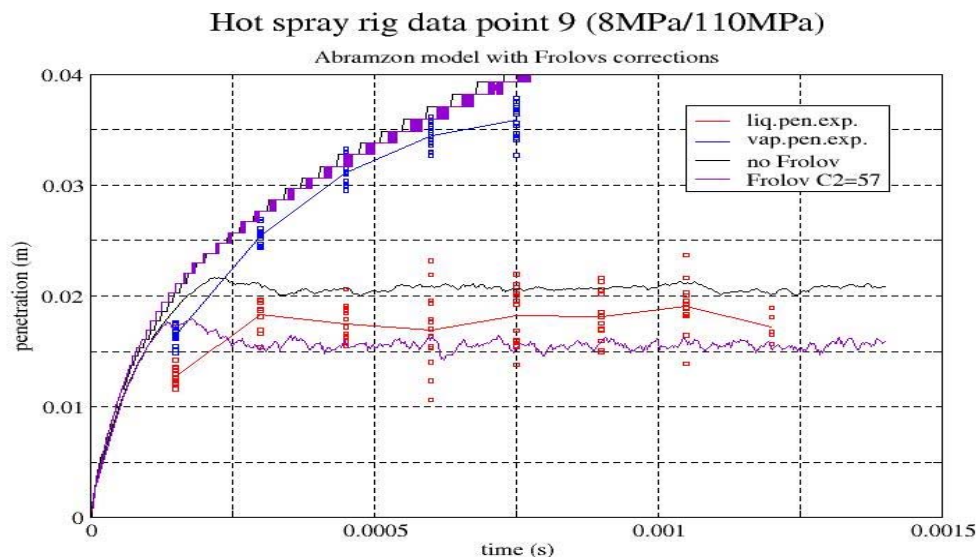


Slika 47. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za sedmu mjernu točku



Slika 48. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave* model) za osmu mjernu točku



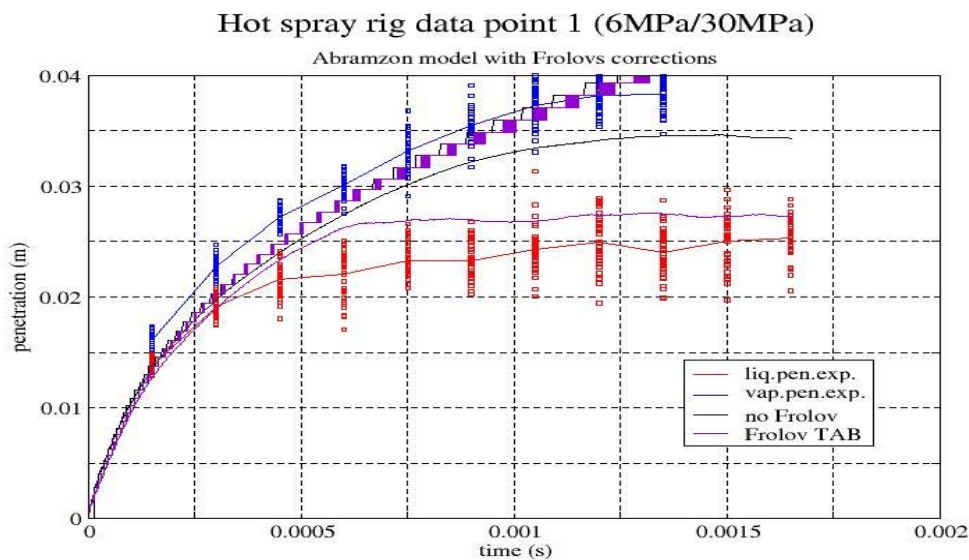


Slika 49. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (*Wave model*) za devetu mjernu točku

