Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Formiranje smeše i sagorevanje u motorima SUS - praktikum

Predrag D. Mrđa
Slobodan J. Popović



Beograd, 2025

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet
Katedra za motore

dr Predrag D. Mrđa
dr Slobodan J. Popović

FORMIRANJE SMEŠE I SAGOREVANJE U MOTORIMA SUS – PRAKTIKUM
– I izdanje –

Recenzenti:
dr Nenad L. Miljić
dr Marko N. Kitanović

Izdavač:
Univerzitet u Beogradu
MAŠINSKI FAKULTET
Ul. Kraljice Marije br.16, Beograd
tel. (011) 3370-760
fax. (011) 3370-364
www.mas.bg.ac.rs

Za izdavača:
Dekan, dr Vladimir Popović

Urednik: dr Nebojša Manić
Predsednik komisije za izdavačku delatnost
Mašinskog fakulteta u Beogradu

Tiraž: -

I izdanje odobrila:
Komisija za izdavačku delatnost
Mašinskog fakulteta u Beogradu
i
Dekan Mašinskog fakulteta
Odlukom br. 10/2025 od 11.07.2025. godine

Beograd, 2025. godine
ISBN 978-86-6060-219-2

© Sva prava zadržavaju autori. Nije dozvoljeno da, bez prethodne pismene dozvole autora, bilo koji deo ovog praktikuma bude snimljen, emitovan ili reprodukovan, uključujući ali ne i ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa.



UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Formiranje smeše i sagorevanje u motorima SUS - Praktikum

Predrag D. Mrđa

Slobodan J. Popović

Beograd, 2025

Formiranje smeše i sagorevanje u motorima SUS

Predgovor

Knjiga „Formiranje smeše i sagorevanje u motorima SUS – Praktikum“ napisana je u skladu sa nastavnim planovima i programima za nekoliko predmeta na Master akademskim studijama koji se iz oblasti motora sa unutrašnjim sagorevanjem predaju na Katedri za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu. To su pre svega predmeti Formiranje smeše i sagorevanje u motorima SUS i predmet Radni procesi motora. Oba predmeta se predaju na 1. godini MAS Modula za motore.

Praktikum je koncipiran tako da nakon teorijske analize pojedinih tema slede numerički primeri za rad na času i za samostalan rad. Uz veliku većinu zadataka priloženi su MathWorks® MATLAB programi i programske funkcije kao i dijagrami sa rešenjima. Ideja je da pored fundamentalnih znanja iz oblasti motora SUS, studenti korišćenjem ovog praktikuma, ovladaju softverskim alatima koji se zasnivaju na tekstualnom programiranju.

Svaka tematska oblast, a posebno one koje se odnose na matematičko modeliranje fenomena formiranja smeše, kritički se osvrću na literaturu uz akcenat na samostalnom studentskom istraživanju, poređenju rezultata iz različitih literaturnih izvora i analizi dostupne literature.

U ovom praktikumu obrađena je tematika fizičkih i hemijskih karakteristika radne materije motora SUS, odnosno gasova, gasnih smeša, vazduha, karakterističnih ugljovodonika i goriva. Dat je osvrt na hemijske reakcije oksidacije i stehiometrije sagorevanja za različite čiste ugljovodonike i goriva. Obrađena je tematika proračuna osnovnih veličina brizgača i detaljno je analizirana matematička interpretacija karakteristike mlaza i kapljica koje se formiraju procesom ubrizgavanja.

Autori posebnu zahvalnost duguju dr Nenadu Miljiću, vanrednom profesoru, dugogodišnjem vršiocu dužnosti šefa Katedre za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu, koji je oslanjajući se na svoje izuzetno tehničko znanje i pedagoško iskustvo, pomogao korisnim savetima i predlozima da ovaj udžbenik dostigne najviši nivo. Takođe, autori se zahvaljuju dr Marku Kitanoviću, docentu na Katedri za motore Mašinskog fakulteta koji je autorima pomogao u savladavanju izazova prilikom analize literature i implementaciji dostignuća drugih autora u ovoj oblasti.

Beograd, 2025.

Autori

Sadržaj

Spisak programa i funkcija **viii**

1 Svojstva gasova i gasnih smeša **1**

1.1 Viskoznost vazduha 1

1.1.1 Viskoznost vazduha u funkciji pritiska i temperature - model Saterlend 2

1.1.2 Viskoznost vazduha za visokopritisne uslove - model Saterlend 4

1.1.3 Promena viskoznost vazduha za različite vrednosti eksponenta politrope 5

1.2 Termodinamičke karakteristike idealnih gasova 7

1.2.1 Termodinamički parametri smeše idealnih gasova 12

1.3 Specifični toplotni kapacitet smeše vazduha i goriva 16

1.4 Polinomi za izračunavanje termodinamičkih parametara 17

1.4.1 Polinomi NASA sa sedam koeficijenata 18

1.4.2 Polinomi NASA sa devet koeficijenata 18

1.4.3 Zadatak: Primena polinoma NASA 7 19

1.4.4 Zadatak: Primena polinoma NASA 9 22

1.4.5 Primena i poređenje polinoma NASA 7 i NASA 9 25

1.4.6 Primena polinoma NASA-JANAF sa tri koeficijenta 25

2 Opšta svojstva ugljovodonika **26**

2.1 Gustina, modul stišljivosti i koeficijent stišljivosti ugljovodonika . . . 26

2.1.1 Uticaj temperature i pritiska na gustinu normalnog oktana $\boldsymbol{n}$-$\boldsymbol{C_8H_{18}}$ - model Tejt-Taman 26

2.1.2 Uticaj temperature i pritiska na modul stišljivosti alkana . . . 33

2.1.3 Poređenje gustina i modula stišljivosti različitih alkana 34

2.1.4 Poređenje gustina i modula stišljivosti alkana i alkohola 35

2.1.5 Poređenje gustina alkana i alkohola - model Abdusalam 36

2.1.6 Gustina binarne mešavine alkana - model Abdusalem 43

2.1.7 Gustina binarne mešavine n-heptana i etanola - model Abdusalem 43

2.1.8 Izračunavanje gustine binarne mešavine n-oktana i etanola - model Abdusalem . . . 43
2.1.9 Izračunavanje gustine različitih ugljovodonika u funkciji temperature - model Elbro . . . 44
2.1.10 Uticaj temperature i pritiska na gustinu n-oktana - poređenje modela . . . 49
2.2 Viskoznost ugljovodonika . . . 49
2.2.1 Zavisnost viskoznosti alkana od temperature - model Arenijus 49
2.2.2 Zavisnost viskoznosti alkana od pritiska - model Barus 53

3 Opšta svojstva goriva 58
3.1 Gustina, koeficijent i modul stišljivosti goriva . . . 58
3.1.1 Gustina dizel-goriva - model Pairi . . . 60
3.1.2 Poređenje zavisnosti gustina dizel-goriva zimskog i letnjeg kvaliteta - model Pairi . . . 65
3.1.3 Zavisnost gustine bio-dizela od temperature - model Pairi . . 69
3.1.4 Zavisnost gustine dizel-goriva od pritiska - model Tejt-Taman 69
3.1.5 Poređenje modela za izračunavanje gustine dizel-goriva 74
3.1.6 Gustina dizel-goriva - aproksimacija eksperimentalnih rezultata 74
3.1.7 Koeficijent stišljivosti dizel-goriva - aproksimacija ekperimentalnih podataka . . . 77
3.1.8 Gustina motornog benzina - model Trost . . . 82
3.2 Viskoznost goriva . . . 90
3.2.1 Dinamička viskoznost dizel-goriva - model Barus 90
3.2.2 Dinamička viskoznost dizel-goriva - aproksimacija eksperimentalnih podataka . . . 100
3.2.3 Viskoznost motornog benzina . . . 103
3.3 Kriva isparavanja goriva . . . 109
3.3.1 Određivanje pritisaka zasićene pare na osnovu Klausijus-Klapejronove jednačine . . . 110

4 Reakcije oksidacija i stehiometrija 115
4.1 Primeri potpune i nepotpune oksidacije C i H . . . 115
4.1.1 Potpuna oksidacija C u CO_2 . . . 116
4.1.2 Nepotpuna oksidacija C u CO . . . 116
4.1.3 Oksidacije CO u CO_2 . . . 117
4.1.4 Oksidacije H_2 u H_2O . . . 118

4.2 Stehiometrijsko sagorevanje elementarnih ugljovodonika i amonijaka 119
4.2.1 Stehiometrijsko sagorevanje propana C_3H_8 119
4.2.2 Stehiometrijsko sagorevanje butana C_4H_{10} 120
4.2.3 Stehiometrijsko sagorevanje oktana C_8H_{18} 121
4.2.4 Stehiometrijsko sagorevanje tetradekana $C_{14}H_{30}$ 121
4.2.5 Stehiometrijsko sagorevanje cikloheksana C_6H_{12} 122
4.2.6 Stehiometrijsko sagorevanje benzena C_6H_6 123
4.2.7 Stehiometrijsko sagorevanje amonijaka NH_3 124
4.3 Određivanje potrebne količine vazduha za stehiometrijsko sagorevanje elementarnog ugljovodoničnog goriva 125
4.3.1 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formule C_aH_b 126
4.3.2 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formulacije $C_aH_bO_c$ 127
4.3.3 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formulacije $C_aH_bO_cN_\mathrm{d}$ 128
4.3.4 Određivanje mase vazduha za stehiometrijsko sagorevanje normalnog oktana 129
4.3.5 Primeri stehiometrijskih odnosa za različita goriva 130
4.3.6 Određivanje mase vazduha za stehiometrijsko sagorevanje goriva u motoru SUS 130
4.4 Maseni udeo i ekvivalentna hemijska formula goriva 131
4.4.1 Određivanje masenog udela pojedinačnih komponenata goriva na osnovu hemijske formule goriva 132
4.4.2 Određivanje masenih udela gradivnih komponenti različitih goriva 132
4.4.3 Određivanje ekvivalentne hemijske formule smeše goriva na osnovu molarnih udela komponenata 133
4.4.4 Zadatak: Određivanje ekvivalentne hemijske formule za različite smeše goriva 134
4.4.5 Određivanje potrebne količine vazduha sa sagorevanje na osnovu masenih udela komponenti u gorivu 134
4.5 Toplotna moć goriva 136
4.5.1 Poređenje donje toplotne moći i emisije CO_2 za ugljovodonike iz reda alkana 138
4.5.2 Određivanja gornje i donje toplotne moći za zadati maseni sastav goriva 140

4.5.3 Određivanje donje i gornje toplotne moći goriva na osnovu masenih udela . . . 141
4.6 Niskotemperaturski model sagorevanja . . . 142

5 Računski zadaci - proračun brizgača 147
5.1 Efektivni parametri motora i karakteristika brizgača . . . 147
5.1.1 Određivanje trajanja radnog ciklusa motora . . . 148
5.1.2 Određivanje zapreminskog i masenog protoka vazduha . . . 150
5.1.3 Određivanje karakteristike brizgača - osnovni pristup . . . 151
5.1.4 Korekcija vremena ubrizgavanja na osnovu napona akumulatorske baterije . . . 152
5.1.5 Određivanje minimalne vrednosti karakteristike brizgača za date efektivne parametre rada motora . . . 153
5.1.6 Određivanje vremena rampe otvaranja brizgača . . . 156
5.1.7 Uticaj promene pritiska u magistrali goriva na vrednost karakteristike brizgača . . . 156
5.2 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe 156
5.2.1 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe na osnovu dva radna režima motora . . . 157
5.2.2 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe na osnovu više radnih režima . . . 158
5.3 Električne karakteristike brizgača . . . 164
5.3.1 Struja pobude visokoomskog brizgača . . . 164
5.3.2 Struja pobude niskoomskog brizgača . . . 165

6 Karakteristike mlaza i kapljica 171
6.1 Bezdimenzijske veličine - brzina isticanja, Rejnoldsov i Veberov broj . 171
6.1.1 Analiza uticaja uslova ubrizgavanja dizel-goriva na veličinu kapljice . . . 171
6.1.2 Analiza uticaja relativne brzine kretanja dizel-goriva na prečnik izdvojene kapljice . . . 176
6.1.3 Uticaj prečnika mlaznice na brzinu istrujavanja, Veberov i Rejnoldsov broj za primenu dizel-goriva . . . 181
6.1.4 Uticaj prečnika mlaznice na brzinu istrujavanja, Veberov i Rejnoldsov broj za primenu motornog benzina . . . 190
6.1.5 Analiza bezdimenzijskih veličina za slučaj ubrizgavanja benzina u završnoj fazi sabijanja . . . 191

6.2 Koeficijent pražnjenja i kavitacija u kanalu mlaznice 192
6.2.1 Poređenje modela Hol, Nakajama, Asimin i Lihtarovič 192
6.2.2 Uticaj radijusa zaobljenja ulazne ivice mlaznice - modeli Lihtarovič i fon Kuensberg 200
6.2.3 Uticaj dužine mlaznice - modeli Lihtarovič i fon Kuensberg . . 210
6.2.4 Slučaj konične mlaznice - model Desantes 214
6.2.5 Kritični kavitacioni broj - model Masijan 221
6.2.6 Uticaj radijusa ulazne ivice mlaznice na kritični kavitacioni broj - model Masijan 228
6.3 Raspad kapljice goriva 232
6.3.1 Uticaj pritiska gasa na vreme raspada mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom usisavanja - model Hirojasu-Arai 232
6.3.2 Uticaj pritiska gasa na vreme raspada mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom sabijanja - model Hirojasu-Arai 237
6.4 Dužina jezgra mlaza 240
6.4.1 Uticaj pritiska goriva u uslovima obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai 240
6.4.2 Uticaj pritiska goriva u uslovima obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai 246
6.4.3 Uticaj dužine kanala mlaznice - model Hirojasu-Arai 250
6.4.4 Uticaj radijusa ulazne ivice mlaznice - model Hirojasu-Arai . . 254
6.4.5 Uticaj prečnika izlaznog otvora mlaznice - model Hirojasu-Arai 257
6.4.6 Zadaci za samostalan rad 262
6.5 Prodor vrha mlaza 262
6.5.1 Prodor vrha mlaza - model Hirojasu-Arai 262
6.5.2 Prodor vrha mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai 267
6.5.3 Prodor vrha mlaza, uticaj veličine mlaznice - model Hirojasu-Arai 271
6.5.4 Prodor vrha mlaza, sistem obrazovanja smeše PCCI tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu Arai 275
6.5.5 Zadatak: Prodor vrha mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai 279
6.5.6 Prodor vrha mlaza, uticaj temperature gasa - model Hirojasu-Arai 283
6.5.7 Prodor vrha mlaza - poređenje modela Hirojasu, Vakuri i Dent 287
6.5.8 Prodor vrha mlaza, korekcija za početnu fazu isticanja - model Kostas-Taškiran 293

6.5.9 Prodor vrha mlaza - 1. korekcija modela Kostas-Taškiran za vreme raspada mlaza . . . 298
6.5.10 Zadatak: Prodor vrha mlaza - 2. korekcija modela Kostas-Taškiran za vreme raspada mlaza, Prodor mlaza (SP) - zadatak 10 . . . 300
6.5.11 Prodor mlaza - model Aregle . . . 303
6.5.12 Prodor mlaza - model Bol i Kegl . . . 309
6.5.13 Prodor vrha mlaza, slučaj ubrizgavanja motornog benzina - model Tijan . . . 316
6.5.14 Prodor vrha mlaza, ubrizgavanje benzina tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Tijan . . . 323
6.5.15 Prodor vrha mlaza tokom visokopritisnog dela ciklusa - modeli Tijan i Hirojasu-Arai . . . 331
6.6 Ugao konusa mlaza . . . 338
6.6.1 Uporedni prikaz modela Hirojasua, Araija i Zame . . . 338
6.6.2 Poređenje modela Hirojasua, Zame i Varde . . . 347
6.6.3 Uticaj veličine cilindrične mlaznice - modeli Hirojasu i Varde . 353
6.6.4 Uticaj dužine kanal mlaznice - modeli Hirojasu i Varde . . . 357
6.6.5 Određivanje uticaja koničnosti mlaznice - model Nađar . . . 362
6.6.6 Uticaj gustine gasa u komori na ugao konusa mlaza - model Nađar . . . 370
6.7 Srednji Sauterov prečnik . . . 377
6.7.1 Srednji Sauterov prečnik, slučaj ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu . . . 378
6.7.2 Srednji Sauterov prečnik, slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu . . . 388
6.7.3 Uticaj prečnika otvora mlaznice - model Hirojasu . . . 390
6.7.4 Uticaj dužine kanala mlaznice - model Hirojasu . . . 394
6.7.5 Slučaj ubrizgavanja benzina - model Hirojasu . . . 398
6.7.6 Slučaj ubrizgavanja benzina - model Elkotb . . . 404
6.7.7 Uticaj prečnika mlaznice - model Elkotb . . . 410
6.7.8 Prečnik kapljice nakon primarnog raspada - model Rajc . . . 416

Spisak slika **427**

Spisak tabela **435**

Bibliografija **437**

Spisak programa i funkcija

1.1 ViskoznostVazduha_01.m 3
1.2 VA_Sutherland.m 4
1.3 ViskoznostVazduha_03.m 6
1.4 TD_par_mesavine_IG.m 15
1.5 NASA_7_H2O_TD_parametri_2.m 19
1.6 NASA_9_H2O_TD_parametri_2.m 23

2.1 GustinaHC010.m 29
2.2 DHC_Tait.m 31
2.3 GustinaHC051.m 39
2.4 DHC_Abdussalam.m 42
2.5 GustinaHC060.m 47
2.6 DHC_Elbro.m 48
2.7 ViskoznostHC04.m 51
2.8 VHC_Arrhenius.m 52
2.9 ViskoznostHC05.m 54
2.10 VHC_Barus.m 56

3.1 GustinaGorivaD010.m 62
3.2 DFD_Payri.m 63
3.3 GustinaGorivaD040.m 67
3.4 GustinaGorivaD011.m 71
3.5 DFD_Tait.m 72
3.6 ro_fuel_fit_safarov.m 75
3.7 a_aprox.m 78
3.8 beta_aprox.m 80
3.9 GustinaGorivaG010.m 85
3.10 DFG_Trost.m 87
3.11 BMC_Klaus.m 88
3.12 ViskoznostD_01.m 94
3.13 UnitConverterViscosity.m 96

3.14 VFD_Tait.m 98
3.15 vis_dyn_fuel_fit_2.m 101
3.16 ViskoznostG_01.m 105
3.17 VFG_Vogel.m 106
3.18 ViskoznostG_04.m 107
3.19 VFG_Barus.m 108
3.20 V1_isparavanje.m 113

4.1 CmHn.m 139
4.2 sastav_CHON_s.m 144

5.1 main_brizgaci_V3.m 161
5.2 Struja_na_brizgacu.m 168

6.1 ReWeuD_01.m 173
6.2 UnitConverterSurfTens.m 175
6.3 ReWeuD_02.m 177
6.4 FuelData.m 179
6.5 uReWe_01.m 183
6.6 NozzleData.m 185
6.7 UnitConverterViscosity.m 186
6.8 UnitConverterDensity.m 187
6.9 NozzleVelocityTh.m 188
6.10 dlqReynolds.m 188
6.11 dlqWeber.m 189
6.12 DC_001.m 194
6.13 DC_Hall.m 197
6.14 DC_Nakayama.m 198
6.15 DC_Asihmin.m 199
6.16 DC_Lichtarowicz.m 199
6.17 DC_002.m 202
6.18 DC_vonKuensberg.m 205
6.19 CNCrit_Macian.m 207
6.20 CavitationNumber.m 209
6.21 DC_003.m 211
6.22 DC_004.m 216
6.23 DC_Desantes.m 219
6.24 kavitacija_0040.m 223
6.25 CavNumTh.m 226

6.26 kavitacija_0050.m 229
6.27 VremeRaspadaMlaza01.m 233
6.28 SBT_Hiroyasu.m 235
6.29 VremeRaspadaMlaza02.m 237
6.30 JezgroMlaza01.m 241
6.31 UnitConverterDensity.m 244
6.32 NozzleVelocity.m 244
6.33 SBL_Hiroyasu.m 245
6.34 JezgroMlaza02.m 248
6.35 JezgroMlaza03.m 251
6.36 JezgroMlaza04.m 255
6.37 JezgroMlaza05.m 258
6.38 ProdorMlaza01.m 264
6.39 STP_Hiroyasu.m 266
6.40 ProdorMlaza02.m 269
6.41 ProdorMlaza03.m 272
6.42 ProdorMlaza04.m 276
6.43 ProdorMlaza05.m 281
6.44 ProdorMlaza06.m 285
6.45 ProdorMlaza081.m 291
6.46 ProdorMlaza071.m 296
6.47 ProdorMlaza073.m 301
6.48 ProdorMlaza082.m 305
6.49 STP_Arregle.m 308
6.50 ProdorMlaza083.m 311
6.51 SBT_Kegl.m 314
6.52 STP_Bohl.m 314
6.53 STP_Kegl_01.m 315
6.54 ProdorMlaza100.m 318
6.55 STP_TianNV.m 320
6.56 STP_TianV.m 321
6.57 ProdorMlaza101.m 325
6.58 ProdorMlaza102.m 332
6.59 UgaoKonusaMlaza_01.m 341
6.60 SCA_Hiroyasu1980.m 345
6.61 SCA_Zama2011.m 346
6.62 SCA_Hiroyasu1990.m 347

6.63 UgaoKonusaMlaza_02.m 349
6.64 SCA_Varde.m 352
6.65 UgaoKonusaMlaza_03.m 355
6.66 UgaoKonusaMlaza_04.m 359
6.67 UgaoKonusaMlaza_05.m 365
6.68 SCA_Najar.m 369
6.69 SMD_01.m 381
6.70 SMD_Hiroyasu.m 387
6.71 SMD_03.m 391
6.72 SMD_05.m 400
6.73 SMD_06.m 405
6.74 SMD_07.m 412
6.75 SMD_08.m 419
6.76 DDBU1_Reitz.m 425

1 Svojstva gasova i gasnih smeša

U termodinamici se materija tretira kao čista supstanca ili smeša supstanci (mešavina). Pod čistom supstancom se podrazumeva supstanca čiji su svi molekuli isti (slični), odnosno koji nisu različiti u hemijskom smislu. Smeša se sastoji od dve ili više čistih supstanci. Primeri čistih supstanci su: voda, etil-alkohol, azot, amonijak, gvožđe itd. Primeri za smeše su: vazduh (sastoji se od azota, kiseonika i brojnih drugih gasova), vodeni rastvor amonijaka, vodeni rastvor etil-alkohola, različite legure metala itd. Čiste supstance koje čine smešu, nazivaju se komponente ili sastojci.

1.1 Viskoznost vazduha

Dinamička viskoznost vazduha se obično izračunava po široko rasprostranjenom izrazu prema Saterlendu (*Sutherland*) [1], u sledećem obliku:

$$\mu\,(p,T) = \mu\,(p_0,T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right) \tag{1.1}$$

$$\mu\,(p_0,T_0) = 1{,}716 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Pas} \tag{1.2}$$

gde su veličine definisane na sledeći način:

p_0 Referentni pritisak [Pa];

T_0 Referentna temperatura [K];

$\mu\,(p_0,T_0)$ Dinamička viskoznost pri referentnim uslovima [Pas];

$\mu\,(p,T)$ Dinamička viskoznost na zadatom pritisku i temperaturi [Pas];

$C = 110{,}4$ Konstanta za vazduh [K].

Kinematska viskoznost vazduha ν [$^{\mathrm{m}^2}/_{\mathrm{s}}$] izračunava se iz poznate vrednosti za dinamičku viskoznost i gustinu vazduha koja se može dobiti primenom jednačine stanja za zadate vrednosti pritiska i temperature:

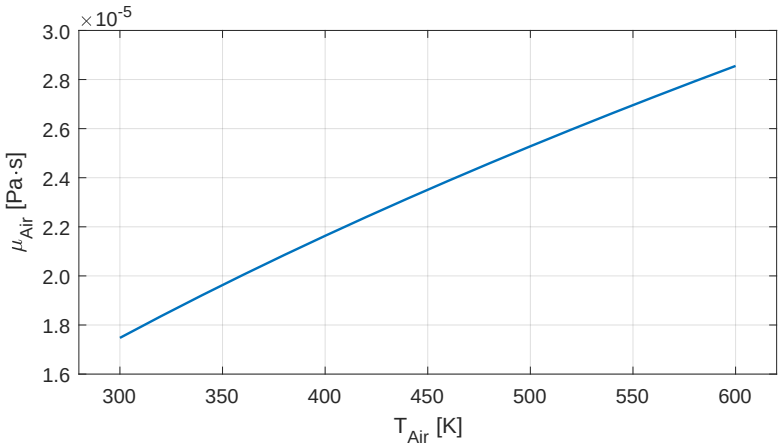
$$\nu\,(p,T) = \frac{\mu\,(p,T)}{\rho\,(p,T)} = \frac{\mu\,(p,T) \cdot R \cdot T}{p} \tag{1.3}$$

1.1.1 Viskoznost vazduha u funkciji pritiska i temperature - model Saterlend

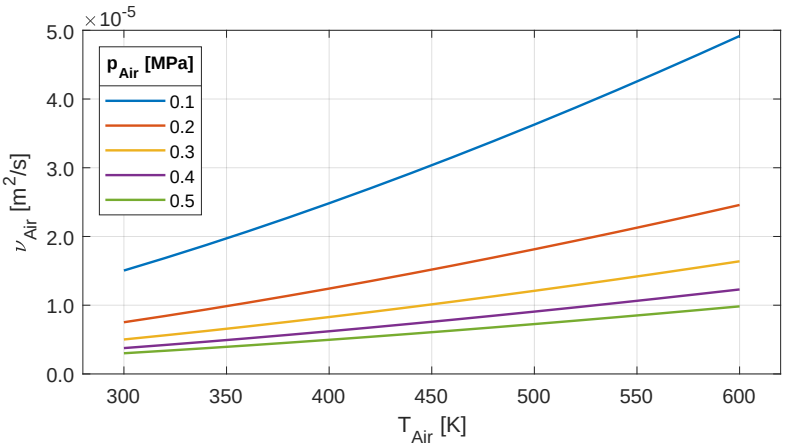
Izračunati promenu dinamičke i kinematske viskoznosti vazduha u zavisnosti od temperature vazduha primenom modela Saterlend za slučaj obrazovanja smeše pri niskim pritiscima. Pretpostaviti da se temperatura vazduha menja u opsegu od 300 K do 600 K sa korakom od 20 K, a pritisak u opsegu od 0,1 MPa do 0,5 MPa sa korakom od 0,1 MPa. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost dinamičke viskoznosti od temperature za diskretne vrednosti pritiska;
- Dijagram 2: zavisnost kinematske viskoznosti od temperature za zadate diskretne vrednosti pritiska.

Rešenje



Slika 1.1: Zavisnost dinamičke viskoznosti vazduha od temperature.



Slika 1.2: Zavisnost kinematske viskoznosti vazduha od temperature za zadate diskretne vrednosti pritiska.

Program 1.1: `ViskoznostVazduha_01.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti vazduha u zavisnosti od
% temperature
% Opseg pritisaka koji odgovara niskopritisnom delu ciklusa
% Model Sutherland
% C.T. Crowe, J. A. Robertson, D. F. Elger
% Engineering fluid mechanics
% 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-38482-8, 2001

%https://iem.ca/pdf/resources/Fluid%20Mechanics,%207th%20Ed.%20(Mcgraw-Hill%20
    Series%20in%20Mechanical%20Engineering).pdf
% str. 66, izraz 1.27

clc;
close all;
clear;

% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TAirMin = 300;
TAirMax = 600;
dTAir = 20;
TAir= TAirMin : dTAir : TAirMax;
[mT nT] = size(TAir);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pAir = 1.0E+05 : 1.0E+05 : 5.0E+05;
[mp np] = size(pAir);

% Izračunavanje dinamičke i kinematske viskoznosti vazduha u [Pa*s], [m2/s]
for i = 1:1:np
    for j = 1:1:nT
        [ViscDynAir(i,j), ViscKinAir(i,j)]=VA_Sutherland(pAir(1,i),TAir(1,j));
    end
end

colororder('default');

figure(1)
plot(TAir,ViscDynAir(1,:),'-','LineWidth',1.2);
grid on;
hold on;
xlabel('T_{Air} [K]');
ylabel('\mu_{Air} [Pa\cdots]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(TAirMin-dTAir),(TAirMax+dTAir)]);

figure(2)
plot(TAir,ViscKinAir(:,:),'-','LineWidth',1.2);
grid on;
hold on;
xlabel('T_{Air} [K]');
```

```
ylabel('\nu_{Air} [m^2/s]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(TAirMin-dTAir),(TAirMax+dTAir)]);
LegendTitle={'p_{Air} [MPa]'};
LegendLabel=num2str([pAir]'.*1E-06,'%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,LegendTitle);
```

Program 1.2: `VA_Sutherland.m`

```
function [ViscDynAir, ViscKinAir]=VA_Sutherland(pAir,TAir)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti vazduha u zavisnosti od
% temperature
% Model Sutherland
% C.T. Crowe, J. A. Robertson, D. F. Elger
% Engineering fluid mechanics
% 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-38482-8, 2001


RAir = 287;                 % J/kg/K
rhoAir = pAir./(RAir.*TAir);   % kg/m3
% pregled korišćenih oznaka
% ViscDynAir0          [Pa*s]   dinamička viskoznost vazduha @T0
% ViscDynAir           [Pa*s]   dinamička viskoznost vazduha @T
% TAir0                [K]      referentna temperatura vazduha
% TAir                 [K]      temperatura vazduha
% pAir                 [Pa]     pritisak vazduha
% RAir                 [J/kgK]  gasna konstanta za vazduh
% C                    [K]      konstanta

% Konstante
ViscDynAir0 = 1.716E-05;
TAir0 = 293;
C = 110.4;

% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
kT1 = (TAir./TAir0).^(+1.5);
kT2 = (TAir0+C)./(TAir+C);
ViscDynAir = ViscDynAir0.*kT1.*kT2;

% Izračunavanje kinematske viskoznosti
ViscKinAir = ViscDynAir./rhoAir;
```

1.1.2 Viskoznost vazduha za visokopritisne uslove - model Saterlend

Izračunati promenu dinamičke viskoznosti vazduha u zavisnosti od temperature vazduha primenom modela Saterlend za slučaj obrazovanja smeše pri pritiscima koji odgovaraju visokopritisnom delu ciklusa motora. Pretpostaviti da se temperatura

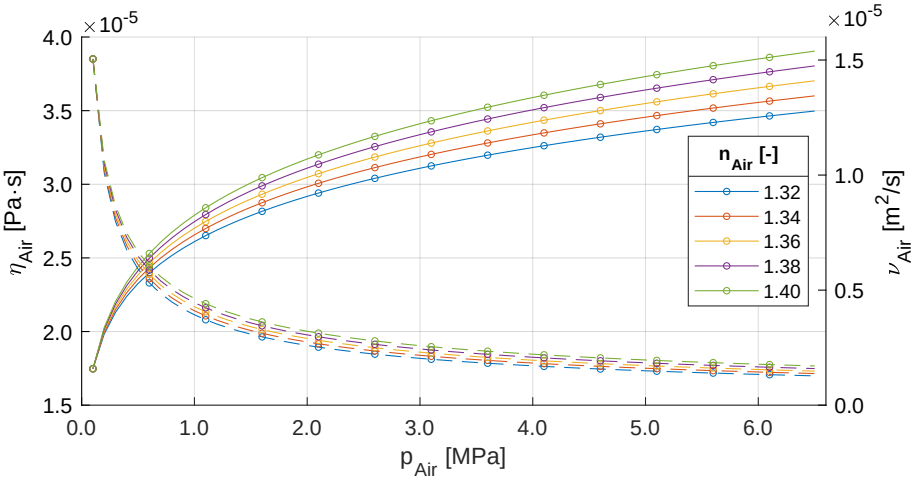
vazduha menja u opsegu od 300 K do 1000 K u koracima od 50 K, a pritisak u opsegu od 0,5 do 6,5 MPa sa korakom od 1,5 MPa. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost dinamičke viskoznosti od temperature;
- Dijagram 2: zavisnost kinematske viskoznosti od temperature za zadate diskretne vrednosti pritiska.

1.1.3 Promena viskoznost vazduha za različite vrednosti eksponenta politrope

Izračunati promenu dinamičke viskoznosti vazduha primenom modela Saterlend (Sutherland) za slučaj obrazovanja smeše pri pritiscima koji odgovaraju visokopritisnom delu ciklusa motora polazeći od pretpostavke o politropskoj promeni stanja tokom takta sabijanja. Pretpostaviti da je priroda razmene toplote gasa sa okolinom takva da je promena stanja gasa sa konstantnim eksponentom politrope. Pretpostaviti početnu temperaturu vazduha od 300 K i promenu pritiska tokom sabijanja u opsegu od 0,5 do 6,5 MPa sa korakom od 1,0 MPa. Proračun sprovesti za 5 različitih vrednosti eksponenta politrope u opsegu od 1,32 do 1,40. Rezultate proračuna prikazati grafički, objedinjeno na istom dijagramu, sa odgovarajućim razmerama za dinamičku viskoznost na levoj i kinematsku viskoznost na desnoj y-osi.

Rešenje



Slika 1.3: Objedinjeni prikaz zavisnost dinamičke i kinematske viskoznosti vazduha u funkciji pritiska za zadate diskretne vrednosti eksponenta politrope.

Program 1.3: `ViskoznostVazduha_03.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti vazduha u zavisnosti od
% temperature i pritiska
% Opseg pritisaka koji odgovara visokopritisnom delu ciklusa
% Model Sutherland
% C.T. Crowe, J. A. Robertson, D. F. Elger
% Engineering fluid mechanics
% 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-38482-8, 2001

clc;
close all;
clear all;

% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TAirMin=300;
% TAirMax=1000;
% dTAir=25;
% TAir=TAirMin:dTAir:TAirMax;
% [mT nT]=size(TAir);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pAirMin=1.0E+05;
pAirMax=65.0E+05;
dpAir=1.0E+05;
pAir=pAirMin:dpAir:pAirMax;
[mp np]=size(pAir);

% kapaMin=1.32;
% kapaMax=1.40;
% dkapa=0.20;
% kapa=kapaMin:dkapa:kapaMax
kapa=1.32:0.02:1.40
[mk nk]=size(kapa);

% Izračunavanje dinamičke i kinematske viskoznosti vazduha u [Pa*s], [m2/s]
for i=1:1:nk
    for j=1:1:np
        TAir(i,j)=TAirMin.*((pAir(1,j)./pAirMin).^((kapa(1,i)-1)./kapa(1,i)));
        [ViscDynAir(i,j), ViscKinAir(i,j)]=VA_Sutherland(pAir(1,j),TAir(i,j));
    end
end

colororder('default');

figure(1)
plot(pAir.*1.0E-06,ViscDynAir,'-o','MarkerSize',3.0,'MarkerIndices',1:5:np);
grid on;
hold on;
xlabel('p_{Air} [MPa]');
ylabel('\mu_{Air} [Pa\cdots]');
xtickformat('%.1f');
ytickformat('%.1f');
```

```
xlim([(pAirMin-dpAir).*1.0E-06,(pAirMax+dpAir).*1.0E-06]);
LegendTitle={'n_{Air} [-]'};
LegendLabel=num2str(kapa','%.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
title(lgd,LegendTitle);

figure(2)
plot(pAir.*1.0E-06,ViscKinAir,'-o','MarkerSize',3.0,'MarkerIndices',1:5:np);
grid on;
hold on;
xlabel('p_{Air} [MPa]');
ylabel('\nu_{Air} [m^2/s]');
xtickformat('%.1f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(pAirMin-dpAir).*1.0E-06,(pAirMax+dpAir).*1.0E-06]);
LegendTitle={'n_{Air} [-]'};
LegendLabel=num2str(kapa','%.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
title(lgd,LegendTitle);

figure(3);
yyaxis left;
colororder('default');
plot(pAir.*1.0E-06,ViscDynAir,'-o','MarkerSize',3.0,'MarkerIndices',1:5:np);
grid on;
hold on;
ylabel('\eta_{Air} [Pa\cdots]');
ytickformat('%.1f');

yyaxis right;
colororder('default');
plot(pAir.*1.0E-06,ViscKinAir,'--o','MarkerSize',3.0,'MarkerIndices',1:5:np);
hold on;
ylabel('\nu_{Air} [m^2/s]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('p_{Air} [MPa]');
xtickformat('%.1f');
xlim([(pAirMin-dpAir).*1.0E-06,(pAirMax+dpAir).*1.0E-06]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendTitle={'n_{Air} [-]'};
LegendLabel=num2str(kapa','%.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','East');
title(lgd,LegendTitle);
```

1.2 Termodinamičke karakteristike idealnih gasova

Za analizu parametara idealnih ciklusa motora SUS, potrebno je odrediti promene stanja radne materije prilikom izentropskog sabijanja (adijabatski i povratni proces), sagorevanja, izentropske ekspanzije i izduvavanja. Za idealne gasove, relacija koja povezuje pritisak p, temperaturu T i zapreminu V je jednačina stanja idealnog gasa

može biti prikazana u jednom od sledećih oblika:

$$\begin{aligned} pV &= NR_uT \\ pV &= mRT \\ pv &= RT \end{aligned} \tag{1.4}$$

gde su:

N [-] Broj molova;

R_u [kJ/kmolK] Univerzalna gasna konstanta;

m [kg] Masa gasa;

V [m^3] Zapremina gasa.

Jedna od najvažnijih karakteristika smeše je njen sastav. Sastav smeše se najčešće predstavlja pomoću masenog ili molarnog udela date komponente u smeši.

Ukoliko sa m_i označimo masu date komponente u smeši, ukupna masa smeše m će biti:

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{1.5}$$

Maseni udeo, g_i svake komponente se određuje prema:

$$g_i = \frac{m_i}{m} \tag{1.6}$$

odakle sledi suma masenih udela:

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = 1 \tag{1.7}$$

Ukupan broj molova date smeše N je zbir broja molova svih n komponenti:

$$N = \sum_{i=1}^{n} n_i \tag{1.8}$$

Molarni udeo se određuje na osnovu relacije:

$$r_i = \frac{n_i}{N} \tag{1.9}$$

Uglavnom se apsolutne veličine označavaju velikim slovima, a mala slova su rezervisana za označavanje specifičnih veličina (svedenih na masu - kg, ili na količinu materije - kmol).

Relativna molarna masa, M_r, date smeše je:

$$M_r = \sum_{i=1}^{n} r_i M_{ri} \tag{1.10}$$

i predstavlja vezu između molarnih specifičnih veličina i masenih specifičnih veličina. Na primer, gasna konstanta R svedena na masu, prema univerzalnoj gasnoj konstanti R_u koja je svedena na količinu supstance je u odnosu:

$$R = \frac{R_u}{M_r} \tag{1.11}$$

gde je $R_u = 8{,}314\ ^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmolK}}$, tako da za suv vazduh koji ima molarnu masu $M_r\,(A) = 28{,}9647\ ^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$, gasna konstanta, svedena na masu, iznosi $R = 287{,}058\ ^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{kgK}}$.

Unutrašnja energija U [kJ] date smeše se izračunava kao zbir proizvoda specifičnih unutrašnjih energija u_i i mase m_i svake od ukupno n komponenti:

$$U = \sum_{i=1}^{n} m_i u_i \tag{1.12}$$

Specifična unutrašnja energija smeše u $\left[^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}\right]$ je:

$$u = \sum_{i=1}^{n} g_i u_i \tag{1.13}$$

gde je g_i maseni udeo svake komponente.

Unutrašnja energija smeše može takođe da se izrazi na osnovu poznate količine materije date komponente u smeši n_i, i specifične molarne unutrašnje energije $\overline{u}_i$:

$$U = \sum_{i=1}^{n} n_i \overline{u}_i \tag{1.14}$$

Specifična molarna unutrašnja energija $\overline{u}$ $\left[^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmol}}\right]$ se određuje na osnovu poznatog molarnog udela i poznatih specifičnih unutrašnjih energija svake komponente:

$$\overline{u} = \sum_{i=1}^{n} r_i \overline{u}_i \tag{1.15}$$

Analogne relacije za entalpiju H [kJ] i specifičnu entalpiju h $\left[^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}\right]$ se dobijaju kao:

$$H = \sum_{i=1}^{n} m_i h_i \tag{1.16}$$

$$h = \sum_{i=1}^{n} g_i h_i \tag{1.17}$$

Entalpija svake komponente h_i se razmatra pri totalnom pritisku P, i po definiciji sledi:

$$h_i = u_i + pv_i \tag{1.18}$$

gde je $v_i = \dfrac{V}{m_i}$ (specifična zapremina svedena na masu).
Ukoliko se specifični parametri svedu na molarne, sledi:

$$H = \sum_{i=1}^{n} n_i \overline{h}_i \tag{1.19}$$

$$\overline{h} = \sum_{i=1}^{n} r_i \overline{h}_i \tag{1.20}$$

Entalpija se definiše korišćenjem standardizovanih referentnih stanja u smislu $T = 298{,}15\,\mathrm{K}$ i $P_0 = 1\,\mathrm{bar}$.

Standardizovana entalpija se sastoji iz dva dela:

- entalpija hemijske veze (energija koja je potrebna da bi supstanca bila formirana od svojih elemenata) i naziva se entalpija formiranja $\overline{h}_f^0$,
- i specifične entalpije koja se odnosi na temperaturu T.

Vrednosti specifične entalpije pri različitim uslovima (temperaturama) određuje se relativno na osnovu standardnog referentnog stanja prema relaciji:

$$\overline{h}_i\,(T) = \overline{h}_f^0 + \left(\overline{h}_i\,(T) - \overline{h}_f^0\right) \tag{1.21}$$

U literaturi se mogu pronaći tabelarni podaci za elementarne gasove i produkte sagorevanja. Entalpija formiranja $\overline{h}_f^0$ za za stabilne molekule elemenata, kao što su vodonik H_2, kiseonik O_2, azot N_2 i ugljenik $C_{(s)}$, je $\overline{h}_f^0 = 0\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}$ pri temperaturi $T = 298{,}15\,\mathrm{K}$.

Za jedinjenja, entalpija formiranja je entalpija koja je potrebna za stvaranje stabilnog jedinjenja od elementarnih čestica materije (atoma). Specifična entalpija formiranja za CO_2, izražena u masenim i molarnim jedinicama je $-393522\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmol}}$ i $-8940\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}$, respektivno. Zbog razlike u energiji veza, entalpija CO_2 $(-8940\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}})$ pri standardnim referentnim uslovima je manja nego entalpija elemenata C i $O_2(0\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}})$ pri istim referentnim uslovima. Slično prethodnom, entalpija formiranja vodene pare (H_2O) svedena na masene i molarne jedinice je $-241826\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmol}}$ i $-13424\ {}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}$, respektivno.

Specifični toplotni kapaciteti pri konstantnom pritisku i pri konstantnoj zapremini definišu se na sledeći način:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \tag{1.22}$$

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \tag{1.23}$$

Korisne relacije između specifičnih toplotnih kapaciteta c_p , c_v i gasne konstante R mogu se formulisati na osnovu definicije entalpije h:

$$\begin{aligned} h &= u + pv \\ &= u + RT \end{aligned} \tag{1.24}$$

u diferencijalnom obliku:

$$\begin{aligned} dh &= du + RdT \\ c_p dT &= c_v dT + RdT \end{aligned} \tag{1.25}$$

tako da je:

$$R = c_p - c_v \tag{1.26}$$

$$\frac{c_v}{R} = \frac{1}{\kappa - 1} \tag{1.27}$$

$$\frac{c_p}{R} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \tag{1.28}$$

gde je eksponent izentrope $\kappa = \dfrac{c_p}{c_v}$.

Entropija smeše S [kJ/K] jednaka je zbiru entropija svake komponente:

$$S = \sum_{i=1}^{n} m_i s_i = \sum_{i=1}^{n} n_i \overline{s}_i \tag{1.29}$$

Iz Gibsove (*Gibbs*) jednačine, masena specifična entropija s_i [kJ/kgK] i molarna specifična entropija $\overline{s}_i$ [kJ/molK] komponente i su:

$$s_i\,(T,p) = s_i^0\,(T) - R_i \ln\left(\frac{p_i}{p_0}\right) \tag{1.30}$$

$$\overline{s}_i\,(T,p) = \overline{s}_i^0\,(T) - R_u \ln\left(\frac{p_i}{p_0}\right) \tag{1.31}$$

Entropija date komponente se analizira pri parcijalnom pritisku p_i, definisanom kao:

$$p_i = r_i p \tag{1.32}$$

što uslovljava korišćenje Daltonovog zakona koji glasi da je pritisak smeše jednak zbiru parcijalnih pritisaka gasova koji čine smešu. Parcijalni pritisak određenog gasa u smeši, je onaj pritisak koji bi taj gas imao kada bi sam zauzimao zapreminu, koju zauzima smeša pri datoj temperaturi.

Standardno referentno stanje je takođe definisano za entropiju S. Treći zakon termodinamike, definiše da je entropija čistih elementa i mešavina jednaka nuli pri $T = 0\,\mathrm{K}$, što predstavlja temperaturu koja je referentna za entropiju. Vrednosti specifične entropije pri bilo kojim drugim stanjima sistema definisane su u odnosu na referentnu temperaturu. Članovi koji predstavljaju standardnu specifičnu entropiju (masena s_i^0, molarna $\bar{s}_i^0$) zavise samo od temperature T, i predstavljaju vrednosti za datu komponentu smeše i pri referentnom pritisku p_0, odnosno $p_i = p_0 = 1\,\mathrm{bar}$.

Tablične vrednosti za standardnu entropiju mogu da se nađu u literaturi, a kao primer za CO_2 pri $T = 298\,\mathrm{K}$ i $p_0 = 1\,\mathrm{bar}$ je $\bar{s}^0_{CO_2} = 213{,}794\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmolK}}$.

Kombinovanjem jednačina za entropiju smeše 1.29 i Gibsove jednačine 1.30 dolazi se do jednačina za masenu i molarnu specifičnu entropiju smeše sa izdvojenim članovima koji su funkcija pritiska i temperature:

$$s = -R \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \sum_{i=1}^{n} g_i \left(s_i^0 - R_i \ln r_i\right) \tag{1.33}$$

$$\bar{s} = -R_u \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \sum_{i=1}^{n} r_i \left(\bar{s}_i^0 - R_u \ln r_i\right) \tag{1.34}$$

Gibsova slobodna energija G smeše idealnih gasova je definisana kao:

$$G_e = H - TS = \sum_{i=1}^{n} n_i \bar{g}_i \tag{1.35}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} n_i \left(\bar{h}_i - T\bar{s}_i\right) \tag{1.36}$$

1.2.1 Termodinamički parametri smeše idealnih gasova

Izračunati molarnu masu M_i, specifičnu entalpiju h $[{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}]$, specifičnu entropiju svedenu na masu s $[{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgK}}]$ i Gibsovu slobodnu energiju (svedenu na masu) g_e $[{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}]$ za smešu produkata sagorevanja pri $p = 2000\,\mathrm{kPa}$ i $T = 1000\,\mathrm{K}$. Komponente i njihovi molarni udeli su dati u sledećoj tabeli 1.1:

Komponenta	r_i
CO_2	0,1090
H_2O	0,1210
N_2	0,6940
CO	0,0283
H_2	0,0455

Tabela 1.1: Komponente i njihovi molarni udeli.

U tabeli su date termodinamičke karakteristike pojedinih komponenti pri uslovima iz zadatka [2]:

Komponenta	r_i	$\overline{h}_f^0$	$\overline{h}_i - \overline{h}_f^0$	$\overline{s}_i^0$
		kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmolK
CO_2	0,109	-393522	33397	269,30
H_2O	0,121	-241826	26000	232,74
N_2	0,694	0	21463	228,17
CO	0,0283	-110527	21686	234,54
H_2	0,0455	0	20663	166,22

Tabela 1.2: Termodinamičke karakteristike komponenti.

Relativne molarne mase elemenata od kojih su sačinjene komponente se mogu pronaći u periodnom sistemu elemenata, a u ovom slučaju glase:

Komponenta	M_r
	kg/kmol
C	12,011
O	15,999
N	14,007
H	1,008

Tabela 1.3: Relativne molarne mase elemenata od kojih su sačinjene komponente smeše.

Smernice za rad:

1. Odrediti molarne mase svih komponenti;
2. Odrediti ukupnu molarnu masu smeše;
3. Odrediti specifičnu entalpiju svedenu na molarne jedinice;
4. Odrediti specifičnu entropiju svedenu na molarne jedinice;

5. Odrediti specifičnu Gibsovu slobodnu energiju svedenu na molarne jedinice;
6. Odrediti tražene veličine svedene na masene jedinice (iskoristiti podatak za molarnu masu smeše).
7. Rešenje zadataka realizovati formiranjem odgovarajućeg Matlab programa.

Rešenje

Maseni udeli i molarne mase molekula komponenti smeše su date u tabeli 1.4.

Komponenta	r_i	M_r
		$^{kg}/_{kmol}$
CO_2	0,1090	44,010
H_2O	0,1210	18,015
N_2	0,6940	28,013
CO	0,0283	28,010
H_2	0,0455	2,016

Tabela 1.4: Maseni udeli i molarne mase komponenti smeše.

$$M_r = \sum_{i=1}^{n} r_i M_{ri} = 27{,}302\,{}^{kJ}/_{kmol} \tag{1.37}$$

Specifična entalpija svedena na molarne jedinice:

Na osnovu podataka iz tabele 1.2 i jednačine 1.20 sledi:

$$\overline{h} = \sum_{i=1}^{n} r_i \overline{h}_i = -52047\,{}^{kJ}/_{kmol} \tag{1.38}$$

Specifična entropija svedena na molarne jedinice:

Na osnovu jednačine 1.34 dobija se:

$$\bar{s} = -R_u \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + \sum_{i=1}^{n} r_i \left(\overline{s}_i^0 - R_u \ln y_i\right) = 213{,}408\,{}^{kJ}/_{kmolK} \tag{1.39}$$

Specifična Gibsova slobodna energija svedena na molarne jedinice se određuje na osnovu jednačine 1.36:

$$\bar{g_e} = \overline{h} - T\bar{s} = -265455\,{}^{kJ}/_{kmol} \tag{1.40}$$

Tražene veličine svedene na masene jedinice:

$$h = {}^{\bar{h}}/_{M_r} = -1906{,}344\,{}^{kJ}/_{kgK}$$
$$s = {}^{\bar{s}}/_{M_r} = 7{,}816\,{}^{kJ}/_{kgK}$$
$$g_e = {}^{\bar{g}}/_{M_r} = 9722{,}914\,{}^{kJ}/_{kg}$$

Program 1.4: `TD_par_mesavine_IG.m`

```
clear
close all
clc
% Zadatak: Za produkte sagorevanja odrediti h,s,g svedene na kolicinu
% materije i svedene na masu. Dati su T i p produkata sagorevanja.
T = 1000; % [K] - temp. produkata sagorevanja
p = 2000e3; % [Pa] - pritisak produkata sagorevanja
Ru = 8.314; % [kJ/kmolK] - univerzalna gasna konstanta
p0 = 1.0e5; % [Pa] - referenti pritisak za spec. entropiju

% 1. Molarne mase svih komponenti
% Specifične (molarne) atomske mase elemenata Ar[kg/kmol]
% C O N H
Ar = [12.011 15.999 14.007 1.008];
% Molarne mase komponenti smese (prod. sag.) Mr[kg/kmol]
% CO2 H2O N2 CO H2
Mr = [Ar(1)+2.*Ar(2), 2.*Ar(4)+Ar(2), 2.*Ar(3), Ar(1)+Ar(2), 2.*Ar(4)];

% 2. Ukupna molarna masa smeše (prod. sag.)
% molarni udeli komponenti smeše (prod. sag.)
% CO2 H2O N2 CO H2
ri = [0.109 0.121 0.694 0.0283 0.0455];
% Ukupna molarna masa smese (prod. sag.) [kg/kmol]
MrMIX = sum(ri.*Mr);

% 3. Specifična entalpija svedena na broj molova [kJ/kmol]
% specifična entalpija formiranja svedena na količinu materije [kJ/kmol]
% CO2 H2O N2 CO H2
hf0_mol = [-393522 -241826 0 -110527 0];
% razlika specifične entalpije pri T=1000K i spec. entalpije formiranja(pri
% referentnoj temp. T0=298.15K) [kJ/kmol]
% CO2 H2O N2 CO H2
h_mol_razlika = [33397 26000 21463 21686 20663];
% spec. molarna entalpija smeše [kJ/kmol]
hMIX_mol = sum(ri.*(hf0_mol + h_mol_razlika));

% 4. Specifična entropija svedena na broj molova [kJ/kmolK]
% spec. entropija pri ref. uslovima (p=1bar) [kJ/kmolK]
% CO2 H2O N2 CO H2
s0_mol = [269.30 232.74 228.17 234.54 166.22];
% spec. entropija smeše svedena na količinu materije [kJ/kmolK]
sMIX_mol = -Ru.*log(p/p0) + sum(ri.* (s0_mol - Ru.*log(ri)));

% 5. Specifična gibsova slobodna energija [kJ/kmol]
g_mol = (hMIX_mol - T.*sMIX_mol);

% 6. izračunate vel. svedene na masene specifične vrednosti
hMIX_m = hMIX_mol./MrMIX; % [kJ/kg] - spec. masena entalpija smeše
sMIX_m = sMIX_mol./MrMIX; % [kJ/kgK] - spec. masena entropija smeše
gMIX_m = g_mol./MrMIX; % [kJ/kg] - spec. masena Gibsova slobodna energ.
```

1.3 Specifični toplotni kapacitet smeše vazduha i goriva

Specifični toplotni kapacitet predstavlja količinu toplote koju je potrebno dovesti sistemu, po jediničnoj masi gasa, da bi se temperatura podigla za jedan 1°C. Veza između toplote i promene temperature se definiše kao:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

gde je c specifični toplotni kapacitet gasa.

Ova relacija ne važi ukoliko dolazi do promene faze određene komponente sistema, zato što količina toplote dovedena ili odvedena tokom promene faze neće uticati na promenu temperature.

Termodinamičke karakteristike smeše goriva, vazduha i zaostalih produkata sagorevanja, ukoliko su poznati molarni udeli pojedinih komponenti, određuju se pomoću prethodnih relacija za entalpiju h, unutrašnju energiju u, entropiju s i specifičnu zapreminu v.

Određivanje specifičnog toplotnog kapaciteta pri konstantnom pritisku c_p je nešto složenije i zahteva detaljniju analizu. U uslovima ravnoteže, c_p ne zavisi samo od promene entalpije, nego i od promene sastava smeše koja je funkcija temperature. Po definiciji glasi:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \tag{1.41}$$

Veza između specifične masene entalpije i specifične molarne entalpije može da se izrazi kao $h = \overline{h}/M_r$, odnosno $h = \overline{h} \cdot \dfrac{1}{M_r}$ odakle sledi:

$$\frac{\partial h}{\partial T} = \frac{1}{M_r}\frac{\partial \overline{h}}{\partial T} + \overline{h}\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{1}{M_r}\right) \tag{1.42}$$

Za smešu takođe važi:

$$\overline{h} = \sum_{i=1}^{n} r_i \overline{h}_i \tag{1.43}$$

Diferenciranjem prethodne jednačine po temperaturi dobija se:

$$\frac{\partial \overline{h}}{\partial T} = \sum_{i=1}^{n} r_i \frac{\partial \overline{h}_i}{\partial T} + \sum_{i=1}^{n} \overline{h}_i \frac{\partial r_i}{\partial T} \tag{1.44}$$

Zamenom jednačine 1.44u jednačinu 1.42, a potom u jednačinu za specifični toplotni kapacitet 1.41 sledi:

$$c_p = \frac{1}{M_r}\left(\sum_{i=1}^{n} r_i \frac{\partial \overline{h}_i}{\partial T} + \sum_{i=1}^{n} \overline{h}_i \frac{\partial r_i}{\partial T}\right) + \overline{h}\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{1}{M_r}\right)$$
$$c_p = \frac{1}{M_r}\left(\sum_{i=1}^{n} r_i \overline{c}_{pi} + \sum_{i=1}^{n} \overline{h}_i \frac{\partial r_i}{\partial T}\right) - \frac{\overline{h}}{M_r^2}\frac{\partial M_r}{\partial T} \tag{1.45}$$

gde je $\overline{c}_p = c_p \cdot M_r$ i $M_r = \sum r_i M_{ri}$. Sređivanjem se dobija sledeći izraz:

$$c_p = \frac{1}{M_r}\left(\sum_{i=1}^{n} r_i \overline{c}_{pi} + \sum_{i=1}^{n} \overline{h}_i \frac{\partial r_i}{\partial T} - \frac{\overline{h}}{M_r}\sum_{i=1}^{n} M_{ri}\frac{\partial r_i}{\partial T}\right) \tag{1.46}$$

U jednačini 1.46 deo koji ne zavisi od $\dfrac{\partial r_i}{\partial T}$ (ne zavisi od promene sastava u funkciji temperature) označava se kao:

$$\overline{c}_{p,f} = \sum_{i=1}^{n} r_i \overline{c}_{pi} \tag{1.47}$$

Za određivanje specifičnog toplotnog kapaciteta smeše, važnu ulogu ima promena sastava smeše u funkciji temperature, odnosno pritiska $\left(\dfrac{\partial r_i}{\partial T}, \dfrac{\partial r_i}{\partial p}\right)$. U narednom poglavlju (1.4), biće prikazani metodi određivanja termodinamičkih parametara, kao što su specifični toplotni kapacitet c_p, specifična entalpija h i specifične standardna entropija s^0 u funkciji temperature za različite komponente (hemijska jedinjenja), prema modelima Gordon-Mek Brajd (*Gordon-McBride*) [3] i NASA-JANAF [4].

1.4 Polinomi za izračunavanje termodinamičkih parametara

Model Gordon-Mek Brajd predstavlja funkcionalne zavisnosti, sa empirijski određenim koeficijentima, čijim rešavanjem se dobijaju promene specifičnog toplotnog kapaciteta, specifične entalpije i specifične standardne entropije u funkciji temperature za različite materije. Stariji tip ovakve polinomske aproksimacije termodinamičkih karakteristika različitih materija sastoji se od sedam koeficijenata i opisan je u [3]. Istraživanje je sprovela NASA, tako da je široko prihvaćen naziv ovakvog modela *polinomi NASA sa sedam koeficijenata*, ili skraćeno NASA 7. Izvor koeficijenata polinoma je [5], a u [6] može se naći tabela u elektronskom obliku. Noviji tip polinomske aproksimacije ima devet koeficijenata i biće prikazan u odeljku 1.4.2.

1.4.1 Polinomi NASA sa sedam koeficijenata

Polinomi NASA 7 koji opisuju promenu specifičnog toplotnog kapaciteta određeni su empirijski i imaju formu:

$$\frac{c_p}{R} = \frac{\overline{c}_p}{R_u} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \tag{1.48}$$

Za idealne gasove važi relacija $dh = c_p dT$ i $ds = (c_p/T)\, dT$, tako da slede izrazi za entalpiju:

$$\frac{h}{RT} = \frac{\overline{h}}{R_u T} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T} \tag{1.49}$$

i standardnu entropiju:

$$\frac{s^0}{R} = \frac{\overline{s}^0}{R_u} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a^7 \tag{1.50}$$

gde su koeficijenti a_6 i a_7 konstante integraljenja dobijene poklapanjem vrednosti za entalpiju i entropiju sa vrednošću nula pri referentnim temperaturama. Referentna temperatura za entalpiju je 298,15 K i iznosi $\overline{h}_f^0 = 0\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kg}}$ za H_2, O_2, N_2 i $C_{(s)}$.

1.4.2 Polinomi NASA sa devet koeficijenata

Novija verzija polinomskih aproksimacija koja je danas u širokoj upotrebi je data u [7]. U ovom materijalu date su teorijske osnove, izvedeni su polinomi termodinamičkih karakteristika i opisana je struktura programa za računanje hemijske kinetike prilikom sagorevanja. Detalji vezani za strukturu tabelarno zadatih polinoma dati su u literaturi [7]. Digitalizovana verzija tabele dostupna je u okviru *OpenFOAM [8]* repozitorijuma u [9].

Polinomi za izračunavanje termodinamičkih parametara primenjuju se u softverskim rešenjima za proračun termodinamičkih parametara u brojnim oblastima inženjerstva. Najbolji primer ovakve platforme je *Cantera* [10], softver otvorenog koda za računanje hemijske kinetike. U okviru dokumentacije [11] mogu se pronaći poređenja polinoma NASA 7 i NASA 9.

Polinomi koji opisuju promenu specifičnog toplotnog kapaciteta određeni su empirijski i imaju formu (oznaka c_p^0):

$$\frac{c_p}{R} = \frac{\overline{c}_p}{R_u} = a_1 T^{-2} + a_2 T^{-1} + a_3 + a_4 T + a_5 T^2 + a_6 T^3 + a_7 T^4 \tag{1.51}$$

Za idealne gasove važi relacija $dh = c_p dT$ i $ds = (c_p/T)\, dT$, tako da slede izrazi za entalpiju (oznaka h^0):

$$\frac{h}{RT} = \frac{\overline{h}}{R_u T} = -a_1 T^{-2} + a_2 \frac{\ln(T)}{T} + a_3 + a_4 \frac{T}{2} + a_5 \frac{T^2}{3} + a_6 \frac{T^3}{4} + a_7 \frac{T^4}{5} + \frac{b_1}{T} \quad (1.52)$$

i standardnu entropiju (oznaka s^0):

$$\frac{s^0}{R} = \frac{\overline{s}^0}{R_u} = -a_1 \frac{T^{-2}}{2} - a_2 T^{-1} + a_3 \ln(T) + a_4 T + a_5 \frac{T^2}{2} + a_6 \frac{T^3}{3} + a_7 \frac{T^4}{4} + b_2 \quad (1.53)$$

Referentna temperatura za entalpiju je 298.15 K i iznosi $\overline{h}_f^0 = 0\,\mathrm{kJ/kg}$ za H_2, O_2, N_2 i $C_{(s)}$.

1.4.3 Zadatak: Primena polinoma NASA 7

Primena modela Gordon-Mek Brajd biće prikazana na primeru vodene pare kao jedne od komponenata produkata sagorevanja ugljovodoničnih goriva. Na osnovu podataka iz tabele 1.5 odrediti funkcionalnu zavisnost specifičnog toplotnog kapaciteta c_p, specifične entalpije h i specifične standardne entropije s^0 u funkciji temperature. Dati keoficijenti polinoma odnose se na vodu i važe za temperaturski opseg od 200 K do 3500 K. Vodena para je izabrana u ovom primeru jer je sastavni deo produkata sagorevanja ugljovodoničnih goriva u motorima SUS. Grafički prikazati promenu specifičnog toplotnog kapaciteta c_p, specifične entalpije h i specifične standardne entropije s^0 (svedeno na masene jedinice) u funkciji temperature prema opsezima definisanosti važenja koeficijenata polinoma i priložiti odgovarajući program.

Koeficijenti za vodenu paru	$T = 200 : 1000\,\mathrm{K}$	$T = 1000 : 3500\,\mathrm{K}$
a_1	$4{,}19864056E+00$	$3{,}03399249E+00$
a_2	$-2{,}03643410E-03$	$2{,}17691804E-03$
a_3	$6{,}52040211E-06$	$-1{,}64072518E-07$
a_4	$-5{,}48797062E-09$	$-9{,}70419870E-11$
a_5	$1{,}77197817E-12$	$1{,}68200992E-14$
a_6	$-3{,}02937267E+04$	$-3{,}00042971E+04$
a_7	$-8{,}49032208E-01$	$4{,}96677010E+00$

Tabela 1.5: Koeficijenti polinoma NASA 7 za vodenu paru.

Granica od 200 K je i izabrana jer je to okvirna donja granica postojanja H_2O u gasovitom stanju (pogledati fazni dijagram).

Rešenje

U nastavku nalazi se program `NASA_7_H2O_TD_parametri_2.m` (1.5). Traženi dijagrami nalaze se u okviru rešenja zadatka 1.4.4.

Program 1.5: NASA_7_H2O_TD_parametri_2.m

```
% Termodinamičke karakteristike - NASA 7
clear;
close all;
clc;

% Određivanje termodinamičkih karakteristika vodene pare (H2O)
%  - specifični toplotni kapacitet
%  - specifična entalpija
%  - specifična standardna entropija
% primenom NASA polinoma sa 7 koeficijenata (NASA 7)

% Univerzalna gasna konstanta
Ru = 8.314; % [kJ/kmolK]
% Molarna masa vode
M_H2O = 18.01528; % [kg/kmol]
% Gasna konstanta za vodenu paru
R_H2O = Ru/M_H2O; % [kJ/kgK]

% Opseg temperatura za Gordon - Mek Brajd (NASA 7) model
Tmin = 200; %[K]
Tmax = 3500; %[K]
T = Tmin:10:Tmax; %[K]

% Koeficijenti NASA 7 polinoma;
% koeficijnti za temperaturski opseg 200:1000 K
a_H2O_NASA7(1,1) = 4.19864056E+00 ;
a_H2O_NASA7(2,1) = -2.03643410E-03;
a_H2O_NASA7(3,1) = 6.52040211E-06 ;
a_H2O_NASA7(4,1) = -5.48797062E-09;
a_H2O_NASA7(5,1) = 1.77197817E-12;
a_H2O_NASA7(6,1) = -3.02937267E+04;
a_H2O_NASA7(7,1) = -8.49032208E-01;

% koeficijnti za temperaturski opseg 1000:3500 K
a_H2O_NASA7(1,2) = 3.03399249E+00;
a_H2O_NASA7(2,2) = 2.17691804E-03;
a_H2O_NASA7(3,2) = -1.64072518E-07;
a_H2O_NASA7(4,2) = -9.70419870E-11;
a_H2O_NASA7(5,2) = 1.68200992E-14;
a_H2O_NASA7(6,2) = -3.00042971E+04;
a_H2O_NASA7(7,2) = 4.96677010E+00;

[cp, h, s] = NASA7 (T, a_H2O_NASA7, R_H2O);

figure(1)
plot(T,cp)
grid on
xlabel('T[K]')
ylabel('c_p [kJ/kgK]');
title('Specifični toplotni kapacitet - NASA 7 polinom')
% saveas(1,'cp_NASA7','emf');

figure(2)
```

```
plot(T,h)
grid on
xlabel('T[K]')
ylabel('h [kJ/kg]');
title('Specifična entalpija - NASA 7 polinom')
% saveas(2,'h_NASA7','emf');

figure(3)
plot(T,s)
grid on
xlabel('T[K]')
ylabel('s [kJ/kg]');
title('Specifična standardna entropija - NASA 7 polinom')
% saveas(3,'s_NASA7','emf');

function [cp, h, s] = NASA7 (T, a, R)
% cp =R* (a1 +a2T + a3T^2 + a4T^3 + a5T^4);
% h =RT* (a1 + (a2/2)T + (a3/3)T^2 + (a4/4)T^3 + (a5/5)T^4 + (a6/T));
% s =R* (a1 ln(T) + a2T + (a3/2)T^2 + (a4/3)T^3 + (a5/4)T^4 + a7);
cp = zeros(length(T),1);
h = zeros(length(T),1);
s = zeros(length(T),1);
for i= 1:length(T)
    if T(i) < 1000
        % ako je temperatura niža od 1000 K, koriste se koeficijenti za niži
        % temperaturski opseg
        cp(i,1) = R .* (a(1,1) + a(2,1).*T(i) + a(3,1).*T(i).^2 +...
            a(4,1).*T(i).^3 + a(5,1)*T(i).^4);

        h(i,1) = R*T(i)* (a(1,1) + (a(2,1)/2) .* T(i) +...
            (a(3,1)/3).*T(i).^2 + (a(4,1)/4).*T(i).^3 +...
            (a(5,1)/5).*T(i).^4 + a(6,1).*T(i).^(-1));

        s(i,1) = R .* (a(1,1).*log(T(i)) + a(2,1).*T(i) +...
            (a(3,1)/2).*T(i).^2 + (a(4,1)/3).*T(i).^3 +...
            (a(5,1)/4).*T(i).^4 + a(7,1));
    else
        % Temperature preko 1000 K
        cp(i,1) = R .* (a(1,2) + a(2,2).*T(i) + a(3,2).*T(i).^2 +...
            a(4,2).*T(i).^3 + a(5,2)*T(i).^4);

        h(i,1) = R*T(i)* (a(1,2) + (a(2,2)/2) .* T(i) +...
            (a(3,2)/3).*T(i).^2 + (a(4,2)/4).*T(i).^3 +...
            (a(5,2)/5).*T(i).^4 + a(6,2).*T(i).^(-1));

        s(i,1) = R .* (a(1,2).*log(T(i)) + a(2,2).*T(i) +...
            (a(3,2)/2).*T(i).^2 + (a(4,2)/3).*T(i).^3 +...
            (a(5,2)/4).*T(i).^4 + a(7,2));
    end
end
end
```

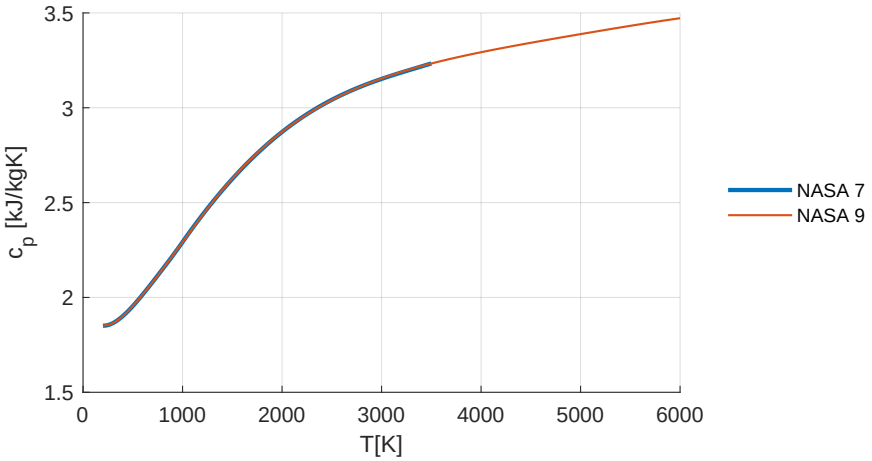
1.4.4 Zadatak: Primena polinoma NASA 9

Na osnovu podataka iz tabele 1.6 odrediti funkcionalnu zavisnost specifičnog toplotnog kapaciteta c_p, specifične entalpije h i specifične standardne entropije s^0 vodene pare u funkciji temperature (svedeno na masene jedinice). Dati keoficijenti polinoma se odnose na vodenu paru i važe za temperaturski opseg od 200 K do 6000 K. Grafički prikazati dobijene rezultate i priložiti odgovarajući program. Na dijagramima uporediti dobijene rezultate primera sa polinomima NASA 7 i NASA 9.