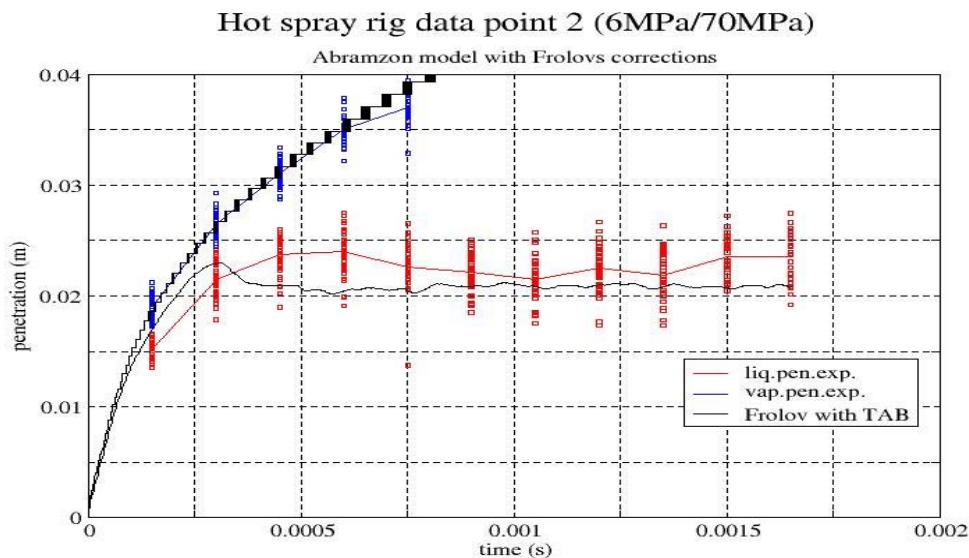
#### 4.4.1. Analiza rezultata za Abramzon model isparavanja uz Frolovu korekciju s *Wave modelom* razdvajanja kapljica

Primjetan je znatan utjecaj na krivulju penetracije tekuće faze, dok je plinovita faza skoro identična u odnosu na kalkulacije bez aktivacije Frolovih korekcija. Primjetan je jači utjecaj na višim tlakovima ubrizgavanja, a podešavanje je uspješno tek pri varijaciji parametra  $C2$ , uz korištenje limitera za deformaciju. Karakteristike pokazuju trend maksimuma penetracije oko vrijednosti  $C2=57$ , da bi nakon toga za neke točke došlo do pada karakteristike, a kod nekih do daljnjeg rasta. Računanjem s jednom kapljicom ustanovljeno je da kod aktivacije Frolova dolazi do izrazito brzog zagrijavanja kapljice do njene temperature zasićenja i dalje do isparavanja. Dakle, koristeći Frolov-ov dodatak najveći je utjecaj procesa isparavanja, a manje proces razdvajanje kapljice. To se je i moglo previdjeti jer aktiviramo samo jednu korekciju, rezultat nije toliko dominantan kao kad su sve korekcije aktivirane. To samo govori o jakoj interakciji unutar rješavanja svih jednažbi uz te dodatke.

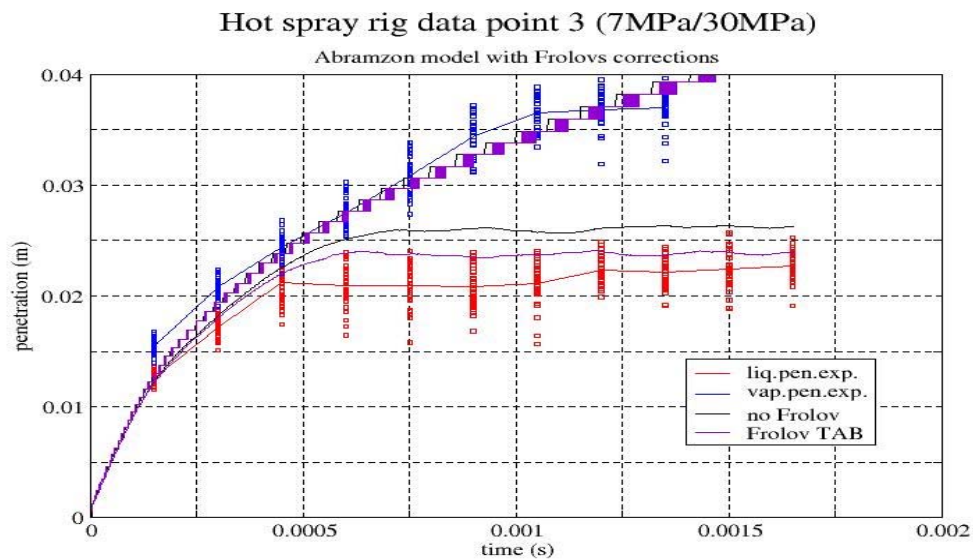
#### 4.5. Model isparavanja Abramzon/Sirignano uz Frolovu korekciju s TAB modelom razdvajanja kapljica



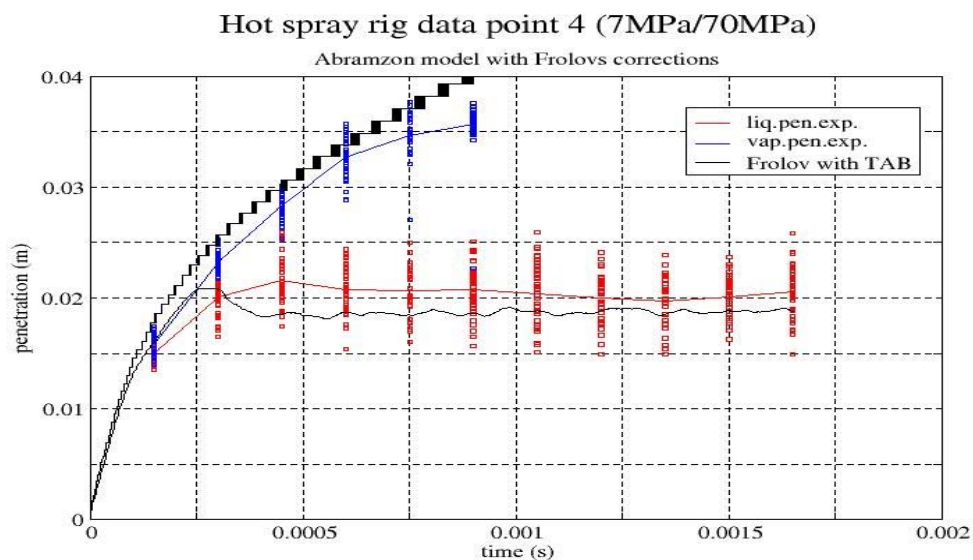
Slika 50. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za prvu mjernu točku



Slika 51. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za drugu mjernu točku

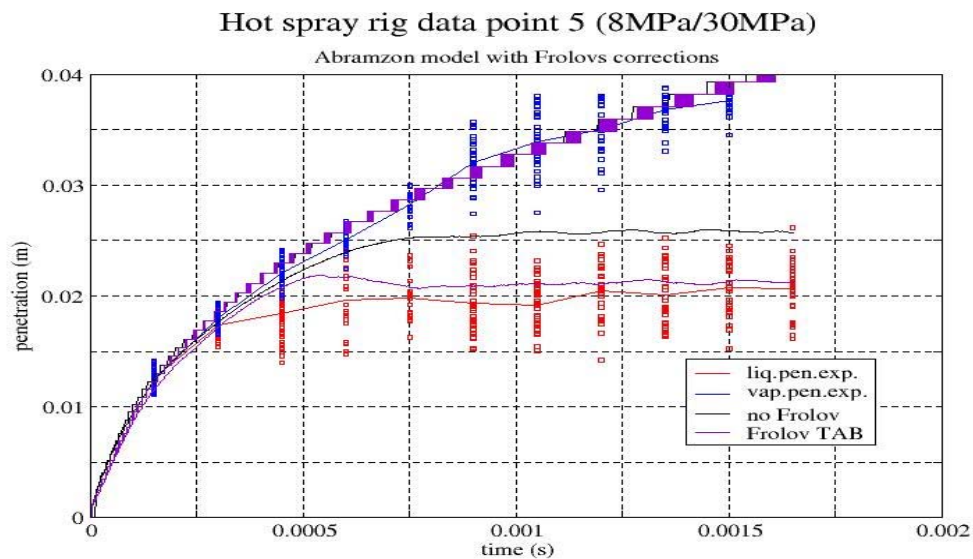


Slika 52. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za treću mjernu točku