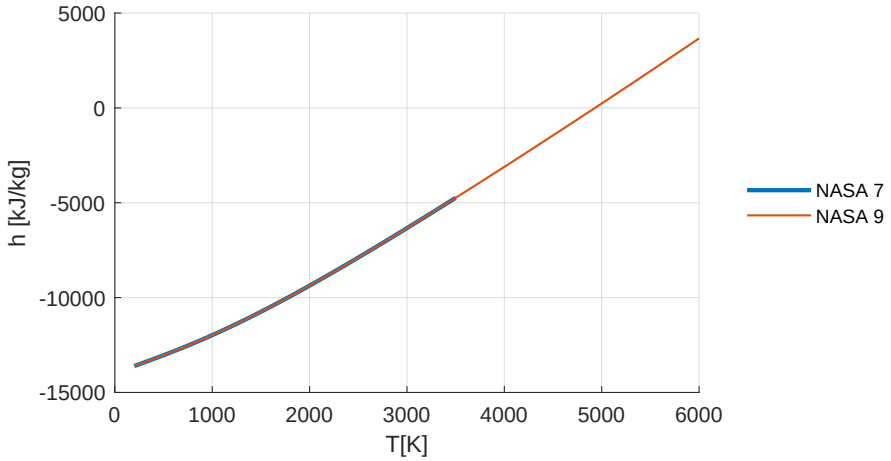
Koeficijenti za H_2O	$T = 200 : 1000\,\mathrm{K}$	$T = 1000 : 6000\,\mathrm{K}$
a_1	$-3.947960830E+04$	$1.034972096E+06$
a_2	$5.755731020E+02$	$-2.412698562E+03$
a_3	$9.317826530E-01$	$4.646110780E+00$
a_4	$7.222712860E-03$	$2.291998307E-03$
a_5	$-7.342557370E-06$	$-6.836830480E-07$
a_6	$4.955043490E-09$	$9.426468930E-11$
a_7	$-1.336933246E-12$	$-4.822380530E-15$
b_1	$-3.303974310E+04$	$-1.384286509E+04$
b_2	$1.724205775E+01$	$-7.978148510E+00$

Tabela 1.6: Koeficijenti polinoma NASA 9 za H_2O.

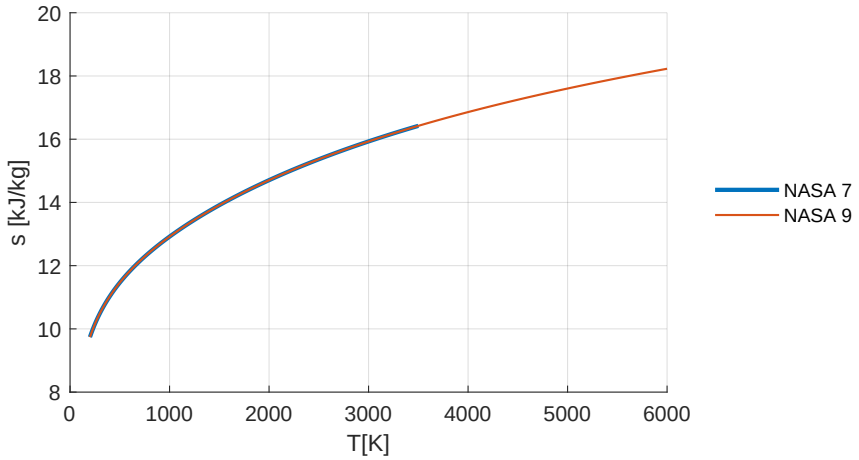
Rešenje



Slika 1.4: Specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku za H_2O.



Slika 1.5: Specifična entalpija za H_2O.



Slika 1.6: Specifična standardna entropija za H_2O.

Program 1.6: `NASA_9_H2O_TD_parametri_2.m`

```
% Termodinamičke karakteristike - NASA 9
clear;
close all;
clc;

% Određivanje termodinamičkih karakteristika vodene pare (H2O)
%  - specifični toplotni kapacitet
%  - specifična entalpija
%  - specifična standardna entropija
% primenom NASA polinoma sa 9 koeficijenata (NASA 9)

% Univerzalna gasna konstanta
Ru = 8.314; % [kJ/kmolK]
% Molarna masa vode
M_H2O = 18.01528; % [kg/kmol]
```

```
% Gasna konstanta za vodenu paru
R_H2O = Ru/M_H2O; % [kJ/kgK]

% Opeg temperatura za NASA 7 model
Tmin = 200; %[K]
Tmax = 6000; %[K]
T = Tmin:10:Tmax; %[K]

% Koeficijenti NASA 9 polinoma;
% koeficijnti za temperaturski opseg 200:1000 K
a_H2O_NASA9(1,1) = -3.947960830E+04;
a_H2O_NASA9(2,1) =  5.755731020E+02;
a_H2O_NASA9(3,1) =  9.317826530E-01;
a_H2O_NASA9(4,1) =  7.222712860E-03;
a_H2O_NASA9(5,1) = -7.342557370E-06;
a_H2O_NASA9(6,1) =  4.955043490E-09;
a_H2O_NASA9(7,1) = -1.336933246E-12;
b_H2O_NASA9(1,1) = -3.303974310E+04;
b_H2O_NASA9(2,1) =  1.724205775E+01;

% koeficijnti za temperaturski opseg 1000:6000 K
a_H2O_NASA9(1,2) =  1.034972096E+06;
a_H2O_NASA9(2,2) = -2.412698562E+03;
a_H2O_NASA9(3,2) =  4.646110780E+00;
a_H2O_NASA9(4,2) =  2.291998307E-03;
a_H2O_NASA9(5,2) = -6.836830480E-07;
a_H2O_NASA9(6,2) =  9.426468930E-11;
a_H2O_NASA9(7,2) = -4.822380530E-15;
b_H2O_NASA9(1,2) = -1.384286509E+04;
b_H2O_NASA9(2,2) = -7.978148510E+00;

[cp, h, s] = NASA9 (T, a_H2O_NASA9, b_H2O_NASA9, R_H2O);

function [cp, h, s] = NASA9 (T, a, b, R)
% cp = R* (a1T^-2 + a2T^-1 + a3 + a4T + a5T^2 + a6T^3 + a7T^4  / *T^2)
% h = RT* (-a1T^-2 + a2 (ln(T)/T) + a3 + (a4/2)T + (a5/3)T^2 + (a6/4)T^3+...
%     (a7/5)T^4 + b1/T)
% s = R*(-(a1/2)*T^-2 -a2T^-1 + a3 ln(T) + a4T + (a5/2)T^2 + (a6/3)T^3 +...
%     (a7/4)T^4 + b2);

cp = zeros(length(T),1);
h = zeros(length(T),1);
s = zeros(length(T),1);
for i= 1:length(T)
    if T(i) < 1000
        % ako je temperatura niža od 1000 K, koriste se koeficijenti za niži
        % temperaturski opseg
        cp(i,1) = R.* (a(1,1).* T(i).^(-2) + a(2,1) .* T(i).^(-1) +...
            a(3,1) + a(4,1).*T(i) + a(5,1).*T(i).^2 + a(6,1).*T(i).^3 +...
            a(7,1).*T(i).^4);

        h(i,1) = R.*T(i)* (-a(1,1).* T(i).^(-2) +...
            a(2,1).*log(T(i)).*(T(i).^(-1)) + a(3,1) + (a(4,1)/2).*T(i) +...
            (a(5,1)/3).*T(i).^2 + (a(6,1)/4).*T(i).^3 +...
            (a(7,1)/5).*T(i).^4 + b(1,1)./T(i));
```

```
        s(i,1) = R.* (-(a(1,1)/2).*T(i).^(-2) - a(2,1).*T(i).^(-1) +...
            a(3,1).*log(T(i)) + a(4,1).*T(i) + (a(5,1)/2).*T(i).^2 +...
            (a(6,1)/3).*T(i).^3 + (a(7,1)/4).*T(i).^4 + b(2,1));
    else
        % Temperature preko 1000 K
        cp(i,1) = R .* (a(1,2).* T(i).^(-2) + a(2,2) .* T(i).^(-1) +...
            a(3,2) + a(4,2).*T(i) + a(5,2).*T(i).^2 + a(6,2).*T(i).^3 +...
            a(7,2).*T(i).^4);

        h(i) = R.*T(i)* (-a(1,2).* T(i).^(-2) +...
            a(2,2).*log(T(i)).*(T(i).^(-1)) + a(3,2) + (a(4,2)/2).*T(i) +...
            (a(5,2)/3).*T(i).^2 + (a(6,2)/4).*T(i).^3 +...
            (a(7,2)/5).*T(i).^4 + b(1,2)./T(i));

        s(i,1) = R.* (-(a(1,2)/2).*T(i).^(-2) - a(2,2).*T(i).^(-1) +...
            a(3,2).*log(T(i)) + a(4,2).*T(i) + (a(5,2)/2).*T(i).^2 +...
            (a(6,2)/3).*T(i).^3 + (a(7,2)/4).*T(i).^4 + b(2,2));
    end
end
end
```

1.4.5 Primena i poređenje polinoma NASA 7 i NASA 9

Po uzoru na prethodne primere primene modela Gordon-Mek Brajd sprovesti proračun za ostale glavne komponente izduvne emisije motora SUS kao što su CO, CO_2, NO, NO_2 i O_2 i formirati pojedinačne grafičke prikaze rezultata za specifični toplotni kapacitet, specifičnu entalpiju i specifičnu standardnu entropiju u funkciji temperature prema opsezima definisanim u tabelama sa koeficijentima.

1.4.6 Primena polinoma NASA-JANAF sa tri koeficijenta

Uporediti dobijene rezultate iz prethodnog zadatka sa rezultatima određivanja termodinamičkih karakteristika prema uputstvima iz literature [4] u kojoj je objašnjen tzv. metod NASA-JANAF. Osnovna razlika u odnosu na prethodne modele je ta što polinomi imaju tri koeficijenta i više je temperaturskih opsega važenja svakog podmodela (pet opsega temperatura u poređenju sa dva opsega koliko imaju modeli NASA7 i NASA 9).

2 Opšta svojstva ugljovodonika

U ovom poglavlju biće dati numerički primeri za izračunavanje osnovnih fizičkih karakteristika pojedinih referentnih ugljovodonika, alkohola kao i standardnih goriva za motore SUS. Pod osnovnim fizičkim karakteristikama podrazumevaju se isparljivost, viskoznost, stišljivost i gustina.

2.1 Gustina, modul stišljivosti i koeficijent stišljivosti ugljovodonika

U ovom poglavlju biće prikazane metode proračuna gustine referentnih ugljovodonika primenom nekoliko oblika poznatog teorijskog modela Tejt-Taman (*Tait-Tammann*), kao i primenom grupnog modela Elbro (*Elbro*). U proračunu će biti korišćeni podaci dobijeni eksperimentalnim putem i identifikacijom, a koji su dostupni u stručnoj literaturi. Vrednosti koeficijenata u pojedinim varijantama modela biće prikazani u ograničenom obimu u pojedinačnim funkcijama pisanim u Matlab okruženju, što će omogućavati izvođenje proračuna za nekoliko karakterističnih primera. Za dalji rad, primenu i unapređenje razvijenih funkcija čitalac se upućuje na korišćenje izvorne literature i tabelarne prikaze koji su prikazani u dodatku.

2.1.1 Uticaj temperature i pritiska na gustinu normalnog oktana n-C_8H_{18} - model Tejt-Taman

Koristeći Tejt-Tamanovu jednačinu za izračunavanje promene specifične zapremine u zavisnosti od pritiska tečnosti, formirati funkciju za izračunavanje promene gustine referentnih ugljovodonika u zavisnosti od pritiska na zadatoj temperaturi. Primenom funkcije, izračunati promenu gustine, modula stišljivosti k_T i koeficijenta stišljivosti β normalnog oktana (n-C_8H_{18}) u zavisnosti od temperature koristeći i eksperimentalne podatke i parametre modela iz literature [12, 13, 14]. Proračun izvršiti za pritisak goriva od 0,1 MPa i uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 50 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature.

Rešenje

Tejtova (*Peter Guthrie Tait*) jednačina stanja koristi se za uspostavljanje veze između gustine i hidrostatičkog pritiska tečnosti. U praksi se umesto izvornog izraza uobičajeno koristi Tamanov (*Gustav Tammann*) oblik jednačine, poznat i kao Tejt-Tamanova jednačina za određivanje izotermskog modula stišljivosti, izražena preko veličina specifične zapremine date tečnosti:

$$k_T = -\nu_0 \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial \nu}\right) = \frac{B+p}{C} \tag{2.1}$$

Integraljenjem, podrazumevajući temperaturne zavisnosti članova B i C i uvođenjem gustine umesto specifične zapremine fluida, dobija se poznati izraz za promenu specifične zapremine u zavisnosti od pritiska:

$$\rho\,(p,T) = \frac{\rho\,(p_0,T)}{1.0 - C_T \cdot \ln\left(\dfrac{B_T + p}{B_T + p_0}\right)} \tag{2.2}$$

Promena gustine u zavisnosti od temperature pri nepromenjenom referentnom pritisku, određuje se primenom polinomske zavisnosti u kojoj figuriše kritična temperatura tečnosti (krajnja vrednost temperature na krivoj ravnotežnog stanja pri kojoj se bez obzira na pritisak, fluid nalazi u gasovitom stanju):

$$\rho\,(p_0,T) = \rho_{crit} \cdot \left(1 + \sum_{1}^{7} a_i \cdot \left(1.0 - \frac{T}{T_{crit}}\right)^{i/3}\right) \tag{2.3}$$

Model i koeficijenti polinoma za širok izbor referentnih ugljovodonika prikazani su u radu Cibulke [12]. Parametri osnovnog modela B_T i C_T predstavljaju funkcije temperature koje su prikazane u obliku polinoma:

$$B_T = \sum_{1}^{5} b_i \cdot \left(\frac{T - T_0}{100}\right)^{i-1} \tag{2.4}$$

$$C_T = \sum_{1}^{2} c_i \cdot \left(\frac{T - T_0}{100}\right)^{i-1} \tag{2.5}$$

Koeficijent stišljivosti izračunava se kao recipročna vrednost izotermskog modula stišljivosti:

$$\beta_T = \frac{1}{k_T} \tag{2.6}$$

Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine i funkcija B_T i C_T preuzeti su iz rada [13] i prikazani u tabeli 2.1.

Jedinjenje	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
CH_3OH	2,62781	−4,04742	15,83425	−22,50656	10,91597	0,304774	0
C_2H_5OH	−0,992639	38,0286	−181,1172	445,9045	−588,5184	393,9196	−104,3443
C_3H_7OH	0,9405336	12,94424	−53,9519	113,6388	−113,8656	43,38324	0
C_4H_9OH	−3,573785	50,24497	−175,9335	308,5883	−265,6281	89,49966	0
C_7H_{16}	1,331593	3,300918	−4,509610	2,765491	0	0	0
C_8H_{18}	1,969770	−1,100623	6,364172	−8,693475	4,420047	0	0
C_9H_{20}	1,927780	0,9302189	−1,334128	1,392823	0	0	0
$C_{10}H_{22}$	0,3291388	7,364340	−9,985096	5,283608	0	0	0
$C_{12}H_{26}$	−0,03049462	8,325350	−10,82684	5,551783	0	0	0
$C_{14}H_{30}$	3,509916	−4,097681	3,610638	0	0	0	0
$C_{16}H_{34}$	2,613058	−1,999638	2,400114	0	0	0	0

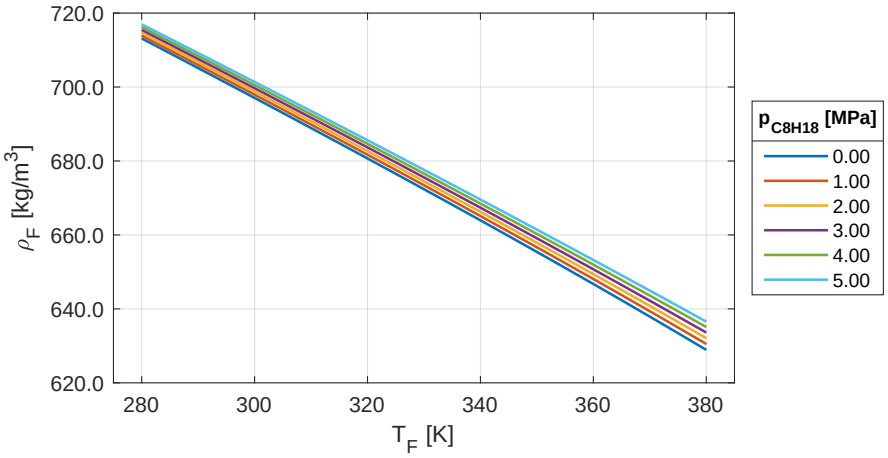
Tabela 2.1: Vrednosti koeficijenata polinoma za izračunavanje gustine čistih ugljovodonika u zavisnosti od temperature na referentnom pritisku[12, 13].

Jedinjenje	b_1 [MPa]	b_2 [MPa·K^{-1}]	b_3 [MPa·K^{-2}]	b_4 [MPa·K^{-3}]	b_5 [MPa·K^{-5}]	c_1 [–]	c_2 [K^{-1}]	c_3 [K^{-2}]	T_0 [K]
CH_3OH	66,0258	−54,0258	12,0902	−4,4449	1,2057	0,097871	−0,005322		323,15
C_2H_5OH	84,7620	−66,0861	13,5273	−1,8708	0,2375	0,095027	−0,005735		323,15
C_3H_7OH	71,5896	−56,4067	7,9726	0,7782	0	0,086148	−0,003058		323,15
C_4H_9OH	84,0516	−62,3764	11,4866	−1,3657	0,4606	0,090982	−0,003268		323,15
C_7H_{16}	64,0193	−53,4677	15,7048	−3,9551	0,8103	0,091609	−0,001099	−0,001513	298,15
C_8H_{18}	73,8539	−61,7706	24,6982	−13,7438	4,2338	0,092825	−0,005741	0	298,15
C_9H_{20}	63,4470	−54,0094	17,5175	−3,9433	0,6272	0,094316	−0,002960	0	333,15
$C_{10}H_{22}$	83,5746	−61,9418	21,8935	−6,4316	1,0545	0,094316	−0,002960	0	294,35
$C_{12}H_{26}$	90,6028	−58,5280	70,5209	−117,9246	63,1006	0,090545	0	0	298,15
$C_{14}H_{30}$	78,3594	−49,2510	0	0	0	0,090131	0	0	338,15
$C_{16}H_{34}$	73,9549	−47,6742	20,6979	26,0659	0	0,090512	0	0	358,15

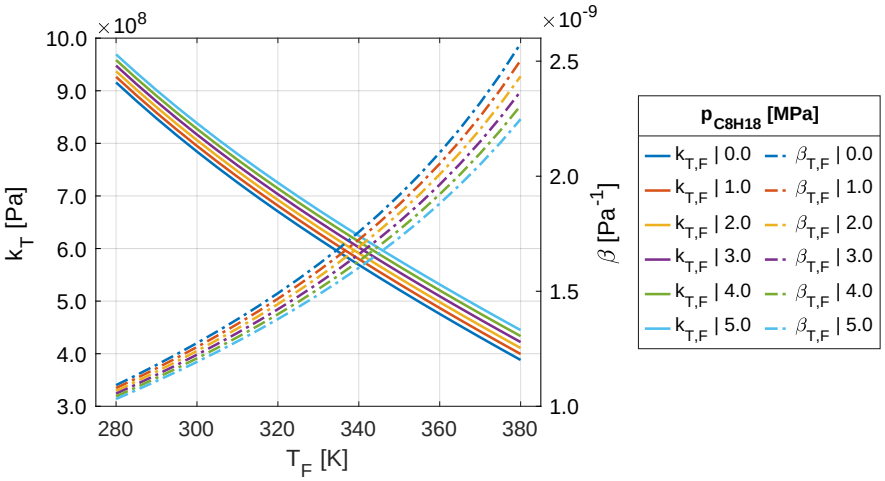
Tabela 2.2: Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman [13, 14] pri $p_0 = 0{,}101325\,\mathrm{MPa}$.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 2.1 i 2.2. U nastavku se nalaze i glavni program `GustinaHC010.m` (2.1) i funkcija `DHC_Tait.m` (2.2).



Slika 2.1: Zavisnost gustine normalnog oktana od temperature za različite vrednosti pritiska.



Slika 2.2: Zavisnost modula stišljivosti normalnog oktana (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska.

Program 2.1: `GustinaHC010.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine referentnih ugljovodonika u
% zavisnosti od pritiska i temperature
% Model: Tait
clc;
clear;
close all;

rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature goriva u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=5;
```

```
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska goriva u [Pa]
% pFuelMin=500.0E+05;
% pFuelMax=2000.0E+05;
% dpFuel=250E+05;
pFuelMin=0.0E+05;
pFuelMax=50.0E+05;
dpFuel=10E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);
HCType='C8H18';
for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoFuel(i,j), kTFuel(i,j), betaTFuel(i,j)]=DHC_Tait(pFuel(1,i),TFuel(1,j),
            HCType);
    end
end

colororder('default');
figure(1);
plot(TFuel,rhoFuel,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{F} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('T_{F} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={append('p_{',HCType,'} [MPa]')};
LegendLabel=num2str([pFuel]'.*1E-06,'%1.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside');
title(lgd,LegendTitle);


colororder('default');
figure(2);
yyaxis left
colororder('default');
plot(TFuel,kTFuel,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('k_{T} [Pa]');
ytickformat('%.1f');
yyaxis right
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
plot(TFuel,betaTFuel,'-.','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('\beta [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
grid on;
hold on;

xlabel('T_{F} [K]');
```

```
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendTitle={append('p_{',HCType,'} [MPa]')};
% LegendLabel=num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','BestOutSide');
title(lgd,LegendTitle);
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('k_{T,F} |',{' '}, num2str([pFuel]'.*1E-06,'%1.1f'))
    );
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\beta_{T,F} |',{' '}, num2str([pFuel]'.*1E-06,'%1.1
    f')));
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2],'Location','EastOutside','NumColumns',2)
    ;
title(lgd,LegendTitle);
lgd.ItemTokenSize(1) = 12;
```

Program 2.2: `DHC_Tait.m`

```
function [rhoHC, kT, betaT]=DHC_Tait(pFuel,TFuel,HCType)
% Funkcija za izračunavanje gustine n-Alkana (C5...C16)
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Peter Guthrie Tait

% Ref.
% I. Cibulka, L. Hnedkovsky
% Liquid Densities at Elevated Pressures of n-Alkanes from C5 to C16:
% A Critical Evaluation of Experimental Data
% Journal of Chemical & Engineering Data, 1996, 41, 657-668, DOI: 10.1021/je960058m
% koef. za Tait-Tamman-ov model za rho=f(p,T), polinom b i c za n-alkane

% I. Cibulka, M. Zikova:
% Liquid densities at elevated pressures of 1-alkanols from C1 to C10, A
% critical evaluation of experimental data
% Journal of Chemical & Engineering Data, 1994, 39, 876-886, DOI:
% koef. za Tait-Tamman-ov model za rho=f(p,T), polinom b i c za alkohole

% I. Cibulka
% Saturated liquid densities of 1-alkanols from C1 to C10 and n-alkanes
% from C5 to C16: A critical evaluation of experimental data
% Fluid phase equilibria, 89, 1993, 1-18, Elsevier Science Publishers, B.V.,
    Amsterdam
% koef. za Tait-Tamman-ov model za rho=f(p,T) polinom a za n-alkane

% p0        [Pa]          referentni pritisak
% pFuel     [Pa]          pritisak goriva
% TFuel     [K]           temperatura goriva
% rho0      [kg/m3]       gustina goriva @(T,p0)
% FuelType
% HPFD (Highly ParaFinic Diesel) gorivo sa visokim udelom parafina
% ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel) gorivo sa niskim udelom sumpora
% HARD (Highly ARomatic Diesel) gorivo sa visokim udelom aromata
```

```
corr_p=1.0E-06; % Pa > MPa
corr_rho=1.0E+03;
corr_p=1.0E-06;

% Izračunavanje gustine goriva na referentnom pritisku u zavisnosti od temperature
switch HCType
    case 'CH3OH'
        a=[+2.627813, -4.047421, +15.83425, -22.50656, +10.91597, +0.3047744,
            +0.00000];
        ea=[1/3, 2/3, 3/3, 4/3, 5/3, 6/3, 7/3];
        b=[+66.0258, -54.4554, +12.0902, -4.4449, +1.2057];
        eb=[0, 1, 2, 3, 4];
        c=[+0.097871, -0.005322];
        ec=[0, 1];
        Tcrit=512.60;
        rhocrit=0.272;
        T0=323.15;
        p0=1.0E+05;
    case 'C2H5OH'
        a=[-0.9926399, +38.02867, -181.1172, +445.9045, -588.5184, +393.9196,
            -104.3443];
        ea=[1/3, 2/3, 3/3, 4/3, 5/3, 6/3, 7/3];
        b=[+84.7620, -66.0861, +13.5273, -1.8708, +0.2375];
        eb=[0, 1, 2, 3, 4];
        c=[+0.095027, -0.005735];
        ec=[0, 1];
        Tcrit=513.88;
        rhocrit=0.276;
        T0=298.15;
        p0=1.0E+05;
    case 'C7H16'
        a=[+1.331593, +3.300918, -4.509610, +2.765491, +0.00000, +0.00000,
            +0.00000];
        ea=[1/3, 2/3, 3/3, 4/3, 5/3, 6/3, 7/3];
        b=[+64.0193, -53.4677, +15.7048, -3.9551, +0.8103];
        eb=[0, 1, 2, 3, 4];
        c=[+0.091609, -0.001099, -0.001513];
        ec=[0, 1, 2];
        Tcrit=540.11;
        rhocrit=0.236;
        T0=298.15;
        p0=1.0E+05;
    case 'C8H18'
        a=[+1.969770, -1.100623, +6.364172, -8.693475, +4.420047, +0.00000,
            +0.00000];
        ea=[1/3, 2/3, 3/3, 4/3, 5/3, 6/3, 7/3];
        b=[+73.8539, -61.7706, +24.6982, -13.7438, +4.2338];
        eb=[0, 1, 2, 3, 4];
        c=[+0.092825, -0.005741, -0.000000];
        ec=[0, 1, 2];
        Tcrit=568.91;
        rhocrit=0.237;
        T0=298.15;
        p0=1.0E+05;
```

```
    otherwise
end

% Izračunavanje gustine na ref. pritisku u zavisnosti od temperature rho=f(p0,T)
fT1=1.0-TFuel./Tcrit;
frho=a.*fT1.^ea;
rhoFuel0=corr_rho.*rhocrit.*(1+sum(frho));

% Izračunavanje gustine goriva u zavisnosti od pritiska
fT2=(TFuel-T0)./100;
fb=b.*(fT2.^eb);
fc=c.*(fT2.^ec);
BT=sum(fb);
CT=sum(fc);
flog=(BT+pFuel.*corr_p)./(BT+p0.*corr_p);
rhoHC=rhoFuel0./(1.0-CT.*log(flog));

% Izračunavanje modula stišljivosti (Bulk Modulus), kT=f(p,T)
% % ckT=2.55;
ckT=1.0;
kT=ckT.*(corr_p.*pFuel+BT)./(CT.*corr_p);

% Izračunavanje izotermskog koeficijenta stišljivosti
% (Coefficient of Compressibility, Isotherma coefficient of Compressibility)
betaT=1./kT;
```

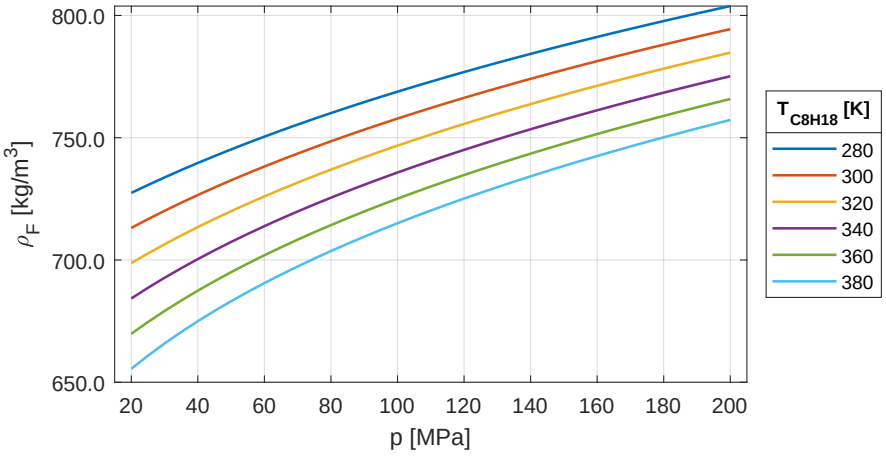
2.1.2 Uticaj temperature i pritiska na modul stišljivosti alkana

Koristeći prethodno razvijenu funkciju `DHC_Tait.m` i eksperimentalne podatke iz literature [12, 13], izračunati promenu gustine, modula stišljivosti k_T i koeficijenta stišljivosti β normalnog oktana (n-C_8H_{18}) u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature. Pretpostaviti opseg pritiska koji odgovara visokopritisnim sistemima za obrazovanje smeše (od 20 MPa do 200 MPa). Proračun izvršiti za uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 20 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

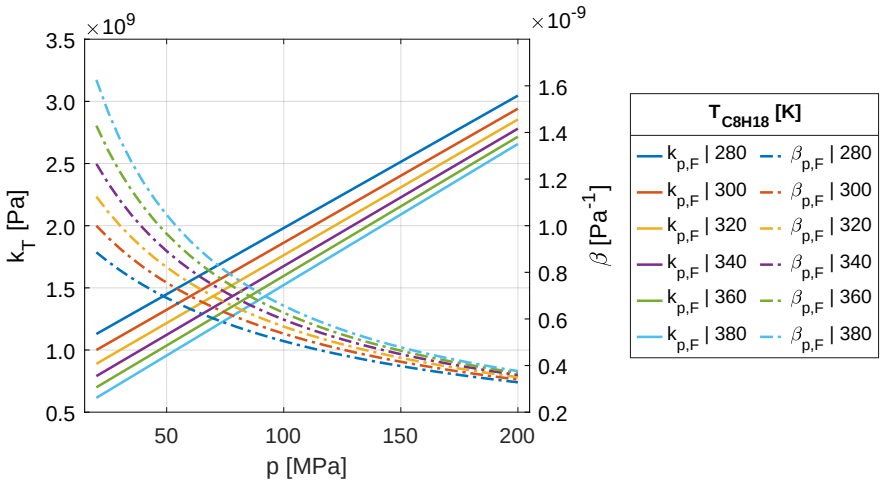
- Dijagram 1: zavisnost gustine od pritiska za diskretne vrednosti temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za diskretne vrednosti temperature.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 2.3 i 2.4.



Slika 2.3: Zavisnost gustine normalnog oktana od pritiska za različite vrednosti temperature.



Slika 2.4: Zavisnost modula stišljivosti normalnog oktana (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za različite vrednosti temperature.

2.1.3 Poređenje gustina i modula stišljivosti različitih alkana

Koristeći prethodno razvijenu funkciju `DHC_Tait.m` i podatke iz literature [12, 13], izračunati i uporedno prikazati promenu gustine i modula stišljivosti normalnog heptana (n-C_7H_{16}) i normalnog oktana (n-C_8H_{18}) u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature. Pretpostaviti opseg pritiska koji odgovara visokopritisnim sistemima za obrazovanje smeše (od 20 MPa do 200 MPa). Proračun izvršiti za uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 20 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od pritiska za diskretne vrednosti temperature;

- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za diskretne vrednosti temperature.

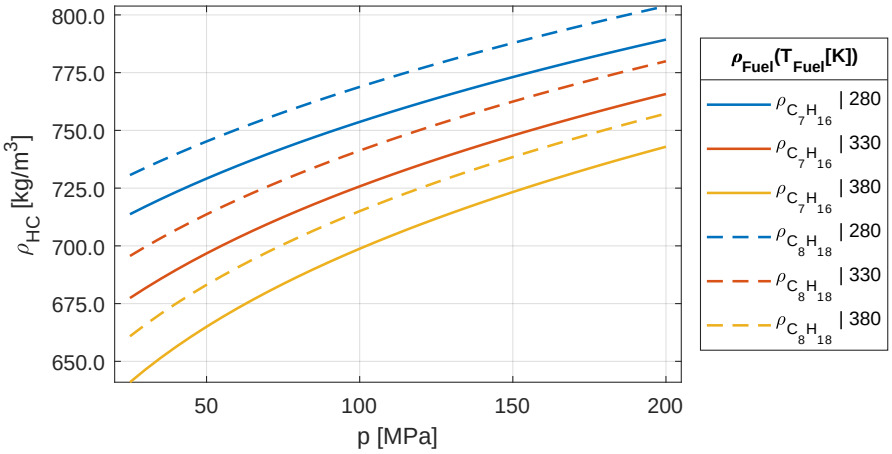
2.1.4 Poređenje gustina i modula stišljivosti alkana i alkohola

Izračunati i uporedno prikazati promenu gustine i modula stišljivosti normalnog oktana (n-C_8H_{18}) i etanola (C_2H_5OH) u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature koristeći model Tejt i eksperimentalne podatke iz literature [12, 14, 13]. Pretpostaviti opseg pritiska koji odgovara visokopritisnim sistemima za obrazovanje smeše (od 20 MPa do 200 MPa). Proračun izvršiti za uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 25 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

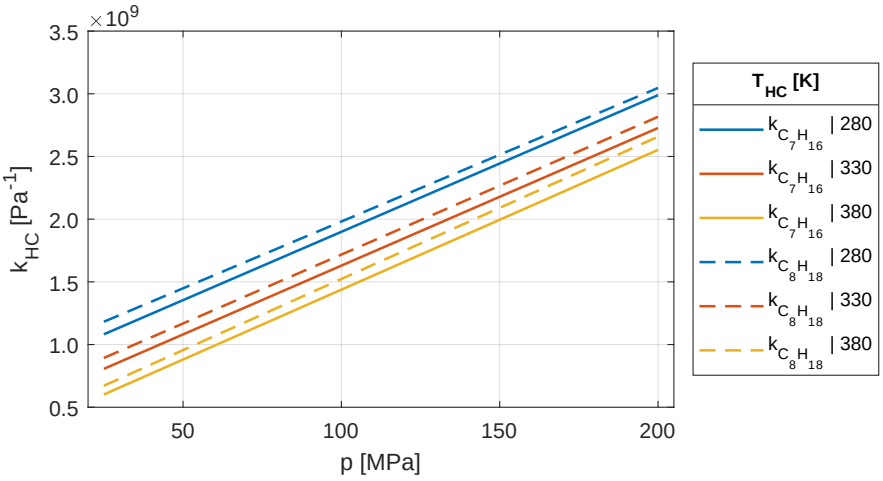
- Dijagram 1: zavisnost gustine od pritiska za diskretne vrednosti temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za diskretne vrednosti temperature.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 2.5 i 2.6.



Slika 2.5: Zavisnost gustine različitih ugljovodonika od pritiska za različite vrednosti temperature.



Slika 2.6: Zavisnost modula stišljivosti različitih ugljovodonika od pritiska za različite vrednosti temperature.

2.1.5 Poređenje gustina alkana i alkohola - model Abdusalam

Formirati izmenjenu funkciju za izračunavanje promene gustine referentnih ugljovodonika na osnovu modela Tejt-Taman, koristeći podatke iz rada Abdusalama [15]. Primenom funkcije, izračunati i uporedno prikazati promenu gustine i modula stišljivosti normalnog heptana (n-C_7H_{16}), normalnog oktana (n-C_8H_{18}) i etanola (C_2H_5OH) u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature. Pretpostaviti opseg pritiska koji odgovara visokopritisnim sistemima za obrazovanje smeše (od 50 MPa do 1200 MPa). Proračun izvršiti za uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 25 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od pritiska za diskretne vrednosti temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za diskretne vrednosti temperature.

Rešenje

Sličnost sa prethodnim zadacima u kojima je korišćen model Tejt-Taman je očigledna. Na prvi pogled, rešenje je moguće dobiti i primenom postojećeg modela i baze podataka koje su već korišćene. Međutim, prilagođenje postojeće funkcije omogućava korišćenje baze podataka iz rada [15] koja objedinjuje, ne samo podatke za tri karakteristična ugljovodonika koji su interesantni za proračun referentnih ciklusa, već i podatke za nekoliko karakterističnih smeša normalnog heptana i etanola i normalnog oktana i etanola. U osnovi, izmena funkcije za primenu modela Tejt-Taman, svodi se na izmenu načina izračunavanja odgovarajućih članova koji zavise od temperature.

U tom smislu, treba izmeniti strukture polinoma za izračunavanje gustine i članova B_T i C_T u zavisnosti od temperature:

$$\rho\,(p_0,T) = \sum_{1}^{3} a_i \cdot T^{i-1} \tag{2.7}$$

$$B_T = \sum_{1}^{3} b_i \cdot T^{i-1} \tag{2.8}$$

$$C_T = c \tag{2.9}$$

Vrednosti koeficijenata preuzeti su iz rada [15] i prikazani su u tabelama od 2.3 do 2.6.

Jedinjenje	a_0 $[\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}]$	a_1 $[\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}\cdot K^{-1}}]$	a_2 $[\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}\cdot K^{-2}}]$	b_1 [MPa]	b_2 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-1}}]$	b_3 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-2}}]$	c [–]
n-C_7H_{16}	871,86	−0,44006	$-6{,}8295\cdot10^{-4}$	364,98	−1,4465	$1{,}4864\cdot10^{-3}$	0,090856
n-C_8H_{18}	875,98	−0,39170	$-6{,}8294\cdot10^{-4}$	376,90	−1,4388	$1{,}4222\cdot10^{-3}$	0,091360
C_2H_5OH	952,55	−0,26716	$-9{,}8674\cdot10^{-4}$	521,31	−2,0143	$2{,}1155\cdot10^{-3}$	0,115710

Tabela 2.3: Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine čistih ugljovodonika u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$.

Smeša	a_1 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}}]$	a_2 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot K^{-1}}]$	a_3 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot K^{-2}}]$	b_1 [MPa]	b_2 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-1}}]$	b_3 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-2}}]$	c [–]
25% - 75%	886,86	−0,47668	$-5{,}6905\cdot10^{-4}$	330,45	−1,2758	$1{,}2751\cdot10^{-3}$	0,082865
50% - 50%	881,92	−0,46306	$-6{,}0833\cdot10^{-4}$	342,71	−1,3482	$1{,}3768\cdot10^{-3}$	0,084243
75% - 25%	874,49	−0,43618	$-6{,}7036\cdot10^{-4}$	343,22	−1,3590	$1{,}3930\cdot10^{-3}$	0,085089

Tabela 2.4: Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-heptana i n-oktana u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$.

Smeša	a_1 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}}]$	a_2 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot K^{-1}}]$	a_3 $[\mathrm{kg\cdot m^{-3}\cdot K^{-2}}]$	b_1 [MPa]	b_2 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-1}}]$	b_3 $[\mathrm{MPa\cdot K^{-2}}]$	c [–]
25% - 75%	858,601	0,031042	$-1{,}5131\cdot10^{-3}$	366,94	−1,4233	$1{,}4250\cdot10^{-3}$	0,089459
50% - 50%	835,520	0,015346	$-1{,}5024\cdot10^{-3}$	362,02	−1,4373	$1{,}4653\cdot10^{-3}$	0,087500
75% - 25%	837,220	−0,11263	$-1{,}2798\cdot10^{-3}$	353,74	−1,4117	$1{,}4457\cdot10^{-3}$	0,086668

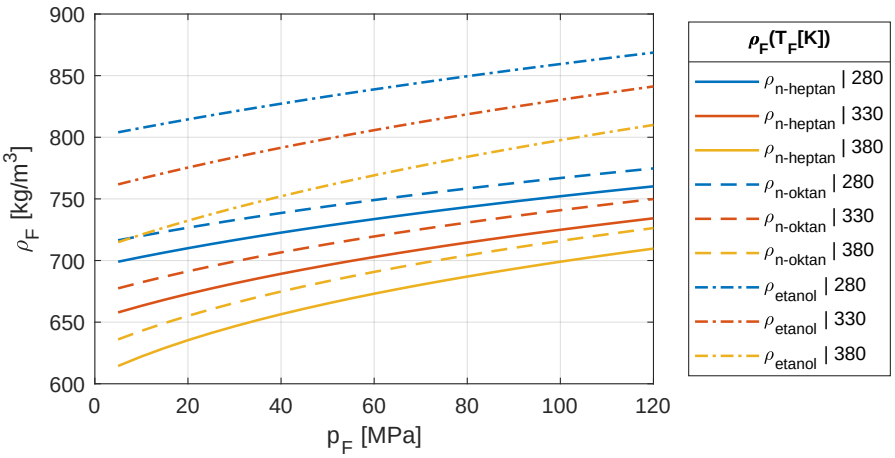
Tabela 2.5: Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-heptana i etanola u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$.

Smeša	a_1 $[\mathrm{kg \cdot m^{-3}}]$	a_2 $[\mathrm{kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}}]$	a_3 $[\mathrm{kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-2}}]$	b_1 $[MPa]$	b_2 $[\mathrm{MPa \cdot K^{-1}}]$	b_3 $[\mathrm{MPa \cdot K^{-2}}]$	c $[-]$
25% - 75%	868,53	−0,012068	$-1{,}4095 \cdot 10^{-3}$	361,14	−1,3741	$1{,}3480 \cdot 10^{-3}$	0,088070
50% - 50%	853,178	−0,057854	$-1{,}3262 \cdot 10^{-3}$	361,06	−1,4022	$1{,}4003 \cdot 10^{-3}$	0,085702
75% - 25%	859,71	−0,197810	$-1{,}0726 \cdot 10^{-3}$	336,83	−1,2815	$1{,}2440 \cdot 10^{-3}$	0,084095

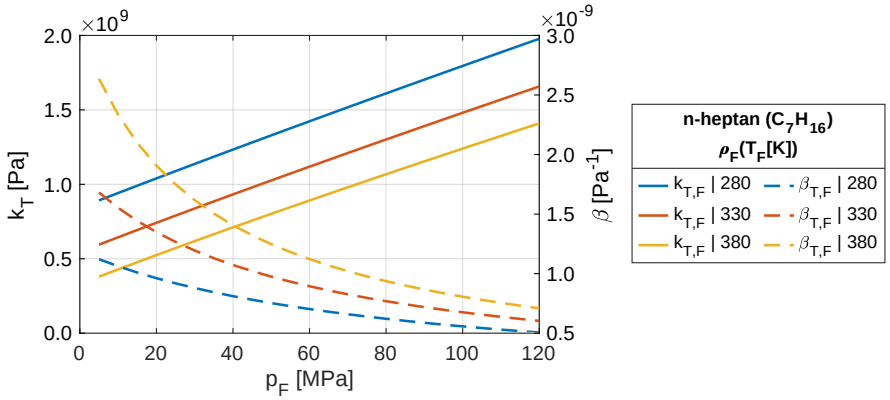
Tabela 2.6: Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-oktana i etanola u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,MPa$.

Rešenje

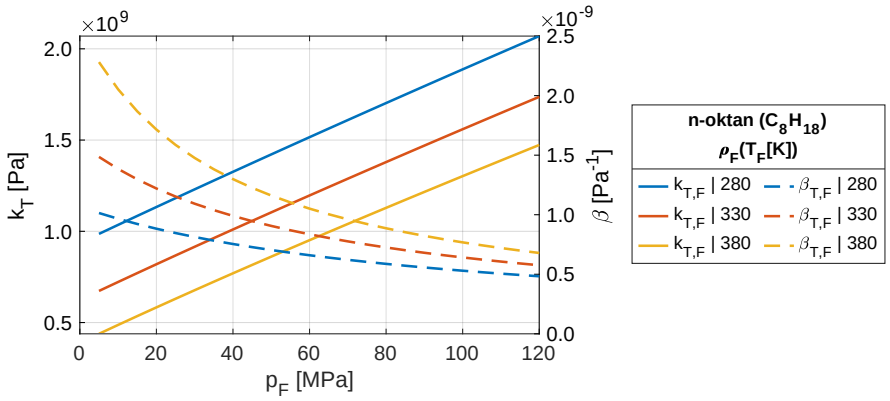
Rezultati proračuna prikazani su na slikama 2.7, 2.8, 2.9 i 2.10. Glavni program `GustinaHC051.m` (2.3) i funkcija `DHC_Abdussalam.m` (2.4) za izračunavanje gustine modelom Abdusalama prikazane su u nastavku.



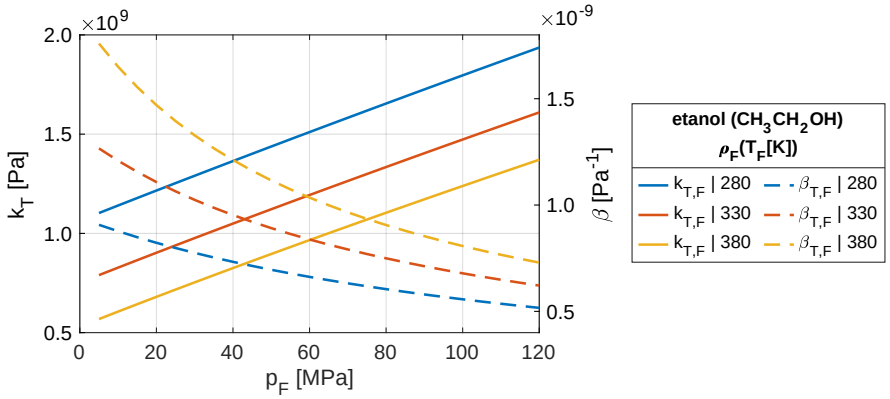
Slika 2.7: Gustina različitih ugljovodoničnih goriva u funkciji pritiska za različite temperature goriva.



Slika 2.8: Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *n-heptan*.



Slika 2.9: Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *n-oktan*.



Slika 2.10: Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *etanol*.

Program 2.3: `GustinaHC051.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine n-heptana, n-oktana i etanola u
    zavisnosti
% od pritiska i temperature
% Primena modela Elbro
% S. J. Popović 202405.v01
% P. Mrđa
clc;
clear;
close all;

rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature goriva u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=50;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);
```

```
% Zadavanje opsega pritiska goriva u [Pa]
pFuelMin=50.0E+05;
pFuelMax=1200.0E+05;
dpFuel=50E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoC7H16(i,j),kTC7H16(i,j),betaTC7H16(i,j)]=DHC_Abdussalam(pFuel(1,i),
            TFuel(1,j),'n-heptan');
        [rhoC8H18(i,j),kTC8H18(i,j),betaTC8H18(i,j)]=DHC_Abdussalam(pFuel(1,i),
            TFuel(1,j),'n-oktan');
        [rhoC2H5OH(i,j),kTC2H5OH(i,j),betaTC2H5OH(i,j)]=DHC_Abdussalam(pFuel(1,i),
            TFuel(1,j),'etanol');
    end
end

AxisLabel_FontSize=14;
colororder('default');
figure(1);
P1 = plot([pFuel.*1E-06]',rhoC7H16,'-','MarkerSize',4.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
P2 = plot([pFuel.*1E-06]',rhoC8H18,'--','MarkerSize',4.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
P3 = plot([pFuel.*1E-06]',rhoC2H5OH,'-.','MarkerSize',4.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{F} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.0f');
xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
LegendTitle={'\rho_{F}(T_{F}[K]) '};
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('\rho_{n-heptan} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'))
    );
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\rho_{n-oktan} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f')))
    ;
LegendLabel_3 = cellstr(strcat('\rho_{etanol} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f')));
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2;LegendLabel_3],...
    'Location','EastOutside','NumColumns',1);
title(lgd,LegendTitle);

% n = 'n-heptan';
% n = 'n-oktan';
n = 'etanol';

switch n
    case 'n-heptan'
        figure(2);
        LegendTitle=[{'n-heptan (C_{7}H_{16})'};{'\rho_{F}(T_{F}[K])'}];
```

```
    case 'n-oktan'
        figure(3);
        LegendTitle=[{'n-oktan (C_{8}H_{18})'};{'\rho_{F}(T_{F}[K])'}];
    case 'etanol'
        figure(4);
        LegendTitle=[{'etanol (CH_{3}CH_{2}OH)'};{'\rho_{F}(T_{F}[K])'}];
end

yyaxis left
colororder('default');
switch n
    case 'n-heptan'
        plot([pFuel.*1E-06]',kTC7H16,'-','LineWidth',1.2);
    case 'n-oktan'
        plot([pFuel.*1E-06]',kTC8H18,'-','LineWidth',1.2);
    case 'etanol'
        plot([pFuel.*1E-06]',kTC2H5OH,'-','LineWidth',1.2);
end
hold on;
ylabel('k_{T} [Pa]');
ytickformat('%.1f');
yyaxis right
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
switch n
    case 'n-heptan'
        plot([pFuel.*1E-06]',betaTC7H16,'--','LineWidth',1.2);
        %title('n-heptan (C_{7}H_{16})');
    case 'n-oktan'
        plot([pFuel.*1E-06]',betaTC8H18,'--','LineWidth',1.2);
        %title('n-oktan (C_{8}H_{18})');
    case 'etanol'
        plot([pFuel.*1E-06]',betaTC2H5OH,'--','LineWidth',1.2);
        %title('etanol (CH_{3}CH_{2}OH)');
end
hold on;
ylabel('\beta [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
grid on;
hold on;
xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
% xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('k_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%1.0f')));
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\beta_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%1.0f')));
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2],'Location','EastOutside','NumColumns',2)
    ;
title(lgd,LegendTitle);
lgd.ItemTokenSize(1) = 14;
```

Program 2.4: `DHC_Abdussalam.m`

```
function [rhoHC, kT, beta]=DHC_Abdussalam(p,T,opt)
% Funkcija za izračunavanje gustine n-heptana, n-oktana i etanola u
% zavisnosti od pritiska i temperature
% Model Abdussalam
% S. J. Popović 2024.05 v01
% ref.
% Ali A. Abdussalam, Gorica R. Ivaniš, Ivona R. Radović, Mirjana Lj. Kijevčanin
% Densities and derived thermodynamic properties for the (n-heptane +
% n-octane), (n-heptane + ethanol) and (n-octane + ethanol) systems at
% high pressures
% J. Chem. Thermodynamics 100 (2016) 89-99

% Vrednost referentnog pritiska
pREF=1.0E+05;
corr_p=1.0E-06;
% p=600.0E+05;

switch opt
    case 'n-heptan'
        % n-Heptan C7H16
        a0=+871.86;
        a1=-0.44006;
        a2=-6.8295E-04;
        b0=+364.98;
        b1=-1.4465;
        b2=+1.4864E-03;
        c0=+0.090856;
    case 'n-oktan'
        % n-oktan C8H18
        a0=+875.98;
        a1=-0.39170;
        a2=-6.8294E-04;
        b0=+376.90;
        b1=-1.4388;
        b2=+1.4222E-03;
        c0=+0.091360;
    case 'etanol'
        % Etanol C2H5OH
        a0=+952.55;
        a1=-0.2671;
        a2=-9.8674E-04;
        b0=+521.31;
        b1=-2.0143;
        b2=+2.1155E-03;
        c0=+0.11571;
    otherwise
end

% Izračunavanje referentne gustine @pREF
rhoREF=a0+a1.*T+a2.*T.^2;
% Izračunavanje funkcijskih članova članova
```

```
BT=b0+b1.*T+b2.*T.^2;
CT=c0;
C1=BT+(p.*corr_p);
C2=BT+(pREF.*corr_p);
f_log=log(C1./C2);
% izračunavanje gustine rho=f(p,T)
rhoHC=rhoREF./(1-CT.*f_log);
% Izračunavanje koeficijenta stišljivosti, beta=f(p,T)
% (Coefficient of Compressibility, Isotherma coefficient of Compressibility)
% beta=(1/rho)*(drho/dp) @T=idem.
% beta=(-1/V)*(dV/dp) @T=idem.
% [1/Pa]
beta=corr_p.*CT./(C1.*(1-CT.*f_log));
% Izračunavanje modula stišljivosti, kT=f(p,T)
% (Bulk Modulus)
% [Pa]
kT=1./beta;
```

2.1.6 Gustina binarne mešavine alkana - model Abdusalem

Koristeći prethodno razvijenu funkciju `DHC_Abdussalam.m` i podatke iz literature [15], izvršiti potrebne izmene i model prilagoditi izračunavanju gustine binarne mešavine normalnog heptana (n-C_7H_{16}) i normalnog oktana (n-C_8H_{18}). Rezultate promene gustine u zavisnosti od pritiska i temperature prikazati za masene udele n-heptana u smeši od 25%, 50% i 75%.

2.1.7 Gustina binarne mešavine n-heptana i etanola - model Abdusalem

Koristeći prethodno razvijenu funkciju za izračunavanje gustine binarne mešavine i podatke iz literature [15], izvršiti potrebne izmene i model prilagoditi izračunavanju gustine mešavine normalnog heptana (n-C_7H_{16}) i etanola (C_2H_5OH). Rezultate promene gustine u zavisnosti od pritiska i temperature prikazati za masene udele etanola u smeši od 25%, 50% i 75%.

2.1.8 Izračunavanje gustine binarne mešavine n-oktana i etanola - model Abdusalem

Koristeći funkciju iz prethodnog primera i podatke iz literature [15], izvršiti potrebne izmene i model prilagoditi izračunavanju gustine mešavine normalnog oktana (n-C_8H_{18}) i etanola (C_2H_5OH). Rezultate promene gustine u zavisnosti od pritiska i temperature prikazati za masene udele etanola u smeši od 25%, 50% i 75%.

2.1.9 Izračunavanje gustine različitih ugljovodonika u funkciji temperature - model Elbro

Izračunati promenu gustine normalnog oktana (n-C_8H_{18}), normalnog heptana (n-C_7H_{16}) i etanola (C_2H_5OH) u zavisnosti od temperature koristeći model Elbro i eksperimentalne podatke iz literature [16]. Proračun izvršiti za pritisak goriva od 0,1 MPa i uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 5 K. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature.

Rešenje

Elbrov model [16] ograničen je na izračunavanje gustine složenih ugljovodonika u zavisnosti od temperature. U tom smislu ima ograničenu primenu na niskopritisne sisteme obrazovanja smeše, ali pre svega upotrebu goriva čije je hemijski sastav u potpunosti poznat i ograničen na referentne, čiste ugljovodonike. Ugljovodonična goriva koja predstavljaju mešavinu više različitih čistih ugljovodonika ne može se odrediti ovom metodom. Ovaj model je specifičan i bitno se razlikuje od modela Tejt-Taman koji podrazumeva poznavanje niza koeficijenta za nekoliko pojedinačnih polinomskih zavisnosti, a koji su karakteristični i utvrđuju se identifikacijom na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka. Za model Elbro, podrazumeva se poznavanje temperaturno zavisnog doprinosa pojedinačnih osnovnih ugljovodoničnih grupa vrednosti gustine složenog ugljovodonika. Metoda će biti prikazana na primeru najčešće korišćenog referentnog ugljovodonika - normalnog oktana koji se sastoji iz 2 metil grupe CH_3 i 6 metilen grupa CH_2. Ukupna molarna zapremina složenog ugljovodonika određuje se zbirom proizvoda broja pojedinačne ugljovodonične grupe i njenog doprinosa promeni molarne zapremine u zavisnosti od temperature:

$$V_m(T) = \sum_{1}^{k} n_i \Delta v_{m,i}(T) \tag{2.10}$$

Priraštaj specifične molarne zapremine svake pojedinačne ugljovodonične grupe sa promenom temperature prikazana je jednostavnim polinomom:

$$\Delta V_m(T) = A_i + B_i \cdot T + B_i \cdot T^2 \tag{2.11}$$

Molarna masa svake pojedinačne ugljovodonične grupe određuje se na jednostavan način, poznavajući broj atoma pojedinih elemenata koji grade datu ugljovodoničnu

grupu. Pretpostavljajući da se grupa sastoji samo iz atoma vodonika, ugljenika i kiseonika, može se postaviti sledeći izraz:

$$M_{HCO,i} = n_{H,i} \cdot M_H + n_{C,i} \cdot M_C + n_{O,i} \cdot M_O \tag{2.12}$$

Molarna masa složenog ugljovodonika izračunava se kao zbir proizvoda broja i molarne mase svake pojedinačne ugljovodonične grupe:

$$M_{HCO} = \sum_{1}^{k} n_i \cdot M_{HCO,i} \tag{2.13}$$

a gustina kao odnos ukupne molarne mase složenog ugljovodonika i njegove molarne zapremine na datoj temperaturi:

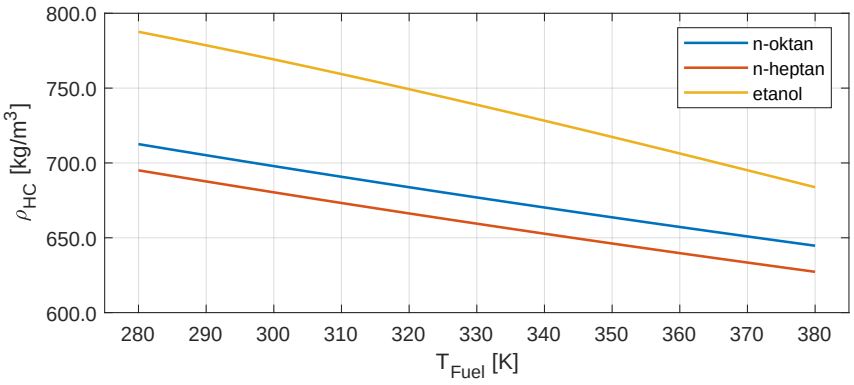
$$\rho_{HCO} = \frac{M_{HCO}}{v_m\,(T)} \tag{2.14}$$

Koeficijenti za proračun gustine najčešće korišćenih ugljovodonika i odgovarajućih grupa preuzeti su iz rada [16] i prikazani u tabeli 2.7

Oznaka grupe	A $[\mathrm{cm^3/mol}]$	B $[\mathrm{cm^3/molK}]$	C $[\mathrm{cm^3/molK^2}]$	Primer ugljovodonika u kome se grupa može naći
CH_3	18,960	45,58	0	*butane*: $2\,CH_3$, $2\,CH_2$
CH_2	12,520	12,94	0	*2-methylpropane*: $3\,CH_3$, $1\,CH$
CH	6,297	−21,92	0	*2,2-dimethylpropane*: $4\,CH_3$, $1\,C$
C	1,296	−59,66	0	
ACH	10,090	17,37	0	*benzene*: $6\,ACH$
$ACCH_3$	23,580	24,43	0	*toluene*: $5\,ACH$, $1\,ACCH_3$
$ACCH_2$	18,160	−8,589	0	*ethylbenzene*: $1\,CH_3$, $5\,ACH$, $1\,ACCH_2$
$ACCH$	8,925	−31,86	0	*cumene*: $2\,CH$, $5\,ACH$, $1\,ACCH$
ACC	7,369	−83,60	0	*tert-butylbenzene*: $3\,CH_3$, $5\,ACH$, $1\,ACC$
$CH_2=$	20,630	31,43	0	*1-hexene*: $1\,CH_3$, $3\,CH_2$, $1\,CH_2=$, $1CH=$
$CH=$	6,761	23,97	0	*2-hexene*: $2\,CH_3$, $2\,CH_2$, $2\,CH=$
$C=$	−0,3971	−14,10	0	*2-methyl-2-butene*: $3\,CH_3$, $1\,CH=$, $1C=$
CH_2OH	39,460	−110,60	23,31	*1-hexanol*: $1\,CH_3$, $4\,CH_2$, $1\,CH_2OH$
$CHOH$	40,920	−193,20	32,21	*2-hexanol*: $2\,CH_3$, $3\,CH_2$, $1\,CHOH$
$aCOH$	41,200	−164,20	22,78	*phenol*: $5\,ACH$, $1\,ACOH$
CH_3CO	42,180	−67,17	22,58	*methyl ethyl ketone*: $1\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,CH_3CO$
CH_2CO	48,560	−170,40	32,15	*diethyl ketone*: $2\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,CH_2CO$
$CHCO$	25,170	−185,60	28,59	*diisopropyl ketone*: $4\,CH_3$, $1\,CH$, $1\,CHCO$
CHO	12,090	45,25	0	*1-hexanal*: $1\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,CHO$
CH_3COO	42,820	−20,50	16,42	*butyl acetate*: $1\,CH_3$, $3\,CH_2$, $1\,CH_3COO$
CH_2COO	49,730	−154,10	33,19	*butyl propionate*: $2\,CH_3$, $3\,CH_2$, $1\,CH_2COO$
$CHCOO$	43,280	−168,70	33,25	*methyl isobutyrate*: $3\,CH_3$, $1\,CHCOO$
COO	14,230	11,93	0	*poly(methyl methacrylate)*: $2\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,C$, $1\,COO$
$ACCOO$	43,060	−147,20	20,93	*methyl benzoate*: $1\,CH_3$, $5\,ACH$, $1\,ACCOO$
$CH3O$	16,660	74,31	0	*ethyl methyl ether*: $1\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,CH_3O$
CH_2O	14,410	28,54	0	*diethyl ether*: $2\,CH_3$, $1\,CH_2$, $1\,CH_2O$
CHO	35,070	−199,70	40,93	*diisopropyl ether*: $4\,CH_3$, $1\,CH$, $1\,CHO$
CO	30,120	−247,30	40,69	*di-tert-butyl ether*: $6\,CH_3$, $1\,C$, $1\,CO$

Tabela 2.7: Koeficijenti polinoma za izračunavanje priraštaja zapremine ugljovodonične grupe u zavisnosti od temperature [16](„=” je simbol dvovalentne veze).

Rezultati proračuna prikazani su na slici 2.11. Glavni program `GustinaHC060.m` (2.5) za izračunavanje gustine ugljovodonika modelom Elbro prikazane su u nastavku.



Slika 2.11: Zavisnost gustine različitih ugljovodonika u funkciji temperature određeni prema modelu Elbro.

Program 2.5: `GustinaHC060.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine dizel-goriva u zavisnosti
% od pritiska i temperature
% primena modela Elbro
clc;
clear;
close all;
% PM rev

rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=5;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);


% HCType='C8H18';
% HCGroupName=['C'; 'CH'; 'CH2'; 'CH3'; 'CH2OH'];
n_HCGroup_1=    [0,    0,    6,     2,     0]; % n-oktan
n_HCGroup_2=    [0,    0,    5,     2,     0]; % n-heptan
n_HCGroup_3=    [0,    0,    0,     1,     1]; % etanol
n_HCGroup = [n_HCGroup_1; n_HCGroup_2; n_HCGroup_3];

for i = 1 : size(n_HCGroup,1)
    for j=1:1:nT
        [rhoFuel(i,j)]=DHC_Elbro(TFuel(1,j),n_HCGroup(i,:));
    end
end

colororder('default');
figure(1);
plot(TFuel,rhoFuel(1,:),'-','LineWidth',1.2);
hold on;
plot(TFuel,rhoFuel(2,:),'-','LineWidth',1.2);
```

```
plot(TFuel,rhoFuel(3,:),'-','LineWidth',1.2);
grid on;
ylabel('\rho_{HC} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('T_{Fuel} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
legend('n-oktan','n-heptan','etanol')
```

Program 2.6: `DHC_Elbro.m`

```
function [rhoHC]=DHC_Elbro(THC,n_HCGroup)
% Funkcija za izračunavanje gustine alkana, izo-alkana i alkohola
% u zavisnosti od temperature
% Model Elbro
% S. J. Popović 2024.05 v01

% ref.
% H.S. Elbro, A. Fredenslund, P. Rasmussen
% Group contribution method for the prediction of liquid densities as a function of
    temperature for solvents, oligomers, and polymers
% Ind Eng Chem Res, 30 (1991), pp. 2576-2582

% Harish Sivasubramanian
% Examination of thermo-physical properties of ethanol and gasoline
% numerically and its behaviour at different temperatures
% Int. J. Adv. Res. 4(10), 1929-1936, DOI: 10.21474/IJAR01/2006

% Napomena o vrednosti koeficijenata polinoma za izračunavanje gustine
% U Elbro et al. (1991), str. 4, Tab. 1, prikazane su vrednosti koef. A, B i C.
% Prikaz vrednosti koeficijenata je inverzan - u zaglavlju tabele date su oznake
    10^3*B i 10^5*C,
% a u tabeli brojčane vrednosti. Primer:
% 1E+03*B = 0.1234 ..... B = 0.1234E-03
% 1E+05*C = 0.5678 ..... C = 0.5678E-05
% Isti prikaz je dat i kod Sivasubramanian (2006).

% n_HCGroup         [-]          broj pojedinačnih HC grupa u sastavu ugljovodonika
% T                 [K]          temperatura
% Molarne mase za C, H i O
M_C=12.011;
M_H=1.00784;
M_O=15.999;

% Faktor za preračunavanje gustine u jedinice SI
corr_rho=1.0E+03; % gr/cm3 > kg/m3

% HCGroupName=['C'; 'CH'; 'CH2'; 'CH3'; 'CH2OH'];

% a=strcmpi(HCType,HCGroupName)

%            [A           B           C           nC nH nO
HCGroupCoeff=[+1.296E+00, -59.66E-03, +0.000E-05, 1, 0, 0;...
```

```
              +6.297E+00, -21.92E-03, +0.000E-05, 1, 1, 0;...
              +12.52E+00, +12.94E-03, +0.000E-05, 1, 2, 0;...
              +18.96E+00, +45.58E-03, +0.000E-05, 1, 3, 0;...
              +39.46E+00, -110.6E-03, +23.31E-05, 1, 3, 1];
[m_GC, n_GC]=size(HCGroupCoeff)

% Izračunavanje priraštaja molarne zapremine i molarne mase komponenata (HC grupa)
    @T
for i=1:1:m_GC
    dv_HCGroup(i)=HCGroupCoeff(i,1)+HCGroupCoeff(i,2).*THC+HCGroupCoeff(i,3).*THC
        .^2;
    M_HCGGroup(i)=HCGroupCoeff(i,4).*M_C+HCGroupCoeff(i,5).*M_H+HCGroupCoeff(i,6).*
        M_O
end

% Izračunavanje molarne mase ugljovodonika
M=sum(n_HCGroup.*M_HCGGroup)
% Izračunavanje molarne zapremine ugljovodonika
V=sum(n_HCGroup.*dv_HCGroup)
% Izračunavanje gustine ugljovodonika
rhoHC=corr_rho.*M./V;
```

2.1.10 Uticaj temperature i pritiska na gustinu n-oktana - poređenje modela

Izračunati promenu gustine normalnog oktana (n-C_8H_{18}) u zavisnosti od temperature koristeći razvijene funkcije za modele Tejt-Taman (`DHC_Tait.m` 2.2) i Elbro (`DHC_Elbro.m` 2.6) i eksperimentalne podatke iz literature [12, 13, 14, 16], a zatim odrediti i relativno odstupanje rezultata dobijenih modelom Elbro u odnosu na rezultate dobijene modelom Tejt-Taman. Pretpostavljajući primenu u niskopritisnim sistemima za obrazovanje smeše, proračun izvršiti za pritisak goriva od $0.1\,MPa$ i uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od $280\,K$ do $380\,K$, sa korakom od $50\,K$. Zavisnost gustine od temperature i promenu relativnog odstupanja rezultata dva modela prikazati objedinjeno na dijagramu sa dve ordinate.

2.2 Viskoznost ugljovodonika

2.2.1 Zavisnost viskoznosti alkana od temperature - model Arenijus

Napisati funkciju za izračunavanje dinamičke viskoznosti referentnih ugljovodonika koristeći model Arenijusa (*Arrhenius*) i eksperimentalne podatke iz literature [17]. Prikazati rezultate primene funkcije za slučaj normalnog heptana i normalnog oktana

za uobičajeni opseg temperatura goriva od 283 K do 353 K.

Rešenje

Prema Arenijusu, logaritam odnosa dinamičke viskoznosti na zadatoj i referentnoj temperaturi predstavljen je polinomom 3. stepena:

$$\ln \frac{\mu\,(p_0,T)}{\mu\,(p_0,T_0)} = A + B \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) + C \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 + D \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 \tag{2.15}$$

Transformacijom se dolazi do eksponencijalnog oblika:

$$\mu\,(p_0,T) = \mu\,(p_0,T_0) \cdot \exp\left(A + B \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) + C \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 + D \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^3\right) \tag{2.16}$$

Ako se vrednost viskoznosti na referentnom pritisku i temperaturi označi kao konstanta, zapis se može uopštiti i prilagoditi programskom okruženju:

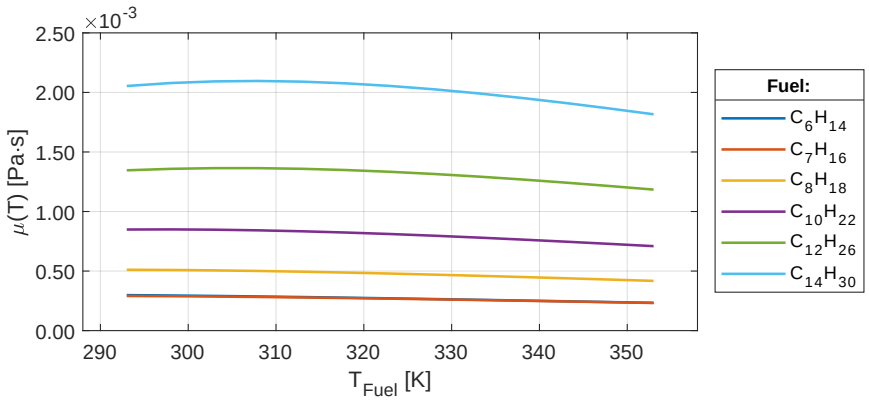
$$\begin{aligned}\mu\,(p_0,T) &= c_1 \cdot \exp\left(c_2 + c_3 \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) + c_4 \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 + c_5 \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^3\right) \\ &= c_1 \cdot \exp\left(\sum_2^5 c_i \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{i-2}\right)\end{aligned} \tag{2.17}$$

Koeficijenti za izračunavanje dinamičke viskoznosti nekoliko karakterističnih referentnih ugljovodonika preuzeti su iz rada Dajmonda (Dymond) [17] i prikazani su u tabeli 2.8. Navedene vrednosti se odnose na referentni pritisak $p_0 = 100\,\text{kPa}$ i referentnu temperaturu 283,15 K, a mogu se primeniti na opseg temperatura do 355 K.

Naziv ugljovodonika	Oznaka ugljovodonika	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Normalni heksan	n-C_6H_{14}	0,2949	−5,8734	11,0471	−7,3844	2,2107
Normalni heptan	n-C_7H_{16}	0,2890	−6,2654	12,0216	−8,4110	2,6546
Normalni oktan	n-C_8H_{18}	0,5092	−6,4960	12,6817	−9,4044	3,2187
Normalni dekan	n-$C_{10}H_{22}$	0,8498	−7,1561	14,2582	−11,3963	4,2942
Normalni dodekan	n-$C_{12}H_{26}$	1,3585	−7,8074	16,0114	−13,8627	5,6586
Normalni tetradekan	n-$C_{14}H_{30}$	2,0780	−8,5427	17,6373	−15,7492	6,6550

Tabela 2.8: Koeficijenti za izračunavanje dinamičke viskoznosti prema modelu Arenijusa [17].

Na slici 2.12 prikazana je zavisnost dinamičke viskoznosti od temperature za različite alkane prema modelu Arenijusa. Primećuje se da su rezultati za C_6H_{14} i C_7H_{16} veoma slični.



Slika 2.12: Zavisnost dinamičke viskoznosti od temperature za različite alkane (model Arenijus).

Program 2.7: `ViskoznostHC04.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti referentnih ugljovodonika u
    zavisnosti od temperature
% n-Heksana, n-Heptana, n-Oktana, n-Dekana, n-Dodekana, n-Tetradekana
% Model Arrhenius
% S. J. Popović 202405.v01

% Ref.
% J. H. Dymond, H. A. Oye
% Viscosity of selected liquid n-Alcanes
% J. Phys. Chem. Ref. Data 23, 41-53 (1994), DOI: 10.1063/1.555943
% str. 5, izraz (1)
% str. 9, tab. 8, tab. 9

clc;
clear;
close all;

TFuelMin=293;
TFuelMax=353;
dTFuel=5;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% pFuel=1.0E+05;
% pFuelMin=50.0E+05;
% pFuelMax=2000.0E+05;
% dpFuel=100.0E+05;
% pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
% [mp np]=size(pFuel);
HCType={'C06H14'; 'C07H16'; 'C08H18'; 'C10H22'; 'C12H26'; 'C14H30'};
%          1         2         3         4         5         6
% Izbor rednog broja HC iz liste ponuđenih
CalcList=[1,2,3,4,5,6];
LegendList0 = {'C_6H_1_4'; 'C_7H_1_6'; 'C_8H_1_8';...
    'C_1_0H_2_2'; 'C_1_2H_2_6'; 'C_1_4H_3_0'};
```

```
LegendList = LegendList0(CalcList,1)

[mCL nCL]=size(CalcList);

for i=1:1:nCL
    for j=1:1:nT
        CalcList(1,i)
        [muHC(i,j)]=VHC_Arrhenius(TFuel(1,j),HCType(CalcList(1,i),1));
    end
end

figure(1)
plot(TFuel,muHC(:,:),'-', 'MarkerSize',3,'LineWidth',1.2)
hold on;
grid on;
ylabel('\mu(T) [Pa\cdots]');
ytickformat('%.2f');
xlabel('T_{Fuel} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={'Fuel:'};
lgd = legend(LegendList,'Location','eastoutside');
title(lgd,LegendTitle);
```

Program 2.8: `VHC_Arrhenius.m`

```
function [ViscDynHC]=VHC_Arrhenius(T,HCType)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od
% temperature
% n-Heksana, n-Heptana, n-Oktana, n-Dekana, n-Dodekana, n-Tetradekana
% Model Arrhenius
% S. J. Popović 202405.v01

% Ref.
% J. H. Dymond, H. A. Oye
% Viscosity of selected liquid n-Alcanes
% J. Phys. Chem. Ref. Data 23, 41-53 (1994), DOI: 10.1063/1.555943
% str. 5, izraz (1)
% str. 9, tab. 8, tab. 9

% (mPa*s @T0)
% clc;
% clear all;
% close all;
% T=298;
T0=298; % [K]
% HCType='C8H18';
corr_mu=1.0E-03; % [mPa*s] > [Pa*s]


HCBase= {'C06H14'; 'C07H16'; 'C08H18'; 'C10H22'; 'C12H26'; 'C14H30'};
%         mu0       A         B,        C,       D
%         c(1,1)    c(1,2)    c(1,3)    c(1,4)   c(1,5)
```

```
coeffHC=[+0.2949, -5.8734, +11.0471, -7.3844, +2.2107;...
         +0.2890, -6.2654, +12.0216, -8.4110, +2.6546;...
         +0.5092, -6.4960, +12.6817, -9.4044, +3.2187;...
         +0.8498, -7.1561, +14.2582, -11.3963, +4.2942;...
         +1.3585, -7.8074, +16.0114, -13.8627, +5.6586;...
         +2.0780, -8.5427, +17.6373, -15.7492, +6.6550];

% Traženje rednog broja člana baze naziva ugljovodonika
iFuel=find(strcmpi(HCType,HCBase));
% Provera da li je vektor indeksa prazan (slučaj kada ugljovodonik nije pronađen u
    bazi)
checkHC=isempty(iFuel);

% Određivanje koeficijenta viskoznosti na osnovu prepoznatog naziva goriva
if(checkHC<1)
    C(1,:)=coeffHC(iFuel,:);
    fT=T./T0;
    fArrhenius=C(1,2)+C(1,3)./fT+C(1,4)./(fT.^2)+C(1,5)./(fT.^2);
    ViscDynHC=corr_mu.*C(1,1).*exp(fArrhenius);
else
    disp('Greška u zadavanju naziva goriva. Zadato gorivo nije pronađeno u bazi.')
    ViscDynHC=0.0;
end
```

2.2.2 Zavisnost viskoznosti alkana od pritiska - model Barus

Formirati funkciju za izračunavanje dinamičke viskoznosti referentnih ugljovodonika koristeći model Barusa (*Barus*) i podatke iz literature [18] za viskozni koeficijent na referentnoj temperaturi od 298 K. Prikazati rezultate primene funkcije za uobičajeni opseg pritisaka goriva od 5 MPa do 200 MPa.

Rešenje

Osnovni izraz za izračunavanje dinamičke viskoznosti maziva u zavisnosti od pritiska po Barusovom modelu može se primeniti i za izračunavanje dinamičke viskoznosti i referentnih ugljovodonika kao i standardizovanih tržišno dostupnih goriva uz napomenu da se podaci za koeficijent viskoznosti obično navode za unapred definisanu referentnu temperaturu. Kada su u pitanju referentni ugljovodonici koji se primenjuju u fundamentalnim istraživanjima motora SUS, treba imati u vidu da je zavisnost koeficijenta viskoznosti od temperature različita za različite ugljovodonike i da načelno, za normalne alkane, npr., uticaj temperature raste sa porastom broja ugljenikovih atoma. Za uobičajeni opseg temperatura goriva od 293 K do 350 K, za alkane, uticaj temperature na promenu koeficijenta viskoznosti se može u prvom približenju zanemariti. Barusov izraz se daje uobičajeno u sledećem obliku:

$$\ln \frac{\mu\,(p,T)}{\mu\,(p_0,T_0)} = \alpha\,(p,T) \cdot p \tag{2.18}$$

ili u eksponencijalnom obliku:

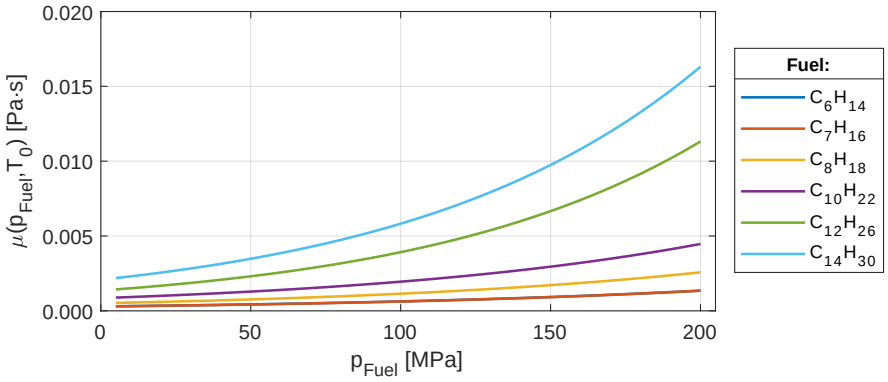
$$\mu\left(p,T\right) = \mu\left(p_0,T_0\right) \cdot \exp\left(\alpha\left(p,T\right) \cdot p\right) \tag{2.19}$$

Vrednosti izotermskog koeficijenta viskoznosti za referentnu temperaturu od 298 K preuzete su iz literature [18] i prikazane u Tabeli 2.9.

Naziv ugljovodonika	Oznaka	α $[10^{-9}\text{Pa}]$
Normalni heksan	n-C_6H_{14}	7,6
Normalni heptan	n-$C7H_{16}$	7,7
Normalni oktan	n-C_8H_{18}	8,1
Normalni dekan	n-$C_{10}H_{22}$	8,3
Normalni dodekan	n-$C_{12}H_{26}$	10,6
Normalni tetradekan	n-$C_{14}H_{30}$	10,3
Normalni heksadekan	n-$C_{16}H_{34}$	12,3
Normalni oktadekan	n-$C_{18}H_{38}$	14,5

Tabela 2.9: Koeficijenti za izračunavanje dinamičke viskoznosti prema modelu Arenijusa [17].

Rezultati proračuna prikazani su na slici 2.13. Uočava se da kod nižih alkana, promena dinamičke viskoznosti sa porastom pritiska nije posebno izražena. U tom smislu, može se izneti preporuka da se kod motornih benzina u kojima je udeo nižih ugljovodonika znatan, promena dinamičke viskoznosti sa porastom pritiska može zanemariti. Nasuprot tome, za više alkane, npr. tetradekan, koji se često uzima kao zamensko referntno gorivo za dizel-motore, dinamička viskoznost se menja u opsegu većem od 300% na opsegu pritisaka karakterističnom za rad savremenih sistema za ubrizgavanje. Zbog toga se kod dizel-motora, uticaj pritiska na dinamičku viskoznost goriva ne može zanemariti.



Slika 2.13: Zavisnost dinamičke viskoznosti od pritiska za različite alkane (model Barus).

Program 2.9: `ViskoznostHC05.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti referentnih ugljovodonika
% u zavisnosti od pritiska
% n-Heksana, n-Heptana, n-Oktana, n-Dekana, n-Dodekana, n-Tetradekana, n-
    Heksadekana, n-Oktadekana
% Model Barus
% S. J. Popović 202405.v01
% P. Mrđa

% Ref.
% M. Elsayed Abdel-Raouf and M. Hasan El-Keshawy, Eds., Crude Oil - New
    Technologies and Recent Approaches,
% IntechOpen, Jun. 28, 2022. ISBN978-1-83969-533-9, eBook (PDF) ISBN978
    -1-83969-534-6, doi: 10.5772/intechopen.95164.
% Chpt. 7,
% P. Arkoudeas: Gasoline Lubricity
% Doi10.5772/intechopen.95164
% str. 14 (15), izraz (5), tab. 4 i 5

clc;
clear;
close all;

TFuel0=298.0;
% TFuelMin=298;
% TFuelMax=353;
% dTFuel=5;
% TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
% [mT nT]=size(TFuel);

% pFuel=1.0E+05;
pFuelMin=50.0E+05;
pFuelMax=2000.0E+05;
dpFuel=50.0E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);
HCType={'C06H14'; 'C07H16'; 'C08H18'; 'C10H22'; 'C12H26'; 'C14H30'; 'C16H34'; '
    C18H38'};
%        1         2         3          4         5         6         7         8
% Izbor rednog broja HC iz liste ponuđenih
CalcList=[1,2,3,4,5,6];
LegendList0 = {'C_6H_1_4'; 'C_7H_1_6'; 'C_8H_1_8'; 'C_1_0H_2_2';...
    'C_1_2H_2_6'; 'C_1_4H_3_0'; 'C_1_6H_3_4'; 'C_1_8H_3_8'};
LegendList=LegendList0(CalcList,1);

[mCL nCL]=size(CalcList);

for i=1:1:nCL
    for j=1:1:np
        [muHCT0]=VHC_Arrhenius(TFuel0,HCType(CalcList(1,i),1));
        [muHC(i,j)]=VHC_Barus(muHCT0,pFuel(1,j),HCType(CalcList(1,i),1));
    end
end
```

```
figure(1)
plot(pFuel.*1.0E-06,muHC(:,:),'-', 'MarkerSize',3,'LineWidth',1.2)
hold on;
grid on;
ylabel('\mu(p_{Fuel},T_{0}) [Pa\cdots]');
ytickformat('%.3f');
xlabel('p_{Fuel} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1.0E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1.0E-06]);
LegendTitle={'Fuel:'};
lgd = legend(LegendList,'Location','EastOutside');
title(lgd,LegendTitle);
```

Program 2.10: `VHC_Barus.m`

```
function [ViscDynHC]=VHC_Barus(ViscDynHC0,pFuel,HCType)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od
% pritiska
% n-Heksana, n-Heptana, n-Oktana, n-Dekana, n-Dodekana, n-Tetradekana, n-Heksana, n
    -Oktadekana
% M. Elsayed Abdel-Raouf and M. Hasan El-Keshawy, Eds., Crude Oil - New
    Technologies and Recent Approaches,
% IntechOpen, Jun. 28, 2022. ISBN978-1-83969-533-9, eBook (PDF) ISBN978
    -1-83969-534-6, doi: 10.5772/intechopen.95164.
% Chpt. 7,
% P. Arkoudeas: Gasoline Lubricity
% Doi10.5772/intechopen.95164
% str. 14 (15), izraz (5), tab. 4 i 5


% Pregled korišćenih oznaka
% ViscDynHC     [Pa*s]      dinamička viskoznost na zadatom pritisku
% ViscDynHC0    [Pa*s]      dinamička viskoznost na referentnom pritisku (p0=1.0E+05)
% alpha         [Pa-1]      koeficijent promene viskoznosti u zavisnosti od pritiska
    (model Vogel)
% pFuel         [Pa]        pritisak goriva

% close all;
% clear all;
% clc;
% HCType='C14H30';

% Nazivi ugljovodonika i vrednosti koeficijenta viskoznosti
HCBase= {'C06H14'; 'C07H16'; 'C08H18'; 'C10H22'; 'C12H26'; 'C14H30'; 'C16H34'; '
    C18H38'};
alphaHC=[ 7.6,     7.7,     8.1,     8.3,      10.6,     10.3,     12.3,
    14.5].*1.0E-09;

% Traženje rednog broja člana baze naziva ugljovodonika
iFuel=find(strcmpi(HCType,HCBase));
% Provera da li je vektor indeksa prazan (slučaj kada ugljovodonik nije pronađen u
    bazi)
checkHC=isempty(iFuel);
```

```
% Određivanje koeficijenta viskoznosti na osnovu prepoznatog naziva goriva
if(checkHC<1)
    alpha=alphaHC(1,iFuel);
    % Izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska po modelu Vogel
        ViscDynHC=ViscDynHC0.*exp(alpha.*pFuel);
else
    disp('Greška u zadavanju naziva goriva. Zadato gorivo nije pronađeno u bazi.')
    ViscDynHC=0.0;
end
```

3 Opšta svojstva goriva

Osobine goriva, zajedno sa elementarnim sastavom, definišu kvalitet goriva, svrsishodnost i valjanost njihove upotrebe. Neke od osobina goriva su zajedničke za sva goriva i nazivaju se opštim svojstvima, dok su pojedine karakteristike vezane samo za specifična goriva. Neke od osobina goriva su:

- Količina toplote koja nastaje sagorevanjem goriva (toplotna moć goriva);
- Specifična toplota;
- Koeficijent toplotne provodljivosti;
- Kriva isparavanja;
- Gustina goriva;
- Koeficijent stišljivosti itd.

3.1 Gustina, koeficijent i modul stišljivosti goriva

Prema standardima petrohemijske industrije iz 2010. godine, gustina dizel-goriva iznosi $832\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$, dok gustina motornog benzina iznosi $745\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$ uz dozvoljena odstupanja pri normalnim uslovima. U praksi, raspon gustina dizel-goriva i motornog benzina je pri normalnim uslovima relativno širok i iznosi:

- za dizel-goriva od $820\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$ do $845\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$,
- za motorni benzin od $715\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$ do $780\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$.

Gustina goriva sa aspekta formiranja smeše ima značajnu ulogu, a posebno pri projektovanju sistema sa direktnim ubrizgavanjem jer gustina goriva utiče na praktično sve aspekte i fenomene obrazovanja smeše - od brzine strujanja u mlaznici, preko dužine jezgra mlaza, dubine prodora vrha mlaza, ugla konusa mlaza pa sve do veličine kapljice na kraju prvog i drugog raspada. U ovom poglavlju biće prikazani modeli proračuna gustine čistih referentnih ugljovodonika i standardnih tečnih goriva u zavisnosti od temperature i pritiska, a u opsezima koji su karakteristični za rad motora SUS.

Pri projektovanju sistema za formiranje smeše, stišljivost goriva se uzima u razmatranje i uvode se različite računske korekcije o kojima će biti više reči kasnije. Gorivo je stišljiv fluid a relativna elementarna promena zapremine $^{dV}/_{V}$ je proporcionalna elementarnoj promeni pritiska dp, u skladu sa relacijom:

$$\frac{dV}{V} = \beta \cdot dp \tag{3.1}$$

gde je β koeficijent stišljivosti goriva. Koeficijent stišljivosti je relativno mala veličina, ali ipak, konačna i na osnovu jednačine 3.1 iznosi:

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{dV}{dp}\right)_S \tag{3.2}$$

pri izentropskoj promeni stanja ($S = const.$).

Brzina zvuka (brzina prostiranja talasa pritiska) u tečnosti se definiše kao:

$$a^2 = \left(\frac{dp}{d\rho_g}\right)_S \tag{3.3}$$

gde je ρ_g gustina goriva, a p pritisak na kome se nalazi gorivo.

S obzirom da pri izentropskoj promeni stanja nema razmene energije i promene mase, sledi da je:

$$V \cdot d\rho = \rho \cdot dV \tag{3.4}$$

Kombinovanjem jednačina 3.2, 3.3 i 3.4 se dobija izraz za koeficijent stišljivosti:

$$\beta = \frac{1}{a^2 \cdot \rho_g} \tag{3.5}$$

Pri kompresiji goriva od početnog pritiska p_0 do pritiska ubrizgavanja p_u smanjenje zapremine goriva ΔV_c usled stišljivosti je:

$$\Delta V_c = \beta_m \cdot V_{vp} \cdot p_u \tag{3.6}$$

Sa V_{vp} je označena ukupna zapremina goriva izložena visokom pritisku, p_u predstavlja pritisak ubrizgavanja, a β_m označava srednji koeficijent stišljivosti goriva za raspon promene pritiska od p_0 do p_u koji može da se izračuna iz relacije:

$$\beta_m = \frac{\int_{p_0}^{p_u} \beta\,(p)\,dp}{p_u - p_o} \tag{3.7}$$

Za potrebe određivanja koeficijenta stišljivosti goriva β neophodno je poznavanje brzine prostiranja talasa pritiska, odnosno zvuka, kroz dato gorivo. Brzina prostiranja zvuka u značajnoj meri zavisi od zapreminskog udela gasne faze u gorivu, ali radi

pojednostavljenja, prisustvo gasne faze neće se uzeti u razmatranje.

3.1.1 Gustina dizel-goriva - model Pairi

Koristeći Pairijev (*Payri*) empirijski model i podatke iz literature [19], izračunati promenu gustine, modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti standardnog dizel-goriva (EN590) u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature. Pretpostaviti uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 20 K i uobičajene vrednosti pritiska u savremenim akumulatorskim sistemima za ubrizgavanje od 25 MPa do 200 MPa. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature.

Rešenje

Model Pairija kombinuje polinomsku zavisnost gustine dizel-goriva od pritiska i temperature. Koeficijenti polinoma identifikovani su za slučajeve standardnog dizel-goriva za primenu u letnjim (EN590ref) i zimskim (EN590w) uslovima kao i za metil-ester repičinog ulja (eng.: *Rapeseed Methyl Ester - RME*). Prikaz modela, teorijske osnove eksperimenta i postupka identifikacije mogu se naći u radu Pairija [19]. Izraz za gustinu u zavisnosti od promene temperature i pritiska u odnosu na referentne vrednosti, prikazan je na sledeći način:

$$\rho\left(p,T\right) = r_1 + r_2 \cdot \left(T - T_0\right) + r_3 \cdot \left(p - p_0\right) + r_4 \cdot \left(p - p_0\right)^2 + \\ + r_5 \cdot \left(T - T_0\right)^2 + r_6 \left(p - p_0\right)\left(T - T_0\right) \quad (3.8)$$

Empirijska zavisnost izotermskog modula stišljivosti data je izrazom:

$$k_T\left(p,T\right) = k_1 + k_2 \cdot \left(T - T_0\right) + k_3 \cdot \left(p - p_0\right) \quad (3.9)$$

Koeficijent stišljivosti određuje se kao recipročna vrednost modula stišljivosti:

$$\beta_T\left(p,T\right) = \frac{1}{k_T\left(p,T\right)} \quad (3.10)$$

Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine i izotermskog modula stišljivosti preuzeti su iz rada [19] i prikazani u tabeli 3.1. Statistički parametar R^2 predstavlja kvalitet aproksimacionog polinoma, odnosno, po definiciji predstavlja koeficijent determinacije.

Oznaka goriva	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	R^2
EN590ref	835,698	−0,6280	0,4914	−0,6280	−0,00070499	0,00103633	0,9998
EN590w	821,468	−0,5615	0,4951	−0,6280	−0,00072810	0,00103526	0,9998
RME	874,584	−0,6991	0,4790	−0,6280	−0,00063634	0,00091866	0,9999

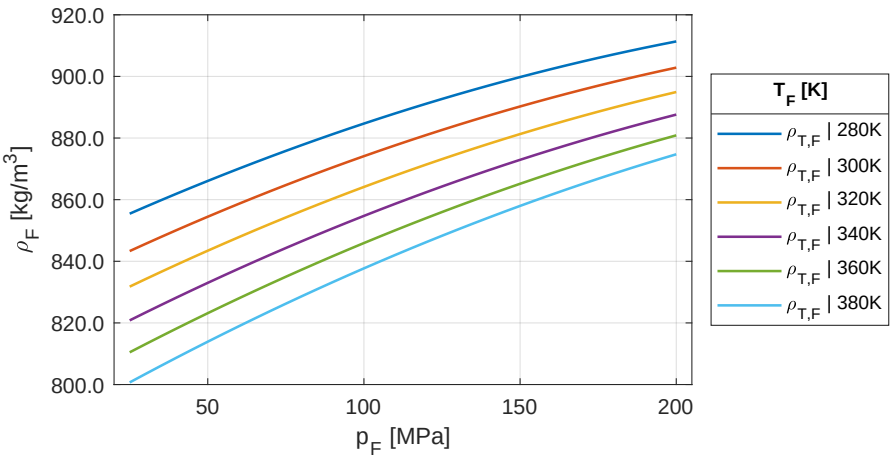
Tabela 3.1: Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine u zavisnosti od temperature i pritiska (model Pairi) [19].

Oznaka goriva	k_1	k_2	k_3	R^2
EN590ref	1581,27	−7,2870	9,4233	0,9947
EN590w	1522,92	−6,9863	9,7161	0,9947
RME	1697,52	−7,0479	9,1896	0,9909

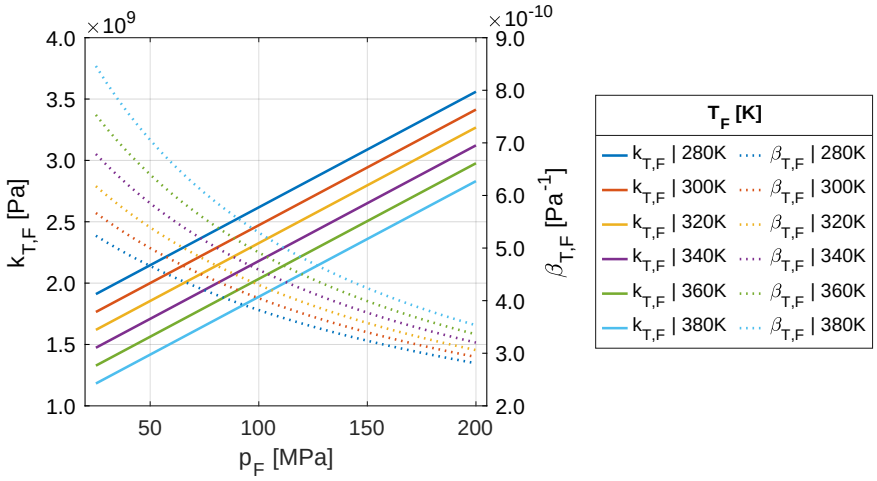
Tabela 3.2: Koeficijenti polinoma za izračunavanje izotermskog modula stišljivosti različitih goriva za dizel motore u zavisnosti od temperature i pritiska (model Pairi) [19].

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 3.1 i 3.2. Prema očekivanju, gustina opada sa porastom temperature za datu nepromenjenu vrednost pritiska goriva. Sa druge strane, za datu nepromenjenu vrednost temperature, porast pritiska dovodi do porasta gustine. Promena zapremine se ogleda u podacima za modul i koeficijent stišljivosti. Očekivano, koeficijent stišljivosti opada sa porastom pritiska tečnosti i raste sa porastom temperature.



Slika 3.1: Zavisnost gustine dizel-goriva od temperature za različite vrednosti pritiska (model Pairi).



Slika 3.2: Zavisnost modula stišljivosti dizel-goriva (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska (model Pairi).

Program 3.1: `GustinaGorivaD010.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine dizel-goriva u
% zavisnosti od pritiska i temperature
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Payri
clc;
clear;
close all;

% rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=20;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pFuelMin=250.0E+05;
pFuelMax=2000.0E+05;
dpFuel=50E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoFuel(i,j), kTFuel(i,j), betaTFuel(i,j)] = DFD_Payri(pFuel(1,i),TFuel(1,
            j),'EN590ref');
    end
end

colororder('default');
```

```
figure(1);
plot([pFuel.*1E-06]',rhoFuel,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{Fuel} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('p_{Fuel} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
LegendTitle={'T_{Fuel} [K]'};
LegendLabel=strcat('\rho_{T,Fuel} |',{' '},num2str([TFuel]','%.0f'),'K');
lgd = legend(LegendLabel,'Location','EastOutside');
title(lgd,LegendTitle);

figure(2);
yyaxis left
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',kTFuel,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('k_{T,Fuel} [Pa]');
ytickformat('%.1f');
yyaxis right
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',betaTFuel,':','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('\beta_{T,Fuel} [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
grid on;

xlabel('p_{Fuel} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendTitle={'T_{Fuel} [K]'};
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('k_{T,Fuel} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'K'))
    ;
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\beta_{T,Fuel} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'
    K'));
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2],'Location','EastOutside','NumColumns',2)
    ;
title(lgd,LegendTitle);
lgd.ItemTokenSize(1) = 12;
```

Program 3.2: `DFD_Payri.m`

```
function [rhoFuel, kT, betaT]=DFD_Payri(pFuel,TFuel,FuelType)
% Funkcija za izračunavanje gustine i modula stišljivosti dizel-goriva
% Model Payri et. al.
% S. J. Popović 202405.v01

% Ref.
```

```
% R. Payri, F.J. Salvador, J. Gimeno, G. Bracho
% The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel
% and biodiesel fuels
% Fuel 90 (2011) 1172-1180
% str. 7, izraz (13), tabela (6)

% pFuel      [Pa]         pritisak goriva
% TFuel      [K]          temperatura goriva
% FuelType   [-]          vrsta goriva
% EN590ref ... standardno dizel-gorivo (letnja mešavina)
% EN590w ..... standardno dizel-gorivo (zimska mešavina)
% RME ........ bio-dizel na bazi metil-estra repičinog ulja (Rape Methyl Ester)

% Referentne vrednosti pritiska i temperature
p0=1.0E+05;
T0=293;

% Korekcioni faktori za korišćene jedinice pritiska i temperature
corr_p=1.0E-06; % Pa > MPa
corr_T=1.0E-00; % K > K
switch FuelType
    case 'EN590ref'
        % Vrednosti koeficijenata za izračunavanje gustine dizel-goriva rho=f(p,T)
        r1=+835.698;
        r2=-0.6280;
        r3=+0.4914;
        r4=-0.00070499;
        r5=+0.00073739;
        r6=+0.00103633;

        % Koeficijenti za izračunavanje modula stišljivosti beta=f(p,T)
        k1=+1581.27;
        k2=-7.2870;
        k3=+9.4233;
    case 'EN590w'
        % Vrednosti koeficijenata za izračunavanje gustine dizel-goriva rho=f(p,T)
        r1=+821.468;
        r2=-0.5615;
        r3=+0.4951;
        r4=-0.00072810;
        r5=+0.00018393;
        r6=+0.00103526;

        % Koeficijenti za izračunavanje modula stišljivosti beta=f(p,T)
        k1=+1522.92;
        k2=-6.9863 ;
        k3=+9.7161;

    case 'RME'
        % Vrednosti koeficijenata za izračunavanje gustine dizel-goriva rho=f(p,T)
        r1=+874.584;
        r2=-0.6991;
        r3=+0.4790;
        r4=-0.00063634;
        r5=+0.0009704;
```

```
        r6=+0.00091866;
        % Koeficijenti za izračunavanje modula stišljivosti beta=f(p,T)
        k1=+1697.52;
        k2=-7.0479;
        k3=+9.1896;
    otherwise
end

% Izračunavanje funkcijskih članova
fT=(TFuel-T0).*corr_T;
fp=(pFuel-p0).*corr_p;

%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje gustine goriva rho=f(p,T)
rhoFuel=r1+r2.*fT+r3.*fp+r4.*fp.^2+r5.*fT.^2+r6.*fp.*fT;
% Izračunavanje modula stišljivosti (Bulk Modulus), kT=f(p,T)
% kT=rho*(dp/drho) @T=idem.
% kT=(-V)*(dp/dV) @T=idem.
kT=(k1+k2.*fT+k3.*fp)./corr_p;
% Izračunavanje izotermskog koeficijenta stišljivosti
% (Coefficient of Compressibility, Isotherma coefficient of Compressibility)
betaT=1./kT;
```

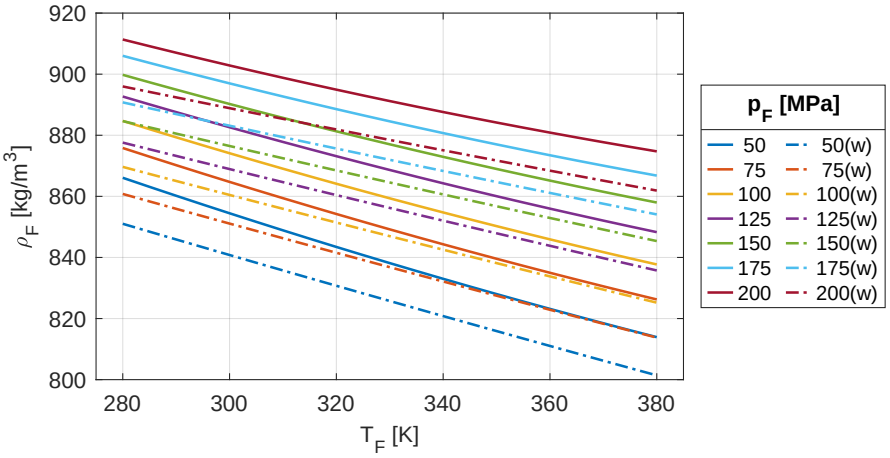
3.1.2 Poređenje zavisnosti gustina dizel-goriva zimskog i letnjeg kvaliteta - model Pairi

Koristeći prethodno napisanu funkciju za izračunavanje gustine dizel-goriva prema modelu Pairi (`DFD_Payri.m` 3.2) i eksperimentalne podatke iz literature [19], sprovesti uporednu analizu uticaja pritiska i temperature na gustinu standardnog dizel-goriva za letnje i zimske uslove. Pretpostaviti uobičajene opsege promene temperature u sistemu za ubrizgavanje (280 K do 380 K) i uobičajene radne vrednosti pritiska ubrizgavanja kod savremenih dizel-motora (50 MPa do 200 MPa sa korakom od 25 MPa). Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

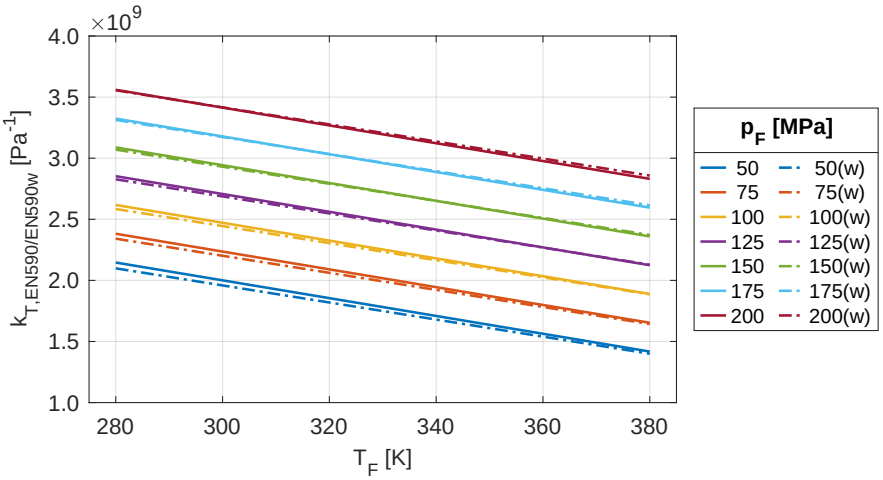
- Dijagram 1: zavisnost gustine od temperature za diskretne vrednosti pritiska;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za diskretne vrednosti pritiska.

Rešenje

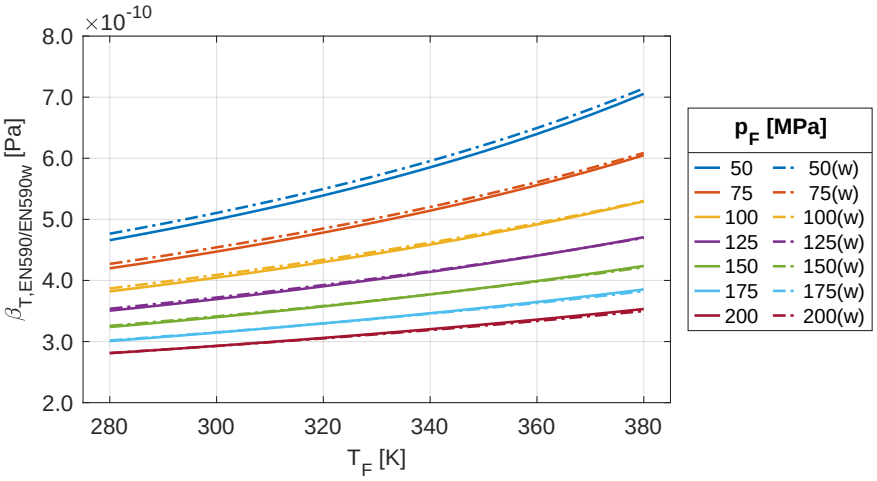
Rezultati proračuna gustine, modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti prikazani su na slikama 3.3 i 3.4. Uočava se da je gustina goriva zimskog kvaliteta niža, što je i očekivano, jer se u sastavu zimskog goriva očekuje veći udeo nižih ugljovodonika radi smanjenja opasnosti od kristalizacije. Kada je u pitanju promena zapremine, bitnih razlika u ponašanju goriva letnjeg i zimskog kvaliteta nema.



Slika 3.3: Gustine letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi).



Slika 3.4: Moduli stišljivosti (*Bulk Modulus*) letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi).



Slika 3.5: Izotermski koeficijenti stišljivosti letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi).

Program 3.3: `GustinaGorivaD040.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine dizel-goriva u zavisnosti
% od pritiska i temperature
% S. Popović
% P. Mrđa
clc;
clear;
close all;

rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=5;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pFuelMin=500.0E+05;
pFuelMax=2000.0E+05;
dpFuel=250E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoEN590(i,j),kTEN590(i,j),betaEN590(i,j)]=DFD_Payri(pFuel(1,i),TFuel(1,j)
            ,'EN590ref');
        [rhoEN590w(i,j),kTEN590w(i,j),betaEN590w(i,j)]=DFD_Payri(pFuel(1,i),TFuel
            (1,j),'EN590w');
    end
end
```

```
AxisLabel_FontSize=14;
colororder('default');
figure(1);
plot(TFuel,rhoEN590,'-','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
plot(TFuel,rhoEN590w,'-.','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{Fuel} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.0f');
xlabel('T_{Fuel} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
LegendLabel=[cellstr(num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f'));...
    cellstr(strcat((num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f')),'(w)'))];
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside','NumColumns',2);
title(lgd,LegendTitle);
fontsize(gca,AxisLabel_FontSize,'pixels')
lgd . ItemTokenSize (1) = 12;

colororder('default');
figure(2);
plot(TFuel,kTEN590,'-','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
plot(TFuel,kTEN590w,'-.','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('k_{T,EN590/EN590w} [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('T_{Fuel} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
LegendLabel=[cellstr(num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f'));...
    cellstr(strcat((num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f')),'(w)'))];
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside','NumColumns',2);
title(lgd,LegendTitle);
fontsize(gca,AxisLabel_FontSize,'pixels')
lgd . ItemTokenSize (1) = 12;

colororder('default');
figure(3);
plot(TFuel,betaEN590,'-','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
colororder('default');
plot(TFuel,betaEN590w,'-.','MarkerSize',3.0,'LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\beta_{T,EN590/EN590w} [Pa]');
```

```
ytickformat('%.1f');
xlabel('T_{Fuel} [K]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
LegendLabel=[cellstr(num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f'));...
    cellstr(strcat((num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.0f')),'(w)'))];
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside','NumColumns',2);
title(lgd,LegendTitle);
fontsize(gca,AxisLabel_FontSize,'pixels')
lgd . ItemTokenSize (1) = 12;
```

3.1.3 Zavisnost gustine bio-dizela od temperature - model Pairi

Koristeći prethodno napisanu funkciju za izračunavanje gustine dizel-goriva prema modelu Pairi (`DFD_Payri.m` 3.2) i eksperimentalne podatke iz literature [19], sprovesti uporednu analizu uticaja pritiska i temperature na gustinu i stišljivost standardnog dizel-goriva za letnje uslove i metil-estra repičinog ulja. Pretpostaviti uobičajene opsege promene temperature u sistemu za ubrizgavanje (280 K do 380 K) i uobičajene radne vrednosti pritiska ubrizgavanja kod savremenih dizel motora (25 MPa do 200 MPa). Rezultate prikazati grafički, kao zavisnosti datog parametra od pritiska za diskretne vrednosti temperature, i to:

- Dijagram 1: zavisnost gustine;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti;
- Dijagram 3: zavisnost koeficijenta stišljivosti.

3.1.4 Zavisnost gustine dizel-goriva od pritiska - model Tejt-Taman

Napisati funkciju za izračunavanje gustine, modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti uzorka goriva za dizel-motore prema modelu Tejt-Taman. Koristeći podatke iz rada Ruana [20], izračunati promene tri navedena parametra u zavisnosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za dizel-gorivo sa visokim sadržajem parafina (eng.: *Highly ParaFinic Diesel - HPFD*). Pretpostaviti uobičajene vrednosti temperature goriva u sistemu za ubrizgavanje u opsegu od 280 K do 380 K, sa korakom od 20 K i uobičajene vrednosti pritiska u savremenim akumulatorskim sistemima za ubrizgavanje od 25 MPa do 200 MPa. Rezultate prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost gustine od pritiska za diskretne vrednosti temperature;
- Dijagram 2: zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature.

Rešenje

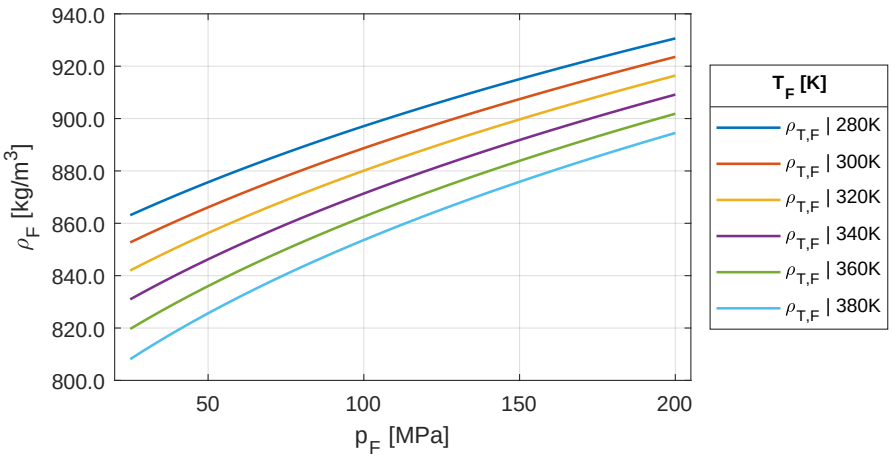
U nastavku je dat prikaz kompletne funkcije `DFD_Tait.m` (3.5) sa koeficijentima modela za tri različite vrste dizel-goriva:

- sa visokim sadržajem parafina (eng.: *High ParaFfinic Diesel - HPFD*);
- sa niskim sadržajem sumpora (eng.: *Ultra Low Sulfur Diesel - ULSD*);
- sa visokim sadržajem aromata (eng.: *Highly ARomatic Diesel - HARD*).

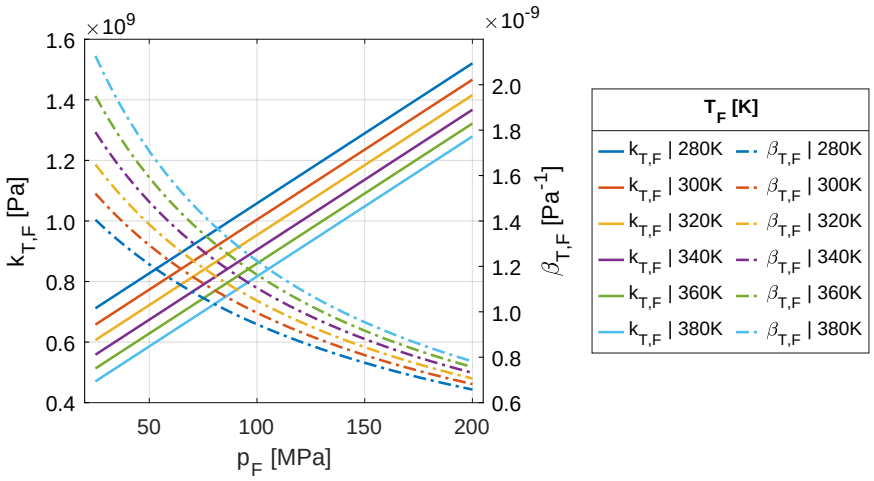
Vrednosti koeficijenata polinoma za izračunavanje referentne gustine i funkcija B_T i C_T za navedena tri uzorka goriva preuzete su iz rada [20] i prikazane u tabeli 3.3.

Oznaka goriva	a_1 [kg/m³]	a_2 [kg/m³]	a_3 [kg/m³]	b_1 [MPa]	b_2 [MPa]	b_3 [MPa]	C [–]
HPFD	$9.7749E^{+02}$	$-0.3834E^{-01}$	$-4.3527E^{-04}$	$3.2524E^{+02}$	$-9.2733E^{-01}$	$6.7987E^{-04}$	$0.2202E^{+00}$
ULSD	$10.172E^{+02}$	$-5.7986E^{-01}$	$-1.2725E^{-04}$	$3.7662E^{+02}$	$-11.165E^{-01}$	$9.6105E^{-04}$	$0.2081E^{+00}$
HARD	$9.6319E^{+02}$	$-2.5290E^{-01}$	$-5.5598E^{-04}$	$3.5593E^{+02}$	$-10.236E^{-01}$	$7.5998E^{-04}$	$0.2163E^{+00}$

Tabela 3.3: Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine u zavisnosti od temperature i pritiska (model Tejt-Taman) [19].



Slika 3.6: Zavisnost gustine goriva od temperature za različite vrednosti pritiska (model Tejt-Taman).



Slika 3.7: Zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska (model Tejt-Taman).

Program 3.4: `GustinaGorivaD011.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine dizel-goriva u zavisnosti
% od pritiska i temperature
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Tait
clc;
clear;
close all;

% rhoFuel0=835; % kg/m3;
% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TFuelMin=280;
TFuelMax=380;
dTFuel=20;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pFuelMin=250.0E+05;
pFuelMax=2000.0E+05;
dpFuel=50E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoFuelHPFD(i,j), kTHPFD(i,j), betaTHPFD(i,j)]=...
            DFD_Tait(pFuel(1,i),TFuel(1,j),'HARD');
    end
end

colororder('default');
figure(1);
```

```
plot([pFuel.*1E-06]',rhoFuelHPFD,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{F} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
LegendTitle={'T_{F} [K]'};
LegendLabel=strcat('\rho_{T,F} |',{' '},num2str([TFuel]','%.0f'),'K');
lgd = legend(LegendLabel,'Location','EastOutside');
title(lgd,LegendTitle);

figure(2);
yyaxis left
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',kTHPFD,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('k_{T,F} [Pa]');
ytickformat('%.1f');
yyaxis right
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',betaTHPFD,'-.','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('\beta_{T,F} [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
grid on;

xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendTitle={'T_{F} [K]'};
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('k_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'K'));
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\beta_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'K')
    );
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2],'Location','EastOutside','NumColumns',2)
    ;
title(lgd,LegendTitle);
lgd.ItemTokenSize(1) = 12;
```

Program 3.5: `DFD_Tait.m`

```
function [rhoFuel, kT, betaT]=DFD_Tait(pFuel,TFuel,FuelType)
% Funkcija za izračunavanje gustine dizel-goriva
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Peter Guthrie Tait
% Ref.
% Aaron J. Rowane, Vikrant Mahesh Babu, Houman B. Rokni,
% Joshua D. Moore, Manolis Gavaises, Michael Wensing, Ashutosh Gupta, Mark A.
    McHugh
```

```
% Effect of Composition, Temperature, and Pressure on the Viscosities
% and Densities of Three Diesel Fuels
% Journal of Chemical & Engineering Data, 2019, 64, 12, 5529-5547, DOI: 10.1021/acs
    .jced.9b00652


% p0        [Pa]          referentni pritisak
% pFuel     [Pa]          pritisak goriva
% TFuel     [K]           temperatura goriva
% rho0      [kg/m3]       gustina goriva @(T,p0)
% FuelType
%                         HPFD (Highly ParaFinic Diesel) gorivo sa visokim udelom
    parafina
%                         ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel) gorivo sa niskim udelom
    sumpora
%                         HARD (Highly ARomatic Diesel) gorivo sa visokim udelom
    aromata

corr_p=1.0E-06; % Pa > MPa
p0=1.0E+05;
switch FuelType
% Napomena #1: prikaz koef. polinoma @ref je oblika (10^e)*a_i=1.234  =>  a_i
    =1.234*10^-e
    case 'HPFD'
        a0=+9.7749E+02;
        a1=-0.3834E-01;
        a2=-4.3527E-04;
        b0=+3.2524E+02;
        b1=-9.2733E-01;
        b2=+6.7987E-04;
        C=+0.2202E+00;
    case 'ULSD'
        a0=+10.172E+02;
        a1=-5.7986E-01;
        a2=-1.2725E-04;
        b0=+3.7662E+02;
        b1=-11.165E-01;
        b2=+9.6105E-04;
        C=+0.2081E+00;
    case 'HARD'
        a0=+9.6319E+02;
        a1=-2.5290E-01;
        a2=-5.5598E-04;
        b0=+3.5593E+02;
        b1=-10.236E-01;
        b2=+7.5998E-04;
        C=+0.2163E+00;
    otherwise
end

% Izračunavanje gustine goriva na referentnom pritisku u zavisnosti od temperature
rhoFuel0=a0+a1.*TFuel+a2.*TFuel.^2;

% Izračunavanje gustine goriva u zavisnosti od pritiska
BT=b0+b1.*TFuel+b2.*TFuel.^2;
```

```
fpBT=(corr_p.*pFuel+BT)./(corr_p.*p0+BT);
rhoFuel=rhoFuel0./(1-C.*log10(fpBT));

% Izračunavanje modula stišljivosti (Bulk Modulus), kT=f(p,T)
% kT=(1/rhoFuel0).*(corr_p.*pFuel+BT)./C;
% ckT=2.55;
ckT=1.0;
kT=ckT.*(corr_p.*pFuel+BT)./(C.*corr_p);
% Izračunavanje izotermskog koeficijenta stišljivosti
% (Coefficient of Compressibility, Isothermal coefficient of Compressibility)
betaT=1./kT;
```

3.1.5 Poređenje modela za izračunavanje gustine dizel-goriva

Uporediti promenu gustine, modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti u funkciji pritiska i temperature koristeći prethodno formirane funkcije `DFD_Payri.m` (3.2) i `DFD_Tait.m` (3.5) i podatke iz literature [19][20]. Pretpostaviti opsege promene temperature u sistemu za ubrizgavanje kao u prethodnim zadacima.

3.1.6 Gustina dizel-goriva - aproksimacija eksperimentalnih rezultata

U radu [21] dati su detaljni podaci o termodinamičkim karakteristikama dizel-goriva na širokom opsegu temperatura i pritisaka. Između ostalog, data je tabela koja povezuje sledeće podatke:

- Gustina ρ [$^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$],
- Koeficijent stišljivosti (pri izotermskom procesu) β [$^{10^{-6}}/_{\mathrm{MPa}}$], (u radu je označen sa κ_T [$^{10^{-6}}/_{\mathrm{MPa}}$]);
- Koeficijent termalne ekspanzije (pri izobarskom procesu) α_p [$^{10^{-6}}/_{\mathrm{K}}$];
- Razlika izobarskog i izohorskog toplotnog kapaciteta $c_p - c_v$ [$^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{kgK}}$];
- Termalni pritisak (koeficijent termalnog pritiska) γ [$^{\mathrm{MPa}}/_{\mathrm{K}}$];
- Unutrašnji pritisak p_{int} [$^{1}/_{\mathrm{MPa}}$];
- Toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku c_p [$^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{kgK}}$];
- Toplotni kapacitet pri konstantnoj zapremini c_v [$^{\mathrm{J}}/_{\mathrm{kgK}}$];
- Brzina prostiranja talasa pritiska (brzina zvuka) u [$^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$];
- Izentropski koeficijent ekspanzije κ_s [$-$].

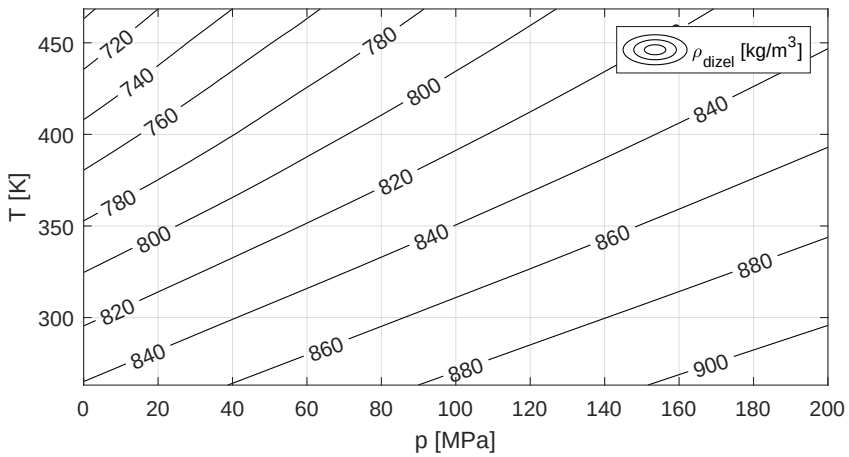
Aproksimaciju podataka za gustinu sprovesti za opseg pritisaka od 0 MPa do 200 MPa i opseg temperatura od 263 K do 468 K.

Na osnovu podataka iz rada Safarova [21], napraviti Matlab funkciju za određivanje gustine dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature. Podaci su dostupni u formi `.mat` datoteke na sledećem linku: podaci_Safarov.

Smernice za rad:

- Aproksimaciju izvršiti metodom `LowessFit`, kvadratnim polinomom i uz uključivanje detekcije robusnosti aproksimacije (`Robust: LAR`);
- Analizirati statističke pokazatelje valjanosti aproksimacije (`SSE`, `RMSE`);
- Formirati konturni dijagram i isprobati alatku `datatip`;
- Sačuvati grafikone u `tiff`, `emf` i `pdf` formatu;
- Koristiti funkcije za definisanje veličine (visina, širina) formiranih dijagrama.

Rešenje



Slika 3.8: Gustina dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature.

U nastavku se nalazi glavni program `ro_fuel_fit_safarov.m` (3.6) za određivanje gustine dizel-goriva u funkciji temperature i pritiska.

Program 3.6: `ro_fuel_fit_safarov.m`

```
% ro_fuel_fit
clear
close all
clc

load podaci_safarov.mat
clearvars -except p T ro

figure(1)
plot3(p,T,ro,'o')
xlabel('Pritisak [MPa]')
```

```
ylabel('Temperatura [K]')
zlabel('Gustina goriva [kg/m^3]')
grid on
legend('Gustina goriva','Location','north')

%cftool(p,T,ro)
[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( p, T, ro );
% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'loess' );
opts = fitoptions( 'Method', 'LowessFit' );
opts.Normalize = 'on';
opts.Robust = 'LAR';

% Fit model to data.
[fit_ro, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, opts );

figure(3);
h = plot(fit_ro, [xData, yData], zData );
save ('fit_ro.mat','fit_ro');

% Odredjivanje gustine goriva na osnovu aproksimiranih vrednosti.
p_1 = linspace(min(p),max(p),100)';
T_1 = linspace(min(T),max(T),100)';
[p_mat, T_mat] = meshgrid(p_1,T_1);
fit_ro_mat = fit_ro(p_mat, T_mat);

% crtanje konturnog dijagrama
F4 = figure(4)
F4.WindowStyle = 'normal'
contourf(p_mat,T_mat,fit_ro_mat,'ShowText','on')
grid on

set(F4,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])

xlabel('Pritisak [MPa]')
ylabel('Temperatura [K]')
legend('\rho_{dizel} [kg/m^3]')
colormap('white')
xlim([0, 200]);

set(F4,'Units','Inches')
pos = get(F4,'Position')
set(F4,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])

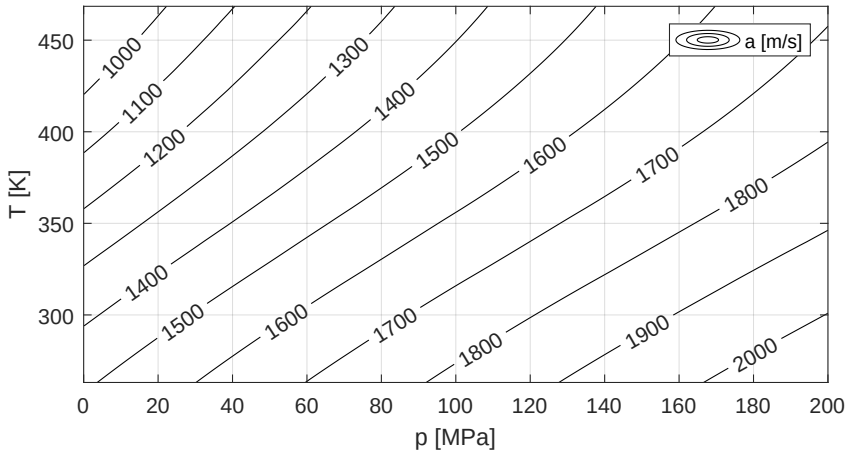
print(F4,'F4','-r300','-dtiffn')
print(F4,'F4','-dmeta')
print(F4,'F4','-dpdf','-r0')
```

3.1.7 Koeficijent stišljivosti dizel-goriva - aproksimacija ekperimentalnih podataka

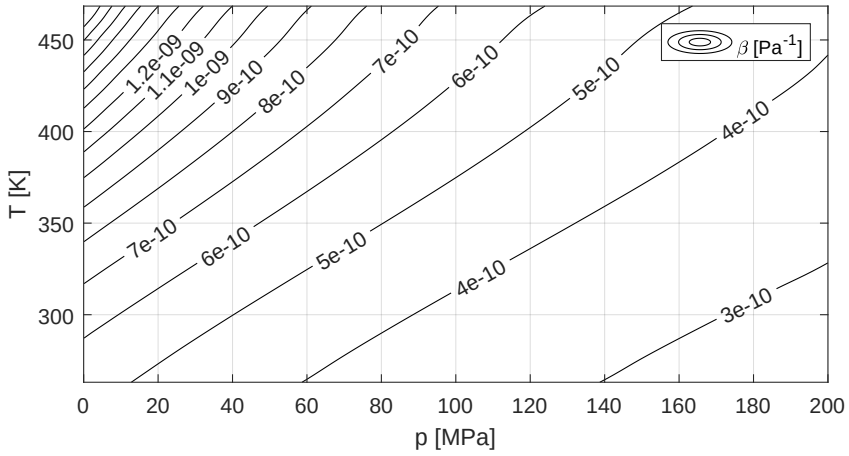
Na osnovu podataka iz rada [21], formirati funkciju za određivanje brzine prostiranja zvuka kroz dizel-gorivo u zavisnosti od pritiska i temperature. Nakon formiranja funkcije za određivanje brzine prostiranja zvuka, iskoristiti aproksimaciju iz prethodnih zadatka i uz korišćenje jednačine 3.5 napraviti funkciju za određivanje koeficijenta stišljivosti β. Ovako dobijenu promenu koeficijenta stišljivosti β uporediti sa vrednostima iz [21] (promenljiva κ_T - Izotermski koeficijenta stišljivosti). Prokomentarisati rezultate.

Za aproksimaciju koeficijenta stišljivosti β koristiti metodu `thinplateinterp` i uključiti opciju `Normalize`. Pri analizi aproksimacije u alatu `cftool` analizirati dijagram odstupanja aproksimacije (*eng.: Residual plot*).

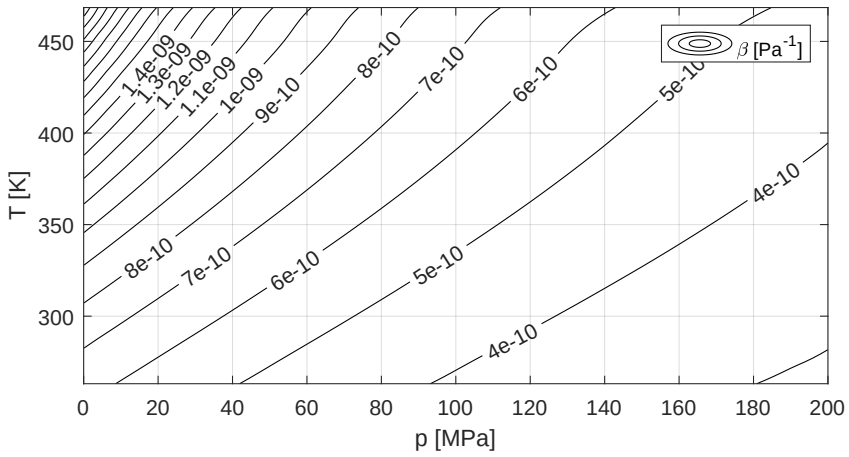
Rešenje



Slika 3.9: Brzina zvuka za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (Safarov).



Slika 3.10: Koeficijent stišljivosti za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (β) određen na osnovu jednačine 3.5 i brzine zvuka iz [21] (Safarov).



Slika 3.11: Koeficijent stišljivosti za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (β) prikazan na osnovu podataka iz [21] (Safarov).

Program 3.7: `a_aprox.m`

```
% Aproksimacija brzine prostiranja zvuka kroz dizel-gorivo u funkciji temperature i
    pritiska
% a_fuel_fit
% P. Mrđa
% Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and
   pressures
% Safarov Javid, Ashurova Ulkar, Ahmadov Bahruz,
% Abdullayev Elshan, Shahverdiyev Astan, Hassel Egon
% ISSN 00162361
% https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236117315399
% doi: 10.1016/j.fuel.2017.11.125
```

```
clear
close all
clc

load podaci_safarov.mat
clearvars -except p T u

figure(1)
plot3(p,T,u,'o')
xlabel('p [MPa]')
ylabel('T [K]')
zlabel('a [m/s]')
grid on
legend('a','Location','north')

%cftool(p,T,u)
[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( p, T, u );
% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'loess' );
opts = fitoptions( 'Method', 'LowessFit' );
opts.Normalize = 'on';
opts.Robust = 'LAR';
% Fit model to data.
[fit_u, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, opts );

figure(2);
h = plot(fit_u, [xData, yData], zData );
save ('fit_u.mat','fit_u');

% Odredjivanje opsega nezavisnih promenljivih
p_1 = linspace(min(p),max(p),100)';
T_1 = linspace(min(T),max(T),100)';
[p_mat, T_mat] = meshgrid(p_1,T_1);
% Određivanje zavisne promenljive
fit_u_mat = fit_u(p_mat, T_mat);

% crtanje konturnog dijagrama
F5 = figure(5)
F5.WindowStyle = 'normal'
v = [1000:100:2000];
contourf(p_mat,T_mat,fit_u_mat,v,'ShowText','on')
grid on
xlabel('p [MPa]')
ylabel('T [K]')
legend('a [m/s]')
colormap('white')
xlim([0 200])

set(F5,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])
set(F5,'Units','Inches')
pos = get(F5,'Position')
set(F5,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
```

```
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])

print(F5,'F5','-r300','-dtiffn')
print(F5,'F5','-dmeta')
print(F5,'F5','-dpdf','-r0')
```

Program 3.8: `beta_aprox.m`

```
% Aproksimacija brzine prostiranja zvuka kroz dizel-gorivo u funkciji temperature i
    pritiska
% a_fuel_fit
% P. Mrđa
% Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and
    pressures
% Safarov Javid, Ashurova Ulkar, Ahmadov Bahruz,
% Abdullayev Elshan, Shahverdiyev Astan, Hassel Egon
% ISSN 00162361
% https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236117315399
% doi: 10.1016/j.fuel.2017.11.125

clear
close all
clc

load podaci_safarov.mat
clearvars -except p T u ro kT

% Određivanje beta
beta = 1./(u.^2.*ro);
kT = kT*10^-6*10^-6; % svođenje jedinica

figure(1)
plot3(p,T,beta,'o')
hold on
plot3(p,T,kT,'x')
xlabel('Pritisak [MPa]')
ylabel('Temperatura [K]')
zlabel('\beta [Pa^-1], kT [Pa^-1]')
grid on
legend('\beta [Pa^-1]','kT [Pa^-1]','Location','northeast')

%cftool(p,T,beta)
[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( p, T, beta );
[xData1, yData1, zData1] = prepareSurfaceData( p, T, kT );

% Set up fittype and options.

ft = 'thinplateinterp';
% Fit model to data.
[fit_beta, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, 'Normalize', 'on' );
[fit_kT, gof] = fit( [xData1, yData1], zData1, ft, 'Normalize', 'on' );

%save ('fit_beta.mat','fit_beta');
```

```
%save ('fit_kT.mat','fit_kT');

% Odredjivanje opsega nezavisnih promenljivih
p_1 = linspace(min(p),max(p),100)';
T_1 = linspace(min(T),max(T),100)';
[p_mat, T_mat] = meshgrid(p_1,T_1);
% Određivanje zavisne promenljive
fit_beta_mat = fit_beta(p_mat, T_mat);
fit_kT_mat = fit_kT(p_mat, T_mat);

% crtanje konturnog dijagrama za beta
F6 = figure(6)
F6.WindowStyle = 'normal'
v = [0.2*10^(-9):0.1*10^(-9):1.8*10^(-9)];
contourf(p_mat,T_mat,fit_beta_mat,v,'ShowText','on')
clear v
grid on

set(F6,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])

xlabel('p [MPa]')
ylabel('T [K]')
legend('\beta [Pa^{-1}]')
colormap('white')
xlim([0 200])

set(F6,'Units','Inches')
pos = get(F6,'Position')
set(F6,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F6,'F6','-r300','-dtiffn')
print(F6,'F6','-dmeta')
print(F6,'F6','-dpdf','-r0')

% crtanje konturnog dijagrama za kT
F7 = figure(7)
F7.WindowStyle = 'normal'
v = [0.2*10^(-9):0.1*10^(-9):2.2*10^(-9)];
contourf(p_mat,T_mat,fit_kT_mat,v,'ShowText','on')
clear v
grid on

set(F7,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])

xlabel('p [MPa]')
ylabel('T [K]')
legend('\beta [Pa^{-1}]')
colormap('white')
xlim([0 200])
```

```
set(F7,'Units','Inches')
pos = get(F7,'Position')
set(F7,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F7,'F7','-r300','-dtiffn')
print(F7,'F7','-dmeta')
print(F7,'F7','-dpdf','-r0')
```

3.1.8 Gustina motornog benzina - model Trost

Izraz za eksponencijalni model za izračunavanje gustine u zavisnosti od temperature prikazan je u radu Trosta [22] i po svom obliku podseća na poznate izraze za izračunavanje kinematske i dinamičke viskoznosti po modelima Njutna, Arenijusa ili Fogela:

$$\rho_F(T) = \rho_F(T_0) \cdot e^{b \cdot T} \tag{3.11}$$

U istom radu prikazan je i izraz za polinomski model koji se može koristiti i za smeše sa butanolom čija je koncentracija određena parametrom C:

$$\rho_F(T) = x_0 + x_1 \cdot T + x_2 \cdot C + x_3 \cdot T^2 + x_4 \cdot C \cdot T \tag{3.12}$$

Vrednosti gustine na referentnoj temperaturi $\rho(T_0)$ i vrednosti koeficijenta b za motorni benzin sa oktanskim brojem 95 i 98, preuzete su iz rada [22] i prikazane u tabeli 3.4, dok su vrednosti koeficijenata za polinomski model prikazane u tabeli 3.5. U oznaci motornog benzina u tabeli 3.5, pre povlake se nalazi informacija o zapreminskom udelu butanola (biobutanola), a nakon povlake nalazi se informacija o oktanskoj vrednosti RON, koja je određena na istraživačkom motoru (eng.: *Research Octane Number*).