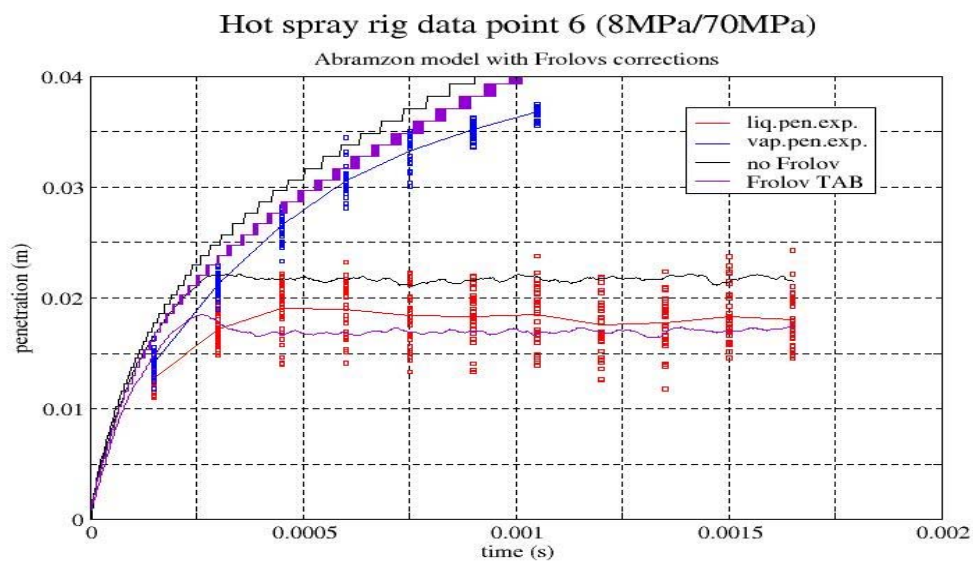


Slika 53. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za četvrtu mjernu točku