Oznaka motornog benzina	$\rho(T_0)$ [kg/m³]	B [K⁻¹]	R^2 [–]
B0-95	842,7	−0,0003653	0,9675
B5-95	918,5	−0,0006602	0,9108
B10-95	939,7	−0,0007296	0,9800
B85-95	1054,0	−0,0009530	0,9793
B0-98	950,2	−0,0007528	0,9705
B5-98	989,9	−0,0008632	0,9720
B10-98	973,6	−0,0007975	0,9710
B85-98	1057,0	−0,0009501	0,9824
B100	1074,0	−0,0009863	0,9745

Tabela 3.4: Parametri eksponencijalnog modela za izračunavanje gustine motornih benzina i smeša sa butanolom [22].

Oznaka goriva	x_0 [kg/m³]	x_1 [kg/m³K]	x_2 [kg/m³]	x_3 [kg/m³K²]	x_4 [kg/m³K]
Bx-95	358,4	3,202	1,649	−0,006287	−0,003953
Bx-98	375,2	3,350	0,9477	−0,006874	−0,001859

Tabela 3.5: Vrednosti koeficijenata za polinomski model 3.12 [22].

Rešenje

Trostovi modeli, eksponencijalni i polinomski, koji su prikazani u prethodnim primerima, mogu se primeniti u slučajevima obrazovanja smeše ubrizgavanjem pod niskim pritiscima u usisni kanal. Izuzetno, mogu se primeniti i na slučajeve direktnog ubrizgavanja benzina u cilindar, ali ograničeno i isključivo za režime praznog hoda i niskih opterećenja na kojima pritisak ubrizgavanja ne prelazi 4-5 MPa. Za slučajeve direktnog ubrizgavanja benzina u cilindar pri pritiscima koji prelaze 20-25 MPa, a kod pojedinih slučajeva i preko 50 MPa (primena na trkačkim motorima) ili u eksperimentalnim sistemima kod kojih se dostižu pritisci iznad 100 MPa, neophodno je u obzir uzeti i uticaj pritiska na gustinu goriva.

Jedan od načina identifikacije složene funkcionalne zavisnosti gustine motornog benzina od pritiska i temperature je sprovođenje posebnog eksperimenta i utvrđivanje empirijske zavisnosti za konkretan uzorak.

Drugi način, daleko praktičniji, oslanja se na primenu Klausovih univerzalnih zavisnosti izotermskog modula stišljivosti od temperature i pritiska. Prva univerzalna zavisnost omogućava izračunavanje modula stišljivosti pri zadatom pritisku i temperaturi ako je poznat modul stišljivosti na referentnom pritisku i zadatoj temperaturi:

$$k_T\,(p,T) = k_T\,(p_0,T) + 5.3 \cdot p \tag{3.13}$$

Druga univerzalna zavisnost omogućava izračunavanje modula stišljivosti na zadatom pritisku i temperaturi, ako je poznat modul stišljivosti na zadatom pritisku p i temperaturi T_2 i modul stišljivosti na istom pritisku i nekoj drugoj poznatoj ili referentnoj temperaturi T_1. Zavisnost je grafički je prikazana na slici 3.13 i data je u logaritamskom obliku:

$$\log\left[\frac{k_T\,(p,T_1)}{k_T\,(p,T_2)}\right] = B\,(p) \cdot (T_2 - T_1) \tag{3.14}$$

ili:

$$k_T\,(p,T_2) = \frac{k_T\,(p,T_1)}{\exp\left[B\,(p) \cdot (T_2 - T_1)\right]} \tag{3.15}$$

Poznat je podatak o modulu stišljivosti motornog benzina na referentnoj temperaturi $T_0 = 298\,\mathrm{K}$ i referentnom pritisku $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$, $k_T = (p_0,T_0) = 1{,}3 \cdot 10^9$. Na osnovu tog podatka, primenom izraza 3.13 može se izračunati modul stišljivosti na zadatom radnom pritisku i referentnoj temperaturi:

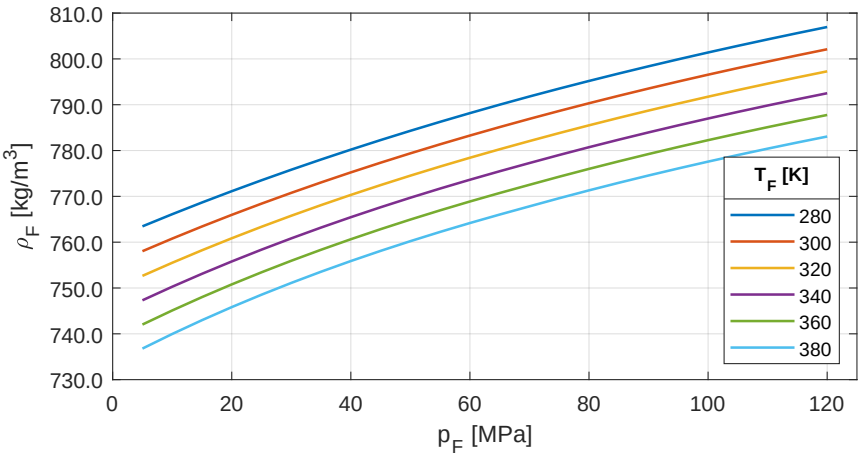
$$k_T\,(p,T_0) = k_T\,(p_0,T_0) + 5.3 \cdot p \tag{3.16}$$

U sledećem koraku, primenom izraza 3.14 ili 3.15 može se izračunati i modul stišljivosti na radnoj temperaturi, pošto se identifikuje vrednost linearnog koeficijenta $B(p)$:

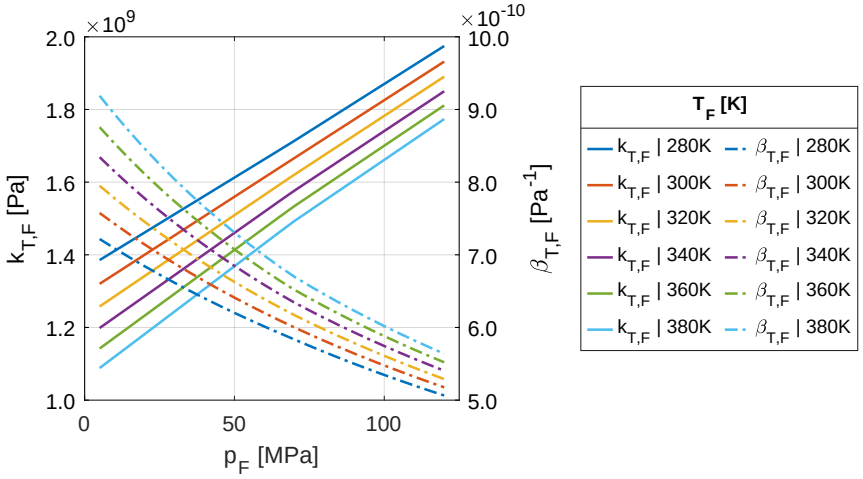
$$k_T\,(p,T) = \frac{k_T\,(p,T_0)}{\exp\left[B\,(p) \cdot (T - T_0)\right]} \tag{3.17}$$

Gustina na zadatom pritisku i temperaturi se onda određuje na osnovu prethodno određene vrednosti gustine na radnoj temperaturi i referentnom pritisku i modula stišljivosti na radnom pritisku i temperaturi:

$$\rho\,(p,T) = \rho\,(p_0,T) \cdot \left[1 + \frac{p - p_0}{k_T\,(p,T)}\right] \tag{3.18}$$



Slika 3.12: Zavisnost gustine motornog benzina od pritiska za različite vrednosti temperature (model Klaus).



Slika 3.13: Zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) motornog benzina od pritiska za različite vrednosti temperature (model Klaus).

Program 3.9: `GustinaGorivaG010.m`

```
% Program za izračunavanje promene gustine motornog benzina u
% zavisnosti od pritiska i temperature
% S. J. Popović, 202405.v01
% P. Mrđa
% Model Trost/Vogel/Barus
clc;
clear;
close all;

% Zadavanje opsega temperature vazduha u [K]
TFuelMin=280;
```

```
TFuelMax=380;
dTFuel=20;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska vazduha u [Pa]
pFuelMin=50.0E+05;
pFuelMax=1200.0E+05;
dpFuel=50E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

% Modul stišljivosti za benzin (Isothermal bulk modulus) @pref, Tref
% https://www.engineersedge.com/materials/bulk_modulus_15780.htm
% https://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d_585.html
% https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Civil_Engineering/Book%3A_Fluid_Mechanics_
    (Bar-Meir)/00%3A_Introduction/1.6%3A_Fluid_Properties/1.6.2%3A_Bulk_Modulus
kT00=1.3E+09; % [Pa]
Tref=298.0;   % [K]
pref=1.0E+05; % [Pa]

for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [rhoFuelT(i,j)]=DFG_Trost(TFuel(1,j),'RON95','Exponential');
        [kTpT(i,j), betaTpT(i,j)]=BMC_Klaus(kT00,Tref,TFuel(1,j),pFuel(1,i));
        rhoFuel(i,j)=rhoFuelT(i,j).*(1.0+(pFuel(1,i)-1.0E+05)./kTpT(i,j));
    end
end

colororder('default');
figure(1);
plot([pFuel.*1E-06]',rhoFuel,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
grid on;
ylabel('\rho_{F} [kg/m^{3}]');
ytickformat('%.1f');
xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
LegendTitle={'T_{F} [K]'};
LegendLabel=num2str([TFuel]','%.0f');
lgd = legend(LegendLabel,'Location','SouthEast');
title(lgd,LegendTitle);

figure(2);
yyaxis left
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',kTpT,'-','LineWidth',1.2);
hold on;
ylabel('k_{T,F} [Pa]');
ytickformat('%.1f');
yyaxis right
colororder('default');
plot([pFuel.*1E-06]',betaTpT,'-.','LineWidth',1.2);
hold on;
```

```
ylabel('\beta_{T,F} [Pa^{-1}]');
ytickformat('%.1f');
grid on;

xlabel('p_{F} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';
LegendTitle={'T_{F} [K]'};
LegendLabel_1 = cellstr(strcat('k_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'K'));
LegendLabel_2 = cellstr(strcat('\beta_{T,F} |',{' '}, num2str([TFuel]','%.0f'),'K')
    );
lgd = legend([LegendLabel_1;LegendLabel_2],'Location','EastOutside','NumColumns',2)
    ;
title(lgd,LegendTitle);
lgd.ItemTokenSize(1) = 12;
```

Program 3.10: `DFG_Trost.m`

```
function [rho]=DFG_Trost(TFuel,FuelType,ModelType)
% Funkcija za izračunavanje gustine motornog benzina u zavisnosti od temperature
% Model: eksponencijalni

% S. Popović, 202406.v01

% Ref.
% Daniel Trost, Adam Polcar, Dorin Boldor, Divine Bup Nde, Artur Wolak, Vojtech
    Kumbár
% Temperature Dependence of Density and Viscosity of Biobutanol-Gasoline Blends
% Appl. Sci. 2021, 11, 3172. https://doi.org/10.3390/app11073172
% str. 3, izraz (4), tab. 3

% Daniel Trost, Adam Polcar, Petr Dostal, Josef Jelinek, Jiri Cupera, Vojtech
    Kumbar
% Mathematical models for temperature dependent viscosity of biobutanol and
    gasoline blends
% Proceedings of 27th International PhD Students Conference, pp. 486 - 491
% 11 November 2020, Brno, Czech Republic


% rho       [kg/m3]      gustina goriva u zavisnosti od temperature
% TFuel     [K]          temperatura goriva
% FuelType               naziv tipa goriva
% corr_rho  [-]          koef. za preračunavanje gustine
% rho0      [kg/m3]      koef. u izrazu za izračunavanje gustine
% b         [K]          koef. u eksponentu za izračunavanje gustine
% FuelBase               baza sa nazivima tipova goriva
% CoefBaseE              matrica sa vrednostima koeficijenata u eksponencijalnom
    modelu
% CoefBaseP              matrica sa vrednostima koeficijenata u polinomskom modelu
% ModelType
```

```
%                       eksponencijalni (Exponential)
%                       polinomski (Polynominal)

% close all;
% clear all;
% clc;
% FuelType='RON98';
% TFuel=273.15;
% % ModelType='Exponential';
% ModelType='Polynominal';

% Nazivi standardnih goriva i vrednosti koeficijenta viskoznosti
FuelBase={'RON95'; 'RON98'};

% Baze koeficijenata za eksponencijalni i polinomski model
%          rho0     b
CoefBaseE=[+842.7, -0.0003653;...
           +950.2, -0.0007528];
%          x0       x1       x2       x3          x4        C
CoefBaseP=[+358.40, +3.2020, +1.6490, -0.006287, -0.003953, +0.000000;...
           +375.20, +3.3500, +0.9477, -0.006874, -0.001859, +0.000000];

% Traženje rednog broja člana baze naziva goriva
iFuel=find(strcmpi(FuelType,FuelBase));
checkFuel=isempty(iFuel);

if(checkFuel>0)
    disp('Greška u zadavanju naziva goriva. Zadato gorivo nije pronađeno u bazi.')
    rho=0.0;
else
    % Izračunavanje gustine motornog benzina u zavisnosti od temperature (eksp.
        model)
    switch ModelType
        case 'Exponential'
            rho=CoefBaseE(iFuel,1).*exp(CoefBaseE(iFuel,2).*TFuel);
        case 'Polynominal'
            rho=CoefBaseP(iFuel,1)+CoefBaseP(iFuel,2).*TFuel+CoefBaseP(iFuel,3).*
                CoefBaseP(iFuel,6)+...
                CoefBaseP(iFuel,4).*(TFuel.^2)+CoefBaseP(iFuel,4).*TFuel.*CoefBaseP
                    (iFuel,6);
        otherwise
    end
end
```

Program 3.11: `BMC_Klaus.m`

```
function [kTpT, betaTpT]=BMC_Klaus(kT00,TFuel0,TFuel,pFuel)

% Hossein Gholizadeh, Richard Burton and Greg Schoenau
% FLUID BULK MODULUS: A LITERATURE SURVEY
% International Journal of Fluid Power 12 (2011) No. 3 pp. 5-15

% Klaus, E. E. and O'Brien, J. A. 1964.
```

```
% Precise Measurement and Prediction of Bulk Modulus Values for
% Fluids and Lubricants.
% ASME Journal of Basic Engineering, 86(D-3), pp. 469 - 474.
% Str. 1, izraz (2)
% Str. 2, izraz (3)


% close all;
% clear all;
% clc;
%
% kT0=1.3E+09; % kT0 za benzin na p=1 bar i T=298 K (t=25 degC)
% TFuel=298;
% pFuel=100E+05;

% kT00    modul stišljivosti @p=p0=1 bar i T=T0=298 K
% kT0T    modul stišljivosti @p=p0=1 bar i T
% kTpT    modul stišljivosti @p i T

% kT
% AT      [GPa/GPa]       nagib krive zavisnosti modula stišljivosti od pritiska
% ni0     [cSt]           kinematska viskoznost @p=1 bar i T

% kT00=1.3E+09; % kT0 za benzin na p=1 bar i T=298 K (t=25 degC)
% TFuel0=298;
corr_kT=1.0E+00; % [GPa] > [Pa]
% TFuel=298:10:398;
% [mT nT]=size(TFuel);

% Str. 2, izraz (3)
% Vrednosti za parametar beta su preuzete sa dijagrma na sl. 4
bVal=[140.0, 100.0, 87.00, 62.00, 50.00].*1.0E-5;
pVal=[0, 68947600, 137895200, 344738000, 689476000];
b=interp1(pVal,bVal, pFuel,'linear');


% Izračunavanje argumenta eksponencijalne f-je
% Napomena: Osnovni izraz je dat za temperature izražene u degF
% Izraz za preračunavanje degK > degF
% (T[K]-273.15)*(9/5)+32 = T[degF]
e=(TFuel-TFuel0).*9./5;
% Izračunavanje modula stišljivosti @p=p0=1 bar i T
kT0T=kT00.*exp(-b.*e);

% Izračunavanje modula stišljivosti @(p,T)
AT=5.30;
kTpT=corr_kT.*(kT0T+AT.*pFuel);
% Izračunavanje koef. stišljivosti
betaTpT=1./kTpT;
```

3.2 Viskoznost goriva

Viskoznost predstavlja karakteristiku unutrašnjeg trenja tečnih materija. Izražava se kao dinamička, kinematska i relativna viskoznost. Vrednost viskoznosti se određuje eksperimentalno i u velikoj meri zavisi od temperature i pritiska. Viskoznost utiče na finoću i homogenost raspršivanja goriva u komori za sagorevanje. Što je viskoznost goriva niža, to je manji prečnik kapi nastalih ubrizgavanjem. Niža vrednost viskoznosti daje manju dubinu prodiranja mlaza ubrizganog goriva. Izbor goriva odgovarajuće viskoznosti je od značaja sa aspekta obrazovanja smeše, ali utiče i na radne parametre sistema za napajanje gorivom (prvenstveno na pumpu visokog pritiska). Ukoliko je suviše niska vrednost viskoznosti goriva, podmazivanje pokretnih elemenata pumpe će biti nedovoljno i zaptivanje lošije. Gornja granica viskoznosti se određuje na osnovu dozvoljenog gubitka goriva kroz zazor u sklopu klip-cilindar pumpe visokog pritiska, a donja na osnovu željene finoće raspršivanja.

Dinamička viskoznost se određuje prema jednačini:

$$F = \mu A \frac{u}{y} \tag{3.19}$$

gde je:

F [N] sila,

μ [Pas] dinamička viskoznost,

A [m^2] površina u kontaktu,

u [m/s] relativna brzina kretanja,

y [m] debljina sloja tečnosti.

Kinematska viskoznost se određuje prema jednačini:

$$\nu \left[\frac{m^2}{s}\right] = \frac{\mu}{\rho} \tag{3.20}$$

3.2.1 Dinamička viskoznost dizel-goriva - model Barus

Koristeći Barusov izraz za određivanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska, izračunati promenu dinamičke viskoznosti standardnog dizel-goriva niske i visoke mazivosti za uobičajeni radni opseg pritiska goriva u sistemu za ubrizgavanje dizel-motora (od $20\,MPa$ do $200\,MPa$), ako su poznati podaci za kinematsku viskoznost oba goriva. Pretpostaviti da se gorivo koristi na temperaturi od $298\,K$.

Rešenje

Barusova jednačina za izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska prikazana je u odeljku 2.2.2 koji se odnosi na karakteristike motornih benzina:

$$\mu\left(p,T\right) = \mu\left(p_0,T_0\right) \cdot \exp\left(\alpha\left(p,T\right) \cdot p\right) \tag{3.21}$$

Za slučaj iz ovog zadatka neophodno je poznavati vrednost dinamičke viskoznosti na referentnom pritisku i temperaturi i piezokoeficijent[1] α viskoznosti koji je takođe veličina koja zavisi od pritiska i temperature. Ukoliko se pretpostavi da se temperatura dizel-goriva u sistemu za ubrizgavanje goriva u realnim uslovima eksploatacije menja u uskim granicama, uticaj temperature na piezokoeficijent viskoznosti se može zanemariti.

$$\mu\left(p,T_0\right) = \mu\left(p_0,T_0\right) \cdot \exp\left(\alpha \cdot p\right) \tag{3.22}$$

Podaci za piezokoeficijent preuzeti su iz literature [20] i prikazani su u Tabeli 3.6.

Oznaka goriva	α $10^{-9}\mathrm{P}a^{-1}$	ν $10^{-6}\,\mathrm{m^2/s}$ @ 298 K
Dizel-gorivo niske mazivosti	0,8	2,82
Dizel-gorivo visoke mazivosti	10,1	3,75

Tabela 3.6: Vrednosti piezokoeficijenata viskoznosti za dizel-goriva različitih nivoa mazivosti [18].

Vrednost dinamičke viskoznosti za referentne uslove izračunava se na osnovu vrednosti kinematske viskoznosti i gustine goriva:

$$\mu\left(p_0,T_0\right) = \nu\left(p_0,T_0\right) \cdot \rho\left(p_0,T_0\right) \tag{3.23}$$

Podatak za gustinu goriva može se uzeti iz tablica ili se može izračunati primenom npr. Pairijevog modela za izračunavanje gustine dizel-goriva u zavisnosti od temperature i pritiska (vidi funkciju `DFD_Payri.m` 3.2). Načelno, treba voditi računa o eventualnoj razlici referentnih uslova za koje je definisan Pairijev model (p_{ref},T_{ref}) i referentnih uslova za izračunavanje viskoznosti (p_0 i T_0). Za takav slučaj, Pairijev model je definisan na sledeći način:

$$\begin{aligned}\rho\left(p_0,T_0\right) = r_1 + r_2 \cdot \left(T_0 - T_{ref}\right) + r_3 \cdot \left(p_0 - p_{ref}\right) + r_4 \cdot \left(p_0 - p_{ref}\right)^2 + \\ + r_5 \cdot \left(T_0 - T_{ref}\right)^2 + r_6 \left(p_0 - p_{ref}\right) \cdot \left(T_0 - T_{ref}\right)\end{aligned} \tag{3.24}$$

[1] Piezokoeficijent viskoznosti nosi u sebi informaciju o tome koliko se viskoznost menja sa promenom pritiska (od grčke reči piézō - pritisnuti, stisnuti).

S obzirom na to da je referentni pritisak u oba slučaja isti ($p_0 = p_{ref} = 10^5\,\mathrm{Pa}$), svi članovi u kojima figuriše razlika pritiska se mogu isključiti iz izraza.

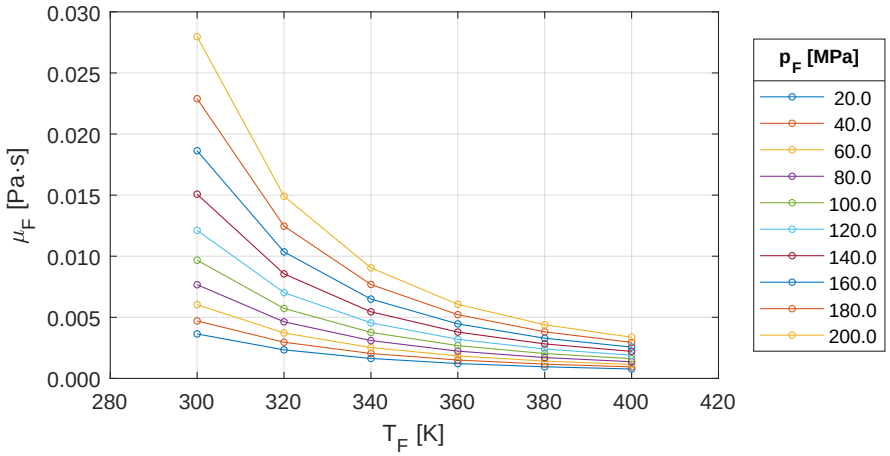
$$\rho\,(p_0,T_0) = r_1 + r_2 \cdot (T_0 - T_{ref}) + r_5 \cdot (T_0 - T_{ref})^2 \tag{3.25}$$

Eventualno, za prvo približenje, ako je cilj isključivo kvalitativno sagledavanje uticaja pritiska na dinamičku viskoznost, dalje pojednostavljenje proračuna se može sprovesti ako se zanemari razlika referentnih temperatura na (za radne uslove $T_0 = 298\,\mathrm{K}$ i za Pairijev model $T_{ref} = 293\,\mathrm{K}$). Tada se za vrednost gustine za referentne radne uslove može uzeti vrednost prvog koeficijenta iz Pairijevog modela:

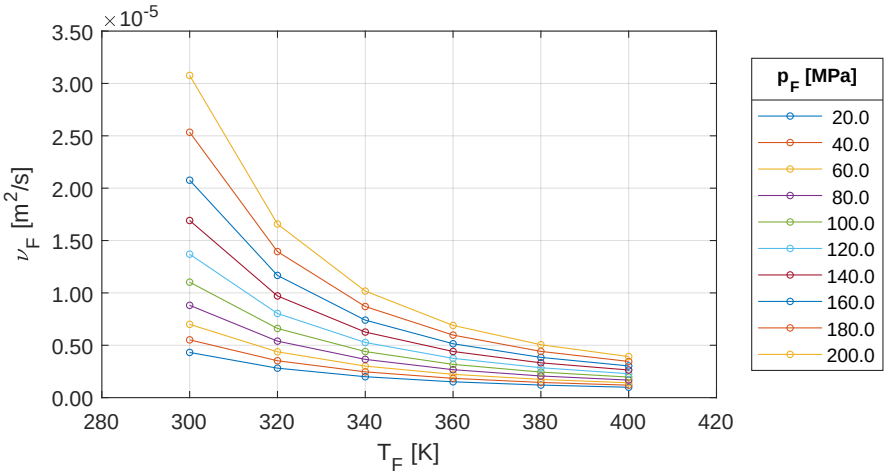
$$\rho\,(p_0,T_0) \approx r_1 \tag{3.26}$$

Rešenje

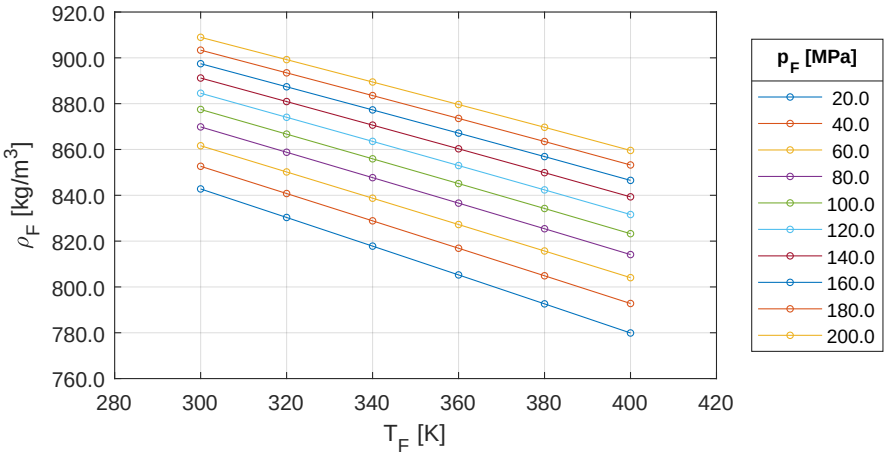
Rezultati proračuna prikazani su na slikama od 3.14 do 3.18. Dinamička viskoznost opada sa porastom temperature, ali raste sa povećanjem pritiska - zavisnost koja je već uočena i kod referentnih čistih ugljovodonika (poglavlje 2.2). Zaključak o ponašanju gustine isti je kao i za referentne ugljovodonike - sa porastom temperature gotovo linearno opada, ali raste sa porastom pritiska, takođe, sa izraženim lineranim trendom.



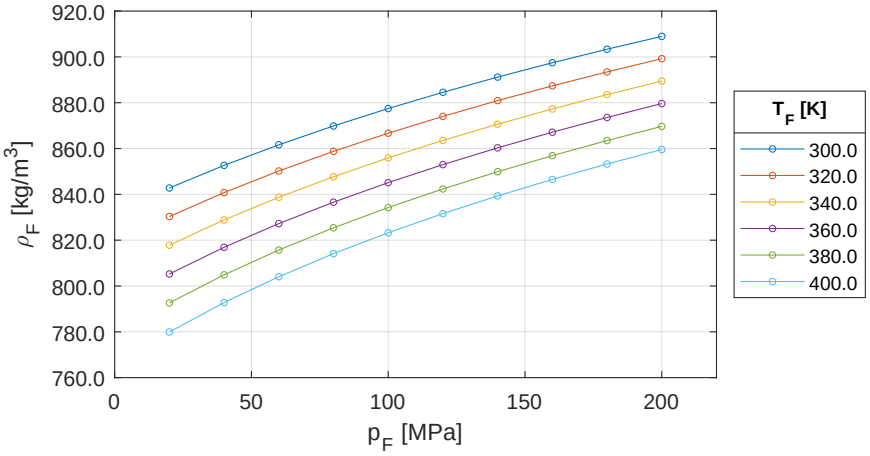
Slika 3.14: Dinamička viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus).



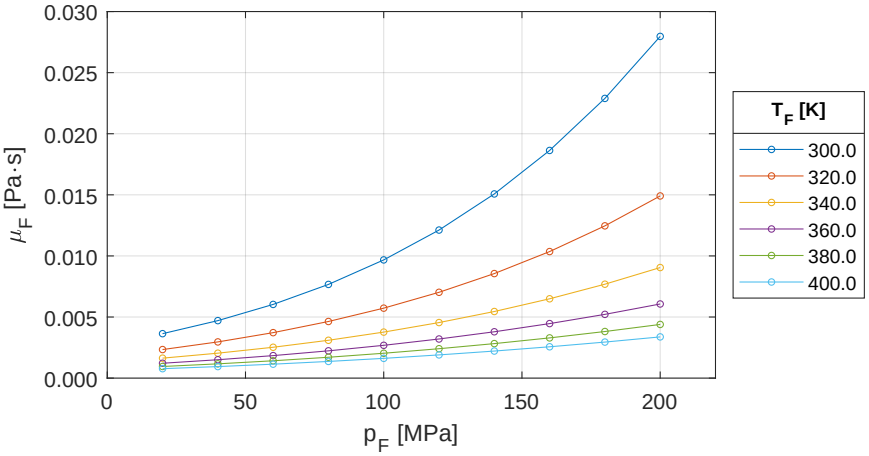
Slika 3.15: Kinematska viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus).



Slika 3.16: Gustina dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus).



Slika 3.17: Gustina dizel-goriva (ULSD) u funkciji pritiska za različite vrednosti temperature (model Barus).



Slika 3.18: Dinamička viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji pritiska za različite vrednosti temperature(model Barus).

Program 3.12: `ViskoznostD_01.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti dizel-goriva u zavisnosti od
% temperature i pritiska
% S. J. Popović, 202405.v01
% P. Mrđa
% Model Peter Guthrie Tait

clc;
close all;
clear;

% Zadavanje opsega temperature dizel-goriva u [K]
TFuelMin=300;
```

```
TFuelMax=400;
dTFuel=20;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska dizel-goriva u [Pa]
pFuelMin=200E+05;
pFuelMax=2000E+05;
dpFuel=200E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

% Izračunavanje dinamičke i kinematske viskoznosti dizel-goriva u [Pa*s], [m2/s]
for i=1:1:np
    for j=1:1:nT
        [etaFuel1(i,j)]=VFD_Tait(pFuel(1,i),TFuel(1,j),'ULSD');
%        [etaFuel(i,j)]=VFD_Tait_v01(pFuel(1,i),TFuel(1,j),'ULSD');
%        [rhoFuel(i,j), kT(i,j), betaT(i,j)]=DFD_Payri(pFuel(1,i),TFuel(1,j),'
    EN590ref');
                [etaFuel(i,j)]=UnitConverterViscosity(etaFuel1(i,j), 'mPas', 'Pas',
                    'Default')
        [rhoFuel(i,j), kT(i,j), betaT(i,j)]=DFD_Tait(pFuel(1,i),TFuel(1,j),'ULSD')
        nuFuel(i,j)=etaFuel(i,j)./rhoFuel(i,j);
    end
end

colororder('default');

figure(1)
plot(TFuel,etaFuel(:,:),'-o',MarkerSize=3.0);
grid on;
hold on;
    xlabel('T_{Fuel} [K]');
    ylabel('\eta_{Fuel} [Pa\cdots]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.3f');
    xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
    LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
    LegendLabel=num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
    title(lgd,LegendTitle);

figure(2)
plot(TFuel,nuFuel(:,:),'-o',MarkerSize=3.0);
grid on;
hold on;
    xlabel('T_{Fuel} [K]');
    ylabel('\nu_{Fuel} [m^2/s]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.2f');
    xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
    LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
    LegendLabel=num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
    title(lgd,LegendTitle);
```

```
figure(10)
plot(TFuel,rhoFuel(:,:),'-o',MarkerSize=3.0);
grid on;
hold on;
    xlabel('T_{Fuel} [K]');
    ylabel('\rho_{Fuel} [kg/m^3]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
    xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
    LegendTitle={'p_{Fuel} [MPa]'};
    LegendLabel=num2str([pFuel]'.*1E-06,'%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthWest');
    title(lgd,LegendTitle);

figure(11)
plot(pFuel'.*1E-06,rhoFuel(:,:),'-o',MarkerSize=3.0);
grid on;
hold on;
    xlabel('p_{Fuel} [MPa]');
    ylabel('\rho_{Fuel} [kg/m^3]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
    xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
    LegendTitle={'T_{Fuel} [K]'};
    LegendLabel=num2str([TFuel]','%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);

figure(12)
plot(pFuel'.*1E-06,etaFuel(:,:),'-o',MarkerSize=3.0);
grid on;
hold on;
    xlabel('p_{Fuel} [MPa]');
    ylabel('\eta_{Fuel} [Pa\cdots]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.3f');
    xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1E-06]);
    LegendTitle={'T_{Fuel} [K]'};
    LegendLabel=num2str([TFuel]','%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
    title(lgd,LegendTitle);
```

Program 3.13: `UnitConverterViscosity.m`

```
function [ViscOut]=UnitConverterViscosity(ViscIn, ViscUnitIn, ViscUnitOut, ViscType
    )
% Funkcija za preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
% ViscIn        [ ]       Vrednost viskoznosti u jedinicama ViscUnitIn
% ViscUnitIn    [ ]
%                         Ulazna jedinica za kinematsku viskoznost
%                            S..... Stokes
%                            cS .... centiStokes
```

```
%                           mm2/s .
%                           m2/s
%                         Ulazna jedinica za dinamičku viskoznost
%                         dopuniti
% ViscUnitOut    [ ]
%                         Izlazna jedinica za kinematsku viskoznost
%                           S..... Stokes
%                           cS .... centiStokes
%                           mm2/s .
%                           m2/s
%                         Izlazna jedinica za dinamičku viskoznost
%                         dopuniti
% ViscType       [ ]
%                         kin ..... kinematska viskoznost
%                         dyn ..... dinamička viskoznost

% Opcija #1: preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
switch ViscType
    case 'Default'
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje ulazne jedinice (ViscUnitIn) u [
    m2/s]
    switch ViscUnitIn
        case '[St]'
            CorrFactIn=1.0E-04;
        case '[cSt]'
            CorrFactIn=1.0E-06;
        case '[mm2/s]'
            CorrFactIn=1.0E-06;
        case '[m2/s]'
            CorrFactIn=1.0E-00;
        case 'mPas'
            CorrFactIn=1.0E-03;
        case 'Pas'
            CorrFactIn=1.0E+00;
    end
    % Određivanje faktora korekcije za preračunavanje [m2/s] u izlazne jedinice (
        ViscUnitOut)
    switch ViscUnitOut
        case '[St]'
            CorrFactOut=1.0E+04;
        case '[cSt]'
            CorrFactOut=1.0E+06;
        case '[mm2/s]'
            CorrFactOut=1.0E+06;
        case '[m2/s]'
            CorrFactOut=1.0E-00;
        case 'mPas'
            CorrFactOut=1.0E+03;
        case 'Pas'
            CorrFactOut=1.0E-00;
    end
% Opcija #2: preračunavanje jedinica dinamičke viskoznosti
% - dopuniti
    otherwise
end
```

```
ViscOut=CorrFactIn.*CorrFactOut.*ViscIn;
```

Program 3.14: `VFD_Tait.m`

```
function [eta]=VFD_Tait(pFuel,TFuel,FuelType)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti dizel-goriva
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Peter Guthrie Tait

% Ref.
% Aaron J. Rowane, Vikrant Mahesh Babu, Houman B. Rokni,
% Joshua D. Moore, Manolis Gavaises, Michael Wensing, Ashutosh Gupta, Mark A.
    McHugh
% Effect of Composition, Temperature, and Pressure on the Viscosities
% and Densities of Three Diesel Fuels
% Journal of Chemical & Engineering Data, 2019, 64, 12, 5529-5547, DOI: 10.1021/acs
    .jced.9b00652

% Problem:
% Uočene su greške u vrednostima parametara u izrazima za izračunavanje
% dinamičke viskoznosti po modelu Tait (P. G. Tait).
% U ovoj funkciji koriste se ispravljene vrednosti koeficijenata i
% eksponenata koje su dobijene identifikacijom
    % fit_Tait.m ..................... glavni program
    % Data_fit_Tait_EtaVsPress.m ... program za linearnu ekvidist. interpolaciju
        eksp. podataka
    % fit_Tait_EtaVsPress.m ........ funkcija za identif. parametara modela eta=f(p
        )
    % fit_Tait_EtaVsTemp.m ......... funkcija za identif. parametara modela eta=f(T
        )
%
% p0        [Pa]          referentni pritisak
% pFuel     [Pa]          pritisak goriva
% TFuel     [K]           temperatura goriva
% rho0      [kg/m3]       gustina goriva @(T,p0)
% FuelType
%   HPFD (Highly ParaFinic Diesel) gorivo sa visokim udelom parafina
%   ULSD (Ultra Low Sulfur Diesel) gorivo sa niskim udelom sumpora
%   HARD (Highly ARomatic Diesel) gorivo sa visokim udelom aromata
% clc;
% close all;
% clear all;

corr_p=1.0E-06; % Pa > MPa
p0=1.0E+05;
% % TFuel=298:10:398;
% TFuel=[298.2, 299.7, 323.2, 325.5, 348.3, 434.9, 525.4];
% [mT nT]=size(TFuel);
%
% pFuel=[50:10:200].*1E+06;
% [mp np]=size(pFuel);

% FuelType='ULSD';
```

```
switch FuelType
    case 'HPFD'
% Originalne vrednosti za HPFD iz ref.
% A=+2.4761E-02;
% B=+9.4192E+02;
% C=+1.0504E+02;
% d0=+1.8810E+01;
% d1=-17.229E+03;
% d2=+4.2883E+06;
% e0=+3.7612E+03;
% e1=-14.980E+00;
% e2=+15.286E-03;
% Korigovane vrednosti koeficijenata za HPFD dobijeni naknadnom identifikacijom
        A=+0.039119028716906;
        B=+7.918183050581843e+02;
        C=+1.191665564329962e+02;
        d0=-6.49549811307298;
        d1=+6722.04905544645;
        d2=-815606.326368076;
        e0=+1236.60235075082;
        e1=-3.47627313410517;
        e2=+0.00369702994797998;
    case 'ULSD'
% Originalne vrednosti za ULSD iz ref.
% d0=+1.2240+01;
% d1=-9.8230E+03;
% d2=+2.4937E+06;
% e0=+2.1064E+03;
% e1=-7.6343E+00;
% e2=+7.8114E-03;
% d0=+5.27970E+01;
% d1=-0.2167;
% d2=+2.00000E-04;
% Korigovane vrednosti koeficijenata za ULSD dobijeni naknadnom identifikacijom
        A=+0.0452791300583964;
        B=+720.584358627015;
        C=+125.134752490664;
        d0=+12.5037922346628;
        d1=-10105.8715377225;
        d2=+2556447.12741425;
        e0=+2496.06856653556;
        e1=-9.64263004659587;
        e2=+0.0103146900344028;
    case 'HARD'
% Originalne vrednosti za HARD iz ref.
% A=+3.2888E-02;
% B=+8.1391E+02;
% C=+1.1196E+02;
% d0=+2.0257E+01;
% d1=-18.546E+03;
% d2=+4.6641E+06;
% e0=+4.1746E+03;
% e1=-16.405E+00;
% e2=+16.697E-03;
% Korigovane vrednosti koeficijenata za HARD dobijeni naknadnom identifikacijom
```

```
        A=+0.0370248127145376;
        B=+786.142674717648;
        C=+111.709766349337;
        d0=+18.2425326661283;
        d1=-14137.7550656713;
        d2=+3226431.45709385;
        e0=+2510.99047473743;
        e1=-10.2530982324182;
        e2=+0.0116490176956837;
    otherwise
end

DT=d0+d1.*(TFuel.^(-1))+d2.*(TFuel.^(-2));
ET=e0+e1.*TFuel+e2.*TFuel.^2;

% Izračunavanje dinamičke viskoznosti na referentnom pritisku u zavisnosti od
    temperature
% Provera za eta0: [+]
fT1=log(A);
fT2=B./(TFuel-C);
eta0=exp(fT1+fT2);

% Izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska
fpET=(corr_p.*pFuel+ET)./(corr_p.*p0+ET);
eta=eta0.*(fpET.^DT);
```

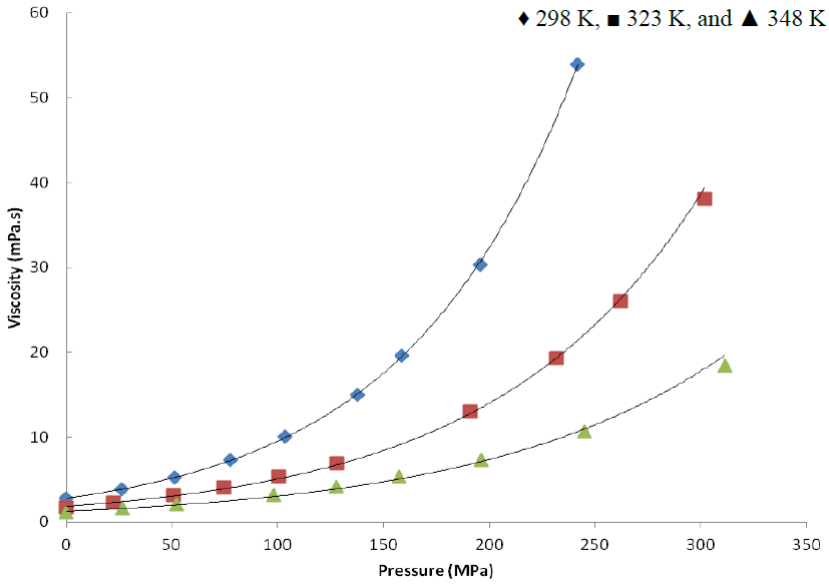
3.2.2 Dinamička viskoznost dizel-goriva - aproksimacija eksperimentalnih podataka

U radu [23] su dati rezultati ispitivanja gustine i viskoznosti dizel-goriva pri visokim pritiscima i povišenim temperaturama. Na osnovu podataka sa slike 3.19, primenom funkcije `grabit` identifikovati podatke (podaci mogu da se preuzmu na sledećem linku) za dinamičku viskoznost u funkciji pritiska za sve tri temperature i:

- Prikazati podatke identifikovane sa dijagrama (označiti ose, ubaciti legendu);
- Primenom alata `cftool` (koji deo `Curve Fitting Toolbox`-a u Matlab-u) istražiti različite metode aproksimacije. Na osnovu analize statističkih parametara formiranih aproksimacija, odabrati željeni metod;
- Generisati kod (File/Generate Code) i analizirati dobijen .m fajl;
- Prikazati rezultate interpolacije i testirati `sfit` objekat;
- Napraviti funkciju za određivanje dinamičke viskoznosti goriva na osnovu zadatog pritiska i temperature (`sfit` objekat se poziva unutar funkcije). Funkcionalnost proveriti za skalare i vektore kao argumente funkcije;
- Primenom funkcije `meshgrid` formirati matrice kolone i matrice redove nezavisnih promenljivih i generisati konturni dijagram dinamičke viskoznosti

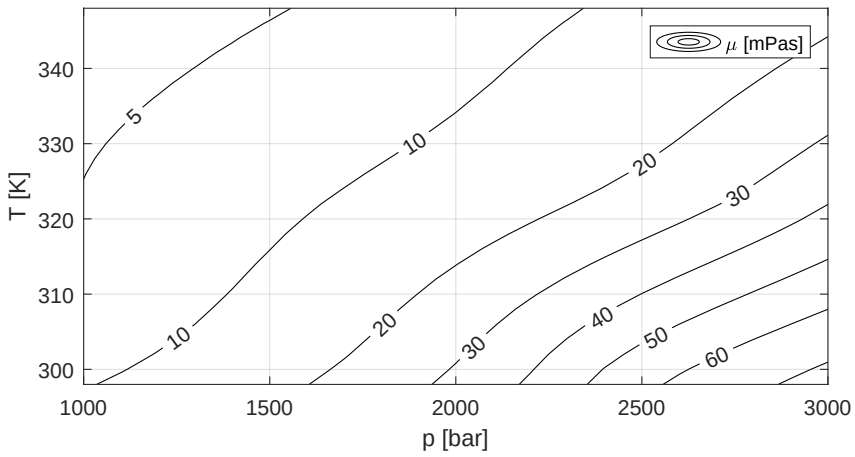
dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature;

- Analizirati oblasti interpolacije i ekstrapolacije zavisne promenljive.



Slika 3.19: Dinamička viskoznost dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature [23].

Rešenje



Slika 3.20: Dinamička viskoznost dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature.

U nastavku se nalazi program `vis_dyn_fuel_fit_2.m` (3.15) za određivanje zavisnosti dinamičke viskoznosti dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature.

Program 3.15: `vis_dyn_fuel_fit_2.m`

```
% vis_dyn_fuel_fit
clear
close all
clc
load viskoznost_data.mat

figure(1)
plot(T298(:,1),T298(:,2))
hold on
plot(T323(:,1),T323(:,2))
plot(T348(:,1),T348(:,2))
xlabel('Pritisak [bar]')
ylabel('Dinamicka viskoznost [Pas]')
grid on
legend('T_f = 298 K','T_f = 323 K','T_f = 348 K','Location','northwest')
hold off

% generisanje vektora sa podacima za sve krive
P = [ T298(:,1);T323(:,1);T348(:,1)];
vis_dyn = [ T298(:,2);T323(:,2);T348(:,2)];
T = [298.*ones(length(T298),1);...
    323.*ones(length(T323),1);...
    348.*ones(length(T348),1)];

%cftool(P,T,vis_dyn)

[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( P, T, vis_dyn );
% Set up fittype and options.
ft = 'thinplateinterp';
% Fit model to data.
[vis_dyn_obj, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, 'Normalize', 'on' );
% Plot fit with data.

figure(2);
h = plot(vis_dyn_obj, [xData, yData], zData );
xlabel('Pritisak [bar]')
ylabel('Temperatura [K]')
zlabel('Dinamicka viskoznost [Pas]')
save ('vis_dyn.mat','vis_dyn');

% odredjivanje dinamicke viskoznosti na osnovu aproksimiranih vrednosti.
p_1 = [0:100:3000]';
t_1 = [298:2:348]';
[P_mat, T_mat] = meshgrid(p_1,t_1);
vis_dyn_mat = vis_dyn_obj(P_mat, T_mat);

v = [0,0.005,[0.01:0.01:0.07]]'.*1000;
figure(3)
contourf(P_mat,T_mat,vis_dyn_mat.*1000,v,'ShowText','on')
grid on
xlabel('p [bar]')
ylabel('T [K]')
xlim([1000 3000])
xticks(1000:500:3000)
```

```
legend('\mu [mPas]')
colormap('white')
```

3.2.3 Viskoznost motornog benzina

Modeli za izračunavanje viskoznosti u zavisnosti od temperature razvijeni su i primenjeni prvenstveno za maziva i tokom vremena postali su sastavni deo nacionalnih i međunarodnih standarda. U osnovi, za izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od temperature koristi se eksponencijalna zavisnost u jednom od sledećih oblika.

Rejnolds (*Reynolds*):

$$\mu\left(T\right) = b \cdot \exp\left(-a \cdot T\right) \tag{3.27}$$

Sloutu (*Slotte*):

$$\mu\left(T\right) = \frac{a}{\left(b+T\right)^{c}} \tag{3.28}$$

Fogel-Fulher-Taman-Hese (*Vogel-Fulcher-Tammann-Hesse*), najčešće navođena kao Fogelova (*Fogel*) jednačina:

$$\mu\left(T\right) = a \cdot \exp\left(\frac{b}{c+T}\right) \tag{3.29}$$

Sličnost navedenih jednačina je očigledna i odgovarajućim transformacijama i aproksimacijama moguće je identifikovati koeficijente drugog modela. Fogelov model se može prikazati u drugačijem obliku ako se uvede vrednost dinamičke viskoznosti na referentnim uslovima (p_0, T_0):

$$\mu\left(p_0,T\right) = \mu\left(p_0,T_0\right) \cdot \exp\left(\frac{b}{c+T}\right) \tag{3.30}$$

Vrednosti koeficijenata b i c za dva uobičajena tržišno dostupna motorna benzina oktanskih brojeva (OB/RON) OB95 i OB98 kao i smeše sa butanolom u nekoliko karakterističnih koncentracija preuzeti su iz literature [24] i prikazani u tabeli 3.7.

Oznaka motornog benzina	$\mu\,(p_0,T_0)$ 10^{-3}Pas	b K	c K
B(0)-OB95(100)	0,47170000	12,590	−233,80
B(5)-OB95(95)	0,51300000	9,758	−235,90
B(10)-OB95(90)	0,54120000	8,194	−244,40
B(85)-OB95(15)	0,00796800	1500	−31,16
B(0)-OB98(100)	0,40190000	25,060	−216,50
B(5)-OB98(95)	0,00089570	2703	50,67
B(10)-OB98(90)	0,58500000	3,513	−250,80
B(85)-OB98(15)	0,00089590	2703	50,66
B(100)	0,00376800	1737	−33,16

Tabela 3.7: Koeficijenti Vogelovog modela za različite motorne benzine i smeše goriva [24].

Barusova jednačina za izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska data je u opštem eksponencijalnom obliku:

$$\mu\,(p,T) = \mu\,(p_0,T_0) \cdot \exp\left(\alpha\,(p,T) \cdot p\right) \tag{3.31}$$

pri čemu je neophodno poznavati vrednost dinamičke viskoznosti na referentnom pritisku i temperaturi i piezokoeficijent viskoznosti koji je takođe veličina koja zavisi od pritiska i temperature. Za opsege temperatura koji su od značaja za motorsku primenu, uticaj temperature se može zanemariti. Za većinu slučajeva može se zanemariti i uticaj promene pritiska. Uticaj temperature na piezokoeficijent može se uzeti u obzir uvođenjem vrednosti za dinamičku viskoznost na referentnom pritisku i radnoj temperaturi ukoliko je taj podatak poznat ili ga je moguće odrediti jednom od poznatih metoda (npr. Fogelovom jednačinom):

$$\mu\,(p,T) = \mu\,(p_0,T) \cdot \exp\left(\alpha \cdot p\right) \tag{3.32}$$

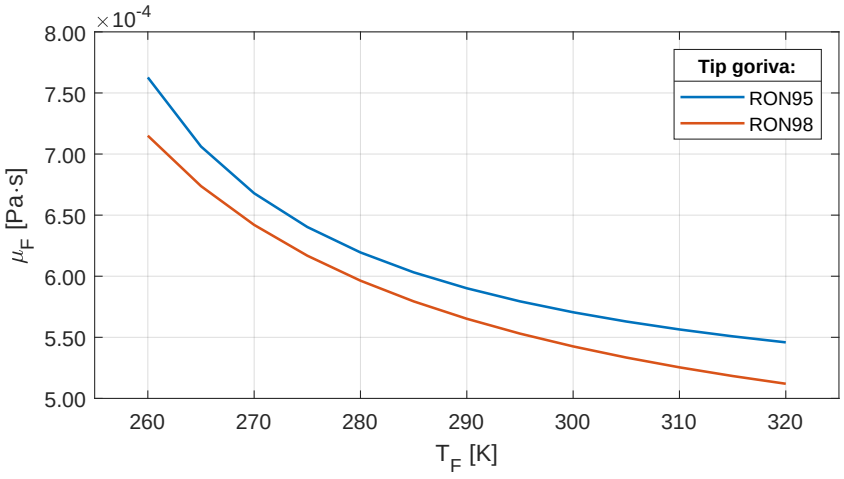
Podaci za piezokoeficijent preuzeti su iz literature [18] i prikazani su u tabeli 3.8.

Oznaka goriva	α $10^{-9}\mathrm{Pa}^{-1}$
OB95 (povišena mazivost)	7,1
OB95 (niža mazivost)	6,3
MTBE (metil-tert-butil-eter)	2,5

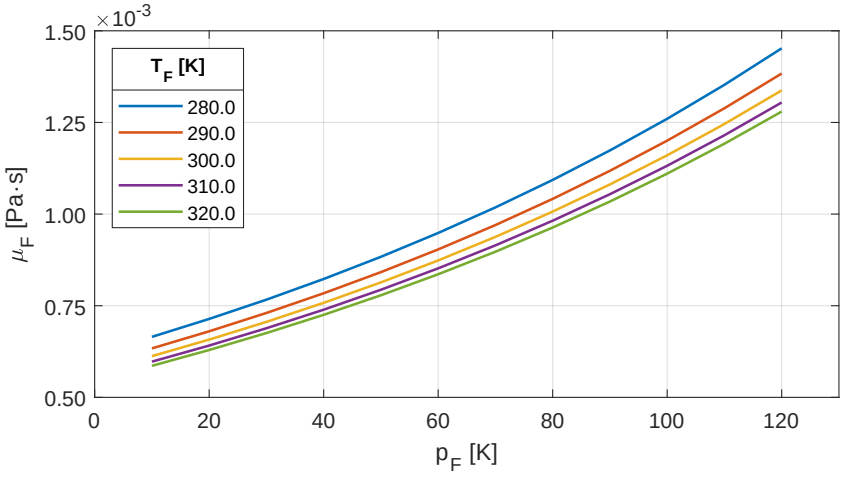
Tabela 3.8: Vrednosti piezokoeficijenata viskoznosti za motorne benzine i antidetonatore [18].

Rešenje

Na slici 3.21 prikazana je promena dinamičke viskoznosti motornih benzina prema modelu Vogela i u nastavku su prikazani glavni program `ViskoznostG_01.m` (3.16) i prateća funkcija `VFG_Vogel.m` (3.17). Rezultati određivanja dinamičke viskoznosti motornog benzina u u funkciji pritiska i temperature dobijeni primenom modela Barus, prikazani su na slici 3.22 a glavni program `ViskoznostG_04.m` (3.18) i funkcija `VFG_Barus.m` (3.19) nalaze se u nastavku.



Slika 3.21: Dinamička viskoznost motornih benzina u funkciji temperature - model Vogel [24].



Slika 3.22: Dinamička viskoznost motornih benzina u funkciji pritiska za diskretne vrednosti tetemperature - model Barus [18].

Program 3.16: `ViskoznostG_01.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti motornog benzina u zavisnosti od
% temperature i pritiska
% S. J. Popović, 202405.v01
% Model Vogel

clc;
close all;
clear all;

% Zadavanje opsega temperature benzina u [K]
TFuelMin=260;
TFuelMax=320;
dTFuel=5;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

FuelType={'RON95'; 'RON98'};
%         1         2
% Izbor rednog broja HC iz liste ponuđenih
CalcList=[1,2];
LegendList=FuelType(CalcList,1);

[mCL nCL]=size(CalcList);
for i=1:1:nCL
    for j=1:1:nT
        [muFuelT(i,j)]=VFG_Vogel(TFuel(1,j),FuelType(CalcList(1,i),1));
    end
end

colororder('default');
figure(1)
plot(TFuel,muFuelT(:,:),'-','LineWidth',1.2);
grid on;
hold on;
xlabel('T_{F} [K]');
ylabel('\mu_{F} [Pa\cdots]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.2f');
xlim([(TFuelMin-dTFuel),(TFuelMax+dTFuel)]);
LegendTitle={'Tip goriva:'};
lgd = legend(LegendList,'Location','NorthEast');
title(lgd,LegendTitle);
```

Program 3.17: `VFG_Vogel.m`

```
function [eta]=VFG_Vogel(TFuel,FuelType)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti
% motornog benzina, RON95 i RON98 u zavisnosti od temperature
% Model Vogel,
% S. J. Popović 202405.v01

% Ref.
```

```
% Daniel Trost, Adam Polcar, Petr Dostal, Josef Jelinek, Jiri Cupera, Vojtech
    Kumbar
% Mathematical models for temperature dependent viscosity
% of biobutanol and gasoline blends
% Proceedings of 27th International PhD Students Conference, pp. 486-491
% 11 November 2020, Brno, Czech Republic

% eta       [Pa*s]       dinamička viskoznost u zavisnosti od temperature
% eta0      [mPa*s]      dinamička viskoznost na ref. temperaturi, zadata u [mPa*s]
% TFuel     [K]          temperatura goriva
% FuelType               naziv tipa goriva
% corr_eta  [-]          koef. za preračunavanje [mPa*s] u [Pa*s]
% B         [K]          koef. u brojiocu za izračunavanje eksponenta
% C         [K]          aditivni član u imeniocu eksponenta
% FuelBase               baza sa nazivima tipova goriva
% CoefBase               matrica sa vrednostima koeficijenata

corr_eta=1.0E-03; % [mPa*s] > [Pa*s]

% Nazivi standardnih goriva i vrednosti koeficijenta viskoznosti
FuelBase={'RON95'; 'RON98'};
%          eta0     B         C
CoefBase=[+0.4717, +12.590, -233.80;...
          +0.4019, +25.060, -216.50];

% Traženje rednog broja člana baze naziva goriva
iFuel=find(strcmpi(FuelType,FuelBase));
checkFuel=isempty(iFuel);

if(checkFuel>0)
    disp('Greška u zadavanju naziva goriva. Zadato gorivo nije pronađeno u bazi.')
    eta=0.0;
else
    % Izračunavanje eksponenta kao f-je temperature goriva (model Vogel)
        eVogelG=CoefBase(iFuel,2)./(TFuel+CoefBase(iFuel,3));
    % Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva u zavisnosti od temperature goriva
         (model Vogel)
        eta=corr_eta.*CoefBase(iFuel,1).*exp(eVogelG);
end
```

Program 3.18: `ViskoznostG_04.m`

```
% Program za izračunavanje dinamičke viskoznosti motornog benzina u zavisnosti od
% temperature i pritiska
% S. J. Popović, 202405.v01
% P. Mrđa
% Model Vogel

clc;
close all;
clear;

% Zadavanje opsega temperature benzina u [K]
```

```
TFuelMin=280;
TFuelMax=320;
dTFuel=10;
TFuel=TFuelMin:dTFuel:TFuelMax;
[mT nT]=size(TFuel);

% Zadavanje opsega pritiska benzina u [Pa]
pFuelMin=100E+05;
pFuelMax=1200E+05;
dpFuel=100E+05;
pFuel=pFuelMin:dpFuel:pFuelMax;
[mp np]=size(pFuel);

% Izračunavanje dinamičke i kinematske viskoznosti motornog benzina u [Pa*s], [m2/s
    ]
% DFD_Tait: provereno, status - OK
% VFD_Tait
for j=1:1:nT
    for i=1:1:np
        [muFuelT(i,j)]=VFG_Vogel(TFuel(1,j),'RON95');
        [muFuel(i,j)]=VFG_Barus(muFuelT(i,j),pFuel(1,i),'RON95_HL');
    end
end

colororder('default');
figure(1)
plot(pFuel.*1.0E-06,muFuel(:,:),'-','LineWidth',1.2);
grid on;
hold on;
xlabel('p_{F} [K]');
ylabel('\mu_{F} [Pa\cdots]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.2f');
yticks([0.5:0.25:1.5].*10^-3)
xlim([(pFuelMin-dpFuel).*1.0E-06,(pFuelMax+dpFuel).*1.0E-06]);
LegendTitle={'T_{F} [K]'};
LegendLabel=num2str([TFuel]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,LegendTitle);
```

Program 3.19: `VFG_Barus.m`

```
function [eta]=VFG_Barus(eta0,pFuel,FuelType)
% Funkcija za izračunavanje dinamičke viskoznosti motornog benzina
% u zavisnosti od pritiska
% Model Vogel
% S. J. Popović, 202406.v01

% ref.
% Crude Oil - New Technologies and Recent Approaches, Chpt. 7,
% P. Arkoudeas: Gasoline Lubricity, 2022, DOI: 10.5772/intechopen.101302
% ISBN978-1-83969-533-9, eBook (PDF) ISBN978-1-83969-534-6, Doi10.5772/intechopen
    .95164
```

```
% str. 14 (15), izraz (5), tab. 4 i 5

% eta     [Pa*s]      dinamička viskoznost
% eta0    [Pa*s]      dinamička viskoznost na referentnom pritisku (p0=1.0E+05)
% alpha   [Pa-1]      koeficijent promene viskoznosti u zavisnosti od pritiska (model
     Vogel)
% pFuel   [Pa]        pritisak goriva

% FuelType
%                     RON95_LL..... gorivo niske mazivosti (Low Lubricity - LL, niski
     sadržaj S)
%                     RON95_HL..... gorivo visoke mazivosti (High Lubricity - HL,
    visoki sadržaj S)
%                     MTBE ........ Metil-tert-butil-eter
% close all;
% clear all;
% clc;
% FuelType='RON95_LL';

% Nazivi standardnih goriva i vrednosti koeficijenta viskoznosti
FuelBase={'RON95_HL'; 'RON95_LL'; 'MTBE'};
alphaFuel=[7.1,         6.3,         2.5].*1.0E-09;

% Određivanje koeficijenta viskoznosti na osnovu naziva ugljovodonika

% Traženje rednog broja člana baze naziva standardnih goriva
iFuel=find(strcmpi(FuelType,FuelBase));
% Provera da li je vektor indeksa prazan (slučaj kada ugljovodonik nije pronađen u
    bazi)
checkFuel=isempty(iFuel);

% Određivanje koeficijenta viskoznosti na osnovu prepoznatog naziva goriva
% i izračunavanje dinamičke viskoznosti u zavisnosti od pritiska
if(checkFuel<1)
        eta=eta0.*exp(alphaFuel(1,iFuel).*pFuel);
else
    disp('Greška u zadavanju naziva goriva. Zadato gorivo nije pronađeno u bazi.')
    eta=0.0;
end
```

3.3 Kriva isparavanja goriva

Prelazak materije iz tečnog u gasovito agregatno stanje naziva se isparavanje, a razlikuju se dva tipa isparavanja i to: površinsko isparavanje i ključanje. Površinsko isparavanje je tip isparavanja koje se odigrava na slobodnoj površini tečnosti kada se tečna faza pretvara u gasovitu nakon dostizanja lokalnih uslova neophodnih za isparavanje. Ključanje je isparavanje unutar čitave posmatrane zapremine tečnosti (ne samo sa površine). Okolni gas ne sme biti zasićen supstancom koja isparava jer u suprotnom neće doći do isparavanja.

Intenzitet isparavanja u globalu zavisi od međumolekulskih sila date materije,

temperature, pritiska (relativne brzine strujanja) i zasićenosti pare u okolnom gasu. Kod isparavanja tečnosti sa slobodne površine intenzitet isparavanja se povećava sa porastom temperature, brzine strujanja između tečne i gasne faze i sa smanjenjem zasićenosti pare.

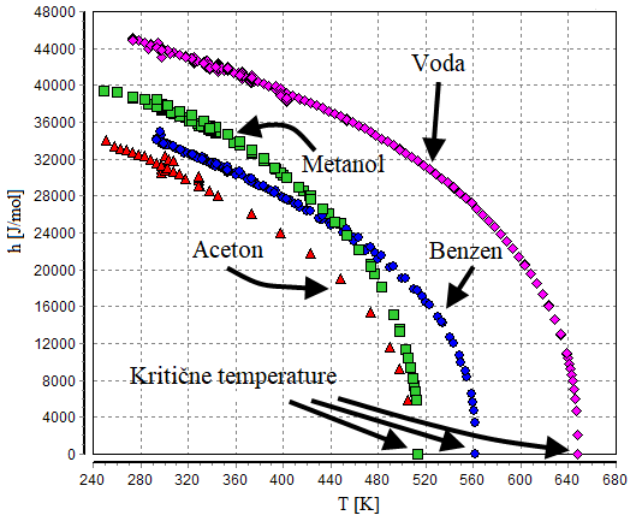
Pritisak zasićene pare se definiše Klauzijus-Klapejronovom (*Clausius-Clapeyron*) jednačinom:

$$ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta h_{vap}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \tag{3.33}$$

gde su p_1 i p_2 pritisak pare na temperaturama T_1 i T_2, Δh_{vap} je entalpija isparavanja i R je univerzalna gasna konstanta.

Entalpija isparavanja je funkcija pritiska i temperature, ali radi pojednostavljenja se koristi samo temperaturska zavisnost.

Na slici 3.23 je predstavljena promena specifične (molarne) entalpije isparavanja u funkciji temperature.



Slika 3.23: Entalpija isparavanja za vodu i pojedine ugljovodonike u funkciji temperature [25].

Ukoliko je temperatura viša od temperature ključanja, isparavanje se odvija po čitavoj zapremini (ne samo sa slobodne površine).

3.3.1 Određivanje pritisaka zasićene pare na osnovu Klausijus-Klapejronove jednačine

Primenom Klausijus-Klapejronove jednačine 3.33 odrediti pritisak zasićene pare vode, metanola (CH_3OH), benzena (C_6H_6) i acetona (C_3H_6O) u funkciji temperature

za početne uslove za primenu jednačine 3.33 prema tabeli 3.9

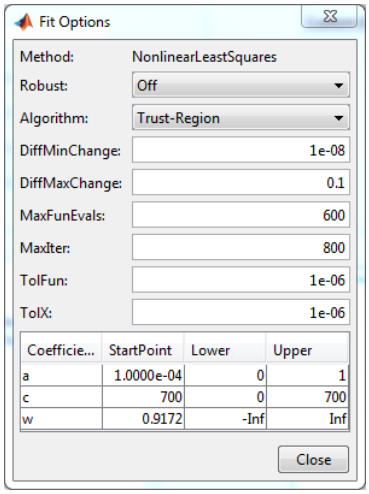
Jedinjenje	Temperatura ključanja pri nominalnom pritisku	
Voda	373,15 K	101325 Pa
Metanol	338 K	
Benzen	353,25 K	
Aceton	329 K	

Tabela 3.9: Temperature ključanja.

Opseg temperatura (t_2) na kome je potrebno sprovesti proračun je od $-10\,°C$ do $110\,°C$. Vrednosti za entalpiju isparavanja preuzeti sa slike 3.23 primenom Matlab funkcije `grabit`. Ovi podaci su dostupni u formi `.mat` datoteke na sledećem linku: link_podaci. U okviru datoteke sa podacima nalaze se četiri matrice sa različitim numeričkim oznakama (`01`, `02`, `03`, `04`) za četiri jedinjenja iz prethodne tabele, respektivno. Unutar svake matrice, prva kolona predstavlja promenu temperature (`Temp`), a druga kolona promenu vrednosti specifične (molarne) entalpije isparavanja (`hvap`). Kvalitetniji podaci, u smislu tačnosti i rezolucije, za ovaj primer, mogu se pronaći u [25].

Aproksimaciju izvršiti eksponencijalnom funkcijom koristeći alatku `cftool` i `Custom Equation` funkciju prema sledećem redosledu operacija:

1. Aproksimaciju izvršiti u domenu `xData = hvap`, `yData = Temp`;
2. `Custom` funkciju napraviti u obliku $f(x) = -e^{(a \cdot x + w)} + c$;
3. Podesiti početne uslove za tražene koeficijente aproksimacije na način dat na slici 3.24;
4. Nakon određivanja koeficijenata funkcije $y = f(x)$, analitičkim putem odrediti inverznu funkciju $x = f(y)$, odnosno funkciju koja će da opisuje datu promenu u domenu `x = Temp`, `y = hvap`;
5. Nakon određivanja aproksimacije za entalpiju isparavanja, primeniti jednačinu 3.33 i odrediti pritisak zasićene pare za navedena jedinjenja. Za opseg temperatura t_2 koristiti korak od $0{,}1\,°C$.

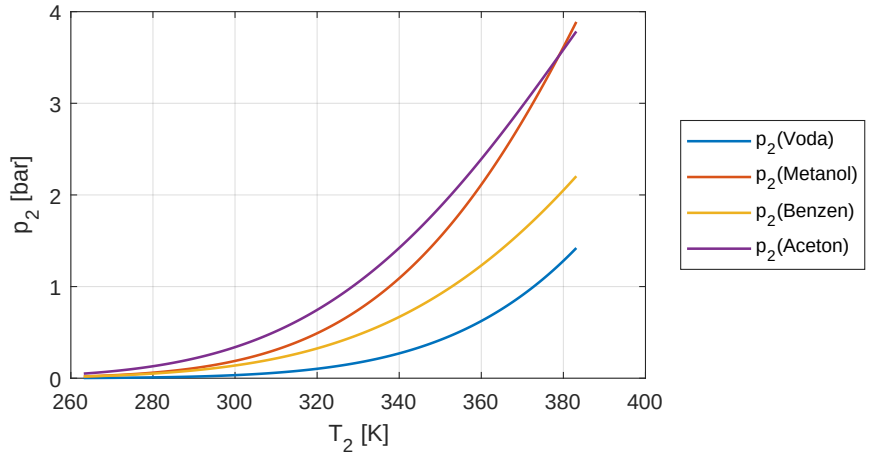


Slika 3.24: Podešavanje početnih uslova tražene aproksimacije.

Aproksimaciju krive za specifičnu molarnu entalpiju isparavanja vode izvršiti primenom opcije `Smoothing Spline` i odgovoriti na sledeće stavke:

1. Variranjem parametra zaobljenja krive, prokomentarisati kvalitet aproksimacije,
2. Razmotriti kvalitet aproksimacije pri podešavanju `xData = hvap`, `yData = Temp`,
3. Razmotriti kvalitet aproksimacije pri podešavanju `xData = Temp`, `yData = hvap`,
4. Analizirati u kom slučaju je aproksimacija bolja i da li postoji mogućnost invertovanja domena $y = f(x) \rightarrow x = f(y)$,
5. Primenom `Smoothing Spline` aproksimacije za `hvap`, odrediti pritisak zasićene pare vode,
6. Uporediti rezultate.