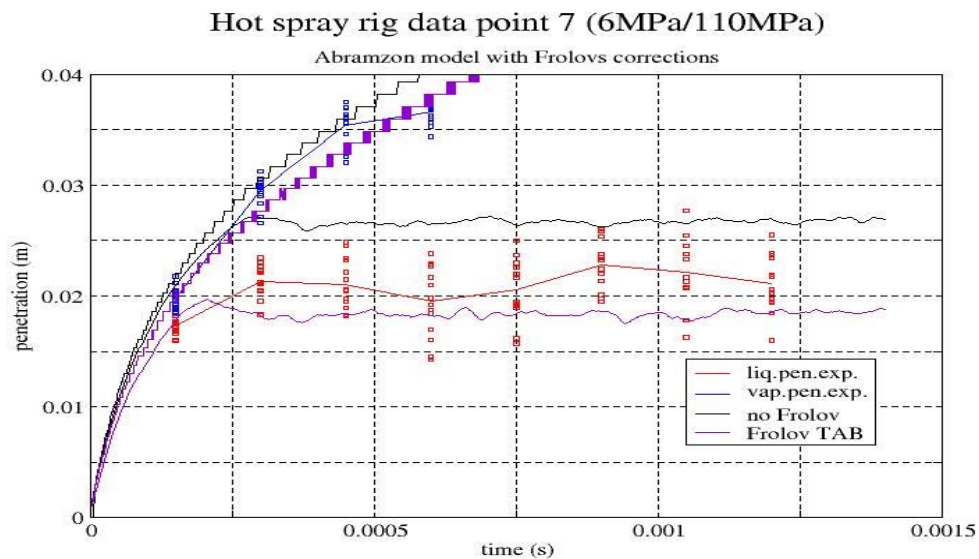




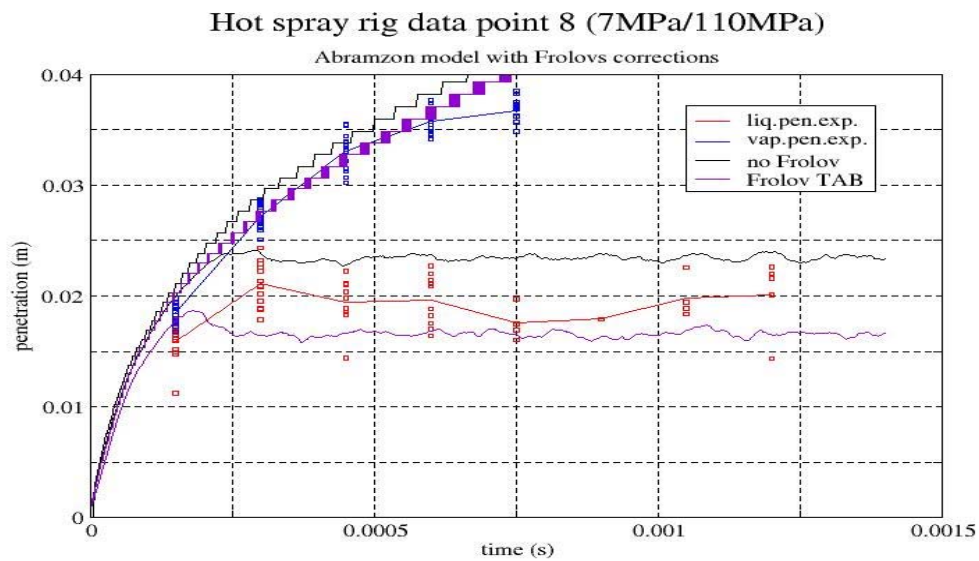
Slika 54. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za petu mjernu točku



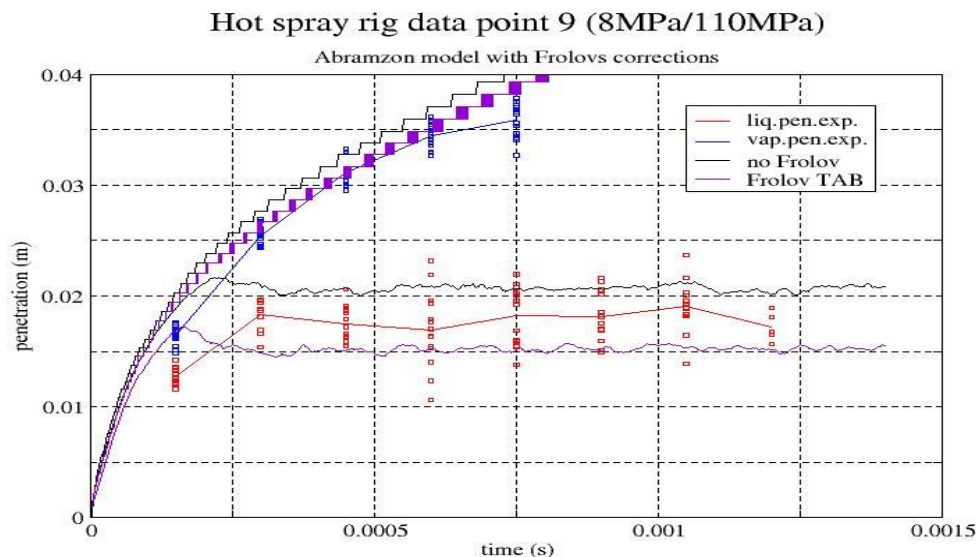
Slika 55. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za šestu mjernu točku



Slika 56. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za sedmu mjernu točku



Slika 57. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za osmu mjernu točku



Slika 58. Rezultati za Abramzon model s Frolov-im korekcijama (TAB model) za devetu mjernu točku

#### 4.5.1. Analiza rezultata za Abramzon model isparavanja uz Frolovu korekciju s TAB modelom razdvajanja kapljica

Za razliku od *Wave* modela, Tab model je pokazao konstantan trend penetracije s povećanjem ili smanjivanjem određenih parametara. Izrazito je dominantno ako smanjimo vrijednost C4 na vrijednost oko jedinice. Koristio se Chi model distribucije (dao je bolje rezultate). Za razliku od *Wave* modela TAB model u sebi ima određena ograničenja vrijednosti deformacije, pa se čini da bi to trebao biti razlog ne toliko boljih rezultata, već da promjenom određenih vrijednosti u modelu razdvajanja možemo očekivati nekakvu promjenu pozicije krivulje na grafu. Također je primjetno da pri povećavajući vrijednost za C5 također dobivamo povećanu penetraciju tekuće faze. Zanimljivo je da kao i kod svih kalkulacija nema nekog osobitog utjecaja promjena parametara na penetraciju isparene faze. Ovo bi moglo biti zbog samog modela računanja gdje se otprilike događa da su ispunjeni uvjeti za isparavanje.

## 5. ZAKLJUČAK

Tijekom kalkulacija primjećeno je da nema velikih odstupanja kod različitih veličina mreža i njihove gustoće. Aktivacijom Frolovih korekcija dolazi do primjetnog smanjivanja krivulje penetracije tekuće faze, dok utjecaj na plinovitu fazu nije toliko izražen. Primjetan je jak utjecaj deformacije kapljice, koji je najviše izražen kod mjerne točke 9 (devet). Primjenom limitera koji ne dopušta deformaciju ispod granične vrijednosti (da ne ide ispod oblika sfere), uspjeli smo povisiti vrijednost penetracije za devetu točku. Isto tako penetracija isparene faze za šestu točku nije se mogla podesiti da odgovara vrijednostima koji su dobiveni eksperimentalnim putem na Sveučilištu u Valenciji (UPV). Kod Frolovih dodataka se također primjećuje da dolazi do izrazito brzog zagrijavanja kapljice do njene temperature isparavanja, što je daleko brže od čistog Abramzon ili Dukowicz modela bez tih korekcija. Kod aktiviranih Frolovih korekcija s *Wave* modelom razdvajanja kapljica trend povećanja penetracije tekuće faze s povećanjem vrijednosti parametra C2 nije kontinuiran za sve točke, ali su rezultati približno podešeni za vrijednost C2=57. Za razliku od *Wave* modela, TAB model pokazuje izrazito linearan trend porasta penetracije tekuće faze. To podešavanje je bilo moguće modelom razdvajanja kapljica podešavajući parametre C4 (smanjujući do oko vrijednosti 1.1, te povećavajući parametar C5). TAB model nam je pomogao da se uvide neka ograničenja koja su primjećena (a nisu implementirana u *Wave* modelu), da budu sastavni dio *Wave* modela.

## 6. LITERATURA

- [1] Zhiyu Han, Rolf D. Reitz, *Seeing reduced diesel emissions*, Mechanical engineering magazine (memagazine), January 1998.
- [2] Maria D'Orazio, *Diploma Thesis*, Graz, 2006.
- [3] Dukowicz J.K., *A Particle- Fluid Numerical Model for Liquid Sprays*, J.Comp. Physics, 35, 229-253, 1980.
- [4] AVL FIRE v.8, *Spray*, AVL, Graz, 2005.
- [5] Shiller L., Naumann A.Z., *VDI 77*, 318-320, 1933.
- [6] Dukowicz J.K., *Quasi- steady droplet change in the presence of convection*, informal report Los Alamos Scientific Laboratory, LA7997-MS.
- [7] Ranz W.E., Marshall W.R., *Evaporation from drops*, Chem. Eng. Prog. 48, 141-146, 173-180, 1952.
- [8] Bose A.K., Pei C.T., *Evaporation Rates in Spray Drying*, Can. J. Chem., 42, 252, 1964.
- [9] Abramzon B., Sirignano W.A., *Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations*, AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting, 1988.
- [10] Liu A.B., Reitz R.D., *Modeling the Effects of Drop Drag and Break-up on Fuel Sprays*, SAE 930072.
- [11] O'Rourke P.J., Amsden A.A., *The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Break-up*, SAE 872089.
- [12] Gosman A.D., Ioannides E., *Aspects of Computer Simulation of Liquid- Fueled Combustors*, AIAA, 81-323, 1981.
- [13] O'Rourke P.J., Bracco F.V., *Modelling of Drop Interactions in Thick Sprays and Comparison With Experiments*, IMECHE, 1980.
- [14] O'Rourke P.J., *Statistical Properties and Numerical Implementation of a Model for Droplet Dispersion in Turbulent Gas*, J. Comput. Physics 83, 1989.

- [15] Frolov S. M., *Development and Implementation of New Drop Evaporation Model with Regard for Spray Effect and Nonuniform Temperature Distribution in Liquid*, Internal Report, Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow 2004.
- [16] Frolov S. M., *Development and Implementation of New Drop Evaporation Model with Regard for Drop Deformation and Internal Circulation of Liquid*, Internal Report, Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow 2004-2005.