Rešenje



Slika 3.25: Pritisak zasićene pare vode, metanola, benzena i acetona u funkciji temperature.

U nastavku se nalazi program `V1_isparavanje.m` (3.20) za određivanje zavisnosti pritiska zasićene vodene pare u funkciji temperature.

Program 3.20: `V1_isparavanje.m`

```
% Pritisak zasićene pare
% P. Mrđa
% Aproksimacija entalpije vaporizacije logaritamskom funkcijom.
clear
close all
clc
% Uzorkovanje podataka sa dojagram primenom funkcije grabit.
load Data_vap.mat
% Temp = Data001(:,1)
% hvap = Data001(:,2)

[xData, yData] = prepareCurveData( Temp, hvap );
ft = fittype( '(log(-x+c)-w)/a', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.Lower = [0 500 0];
opts.MaxIter = 800;
opts.StartPoint = [0.0001 700 1];
opts.Upper = [1 700 10];

[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

Temp_aprox = linspace(min(Temp),max(Temp),100)';
hvap_aprox = fitresult(Temp_aprox);

figure(1)
plot(Temp,hvap,'x')
```

```
hold on
plot(Temp_aprox,hvap_aprox)
xlabel('Temperatura [K]')
ylabel('Molarna entalpija vode, hvap [J/mol]')
grid on
legend('data','aprox')

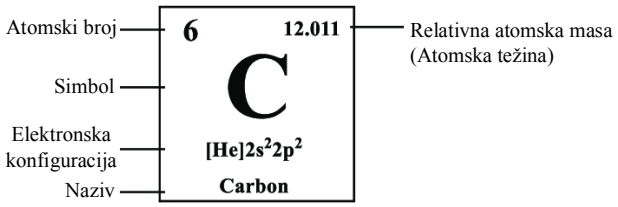
% Odredjivanje pritiska zasicene pare
T2 = 273.15 + (-10:0.1:110)'; % [K]
dhvap = fitresult(T2);

% Početni uslovi
p1 = 1e5; % Pa
T1 = 100 + 273.15; % degC
R = 8.3145; % J/molK
p2 = p1.* exp(-(dhvap./R).*(1./T2 - 1/(T1)));

figure(2)
plot(T1-273.15,p1/1e5,'x','MarkerSize',10,'LineWidth',3)
hold on
plot(T2-273.15,p2/1e5,'LineWidth',2)
hold off
xlabel('t_2 [degC]')
ylabel('p_2 [bar]')
legend('p_1(t_1)','p_2','Location','eastoutside')
legend('boxoff')
grid on
xlim([-20 120]);
ylim([0 1.4]);
```

4 Reakcije oksidacija i stehiometrija

Atomska težina ili relativna atomska masa je bezdimenziona veličina i predstavlja broj koji pokazuje koliko puta jedan reprezentativni atom određenog hemijskog elementa ima veću molarnu masu od $^1/_{12}$ atoma izotopa ^{12}C. Molarna masa se označava sa M_r i ima jedinicu $^g/_{mol}$ ili $^{kg}/_{kmol}$.



Slika 4.1: Osnovni podaci dati u Periodnom sistemu elemenata.

Podaci o Periodnom sistemu elemenata su opšte dostupni i mogu se naći u literaturi u štampanom ili elektronskom obliku *[26].*

4.1 Primeri potpune i nepotpune oksidacije *C* i *H*

U nastavku su dati primeri hemijskih reakcija koje su pogodne za razumevanje osnovnih principa stehiometrije i koje su karakteristične za osnovne elemente goriva koja se koriste kod motora SUS:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q_C \tag{4.1}$$

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + Q_C \tag{4.2}$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + Q_C \tag{4.3}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Q_C \tag{4.4}$$

gde Q_C predstavlja toplotni bilans konkretne reakcije. U poglavlju 4.5.2 će biti više detalja o određivanju količine toplote koja se dobija sagorevanjem.

4.1.1 Potpuna oksidacija *C* u CO_2

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 2 \cdot M_r\,(O) = 2 \cdot 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}} = 31{,}998\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
Hemijska jednačina reakcije:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q_C \tag{4.5}$$

gde je Q_C količina toplote koja se oslobađa oksidacijom. Jednačina 4.5, posmatrana sa aspekta količine materije može da se napiše u sledećem obliku:

$$1\,\text{mol}C + 1\,\text{mol}O_2 \rightarrow 1\,\text{mol}CO_2 + Q_C \tag{4.6}$$

ili

$$1\,\text{kmol}C + 1\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 1\,\text{kmol}CO_2 + Q_C \tag{4.7}$$

Kada se uvrste vrednosti molarnih masa, nakon skraćivanja oznaka za količinu materije ($kmol$) dobija se:

$$1 \cdot 12{,}011\,\text{kg}C + 1 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + Q_C \tag{4.8}$$

Svođenjem prethodne jednačine na jediničnu masu C, dobija se:

$$1 \cdot 12{,}011\,\text{kg}C + 1 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + Q_C \qquad /12{,}011 \tag{4.9}$$

$$1\,\text{kg}C + \frac{1 \cdot 31{,}998}{12{,}011}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{44{,}009}{12{,}011}\,\text{kg}CO_2 + Q_C \tag{4.10}$$

$$1\,\text{kg}C + 2{,}664\,\text{kg}O_2 \rightarrow 3{,}664\,\text{kg}CO_2 + 32912{,}87\,{}^{\text{kJ}}/_{\text{kgC}} \tag{4.11}$$

4.1.2 Nepotpuna oksidacija *C* u *CO*

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
Hemijska jednačina reakcije:

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + Q_C \tag{4.12}$$

Po ugledu na primer 4.1.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$C + 0{,}5O_2 \rightarrow CO + Q_C \tag{4.13}$$

$$1\,\text{kmol}C + 0{,}5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 1\,\text{kmol}CO + Q_C \tag{4.14}$$

$$1 \cdot 12{,}011\,\text{kg}C + 0{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 28{,}01\,\text{kg}CO + Q_C \tag{4.15}$$

$$1 \cdot 12{,}011\,\text{kg}C + 0.5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 28{,}01\,\text{kg}CO + Q_C \qquad /12{,}011 \tag{4.16}$$

$$1\,\text{kg}C + \frac{0{,}5 \cdot 31{,}998}{12{,}011}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{28{,}01}{12{,}011}\,\text{kg}CO + Q_C \tag{4.17}$$

$$1\,\text{kg}C + 1{,}332\,\text{kg}O_2 \rightarrow 2{,}332\,\text{kg}CO + 9211\,{}^{\text{kJ}}/_{\text{kgC}} \tag{4.18}$$

4.1.3 Oksidacije *CO* u *CO_2*

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(CO) = 28{,}01\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$ (jednačina 4.15)
Hemijska jednačina reakcije:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + Q_C \tag{4.19}$$

Po ugledu na primer 4.1.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$CO + 0{,}5O_2 \rightarrow CO_2 + Q_C \tag{4.20}$$

$$1\,\text{kmol}CO + 0{,}5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 1\,\text{kmol}CO_2 + Q_C \tag{4.21}$$

$$1 \cdot 28{,}01\,\text{kg}CO + 0{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + Q_C \tag{4.22}$$

$$1 \cdot 28{,}01\,\mathrm{kg}CO + 0{,}5 \cdot 31{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 44{,}009\,\mathrm{kg}CO_2 + Q_C \qquad /28{,}01 \tag{4.23}$$

$$1\,\mathrm{kg}CO + \frac{0{,}5 \cdot 31{,}998}{28{,}01}\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \frac{44{,}009}{28{,}01}\,\mathrm{kg}CO_2 + Q_C \tag{4.24}$$

$$1\,\mathrm{kg}CO + 0{,}571\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 1{,}571\,\mathrm{kg}CO_2 + 10160\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgCO}} \tag{4.25}$$

Kombinovanjem jednačine 4.18, koja opisuje koliko se kilograma produkata nepotpunog sagorevanja (CO) dobija i kolika se količine energije oslobađa pri sagorevanju $1\,\mathrm{kg}C$, i jednačine 4.25, dobija se količina toplote koja se oslobodi dogorevanjem odgovarajuće količine CO do produkata potpunog sagorevanja, odnosno CO_2, za $1\,\mathrm{kg}C$.

$$\begin{gathered}
1\,\mathrm{kg}C + 1{,}332\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 2{,}332\,\mathrm{kg}CO + 9211\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC}} \\
2{,}332 \cdot (1\,\mathrm{kg}CO + 0{,}571\,\mathrm{kg}O_2) \rightarrow 2{,}332 \cdot (1{,}571\,\mathrm{kg}CO_2 + 10160\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgCO}}) \\
1\,\mathrm{kg}C + 1{,}332\,\mathrm{kg}O_2 + 2{,}332 \cdot 0{,}571\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \\
2{,}332 \cdot 1{,}571\,\mathrm{kg}CO_2 + 9211\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC}} + 2{,}332 \cdot 10160\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgCO}} \\
1\,\mathrm{kg}C + 2{,}664\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 3{,}664\,\mathrm{kg}CO_2 + 32913\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC}}
\end{gathered} \tag{4.26}$$

što odgovara jednačini 4.11.

Ovim primerom može da se dokaže Hesov zakon (*Germain Henri Hess*), odnosno da toplotni bilans reakcije zavisi od konačnog bilansa reaktanata i produkata, a ne od redosleda i broja reakcija.

4.1.4 Oksidacije H_2 u H_2O

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(H_2) = 2{,}016\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
Hemijska jednačina reakcije:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Q_C \tag{4.27}$$

Po ugledu na primer 4.1.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O + Q_C \tag{4.28}$$

$$1\,\text{kmol}H_2 + 0{,}5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 1\,\text{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.29}$$

$$2 \cdot 1{,}008\,\text{kg}H_2 + 0{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.30}$$

$$2{,}016\,\text{kg}H_2 + 0{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \qquad /2{,}016 \tag{4.31}$$

$$1\,\text{kg}H_2 + \frac{0{,}5 \cdot 31{,}998}{2{,}016}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{18{,}015}{2{,}016}\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.32}$$

$$1\,\text{kg}H_2 + 7{,}93\,\text{kg}O_2 \rightarrow 8{,}936\,\text{kg}H_2O + 142081\,{}^{\text{kJ}}/_{\text{kgH}_2} \tag{4.33}$$

4.2 Stehiometrijsko sagorevanje elementarnih ugljovodonika i amonijaka

Stehiometrijska reakcija sagorevanja ugljovodoničnog goriva se definiše tako da gorivo sagoreva u potpunosti i da su jedini produkti sagorevanja CO_2 i H_2O. U ovom odeljku biće prikazani primeri stehiometrijskih jednačina oksidacije nekoliko karakterističnih zasićenih i nezasićenih ugljovodonika iz grupe acikličnih i cikličnih ugljovodonika, kao i primer oksidacije amonijaka kao bezugljeničnog goriva. Zasićeni ugljovodonici su oni kod kojih se između atoma ugljenika javljaju samo jednostruke hemijske veze (nema dvostrukih niti trostrukih veza). Opšta hemijska formula za aciklične zasićene ugljovodonike (alkane) je C_nH_{2n+2}, dok za ciklične zasićene ugljovodonike (cikloalkane) ima formu C_nH_{2n}. Druge kategorije ugljovodonika, kao što su na primer cikloalkeni, imaju cikličnu strukturu i nisu zasićeni (odnosno imaju višestruke veze).

4.2.1 Stehiometrijsko sagorevanje propana C_3H_8

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
Jednačina sagorevanja:

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + Q_C \tag{4.34}$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$1\,\text{kmol}C_3H_8 + 5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 3\,\text{kmol}CO_2 + 4\,\text{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.35}$$

$$M_r\,(C_3H_8) = 3 \cdot M_r\,(C) + 8 \cdot M_r\,(H) = 3 \cdot 12{,}011 + 8 \cdot 1{,}008 = 44{,}097\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}C_3H_8} \tag{4.36}$$

$$44{,}097\,\text{kg}C_3H_8 + 5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 3 \cdot 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + 4 \cdot 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.37}$$

$$1\,\text{kg}C_3H_8 + \frac{5 \cdot 31{,}998}{44{,}097}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{3 \cdot 44{,}009}{44{,}097}\,\text{kg}CO_2 + \frac{4 \cdot 18{,}015}{44{,}097}\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.38}$$

$$1\,\text{kg}C_3H_8 + 3{,}628\,\text{kg}O_2 \rightarrow 2{,}994\,\text{kg}CO_2 + 1{,}6341\,\text{kg}H_2O + 50158\,{}^{\text{kJ}}/_{\text{kg}C_3H_8} \tag{4.39}$$

4.2.2 Stehiometrijsko sagorevanje butana C_4H_{10}

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}}$
Jednačina sagorevanja:

$$2C_4H_{10} + 13O_2 \rightarrow 8CO_2 + 10H_2O + Q_C \tag{4.40}$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$C_4H_{10} + 6{,}5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + Q_C \tag{4.41}$$

$$1\,\text{kmol}C_4H_{10} + 6{,}5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 4\,\text{kmol}CO_2 + 5\,\text{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.42}$$

$$M_r\,(C_4H_{10}) = 4 \cdot M_r\,(C) + 10 \cdot M_r\,(H) = 4 \cdot 12{,}011 + 10 \cdot 1{,}008 = 58{,}124\,{}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}C_4H_{10}} \tag{4.43}$$

$$58{,}124\,\text{kg}C_4H_{10} + 6{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 4 \cdot 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + 5 \cdot 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.44}$$

$$1\,\mathrm{kg}C_4H_{10} + \frac{6{,}5 \cdot 31{,}998}{58{,}124}\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \frac{4 \cdot 44{,}009}{58{,}124}\,\mathrm{kg}CO_2 + \frac{5 \cdot 18{,}015}{58{,}124}\,\mathrm{kg}H_2O + Q_C \quad (4.45)$$

$$1\,\mathrm{kg}C_4H_{10} + 3{,}578\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 3{,}027\,\mathrm{kg}CO_2 + 1{,}5497\,\mathrm{kg}H_2O + 50335\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC_3H_8}} \quad (4.46)$$

4.2.3 Stehiometrijsko sagorevanje oktana C_8H_{18}

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
Jednačina sagorevanja:

$$2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O + Q_C \quad (4.47)$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$C_8H_{18} + 12{,}5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O + Q_C \quad (4.48)$$

$$1\,\mathrm{kmol}C_8H_{18} + 12{,}5\,\mathrm{kmol}O_2 \rightarrow 8\,\mathrm{kmol}CO_2 + 9\,\mathrm{kmol}H_2O + Q_C \quad (4.49)$$

$$M_r\,(C_8H_{18}) = 8 \cdot M_r\,(C) + 18 \cdot M_r\,(H) = 8 \cdot 12{,}011 + 18 \cdot 1{,}008 = 114{,}232\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmolC_8H_{18}}} \quad (4.50)$$

$$114{,}232\,\mathrm{kg}C_8H_{18} + 12{,}5 \cdot 31{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 8 \cdot 44{,}009\,\mathrm{kg}CO_2 + 9 \cdot 18{,}015\,\mathrm{kg}H_2O + Q_C \quad (4.51)$$

$$1\mathrm{kg}C_8H_{18} + \frac{12{,}5 \cdot 31{,}998}{114{,}232}\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \frac{8 \cdot 44{,}009}{114{,}232}\mathrm{kg}CO_2 + \frac{9 \cdot 18{,}015}{114{,}232}\mathrm{kg}H_2O + Q_C \quad (4.52)$$

$$1\,\mathrm{kg}C_8H_{18} + 3{,}501\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 3{,}082\,\mathrm{kg}CO_2 + 1{,}419\,\mathrm{kg}H_2O + 44427\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC_8H_{18}}} \quad (4.53)$$

4.2.4 Stehiometrijsko sagorevanje tetradekana $C_{14}H_{30}$

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:

$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
Jednačina sagorevanja:

$$2C_{14}H_{30} + 43O_2 \rightarrow 28CO_2 + 30H_2O + Q_C \tag{4.54}$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$C_{14}H_{30} + 21{,}5O_2 \rightarrow 14CO_2 + 15H_2O + Q_C \tag{4.55}$$

$$1\,\mathrm{kmol}C_{14}H_{30} + 21{,}5\,\mathrm{kmol}O_2 \rightarrow 14\,\mathrm{kmol}CO_2 + 15\,\mathrm{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.56}$$

$$M_r\,(C_{14}H_{30}) = 14{\cdot}M_r\,(C){+}30{\cdot}M_r\,(H) = 14{\cdot}12{,}011{+}30{\cdot}1{,}008 = 198{,}394\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}\mathrm{C_{14}H_{30}}} \tag{4.57}$$

$$198{,}394\,\mathrm{kg}C_{14}H_{30} + 21{,}5 \cdot 31{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 14 \cdot 44{,}009\,\mathrm{kg}CO_2 + 15 \cdot 18{,}015\,\mathrm{kg}H_2O + Q_C \tag{4.58}$$

$$1\,\mathrm{kg}C_{14}H_{30} + \frac{21{,}5 \cdot 31{,}998}{198{,}394}\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \frac{14 \cdot 44{,}009}{198{,}394}\,\mathrm{kg}CO_2 + \frac{15 \cdot 18{,}015}{198{,}394}\,\mathrm{kg}H_2O + Q_C \tag{4.59}$$

$$1\,\mathrm{kg}C_{14}H_{30} + 3{,}468\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 3{,}106\,\mathrm{kg}CO_2 + 1{,}362\,\mathrm{kg}H_2O + 44427\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC_8H_{18}}} \tag{4.60}$$

4.2.5 Stehiometrijsko sagorevanje cikloheksana C_6H_{12}

Najjednostavniji primeri zasićenih naftenskih (cikličnih) ugljovodoničnih goriva su ciklopentan C_5H_{10} i cikloheksan C_6H_{12}. U nastavku će biti dat primer stehiometrijske oksidacije cikloheksana C_6H_{12}.

$$C_6H_{12} + 9O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + Q_C \tag{4.61}$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$1\,\text{kmol}C_6H_{12} + 9\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 6\,\text{kmol}CO_2 + 6\,\text{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.62}$$

$$M_r\,(C_6H_{12}) = 6 \cdot M_r\,(C) + 12 \cdot M_r\,(H) = 6 \cdot 12{,}011 + 12 \cdot 1{,}008 = 84{,}162\ {}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}C_6H_{12}} \tag{4.63}$$

$$84{,}162\,\text{kg}C_6H_{12} + 9 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 6 \cdot 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + 6 \cdot 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.64}$$

$$1\,\text{kg}C_6H_{12} + \frac{9 \cdot 31{,}998}{84{,}162}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{6 \cdot 44{,}009}{84{,}162}\,\text{kg}CO_2 + \frac{6 \cdot 18{,}015}{84{,}162}\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.65}$$

$$1\,kgC_6H_{12} + 3{,}422\,kgO_2 \rightarrow 3{,}137\,kgCO_2 + 1{,}284\,kgH_2O + 43450\ {}^{\text{kJ}}/_{\text{kg}C_6H_{12}} \tag{4.66}$$

4.2.6 Stehiometrijsko sagorevanje benzena C_6H_6

Nezasićeni ugljovodonici su oni kod kojih se između atoma ugljenika javljaju ne samo jednostruke, već i dvostruke i/ili trostruke hemijske veze. U nastavku će biti dat primer stehiometrijskog sagorevanja nezasićenog cikličnog (aromatskog) ugljovodoničnog goriva - benzena C_6H_6.

$$2C_6H_6 + 15O_2 \rightarrow 12CO_2 + 6H_2O + Q_C \tag{4.67}$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$C_6H_6 + 7.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O + Q_C \tag{4.68}$$

$$1\,\text{kmol}C_6H_6 + 7{,}5\,\text{kmol}O_2 \rightarrow 6\,\text{kmol}CO_2 + 3\,\text{kmol}H_2O + Q_C \tag{4.69}$$

$$M_r\,(C_6H_6) = 6 \cdot M_r\,(C) + 6 \cdot M_r\,(H) = 6 \cdot 12{,}011 + 6 \cdot 1{,}008 = 78{,}114\ {}^{\text{kg}}/_{\text{kmol}C_6H_6} \tag{4.70}$$

$$78{,}114\,\text{kg}C_6H_6 + 7{,}5 \cdot 31{,}998\,\text{kg}O_2 \rightarrow 6 \cdot 44{,}009\,\text{kg}CO_2 + 3 \cdot 18{,}015\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.71}$$

$$1\,\text{kg}C_6H_6 + \frac{7{,}5 \cdot 31{,}998}{78{,}114}\,\text{kg}O_2 \rightarrow \frac{6 \cdot 44{,}009}{78{,}114}\,\text{kg}CO_2 + \frac{3 \cdot 18{,}015}{78{,}114}\,\text{kg}H_2O + Q_C \tag{4.72}$$

$$1\,\mathrm{kg}C_6H_6 + 3{,}072\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 3{,}380\,\mathrm{kg}CO_2 + 0{,}692\,\mathrm{kg}H_2O + 40170\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgC_6H_6}} \quad (4.73)$$

4.2.7 Stehiometrijsko sagorevanje amonijaka NH_3

Amonijak je bezugljenično gorivo, tj. njegovim sagorevanjem se ne emituje CO_2. Zbog mogućnosti skladištenja u tečnom stanju, obično se posmatra kao tzv. „nosač vodonika". Nažalost, hemijska reaktivnost, niska toplotna moć i činjenica da je u pitanju izuzetno otrovno hemijsko jedinjenje, čine ga manje interesantnim za masovnu upotrebu, ali interesantnim za upotrebu u posebnim slučajevima, kao što su npr. pogon plovila ili stacionarni pogon motorima SUS.

Molarne mase atoma i molekula neophodne za rešavanje ovog zadatka su:
$M_r\,(N) = 14{,}007\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(N_2) = 28{,}014\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
Jednačina sagorevanja:

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 6H_2O + 2N_2 + Q_C \quad (4.74)$$

Po ugledu na primer 4.2.1, prikazani su pojedinačni koraci u sređivanju polazne hemijske jednačine:

$$NH_3 + 0.75O_2 \rightarrow 1{,}5H_2O + 0{,}5N_2 + Q_C \quad (4.75)$$

$$1\,\mathrm{kmol}NH_3 + 0{,}75\,\mathrm{kmol}O_2 \rightarrow 1{,}5\,\mathrm{kmol}H_2O + 0{,}5\,\mathrm{kmol}N_2 + Q_C \quad (4.76)$$

$$M_r\,(NH_3) = 1 \cdot M_r\,(N) + 3 \cdot M_r\,(H) = 1 \cdot 14{,}007 + 3 \cdot 1{,}008 = 17{,}031\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmolNH_3}} \quad (4.77)$$

$$17{,}031\,\mathrm{kg}NH_3 + 0{,}75 \cdot 31{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 1{,}5 \cdot 18{,}015\,\mathrm{kg}H_2O + 0{,}5 \cdot 28{,}014\,\mathrm{kg}N_2 + Q_C \quad (4.78)$$

$$1\,\mathrm{kg}NH_3 + \frac{0{,}75 \cdot 31{,}998}{17{,}031}\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow \frac{1{,}5 \cdot 18{,}015}{17{,}031}\,\mathrm{kg}H_2O + \frac{0{,}5 \cdot 28{,}014}{17{,}031}\,\mathrm{kg}N_2 + Q_C \quad (4.79)$$

$$1\,\mathrm{kg}NH_3 + 1{,}409\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 1{,}587\,\mathrm{kg}H_2O + 0{,}822\,\mathrm{kg}N_2 + 22500\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgNH_3}} \quad (4.80)$$

4.3 Određivanje potrebne količine vazduha za stehiometrijsko sagorevanje elementarnog ugljovodoničnog goriva

Kao što je već napomenuto u poglavlju 4.2, stehiometrijska reakcija sagorevanja ugljovodoničnog goriva se definiše tako da gorivo sagoreva u potpunosti i da su jedini produkti sagorevanja CO_2 i H_2O. Ovakav način sagorevanja je referentan, a ostale varijante procesa podrazumevaju i druge produkte potpunog sagorevanja (ukoliko gorivo npr. sadrži sumpor) i/ili nepotpunog sagorevanja (npr. CO, grupe ugljovodonika, slobodnih radikala itd.)

Sastav produkata zavisi od stehiometrije, tako na primer za bogatu smešu (prisustvo kiseonika u količini manjoj od stehiometrijski potrebne) očekujemo CO i H_2 u produktima sagorevanja zbog nedostatka kiseonika. Ukoliko je smeša siromašna (prisustvo kiseonika u količini većoj od stehiometrijski potrebne), očekujemo višak kiseonika u produktima sagorevanja.

Ukoliko se vazduh razmatra kao idealan gas i uz pretpostavku da je zapreminski (molarni) odnos O_2 i N_2 u vazduhu $r_i(O_2) : r_i(N_2) = 0{,}21 : 0{,}79$, sledi da je i molarni odnos $0{,}21\,\mathrm{mol}O_2 : 0{,}79\,\mathrm{mol}N_2$, tj. da $1\,\mathrm{mol}O_2$ odgovara $3{,}762\,\mathrm{mol}N_2$. Ukoliko se sastav vazduha posmatra prema stvarnom sastavu iz [27], što je tabelarno prikazano u tabeli 4.1, molarni odnos kiseonika i azota (pod pretpostavkom da se idalje posmatra kao idealni gas, odnosno da su zapreminski i molarni odnosi jednoznačni) u vazduhu je nešto drugačiji i iznosi $3{,}727\,{}^{\mathrm{mol}N_2}/_{\mathrm{mol}O_2}$.

Gas		Zapreminski udeli		Maseni udeli	
Naziv	Oznaka	[ppm]	[%]	[ppm]	[%]
Azot	N_2	780800	78,08	755200	75,52
Kiseonik	O_2	209500	20,95	231400	23,14
Argon	Ar	9340	0,9340	12900	1,29
Ugljen-dioksid	CO_2	412	0,0412	626	0,063
Neon	Ne	18,2	0,00182	12,7	0,00127
Helium	He	5,24	0,000524	0,724	0,0000724
metan	CH_4	1,79	0,000179	0,99	0,000099
Kripton	Kr	1,14	0,000114	3,3	0,00033

Tabela 4.1: Zapreminski i maseni udeli komponenti u suvom vazduhu [27].

4.3.1 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formule C_aH_b

Ukoliko gorivo predstavimo kao C_aH_b, stehiometrijska jednačina sagorevanja glasi:

$$C_aH_b + a_s\left(O_2 + \frac{0{,}79\,\frac{\text{mol}N_2}{\text{mol}A}}{0{,}21\,\frac{\text{mol}O_2}{\text{mol}A}}N_2\right) \rightarrow n_1CO_2 + n_2H_2O + n_3N_2 \tag{4.81}$$

$$C_aH_b + a_s\left(O_2 + 3{,}76N_2\right) \rightarrow n_1CO_2 + n_2H_2O + n_3N_2 \tag{4.82}$$

gde je a_s stehiometrijski molarni odnos vazduha i goriva, a n_1, n_2, n_3 predstavljaju broj molova koji opisuju sastav produkata sagorevanja.

Stehiometrijska jednačina je izražena po molu goriva. Broj molova u reaktantima i produktima mora da bude jednak, prema tome sledi:

$$\begin{aligned} C: &\quad a = n_1 \\ H: &\quad b = 2n_2 \\ O: &\quad 2a_s = 2n_1 + n_2 \\ N: &\quad 2 \cdot 3{,}76 \cdot a_s = 2 \cdot n_3 \end{aligned} \tag{4.83}$$

Nepoznate veličine se određuju iz jednačina:

$$\begin{aligned} a_s &= a + \frac{b}{4} \\ n_1 &= a \\ n_2 &= \frac{b}{2} \\ n_3 &= 3{,}76\left(a + \frac{b}{4}\right) \end{aligned} \tag{4.84}$$

Odnos mase vazduha (m_A) i mase goriva (m_F) koji učestvuju u reakciji često se u literaturi označava kao AFR (eng.: *Air-Fuel Ratio*). Ukoliko su u pitanju stehiometrijski odnosi masa (ili masenih protoka) vazduha i goriva dodaje se indeks s, odnosno oznaka postaje AFR_s, a vrednost može da se odredi iz a_s i molarnih masa vazduha i goriva prema jednačini:

$$AFR_s = \left(\frac{m_A}{m_F}\right)_s = \frac{M_r\left(A\right) \cdot \left(4{,}76 \cdot a_s\right)}{a \cdot M_r\left(C\right) + b \cdot M_r\left(H\right)} \tag{4.85}$$

gde je:

$$M_r(A) = r_i\,(O_2) \cdot M_r\,(O_2) + r_i\,(N_2) \cdot M_r\,(N_2) \tag{4.86}$$

Molarni udeo date komponente u prethodnoj jednačini je označen sa r_i. Molarna masa vazduha definisana je na osnovu udela kiseonika i azota, zanemarujući prisustvo inertnih gasova, ugljen-monoksida, ugljen-dioksida i drugih primesa u vazduhu.

Molarna masa kiseonika i azota u molekularnom obliku:

$M_r\,(O_2) = 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$

$M_r\,(N_2) = 28{,}014\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$

$$M_r(A) = 0{,}21 \cdot 31{,}998\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}_{O_2}} + 0{,}79 \cdot 28{,}014\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}_{N_2}} = 28{,}850\,\frac{\mathrm{kg}A}{\mathrm{kmol}A} \tag{4.87}$$

Molarne mase C i H su:

$M_r\,(C) = 12{,}011\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$

$M_r\,(H) = 1{,}008\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$

$$AFR_s = \left(\frac{m_A}{m_F}\right)_s = \frac{28{,}85\frac{\mathrm{kg}A}{\mathrm{kmol}A}\,(4{,}76 \cdot a_s)}{a \cdot 12{,}011\frac{\mathrm{kg}C}{\mathrm{kmol}F} + b \cdot 1{,}008\frac{\mathrm{kg}H}{\mathrm{kmol}F}} \tag{4.88}$$

Bezdimenziona veličina odnosa sastava definisanog putem stvarnog AFR i stehiometrijskog sastava smeše definisanog putem AFR_s se označava sa λ i naziva se koeficijent viška vazduha:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_s} \tag{4.89}$$

Recipročna vrednost od λ je ϕ i predstavlja koeficijent viška goriva (eng.: *Equivalence Ratio*):

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \tag{4.90}$$

4.3.2 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formulacije $C_aH_bO_c$

Ukoliko gorivo predstavimo kao $C_aH_bO_c$, stehiometrijska jednačina sagorevanja glasi:

$$C_aH_bO_c + a_s\,(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow n_1CO_2 + n_2H_2O + n_3N_2 \tag{4.91}$$

gde je a_s stehiometrijski molarni odnos vazduha i goriva, a n_1, n_2, n_3 predstavljaju broj molova koji opisuju sastav produkata sagorevanja.

Stehiometrijska jednačina je izražena po molu goriva. Broj atoma u reaktantima i produktima mora da bude jednak, prema tome sledi:

$$\begin{aligned} C: &\quad a = n_1 \\ H: &\quad b = 2n_2 \\ O: &\quad c + 2a_s = 2n_1 + n_2 \\ N: &\quad 2 \cdot 3{,}76 \cdot a_s = 2n_3 \end{aligned} \tag{4.92}$$

Nepoznate veličine se određuju iz jednačina:

$$\begin{aligned} a_s &= a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \\ n_1 &= a \\ n_2 &= \frac{b}{2} \\ n_3 &= 3{,}76\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \end{aligned} \tag{4.93}$$

Stehiometrijski odnos mase vazduha i mase goriva AFR_s može da se odredi iz a_s i molarnih masa vazduha i goriva prema jednačini:

$$AFR_s = \left(\frac{m_A}{m_F}\right)_s = \frac{M_r\left(A\right)\left(4{,}76 \cdot a_s\right)}{a \cdot M_r\left(C\right) + b \cdot M_r\left(H\right) + c \cdot M_r\left(O\right)} \tag{4.94}$$

$$AFR_s = \frac{28{,}85\dfrac{\mathrm{kg}A}{\mathrm{kmol}A}\left(4{,}76 \cdot a_s\right)}{a \cdot 12{,}01\dfrac{\mathrm{kg}C}{\mathrm{kmol}F} + b \cdot 1{,}008\dfrac{\mathrm{kg}H}{\mathrm{kmol}F} + c \cdot 16{,}00\dfrac{\mathrm{kg}O}{\mathrm{kmol}F}} \tag{4.95}$$

4.3.3 Stehiometrijsko sagorevanje goriva opšte hemijske formulacije $C_aH_bO_cN_d$

Ukoliko gorivo predstavimo kao $C_aH_bO_cN_d$, stehiometrijska jednačina sagorevanja glasi:

$$C_aH_bO_cN_d + a_s\left(O_2 + 3{,}76N_2\right) \rightarrow n_1CO_2 + n_2H_2O + n_3N_2 \tag{4.96}$$

gde je a_s stehiometrijski molarni odnos vazduha i goriva, a n_1, n_2, n_3 predstavljaju broj molova koji opisuju sastav produkata sagorevanja.

Stehiometrijska jednačina je izražena po molu goriva. Broj molova u reaktantima i produktima mora da bude jednak, prema tome sledi:

$$\begin{aligned} C: &\quad a = n_1 \\ H: &\quad b = 2n_2 \\ O: &\quad c + 2a_s = 2n_1 + n_2 \\ N: &\quad d + 2 \cdot 3{,}76 \cdot a_s = 2n_3 \end{aligned} \tag{4.97}$$

Nepoznate veličine se određuju iz jednačina:

$$\begin{aligned} a_s &= a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \\ n_1 &= a \\ n_2 &= \frac{b}{2} \\ n_3 &= \frac{d}{2} + 3{,}76\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \end{aligned} \tag{4.98}$$

Stehiometrijski odnos mase vazduha i mase goriva AFR_s može da se odredi iz a_s i molarnih masa vazduha i goriva prema jednačini:

$$AFR_s = \left(\frac{m_A}{m_F}\right)_s = \frac{M_r\left(A\right)\left(4{,}76 \cdot a_s\right)}{a \cdot M_r\left(C\right) + b \cdot M_r\left(H\right) + c \cdot M_r\left(O\right) + d \cdot M_r\left(N\right)} \tag{4.99}$$

$$AFR_s = \frac{28{,}85\dfrac{\mathrm{kg}A}{\mathrm{kmol}A}\left(4{,}76 \cdot a_s\right)}{a \cdot 12{,}01\dfrac{\mathrm{kg}C}{\mathrm{kmol}F} + b \cdot 1{,}008\dfrac{\mathrm{kg}H}{\mathrm{kmol}F} + c \cdot 16{,}00\dfrac{\mathrm{kg}O}{\mathrm{kmol}F} + d \cdot 14{,}01\dfrac{\mathrm{kg}N}{\mathrm{kmol}F}} \tag{4.100}$$

4.3.4 Određivanje mase vazduha za stehiometrijsko sagorevanje normalnog oktana

Zadatak za samostalan rad:

- Na osnovu jednačine 4.99 odrediti potrebnu masu vazduha za stehiometrijsko sagorevanje 1 kg normalnog oktana n-C_8H_{18}.
- Na osnovu dobijenog rezultata i poznatog molarnog sastava vazduha, odrediti ekvivalentnu masu kiseonika potrebnu za stehiometrijsko sagorevanje.
- Dobijeni rezultat uporediti sa rezultatom iz poglavlja 4.2.3.

4.3.5 Primeri stehiometrijskih odnosa za različita goriva

U tabeli su date vrednosti molarnih masa M_r, stehiometrijskih masenih odnosa AFR_s, stehiometrijskih molarnih odnosa a_s, vrednosti molarnih udela r_{CO_2} i r_{H_2O} pri stehiometrijskom sagorevanju i maseni udeo vodene pare g_{H_2O} u produktima sagorevanja pri $T = 298{,}15\,\mathrm{K}$ za različita goriva.

Molarni i maseni udeli goriva u stehiometrijskoj smeši se određuju:

$$r_s = \frac{n_F}{n_F + n_A} = \frac{1}{1 + 4.76 \cdot a_s} \tag{4.101}$$

$$g_s = \frac{m_F}{m_F + m_A} = \frac{1}{1 + AFR_s} \tag{4.102}$$

Gorivo	Hemijska formula	M_r	AFR_s	a_s	r_{CO_2}	r_{H_2O}	g_{H_2O}
Vodonik	H_2	2,02	34,06	0,50	0,000	0,347	0,0061
Metan	CH_4	16,04	17,12	2.00	0,095	0,190	0,1390
Amonijak	NH_3	17,03	6,05	0,75	0,000	0,311	0,0072
Metanol	CH_4O	32,04	6,43	1,50	0,116	0,231	0,1090
Propan	C_3H_8	44,09	15,57	5,00	0,116	0,155	0,1780
Etanol	C_2H_6O	46,07	8,94	3,00	0,123	0,184	0,1450
Nitrometan	CH_3NO_2	61,04	1,69	0,75	0,158	0,237	0,1050
Benzin	C_7H_{17}	101,21	15,27	11,25	0,121	0,147	0,2010
Oktan	C_8H_{18}	114,22	15,03	12,50	0,125	0,141	0,1990
Dizel	$C_{14,4}H_{24,9}$	198,04	14,30	20,63	0,138	0,199	0,2420
Tetradekan	$C_{14}H_{30}$	198,39	14,54	21,50	0,127	0,110	0,2070
Heksadekan (Cetan)	$C_{16}H_{34}$	226,44	14,56	24,50	0,128	0,136	0,2080

Tabela 4.2: Stehiometrijski odnosi za različita goriva.

4.3.6 Određivanje mase vazduha za stehiometrijsko sagorevanje goriva u motoru SUS

- Koja je molarna masa stehiometrijske smeše oktana i vazduha M_{mix} [$^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$]?
- Ukoliko ovakva smeša ispunjava cilindar motora SUS zapremine $V = 9 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^3$ pri pritisku od 100 kPa i temperaturi $T = 300\,\mathrm{K}$, koja je masa smeše u cilindru?

Rešenje

Relativna molarna masa vazduha je $M_a = 28{,}97\,^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$, a molarna masa oktana je $M_{\mathrm{F}} = 114{,}22\,^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$ i stehiometrijski maseni odnos iznosi $AFR_s = 15{,}03$, sledi da je molarni udeo goriva:

$$r_{\mathrm{F}} = \frac{n_{\mathrm{F}}}{n_{\mathrm{F}} + n_A} = \frac{\frac{m_{\mathrm{F}}}{M_{\mathrm{F}}}}{\frac{m_{\mathrm{F}}}{M_{\mathrm{F}}} + \frac{m_A}{M_A}} = \frac{M_A}{M_A + AFR_s \cdot M_{\mathrm{F}}} = 0{,}0166$$

odnosno molarni udeo vazduha:

$$r_A = 1 - r_{\mathrm{F}} = 0{,}9834$$

Kada su poznate molarne mase komponenti smeše i molarni udeli, može da se izračuna molarna masa smeše:

$$M_{mix} = r_A M_A + r_{\mathrm{F}} M_{\mathrm{F}} = 30{,}89\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$$

Masa smeše u cilindru je:

$$m_{mix} = \frac{P \cdot V \cdot M_{mix}}{R_u \cdot T} = \frac{100 \cdot 10^3\,\mathrm{Pa} \cdot 9 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^3 \cdot 30{,}39\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}}{8{,}314\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kmol}} \cdot 300\,\mathrm{K}} = 1{,}097\,\mathrm{g}$$

Za motore koji se koriste u automobilskoj industriji, smeša ima približnu molarnu masu od $30\,{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{mol}}$ i neznatno će se menjati sa promenom udela goriva, zavisno od koeficijenta viška vazduha. Ukupna masa smeše koja staje u cilindar je reda veličine 1 g, ali u načelu, zavisiće od zapremine cilindra i gustine punjenja (izražena kroz osnovne termodinamičke parametre - pritisak i temperatura smeše). Više detalja o ovom zadatku, može se pronaći u [2].

4.4 Maseni udeo i ekvivalentna hemijska formula goriva

Jedna od najvažnijih karakteristika smeše (mešavine) je njen sastav. Sastav smeše se najčešće predstavlja pomoću masenog ili molarnog udela date komponente u smeši.

Ukoliko sa m_i označimo masu date komponente u smeši, ukupna masa smeše m će biti:

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{4.103}$$

Maseni udeo, g_i svake komponente se određuje prema:

$$g_i = \frac{m_i}{m} \tag{4.104}$$

odakle sledi suma masenih udela:

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = 1 \tag{4.105}$$

Ukupan broj molova N, date mešavine je suma molova svih n komponenti:

$$N = \sum_{i=1}^{n} n_i \tag{4.106}$$

Molarni udeo se određuje na osnovu relacije:

$$r_i = \frac{n_i}{N} \tag{4.107}$$

4.4.1 Određivanje masenog udela pojedinačnih komponenata goriva na osnovu hemijske formule goriva

Ukoliko se za dato gorivo atomi C, H, O, N itd. od kojih je gorivo sačinjeno posmatraju kao komponente, moguće je odrediti masene udele na osnovu hemijske formule goriva. Za opštu hemijsku formulaciju $C_aH_bO_cN_d$ važi sledeće:

$$g_C + g_H + g_O + g_N = 1 \tag{4.108}$$

Molarna masa goriva, odnosno masa goriva svedena na jediničnu količinu materije se dobija pomoću opšte jednačine:

$$M_r(F) = a \cdot M_r(C) + b \cdot M_r(H) + c \cdot M_r(O) + d \cdot M_r(N) \tag{4.109}$$

Maseni udeo svake komponente se određuje prema:

$$\begin{aligned} g_C &= \frac{a \cdot M_r(C)}{M_r(F)} \\ g_H &= \frac{b \cdot M_r(H)}{M_r(F)} \\ g_O &= \frac{c \cdot M_r(O)}{M_r(F)} \\ g_N &= \frac{d \cdot M_r(N)}{M_r(F)} \end{aligned} \tag{4.110}$$

Ukoliko je sastav goriva definisan još nekom gradivnom komponentom, kao što je na primer sumpor (S), jasna je analogija za proširenje jednačina 4.108, 4.109 i 4.110.

4.4.2 Određivanje masenih udela gradivnih komponenti različitih goriva

Odrediti masene udele gradivnih komponenti za sledeće goriva:

- Nitrometan hemijske formule CH_3NO_2
- Benzin C_7H_{17}
- Dizel $C_{14,4}H_{24,9}$

4.4.3 Određivanje ekvivalentne hemijske formule smeše goriva na osnovu molarnih udela komponenata

Metod određivanja ekvivalentne hemijske formule biće prikazan na sledećem primeru. Za prirodni gas definisan molarnim udelima r_i prema tabeli 4.3, odrediti ekvivalentnu hemijsku formulu i molarnu masu goriva. Na osnovu vrednosti molarnih masa atoma od kojih je sačinjeno gorivo, i koeficijenata ekvivalentne hemijske formule, odrediti molekularnu masu goriva (realnog prirodnog gasa).

Komponenta	r_i
metan, CH_4	0,9220
etan, C_2H_6	0,0500
propan, C_3H_8	0,0030
n-butan, C_4H_{10}	0,0005
i-butan, C_4H_{10}	0,0005
n-pentan, C_5H_{12}	0,0005
i-pentan, C_5H_{12}	0,0005
azot, N_2	0,0180
ugljen dioksid CO_2	0,0050
Ukupno	**1**

Tabela 4.3: Molarni udeli komponenata u sastavu prirodnog gasa.

Rešenje

Koeficijenti $C_aH_bO_cN_d$ hemijske formulacije (ili neke složenije) se određuju tako što se molarni udeo svake komponente pomnoži sa brojem odgovarajućih atoma svake komponente datog goriva. Sumiranjem dobijenih vrednosti za svaku komponentu mešavine, dobijaju se koeficijenti a, b, c, i d.

Komponenta	r_i	C	H	O	N
Metan, CH_4	0,9220	0,9220	3,6880	-	-
Etan, C_2H_6	0,0500	0,1000	0,3000	-	-
Propan, C_3H_8	0,0030	0,0090	0,0240	-	-
N-butan, C_4H_{10}	0,0005	0,0020	0,0050	-	-
I-butan, C_4H_{10}	0,0005	0,0020	0,0050	-	-
N-pentan, C_5H_{12}	0,0005	0,0025	0,0060	-	-
I-pentan, C_5H_{12}	0,0005	0,0025	0,0060	-	-
Azot, N_2	0,0180	-	-	-	0,0360
Ugljen dioksid CO_2	0,0050	0,0050	-	0,0100	-
Ukupno	**1**	**1,0450**	**4,0340**	**0,0100**	**0,0360**

Tabela 4.4: Molarni udeli komponenata i ekvivalentni broj atoma pojedinih hemijskih elemenata opštoj hemijskoj formuli prirodnog gasa.

Uzimajući vrednosti koeficijenata iz tabele 4.4, ekvivalentna hemijska formula ima oblik:

$$C_{1,045}H_{4,034}O_{0,01}N_{0,036}$$

4.4.4 Zadatak: Određivanje ekvivalentne hemijske formule za različite smeše goriva

Za mešavinu goriva definisanu zapreminskim odnosima, odrediti ekvivalentnu hemijsku formulu i relativnu molekularnu masu takve smeše. Podaci su dati u tabeli 4.5. Komponente mešavine posmatrati kao idealan gas.

Komponenta	mešavina #1	mešavina #2	mešavina #3
	[%vol]	[%vol]	[%vol]
Propan, C_3H_8	40	50	45
Butan, C_4H_{10}	60	30	20
Pentan, C_5H_{12}	0	20	30
Oktan, C_8H_{18}	0	0	5

Tabela 4.5: Zapreminski udeli komponenata u mešavinama ugljovodonika.

4.4.5 Određivanje potrebne količine vazduha sa sagorevanje na osnovu masenih udela komponenti u gorivu

Odrediti potrebnu količinu vazduha za stehiometrijsko sagorevanje goriva koje je određeno masenim udelima komponenata:

$$g_C = 86{,}18\%$$
$$g_H = 13{,}76\%$$
$$g_O = 0{,}06\%$$
$$g_S = 3\,ppm \tag{4.111}$$

Da bismo izvršili sagorevanje $1\,\mathrm{kg}C$ (ugljenika) neophodno nam je $2{,}664\,\mathrm{kg}O_2$ prema jednačini 4.11. Za sagorevanje $1\,\mathrm{kg}H$ potrebno je $7{,}93\,\mathrm{kg}O_2$ prema jednačini 4.33. Za sagorevanje $1\,\mathrm{kg}S$ neophodna količina kiseonika će biti određena u nastavku.

Hemijska jednačina reakcije:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + Q_C \tag{4.112}$$

gde je Q_C količina toplote koja se oslobađa oksidacijom. Sledi:

$$1\,\mathrm{kmol}S + 1\,\mathrm{kmol}O_2 \rightarrow 1\,\mathrm{kmol}SO_2 + Q_C \tag{4.113}$$

Uzimajući u obzir molarne mase:
$M_r\,(O) = 15{,}999\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
$M_r\,(S) = 32{,}065\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{kmol}}$
dobija se:

$$1 \cdot 32{,}065\,\mathrm{kg}S + 1 \cdot 31{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 64{,}063\,\mathrm{kg}SO_2 + Q_C \tag{4.114}$$

Svođenjem prethodne jednačine na jediničnu masu S, dobija se:

$$1\,\mathrm{kg}S + 0{,}998\,\mathrm{kg}O_2 \rightarrow 1{,}998\,\mathrm{kg}SO_2 + 9230{,}96\,{}^{\mathrm{kJ}}/_{\mathrm{kgS}} \tag{4.115}$$

što ukazuje da je za sagorevanje $1\,\mathrm{kg}S$ neophodno $0{,}998\,\mathrm{kg}O_2$.

Za jediničnu masu goriva definisanog na način iz 4.111 potrebna je sledeća masa kiseonika:

$$\frac{m_{O_2}}{m_F} = 2{,}664 \cdot g_C + 7{,}93 \cdot g_H + 0{,}998 \cdot g_S - g_O \tag{4.116}$$

Na početku poglavlja br. 4 navedeno je da, za vazduh koji je sačinjen od zapreminskih odnosa $79\%\,N_2$ i $21\%\,O_2$, $1\,\mathrm{mol}O_2$ odgovara $3{,}76\,\mathrm{mol}N_2$. Kada se uvrste molarne mase $M_r\,(N_2)$ i $M_r\,(O_2)$ dobija se da $1\,\mathrm{kg}O_2$ odgovara masa $4{,}292\,\mathrm{kg}A$, odnosno da je maseni udeo kiseonika u vazduhu 23,3%, tj. $m_{O_2} = m_A \cdot 0{,}233$. Uvrštavanjem ovog odnosa u jednačinu 4.116, dobija se masa vazduha neophodna za sagorevanje određene mase goriva:

$$m_A = \frac{m_F \cdot (2{,}664 \cdot g_C + 7{,}93 \cdot g_H + 0{,}998 \cdot g_S - g_O)}{0{,}233} \tag{4.117}$$

Kada se zamene vrednosti masenih udela kojima je definisan sastav goriva, dobija se stehiometrijska masa vazduha potrebna za sagorevanje jedinične mase goriva $L_0 = 14{,}534\,{}^{\mathrm{kgA}}/_{\mathrm{kgF}}$.

4.5 Toplotna moć goriva

Toplotna moć goriva predstavlja količinu toplote koja bi se oslobodila pri potpunom sagorevanju date jedinične količine goriva (obično ima jedinicu ${}^{MJ}/_{kg}$ ili ${}^{kJ}/_{kg}$ za čvrsta i tečna goriva i ${}^{MJ}/_{m^3}$ ili ${}^{kJ}/_{m^3}$ za gasovita goriva). Preračunavanje zapreminske na masenu toplotnu moć dato je jednačinom:

$$H\left[\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}\right] = \frac{H\left[\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{m^3}}\right]}{\rho\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}\right]} \tag{4.118}$$

gde je sa ρ označena gustina goriva.

S obzirom na uslove pri kojima se proces sagorevanja odvija, razlikuju se:

- Toplotna moć pri konstantnom pritisku i
- Toplotna moć pri konstantnoj zapremini.

U odnosu na toplotni nivo produkata sagorevanja nastalih prilikom određivanja toplotne moći razlikuju se:

- Gornja toplotna moć H_g i
- Donja toplotna moć H_d.

Gornja toplotna moć H_g, je količina toplote koja se dobije potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva pod sledećim uslovima:

- Ugljenik i sumpor iz gorive materije nalaze se u obliku svojih dioksida u gasovitom stanju, dok do sagorevanja azota nije došlo;
- Produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koje je imalo gorivo na početku procesa sagorevanja $T = 293{,}15\,\mathrm{K}$ $(20°C)$;
- Voda koja u produktima sagorevanja potiče od vlage iz goriva i od sagorelog vodonika, prevedena u je u tečno stanje (kondenzovana je), što je uslovljeno prethodnom stavkom, odnosno temperatura produkata sagorevanja je dovedena na temperaturu od $T = 293{,}15\,\mathrm{K}$;

- Svi produkti sagorevanja nalaze se na pritisku standardne atmosfere (10^5 Pa).

Donja toplotna moć H_d, predstavlja količinu toplote koja se oslobodi potpunim sagorevanjem jedinične mase goriva pod sledećim uslovima:

- Ugljenik i sumpor iz goriva se nalaze u obliku svojih dioksida (CO_2, SO_2), dok do sagorevanja azota ne dolazi;
- Produkti sagorevanja dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na ulazu u proces $T = 293{,}15$ K;
- Voda koja u produktima sagorevanja potiče od vlage iz goriva i od sagorelog vodonika ostaje u parnom stanju, tj. ne uzima se u obzir količina toplote koja bi se oslobodila kondenzacijom vodene pare;
- Svi produkti sagorevanja nalaze se na pritisku standardne atmosfere (10^5 Pa).

Za slučaj sagorevanja smeše goriva, toplotna moć smeše se računa iz sume proizvoda masenog udela (g_i) i odgovarajuće toplotne moći (H_i) odgovarajuće komponente prema jednačini 4.119.

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} g_i \cdot H_i \tag{4.119}$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} g_i = 1 \tag{4.120}$$

Pri sagorevanju tečnog goriva zajedno sa gasovitim gorivom, toplotna moć smeše goriva se određuje za 1 kg tečnog goriva uz dodatak ekvivalentan masi 1 m^3 gasovitog goriva prema jednačini 4.121:

$$H = H_1 + V \cdot H_2 \tag{4.121}$$

gde je H_1 toplotna moć tečnog goriva, H_2 toplotna moć gasovitog goriva i V zapremina gasovitog goriva koja se dovodi po jednom kilogramu tečnog goriva $^{m^3}/_{kg}$.

Toplotna moć smeše goriva i vazduha je izračunata pomoću jednačine:

$$H_S = \frac{H}{1 + L} \tag{4.122}$$

gde je L masa vazduha koja učestvuje u sagorevanju jedinične mase goriva.

Opšta veza između donje i gornje toplotne moći je data jednačinom 4.123:

$$H_d \left[^{kJ}/_{kg}\right] = H_g - 2450 \cdot (9g_H + g_W) \tag{4.123}$$

gde je:

- g_H - maseni udeo vodonika u gorivu,

- g_W - maseni udeo vlage u gorivu,
- $9g_H$ - maseni udeo vode nastao sagorevanjem masenog udela (g_H) vodonika iz goriva,
- 2450 - toplota isparavanja vode (za isparavanje 1 kg vode sa 20 °C na atmosferskom pritisku potrebno je 2450 kJ).

U tabelama 4.6 i 4.7 prikazane su vrednosti donje i gornje toplotne moći za različite čiste ugljovodonike i okvirne vrednosti za najzastupljenija komercijalna goriva.

Gorivo	Oznaka	Toplotna moć ($^{MJ}/_{kg}$)			
		H_g		H_d	
		$[^{MJ}/_{kg}]$	$[^{MJ}/_{m^3}]$	$[^{MJ}/_{kg}]$	$[^{MJ}/_{m^3}]$
metan	CH_4	55,52	39,82	50,03	35,88
acetilen	C_2H_2	49,91	58,66	48,23	56,65
etilen	C_2H_4	50,28	63,43	47,19	59,45
etan	C_2H_6	51,87	70,34	47,48	64,39
propilen	C_3H_6	48,90	94,79	46,80	88,72
propan	C_3H_8	50,37	100,99	46,35	92,99
butilen	C_4H_8	48,44	123,55	45,30	115,56
n-butan	C_4H_{10}	49,29	133,85	45,57	123,59
benzol	C_6H_6	42,29	150,10	40,57	144,07

Tabela 4.6: Vrednosti toplotne moći izabranih čistih ugljovodonika.

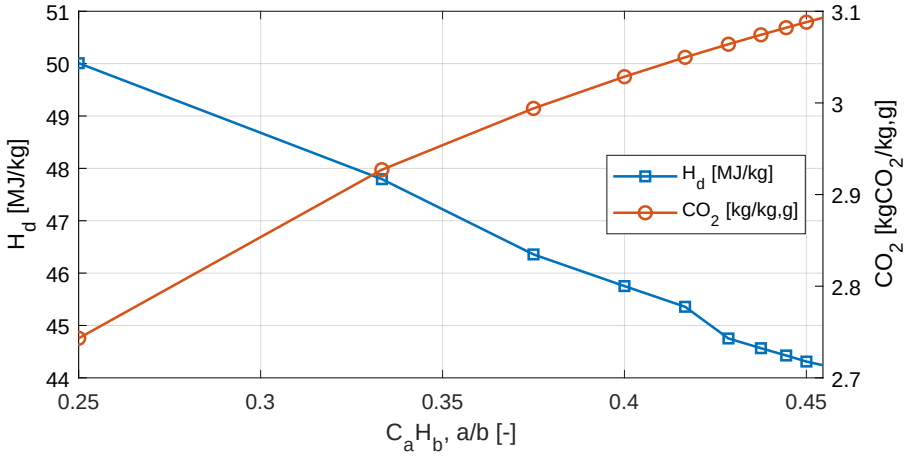
Gorivo	Toplotna moć $[^{MJ}/_{kg}]$	
	H_g	H_d
Benzin (srednja vrednost)	46,05	42,7
Dizel (srednja vrednost)	44,7	41,8
Lož ulje	$42{,}3 \cdots 44{,}8$	$39{,}8 \cdots 42{,}7$

Tabela 4.7: Orijentacione vrednosti toplotne moći goriva.

4.5.1 Poređenje donje toplotne moći i emisije CO_2 za ugljovodonike iz reda alkana

Formirati dijagram za prvih deset alkana (od CH_4 do $C_{10}H_{22}$), alkena (do $C_{10}H_{20}$) i alkina (do $C_{10}H_{18}$) koji će na x-osi imati odnos broja atoma C/H, i dve y-ose na kojima će biti prikazana vrednost donje toplotne moći i masa emitovanog CO_2 koja bi odgovarala stehiometrijskom sagorevanju $1\,kg$ svakog od goriva.

Za iscrtavanje dijagrama sa dve y-ose koristiti funkcije `yyaxis right` i `yyaxis left`.



Slika 4.2: Donja toplotna moć alkana i emisija CO_2 pri njihovom potpunom sagorevanju.

Program 4.1: `CmHn.m`

```
% Dijagram LHV(C/H), CO2(C/H)
clear
close all
clc

% Parafinski ugljovodonici /alkani/ [CmHn]
% Vrednost donje toplotne moći za prvih 10 alkana (od metana do dekana)
LHV = [50.009, 47.794, 46.357, 45.752, 45.357,...
    44.752, 44.566, 44.427, 44.311, 44.240]'; %[MJ/kg]
% Undecane =44.194;
% Dodecane =44.147;

% CO2
% Opsta formula za reakciju potpunog sagorevanja alkana
% CmH2n+2 + ((3m + 1)/2) O2 -> m CO2  + (m+1) H2O

m = zeros(10,1);
n = zeros(10,1);
CH = zeros(10,1);
for i=1:10
    m(i)=i;
    n(i)=2.*i+2;
    CH(i)=m(i)/n(i);
    A(i)=m(i)*12.011+(2*m(i)+2)*1.008;
    B(i)=(((3*m(i) + 1)/2)*2*15.999)/A(i);
    C(i)=(m(i)*(12.011+2*15.999))/A(i);
    D(i)=((m(i)+1)*(2*1.008+15.999))/A(i);
end
```

```
F8 = figure(8);
F8.WindowStyle = 'normal';

yyaxis left
plot(CH, LHV,'-s','LineWidth',1.2);
xlabel('C_aH_b, a/b [-]');
xlim([min(CH) max(CH)]);
ylabel('H_d [MJ/kg]');
grid on
hold on
yyaxis right
plot(CH,C,'-o','LineWidth',1.2);
xlim([min(CH) max(CH)]);
ylabel('CO_2 [kgCO_2/kg,g]');
legend('H_d [MJ/kg]','CO_2 [kg/kg,g]','Location','east');
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color = 'k';
ax.YAxis(2).Color = 'k';

set(F8,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])
set(F8,'Units','Inches')
pos = get(F8,'Position')
set(F8,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])

print(F8,'F8','-r300','-dtiffn')
print(F8,'F8','-dmeta')
print(F8,'F8','-dpdf','-r0')
```

4.5.2 Određivanja gornje i donje toplotne moći za zadati maseni sastav goriva

U literaturi, maseni udeo može biti izražen procentualno, odnosno može imati jedinicu $[\%_{\mathrm{m}}/_{\mathrm{m}}]$ gde m predstavlja jediničnu masu. Ukoliko određene komponente imaju veoma mali maseni udeo u datom gorivu, često se zanemaruje njihovo učešće u ukupnoj sumi masenih udela i važi $g_C + g_H + g_O = 1$. Komponente kojih ima u malim količinama su obično azot, voda i sumpor i njihov udeo se iskazuje u $^{\mathrm{mg}}/_{\mathrm{kg}}$, odnosno u *ppm* (eng. *parts per million*). U literaturi se mogu pronaći informacije o toplotnoj moći određenih čistih supstanci [28]. Skraćenice za gornju toplotnu moć HHV i donju toplotnu moć LHV potiču iz engleskog jezika: *Higher Heating Value* i *Lower Heating Value*.

U nastavku su date empirijske relacije za određivanje gornje i donje toplotne moći goriva na osnovu masenih udela prema različitim literaturnim izvorima:

- $H_{d,1}$ prema [29]:

$$H_{d,1}\,[\mathrm{kJ/kg}] = 100 \cdot (350 \cdot g_C + 940 \cdot g_H + 63 \cdot g_N + 100 \cdot g_S - 100 \cdot g_O - 25 \cdot g_W) \tag{4.124}$$

- $H_{g,2}$ i $H_{d,2}$ prema [30]:

$$H_{g,2}\,[\mathrm{kJ/kg}] = 35160 \cdot g_C + 116225 \cdot g_H - 11090 \cdot g_O + 6280 \cdot g_N + 10465 \cdot g_S \tag{4.125}$$

$$H_{d,2} = H_{g,2} - Q_{H_2O} \tag{4.126}$$

$$H_{d,2}\,[\mathrm{kJ/kg}] = H_{g,2} - 2500 \cdot (9 \cdot g_H + g_W) \tag{4.127}$$

- $H_{g,3}$ i $H_{d,3}$ prema [31]:

$$H_{g,3}\,[\mathrm{kJ/kg}] = 100 \cdot (351{,}7 \cdot g_C + 1162{,}6 \cdot g_H + 104{,}7 \cdot g_S - 111 \cdot g_O) \tag{4.128}$$

$$H_{d,3} = H_{g,3} - Q_{H_2O} \tag{4.129}$$

$$H_{d,3}\,[\mathrm{kJ/kg}] = H_{g,3} - 2500 \cdot (9 \cdot g_H + g_W) \tag{4.130}$$

Za izraz 4.130 prema Boieu (*Boie*) postoje korekcije za udeo vode u sastavu goriva:

- Korekcija br. 1 za prisustvo vode u gorivu prema [32]:

$$H_{d,3corr1}\,[kJ/kg] = H_{g,3} - 21960 \cdot g_H \tag{4.131}$$

- Korekcija br. 2 H_2O za prisustvo vode u gorivu prema [33]:

$$H_{d,3corr2}\,[\mathrm{kJ/kg}] = H_{g,3} - -21960 \cdot g_H - 2450 \cdot g_W - 8 \cdot g_O \tag{4.132}$$

- Korekcija br. 3 za prisustvo vode u gorivu prema [34]:

$$H_{d,3corr3}\,[\mathrm{kJ/kg}] = H_{g,3} - 2453{,}93 \cdot (9 \cdot g_H - g_W) \tag{4.133}$$

4.5.3 Određivanje donje i gornje toplotne moći goriva na osnovu masenih udela

Za gorivo definisano masenim udelima prema tabeli 4.8 odrediti vrednosti donje i gornje toplotne moći prema jednačinama od 4.124 do 4.133. Odrediti srednju vrednost donje i gornje toplotne moći i analizirati relativna odstupanja dobijenih rezultata koristeći sve prethodno navedene metode proračuna.

Primer stvarnih masenih udela za ispitivani benzin je dat u sledećoj tabeli.

Maseni udeo	[%], [ppm]	[−]	
g_C	86,18 %	0,8618	
g_H	13,76 %	0,1376	
g_O	0,06 %	0,0006	$\Sigma = 1$
g_N	1 ppm	0,000001	
g_W	52 ppm	0,000052	
g_S	1 ppm	0,000003	$\Sigma = 1{,}000056$

Tabela 4.8: Maseni udeli za ispitivani benzin.

Na primer, prema jednačini 4.124, proračun donje toplotne moći prema [30] izgleda:

$$\begin{aligned} H_{d,1}\,[\mathrm{kJ/kg}] &= 100 \cdot (350 \cdot g_C + 940 \cdot g_H + 63 \cdot g_N + 100 \cdot g_S - 100 \cdot g_O - 25 \cdot g_W) \\ &= 43091{,}31\ \mathrm{kJ/kg} \end{aligned} \tag{4.134}$$

4.6 Niskotemperaturski model sagorevanja

Za temperature niže od 1000 K i za odnos broja atoma reaktanata C i O manji od 1 (neće se formirati čist C u produktima) i za bilo koji sastav smeše važi relacija:

$$\begin{aligned} &C_a H_b O_c N_d + \lambda \cdot a_s\,(O_2 + 3{,}76 N_2) \rightarrow \\ &\qquad \rightarrow n_1 CO_2 + n_2 H_2O + n_3 N_2 + n_4 O_2 + n_5 CO + n_6 H_2 \end{aligned} \tag{4.135}$$

Podrazumeva se da do disocijacije reaktanata ne dolazi.

Za siromašnu smešu $\lambda > 1$, i sagorevanje u uslovima niske temperature, podrazumeva se da ne dolazi do formiranja CO i H_2 u produktima sagorevanja, odnosno koeficijenti $n_5 = 0$ i $n_6 = 0$. Ovaj sistem ima četiri nepoznate n_1, n_2, n_3, n_4 i ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned} n_1 &= a \\ n_2 &= \frac{b}{2} \\ n_3 &= \frac{d}{2} + \lambda \cdot a_s \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} \\ n_4 &= a_s \cdot (\lambda - 1) \end{aligned} \tag{4.136}$$

Za bogatu i stehiometrijsku smešu ($\lambda \leq 1$) podrazumeva se da nema molekularnog kiseonika u produktima sagorevanja, odnosno da je broj molova O_2 u produktima

jednaka nuli ($n_4 = 0$). U ovom sistemu postoji pet nepoznatih n_1, n_2, n_3, n_5, i n_6, a moguće je postavite samo četiri jednačine po prethodnom principu, i imaju oblik:

$$\begin{aligned} n_1 + n_5 &= a \\ n_2 + n_6 &= \frac{b}{2} \\ 2 \cdot n_1 + n_2 + n_5 &= c + 2 \cdot \lambda \cdot a_s \\ 2 \cdot n_3 &= d + 2 \cdot \lambda \cdot a_s \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} \end{aligned} \tag{4.137}$$

Peta jednačina je jednačina stanja ravnoteže voda-gas:

$$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O \tag{4.138}$$

Empirijska funkcionalna zavisnost $K(T)$ predstavlja odnos molova reaktanata i produkata u jednačini 4.138:

$$\begin{aligned} K(T) &= \frac{[H_2O]\,[CO]}{[CO_2]\,[H_2]} \\ K(T) &= \frac{n_2 n_5}{n_1 n_6} \end{aligned} \tag{4.139}$$

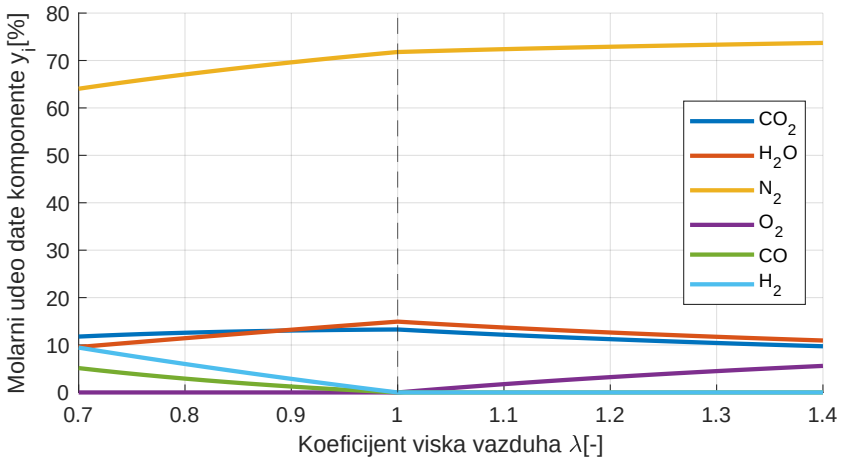
i služi za kompletno postavljanje sistema jednačina 4.137 i ima oblik:

$$\ln K(T) = 2{,}743 - \frac{1{,}761}{t} - \frac{1{,}611}{t^2} - \frac{0{,}2803}{t^3} \tag{4.140}$$

pri čemu je $t = \dfrac{T}{1000} \;\mid\; T < 1000\,\mathrm{K}$.

Za rešavanje ovakvog sistema jednačina koristiti Matlab funkciju `fsolve`.

Na slici 4.3 prikazana je promena molarnog udela datih komponenti u funkciji sastava smeše za gorivo hemijskog sastava $CH_{2,25}O_{0,25}$.



Slika 4.3: Sastav produkata sagorevanja u funkciji sastava smeše za niskotemperaturski model sagorevanja i gorivo sastava $CH_{2,25}O_{0,25}$.

U nastavku je prikazan program `sastav_CHON_s.m` (4.2). Unutar ovog programa, na kraju, kao sastavni deo nalaze se funkcije `rich_fun_CHON` i `lean_fun_CHON` unutar kojih su formirani sistemi jednačina koji važe za različite opsege sastava smeše. Na ovaj način mogu da se koriste funkcije unutar Matlab programskog okruženja a da prethodno ne budu sačuvane kao zasebne m-datoteke (eng.: *m-file*).

Program 4.2: `sastav_CHON_s.m`

```
% Odredjivanje molarnih udela produkata sagorevanja
% T < 1000K
% C/O < 1
% Model CHON

% Odredjivanje sastava produkata sagorevanja na bazi pet komponenti
% Resavanje sistema 5 jednacina sa 5 nepoznatih

clear
close all
clc

a = 8;  % C
b = 18; % H
c = 2;  % O
d = 0;  % N
lambda = 0.7:0.02:1.4;
T = 900; % za T < 1000

t = T/1000;
KT = exp(2.743 - (1.761./t)-(1.611./t.^2)+(0.2803./t.^3));

as = a + b/4 - c/2;
options = optimset('TolFun',1e-8,'TolX',1e-8);   % Option to display output
```

```
% početni uslovi moraju da se prilagode datom gorivu
m0 = [0.5;2;7;0;0.5;0.5];
n0 = [0.5;2;7;0.5;0;0]; % uslov za siromasnu smešu

for i = 1 : length(lambda)
    if lambda(i) < 1
        clear m
        [m] = fsolve(@(m)rich_fun_CHON(m,a,b,c,d,lambda(i),as,KT),m0,options);
    else
        clear m
        [m] = fsolve(@(n)lean_fun_CHON(n,a,b,d,lambda(i),as),n0,options);
    end
con(:,i) = m;
clear m
end

con_sum=sum(con,1)
clear i j

for i = 1:size(con,1)
    for j = 1:size(con,2)
        conV(i,j) = con(i,j)*100/con_sum(j)
    end
end
V_sum=sum(conV,1);

F9 = figure(9)
F9.WindowStyle = 'normal'
hold on
plot(lambda,conV(1,:),'linewidth',2)
plot(lambda,conV(2,:),'linewidth',2)
plot(lambda,conV(3,:),'linewidth',2)
plot(lambda,conV(4,:),'linewidth',2)
plot(lambda,conV(5,:),'linewidth',2)
plot(lambda,conV(6,:),'linewidth',2)
hold off
xline(1,'--')
legend({'CO_2','H_2O','N_2','O_2','CO','H_2'},'Location','east')
xlabel('Koeficijent viska vazduha \lambda[-]')
ylabel('Molarni udeo date komponente y_i[%]')
grid on

set(F9,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])

set(F9,'Units','Inches')
pos = get(F9,'Position')
set(F9,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F9,'F9','-r300','-dtiffn')
print(F9,'F9','-dmeta')
print(F9,'F9','-dpdf','-r0')
```

```
function F = rich_fun_CHON(m,a,b,c,d,lambda,as,KT)
F(1) = m(1) + m(5) -a;
F(2) = m(2) + m(6) - b./2;
F(3) = 2.*m(1)+ m(2) + m(5) - c - 2.*lambda.*as;
F(4) = 2.*m(3) - d - 2.*lambda.*as.*(0.79./0.21);
F(5) = (m(2).*m(5))./(m(1).*m(6)) - KT;
F(6) = m(4);
end

function F = lean_fun_CHON(n,a,b,d,lambda,as)
F(1) = n(1) - a;
F(2) = n(2) - b./2;
F(3) = n(3) - d./2 - lambda.*(as).*(0.79/0.21);
F(4) = n(4) - as.*(lambda - 1);
F(5) = n(5);
F(6) = n(6);
end
```

5 Računski zadaci - proračun brizgača

5.1 Efektivni parametri motora i karakteristika brizgača

Karakteristika brizgača K_b je standardizovana veličina i određuje se merenjem zapremine čistog oktana koji protekne kroz brizgač pri kontinualnom ubrizgavanju, svedena na jedinicu vremena, odnosno ima veličinu zapreminskog protoka, uglavnom izraženu u $[^{cm^3}/_{min}]$. Preduslov za proces ubrizgavanja je postojanje razlike pritisaka pre i posle brizgača, odnosno u magistrali goriva i sredini u koju se gorivo ubrizgava. Prilikom određivanja protočne karakteristike brizgača, neophodno je definisati razliku pritisaka, odnosno pritisak u magistrali goriva ukoliko se ubrizgavanje vrši u slobodnu atmosferu. Kada se prelazi na realne (radne) uslove, mora se izvršiti korekcija za korišćeno gorivo i za razliku pritisaka pre i posle brizgača, ukoliko postoje razlike u odnosu na uslove pri kojima je K_b definisan. Veza između protočne karakteristike brizgača K_b, vremena ubrizgavanja Δt_{inj} i ubrizgane zapremine goriva b_c, ukoliko se zanemari uticaj prelaznih pojava tokom otvaranja i zatvaranja brizgača je:

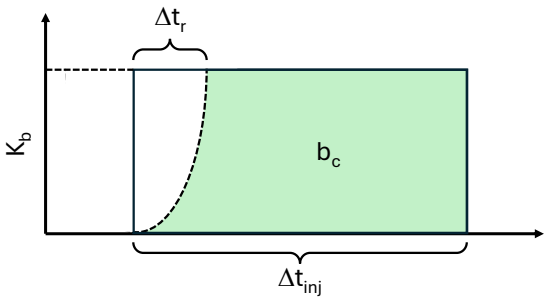
$$b_c = \Delta t_{inj} \cdot K_b \tag{5.1}$$

Zadaci i eksperimenti određivanja protočne karakteristike brizgača, koji će u nastavku biti prikazani, važe za visokoomske benzinske brizgače, odnosno brizgače za indirektno ubrizgavanje benzina. Ova vrsta brizgača zahteva relativno jednostavan način upravljanja i relativno niske natpritiske u sistemu za dopremanje goriva. Iz tih razloga, pogodni su za demonstracije rada sa brizgačima. U prvom približenju, ukoliko se u razmatranje uzmu prelazne pojave tokom otvaranja i zatvaranja brizgača, može se usvojiti da:

- Vreme potrebno da se brizgač otvori u potpunosti traje određeno vreme, da se to vreme naziva *vreme rampe* i da se tokom tog vremena ubrizga 33% goriva koje bi bilo ubrizgano da se brizgač momentalno otvara;
- Vreme zatvaranja brizgača se posmatra kao trenutno.

Na slici 5.1 označene su površine koje bi odgovarale ubrizganoj zapremini goriva tokom ubrizgavanja za impuls trajanja Δt_{inj} i protočnu karakteristiku K_b za slučaj trenutnog otvaranja i zatvaranja brizgača i za slučaj prvog približenja koje uzima u obzir vreme rampe t_r i za koje važi:

$$b_c = K_b \cdot (\Delta t_{inj} - 0.67 \cdot t_r) \tag{5.2}$$



Slika 5.1: Grafička interpretacija protočne karakteristike brizgača, vremena ubrizgavanja i vremena rampe.

U slučaju izražavanja karakteristike brizgača i ciklusne količine goriva u masenim jedinicama, neophodno je uzeti u obzir gustinu goriva i tada važi:

$$K_m = K_b \cdot \rho_F \tag{5.3}$$

$$m_c = b_c \cdot \rho_F \tag{5.4}$$

$$m_c = K_m \cdot (\Delta t_{inj} - 0{,}67 \cdot t_r) \tag{5.5}$$

Kroz narednih nekoliko zadataka biće prikazano teorijsko određivanje karakteristike brizgača na osnovu efektivnih parametara rada motora.

5.1.1 Određivanje trajanja radnog ciklusa motora

Za benzinski motor date su sledeće tehničke karakteristike:

Broj cilindara:	$z = 4$
Taktnost:	$\tau = 4$
Prečnik klipa:	$D = 80{,}5\,\mathrm{mm}$
Hod klipa:	$s = 67{,}4\,\mathrm{mm}$
Nominalni broj obrtaja:	$n_{nom} = 6000\,\mathrm{min}^{-1}$
Broj obrtaja na praznom hodu:	$n_{idle} = 800\,\mathrm{min}^{-1}$
Ugao otvaranja usisnog ventila (pre SMT):	$\alpha_1 = 5°KV$ pre SMT
Ugao zatvaranja usisnog ventila (posle UMT):	$\alpha_2 = 37°KV$ posle UMT

Odrediti:

1. Minimalno i maksimalno vreme trajanja ciklusa motora;
2. Minimalno i maksimalno vreme trajanja procesa usisavanja.

Pritisak spoljne sredine je $p_0 = 1\,\mathrm{bar}$, a temperatura je $t_0 = 25°\mathrm{C}$. Zanemariti strujne gubitke i efekat zagrevanja svežeg punjenja u usisnom kolektoru motora.

Rešenje:

1. Određivanje minimalnog i maksimalnog vremena trajanja ciklusa motora:

   Broj radnih ciklusa motora u jedinici vremena:

$$n_{c_nom} = \frac{2 \cdot n}{\tau} = \frac{2 \cdot 6000\,\mathrm{min}^{-1}}{4} = 3000\,\mathrm{min}^{-1} \tag{5.6}$$

$$n_{c_idle} = \frac{2 \cdot n}{\tau} = \frac{2 \cdot 800\,\mathrm{min}^{-1}}{4} = 400\,\mathrm{min}^{-1} \tag{5.7}$$

   Određivanje vremena trajanja jednog radnog ciklusa:

$$\Delta t_{c_nom} = \frac{1}{n_{c_nom}} = \frac{1}{3000\,\mathrm{min}^{-1}} = 0{,}02\,\mathrm{s} = 20\,\mathrm{ms} \tag{5.8}$$

$$\Delta t_{c_idle} = \frac{1}{n_{c_idle}} = \frac{1}{400\,\mathrm{min}^{-1}} = 0{,}15\,\mathrm{s} = 150\,\mathrm{ms} \tag{5.9}$$

2. Određivanje maksimalnog i minimalnog vremena trajanja procesa usisavanja motora:

   Određivanje ukupnog trajanja usisavanja u ugaonom domenu:

$$\Delta\alpha_{US} = \alpha_1 + 180°KV + \alpha_2 = (5 + 180 + 37)\,°KV = 222°KV \tag{5.10}$$

   Određivanje vremena trajanja procesa usisavanja na nominalnom režimu i režimu praznog hoda:

$$\Delta t_{US_nom} = t_{c_nom} \cdot \frac{\alpha_{US}}{720°KV} = 20\,\text{ms} \cdot \frac{222°KV}{720°KV} = 6{,}17\,\text{ms} \tag{5.11}$$

$$\Delta t_{US_idle} = t_{c_idle} \cdot \frac{\alpha_{US}}{720°KV} = 150\,\text{ms} \cdot \frac{222°KV}{720°KV} = 46{,}25\,\text{ms} \tag{5.12}$$

5.1.2 Određivanje zapreminskog i masenog protoka vazduha

Za motor i podatke definisane u zadatku 5.1.1, odrediti:

1. Zapreminski i maseni protok vazduha kroz motor zanemarujući realne vrednosti koeficijenta punjenja motora;
2. Realni maseni protok vazduha ako je koeficijent punjenja $\eta_v = 0{,}83$;
3. Odgovarajući maseni protok goriva, ako je smeša na nominalnom režimu definisana sa koeficijentom viška vazduha $\lambda = 1$;
4. Ciklusnu količinu goriva u masenim i zapreminskim jedinicama.

Gustina goriva iznosi: $\rho_F = 752\,\text{kg/m}^3$. Stehiometrijska masa vazduha je: $L_0 = 14{,}7\,\text{kg}_\text{A}/\text{kg}_\text{F}$.

Rešenje

1. Određivanje radne zapremine jednog cilindra:

$$V_{h1} = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot s = \frac{(80{,}5\,\text{mm})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 67{,}4\,\text{mm} = 342{,}86\,\text{cm}^3 \tag{5.13}$$

Određivanje ukupne radne zapremine motora:

$$V_h = V_{h1} \cdot z = 342{,}86\,\text{cm}^3 \cdot 4 = 1372\,\text{cm}^3 \tag{5.14}$$

Pri određivanju približne vrednosti zapreminskog i masenog protoka vazduha kroz motor, zanemaruju se strujni gubici u usisnom sistemu i realne vrednosti pritiska i temperature u usisnom kolektoru.

Broj radnih ciklusa motora u jedinici vremena:

$$n_{c_nom} = \frac{2 \cdot n}{\tau} = \frac{2 \cdot 6000\,\text{min}^{-1}}{4} = 3000\,\text{min}^{-1} \tag{5.15}$$

Procena zapreminskog protoka:

$$Q_{A_th} = n_c \cdot V_h = 3000\,\text{min}^{-1} \cdot 1372\,\text{cm}^3 = 4116\,\text{l/min} = 0{,}0686\,\text{m}^3/\text{s} \tag{5.16}$$

Procena masenog protoka vazduha:

$$G_{A_th} = Q_{A_th} \cdot \rho_A = Q_{A_th} \cdot \frac{p_0}{R \cdot T_0}$$
$$= 0{,}0686\,{}^{\mathrm{m}^3}\!/_{\mathrm{s}} \cdot \frac{10^5\,\mathrm{Pa}}{287\,{}^{\mathrm{J}}\!/_{\mathrm{kgK}} \cdot (273+25)\,\mathrm{K}}$$
$$= 0{,}08021\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}} \approx 289\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{h}} \tag{5.17}$$

2. Određivanje realnog masenog protoka vazduha:

$$G_A = G_{A_th} \cdot \eta_v = 0{,}08021\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}} \cdot 0{,}83 = 0{,}06657\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}} \approx 240\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{h}}$$

3. Određivanje masenog protoka goriva iz opšteg izraza za koeficijent viška vazduha:

$$\lambda = \frac{m_{A_stv}}{m_{A_steh}} = \frac{m_{A_stv}}{m_F \cdot L_0} = \frac{G_A}{G_F \cdot L_0} \tag{5.18}$$

$$G_F = \frac{G_A}{\lambda \cdot L_0} = \frac{0{,}06657\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}}}{1 \cdot 14{,}7\,{}^{\mathrm{kg_A}}\!/_{\mathrm{kg_F}}} = 0{,}004528\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}} \approx 16{,}3\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{h}} \tag{5.19}$$

4. Određivanje ciklusne količine goriva u masenim i zapreminskim jedinicama ciklusna količina goriva u masenim jedinicama:

$$m_c = \frac{G_F}{n_c \cdot z} = \frac{0{,}004528\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{s}}}{3000\,{}^{\mathrm{cikl}}\!/_{\mathrm{min}} \cdot 4} = 2{,}264 \cdot 10^{-5}\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{cikl}} \tag{5.20}$$

Ciklusna količina goriva u zapreminskim jedinicama:

$$b_c = \frac{m_c}{\rho_F} = \frac{2{,}264 \cdot 10^{-5}\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{cikl}}}{752\,{}^{\mathrm{kg}}\!/_{\mathrm{m}^3}} = 30{,}187\,{}^{\mathrm{mm}^3}\!/_{\mathrm{cikl}} \tag{5.21}$$

5.1.3 Određivanje karakteristike brizgača - osnovni pristup

Za motor i podatke definisane u zadatku 5.1.1, a na osnovu prethodno dobijenih rezultata iz zadatka 5.1.2 odrediti:

1. Potrebnu karakteristiku brizgača ako je maksimalno vreme otvaranja brizgača određeno vremenskim trajanjem ciklusa motora
2. Potrebnu karakteristiku brizgača ako je maksimalno vreme otvaranja brizgača određeno vremenskim trajanjem procesa usisavanja motora.

Rešenje

Ciklusna količina goriva, izražena preko dužine impulsa otvaranja brizgača Δt_{inj} i statičke protočne karakteristike brizgača K_b, definisana je jednačinom 5.1.

1. Određivanje potrebne statičke protočne karakteristike brizgača prema vremenskom trajanju ciklusa motora:

Kritična situacija odgovara nominalnom brzinskom režimu na kome je trajanje ciklusa najkraće. U tom slučaju se polazi od pretpostavke da se impulsi za otvaranje brizgača nastavljaju, odnosno da je brizgač kontinualno otvoren. Sledi:

$$K_b = \frac{b_c}{\Delta t_{inj}} = \frac{b_c}{\Delta t_{c_nom}} = \frac{30{,}187\,{}^{\mathrm{mm^3}}/_{\mathrm{cikl}}}{20\,{}^{\mathrm{ms}}/_{\mathrm{cikl}}} = 1{,}5093 \cdot 10^{-6}\,{}^{\mathrm{m^3}}/_{\mathrm{s}} \tag{5.22}$$

izraženo u ${}^{\mathrm{cm^3}}/_{\mathrm{min}}$:

$$K_b = 1{,}5093 \cdot 10^{-6}\,{}^{\mathrm{m^3}}/_{\mathrm{s}} = 90{,}561\,{}^{\mathrm{cm^3}}/_{\mathrm{min}} \tag{5.23}$$

2. Određivanje potrebne statičke protočne karakteristike brizgača prema vremenskom trajanju procesa usisavanja motora:

   Kritična situacija odgovara nominalnom brzinskom režimu na kome je trajanje procesa usisavanja najkraće:

$$K_b = \frac{b_c}{\Delta t_{inj}} = \frac{b_c}{\Delta t_{US_nom}} = \frac{30{,}187\,{}^{\mathrm{mm^3}}/_{\mathrm{cikl}}}{6{,}17\,{}^{\mathrm{ms}}/_{\mathrm{cikl}}} = 4{,}8925 \cdot 10^{-6}\,{}^{\mathrm{m^3}}/_{\mathrm{s}} \tag{5.24}$$

   Izraženo u ${}^{\mathrm{cm^3}}/_{\mathrm{min}}$:

$$K_b = 4{,}8925 \cdot 10^{-6}\,{}^{\mathrm{m^3}}/_{\mathrm{s}} = 293{,}55\,{}^{\mathrm{cm^3}}/_{\mathrm{min}} \tag{5.25}$$

5.1.4 Korekcija vremena ubrizgavanja na osnovu napona akumulatorske baterije

Za motor i podatke definisane u zadatku 5.1.1, a na osnovu prethodno dobijenih rezultata, i za slučaj korišćenja brizgača pri radnim uslovima (ubrizgavanje benzina, pritisak u magistrali goriva $p_{inj} = 3\,\mathrm{bar}$) stacionarne protočne karakteristike $K_b = 107\,{}^{\mathrm{cm^3}}/_{\mathrm{min}}$ i perioda izdizanja iglice, odnosno vremena rampe $\Delta t_r = 1{,}5\,\mathrm{ms}$ odrediti:

1. Osnovno vreme trajanja impulsa za otvaranje brizgača za nominalni radni režim ($n = 6000\,\mathrm{min}^{-1}$) pri nominalnom naponu $V_{bat} = 12\,\mathrm{V}$;
2. Korigovano vreme za period otvorenosti brizgača;
3. Korekciju za slučaj rada motora sa $V_{bat} = 11{,}6\,\mathrm{V}$ i $V_{bat} = 13{,}7\,\mathrm{V}$ (korekcija iznosi $C_{t_r} = 0{,}085\,{}^{\mathrm{ms}}/_{\mathrm{V}}$).

Rešenje

1. Određivanje osnovnog vremena trajanja impulsa za otvaranje brizgača za nominalni radni režim:

$$\Delta t_{inj_0} = \frac{b_c}{K_b} = \frac{30{,}187\,{}^{\mathrm{mm}^3}/_{\mathrm{cikl}}}{107\,{}^{\mathrm{cm}^3}/_{\mathrm{min}}} = 0{,}01693\,\mathrm{s} = 16{,}93\,\mathrm{ms} \tag{5.26}$$

2. Određivanje korigovanog vremena trajanja impulsa za otvaranje brizgača (za period podizanja iglice brizgača)

$$\Delta t_{inj_1} = \Delta t_r + \frac{b_c - 0{,}33 \cdot K_b \cdot \Delta t_r}{K_b} = 0{,}67 \cdot \Delta t_r + \frac{b_c}{K_b} \Rightarrow$$
$$\Delta t_{inj_1} = 0{,}67 \cdot 1{,}5\,ms + \frac{30{,}187\,{}^{\mathrm{mm}^3}/_{\mathrm{cikl}}}{107\,{}^{\mathrm{cm}^3}/_{\mathrm{min}}} = 17{,}93\,\mathrm{ms} \tag{5.27}$$

3. U slučaju rada sa naponom $V_{bat} = 11{,}6\,\mathrm{V}$, vreme izdizanja iglice se produžava uzimajući u obzir korekcioni faktor C_{t_r}:

$$\Delta V_{bat_1} = V_{bat_nom} - V_{bat_1} = 12\,\mathrm{V} - 11{,}6\,\mathrm{V} = 0{,}4\,\mathrm{V} \tag{5.28}$$

$$\Delta t_{r_V_{bat_1}} = (1 + \Delta V_{bat_1} \cdot C_{t_r}) \cdot \Delta t_r = (1 + 0{,}4\,\mathrm{V} \cdot 0{,}085\,{}^{\mathrm{ms}}/_{\mathrm{V}}) \cdot 1{,}5\,\mathrm{ms} = 1{,}551\,\mathrm{ms} \tag{5.29}$$

U slučaju rada sa naponom $V_{bat} = 13{,}7\,\mathrm{V}$ dobija se:

$$\Delta V_{bat_2} = V_{bat_nom} - V_{bat_2} = 12\,\mathrm{V} - 13{,}7\,\mathrm{V} = -1{,}7\,\mathrm{V} \tag{5.30}$$

$$\Delta t_{r_V_{bat_2}} = (1 + \Delta V_{bat_2} \cdot C_{t_r}) \cdot \Delta t_r = (1 - 1{,}7\,\mathrm{V} \cdot 0{,}085\,{}^{\mathrm{ms}}/_{\mathrm{V}}) \cdot 1{,}5\,\mathrm{ms} = 1{,}283\,\mathrm{ms} \tag{5.31}$$

5.1.5 Određivanje minimalne vrednosti karakteristike brizgača za date efektivne parametre rada motora

Benzinski motor sa prirodnim punjenjem definisan je sledećim tehničkim podacima:

Broj cilindara:	$z = 4$
Taktnost:	$\tau = 4$
Prečnik klipa:	$D = 77\,\mathrm{mm}$
Hod klipa:	$s = 75\,\mathrm{mm}$
Nominalni broj obrtaja:	$n_{nom} = 6200\,\mathrm{min}^{-1}$
Efektivna snaga:	$P_e = 80{,}1\,\mathrm{kW}$
Sastav smeše:	$AFR = 13{,}23$
Specifična efektivna potrošnja goriva:	$g_e = 310\,{}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{kWh}}$

Za navedeni motor neophodno je izabrati odgovarajući brizgač. Razmotriti slučajeve kada je vreme trajanja ubrizgavanja ograničeno trajanjem ciklusa i trajanjem procesa usisavanja. Regulator pritiska održava natpritisak u akumulatoru (magistrali) goriva na nivou od $\Delta p_F = 2{,}8\,\text{bar}$.

Rešenje

Određivanje radne zapremine jednog cilindra:

$$V_{h1} = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot s = \frac{(77\,\text{mm})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 75\,\text{mm} = 349{,}25\,\text{cm}^3 \tag{5.32}$$

Određivanje ukupne radne zapremine motora:

$$V_h = V_{h1} \cdot z = 349{,}25 \cdot 4 = 1396{,}98\,\text{cm}^3 \tag{5.33}$$

Izračunavanje ciklusne mase goriva za rad motora na nominalnom radnom režimu:

$$m_c = \frac{G_F}{n_c \cdot z} = \frac{g_e \cdot P_e}{\frac{2 \cdot n}{\tau}} \cdot z = \frac{310\,\text{g/kWh} \cdot 80{,}1\,\text{kW}}{\frac{2 \cdot 6200\,\text{min}^{-1}}{4}} \cdot 4 = 33{,}375 \cdot 10^{-6}\,\text{kg} \tag{5.34}$$

Izračunavanje dužine trajanja ciklusa i trajanja takta usisavanja:

$$\Delta t_c = \frac{1}{n_c} = \frac{1}{\frac{2 \cdot 6200\,\text{min}^{-1}}{4}} = 0{,}019354\,\text{s} = 19{,}354\,\text{ms} \tag{5.35}$$

$$\Delta t_{US} = \frac{t_c}{\tau} = \frac{0{,}019354\,\text{s}}{4} = 0{,}004838\,\text{s} = 4{,}838\,\text{ms} \tag{5.36}$$

Izračunavanje neophodne protočne karakteristike brizgača - vreme ubrizgavanja jednako je vremenu trajanja ciklusa:

$$K_{m_c} = \frac{m_c}{\Delta t_c} = \frac{33{,}375 \cdot 10^{-6}\,\text{kg}}{0{,}019354\,\text{s}} = 103{,}4\,\text{g/min} \tag{5.37}$$

$$K_{b_c} = \frac{K_{m_c}}{\rho_F} = \frac{103{,}4\,\text{g/min}}{0{,}752\,\text{g/cm}^3} = 137{,}5\,\text{cm}^3\text{/min} \tag{5.38}$$

Izračunavanje fiktivne protočne karakteristike brizgača - vreme ubrizgavanja je približno jednako vremenu trajanja procesa usisavanja:

$$K_{m_US} = \frac{m_c}{\Delta t_{US}} = \frac{33{,}375 \cdot 10^{-6}\,\text{kg}}{0{,}004838\,\text{s}} = 413{,}8\,\text{g/min} \tag{5.39}$$

$$K_{b_US} = \frac{K_{m_US}}{\rho_F} = \frac{413{,}8\,\text{g/min}}{0{,}752\,\text{g/cm}^3} = 550{,}3\,\text{cm}^3\text{/min} \tag{5.40}$$

Maseni protok kroz brizgač (protočna karakteristika) može se prikazati izrazom za izračunavanje protoka kroz standardnu prigušnicu [35]:

$$\dot{m} = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1} \tag{5.41}$$

gde su:

C_d Koeficijent pražnjenja;

β Odnos prečnika otvora na prigušnici d i deonice (cevi D) u koju je ugrađeno prigušno mesto $\frac{d}{D}$ [−];

ϵ Faktor ekspanzije fluida [−];

A Površina poprečnog preseka prigušnog mesta $A = {}^{d^2\pi}/_4$;

ρ_1 Gustina fluida pre prigušnice;

Δp Razlika pritisaka pre i posle prigušnog mesta.

Odnos protočnih karakteristika brizgača pri različitim pritiscima regulacije definisan je na sledeći način:

$$\frac{K_{m_\Delta p_F_nom}}{K_{m_\Delta p_F}} = \frac{\frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2\Delta p_{F_nom} \cdot \rho_{nom}}}{\frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2\Delta p_F \cdot \rho_1}} \approx \sqrt{\frac{\Delta p_{F_nom}}{\Delta p_F}} \tag{5.42}$$

Protočne karakteristike brizgača svaki proizvođač deklariše na određenom pritisku goriva. Za slučaj primene brizgača iz programa proizvođača BOSCH, karakteristike brizgača su definisane na nominalnom pritisku od $\Delta p_F = 3{,}0\,\text{bar}$ ukoliko nije drugačije naglašeno i čist oktan se koristi kao ispitni fluid. Pod pretpostavkom da su fizičke karakteristike čistog oktana i komercijalnog benzina slične, potrebna nominalna protočna karakteristika brizgača se tada određuje na sledeći način:

$$K_{m_c_nom} = K_{m_c} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{F_nom}}{\Delta p_F}} = 103{,}4\,{}^{\text{g}}/_{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{3{,}0\,\text{bar}}{2{,}8\,\text{bar}}} = 107\,{}^{\text{g}}/_{\text{min}} \tag{5.43}$$

$$K_{b_c_nom} = K_{b_c} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{F_nom}}{\Delta p_F}} = 137{,}5\,{}^{\text{cm}^3}/_{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{3{,}0\,\text{bar}}{2{,}8\,\text{bar}}} = 142.3\,{}^{\text{cm}^3}/_{\text{min}} \tag{5.44}$$

$$K_{m_US_nom} = K_{m_US} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{F_nom}}{\Delta p_F}} = 413{,}8\,{}^{\text{g}}/_{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{3{,}0\,\text{bar}}{2{,}8\,\text{bar}}} = 428.3\,{}^{\text{g}}/_{\text{min}} \tag{5.45}$$

$$K_{b_US_nom} = K_{b_US} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{F_nom}}{\Delta p_F}} = 550{,}3\,{}^{\text{cm}^3}/_{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{3{,}0\,\text{bar}}{2{,}8\,\text{bar}}} = 569.6\,{}^{\text{cm}^3}/_{\text{min}} \tag{5.46}$$

5.1.6 Određivanje vremena rampe otvaranja brizgača

Za brizgač definisan u zadatku 5.1.5 izračunati ciklusnu masu goriva u funkciji vremena otvaranja brizgača. Uzeti u obzir da je protočna karakteristika brizgača tokom izdizanja iglice brizgača:

$$K_{m,r} = 0{,}33 \cdot K_m \tag{5.47}$$

Izračunati relativno odstupanje u odnosu na vrednosti ciklusne mase goriva ako se u obzir ne uzima uticaj smanjenja protočne karakteristike tokom izdizanja iglice brizgača. Vreme izdizanja iglice iznosi $\Delta t_r = 1{,}05\,\text{ms}$. Dobijene rezultate prikazati grafički.

Rešenje

Masa ubrizganog goriva sa korekcijom za promenu protočne karakteristike brizgača izračunava se prema jednačini 5.5.

5.1.7 Uticaj promene pritiska u magistrali goriva na vrednost karakteristike brizgača

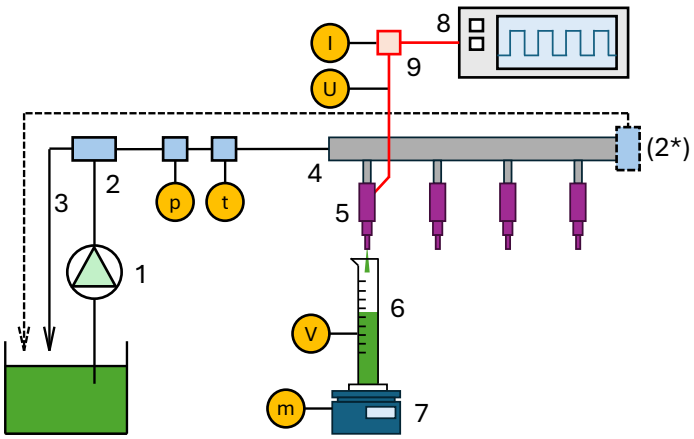
Protočna karakteristika brizgača je $K_b = 107\,^{\text{cm}^3}/_{\text{min}}$ i deklarisana je za pritisak u magistrali goriva od $p_{rail} = 3{,}0\,\text{bar}$. Regulator ima izmenjenu karakteristiku i pritisak u magistrali goriva iznosi $p_{rail_2} = 3{,}1\,\text{bar}$. Odrediti:

1. Relativnu promenu statičke protočne karakteristike brizgača za slučaj ugradnje novog regulatora pritiska;
2. Nove vrednosti osnovnog vremena otvaranja brizgača za slučaj primene novog regulatora (uračunati i vreme potrebno za izdizanje iglice brizgača).

5.2 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe

Na slici 5.2 dat je šematski prikaz i dispozicija elemenata koji se koriste prilikom eksperimentalnog određivanja protočne karakteristike i vremena rampe brizgača. Gorivo iz rezervoara, posredstvom potisne pumpe (1) potiskuje se ka regulatoru pritiska (2) koji posredstvom povratnog voda (3) višak goriva vraća ka rezervoaru. Regulator pritiska može da se nalazi pre magistrale goriva (4) ili posle (2*). Zahvaljujući regulatoru pritiska, nezavisno od protoka goriva kroz brizgače, moguće je održavati željeni nivo pritiska u magistrali goriva, što se detektuje senzorom pritiska (p). Pored merenja pritiska u sistemu, uobičajeno se meri i temperatura goriva (t).

Brizgači (5) nalaze se na magistrali goriva i ubrizgavanje (brizganje) goriva se vrši u mernu menzuru (6) koja omogućava određivanje ukupne zapremine (V) ubrizganog goriva nakon određenog broja ciklusa ubrizgavanja. Paralelno, precizna vaga (7) omogućava merenje ukupne mase (m) ubrizganog goriva. Signal za pobudu brizgača definisan je softverskim putem na akvizicionoj platformi (8) a putem digitalnog izlaza upravlja se tranzistorskom pojačivačem za brizgač (*eng.: Injector Driver*). Struja pobude brizgača meri se senzorom jačine električne struje (9), a pored merenja strujnog profila (I) omogućeno je i merenje naponskog profila (U) tokom sukcesivnih ciklusa ubrizgavanja.



Slika 5.2: Šema eksperimentalne instalacije za ispitivanje protočne karakteristike brizgača i vremena rampe u dinamičkim uslovima.

5.2.1 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe na osnovu dva radna režima motora

Na motoru su izmereni sledeći podaci vezani za potrošnju goriva:

br. radnog režima	ΔV_F [cm^3]	Δt_F [s]	t_{inj} [μs]	n [min^{-1}]
1	100	96,97	4005	2430
2	100	59,29	6540	2400

Podaci o motoru i gorivu:

Broj cilindara: $z = 4$

Taktnost: $\tau = 4$

Gustina goriva: $\rho_F = 782\,^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$

Odrediti protočnu karakteristiku brizgača K_b i vreme izdizanja iglice brizgača Δt_r.

Rešenje

Tražene veličine su K_b i Δt_r. Neophodno je postaviti sistem jednačina koristeći relacije iz poglavlja 5.1. Ciklusna količina goriva se određuje kao:

$$b_{c,i} = \frac{\frac{\Delta V_{F,i}}{\Delta t_{F,i}}}{n_{c,i} \cdot z} = \frac{\frac{\Delta V_{F,i}}{\Delta t_{F,i}}}{\frac{2 \cdot n_i}{\tau} \cdot z} \mid i = 1,2 \tag{5.48}$$

Kada se zamene vrednosti, dobija se da je $b_{c,1} = 12{,}73\,\mathrm{mm^3/cikl}$ i $b_{c,1} = 21{,}08\,\mathrm{mm^3/cikl}$. Sistem jednačina ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned} b_{c,1} &= K_b \cdot (\Delta t_{inj,1} - 0{,}67 \cdot t_r) \\ b_{c,2} &= K_b \cdot (\Delta t_{inj,2} - 0{,}67 \cdot t_r) \end{aligned} \tag{5.49}$$

Rešavanjem sistema jednačina dobija se $t_r = 0{,}209\,\mathrm{ms}$ i $K_b = 327{,}33\,\mathrm{cm^3/min}$.

5.2.2 Eksperimentalno određivanje karakteristike brizgača i vremena rampe na osnovu više radnih režima

Ispitivanjem brizgača ustanovljene su sledeće vrednosti:

r. br.	n $[\mathrm{min}^{-1}]$	*Duty* [%]	Broj impulsa	Izmerena masa goriva režimu ubrizgavanja [g]			
				#1	#2	#3	#4
1	3000	10	1000	12,51	12,36	12,38	12,29
2	3300	25	2000	61,13	59,92	60,09	59,75
3	3600	40	1500	68,25	66,85	67,12	66,51
4	4000	5	2000	9,86	10,60	10,52	10,49
5	6000	10	3000	15,86	15,99	15,73	15,77
6	6500	40	3000	72,95	71,61	72,31	71,70
7	7000	25	3000	40,24	39,66	39,93	39,67
8	8000	15	3000	18,45	18,52	18,50	18,52
9	8500	30	3000	39,56	39,07	39,48	39,24
10	9000	50	3000	65,09	64,08	64,70	64,10

gde je:

Broj impulsa - ukupan broj otvaranja brizgača frekvencom koja odgovara broju obrtaja iz kolone n, a za čije vreme je gorivo ubrizgavano u mernu biretu

nakon čega je merena ukupna masa ubrizganog goriva.

Duty - procentualni udeo trajanja signala za otvaranje brizgača u odnosu na trajanje radnog ciklusa motora na datom režimu

Gustina korišćenog goriva je $\rho_F = 0{,}722\,\mathrm{g/cm^3}$.

Smernice za rad:

- Odrediti protočnu karakteristiku ispitivanih brizgača K_b, kao i vreme rampe Δt_r ukoliko se pretpostavi da se za vreme rampe ubrizga 33% goriva koje bi se ubrizgalo da se brizgač trenutno otvara.
- Postaviti sistem jednačina, po uzoru na sistem jednačina 5.49 iz zadatka 5.2.1, tako da se za 10 jednačina dobiju rešenja traženih veličina (nekvadratni sistem jednačina).
- U drugom slučaju, postavljati po dve jednačine iz seta mogućih kombinacija jednačina i formirati populaciju rešenja za K_b i Δt_r. Nacrtati odgovarajuće histograme za K_b i Δt_r i prokomentarisati razliku između srednjih vrednosti dobijenih rezultata (funkcija `mean`) i medijane (funkcija `median`). Na histogramima prikazati poziciju srednjih vrednosti rešenja i medijane dobijenih rešenja.
- Prokomentarisati odbacivanje rešenja minimalne zastupljenosti (eng: *outlier*). Proceniti neophodan broj *outlier*-a na osnovu promene krajnjih rezultata (srednjih i medijan vrednosti) i nacrtati nove histograme i funkcije raspodele za prihvaćena rešenja.

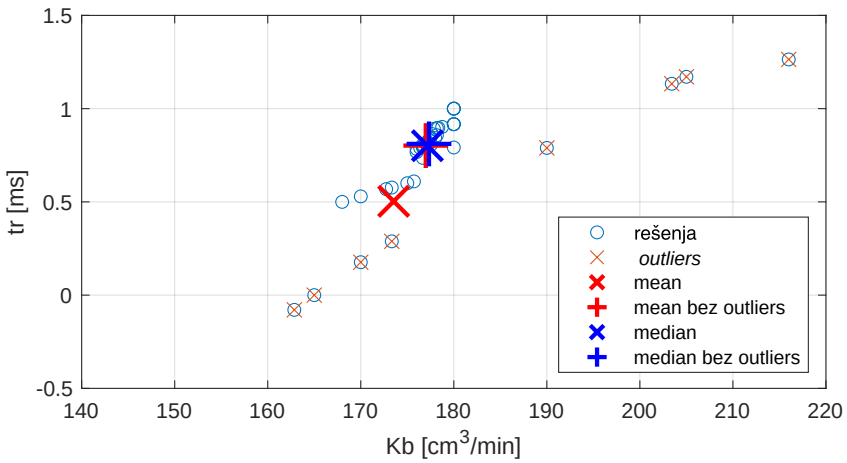
Podaci u formi `.mat`-fajla neophodni za rešavanje ovog zadatka, nalaze se u arhivi: podaci_KB_tr. U nastavku je prikazan program `main_brizgaci_V3.m` (5.1) na osnovu koga su dobijeni rezultati i formirani dijagrami 5.3, 5.4 i 5.5.

Rešenje

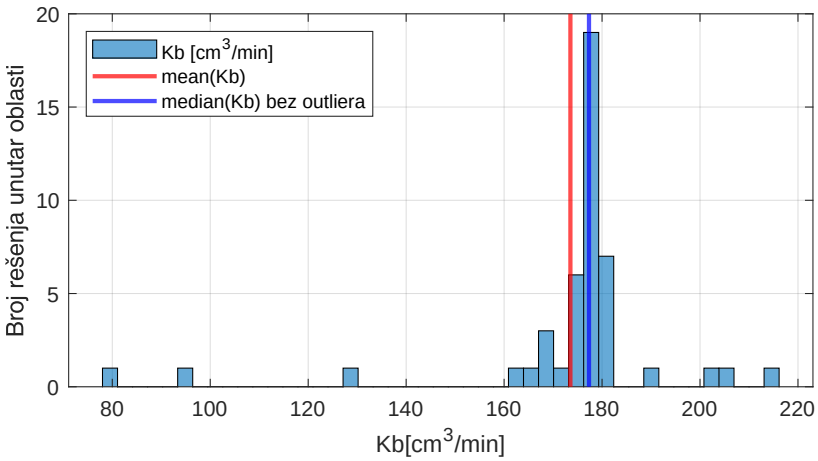
Na slici 5.3 prikazana je populacija rešenja za K_b (x-osa) i t_r (y-osa) za brizgač prvog cilindra a na osnovu deset radnih režima ($R_r = 10$) na kojima je ispitivana dinamička karakteristika brizgača. Imajući u vidu da pri postavljanju jednačina permutacije radnih režima budu bez ponavljanja i da nije važno koja se jednačina iz parova jednačina uzima kao prva a koja kao druga (redosled je nevažan), dolazi se do zaključka da je ukupan broj jednačina koji može da se postavi i za koji može da se dobije jednoznačno rešenje:

$$\frac{R_r \cdot (R_r - 1)}{2} = 45 \tag{5.50}$$

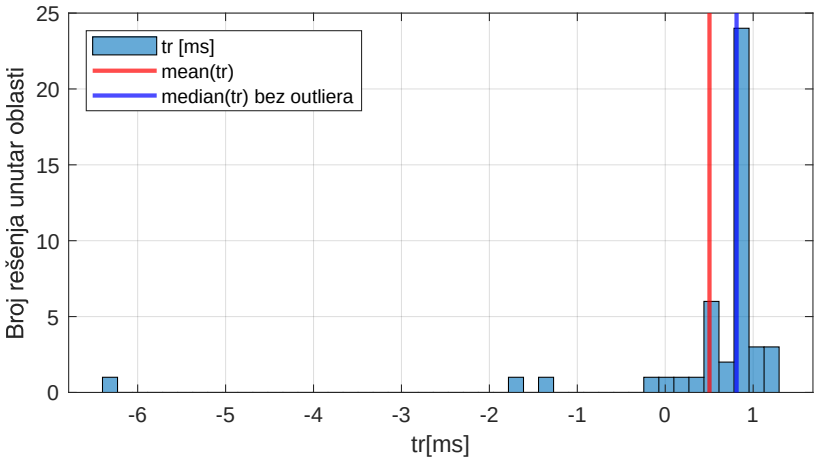
Analizom dobijenih rešenja, uočava se da se u nekim slučajevima, odnosno za neke kombinacije radnih režima ispitivanja brizgača, dobijaju netačna rešenja (negativna vrednost t_r ili K_b koje značajno odstupa od vrednosti dobijene stacionarnim ispitivanjem brizgača. Iz tog razloga, neophodno je izvršiti odstranjivanje onih rešenja za koja važi minimalna zastupljenost tj. spadaju u takozvane *oulier*-e.



Slika 5.3: Populacija rešenja pri određivanju dinamičke karakteristike brizgača.



Slika 5.4: Histogram rešenja za karakteristiku brizgača i pozicija konačnih rešenja.



Slika 5.5: Histogram rešenja za vreme rampe i pozicija konačnih rešenja.

Program 5.1: `main_brizgaci_V3.m`

```
% Ispitivanje dinamicke karakteristike brizgaca
% FIAT 1.4 16V
clear
close all
clc

data_xlsx = xlsread('merenja FIAT 14 16V.xlsx');

RPM = data_xlsx(:,1);   %[rpm] - broj obrtaja motora
Duty = data_xlsx(:,2);  %[%] - duty
Cycle = data_xlsx(:,3); %[no] - broj ciklusa
Volume = data_xlsx(:,4);%[cm3] - izmerena zapremina

Kb_stac = 178.5; %[cm3/min] - izmerena stacionarna protocna karakteristika
ro_g = 0.7221; % [g/cm3] - izmerena gustina goriva

Fuel_m = Volume.*ro_g; %[g] - Masa ubrizganog goriva za ukupan broj ciklusa
period = 2./(RPM./60); %[sec] - trajanje jednog ciklusa
tinj = period.*(Duty./100); %[sec] - trajanje ubrizgavanja
mg1imp = Fuel_m./Cycle; %[g] - masa goriva koja se ubrizga za jedan impuls
% Period trajanja rampe otvaranja brizgača tokom
% koga nije došlo do ubrizgavanja
koef = 2/3';

%fsolve
x0 = [3; 0.001]; % pocetni uslovi (Kb [cm3/s], tr[s])

% options = optimset('Algorithm',{'levenberg-marquardt',.005},...
% 'Display','iter','TolFun',1e-20,'TolX',1e-20); % Option to display output

% pojedinacno racunanje unutar for petlji
brojac = 0;
Kb_pop = [];
tr_pop = [];
```

```
Kb_pop_mat = zeros(length(tinj));
tr_pop_mat = zeros(length(tinj));
mat_1 = zeros(length(tinj));
for i = 1 : length(tinj)
    for j = i+1 : length(tinj)
        mat_1(i,j) = 1;
        brojac = brojac + 1;
        clear x fval
        [x,fval] = fsolve(@(x)myfun_V2(x,ro_g,mg1imp,tinj,koef,i,j),x0);

        Kb_pop(brojac,1) = x(1)* 60; %[cm3/min]
        Kb_pop_mat(i,j) = x(1)* 60; %[cm3/min]
        tr_pop(brojac,1) = x(2)* 1000; % [ms]
        tr_pop_mat(i,j) = x(2)* 1000; % [ms]
    end
end

F9 = figure(9);
F9.WindowStyle = 'normal';
plot(Kb_pop,tr_pop,'o')
grid on
xlabel('Kb [cm^3/min]')
ylabel('tr [ms]')
xlim([140 220]);
ylim([-0.5 1.5]);
[~,TFrm] = rmoutliers([Kb_pop tr_pop]);
hold on
plot (Kb_pop(TFrm),tr_pop(TFrm),'x','MarkerSize',10)

Kb_mean = mean(Kb_pop);
Kb_mean_1 = mean(Kb_pop(~TFrm)); % bez outliers
Kb_median = median(Kb_pop);
Kb_median_1 = median(Kb_pop(~TFrm)); % bez outliers

tr_mean = mean(tr_pop);
tr_mean_1 = mean(tr_pop(~TFrm)); % bez outliers
tr_median = median(tr_pop);
tr_median_1 = median(tr_pop(~TFrm)); % bez outliers

figure(9)
hold on
plot(Kb_mean,tr_mean,'rx','MarkerSize',20,'LineWidth',2)
plot(Kb_mean_1,tr_mean_1,'r+','MarkerSize',20,'LineWidth',2)
plot(Kb_median,tr_median,'bx','MarkerSize',20,'LineWidth',2)
plot(Kb_median_1,tr_median_1,'b+','MarkerSize',20,'LineWidth',2)
legend('rešenja','{\it outliers}',...
    'mean','mean bez outliers','median','median bez outliers',...
    'location','southeast');
set(F9,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])
set(F9,'Units','Inches')
pos = get(F9,'Position')
set(F9,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
```

```
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F9,'F9','-r300','-dtiffn')
print(F9,'F9','-dmeta')
print(F9,'F9','-dpdf','-r0')


F10 = figure(10);
F10.WindowStyle = 'normal';
histogram(Kb_pop,45)
hold on
xline(Kb_mean,'r','LineWidth',2)
xline(Kb_median_1,'b','LineWidth',2)
grid on
xlabel('Kb[cm^3/min]')
ylabel('Broj rešenja unutar oblasti')
legend('Kb [cm^3/min]','mean(Kb)','median(Kb) bez outliera','location','northwest')
set(F10,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])
set(F10,'Units','Inches')
pos = get(F10,'Position')
set(F10,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F10,'F10','-r300','-dtiffn')
print(F10,'F10','-dmeta')
print(F10,'F10','-dpdf','-r0')


F11 = figure(11);
F11.WindowStyle = 'normal';
histogram(tr_pop,45)
hold on
xline(tr_mean,'r','LineWidth',2)
xline(tr_median_1,'b','LineWidth',2)
grid on
xlabel('tr[ms]')
ylabel('Broj rešenja unutar oblasti')
legend('tr [ms]','mean(tr)','median(tr) bez outliera','location','northwest')
set(F11,'Position',[300 300 600 300])
set(gcf,'PaperPositionMode','manual')
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 6 3])
set(F11,'Units','Inches')
pos = get(F11,'Position')
set(F11,'PaperPositionMode','Auto',...
    'PaperUnits','Inches',...
    'PaperSize',[pos(3), pos(4)])
print(F11,'F11','-r300','-dtiffn')
print(F11,'F11','-dmeta')
print(F11,'F11','-dpdf','-r0')
```

5.3 Električne karakteristike brizgača

5.3.1 Struja pobude visokoomskog brizgača

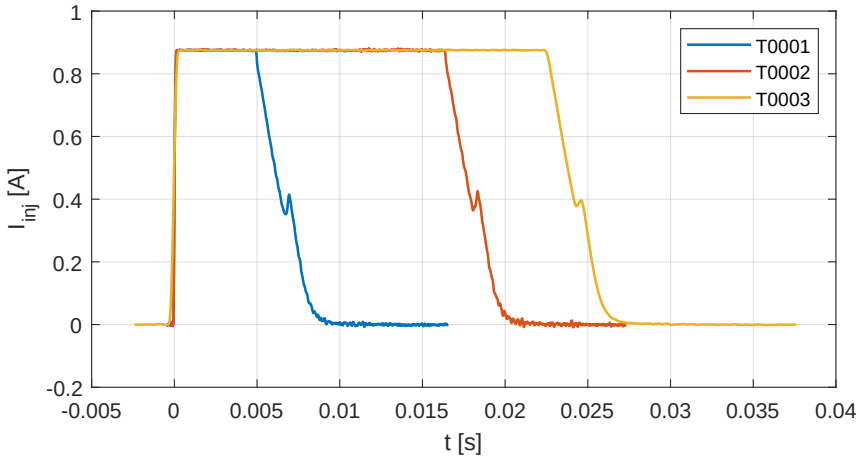
Tokom ispitivanja dinamičke protočne karakteristike brizgača za indirektno ubrizgavanje benzina sniman je signal sa strujnih klešta *Chauvin Arnoux E3N* [36] posredstvom osciloskopa *Tektronix MSO2004B* [37]. Za pobudu brizgača korišćen je modul sa analognim podešavanjem frekvence i trajanja (eng.: *high time*) impulsa pobude zasnovan na brojačkom integralnom kolu *NE555D* i tranzistorima oznake *STP62NS04Z*. Snimljene datoteke nalaze se na moodle platformi na sledećem linku.

Napisati odgovarajući program koji će omogućiti sledeće:

1. U okviru datoteka nalazi se vremenski domen i naponske vrednosti prvog kanala osciloskopa (`CH1`). Neophodno je učitati podatke i primeniti filter pokretne sredine proizvoljne širine korišćenjem funkcije `smooth`. Prilikom odabira broja elemenata pokretne sredine obratiti pažnju uticaja filtera na smanjenje nivoa šuma i na poremećaj dinamike snimljenog signala.
2. Svaki set podataka sadrži različiti broj tranzicija tj. ciklusa otvaranja i zatvaranja brizgača koji su snimljeni u posmatranom vremenskom intervalu (1 s). Potrebno je identifikovati karakteristične indekse svake tranzicije i identifikovati frekvencu pobude brizgača. Kod ovakve vrste signala, vrlo je karakteristična tačka najvećeg gradijenta, tako da je preporučljiva primena funkcije `gradient` i `findfpeaks` kako bi se identifikovali ponovljivi ciklusi pobude brizgača. U cilju dodatnog osrednjavanja, odrediti srednji ciklus pobude brizgača primenom funkcije `mean` (aritmetička sredina).
3. Primenom funkcije `circshift`, smaknuti vektore za definisan broj članova, odnosno vreme, kako bi se na dijagramu preklopili počeci ubrizgavanja.
4. Nakon identifikovanih perioda kada je brizgač pobuđen (otvoren) i kada je brizgač zatvoren, na osnovu srednjih vrednosti tih perioda, izvršiti linearno skaliranje merenog naponskog signala tako da kada je brizgač zatvoren kroz brizgač ne protiče struje (0 A), a kada je pobuđen kroz njega protiče struja koja odgovara otpornosti brizgača od 16 Ω i naponu od 14 V.

Rešenje

Na slici 5.6 prikazan je tok struje kroz visokoomski brizač snimljen tokom eksperimentalnog određivanja dinamičke karakteristike brizgača i vremena rampe. U pitanju je brizgač za indirektno ubrizgavanje benzina.



Slika 5.6: Tok struje kroz visokoomski brizgač za tri različita režima ubrizgavanja.

5.3.2 Struja pobude niskoomskog brizgača

Niskoomske brizgače karakteriše otpornost namotaja od 1 Ω do 3 Ω. Upravo zbog niže otpornosti moguće je, za zadati nivo napona u sistemu upravljanja, obezbediti veći nivo električne struje kroz brizgač, a time i brže reagovanje brizgača što ima brojne povoljne efekte. Kako bi se brizgači zaštitili od pregorevanja, pregrevanja i kako bi se smanjila potrošnja električne struje koja se troši na sistem za ubrizgavanje, niskoomski brizgači se upravljaju na karakterističan način koji se u literaturi naziva *Peak & Hold.* Ovakav način upravljanja u prvoj fazi omogućava viši nivo struje koji služi brzom otvaranju brizgača (vrh, maksimum - eng.: *peak*). Nakon otvaranja brizgača sledi period tokom koga se propušta niži nivo struje koji je neophodan kako bi se brizgač držao otvorenim (držati - eng.: *hold*).

Na četvorocilindarskom motoru sa direktnim ubrizgavanjem i induktivnim brizgačima je snimana struja pobude sva četiri brizgača i struja punjenja primara indukcionog kalema sistema paljenja koristeći osciloskop *Tektronix MSO2004B*. Podaci su snimani u datoteke kojima se može pristupiti na Moodle platformi.

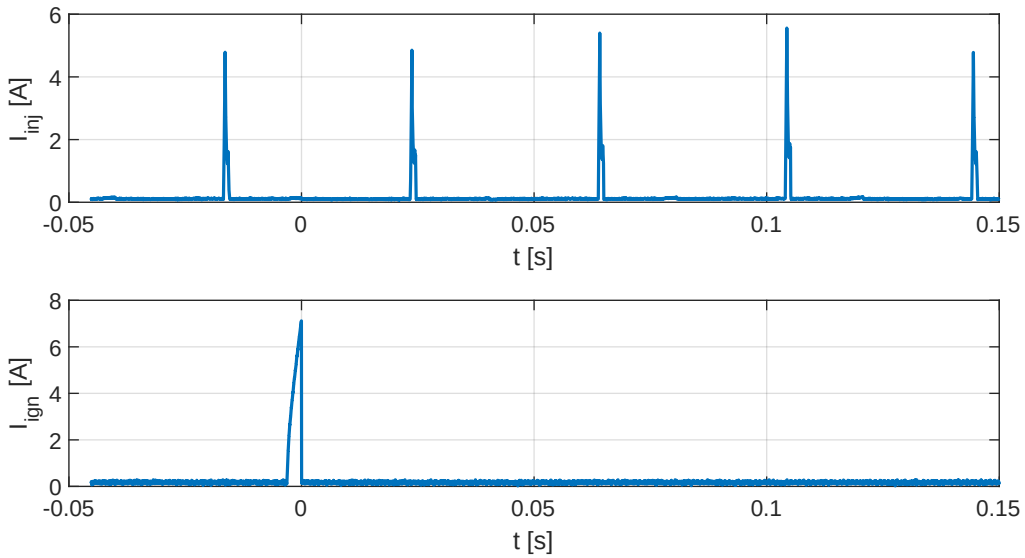
Kanal `CH1` sadrži podatke vezane za struju pobude brizgača, dok kanal `CH2` sadrži podatke o struji punjenja indukcionog kalema.

Za uzorkovanje struje sa brizgača korišćena su strujna klešta oznake *Chauvin Arnoux E3N* [36]. Za merenje struje primara indukcionog kalema, korišćen je senzor struje *ACS712elctr-20a-t* [38].

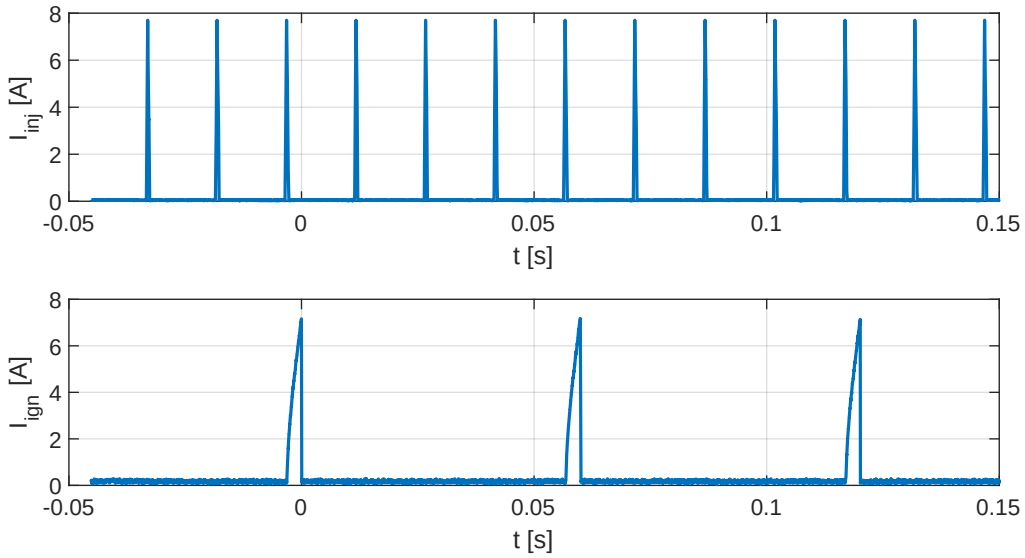
Padajuća ivica punjenja indukcionog kalema je korišćena kao okidač (eng.: *trigger*) za stabilizaciju prikazivanja na ekranu osciloskopa.

Na slikama 5.7 i 5.8 dat je prikaz promene struje kroz brizgače i kroz primar induktivnog kalema sistema paljenja:

- Prazan hod, minimalan broj obrtaja motora, oznaka datoteke: `T0001`;
- Prazan hod (rad bez spoljnog opterećenja), povišen broj obrtaja motora, oznaka datoteke: `T0002`.



Slika 5.7: Profil struje kroz brizgače i kroz primar induktivnog kalema (datoteka `T0001`).



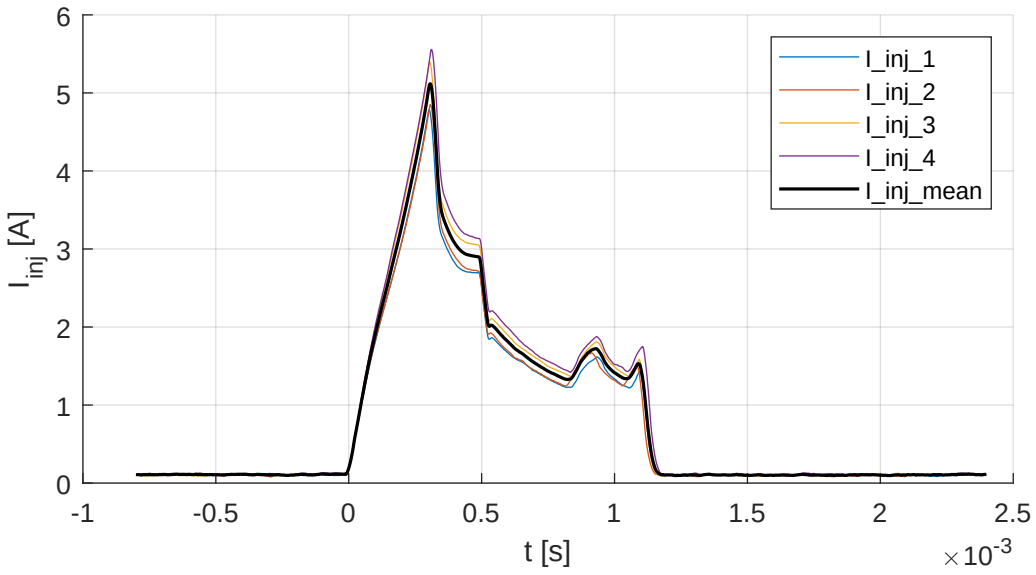
Slika 5.8: Profil struje kroz brizgače i kroz primar induktivnog kalema (datoteka `T0002`).

Napisati odgovarajući Matlab program pomoću koga će se odrediti sledeće:

1. Primeniti prenosne funkcije strujnih klešta i senzora struje koji su korišćeni i prevesti naponske nivoe snimljenog signala u vrednosti struje kojom su bili izloženi solenoidi brizgača. Strujna klešta su korišćena uz podešavanje pojačanja $G_{cc} = 100\,\mathrm{mV/A}$. Pre primene prenosnih funkcija, očitavanja naponskih vrednosti U_{CH_1} prvog kanala (`CH1`) treba pojačati 10 puta zato što je tokom uzorkovanja podataka korišćen atenuator sa pojačanjem $A_{CH_1} = 1/10$. Atenuator je uređaj koji se koristi za naponsku zaštitu ulaznih kanala osciloskopa i obično se ova vrednost pojačanja označava kao 10x. Uzimajući u obzir prethodno, dobija se da je:
$$I_{CH_1} = \frac{U_{CH_1} \cdot A_{CH_1}}{G_{cc}} \tag{5.51}$$
2. Primenom funkcije `smooth` adekvatno filtrirati snimljene profile struje. Broj elemenata pokretne sredine odabrati tako da se u dovoljnoj meri smanji šum signala bez prevelikog amplitudnog i faznog poremećaja. Grafičkim putem analizirati uticaj broja elemenata u filteru pokretne sredine.
3. Identifikovati indekse članova niza (vektora) izmerenih podataka koji odgovaraju početku i kraju ubrizgavanja. Graničnu vrednost signala (eng.: *Signal Threshold*) izabrati tako da amplitudna promena vrednosti struje iznosi manje od 1% od ukupnog raspona strujnog signala. Preklopiti dijagrame četiri uzastopna ubrizgavanja i odrediti srednji profil struje. Dijagram prikazati u vremenskom domenu tako da ubrizgavanje počne na 0 s.
4. Primenom funkcije `findpeaks` identifikovati indekse maksimalnih vrednosti struje za svako pojedinačno ubrizgavanje.
5. Uzimajući u obzir činjenicu da na posmatranim radnim režimima postoji samo jedno ubrizgavanje po ciklusu, odrediti period između dva ubrizgavanja na istoimenom cilindru (eksperiment je sproveden na četvorocilindarskom motoru, $z = 4$) i na osnovu toga odrediti broj obrtaja kolenastog vratila motora.
6. Na osnovu profila struje punjenja indukcionog kalema sistema paljenja, odrediti vreme trajanja punjenja indukcionog kalema (eng.: *Dwell Time*). Profil struje odrediti na osnovu podataka o naponu snimljenih na kanalu `CH2` i vrednosti prenosne funkcije korišćenog senzora struje *ACS712elctr-20a-t* [38].
7. Računicu primeniti i kreirati grafikone vrednosti struje kroz brizgače za oba snimljena radna režima (`T0001` i `T0002`).

Rešenje

Na slici 5.9 je prikazan tok struje na brizgačima za podatke iz datoteke `T0001`.



Slika 5.9: Struja pobude induktivnih brizgača (niskoomski, *Peak & Hold* upravljanje).

Program 5.2: `Struja_na_brizgacu.m`

```
clear
close all
clc
% Učitavanje podatak iz CSV datoteke na osnovu automatski generisanog
% skripta iz Import Data wizard-a.

% Auto generisani deo koda iz Data Import Wizard-a:
% Set up the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 5);
% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [17, 125016];
opts.Delimiter = ",";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["TIME", "CH1", "CH1PeakDetect", "CH2", "CH2PeakDetect"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double"];
% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";
% Import the data
tbl = readtable("Struja_na_brizgacu_podaci\T0001.CSV", opts);
%tbl = readtable("Struja_na_brizgacu_podaci\T0002.CSV", opts);

% 1. Prenosna funkcija stujnih klesta je 100 mA/V tj. 0.1 A/V
% Prenosna funkcija senzora struje je definisana unutar datasheet-a
% -20A -> 0.5 V
%  20A -> 4.5 V,

% Primenom cftool alata i linearne aproksimacije dobija se prenosna
% funkcija senzora ACS712elctr-20a-t:
% I[A] = 10.*CH2[V] - 25
```

```
TIME = tbl.TIME;
CH1 = tbl.CH1.*10; %atenuacija
CH2 = tbl.CH2;
clear opts tbl

CH1_I = 0.1.*CH1;
CH2_I = 10.*CH2-25;
clear CH1 CH2

% 2. primena funkcije smooth za filtriranje signala pokretnom sredinom
CH1_IF = smooth(CH1_I,10);
CH2_IF = smooth(CH2_I,10);

figure(1)
plot(TIME,CH1_I);
hold on;
plot(TIME,CH1_IF);
hold off;

figure(2)
plot(TIME,CH2_I);
hold on;
plot(TIME,CH2_IF)
hold off;

% 3. određivanje indeksa početka ubrizgavanja

Tr = 0.2; % Granična vrednost struje iznad koje ima ubrizgavanja
Ind_1 = zeros(4,1);
Ind_2 = zeros(4,1);
brojac = 1;
for i = 1 : (length(CH1_IF)-1)
    if CH1_IF(i)<Tr && CH1_IF(i+1)>=Tr
        Ind_1 (brojac,1) = i; % indeksi pocetka ubrizgavanja
    end
    if CH1_IF(i)>=Tr && CH1_IF(i+1)<Tr
        Ind_2 (brojac,1) = i+1; % indeksi kraja ubrizgavanja
        brojac = brojac + 1;
    end
    if brojac == 5
        break
    end
end

t_off_i = 500; % ofset vremenskog domena
t_len_i = 2000; % ukupna dužina vektora

CH1_IFS = zeros(t_len_i,4);
for i = 1:4
    CH1_IFS(:,i) = CH1_IF((Ind_1(i)-t_off_i):(Ind_1(i)+(t_len_i-t_off_i-1)));
end

% srednja vrednost
```

```
CH1_IFS_m = mean(CH1_IFS,2);
[~,I] = min(abs(TIME));

figure(3)
plot(TIME((I-t_off_i):(I+(t_len_i-t_off_i-1))),CH1_IFS)
hold on
plot(TIME((I-t_off_i):(I+(t_len_i-t_off_i-1))),CH1_IFS_m,'k','LineWidth',2)
grid on
legend('inj_1','inj_2','inj_3','inj_4','inj_mean','Interpreter','none')
xlabel('Vreme [s]')
ylabel('Struja na brizgačima [A]')

% 4. Određivanje maksimalne vrednosti struje primenom funkcije findpeaks
% pks - vrednosti struje
% locs - indeksi pronađenih vrednosti struje
[pks,locs] = findpeaks (CH1_IF,'MinPeakHeight',4);

% 5. Određivanje broja obrtaja motora
Tr = 0.2; % Granična vrednost struje iznad koje ima ubrizgavanja
Ind_3 = zeros(5,1);
brojac = 1;
for i = 1 : (length(CH1_IF)-1)
    if CH1_IF(i)<Tr && CH1_IF(i+1)>=Tr
        Ind_3 (brojac,1) = i; % indeksi pocetka ubrizgavanja
        brojac = brojac + 1;
    end
end
% Svaki peti strujni profil odgovara ubrizgavanju na istom cilindru.
% Vreme trajanja jednog ciklusa
tc = TIME(Ind_3(5)) - TIME(Ind_3(1)); % [s]
nc = 60/tc; % [min-1] broj ciklusa
n = 2*nc; % [min-1] broj obrtaja

% 6. Određivanje trajanja punjenja bobine
Tr = 0.41; % Granična vrednost struje punjenja primara bobine
DW_time = (TIME(find(CH2_IF>Tr,1,'last')) - TIME(find(CH2_IF>Tr,1)))*1000; %[ms]

% 7. Računicu prilagoditi za drugi set podataka (T0002.csv)
```

6 Karakteristike mlaza i kapljica

6.1 Bezdimenzijske veličine - brzina isticanja, Rejnoldsov i Veberov broj

U cilju kvantitativnog definisanja modela raspada mlaza goriva i formiranja čestice, definisan je tzv. Onezorgeov (*Ohnesorge*) broj Z na sledeći način:

$$Z = \frac{\sqrt{We_F}}{Re} \tag{6.1}$$

gde su Veberov broj i Rejnoldsov broj:

$$We_F = \frac{u^2 D_N \rho_F}{\sigma} \tag{6.2}$$

$$Re = \frac{u D_N \rho_F}{\mu_F} \tag{6.3}$$

odakle sledi:

$$Z = \frac{\sqrt{We_F}}{Re} = \frac{\mu_F}{\sqrt{\sigma \rho_F D_N}} \tag{6.4}$$

gde su:

σ Površinski napon kapljice goriva kada se nalazi u vazduhu sveden na dužinsku meru ($\sigma \approx 0{,}02\,{}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$);

ρ_F Gustina tečnosti koja se raspršuje;

μ_F Dinamička viskoznost goriva;

D_N Prečnik otvora mlaznice.

6.1.1 Analiza uticaja uslova ubrizgavanja dizel-goriva na veličinu kapljice

Polazeći od uslova za odvajanje kapljice a koji proističe iz analize kritičnog Veberovog broja ($We > 8$), sprovesti analizu uticaja relativne brzine kretanja goriva na

prečnik izdvojene kapljice za slučaj ubrizgavanja standardnog dizel-goriva. Analizu sprovesti za slučaj primene standardnog motornog benzina u različitim uslovima obrazovanja smeše i to na sledeći način:

- Za slučaj niskopritisnog ubrizgavanja u opsegu relativnih brzina istrujavanja goriva od 10 $^{m}/_{s}$ do 100 $^{m}/_{s}$, pretpostavljajući diskretne vrednosti gustine vazduha koje odgovaraju uslovima obrazovanja smeše tokom punjenja cilindra (od 1,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 2,0 $^{kg}/_{m^3}$);
- Za slučaj visokopritisnog ubrizgavanja u opsegu relativnih brzina istrujavanja goriva od 100 $^{m}/_{s}$ do 500 $^{m}/_{s}$ pretpostavljajući diskretne vrednosti gustine vazduha koje odgovaraju uslovima obrazovanja smeše tokom sabijanja (od 4,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 20,0 $^{kg}/_{m^3}$).

Rezultate prikazati grafički, odvojeno za svaki od navedenih slučajeva.

Rešenje

Osnovne karakteristike tržišno dostupnih goriva koje su potrebne za rešenje zadatka prikazane su tabeli 6.1.

Tip goriva	Viskoznost ν $\left[^{mm^2}/_{s}\right]$	Površinski napon σ $\left[^{mN}/_{m}\right]$	Gustina ρ $\left[^{kg}/_{m^3}\right]$
Standardni motorni benzin (SRPS EN228)	0,619	21,56	760,0
Standardno dizel-gorivo (SRPS EN590)	2,485	28,60	833,0

Tabela 6.1: Osnovne karakteristike standardnih goriva.

Izraz za gasni Veberov broj (We) dat je u sledećem obliku:

$$We = \frac{D_D \cdot \rho_A \cdot u_{rel}^2}{\sigma_F} \tag{6.5}$$

Iz teorijskog uslova da se izdvajanje kapljice postiže za vrednosti kritičnog Veberovog broja veće od 8,

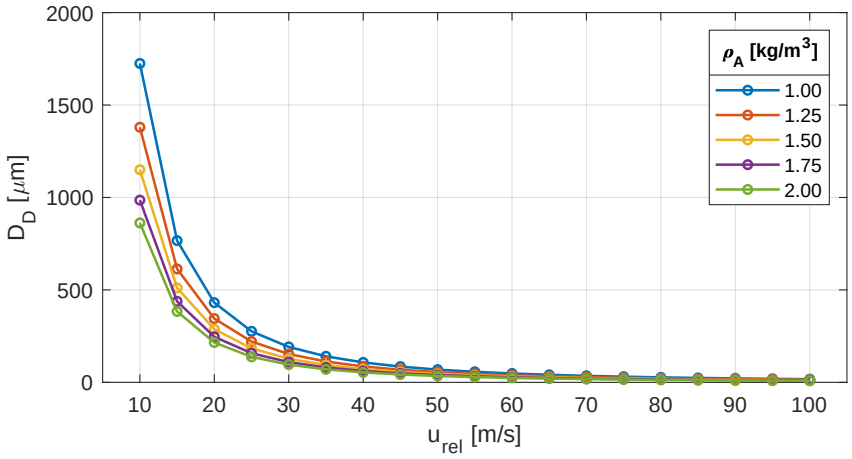
$$We_{crit} \geq 8 \tag{6.6}$$

dobija se izraz za procenu prečnika kapljice goriva D_D u zavisnosti od relativne brzine strujanja tečnosti u_F (u konkretnom slučaju goriva) i gustine sredine ρ_A (u konkretnom slučaju vazduha) kroz koju se tečnost kreće:

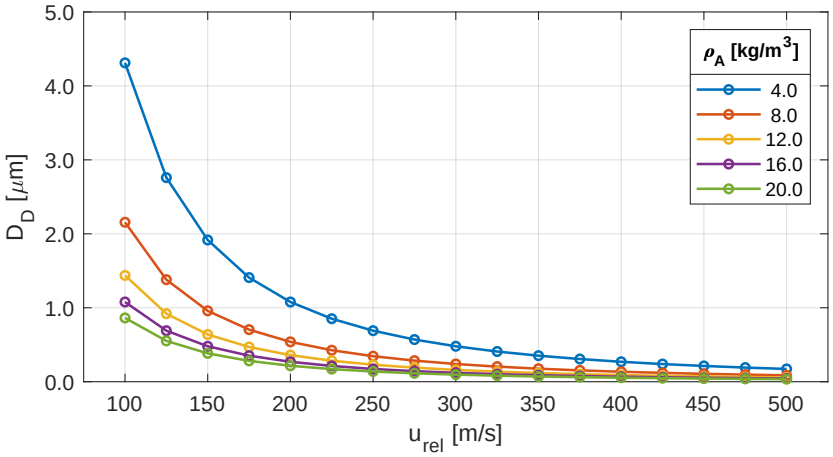
$$D_D \approx \frac{We_{crit} \cdot \sigma_F}{\rho_A \cdot u_{rel}^2} \tag{6.7}$$

U nastavku, prikazani su rezultati na slikama 6.1 i 6.2 i prikazana je funkcija - datoteka u kojoj su zadate karakteristike goriva u vidu strukture `FD FuelData.m`

(6.4) i glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti prečnika kapljice D_D `ReWeuD_01.m` (6.1).



Slika 6.1: Zavisnost prečnika kapljice standardnog motornog benzina od relativne brzine strujanja goriva u opsegu od 10 $^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$ do 100 $^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 1 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$ do 2 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$.



Slika 6.2: Zavisnost prečnika kapljice standardnog motornog benzina od relativne brzine strujanja goriva u opsegu od 100 $^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$ do 500 $^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 4 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$ do 20 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$.

Program 6.1: `ReWeuD_01.m`

```
% Program za određivanje prečnika kapljice u funkciji kritičnog Veberovog
% broja i relativne brzine
%
% Uticaj gustine sredine u kojoj se kreće gorivo

% S. J. Popović
```

```
% P. Mrđa
% 202403.v01
% Ref.

clc;
clear;
close all;

WeNumCrit=8.0;
% rhoGas=1.2;
% D_Droplet=30E-06;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='gasoline EN228';
[FP]=FuelData(FuelType);

% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel0]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
sigmaFuel=sigmaFuel0;
% rhoFuel=FP.rho;

%-------------------------------------------------------------
% Slučaj obrazovanja smeše u uslovima niskih brzina strujanja
% - obrazovanje smeše u usisnom vodu karburacijom ili ubrizgavanjem

% Definisanje opsega gustine gasa (vazduha)
rhoGas1=[1.0:0.25:2.0]';

% Definisanje opsega relativne brzine goriva
u_rel1_min=10.0;
u_rel1_max=100.0;
du_rel1=5.0;
u_rel1=u_rel1_min:du_rel1:u_rel1_max;

% Izračunavanje procenjene vrednosti prečnika izdvojene kapljice u
% zavisnosti od relativne brzine kretanja goriva i vazduha i gustine gasa (vazduha)
D_D1=(WeNumCrit.*sigmaFuel)./(rhoGas1.*(u_rel1.^2));
D_Droplet1=D_D1.*1.0E+06;

figure(1)
plot(u_rel1,D_Droplet1, '-o', 'MarkerSize', 4,'Linewidth',1.2)
grid on;
xlabel ('u_{rel} [m/s]');
ylabel('D_{D} [\mum]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')
xlim([(u_rel1_min-du_rel1),(u_rel1_max+du_rel1)])
LegendLabel=num2str(rhoGas1,'%.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
title(lgd,'\rho_{A} [kg/m^3]')

%-------------------------------------------------------------
% Slučaj obrazovanja smeše u uslovima visokih brzina strujanja
% - obrazovanje smeše direktnim ubrizgavanjem goriva pod visokim pritiskom
```

```
% Definisanje opsega gustine gasa (vazduha)
rhoGas2=[4.0 8.0 12.0 16.0 20.0]';
% Definisanje opsega relativne brzine goriva
u_rel2_min=100.0;
u_rel2_max=500.0;
du_rel2=25.0;
u_rel2=u_rel2_min:du_rel2:u_rel2_max;

D_D2=(WeNumCrit.*sigmaFuel)./(rhoGas2.*(u_rel2.^2));
D_Droplet2=D_D2.*1.0E+06;

figure(2)
plot(u_rel2,D_Droplet2, '-o', 'MarkerSize', 4,'Linewidth',1.2)
grid on;
xlabel ('u_{rel} [m/s]');
ylabel('D_{D} [\mum]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(u_rel2_min-du_rel2),(u_rel2_max+du_rel2)])
LegendLabel=num2str(rhoGas2,'%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
title(lgd,'\rho_{A} [kg/m^3]')
```

Program 6.2: `UnitConverterSurfTens.m`

```
function [SurfTensOut]=UnitConverterSurfTens(SurfTensIn, SurfTensUnitIn,
    SurfTensUnitOut)
% Funkcija za preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
% SurfTensIn        [ ]       Vrednost površinskog napona u jedinicama
    SurfTensUnitIn
% SurfTensUnitIn    [ ]       Ulazna jedinica za površinski napon
%                             mN/m
%
% SurfTensUnitOut   [ ]       Izlazna jedinica za površinski napon
%                             N/m
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje ulazne jedinice (SurfTensUnitIn)
    u [N/m]
switch SurfTensUnitIn
    case '[N/m]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[J/m2]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[mN/m]'
        CorrFactIn=1.0E-03;
    case '[dyn/cm]'
        CorrFactIn=1.0E-03;
    case '[erg/cm2]'
        CorrFactIn=1.0E-03;
    otherwise
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Ulazna jedinica nije prepoznata');
end
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje [N/m] u izlazne jedinice (
```

```
    SurfTensUnitOut)
switch SurfTensUnitOut
    case '[N/m]'
        CorrFactOut=1.0E+00;
    otherwise
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Izlazna jedinica nije prepoznata');
end
SurfTensOut=CorrFactIn.*CorrFactOut.*SurfTensIn;
```

6.1.2 Analiza uticaja relativne brzine kretanja dizel-goriva na prečnik izdvojene kapljice

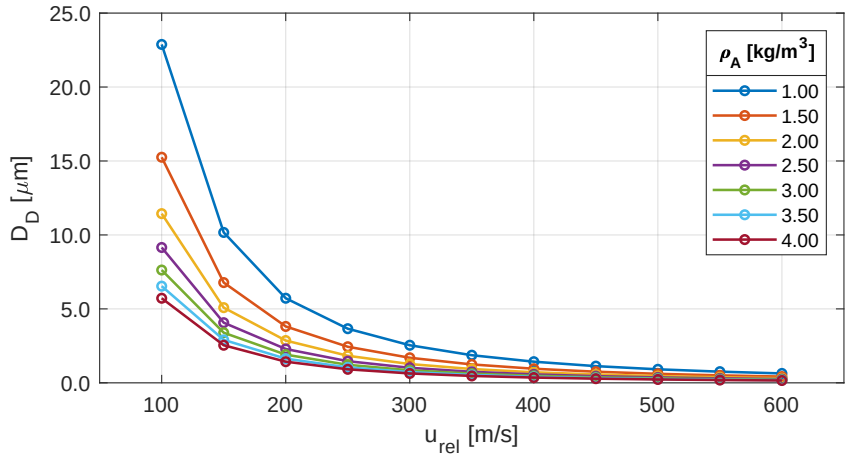
Koristeći prethodno razvijene funkcije `FuelData.m` (6.4) i rešenje prethodnog zadatka, sprovesti istovetnu analizu uticaja relativne brzine kretanja goriva na prečnik izdvojene kapljice za slučaj primene standardnog dizel-goriva, pretpostavljajući opseg relativnih brzina istrujavanja goriva od 100 $^{m}/_{s}$ do 600 $^{m}/_{s}$. Analizu sprovesti za sledeće uslove, tj. sledeće strategije ubrizgavanja goriva:

- Višestruko ubrizgavanje tokom punjenja cilindra, pretpostavljajući diskretne vrednosti gustine vazduha u opsegu od 1,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 4,0 $^{kg}/_{m^3}$;
- Višestruko ubrizgavanje tokom takta sabijanja, pretpostavljajući diskretne vrednosti gustine u opsegu od 5,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 65,0 $^{kg}/_{m^3}$.

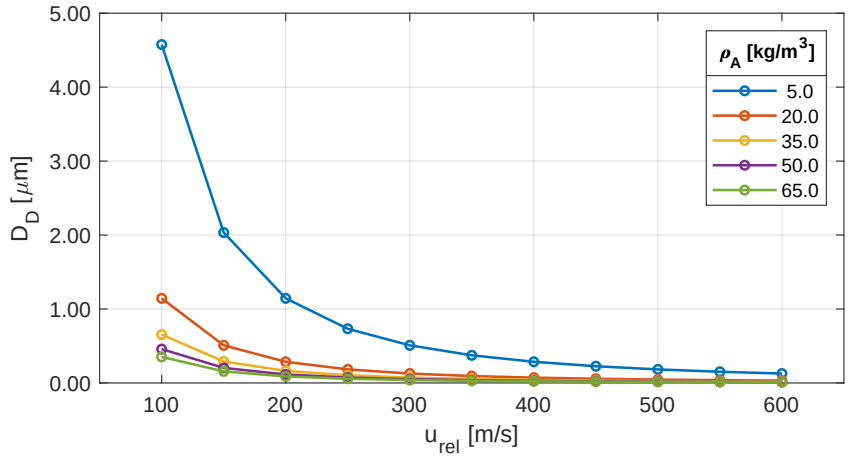
Rezultate prikazati grafički, odvojeno za svaki od navedenih slučajeva obrazovanja smeše.

Rešenje

Na slikama 6.3 i 6.4 prikazani su traženi dijagrami. U nastavku nalazi se glavni program `ReWeuD_02.m` (6.3) i prateća funkcija `FuelData.m` (6.4).



Slika 6.3: Zavisnost prečnika kapljice dizel-goriva od relativne brzine strujanja goriva za opseg gustine gasa od 1,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 4,0 $^{kg}/_{m^3}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 1 $^{kg}/_{m^3}$ do 4 $^{kg}/_{m^3}$.



Slika 6.4: Zavisnost prečnika kapljice dizel-goriva od relativne brzine strujanja goriva za opseg gustine gasa od 5,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 65,0 $^{kg}/_{m^3}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 5 $^{kg}/_{m^3}$ do 65 $^{kg}/_{m^3}$.

Program 6.3: `ReWeuD_02.m`

```
% Program za određivanje prečnika kapljice u funkciji kritičnog Veberovog
% broja i relativne brzine
%
% Uticaj gustine sredine u kojoj se kreće gorivo

% S. J. Popović
% P. Mrđa
% 202403.v01
% Ref.
```

```
clc;
clear;
close all;

WeNumCrit=8.0;
% rhoGas=1.2;
% D_Droplet=30E-06;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel0]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
sigmaFuel=sigmaFuel0;
% rhoFuel=FP.rho;

%-------------------------------------------------------------
% Slučaj obrazovanja smeše u uslovima niskih brzina strujanja - obrazovanje
% smeše tokom procesa usisavanja (PCCI - Pre-mixed Charge Compression Ignition)

% Definisanje opsega gustine gasa (vazduha)
rhoGas1=[1.0:0.5:4.0]';

% Definisanje opsega relativne brzine goriva
u_rel1_min=100.0;
u_rel1_max=600.0;
du_rel1=50.0;
u_rel1=u_rel1_min:du_rel1:u_rel1_max;

% Izračunavanje procenjene vrednosti prečnika izdvojene kapljice u
% zavisnosti od relativne brzine kretanja goriva i vazduha i gustine gasa (vazduha)
D_D1=(WeNumCrit.*sigmaFuel)./(rhoGas1.*(u_rel1.^2));
D_Droplet1=D_D1.*1.0E+06;

figure(1)
plot(u_rel1,D_Droplet1, '-o', 'MarkerSize', 4,'LineWidth',1.2)
grid on;
xlabel ('u_{rel} [m/s]');
ylabel('D_{D} [\mum]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.1f')
xlim([(u_rel1_min-du_rel1),(u_rel1_max+du_rel1)])
LegendLabel=num2str(rhoGas1,'%.2f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
title(lgd,'\rho_{A} [kg/m^3]')

%-------------------------------------------------------------
% Slučaj obrazovanja smeše u uslovima visokih brzina strujanja - obrazovanje
% smeše direktnim ubrizgavanjem goriva pod visokim pritiskom

% Definisanje opsega gustine gasa (vazduha)
rhoGas2=[5.0 20.0 35.0 50.0 65.0]';
```

```
D_D2=(WeNumCrit.*sigmaFuel)./(rhoGas2.*(u_rel1.^2));
D_Droplet2=D_D2.*1.0E+06;

figure(2)
plot(u_rel1,D_Droplet2, '-o', 'MarkerSize', 4,'LineWidth',1.2)
grid on;
xlabel ('u_{rel} [m/s]');
ylabel('D_{D} [\mum]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.2f');
xlim([(u_rel1_min-du_rel1),(u_rel1_max+du_rel1)])
LegendLabel=num2str(rhoGas2,'%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
title(lgd,'\rho_{A} [kg/m^3]')
```

Program 6.4: `FuelData.m`

```
function [FD]=FuelData(FuelType)
% Funkcija za zadavanje karakteristika goriva za proračun raspada mlaza i kapljice
% Izlazna struktura: FP (FuelProperties)
% FD.FuelType
% FD.Viscosity
% FD.ViscUnit
% FD.ViscUnitSI
% FD.ViscType
% FD.SurfTens
% FD.SurfTensUnit
% FD.SurfTensUnitSI
% FD.rho
% FD.rhoUnit
% FD.rhoUnitSI

FD.FuelType=FuelType;

switch FuelType
    case 'diesel'
disp('FD.FuelType=diesel')
% % ---------------------------
% % Dizel-gorivo EN590 ED2023/L
% % FD.FuelType='diesel';
% FD.Viscosity=2.485;
% FD.ViscUnit='[mm2/s]';
% FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
% FD.ViscType='kin';
% % ---------------------------
% FD.SurfTens=28.6;
% FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
% FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% % ---------------------------
% FD.rho=833.0;
% FD.rhoUnit='[kg/m3]';
% FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';
```

```
% % --------------------------
% % Dizel-gorivo EN590 GD2023/L
% % FD.FuelType='diesel';
% FD.Viscosity=2.429;
% FD.ViscUnit='[mm2/s]';
% FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
% FD.ViscType='kin';
% % --------------------------
% FD.SurfTens=28.6;
% FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
% FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% % --------------------------
% FD.rho=834.2;
% FD.rhoUnit='[kg/m3]';
% FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';

% --------------------------
% A Review of the Behavior of Fuel Drops in a Fuel Spray in the Context of Biofuels
% Riho Kägo, Risto Ilves, Arne Küüt, Jüri Olt
% Journal of Power Technologies 99 (3) (2019) 218-230
% --------------------------
% Dizel-gorivo EN590
% FD.FuelType='diesel';
FD.Viscosity=2.827;
FD.ViscUnit='[mm2/s]';
FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
FD.ViscType='kin';
% --------------------------
FD.SurfTens=20.0;
FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% --------------------------
FD.rho=837.0;
FD.rhoUnit='[kg/m3]';
FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';
% --------------------------


    case 'C7H14'
% Hepten
% --------------------------
% FD.FuelType='C7H14';
FD.Viscosity=3.11;
FD.ViscUnit='[mm2/s]';
FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
FD.ViscType='kin';
% --------------------------
FD.SurfTens=28.6;
FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% --------------------------
FD.rho=825.0;
FD.rhoUnit='[kg/m3]';
FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';
% --------------------------
```

```
    case 'C8H18'
% Oktan
% --------------------------
% FD.FuelType='C8H18';
FD.Viscosity=3.11;
FD.ViscUnit='[mm2/s]';
FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
FD.ViscType='kin';
% --------------------------
FD.SurfTens=28.6;
FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% --------------------------
FD.rho=825.0;
FD.rhoUnit='[kg/m3]';
FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';
% --------------------------
    case 'C10H22'
                % Za doradu
    case 'C12H24'
% --------------------------
% FD.FuelType='C12H24';
FD.Viscosity=3.11;
FD.ViscUnit='[mm2/s]';
FD.ViscUnitSI='[m2/s]';
FD.ViscType='kin';
% --------------------------
FD.SurfTens=28.6;
FD.SurfTensUnit='[mN/m]';
FD.SurfTensUnitSI='[N/m]';
% --------------------------
FD.rho=825.0;
FD.rhoUnit='[kg/m3]';
FD.rhoUnitSI='[kg/m3]';
% --------------------------
    otherwise
end
```

6.1.3 Uticaj prečnika mlaznice na brzinu istrujavanja, Veberov i Rejnoldsov broj za primenu dizel-goriva

Sprovesti analizu uticaja prečnika mlaznice i pritiska goriva u akumulatoru visokopritisnog akumulatorskog sistema za ubrizgavanje goriva na relativnu brzinu istrujavanja goriva, Rejnoldsov broj, Veberov tečni i Veberov gasni broj. Pretpostaviti promenu prečnika izlaznog preseka mlaznice u opsegu od 100 μm do 300 μm i pritisak ubrizgavanja u opsegu od 20 MPa do 200 MPa. Pretpostaviti strategiju jednostrukog ubrizgavanja u neposrednoj okolini SMT pri pritisku od 6,5 MPa i gustini gasa u cilindru od 65 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$. Rezultate analize prikazati grafički, na sledeći način:

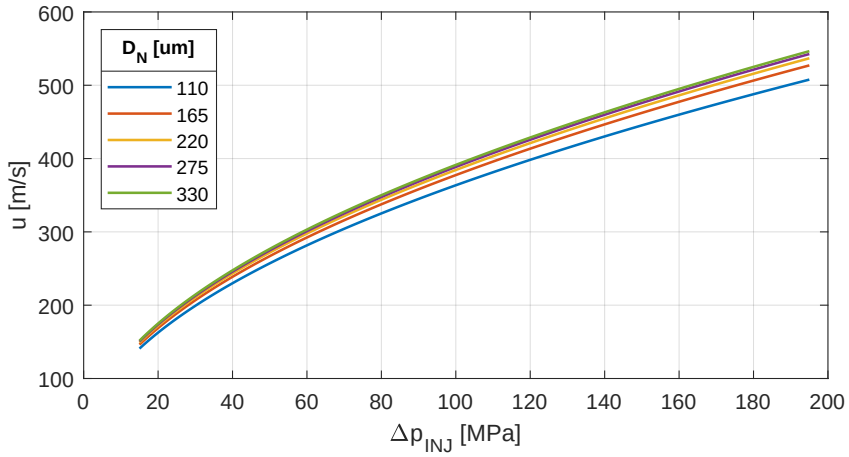
- Dijagram 1: zavisnost relativne brzine strujanja goriva u zavisnosti od pada

pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice;

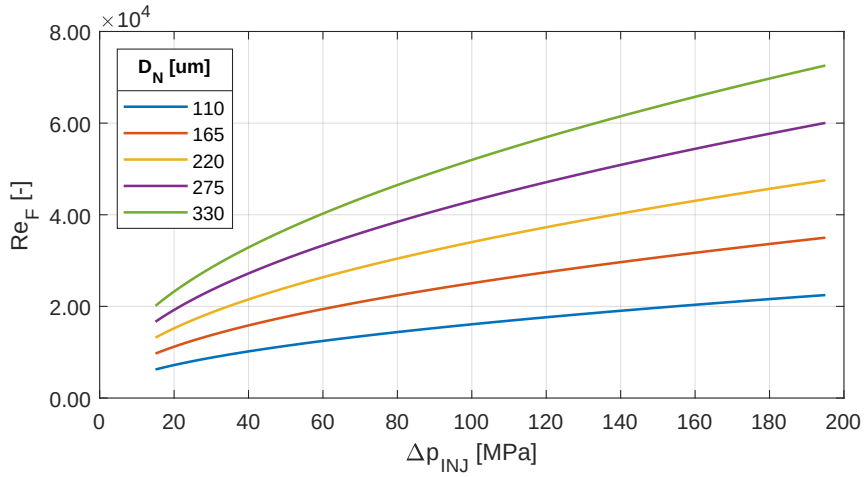
- Dijagram 2: zavisnost Rejnoldsovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice;
- Dijagram 3: zavisnost tečnog i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

Rešenje

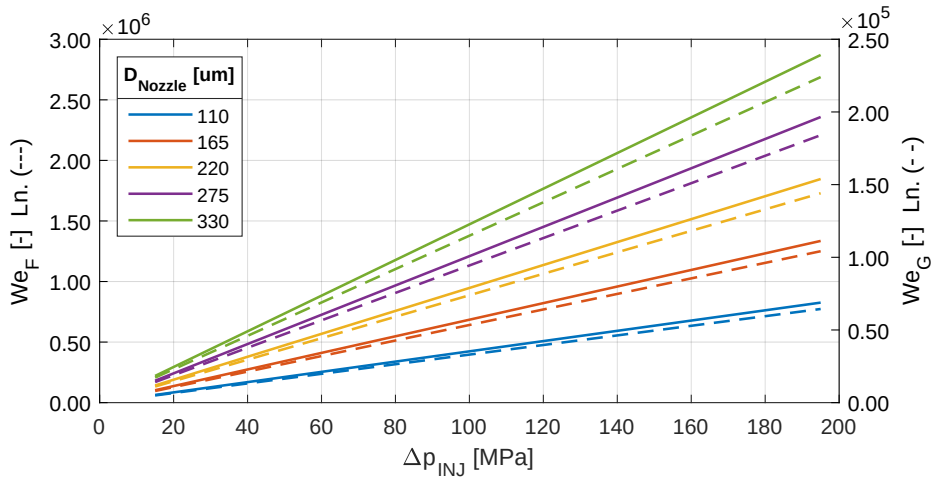
Na slikama 6.5, 6.6 i 6.7 prikazani su traženi rezultati. Glavni program `uReWe_01.m` (6.5) i prateće funkcije `NozzleData.m` (6.6) `UnitConverterViscosity.m` (6.7), `UnitConverterDensity.m` (6.8), `NozzleVelocityTh.m` (6.9), `dlqReynolds.m` (6.10) i `dlqWeber.m` (6.11) nalaze se u nastavku.



Slika 6.5: Relativna brzina strujanja dizel-goriva u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.



Slika 6.6: Rejnoldsov broj dizel-goriva u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.



Slika 6.7: Zavisnost tečnog (za dizel-gorivo) i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

Program 6.5: `uReWe_01.m`

```
% Program za određivanje brzine strujanja goriva, Rejnoldsovog i Veberovog
% broja u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i prečnika otvora mlaznice
%
%
% S. J. Popović
% P. Mrđa
% 202403.v01
% Ref.

clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega pritiska ubrizgavanja (pritisak u akumulatoru,
% pritisak ispred mlaznice brizgača)
p_Rail_min=200E+05;
p_Rail_max=2000.0E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_Rail_min:dp_Rail:p_Rail_max;
% Definisanje pritiska gasa u komori
p_Gas=50.0E+05;
rhoGas=65.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
```

```
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel0]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel0]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
rhoFuel=rhoFuel0;
sigmaFuel=sigmaFuel0;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
% Definisanje opsega prečnika otvora mlaznice brizgača
D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.5:ND.dOut.*3.0]';
[DN_m DN_n]=size(D_Nozzle);

%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
[u]=NozzleVelocity(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,ND.L,D_Nozzle);

%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje Rejnoldsovog broja
% [ReNum]=dlqReynolds(length, velocity, viscosity, density)
[ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_Nozzle),u,niFuel,0.0);

% Izračunavanje razlike pritisaka na mlaznici brizgača
dpINJ=(p_Rail-p_Gas)*1.0E-06;

% Dijagramski prikaz u=f(dp,D_Nozzle)
figure(1)
plot(dpINJ,u,'-','LineWidth',1.2);
grid on;
xlabel ('\Deltap_{INJ} [MPa]');
ylabel('u [m/s]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')
LegendLabel=num2str(D_Nozzle*1000000);
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,'D_{N} [um]')

% Dijagramski prikaz ReNum=f(dp,D_Nozzle)
figure(2)
plot(dpINJ,ReNumLiquid,'-','LineWidth',1.2);
grid on;
xlabel ('\Deltap_{INJ} [MPa]');
ylabel('Re_{F} [-]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel=num2str(D_Nozzle*1000000);
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,'D_{N} [um]')


%-------------------------------------------------------------
```

```
% Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
[WeNumLiquid]=dlqWeber((D_Nozzle),u,rhoFuel,sigmaFuel);
%-------------------------------------------------------
% Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
[WeNumGas]=dlqWeber((D_Nozzle),u,rhoGas,sigmaFuel);

% Dijagramski prikaz WeNum=f(dp,D_Nozzle)
figure(3)
yyaxis left
colororder('default');
plot(dpINJ,WeNumLiquid,'-','LineWidth',1.2);
grid on;
xlabel ('\Deltap_{INJ} [MPa]');
ylabel('We_{F} [-]  Ln. (---)');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.2f')
yyaxis right
colororder('default');
plot(dpINJ,WeNumGas,'--','LineWidth',1.2);
ylabel('We_{G} [-]  Ln. (- -)');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.2f')
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
ax.YAxis(2).Color ='k';
LegendLabel=num2str(D_Nozzle*1000000);
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,'D_{N} [um]')
```

Program 6.6: `NozzleData.m`

```
function [ND]=NozzleData()
% Funkcija za zadavanje karakteristika mlaznice za proračun raspada mlaza i
    kapljice
% Izlazna struktura: ND (NozzleData)
% ND.dIn              [m]    Prečnik ulaznog otvora mlaznice
% ND.r0In             [m]    Radijus ivice ulaznog otvora mlaznice
% ND.dOut             [m]    Prečnik izlaznog otvora mlaznice
% ND.L                [m]    Dužina mlaznice
% ND.L_d              [-]    Odnos dužine i prečnika mlaznice
% ND.zNozzle          [-]    Broj mlaznica

% ND.dIn=255.0E-06;
% ND.r0In=10.0E-06;
% ND.dOut=240.0E-06;

ND.dIn=110.0E-06;
ND.r0In=10.0E-06;
ND.dOut=110.0E-06;

% Characterization of the spray cone angles of fuels with nanoparticle additives
% Jude Asibor, Khushboo Pandey, Saptarshi Basu, Nwabueze Emekwuru
% str. 3
```

```
ND.dSAC=1000.0E-06;
ND.L=10.*ND.dOut;
ND.L_d=ND.L./ND.dOut;
ND.zNozzle=6;
```

Program 6.7: `UnitConverterViscosity.m`

```
function [ViscOut]=UnitConverterViscosity(ViscIn, ViscUnitIn, ViscUnitOut, ViscType
    )
% PM 20250225:
% Prepraviti da budu posebne funkcije za kinematsku i dinamičku viskoznost.
%
% Funkcija za preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
% ViscIn        [ ]       Vrednost viskoznosti u jedinicama ViscUnitIn
% ViscUnitIn    [ ]
%                         Ulazna jedinica za kinematsku viskoznost
%                            S..... Stokes
%                            cS .... centiStokes
%                            mm2/s .
%                            m2/s
%                         Ulazna jedinica za dinamičku viskoznost
%                         dopuniti
% ViscUnitOut   [ ]
%                         Izlazna jedinica za kinematsku viskoznost
%                            S..... Stokes
%                            cS .... centiStokes
%                            mm2/s .
%                            m2/s
%                         Izlazna jedinica za dinamičku viskoznost
%                         dopuniti
% ViscType      [ ]
%                         kin ..... kinematska viskoznost
%                         dyn ..... dinamička viskoznost

% Opcija #1: preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
switch ViscType
    % case 'Default'
    case 'kinematic'
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje ulazne jedinice (ViscUnitIn) u [
    m2/s]
    switch ViscUnitIn
        case '[St]'
            CorrFactIn=1.0E-04;
        case '[cSt]'
            CorrFactIn=1.0E-06;
        case '[mm2/s]'
            CorrFactIn=1.0E-06;
        case '[m2/s]'
            CorrFactIn=1.0E-00;
        case 'mPas'
            CorrFactIn=1.0E-03;
        case 'Pas'
            CorrFactIn=1.0E+00;
```

```
    end
    % Određivanje faktora korekcije za preračunavanje [m2/s] u izlazne jedinice (
        ViscUnitOut)
    switch ViscUnitOut
        case '[St]'
            CorrFactOut=1.0E+04;
        case '[cSt]'
            CorrFactOut=1.0E+06;
        case '[mm2/s]'
            CorrFactOut=1.0E+06;
        case '[m2/s]'
            CorrFactOut=1.0E-00;
        case 'mPas'
            CorrFactOut=1.0E+03;
        case 'Pas'
            CorrFactOut=1.0E-00;
    end
% Opcija #2: preračunavanje jedinica dinamičke viskoznosti
% - dopuniti
    otherwise
end

ViscOut=CorrFactIn.*CorrFactOut.*ViscIn;
```

Program 6.8: `UnitConverterDensity.m`

```
function [DensityOut]=UnitConverterDensity(DensityIn, DensityUnitIn, DensityUnitOut
    )
% Funkcija za preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
% DensityIn         [ ]       Vrednost površinskog napona u jedinicama
    SurfTensUnitIn
% DensityUnitIn     [ ]       Ulazna jedinica za gustinu
%                             [kg/m3]
%                             []
%
% DensityUnitOut    [ ]       Izlazna jedinica za gustinu
%                             [kg/m3]
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje ulazne jedinice (SurfTensUnitIn)
    u [N/m]
switch DensityUnitIn
    case '[kg/m3]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[kg/dm3]'
        CorrFactIn=1.0E+03;
    case '[kg/cm3]'
        CorrFactIn=1.0E+06;
    case '[g/m3]'
        CorrFactIn=1.0E-03;
    case '[g/dm3]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[g/cm3]'
        CorrFactIn=1.0E+03;
    otherwise
```

```
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Ulazna jedinica nije prepoznata');
end
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje [N/m] u izlazne jedinice (
    SurfTensUnitOut)
switch DensityUnitOut
    case '[kg/m3]'
        CorrFactOut=1.0E+00;
    otherwise
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Izlazna jedinica nije prepoznata');
end
DensityOut=CorrFactIn.*CorrFactOut.*DensityIn;
```

Program 6.9: `NozzleVelocityTh.m`

```
function [u_Nozzle]=NozzleVelocityTh(p_Rail,p_Gas,rhoFuel)
% Funkcija za izračunavanje brzine strujanja kroz mlaznicu brizgača
% u_Nozzle              [m/s]   Brzina strujanja u mlaznici
% D_Nozzle              [m]     Prečnik mlaznice
% DischargeCoeff        [-]     Koeficijent protoka
% p_Rail                [Pa]    Pritisak u akumulatoru (pritisak ispred brizgača)
% p_Gas                 [Pa]    Pritisak gasa u cilindru (pritisak iza brizgača)
% rhoFuel               [kg/m3] Gustina goriva
% ------------------------------------------------------------
% Teorijska osnova: Bernulijeva (Bernoulli) jednačina
% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja u mlaznici
% Mithun Das*, Mouktik Sarkar, Amitava Datta, Apurba Kumar Santra
% Study on viscosity and surface tension properties of biodiesel-diesel
% blends and their effects on spray parameters for CI engines
% Fuel 220 (2018) 769-779
% Cd=0.827-0.0085.*(L_Nozzle./D_Nozzle);

% Wei Zeng a, Min Xu a, Ming Zhang a, Yuyin Zhang a, David J. Cleary b
% Macroscopic characteristics for direct-injection multi-hole sprays using
% dimensionless analysis
% Experimental Thermal and Fluid Science 40 (2012) 81-92
% Cd=1./(1.23+58.0.*(L_Nozzle./D_Nozzle)./ReNum);
% Cd=1.0;
u_Nozzle=sqrt(2.0.*(p_Rail-p_Gas)./rhoFuel);
```

Program 6.10: `dlqReynolds.m`

```
function [ReNum]=dlqReynolds(length, velocity, viscosity, density)
% Funkcija za izracunavanje Rejnoldsovog broja
%-------------------------------------------
% ReNum        [-]       Rejnoldsov broj (DimensionLess Quantity REynolds Number)
% length            [m]       karakteristična dužina
% velocity            [m/s]     karakteristična brzina
% density          [kg/m^3]  gustina fluida
% viscosity                    viskoznost fluida
% Opt          'KinVisc' izbor opcije izračunavanja preko kinematske viskoznosti
```

```
    fluida
%               [m2/s]
%               'DinVisc' izbor opcije izračunavanja preko dinamičke viskoznosti
    fluida
%               [kg/m*s]

if (viscosity<=0.0)
    disp('Funkcija dlqReynolds: pogrešan unos podataka (visc).')
elseif (length<=0.0)
    disp('Funkcija dlqReynolds: pogrešan unos podataka (L).')
elseif (velocity<=0.0)
    disp('Funkcija dlqReynolds: pogrešan unos podataka (u).')
elseif (density<=0.0)
        ReNum=length.*velocity./viscosity;
%        disp('opcija izračunavanja preko kinematske viskoznosti')
elseif (density>0.0)
        ReNum=length.*velocity.*density./viscosity;
%        disp('opcija izračunavanja preko dinamičke viskoznosti')
else
        disp('Funkcija dlqReynolds: pogrešan unos podataka.')
end
```

Program 6.11: `dlqWeber.m`

```
function [WeNum]=dlqWeber(L, u, rho, sigma)
% Funkcija za izracunavanje Weberovog broja
%-------------------------------------------
% WeNum         [-]       Veberov broj (DimensionLess Quantity Weber Number)
% L             [m]       karakteristična dužina
% u             [m/s]     karakteristična brzina
% rho           [kg/m^3]  gustina fluida
% sigma         [N/m]     površinski napon

% Stiesch: Modeling Engine Spray and Combustion, str.136

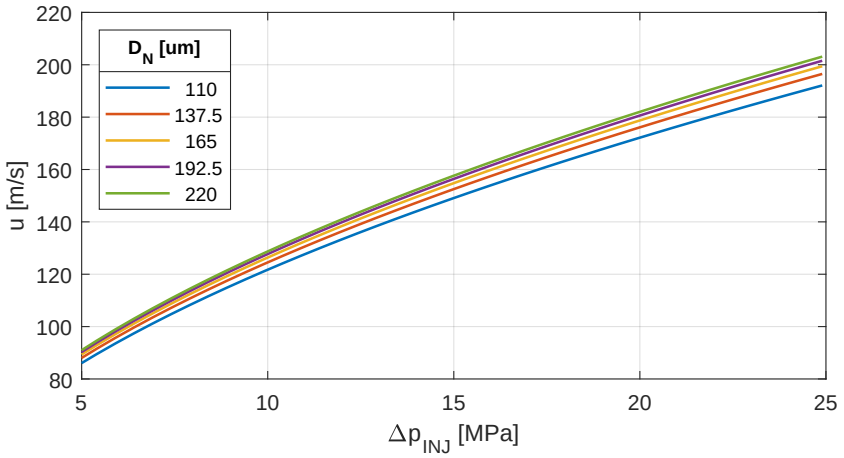
if (sigma<=0.0)
    disp('Funkcija dlqWeber: pogrešan unos podataka (sigma).')
elseif (rho<=0.0)
    disp('Funkcija dlqWeber: pogrešan unos podataka (rho).')
elseif (u<=0.0)
    disp('Funkcija dlqWeber: pogrešan unos podataka (u).')
elseif (L<=0.0)
    disp('Funkcija dlqWeber: pogrešan unos podataka (L).')
%----------------------------
elseif (sigma>0.0)
    WeNum=rho.*(u.^2).*L./sigma;
%----------------------------
else
    disp('Funkcija dlqWeber: pogrešan unos podataka.')
end
```

6.1.4 Uticaj prečnika mlaznice na brzinu istrujavanja, Veberov i Rejnoldsov broj za primenu motornog benzina

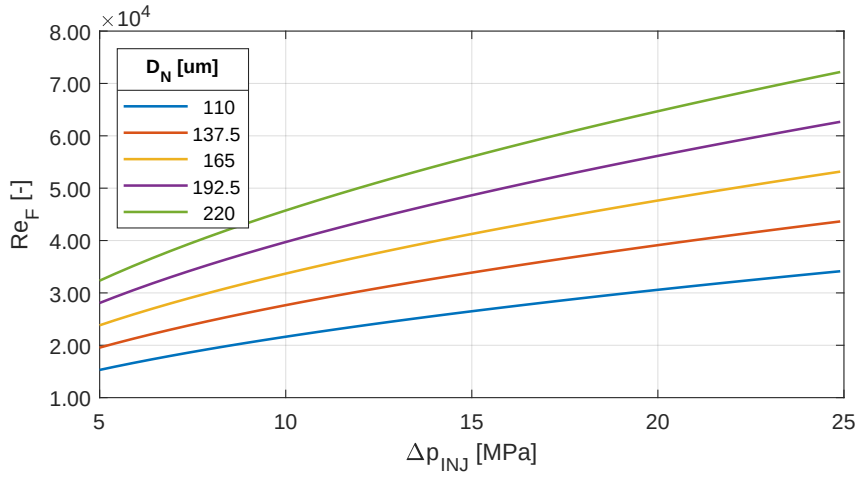
Po uzoru na zadatak 6.1.3 i priloženi program 6.5, sprovesti analizu uticaja prečnika mlaznice i pritiska goriva u akumulatoru sistema za direktno ubrizgavanje motornog benzina na relativnu brzinu istrujavanja goriva, Rejnoldsov broj, Veberov tečni i Veberov gasni broj. Pretpostaviti promenu prečnika izlaznog preseka mlaznice u opsegu od 100 μm do 200 μm i pritisak ubrizgavanja u opsegu od 5 MPa do 25 MPa. Pretpostaviti strategiju jednostrukog ubrizgavanja tokom punjenja cilindra pri pritisku od 0,1 MPa i gustini gasa u cilindru od 1,2 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$. Rezultate analize prikazati grafički, na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost relativne brzine strujanja goriva u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice;
- Dijagram 2: zavisnost Rejnoldsovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice;
- Dijagram 3: zavisnost tečnog i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

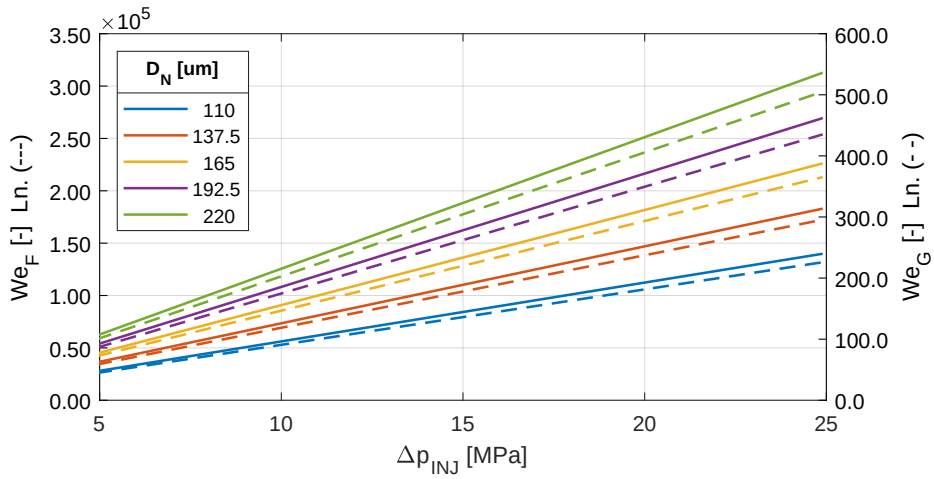
Rešenje



Slika 6.8: Relativna brzina strujanja motornog benzina u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.



Slika 6.9: Rejnoldsov broj za motorni benzin u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.



Slika 6.10: Zavisnost tečnog (za motorni benzin) i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

6.1.5 Analiza bezdimenzijskih veličina za slučaj ubrizgavanja benzina u završnoj fazi sabijanja

Koristeći prethodno pripremljene funkcije za zadavanje karakteristika goriva `FuelData.m` (6.4) i mlaznice brizgača `NozzleData.m` (6.6) i podatke i program za proračun uticaja prečnika mlaznice na karakteristične bezdimenzione veličine (Re, We) iz prethodnog zadatka, sprovesti dodatnu identičnu analizu za slučaj direktnog ubrizgavanja motornog benzina u završnoj fazi sabijanja (okolina SMT). Pretpostaviti pritisak od 3 MPa i gustinu od 20 $^{kg}/_{m^3}$. Uporediti rezultate za obe primenjene strategije ubrizgavanja i dati zaključak o promeni tečnog i gasnog Veberovog broja.

6.2 Koeficijent pražnjenja i kavitacija u kanalu mlaznice

6.2.1 Poređenje modela Hol, Nakajama, Asimin i Lihtarovič

Napisati funkcije za izračunavanje koeficijenta pražnjenja koristeći modele Hola [39], Nakajame, Asimina i Lihtaroviča, a zatim sprovesti dva nezavisna proračuna koeficijenta pražnjenja cilindrične mlaznice:

- Za opseg pada pritiska na mlaznici od 20 MPa do 200 MPa;
- Za opseg Rejnoldsovog broja od 10 do 10^5.

Pretpostaviti izlazni prečnik mlaznice od $100 \cdot 10^{-6}$ m i odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice 4 i isticanje u sredinu na atmosferskom pritisku. Zanemariti uticaj pritiska goriva na promenu gustine i viskoznosti goriva i uticaj kavitacije na suženje mlaza. Rezultate proračuna prikazati grafički u zavisnosti od Rejnoldsovog broja, na posebnim dijagramima sa linearnom i logaritamskom razmerom za režime strujanja.

Rešenje

Izrazi za navedena četiri modela [39] koriste se kao opšti izrazi za proračun koeficijenta pražnjenja mlaznice i njihova verifikacija nije obavljena na slučajevima koji se odnose na sisteme ubrizgavanja kod motora SUS. Međutim, sva četiri navedena izraza imaju solidnu teorijsku osnovu i predstavljaju polazne tačke u definisanju i proveri empirijskih i poluempirijskih modela koji su namenski razvijeni za slučajeve ubrizgavanja goriva. Izrazi su dati u sledećim oblicima jednačina za modele Hola (6.8), Nakajame (6.9 i 6.10), Asimina (6.11), Lihtaroviča (6.12, 6.13 i 6.14) i Nurik-Lihtaroviča (6.15):

$$C_D = 1 - 0{,}184 \cdot \left(\frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} - 1 + 1{,}11 \cdot Re^{0{,}25} \right)^{0{,}8} \cdot Re^{-0.2} \;\mid\; Re > 10^4 \tag{6.8}$$

$$C_D = \frac{Re^{0{,}833}}{17.11 \cdot \dfrac{L_N}{D_{N,\text{out}}} + 1{,}65 \cdot Re^{0.8}} \;\mid\; Re < 7 \cdot 10^3 \tag{6.9}$$

$$C_{D,\max} = 0{,}868 - 0{,}0425 \cdot \frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} \;\mid\; Re > 7 \cdot 10^3 \tag{6.10}$$

$$\frac{1}{C_D} = 1{,}23 + \frac{58}{Re} \cdot \frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} \;\mid\; 100 < Re < 1{,}5 \cdot 10^3 \tag{6.11}$$

$$\frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_{D,\max}} + \frac{20}{Re} \cdot \left(1 + 2{,}25 \cdot \frac{L_N}{D_{N,\text{out}}}\right) - \frac{0{,}005 \cdot \dfrac{L_N}{D_{N,\text{out}}}}{1 + 7{,}5 \cdot \left(\log\left(0{,}00015 \cdot Re\right)\right)^2} \tag{6.12}$$

$$2 < Re < 2 \cdot 10^4 \tag{6.13}$$

$$2 < \frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} < 10 \tag{6.14}$$

$$\frac{1}{C_D} = \sqrt{1 - \left(\frac{D_{N,\text{out}}}{D_{N,\text{in}}}\right)^4} \cdot \left(\frac{1}{C_{D,\max}} + \frac{20}{Re} \cdot \left(1 + 2{,}25 \cdot \frac{L_N}{D_{N,\text{out}}}\right) - \frac{0{,}005 \cdot \dfrac{L_N}{D_{N,\text{out}}}}{1 + 7{,}5 \cdot \left(\log\left(0{,}00015 \cdot Re\right)\right)^2} \right) \tag{6.15}$$

gde su veličine definisane uopšteno na sledeći način:

$D_{N,\text{in}}$ [m] Prečnik ulaznog otvora mlaznice;

$D_{N,\text{out}}$ [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice;

L_N [m] Dužina kanala mlaznice;

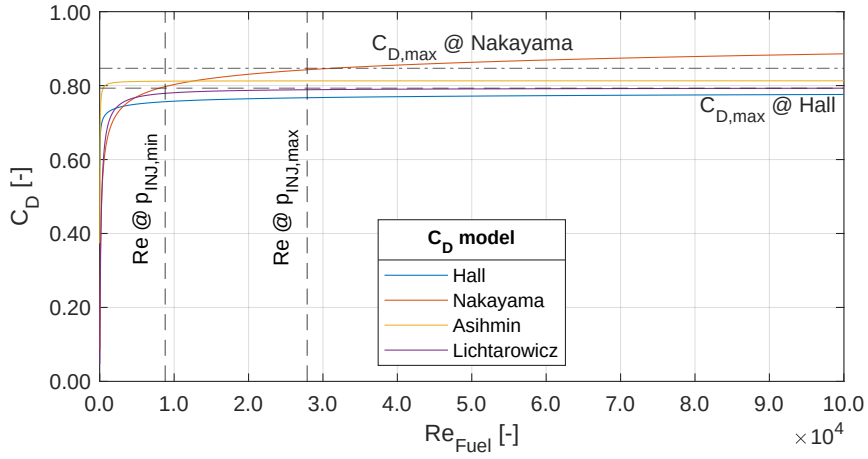
Re [−] Rejnoldsov broj za tečnost;

C_D [−] Koeficijent pražnjenja mlaznice.

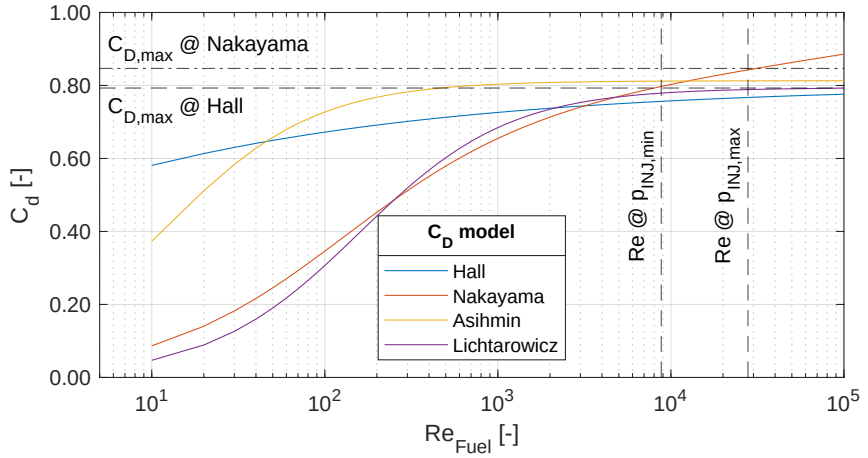
Rezultati proračuna koeficijenta pražnjenja mlaznice u zavisnosti od Rejnoldsovog broja prikazani su na dijagramima na slici 6.11 i 6.12, sa linearnom i logaritamskom razmerom za Rejnoldsov broj. Na oba dijagrama posebno su naznačene i vrednosti Rejnoldsovog broja koje odgovaraju graničnim vrednostima opsega u kome je zadat pritisak u akumulatoru. Ako se posmatra dijagram na slici 6.11, može se konstatovati da su razlike evidentne, upravo u području režima strujanja od interesa za rad sistema za ubrizgavanje. Međutim, svi navedeni modeli daju vrednost koeficijenta pražnjenja od oko 0,8 (od 0,76 do 0,85), uz naznaku da za modele Hol i Nakajama postoje definisane i granične vrednosti. Međutim, suštinske razlike se uočavaju ako se rezultati prikažu u logaritamskim koordinatama (slika 6.12). Modeli Hol i Asimin daju neproporcionalno velike vrednosti koeficijenta pražnjenja u oblasti niskih Rejnoldsovih brojeva, što je i razumljivo jer je verifikacija modela obavljena za oblast razvijenog turbulentnog strujanja.

Modeli Nakajama, a posebno model Lihtarovič daju korektnu detaljnu zavisnost koeficijenta pražnjenja na širokom opsegu, uz napomenu da model Nakajama ima

ograničenu primenu za više brzinske režime (usvaja se maksimalna vrednost definisana posebnim izrazom). U području niskih Rejnoldsovih brojeva modeli su saglasni i mogu predstavljati prvi izbor za proračun koeficijenta pražnjenja mlaznice u uslovima strujanja pri otvaranju i zatvaranju brizgača (kritični režimi niskih brzina strujanja pri malim visinama izdizanja iglice brizgača).



Slika 6.11: Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (linearna osa) za različite modele.



Slika 6.12: Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (logaritamska osa) za različite modele.

Program 6.12: `DC_001.m`

```
clear;
close all;
clc;
```

```
% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);
p_Gas=1.0E+05;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1';
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType)
    ;

% Definisanje podataka o brizgaču (mlaznici)
D_Nozzle_In=1.0.*100.0E-06;
D_Nozzle_Out=1.0.*100.0E-06;
L_Nozzle=4.*D_Nozzle_Out;
r0_Nozzle=15.*100.0E-06;

% Definisanje opsega brzine strujanja u mlaznici

% Definisanje opsega Rejnoldsovog broja
ReNumMin=10.0;
ReNumMax=100000.0;
dReNum=10.0;
ReNum=ReNumMin:dReNum:ReNumMax;
[m_Re n_Re]=size(ReNum);

% Određivanje opsega Rejnoldsovog broja za teorijsku brzinu strujanja u
% mlaznici
[u_NozzleCalc]=NozzleVelocityTh(p_Rail,p_Gas,rhoFuel);
[ReNumCalc]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out, u_NozzleCalc, niFuel, 0);
ReNumMin0=min(ReNumCalc)
ReNumMax0=max(ReNumCalc)

ReNumMin1=floor(min(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03
ReNumMax1=ceil(max(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03
%-------------------------------------------------------
% Modeli koji ne uzimaju u obzir efekat kavitacije
for i=1:1:n_Re
    % Izračunavanje Cd @modelHall
    % Prečnik mlaznice je u [mm]!!!
    [Cd_Hall(1,i), CdMax_Hall]=DC_Hall(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum(1,i));

    % Izračunavanje Cd @modelNakayama
    [Cd_Nakayama(1,i), CdMax_Nakayama]=DC_Nakayama(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum(1,
        i));

    % Izračunavanje Cd @modelAsihmin
    [Cd_Asihmin(1,i)]=DC_Asihmin(D_Nozzle_Out, L_Nozzle, ReNum(1,i));
```

```
    % Izračunavanje Cd @modelArcoumanis
    %     [Cd_Arcoumanis(1,i)]=DC_Arcoumanis(D_Nozzle_Out*1000, ReNum(1,i));

    % Izračunavanje Cd @modelLichtarowicz
    [Cd_Lichtarowicz(1,i)]=DC_Lichtarowicz(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum(1,i));

% % Izračunavanje Cd @modelKuensberg
% [Cd_Kuensberg]=DC_KuensbergNCav(r0_Nozzle, L_Nozzle, D_Nozzle_In, D_Nozzle_Out,
    ReNum);
%
% % Izračunavanje Cd @modelDesantes
% [Cd_Desantes]=DC_DesantesNCav(r0_Nozzle, L_Nozzle, D_Nozzle_In, D_Nozzle_Out,
    ReNum);
end
% %------------------------------------------------------------
% % Modeli koji uzimaju u obzir efekat kavitaciije
% % Izračunavanje Cd @modelSalvador
% NeedleLift=0.5E-03;
% [Cd_Salvador]=DC_SalvadorCav(ND.r0In*1000, NeedleLift*1000, ND.dIn*1000, ND.dOut
    *1000, ReNum);
% % [Cd_Salvador]=DC_Salvador(ND.r0In, NeedleLift, ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
%
% % Izračunavanje Cd @modelPayri
% [Cd_PayriCon]=DC_PayriCav2(ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
% [Cd_PayriCil]=DC_PayriCav2(ND.dOut, ND.dOut, ReNum);



colororder('default');
figure(1);
    plot(ReNum,Cd_Hall);
    grid on;
    hold on;
    plot(ReNum,Cd_Nakayama);
    hold on;
    plot(ReNum,Cd_Asihmin);
    hold on;
%     plot(ReNum,Cd_Arcoumanis);
%     hold on;
    plot(ReNum,Cd_Lichtarowicz);
    hold on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    yline(CdMax_Hall,'--','C_{D,max} @ Hall',LabelHorizontalAlignment='right',
        LabelVerticalAlignment='bottom')
    hold on;
    yline(CdMax_Nakayama,'-.','C_{D,max} @ Nakayama',LabelHorizontalAlignment='
        center', LabelVerticalAlignment='top')
    hold on;
    xlim([(ReNumMin-2.*dReNum),(ReNumMax+2.*dReNum)]);
    ylim([0,1.0]);
```

```
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
% LegendLabel={'Hall';'Nakayama'; 'Asihmin'; 'Arcoumanis'; 'Lichtarowicz'};
LegendLabel={'Hall';'Nakayama'; 'Asihmin'; 'Lichtarowicz'};
lgd = legend(LegendLabel,'Location','South');
title(lgd,'C_{D} model ');
%-------------------------------------------------------------

colororder('default');
figure(2);
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    semilogx(ReNum,Cd_Hall);
    grid on;
    hold on;
    semilogx(ReNum,Cd_Nakayama);
    hold on;
    semilogx(ReNum,Cd_Asihmin);
    hold on;
%     semilogx(ReNum,Cd_Arcoumanis);
%     hold on;
    semilogx(ReNum,Cd_Lichtarowicz);
    hold on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    yline(CdMax_Hall,'k--','C_{D,max} @ Hall',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='bottom')
    hold on;
    yline(CdMax_Nakayama,'k-.','C_{D,max} @ Nakayama',LabelHorizontalAlignment='
        left', LabelVerticalAlignment='top')
    hold on;

    xlim([(5),(100000)]);
    ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{d} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
% LegendLabel={'Hall';'Nakayama'; 'Asihmin'; 'Arcoumanis'; 'Lichtarowicz'};
LegendLabel={'Hall';'Nakayama'; 'Asihmin'; 'Lichtarowicz'};
lgd = legend(LegendLabel,'Location','South');
title(lgd,'C_{D} model ');
```

Program 6.13: `DC_Hall.m`

```
function [Cd, CdMax] = DC_Hall(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model Hall
```

```
% Ref.

% ------------------------------------------------------------
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% (Tab. 3, str. 5)
% Napomena: greška u izrazu datom u tabeli 3

% Lichtarowicz, A., Duggins, R.K., Markland, E., 1965.
% Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long
    orifices.
% Journal of Mechanical Engineering Science 7 (2).
% ------------------------------------------------------------
% Corr_D = 1.0E+03; % [m] > [mm]
% C1 = (Corr_D.*D_Nozzle_Out).^(-1.0);
LDR = (L_Nozzle./D_Nozzle_Out);
    C1 = 1.11.*ReNum.^(+0.25);
    C2 = (LDR-1.0+C1).^(+0.8);
    C3 = ReNum.^(-0.2);
    Cd = 1.0-0.184.*C2.*C3;
    CdMax = 0.827-0.0085.*LDR;
```

Program 6.14: `DC_Nakayama.m`

```
function [Cd, CdMax]=DC_Nakayama(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model Nakayama

% Ref.

% ------------------------------------------------------------
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% (Tab. 3, str. 5)
% Napomena: greška u izrazu datom u tabeli 3
% Umesto 17.11(D^-1), treba da stoji 17.11*(L/D)

% Lichtarowicz, A., Duggins, R.K., Markland, E., 1965.
% Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long
    orifices.
% Journal of Mechanical Engineering Science 7 (2).
% ------------------------------------------------------------
% Corr_D=1.0E+03; % [m] > [mm]

LDR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
    C1=ReNum.^(+5./6);
    C2=17.11.*LDR;
    C3=1.65.*ReNum.^(+0.8);
    Cd=C1./(C2+C3);
```

```
    CdMax=0.868-0.0425./(sqrt(LDR));
```

Program 6.15: `DC_Asihmin.m`

```
function [Cd]=DC_Asihmin(L_Nozzle, D_Nozzle, ReNum)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model Asihmin (1961)

% Ref.
% Lichtarowicz, A., Duggins, R.K., Markland, E., 1965.
% Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long
    orifices.
% Journal of Mechanical Engineering Science 7 (2).

% A.H. Lefebvre,
% Atomization and Sprays, Taylor Francis, New York, 1989.

% Wei Zeng, Min Xu, Ming Zhang, Yuyin Zhang, David J. Cleary
% Macroscopic characteristics for direct-injection multi-hole sprays using
% dimensionless analysis
% Experimental Thermal and Fluid Science 40 (2012) 81-92
% 004_1-s2.0-S0894177712000489-main

% S. Essien, A. Archibong-Esoa,c,* , L. Laoa
% DISCHARGE COEFFICIENT OF HIGH VISCOSITY LIQUIDS THROUGH NOZZLES
% Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 103, May 2019, pp. 1-8
% DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.004

% ----------------------------------------------------------
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% ----------------------------------------------------------

% Opseg:
%     (L/D) ..... 2 - 5
%     Re .... 100 - 1.5E+05
LDR=L_Nozzle./D_Nozzle;
C1=58./ReNum;
Cd=(1.23+C1.*LDR).^(-1.0);
```

Program 6.16: `DC_Lichtarowicz.m`

```
function [Cd]=DC_Lichtarowicz(L_Nozzle,D_Nozzle_Out, ReNum)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model Lichtarowicz

% Ref.

% ----------------------------------------------------------
```

```
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% (Tab. 3, str. 5)
% Napomena: greška u izrazu datom u tabeli 3
    % Umesto 1.0+2.25.*(D^-1), treba da stoji 1.0+2.25.*(L/D)
    % Umesto 0.0015.*(D^-1);, treba da stoji 0.005.*(L/D)

% W. H. Nurick
% Flow Characteristics and Status of CFD Hydrodynamic Model Development in
% Sudden Contraction Manifold/Orifice Configurations
% AFRL-RZ-ED-TP-2011-0021
% AIR FORCE RESEARCH LABORATORY PROPULSION DIRECTORATE


% Lichtarowicz, A., Duggins, R.K., Markland, E., 1965.
% Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long
    orifices.
% Journal of Mechanical Engineering Science 7 (2).
% ------------------------------------------------------------
LDR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
% DDR=D_Nozzle_Out./D_Nozzle_In;
CdMax=0.827-0.0085.*LDR;
% [CdMax]=DCMax_Nakayama(D_Nozzle_Out);

C1=1.0./CdMax;
C2=20./ReNum;
C3=1.0+2.25.*LDR;

% C4=0.0015./D_Nozzle_Out;
C4=0.005.*LDR;

C5=log(0.00015.*ReNum);
% C6=1.0+7.5.*(C5).^(+2.0);
C6=1.0+7.5.*(C5-3.824).^(+2.0);

A=C1+C2.*C3-C4./C6;
Cd=1.0./A;
```

6.2.2 Uticaj radijusa zaobljenja ulazne ivice mlaznice - modeli Lihtarovič i fon Kuensberg

Napisati funkciju za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice sa uticajem zaobljenja radijusa ulazne ivice mlaznice koristeći model fon Kuensberga [40], a zatim za uslove strujanja iz prethodnog primera sprovesti proračun za nekoliko diskretnih vrednosti radijusa zaobljenja ulazne ivice mlaznice u opsegu od 0 do $20 \cdot 10^{-6}$ m. Rezultate uporediti sa modelom Lihtaroviča za cilindričnu mlaznicu i prikazati grafički zavisnosti od Rejnoldsovog broja, na posebnim dijagramima sa linearnom i logaritamskom razmerom za režime strujanja.

Rešenje

U ovom primeru, cilj je uporediti rezultate proračuna koeficijenta pražnjenja mlaznice jednim opštim modelom kakav je model Lihtarovič i jednim modelom posebno razvijenim i prilagođenom specifičnostima mlaznice brizgača dizel-motora. Izraz za model fon Kuensberga dat je na sledeći način:

$$C_D = \frac{1}{\sqrt{\xi_r + \mathrm{f} \cdot \dfrac{L_N}{D_N} + 1}} \;\mid\; \mathrm{f} = \max\left(\frac{0{,}316}{Re^{0{,}25}}, \frac{64}{Re}\right) \tag{6.16}$$

gde su veličine definisane na sledeći način:

ξ_r [−] Koeficiijent gubitaka na ulazu u mlaznicu koji zavisi od radijusa zaobljenja ulazne ivice;

f [−] Koeficijent viskoznog trenja (kriterijumi Blazijusa i Puazeja).

Koeficijent gubitaka na ulazu ξ_r koji zavisi od radijusa zaobljenja ulazne ivice r_{0N} može se pronaći u literaturi, npr. u radu Desantesa [41]. Za proračun se može koristiti i polinomska zavisnost, pri čemu su koeficijenti identifikovani na osnovu podataka iz tabele 6.2 u radu Idelčika [42] i Desantesa [41]:

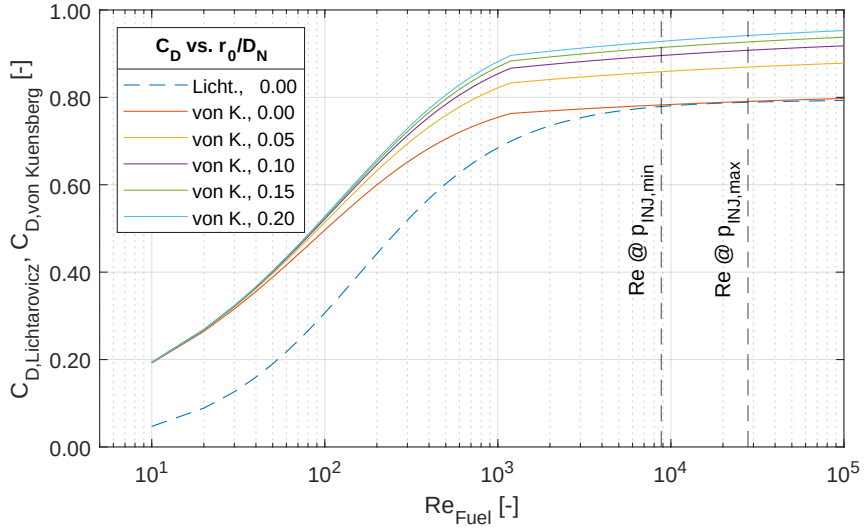
$$\xi_r = 0{,}5017 - 8{,}1944 \cdot \frac{r_{0N}}{D_N} + 65{,}415 \cdot \left(\frac{r_{0N}}{D_N}\right)^2 - \\ - 259{,}9277 \cdot \left(\frac{r_{0N}}{D_N}\right)^3 + 393{,}9281 \cdot \left(\frac{r_{0N}}{D_N}\right)^4 \tag{6.17}$$

r_{oN}/D_N	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,12	0,16	$\geq$ 0,20
ξ_r	0,50	0,43	0,36	0,31	0,26	0,22	0,20	0,15	0,09	0,06	0,03

Tabela 6.2: Koeficijent gubitaka na ulazu ξ_r u zavisnosti od radijusa zaobljenja ulazne ivice r_{0N} [42].

Rezultati proračuna za diskretne vrednosti odnosa r_{oN}/D_N u opsegu od 0 do 0,20, prikazani su na slici 6.13 u logaritamskim koordinatama kako bi se sagledale razlike u opsegu niskih brzina strujanja kroz mlaznicu. Uočava se da model fon Kuensberg daje više vrednosti koeficijenta pražnjenja na celokupnom opsegu Rejnoldsovog broja i razlika u odnosu na model Lihtarovič je ujednačena i iznosi oko 0,15, ali se takođe konstatuje potpuna saglasnost modela u pogledu karaktera zavisnosti koeficijenta pražnjenja od Rejnoldsovog broja. Razlike se mogu pripisati kvalitetnijem eksperimentu i tehnološkom nivou (vremenska razlika između objavljivanja od gotovo 35

godina). Takođe konstatuje se da postojanje zaobljenja ulazne ivice mlaznice doprinosi smanjenju ulaznog otpora, smanjenju kontrakcije mlaza (lat.: *Vena Contracta*), a oba efekta dovode, očekivano, do povećanja koeficijenta pražnjenja i povećanja efektivne brzine strujanja kroz mlaznicu.



Slika 6.13: Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose $r_{oN}/D_{N,\text{out}}$.

Program 6.17: `DC_002.m`

```
clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);
p_Gas=1.0E+05;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1';
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType)
    ;

% Definisanje podataka o brizgaču (mlaznici)
D_Nozzle_In=1.0.*100.0E-06;
```

```
D_Nozzle_Out=1.0.*100.0E-06;
L_Nozzle=4.*D_Nozzle_Out;
r0_Nozzle=[0.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0].*1.0E-06;
[m_r0, n_r0]=size(r0_Nozzle);
r0DR=r0_Nozzle./D_Nozzle_Out;

% Definisanje opsega brzine strujanja u mlaznici

% Definisanje opsega Rejnoldsovog broja
ReNumMin=10.0;
ReNumMax=100000.0;
dReNum=10.0;
ReNum=ReNumMin:dReNum:ReNumMax;
[m_Re n_Re]=size(ReNum);

% Određivanje opsega Rejnoldsovog broja za teorijsku brzinu strujanja u
% mlaznici
[u_NozzleCalc]=NozzleVelocityTh(p_Rail,p_Gas,rhoFuel);
[ReNumCalc]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out, u_NozzleCalc, niFuel, 0);
ReNumMin0=min(ReNumCalc);
ReNumMax0=max(ReNumCalc);

ReNumMin1=floor(min(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
ReNumMax1=ceil(max(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
%-------------------------------------------------------------
% Modeli koji ne uzimaju u obzir efekat kavitacije
for i=1:1:n_r0
    for j=1:1:n_Re

    % Izračunavanje Cd @modelLichtarowicz
    [Cd_Lichtarowicz(1,j)]=DC_Lichtarowicz(L_Nozzle, D_Nozzle_Out, ReNum(1,j));

    % Izračunavanje Cd @modelKuensberg
%     [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle(1,i), L_Nozzle, D_Nozzle_Out,
    ReNum(1,j));
    [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle(1,i), L_Nozzle, D_Nozzle_Out,
        ReNum(1,j), 0, 0, 0,'NCav');

%     % Izračunavanje Cd @modelDesantes
%     [Cd_Desantes(1,i)]=DC_DesantesNCav(r0_Nozzle, L_Nozzle, D_Nozzle_In,
    D_Nozzle_Out, ReNum(1,i));
    end
end
% %-------------------------------------------------------------
% % Modeli koji uzimaju u obzir efekat kavitaciije
% % Izračunavanje Cd @modelSalvador
% NeedleLift=0.5E-03;
% [Cd_Salvador]=DC_SalvadorCav(ND.r0In*1000, NeedleLift*1000, ND.dIn*1000, ND.dOut
    *1000, ReNum);
% % [Cd_Salvador]=DC_Salvador(ND.r0In, NeedleLift, ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
%
% % Izračunavanje Cd @modelPayri
% [Cd_PayriCon]=DC_PayriCav2(ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
% [Cd_PayriCil]=DC_PayriCav2(ND.dOut, ND.dOut, ReNum);
```

```
colororder('default');
figure(1);
    plot(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'--');
    hold on;
    plot(ReNum,Cd_Kuensberg);
    hold on;
    grid on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xlim([(ReNumMin-2.*dReNum),(ReNumMax+2.*dReNum)]);
    ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D,Lichtarovicz}, C_{D,von Kuensberg} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel_L="Licht.,   0.00";
for i=1:1:n_r0
    LegendLabel_vK(i)=strcat("von K., ", num2str(r0DR(1,i),'%.2f'));
end
LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
lgd = legend(LegendLabel,'Location','SouthEast');
title(lgd,'C_{D} vs. r_{0N}/D_{N}');
%-------------------------------------------------------------

colororder('default');
figure(2);
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    semilogx(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'--');
    hold on;
    semilogx(ReNum,Cd_Kuensberg);
    hold on;
    grid on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
xlim([(5),(100000)]);
ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D,Lichtarovicz}, C_{D,von Kuensberg} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel_L="Licht.,   0.00";
for i=1:1:n_r0
    LegendLabel_vK(i)=strcat("von K., ", num2str(r0DR(1,i),'%.2f'));
end
LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
```

```
lgd = legend(LegendLabel,'Location','NorthWest');
title(lgd,'C_{D} vs. r_{0}/D_{N}');
```

Program 6.18: DC_vonKuensberg.m

```
function [Cd, CavNumHN, CavNumCrit, Cvc]=DC_vonKuensberg(R_Nozzle_Round, L_Nozzle,
    D_Nozzle_Out, ReNum, pIn, pOut, pVapor, par)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model von Kuensberg, bez uticaja kavitacije

% von Kuensberg Sarre, C., Kong, S., and Reitz, R.,
% Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays,
% SAE Technical Paper 1999-01-0912, 1999, https://doi.org/10.4271/1999-01-0912.

% Claudio Dongiovanni, Marco Coppo
% Fuel Injection: Accurate Modelling of an Injector for Common Rail Systems
% InTech 2010, Doi10.5772/261,
% ISBN978-953-307-116-9,
% eBook (PDF) ISBN978-953-51-5939-1
% % % Komentar za izraz (6) - naveden je član 0.316*Re^0.25
% % % Navedena je pogrešna vrednost eksponenta +0.25
% % % Eksponent treba da bude -0.25

% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% José M. Desantes, J. Javier López, Marcos Carreres, Darío López-Pintor
% Characterization and prediction of the discharge coefficient
% of non-cavitating diesel injection nozzles
% Fuel 184 (2016) 371-381
% (str. 5, tab. 2)

% Tabelarni prikaz koeficijenta pada pritiska ksi u zavisnosti od
% relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice (str. 5, tab. 2)
% Napomena:
% Netačno naveden izvor: Benedict, R.P. Fundamentals of Pipe Flow, Wiley, New York,
    1980
% Izvor:
% José M. Desantes, J. Javier López, Marcos Carreres, Darío López-Pintor
% Characterization and prediction of the discharge coefficient
% of non-cavitating diesel injection nozzles
% Fuel 184 (2016) 371-381
% Original:
% I. E. Ide1chik: Handbook of Hydraulic Resistance, 4 th Edition,
% Begell House, Ine., Begell House, Ine. ISBN: 978-1-56700-251-5
% str. 233 (197), diagr. 3.4
% RDR_Table= [0.00 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.08 0.12 0.16 0.20];
% ksi_Table=[0.50 0.43 0.36 0.31 0.26 0.22 0.20 0.15 0.09 0.06 0.03];

% Izračunavanje relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice
```

```
RDR=R_Nozzle_Round./D_Nozzle_Out;

% Slučaj strujanja bez kavitacije
% Koeficijenti polinoma 4. stepena za interpolaciju ksi2RDR
PolyCoeff=[393.9281 -259.9277   65.4150   -8.1944    0.5017];
LDR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
% Određivanje vrednosti koef. pada pritiska u zavisnosti od
% relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice za zadate geometrijske
% podatke mlaznice
if (RDR>0.2)
    ksi=0.03;
else
% ksi=interp1(RDTable, ksiTable, RDR,'linear');
    ksi=polyval(PolyCoeff,RDR);
end
R1=0.316.*ReNum.^(-0.25); % Baumgarten, von Kuensberg
% R1=0.316.*ReNum.^(+0.25); % Dongiovani
R2=64./ReNum;
f=max(R1,R2);
CdNCav=(ksi+f.*LDR+1).^(-0.5);

switch par
    case 'NCav'
        Cd=CdNCav;
    case 'WCav'
    % Izračunavanje kritičnog kavitacionog broja prema kriterijumu von Kuensberg
    % Izračunavanje kritičnog kavitacionog broja prema kriterijumu Macian
    [CavNumCrit]=CNCrit_Macian(pIn,(1.01.*D_Nozzle_Out),D_Nozzle_Out,R_Nozzle_Round
        );

    % Izračunavanje kavitacionog broja prema modelu Hall-Nurick
    [CavNum]=CavitationNumber(pIn,pOut,pVapor,'Hall-Nurick');

    % Provera uslova za postojanje kavitacije
    if CavNumHN<CavNumCrit
        % Slučaj strujanja sa kavitacijom (zagušenje)
        Cvc0=0.62;
        CCvc1=Cvc0.^(-2.0);
        CCvc2=11.4.*RDR;
        Cvc=(CCvc1-CCvc2).^(-0.5);
        CdWCav=Cvc.*sqrt(CavNumHN)
        Cd=CdWCav;
    elseif CavNumHN>=CavNumCrit
        Cd=CdNCav;
    else
    end
    otherwise
end

% Referentne vrednosti za Cvc,
% Slučaj #1: nisu poznati geometrijski podaci za komoru iglice
% Munson, B. R., Young, D. F. & Okiishi, T. H. (2013).
% Fundamentals of Fluid Mechanics, Wiley.
% str.120, fig. 3.14
% Cvc0=0.61;
```

```
% Nurick, W.H.
% Orifice Cavitation and Its Effects on Spray Mixing, J. Fluids Eng., Vol.98, pp
    .681-687, 1976.
% str. 6, izraz 16b, ref. [9]
% Cvc0=0.62;

% Slučaj #2: poznati su geometrijski podaci za komoru iglice
% Ako je poznata vrednost prečnika komore brizgača (ekvivalentni prečnik komore),
    koristi se izraz:
% str. 5, izraz 10, ref. [9]
% A_NozzleSac      površina komore
% A_NozzleOut      površina izlaznog otvora mlaznice
% Preporuka za aproksimaciju:
% Proceniti ili izmeriti prečnik podeonog kruga DN0 na kome su postavljene mlaznice
    .
% Pretpostaviti da je površina A_NozzleSac za jednu mlaznicu jednaka
% površini kruga čiji je poluprečnik jednak polovini rastojanja između
% pojedinačnih mlaznica
% D_Sac=DN0.*sin(360./(2.*n_Nozzle));
%
% A_NozzleSac=D_Sac.^2.0.*pi./4;
% A_NozzleOut=D_NozzleOut.^2.0.*pi./4;
% Cvc=0.62+0.38.*(A_NozzleSac./A_NozzleOut).^3.0;
% Ako se pretpostavljaju površine krugova, onda se osnovni izraz može
% svesti na odnos karakterističnih prečnika
% Cvc=0.62+0.38.*(D_Sac./D_NozzleOut).^6.0;
```

Program 6.19: `CNCrit_Macian.m`

```
function [CavNumCrit]=CNCrit_Macian(p_Inj,D_Nozzle_In,D_Nozzle_Out,R_Nozzle_Round)
% Funkcija za izračunavanje kritičnog kavitacionog broja
% (bez uticaja hoda iglice brizgača)
% po modelu Macian et. al
% (korelacija na osnovu stagnacije koeficijenta pražnjenja - hidraulička metoda)
% S. Popović 202404.v01
%
% Ref.
% Macian, V., Pyri, R., Margot, X., Salvador, F. J.
% A CFD Analysis of the influence of diesel nozzle geometry on the
% inception of cavitation
% Atomization and sprays, vol. 13, pp. 579-604, 2003
% izraz (6-10)

% Pregled korišćenih oznaka ulaznih veličina
% p_Inj           [Pa]       Pritisak goriva na ulazu u mlaznicu
% D_Nozzle_In     [m]        Prečnik mlaznice u ulaznom preseku
% D_Nozzle_Out    [m]        Prečnik mlaznice u izlaznom preseku
% R_NozzleRound   [m]        Radijus zaobljenja ulazne ivice mlaznice
% opt                        'Payri'
%                            'Macian'

% AR              [%]        Relativna promena prečnika mlaznice - model Payri
%                 [%]        Relativna promena površine protočnog preseka mlaznice -
```

```
    model Macian

% Napomena #1:
% U originalnom izrazu, jedinice su zadate na sledeći način:
% p_Inj          [MPa]       Pritisak goriva na ulazu u mlaznicu
% D_Nozzle_In    [um]        Prečnik mlaznice u ulaznom preseku
% D_Nozzle_Out   [um]        Prečnik mlaznice u izlaznom preseku

% clear all;
% close all;
% clc;
%
% % opt='Payri'
% opt='Macian_pINJ'

% ReNum=1000:1000:15000;
% R_Nozzle_Round=8E-06;
% R_Nozzle_Round=0.0E-06:0.5E-06:30E-06;

% L_Nozzle=773E-06;
% D_Nozzle_In=133E-06;
% D_Nozzle_Out=130E-06;
%
% p_Vapor=0.08E+06;
%
% p_InjMin=100E+05;
% p_InjMax=1500E+05;
% dp_Inj=50E+05;
% p_Inj=p_InjMin:dp_Inj:p_InjMax;
% [m n]=size(p_Inj)

% Referentne vrednosti fizičkih veličina za izračunavanje bezdimenzionalnih
% parametara pritiska ubrizgavanja, redukcije protočnog preseka, prečnika
% mlaznice i ulaznog radijusa mlaznice
p_InjRef=135E+06;
R_Nozzle_RoundRef=15.0E-06;
ARRef=15.0;
D_Nozzle_OutRef=180.0E-06;
ep=-0.01968;
eR=+0.2156;
eAR=+0.0375;
eD=-0.3088;
% for i=1:1:n
%             AR=100.*(D_Nozzle_In.^2-D_Nozzle_Out.^2)./(D_Nozzle_In.^2);
%             ND_p=p_Inj(i)./p_InjRef;
%             ND_R=R_Nozzle_Round./R_Nozzle_RoundRef;
%             ND_AR=AR./ARRef;
%             ND_D=D_Nozzle_Out./D_Nozzle_OutRef;
%             CavNumCrit(i)=(ND_p.^ep).*(ND_R.^eR).*(ND_AR.^eAR).*(ND_D.^eD);
%             CavNumCrit1(i)=1./CavNumCrit(i);
% end

% Izračunavanje bezdimenzionalnih članova (vrednosti uticajnih
% činilaca svedene na referentne vrednosti)
AR=100.*(D_Nozzle_In.^2-D_Nozzle_Out.^2)./(D_Nozzle_In.^2);
```

```
ND_p=p_Inj./p_InjRef;
ND_R=R_Nozzle_Round./R_Nozzle_RoundRef;
ND_AR=AR./ARRef;
ND_D=D_Nozzle_Out./D_Nozzle_OutRef;

% Izračunavanje recipročne vrednosti kritičnog kavitacionog broja
% (prema originalnom izrazu)
CavNumCrit0=(ND_p.^ep).*(ND_R.^eR).*(ND_AR.^eAR).*(ND_D.^eD);
% Izračunavanje kritičnog kavitacionog broja
CavNumCrit=1./CavNumCrit0;
```

Program 6.20: `CavitationNumber.m`

```
function [CavVal]=CavitationNumber(pIn,pOut,pVapor,opt)
% Funkcija za izračunavanje kavitacionog broja
% S. Popović 202404.v01
%
% Ref.
% W. H. Nurick
% Flow Characteristics and Status of CFD Hydrodynamic Model Development in
% Sudden Contraction Manifold/Orifice Configurations
% AFRL-RZ-ED-TP-2011-0021
% AIR FORCE RESEARCH LABORATORY PROPULSION DIRECTORATE
% str. 24(33), izraz (29)

% R. Payri, J.M. Garcia, F.J. Salvador, J. Gimeno
% Using spray momentum flux measurements to understand the influence
% of diesel nozzle geometry on spray characteristics
% Fuel 84 (2005) 551-561
% izraz (15-16)

% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% izraz (2, 3)

% F. Payri, V. Bermu´dez, R. Payri*, F.J. Salvador
% The influence of cavitation on the internal flow and the spray
% characteristics in diesel injection nozzles
% Fuel 83 (2004) 419-431
% izraz (2, 3)

% David P. Schmidt, Christopher J. Rutland, M. L. Corradini
% A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes
% SAE 971597
% izraz (9)

% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
```

```
% izraz(2.17)
% --------------------------------------------------------------------------
% Macian, V., Pyri, R., Margot, X., Salvador, F. J.
% A CFD Analysis of the influence of diesel nozzle geometry on the
% inception of cavitation
% Atomization and sprays, vol. 13, pp. 579-604, 2003
% izraz (2)
% Napomena: inverzna vrednost u odnosu na izraz 29@Nurick
% --------------------------------------------------------------------------
% R. Payri, F.J. Salvador, M. Carreres*, M. Belmar-Gil
% Thermal effects on the diesel injector performance through adiabatic 1D
% modelling. Part II: Model validation, results of the simulations and
% discussion
% Fuel 84 (2005) 551-561
% Izraz (4)
% Refernca [26]
% Soteriou C, Andrews R, Smith M. Direct injection diesel sprays and the effect of
% cavitation and hydraulic flip on atomization
% SAE Pap 950080 1995. doi: 10.4271/950080.
% % Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% izraz(2.16)

switch opt
    case 'Hall-Nurick'
        CavVal=(pIn-pVapor)./(pIn-pOut);
    case 'Soteriou'
        CavVal=(pIn-pOut)./(pOut-pVapor);
    case 'CavPar'
        CavVal=(pIn-pOut)./(pIn-pVapor);
    otherwise
end
```

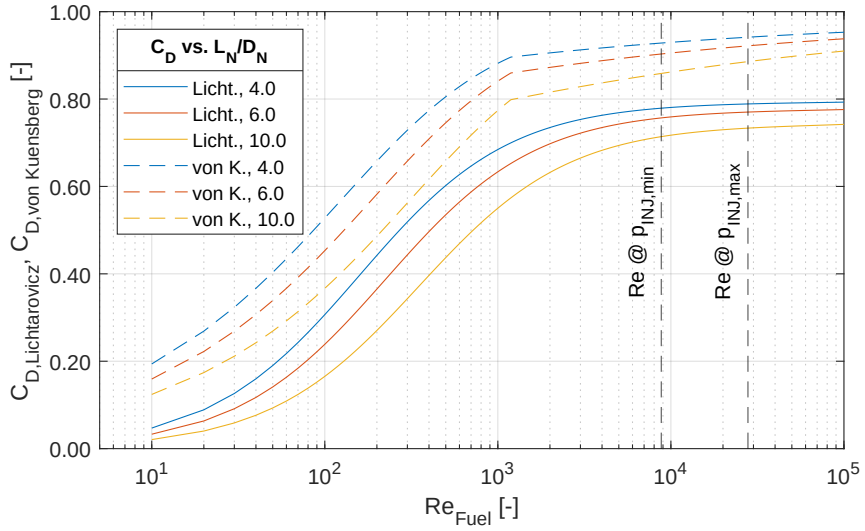
6.2.3 Uticaj dužine mlaznice - modeli Lihtarovič i fon Kuensberg

Koristeći prethodno razvijene funkcije za proračun koeficijenta pražnjenja cilindrične mlaznice modelima Lihtaroviča i fon Kuensberga, sprovesti proračun za uslove strujanja iz prethodnih primera za različite dužine mlaznica koje su definisane relativnim odnosom dužine i prečnika otvora mlaznice u opsegu od 4 do 10. Rezultate prikazati grafički zavisnosti od Rejnoldsovog broja sa logaritamskom razmerom za režime strujanja.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.14. Analiza izraza za modele Lihtaroviča i fon Kuensberga pokazuje da se sa povećanjem odnosa dužine kanala i prečnika izlaznog otvora mlaznice $^{L_N}/_{D_N}$ može očekivati smanjenje koeficijenta pražnjenja mlaznice. U oblasti niskih brzina strujanja (oblast laminarnog strujanja) ovaj efekat

je izraženiji ali ujednačen i prelaskom sa vrednosti 4 na vrednost 10, smanjenje koeficijenta pražnjenja mlaznice u apsolutnom domenu iznosi oko 0,1, a u relativnom od oko 50% na nižim do oko 10% na višim režimima strujanja. Prelaskom u područje turbulentnog strujanja, smanjenje koeficijenta pražnjenja mlaznice je manje izraženo i može se objasniti bržim oporavkom strujnog polja iza preseka u kome se javlja kontrakcija mlaza.



Slika 6.14: Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose $^{L_N}/_{D_N}$.

Program 6.21: `DC_003.m`

```
clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);
p_Gas=1.0E+05;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1';
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType)
    ;
```

```
% Definisanje podataka o brizgaču (mlaznici)
D_Nozzle_In=1.0.*100.0E-06;
D_Nozzle_Out=1.0.*100.0E-06;
[m_DNi, n_DNi]=size(D_Nozzle_In);

L_Nozzle=[4.0, 6.0, 10.0].*D_Nozzle_Out;
LNR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
[m_LN, n_LN]=size(L_Nozzle);
r0_Nozzle=20.0.*1.0E-06;

% Definisanje opsega brzine strujanja u mlaznici

% Definisanje opsega Rejnoldsovog broja
ReNumMin=10.0;
ReNumMax=100000.0;
dReNum=10.0;
ReNum=ReNumMin:dReNum:ReNumMax;
[m_Re n_Re]=size(ReNum);

% Određivanje opsega Rejnoldsovog broja za teorijsku brzinu strujanja u
% mlaznici
[u_NozzleCalc]=NozzleVelocityTh(p_Rail,p_Gas,rhoFuel);
[ReNumCalc]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out, u_NozzleCalc, niFuel, 0);
ReNumMin0=min(ReNumCalc);
ReNumMax0=max(ReNumCalc);

ReNumMin1=floor(min(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
ReNumMax1=ceil(max(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
%-------------------------------------------------------------
% Modeli koji ne uzimaju u obzir efekat kavitacije
for i=1:1:n_LN
    for j=1:1:n_Re

    % Izračunavanje Cd @modelLichtarowicz
    [Cd_Lichtarowicz(i,j)]=DC_Lichtarowicz(L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out, ReNum(1,j))
        ;

    % Izračunavanje Cd @modelKuensberg
%     [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle, L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out,
    ReNum(1,j));
    [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle, L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out,
        ReNum(1,j), 0, 0, 0,'NCav');

%     Delta(i,j)=Cd_Kuensberg(i,j)-Cd_Lichtarowicz(i,j);
    delta(i,j)=(Cd_Kuensberg(i,j)-Cd_Lichtarowicz(i,j))./Cd_Kuensberg(i,j);
%     % Izračunavanje Cd @modelDesantes
%     [Cd_Desantes(i,j)]=DC_DesantesNCav(r0_Nozzle, L_Nozzle, D_Nozzle_In(1,i),
    D_Nozzle_Out, ReNum(1,j));
    end
end
% %-------------------------------------------------------------
% % Modeli koji uzimaju u obzir efekat kavitaciije
% % Izračunavanje Cd @modelSalvador
% NeedleLift=0.5E-03;
```

```
% [Cd_Salvador]=DC_SalvadorCav(ND.r0In*1000, NeedleLift*1000, ND.dIn*1000, ND.dOut
    *1000, ReNum);
% % [Cd_Salvador]=DC_Salvador(ND.r0In, NeedleLift, ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
%
% % Izračunavanje Cd @modelPayri
% [Cd_PayriCon]=DC_PayriCav2(ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
% [Cd_PayriCil]=DC_PayriCav2(ND.dOut, ND.dOut, ReNum);



colororder('default');
figure(1);
    plot(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'-');
    hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    plot(ReNum,Cd_Kuensberg,'--');
    hold on;
% set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     plot(ReNum,Cd_Desantes,'-.');
%     hold on;
    grid on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xlim([(ReNumMin-2.*dReNum),(ReNumMax+2.*dReNum)]);
    ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D,Lichtarovicz}, C_{D,von Kuensberg} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel_L="Licht.,   0.00";
% for i=1:1:n_r0
%     LegendLabel_vK(i)=strcat("von K., ", num2str(r0DR(1,i),'%.2f'));
% end
% LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
% lgd = legend(LegendLabel,'Location','SouthEast');
% title(lgd,'C_{D} vs. r_{0}/D_{N}');
%-------------------------------------------------------

colororder('default');
figure(2);
% yyaxis left
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    semilogx(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'-');
    hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    semilogx(ReNum,Cd_Kuensberg,'--');
    hold on;
% set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     semilogx(ReNum,Cd_Desantes,'-.');
%     hold on;
    grid on;
```

```
% yyaxis right
%     semilogx(ReNum, delta(1,:),'r-');
%     hold on;
%     semilogx(ReNum, delta(n_LN,:),'b-');
%     hold on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
xlim([(5),(100000)]);
ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D,Lichtarovicz}, C_{D,von Kuensberg} [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel_L="Licht.,   0.00/4.0";
for i=1:1:n_LN
    LegendLabel_L(i)= strcat("Licht., ", num2str(LNR(1,i),'%.1f'));
    LegendLabel_vK(i)=strcat("von K., ", num2str(LNR(1,i),'%.1f'));
end
LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
lgd = legend(LegendLabel,'Location','NorthWest');
title(lgd,'C_{D} vs. L_{N}/D_{N}');
```

6.2.4 Slučaj konične mlaznice - model Desantes

Napisati funkciju za koeficijent pražnjenja konične (konvergentne) mlaznice koristeći model Desantesa [41], a zatim sprovesti uporedni proračun za nekoliko diskretnih vrednosti odnosa dužine mlaznice za slučaj cilindrične mlaznice modelom fon Kuensberga i za slučaj konične mlaznice modelom Desantesa. Pretpostaviti da je prečnik izlaznog otvora mlaznice u oba slučaja $100 \cdot 10^{-6}$ m, a da je prečnik ulaznog otvora konične mlaznice $120 \cdot 10^{-6}$ m. Dužine mlaznica, kao i u prethodnom primeru, definisane su relativnim odnosom dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice u opsegu od 4 do 10. Rezultate prikazati grafički zavisnosti od Rejnoldsovog broja sa logaritamskom razmerom za režime strujanja.

Rešenje

Model Desantes je interesantan jer je verifikovan na nizu isključivo koničnih mlaznica. S obzirom na to da je primena koničnih mlaznica u porastu, interesantno je razmotriti kakav je uticaj konvergentnog protočnog preseka na koeficijent pražnjenja mlaznice. Kakav bi dalji uticaj na ostale karakteristike mlaza mogao biti, može se zaključiti iz uticaja realne brzine istrujavanja na te karakteristike. Izraz za model Desantes dat je u sledećem obliku:

$$C_D = C_1 - C_2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Re}} - C_3 \cdot \frac{1}{Re} \right) \tag{6.18}$$

Funkcijski članovi definisani su na sledeći način:

$$C_1 = \sqrt{\frac{1}{1+\xi_r}} \tag{6.19}$$

$$C_2 = \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot K^3 C_{con} \cdot \left(\frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} \right)^{1.5} \cdot (1+\xi_r)^{0.25} \tag{6.20}$$

Veličine su definisane na sledeći način:

$D_{N,\text{in}}$ [m] Prečnik ulaznog otvora mlaznice;

$D_{N,\text{out}}$ [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice;

ξ_r [−] Koeficiijent gubitaka na ulazu u mlaznicu koji zavisi od radijusa zaobljenja ulazne ivice;

K [−] Faktor proporcionalnosti;

C_{con} [−] Faktor koničnosti mlaznice.

Faktor proporcionalnosti K zavisi od debljine graničnog sloja i geometrijskih karakteristika mlaznice. Eksperimentalno je utvrđena zavisnost i prikazana sledećim izrazom:

$$K = 1{,}838 + 3{,}122 \cdot \exp\left(-0{,}31 \cdot \left(\frac{L_N}{D_{N,\text{out}}} \right) \cdot \frac{1}{1 - C_{con}} \right) \tag{6.21}$$

Faktor koničnosti mlaznice definisan je na sledeći način:

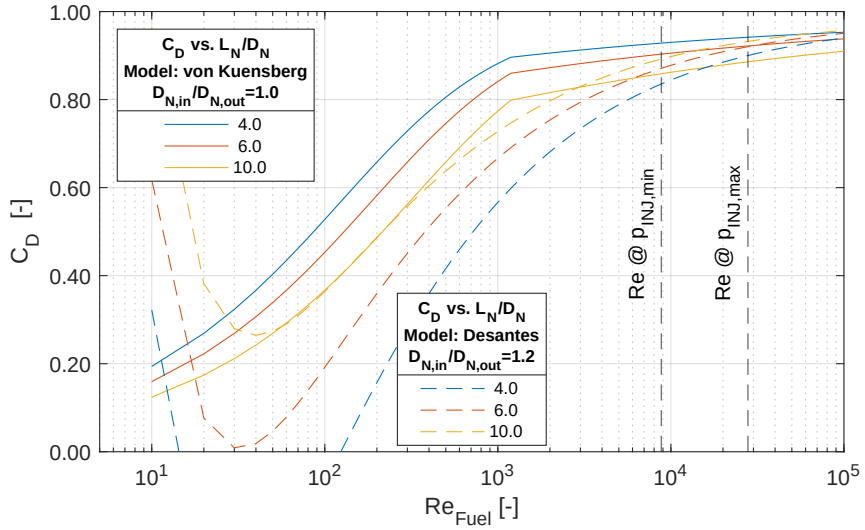
$$C_{con} = \frac{D_{N,\text{in}} - D_{N,\text{out}}}{L_N} \tag{6.22}$$

Važno je napomenuti da se prethodni izraz za faktor koničnosti odnosi isključivo na ovaj model i ne treba ga koristiti u drugim modelima koji se odnose na konične mlaznice. Stepen suženja mlaznice može se definisati na više različitih načina i u literaturi se, čak i u radovima istog autora, često pojavljuju različiti izrazi.

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.15. Empirijski karakter izraza potvrđuje se singularitetom u oblasti niskih vrednosti Rejnoldsovog broja ($Re < 50 \ldots 100$) gde se uočava nagli i neočekivani porast koeficijenta pražnjenja. Takođe, konstatuje se da je u području laminarnog strujanja uticaj dužine kanala mlaznice kod koničnih mlaznica obrnut u odnosu na cilindrične - kod kraćih mlaznica koeficijent pražnjenja je manji. Karakteristike se izjednačavaju za vrednosti $L_N/D_{N,\text{out}} \approx 10$, tj. može se

konstatovati da se u oblasti laminarnog strujanja kod dužih mlaznica efekat koničnosti smanjuje ili se u potpunosti može zanemariti. Sa prelaskom u oblast turbulentnog strujanja razlike se smanjuju i mogu se načelno zanemariti.

Model Desantes je empirijski i može se reći, uskog opsega primene. Najpre, mora se konstatovati da je stepen suženja mlaznica korišćenih u eksperimentu gotovo identičan (oko 1,2). Da su odstupanja znatna, može se proveriti ukoliko se odnos ulaznog i izlaznog prečnika mlaznice izabere u širem opsegu od onog koji je naveden u radu [41]. Takođe, model se ne može primeniti ni na cilindrične mlaznice jer isključenjem drugog člana u izrazu (eksplicitno uzima vrednost 0 za cilindrične mlaznice) koeficijent pražnjenja dobija, suprotno očekivanju, konstantnu i nerealno visoku vrednost. Čitaocu se prepušta da ove uticaje i zaključke proveri i prokomentariše uvođenjem širih graničnih vrednosti za odnos prečnika ulaznog i izlaznog prečnika mlaznice.



Slika 6.15: Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose $D_{N,\mathrm{in}}/D_{N,\mathrm{out}}$.

Program 6.22: `DC_004.m`

```
clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);
```

```
p_Gas=1.0E+05;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1';
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType)
    ;

% Definisanje podataka o brizgaču (mlaznici)
D_Nozzle_In=1.2.*100.0E-06;
D_Nozzle_Out=1.0.*100.0E-06;
[m_DNi, n_DNi]=size(D_Nozzle_In);

L_Nozzle=[4.0, 6.0, 10.0].*D_Nozzle_Out;
LNR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
[m_LN, n_LN]=size(L_Nozzle);
r0_Nozzle=30.0.*1.0E-06;



% Definisanje opsega brzine strujanja u mlaznici

% Definisanje opsega Rejnoldsovog broja
ReNumMin=10.0;
ReNumMax=100000.0;
dReNum=10.0;
ReNum=ReNumMin:dReNum:ReNumMax;
[m_Re n_Re]=size(ReNum);

% Određivanje opsega Rejnoldsovog broja za teorijsku brzinu strujanja u
% mlaznici
[u_NozzleCalc]=NozzleVelocityTh(p_Rail,p_Gas,rhoFuel);
[ReNumCalc]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out, u_NozzleCalc, niFuel, 0);
ReNumMin0=min(ReNumCalc);
ReNumMax0=max(ReNumCalc);

ReNumMin1=floor(min(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
ReNumMax1=ceil(max(ReNumCalc).*1.0E-03).*1.0E+03;
%-------------------------------------------------------------
% Modeli koji ne uzimaju u obzir efekat kavitacije
for i=1:1:n_LN
    for j=1:1:n_Re

    % Izračunavanje Cd @modelLichtarowicz
%     [Cd_Lichtarowicz(i,j)]=DC_Lichtarowicz(L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out, ReNum(1,j
    ));

    % Izračunavanje Cd @modelKuensberg
%     [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle, L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out,
    ReNum(1,j));
    [Cd_Kuensberg(i,j)]=DC_vonKuensberg(r0_Nozzle, L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_Out,
        ReNum(1,j), 0, 0, 0,'NCav');
```

```
%     Delta(i,j)=Cd_Kuensberg(i,j)-Cd_Lichtarowicz(i,j);
%     delta(i,j)=(Cd_Kuensberg(i,j)-Cd_Lichtarowicz(i,j))./Cd_Kuensberg(i,j);
%     % Izračunavanje Cd @modelDesantes
    [Cd_Desantes(i,j)]=DC_Desantes(r0_Nozzle, L_Nozzle(1,i), D_Nozzle_In(1,1),
        D_Nozzle_Out, ReNum(1,j));
    end
end
% %-------------------------------------------------------------
% % Modeli koji uzimaju u obzir efekat kavitaciije
% % Izračunavanje Cd @modelSalvador
% NeedleLift=0.5E-03;
% [Cd_Salvador]=DC_SalvadorCav(ND.r0In*1000, NeedleLift*1000, ND.dIn*1000, ND.dOut
    *1000, ReNum);
% % [Cd_Salvador]=DC_Salvador(ND.r0In, NeedleLift, ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
%
% % Izračunavanje Cd @modelPayri
% [Cd_PayriCon]=DC_PayriCav2(ND.dIn, ND.dOut, ReNum);
% [Cd_PayriCil]=DC_PayriCav2(ND.dOut, ND.dOut, ReNum);

colororder('default');
figure(1);
%     plot(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'-');
%     hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    plot(ReNum,Cd_Kuensberg,'-');
    hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    plot(ReNum,Cd_Desantes,'--');
    hold on;
    grid on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xlim([(ReNumMin-2.*dReNum),(ReNumMax+2.*dReNum)]);
    ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D,von Kuensberg}, C_{D,Desantes}  [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel_L="Licht.,   0.00";
% for i=1:1:n_r0
%     LegendLabel_vK(i)=strcat("von K., ", num2str(r0DR(1,i),'%.2f'));
% end
% LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
% lgd = legend(LegendLabel,'Location','SouthEast');
% title(lgd,'C_{D} vs. r_{0}/D_{N}');
%-------------------------------------------------------------

colororder('default');
figure(2);
% yyaxis left
```

```
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     semilogx(ReNum,Cd_Lichtarowicz,'-');
%     hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p21=semilogx(ReNum,Cd_Kuensberg,'-');
    hold on;
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p22=semilogx(ReNum,Cd_Desantes,'--');
    hold on;
    grid on;
% yyaxis right
%     semilogx(ReNum, delta(1,:),'r-');
%     hold on;
%     semilogx(ReNum, delta(n_LN,:),'b-');
%     hold on;
    xline(ReNumMin0,'k--','Re @ p_{INJ,min}', LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
    xline(ReNumMax0,'k--', 'Re @ p_{INJ,max}',LabelHorizontalAlignment='left',
        LabelVerticalAlignment='middle');
    hold on;
xlim([(5),(100000)]);
ylim([0,1.0]);
xlabel ('Re_{Fuel} [-]');
ylabel('C_{D}  [-]');
xtickformat('%.1f')
ytickformat('%.2f')
LegendLabel=num2str(LNR','%.1f');
% for i=1:1:n_LN
%     LegendLabel(i)= strcat("von K.", num2str(LNR(1,i),'%.1f'));
% %     LegendLabel_D(i)=strcat("Des.", num2str(LNR(1,i),'%.1f'));
% end
% LegendLabel=[LegendLabel_L, LegendLabel_vK];
% lgd = legend(LegendLabel,'Location','NorthWest');
% title(lgd,'C_{D} vs. L_{N}/D_{N}');

% % Prikaz legende za model von Kuensberg
LegendTitle_vK={'C_{D} vs. L_{N}/D_{N}';'Model: von Kuensberg';'D_{N,in}/D_{N,out
    }=1.0'};
lgd_p21=legend([p21],LegendLabel,'Location','NorthWest','FontSize',8);
title(lgd_p21,LegendTitle_vK);
a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Desantes
LegendTitle_D={'C_{D} vs. L_{N}/D_{N}';'Model: Desantes';'D_{N,in}/D_{N,out}=1.2'};
lgd_p22=legend(a2,[p22],LegendLabel,'Location','South','FontSize',8);
title(lgd_p22,LegendTitle_D);
```

Program 6.23: `DC_Desantes.m`

```
function [Cd, C1, C2, C3]=DC_Desantes(R_Nozzle_Round, L_Nozzle, D_Nozzle_In,
    D_Nozzle_Out, ReNum)
% Funkcija za izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice
% Model Desantes, bez uticaja kavitacije
```

```
% Ref.

% José M. Desantes, J. Javier López, Marcos Carreres, Darío López-Pintor
% Characterization and prediction of the discharge coefficient
% of non-cavitating diesel injection nozzles
% Fuel 184 (2016) 371-381
% str. 5, izrazi (13)...(16)
% str. 7, izraz (18)

% clear all;
% close all;
% clc;
%
% ReNum=1000:1000:15000;
%
% R_Nozzle_Round=28E-06;
% L_Nozzle=773E-06;
% D_Nozzle_In=150E-06;
% D_Nozzle_Out=126E-06;

% Tabelarni prikaz koeficijenta pada pritiska ksi u zavisnosti od
% relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice (str. 5, tab. 2)
RDRTable= [0.00 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.08 0.12 0.16 0.20];
ksiTable=[0.50 0.43 0.36 0.31 0.26 0.22 0.20 0.15 0.09 0.06 0.03];

% Izračunavanje relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice
RDR=R_Nozzle_Round./D_Nozzle_In;
% LDRin=L_Nozzle./D_Nozzle_In;
LDR=L_Nozzle./D_Nozzle_Out;
% Određivanje vrednosti koef. pada pritiska u zavisnosti od
% relativnog zaobljenja u ulaznom preseku mlaznice za zadate geometrijske
% podatke mlaznice
if (RDR>0.2)
    ksi=0.03;
else
    ksi=interp1(RDRTable, ksiTable, RDR,'linear');
end

% Izračunavanje stepena suženja mlaznice (koničnost)
% Izraz nije referenciran, dobijen je posredno, preračunavanjem podataka iz
% tab. 3, str. 6
CCon=(D_Nozzle_In-D_Nozzle_Out)./L_Nozzle;

% Izračunavanje konstante proporcionalnosti između debljine graničnog sloja
% i Rejnoldsovog broja, str 7, izraz (18)
eK=-0.31.*LDR./(1-CCon);
K=1.838+3.122.*exp(eK);

% Izračunavanje koef. C1 (izraz 14)
C1=sqrt(1./(1+ksi));

% Izračunavanje koef. C2 (izraz 15)
C21=4.*sqrt(2)./3;
C22=(K.^3).*CCon;
```

```
C23=(LDR).^(+1.5);
C24=(1.0+ksi).^(-0.25);
C2=C21.*C22.*C23.*C24;

% Izračunavanje koef. C3 ((izraz 16)
C3=0.5.*K.*sqrt(LDR).*(1.0+ksi).^(+0.25);

% Izračunavanje koeficijenta pražnjenja mlaznice (izraz 13)
Cd=C1-C2.*(ReNum.^(-0.5)-C3./ReNum);
```

6.2.5 Kritični kavitacioni broj - model Masijan

Napisati funkcije za izračunavanje kavitacionog broja mlaznice u izvornom teorijskom obliku i kritičnog kavitacionog broja po modelu Masijan, a zatim sprovesti proračun navedenih parametara za slučaj ubrizgavanja dizel-goriva korišćenjem mlaznica čiji su geometrijski parametri definisani na sledeći način:

- Opseg prečnika ulaznog otvora: od $135 \cdot 10^{-6}$ m do $155 \cdot 10^{-6}$ m;
- Prečnik izlaznog otvora: $130 \cdot 10^{-6}$ m;
- Odnos dužine kanala i prečnika izlaznog otvora: 6;
- Radijus zaobljenja ivice ulaznog otvora: $5 \cdot 10^{-6}$ m;

Pretpostaviti da se pritisak gasa u komori menja u opsegu od 0,5 MPa do 6,5 MPa, a da je pritisak goriva u akumulatoru u opsegu od 20 MPa do 200 MPa. U prvom približenju zanemariti uticaj pritiska goriva na viskoznost i gustinu goriva. Rezultate prikazati grafički u zavisnosti od Rejnoldsovog broja.

Rešenje

Problem kavitacije je vrlo značajan za razumevanje pojava koje se javljaju u mlaznici, a pre svega njenom uticaju na početak raspada mlaza već u samom kanalu mlaznice. Da bi se sagledale razmere osetljivosti ili sklonosti određenog tipa mlaznice ka pojavi kavitaciije biće iskorišćen jedan od modela za proračun kritičnog kavitacionog broja koji uključuje osnovne geometrijske karakteristike mlaznice. Poređenjem kritičnog sa teorijskim kavitacionim brojem za date uslove strujanja u kanalu mlaznice dolazi se najpre do zaključka da li uslovi za pojavu kavitacije uopšte postoje. Ukoliko postoje uslovi za kavitaciju, na tim režimima se primenjuje poseban izraz za izračunavanje koeficijenta pražnjenja i tako korigovao i proračun brzine strujanja, Rejnoldsovog broja i ostalih zavisnih veličina u proračunu raspada mlaza i kapljice. Kavitacioni broj (teorijski) se može izračunati na nekoliko različitih načina. U ovom primeru biće korišćen izraz prema Holu i Njuriku [43, 44] koji je dat u obliku prilagođenom strujanju u mlaznici brizgača:

$$K_{cav} = \frac{p_{INJ} - p_{vap}}{p_{INJ} - p_{GAS}} \tag{6.23}$$

Gde su veličine definisane na sledeći način:

p_{INJ} [Pa] Pritisak goriva ispred mlaznice (u prvom približenju, pritisak goriva u akumulatoru);

p_{GAS} [Pa] Pritisak gasa u komori (u prvom približenju, pritisak goriva u akumulatoru);

p_{vap} [Pa] Pritisak (napon) pare goriva;

K_{cav} [−] Kavitacioni broj.

Kavitacija se javlja u slučajevima u kojima je kritični kavitacioni broj kome odgovara karakteristična kombinacija strujnih i geometrijskih parametara mlaznice veći od kavitacionog broja definisanog samo preko vrednosti karakterističnih pritisaka:

$$K_{cav,crit} > K_{cav} \tag{6.24}$$

Kritični kavitacioni broj koji odgovara obliku kavitacionog broja prema izrazu Hol-Njurik, a koji zavisi od pojedinih geometrijskih karakteristika mlaznice, može se odrediti prema empirijskom modelu Masijana [45]:

$$K_{cav,crit} = PR^{0,01968} \cdot RR^{-0,2156} \cdot ARR^{-0,0375} \cdot DR^{0,3088} \tag{6.25}$$

Gde su bezdimenzioni članovi definisani na sledeći način:

$$PR = \frac{p_{INJ}}{P_{INJ,\mathrm{ref}}} \;\mid\; P_{INJ,\mathrm{ref}} = 135 \cdot 10^6\, Pa \tag{6.26}$$

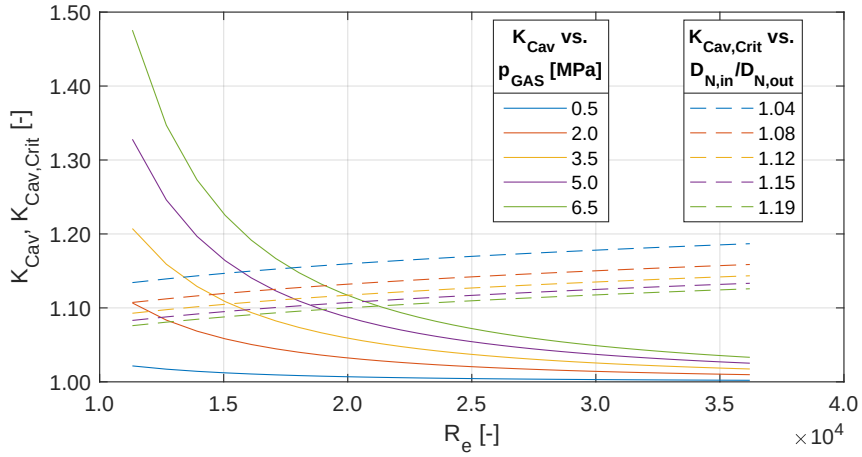
$$RR = \frac{r_{0N}}{r_{0N,\mathrm{ref}}} \;\mid\; r_{0N,\mathrm{ref}} = 50 \cdot 10^6\, m \tag{6.27}$$

$$ARR = \frac{AR}{AR_{\mathrm{ref}}} \;\mid\; AR_{\mathrm{ref}} = 15\%,\; AR = \frac{D_{N,in}^2 - D_{N,out}^2}{D_{N,in}^2} \cdot 100\% \tag{6.28}$$

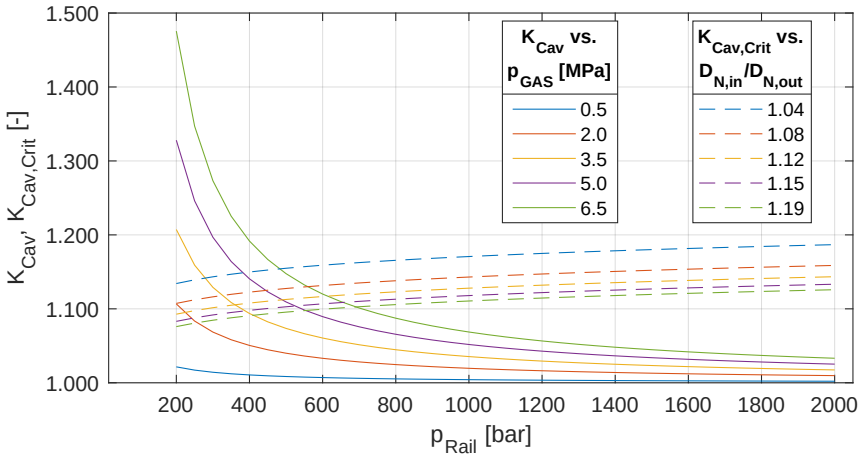
$$DR = \frac{D_{N,out}}{D_{N,out,\mathrm{ref}}} \;\mid\; D_{N,out,\mathrm{ref}} = 180 \cdot 10^{-6}\, m \tag{6.29}$$

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.16 i 6.17. Punim linijama prikazane su promene kavitacionog broja za nekoliko karakterističnih vrednosti pritiska gasa u komori koje odgovaraju realnom stanju u cilindru motora, tj. odgovaraju različitim uglovima početka ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa. Uočava

se da sa porastom pritiska ubrizgavanja (povećanjem Rejnoldsovog broja za zadatu kombinaciju prečnika mlaznice i vrste goriva) kavitacioni broj opada. Takođe, kavitacioni broj opada sa opadanjem pritiska u komori. Kritični kavitacioni broj za nekoliko karakterističnih vrednosti odnosa prečnika ulaznog i izlaznog otvora mlaznice prikazan je isprekidanim linijama. Zaključuje se da sa povećanjem stepena koničnosti mlaznice i povećanjem pritiska gasa u komori, uslovi za pojavu kavitacije se pomeraju u područje viših vrednosti Rejnoldsovog broja.



Slika 6.16: Kavitacioni broj u funkciji *Re* za različite modele i različite odnose $D_{N,\mathrm{in}}/D_{N,\mathrm{out}}$.



Slika 6.17: Kavitacioni broj u funkciji *Re* za različite modele i različite odnose $D_{N,\mathrm{in}}/D_{N,\mathrm{out}}$.

Program 6.24: `kavitacija_0040.m`

```
% Određivanje režima strujanja u kome se postiže kritična vrednost
% kavitacionog broja pri strujanju kroz mlaznicu brizgača
% S. Popović 202404.v01

% Ref.
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing bubbles
% in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777

clear;
close all;
clc;

% ReNum=1000:1000:15000;
% R_Nozzle_Round=8E-06;
% R_Nozzle_Round=0.0E-06:0.5E-06:30E-06;

% Definisanje pritiska pare goriva
p_FuelVapor=0.08E+06;

% Definisanje opsega pritiska goriva u akumulatoru
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_p_Rail n_p_Rail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega pritiska gasa u cilindru
p_GasMin=5E+05;
p_GasMax=65E+05;
dp_Gas=15E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_p_Gas n_p_Gas]=size(p_Gas);

% Učitavanje strukture sa podacima o mlaznici brizgača
% [ND]=NozzleData();
% L_Nozzle=773E-06;
% D_Nozzle_In=133E-06;
% D_Nozzle_Out=ND.dOut;
L_Nozzle=773E-06;
D_Nozzle_InMin=135E-06;
D_Nozzle_InMax=155E-06;
dD_Nozzle_In=5E-06;
D_Nozzle_In=D_Nozzle_InMin:dD_Nozzle_In:D_Nozzle_InMax;
[m_DNIn n_DNIn]=size(D_Nozzle_In);
D_Nozzle_Out=130E-06;
Ccon=(D_Nozzle_In)./D_Nozzle_Out;

% R_Nozzle_Round=8E-06;
R_Nozzle_Round=5E-06:5E-06:25E-06;
[m_R n_R]=size(R_Nozzle_Round);

% Učitavanje podataka o gorivu
```

```
[FP]=FuelData('diesel EN590 ED2023/L1');
visc=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType);


for i=1:1:n_p_Gas
    for j=1:1:n_p_Rail
        dp(i,j)=p_Rail(1,j)-p_Gas(1,i);

        [u_Nozzle(i,j)]=NozzleVelocityTh(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),FP.rho);

        [ReNum(i,j)]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out,u_Nozzle(i,j), visc, 0);
        [CavNum(i,j)]=CavNumTh(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),p_FuelVapor,'Hall-Nurick');
    end
end

% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanje kritične vrednosti kavitacionog broja
% Važna napomena:
% Jedinice koje se koriste u originalnom članku definisane su na sl. način:
% pritisak u [MPa]
% Prečnik mlaznice u [um]
for i=1:1:n_DNIn
    for j=1:1:n_p_Rail
%         [CavNumCrit_Payri(i,j)]=CNCrit_Payri(p_Rail(1,j),D_Nozzle_In(1,i),
    D_Nozzle_Out);
        [CavNumCrit_Macian(i,j)]=CNCrit_Macian(p_Rail(1,j),D_Nozzle_In(1,i),
            D_Nozzle_Out,R_Nozzle_Round(1,1));
    end
end
% ------------------------------------------------------------

figure(1);
Ax1=axes;
% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
colororder('default');
for i=1:1:n_p_Gas
%     HdlPlot1(i)=plot(Ax1,ReNum(1,:),CavNum(i,:),LineSet(i,:));
    HdlPlot1(i)=plot(Ax1,ReNum(1,:),CavNum(i,:));
    grid on;
    hold on;
end

% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
for i=1:1:n_DNIn
%     HdlPlot2(i)=plot(Ax1,ReNum(1,:),CavNumCrit_Payri(i,:),LineSet(i,:));
%     HdlPlot2(i)=plot(Ax1,ReNum(1,:),CavNumCrit_Payri(i,:),'--');
    HdlPlot2(i)=plot(Ax1,ReNum(1,:),CavNumCrit_Macian(i,:),'--');
    grid on;
    hold on;
end
hold off;
xlabel ('R_e [-]');
ylabel('K_{Cav}, K_{Cav,Crit} [-]');
xtickformat('%.1f');
```

```
ytickformat('%.2f');
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.1f');
lgd1 = legend(Ax1,HdlPlot1(:),LegendLabel,'position',[0.55 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd1,{'K_{Cav} vs.'; 'p_{GAS} [MPa]'});
Ax2=axes('Position', get(gca,'Position'),'Visible','Off');
LegendLabel=num2str((Ccon)','%.2f');
lgd2 = legend(Ax2,HdlPlot2(:),LegendLabel,'position',[0.75 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd2,{'K_{Cav,Crit} vs.'; 'D_{N,in}/D_{N,out}'});

figure(2);
Ax3=axes;
% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
for i=1:1:n_p_Gas
%     HdlPlot3(i)=plot(Ax3,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNum(i,:),LineSet(i,:));
    HdlPlot3(i)=plot(Ax3,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNum(i,:));
    grid on;
    hold on;
end

% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
for i=1:1:n_DNIn
%     HdlPlot4(i)=plot(Ax3,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNumCrit_Payri(i,:),LineSet(i,:));
    HdlPlot4(i)=plot(Ax3,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNumCrit_Macian(i,:),'--');
    grid on;
    hold on;
end

xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06, (p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-05]);
xlabel ('p_{Rail} [bar]');
ylabel('K_{Cav}, K_{Cav,Crit} [-]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.3f');
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.1f');
lgd3 = legend(Ax3,HdlPlot3(:),LegendLabel,'position',[0.55 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd3,{'K_{Cav} vs.'; 'p_{GAS} [MPa]'});
Ax4=axes('Position', get(gca,'Position'),'Visible','Off');
LegendLabel=num2str((Ccon)','%.2f');
lgd4 = legend(Ax4,HdlPlot4(:),LegendLabel,'position',[0.75 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd4,{'K_{Cav,Crit} vs.'; 'D_{N,in}/D_{N,out}'});
```

Program 6.25: `CavNumTh.m`

```
function [CavNum]=CavitationNumber(pIn,pOut,pVapor,opt)
% Funkcija za izračunavanje kavitacionog broja
% S. Popović 202404.v01
%
% Ref.
% W. H. Nurick
% Flow Characteristics and Status of CFD Hydrodynamic Model Development in
% Sudden Contraction Manifold/Orifice Configurations
% AFRL-RZ-ED-TP-2011-0021
```

```
% AIR FORCE RESEARCH LABORATORY PROPULSION DIRECTORATE
% str. 24(33), izraz (29)

% R. Payri, J.M. Garcia, F.J. Salvador, J. Gimeno
% Using spray momentum flux measurements to understand the influence
% of diesel nozzle geometry on spray characteristics
% Fuel 84 (2005) 551-561
% izraz (15-16)

% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing
% bubbles in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777
% izraz (2, 3)

% F. Payri, V. Bermu´dez, R. Payri*, F.J. Salvador
% The influence of cavitation on the internal flow and the spray
% characteristics in diesel injection nozzles
% Fuel 83 (2004) 419-431
% izraz (2, 3)

% David P. Schmidt, Christopher J. Rutland, M. L. Corradini
% A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes
% SAE 971597
% izraz (9)

% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% izraz(2.17)
% ------------------------------------------------------------------------
% Macian, V., Pyri, R., Margot, X., Salvador, F. J.
% A CFD Analysis of the influence of diesel nozzle geometry on the
% inception of cavitation
% Atomization and sprays, vol. 13, pp. 579-604, 2003
% izraz (2)
% Napomena: inverzna vrednost u odnosu na izraz 29@Nurick
% ------------------------------------------------------------------------
% R. Payri, F.J. Salvador, M. Carreres*, M. Belmar-Gil
% Thermal effects on the diesel injector performance through adiabatic 1D
% modelling. Part II: Model validation, results of the simulations and
% discussion
% Fuel 84 (2005) 551-561
% Izraz (4)
% Refernca [26]
% Soteriou C, Andrews R, Smith M. Direct injection diesel sprays and the effect of
% cavitation and hydraulic flip on atomization
% SAE Pap 950080 1995. doi: 10.4271/950080.
% % Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
```

```
% izraz(2.16)

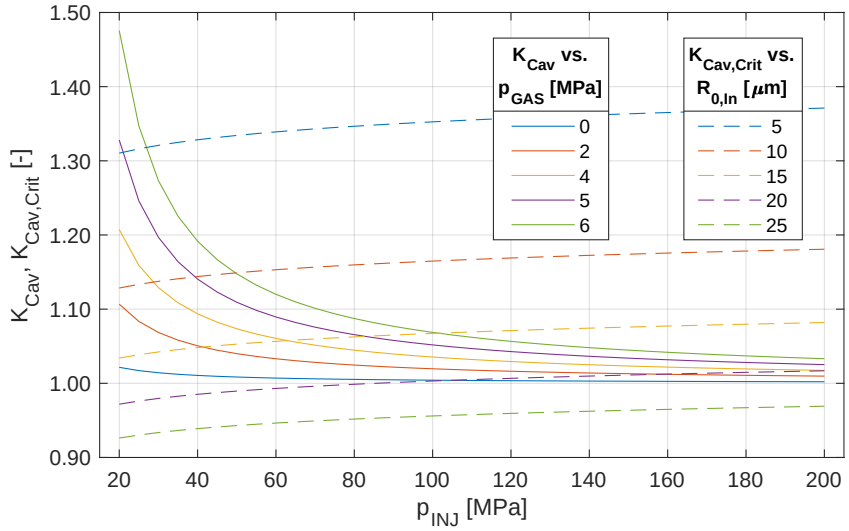
switch opt
    case 'Hall-Nurick'
        CavNum=(pIn-pVapor)./(pIn-pOut);
    case 'Soteriou'
        CavNum=(pIn-pOut)./(pOut-pVapor);
    case 'CavPar'
        CavNum=(pIn-pOut)./(pIn-pVapor);
    otherwise
end
```

6.2.6 Uticaj radijusa ulazne ivice mlaznice na kritični kavitacioni broj - model Masijan

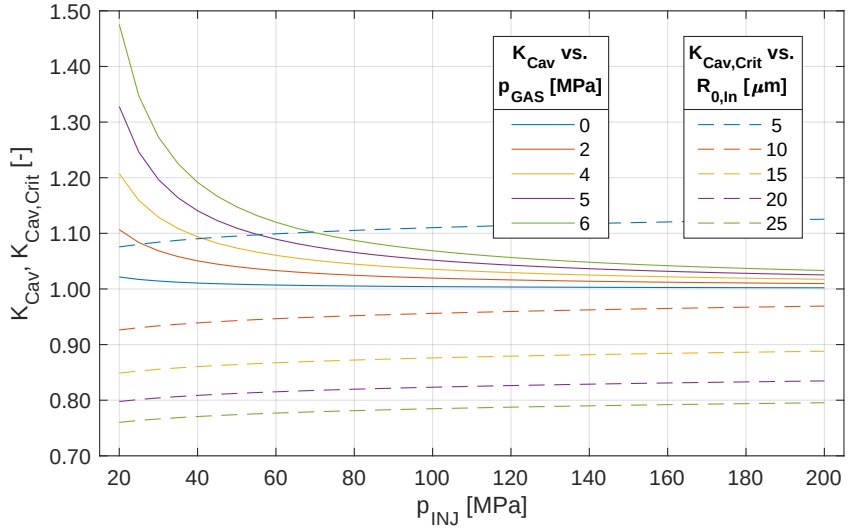
Koristeći kao osnovu podatke i proračun iz prethodnog primera, analizirati uticaj radijusa zaobljenja ivice ulaznog otvora mlaznice na kvitacioni broj i kritični kavitacioni broj. Analizu sprovesti za minimalni i maksimalni prečnik ulaznog otvora mlaznice iz opsega definisanog u prethodnom primeru. Pretpostaviti da se radijus zaobljenja ulazne ivice kreće u opsegu od $5 \cdot 10^{-6}$ m do $25 \cdot 10^{-6}$ m. Rezultate proračuna prikazati grafički u zavisnosti od pritiska goriva u akumulatoru.

Rešenje

Rezultati proračuna uticaja radijusa zaobljenja ivice ulaznog otvora mlaznice prikazani su za prečnike ulaznog otvora od $130 \cdot 10^{-6}$ m i $150 \cdot 10^{-6}$ m slici 6.18 i 6.18, respektivno. Vrednosti i karakter zavisnosti kavitacionog broja ostao je nepromenjen u odnosu na proračun iz prethodnog primera. U slučaju mlaznice sa blago izraženim stepenom koničnosti koja se i formalno može smatrati cilindričnom mlaznicom ($D_{N,in} = 130\,\mu$m, $D_{N,out} = 129{,}9\,\mu$m), može se konstatovati da se uvođenjem radijusa zaobljenja od $20\,\mu$m i $25\,\mu$m može sprečiti pojava kavitacije na punom opsegu pritiska ubrizgavanja, bez obzira pri kom pritisku gasa u komori se odvija obrazovanje smeše. Analizom dijagrama na slici 6.18 koja se odnosi na mlaznicu sa povećanim stepenom koničnosti ($D_{N,in} = 150\,\mu$m, $D_{N,out} = 129{,}9\,\mu$m), konstatuje se da se obrazovanje smeše bez kavitacije može ostvariti u svim slučajevima osim sa minimalnim radijusom zaobljenja ulazne ivice ($5\,\mu$m) i najnižim izabranim pritiskom gasa u komori (0,5 MPa).



Slika 6.18: Kavitacioni broj za različite pritiske gasa u komori i kritični kavitacioni broj za različite radijuse zaobljenja za cilindričnu mlaznicu brizgača.



Slika 6.19: Kavitacioni broj za različite pritiske gasa u komori i kritični kavitacioni broj za različite radijuse zaobljenja za konusnu mlaznicu brizgača.

Program 6.26: `kavitacija_0050.m`

```
% Određivanje režima strujanja u kome se postiže kritična vrednost
% kavitacionog broja pri strujanju kroz mlaznicu brizgača
% Uticaj radijusa zaobljenja ulazne ivice konusne mlaznice
% S. Popović 202404.v01

% Ref.
% R. Payri *, F.J. Salvador, J. Gimeno, J. de la Morena
```

```
% Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing bubbles
% in a liquid pressurized chamber
% International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 768-777

% Macian, V., Payri, R., Margot, X., Salvador, F. J.
% A CFD Analysis of the influence of diesel nozzle geometry on the
% inception of cavitation
% Atomization and sprays, vol. 13, pp. 579-604, 2003
% izraz (6-10)

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje pritiska pare goriva
p_FuelVapor=0.08E+06;

% Definisanje opsega pritiska goriva u akumulatoru
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_p_Rail n_p_Rail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega pritiska gasa u cilindru
p_GasMin=5E+05;
p_GasMax=65E+05;
dp_Gas=15E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_p_Gas n_p_Gas]=size(p_Gas);

% Učitavanje strukture sa podacima o mlaznici brizgača
% [ND]=NozzleData();
% L_Nozzle=773E-06;
% D_Nozzle_In=133E-06;
% D_Nozzle_Out=ND.dOut;
L_Nozzle=773E-06;
D_Nozzle_InMin=130E-06;
D_Nozzle_InMax=150E-06;
dD_Nozzle_In=20E-06;
D_Nozzle_In=D_Nozzle_InMin:dD_Nozzle_In:D_Nozzle_InMax;
[m_DNIn n_DNIn]=size(D_Nozzle_In);
D_Nozzle_Out=129.9E-06;

% R_Nozzle_Round=8E-06;
R_Nozzle_Round=5E-06:5E-06:25E-06;
[m_R n_R]=size(R_Nozzle_Round);

% Učitavanje podataka o gorivu
[FP]=FuelData('diesel EN590 ED2023/L1');
visc=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType);

for i=1:1:n_p_Gas
    for j=1:1:n_p_Rail
        dp(i,j)=p_Rail(1,j)-p_Gas(1,i);
```

```
        [u_Nozzle(i,j)]=NozzleVelocityTh(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),FP.rho);
        [ReNum(i,j)]=dlqReynolds(D_Nozzle_Out,u_Nozzle(i,j), visc, 0);
        [CavNum(i,j)]=CavNumTh(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),p_FuelVapor,'Hall-Nurick');
    end
end

% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanje kritične vrednosti kavitacionog broja
% Važna napomena:
% Jedinice koje se koriste u originalnom članku definisane su na sl. način:
% pritisak u [MPa]
% Prečnik mlaznice u [um]
for i=1:1:n_R
    for j=1:1:n_p_Rail
%           [CavNumCrit_Payri(i,j)]=CNCrit_Payri(p_Rail(1,j),D_Nozzle_In(1,2),
    D_Nozzle_Out);
        [CavNumCrit_Macian(i,j)]=CNCrit_Macian(p_Rail(1,j),D_Nozzle_In(1,1),
            D_Nozzle_Out,R_Nozzle_Round(1,i));

    end
end
% ------------------------------------------------------------

figure(1);
Ax1=axes;
% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
colororder('default');
for i=1:1:n_p_Gas
%     HdlPlot1(i)=plot(Ax1,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNum(i,:),LineSet(i,:));
    HdlPlot1(i)=plot(Ax1,p_Rail(1,:).*1E-06,CavNum(i,:));
    grid on;
    hold on;
end

% LineSet=['k-', 'r-', 'b-', 'm-', 'g-'];
set(gca,'ColorOrderIndex',1)
for i=1:1:n_R
%     HdlPlot2(i)=plot(Ax1,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNumCrit_Macian1(i,:),LineSet1(i,:)
    );
    HdlPlot2(i)=plot(Ax1,p_Rail(1,:).*1E-06,CavNumCrit_Macian(i,:),'--');
%     HdlPlot2(i)=plot(Ax1,p_Rail(1,:).*1E-05,CavNumCrit_Payri(i,:),'--');
    grid on;
    hold on;
end

xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06, (p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06])
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('K_{Cav}, K_{Cav,Crit} [-]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.2f');
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.0f');
% lgd1 = legend(Ax1,HdlPlot1(:),LegendLabel,'location','North');
% title(lgd1,'p_{GAS} [bar] ');
lgd1 = legend(Ax1,HdlPlot1(:),LegendLabel,'position',[0.55 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd1,{'K_{Cav} vs.'; 'p_{GAS} [MPa]'});
```

```
Ax2=axes('Position', get(gca,'Position'),'Visible','Off');
LegendLabel=num2str((R_Nozzle_Round.*1.0E+06)','%.0f');
% lgd2 = legend(Ax2,HdlPlot2(:),LegendLabel,'location','NorthEast');
% title(lgd2,'D_{Nozzle,In} [\mum] ');
lgd2 = legend(Ax2,HdlPlot2(:),LegendLabel,'position',[0.75 0.65 0.1 0.1]);
title(lgd2,{'K_{Cav,Crit} vs.'; 'R_{0,In} [\mum] '});
```

6.3 Raspad kapljice goriva

Dalji raspad kapljice goriva je prouzorkovan uticajem spoljne atmosfere na posmatranu kapljicu. Najvažniju ulogu imaju pritisak i trenje koje se javlja između kapljice i okolnog gasa zbog prisustva relativne razlike brzina u_{rel}.

Zbog interakcije kapljice goriva sa okolnim vazduhom i zbog pomenutih pojava, dolazi do oscilovanja površine kapljice (ili do oscilovanja cele kapljice) i do njenog daljeg raspadanja na sitnije kapljice. Sa druge strane, površinski pritisak kapljice teži da onemogući dalji raspad kapljice. Što je manja kapljica, potrebna je veća relativna brzina da bi došlo do daljeg raspadanja. Ova zavisnost se predstavlja Veberovim brojem za gas, odnosno spoljnu sredinu:

$$We_g = \frac{u_{rel}^2 D \rho_g}{\sigma} \tag{6.30}$$

gde je:

D Prečnik kapljice;

ρ_g Gustina gasa;

σ Površinski napon kapljice goriva kada se nalazi u vazduhu sveden na dužinsku meru ($\sigma \approx 0.02\,{}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$).

6.3.1 Uticaj pritiska gasa na vreme raspada mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom usisavanja - model Hirojasu-Arai

Koristeći empirijski model Hirojasua i Araija (Hiroyasu & Arai) [46], napisati funkciju za izračunavanje vremena primarnog raspada mlaza dizel-goriva, a zatim napisati program za izračunavanje vremena primarnog raspada pretpostavljajući sledeće uslove obrazovanja smeše u cilindru:

- Ubrizgavanje se obavlja tokom niskopritisnog dela ciklusa (sistem obrazovanja predmešane smeše kod motora sa paljenjem sabijanjem: PCCI (eng.: *Pre-mixed Charge Compression Ignition*) na opsegu pritisaka gasa u cilindru od 0,1 MPa do 0,5 MPa;

- Temperatura u cilindru tokom ubrizgavanja je konstantna i nepromenljiva za sve zadate vrednosti pritiska gasa u cilindru i iznosi 323 K (pretpostavlja se primena sistema natpunjenja sa međuhlađenjem, temperatura vazduha za punjenje je konstantna, a zagrevanje gasa u cilindru tokom niskopritisnog dela ciklusa se zanemaruje);
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 50 MPa.

Pretpostaviti da je gas u cilindru čist vazduh i da se gorivo ubrizgava u mirnu sredinu. Rezultate proračuna vremena primarnog raspada mlaza prikazati grafički u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u cilindru.

Rešenje

Izraz za izračunavanje vremena primarnog raspada mlaza prema modelu Hirojasua i Araija dat je u sledećem obliku:

$$t_{BU} = 28{,}65 \cdot \frac{\rho_F \cdot D_N}{\sqrt{\rho_G \cdot (p_{INJ} - p_G)}} \tag{6.31}$$

Veličine su definisane na sledeći način:

t_{BU} [s] Vreme primarnog raspada;

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

ρ_F [kg/m³] Gustina goriva;

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [s] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [s] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru.

Gustina gasa u cilindru određuje se primenom jednačine stanja idealnog gasa za zadatu konstantnu temperaturu i zadati opseg pritisaka gasa. U nastavku, prikazana je glavna funkcija za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `VremeRaspadaMlaza01.m` (6.27) i funkcija `SBT_Hiroyasu.m` (6.28). Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.20.

Program 6.27: `VremeRaspadaMlaza01.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada mlaza
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
```

```
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev1
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=250E+05;
p_RailMax=500E+05;
dp_Rail=5.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=1.0E+05;
p_GasMax=5.0E+05;
dp_Gas=1.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Definisanje temperature gasa za definisani opseg pritiska u cilindru
T_Gas=323.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'

[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_Nozzle=ND.dOut;
```

```
for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_pGas
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,j)./(R_Gas.*T_Gas);

        [PrimaryBreakTime(i,j)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas(1,j),rhoFuel,rhoGas,
            D_Nozzle);


    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
figure(1)
    plot(p_Rail.*1.0E-06,PrimaryBreakTime.*1.0E+06, '-o',...
        'MarkerIndices',1:5:length(PrimaryBreakTime(:,1)),'MarkerSize', 3.5)
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('t_{Break-Up} [\mus]');
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.0f')
    xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
    LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
    title(lgd,'p_{Gas} [MPa] ');
```

Program 6.28: `SBT_Hiroyasu.m`

```
function [BreakupTime]=SBT_Hiroyasu(p_Inj,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_Nozzle)
% Funkcija za izračunavanje vremena početka raspada mlaza goriva
% - vreme početka primarnog raspada -
% S. J. Popović
% 202403.v01

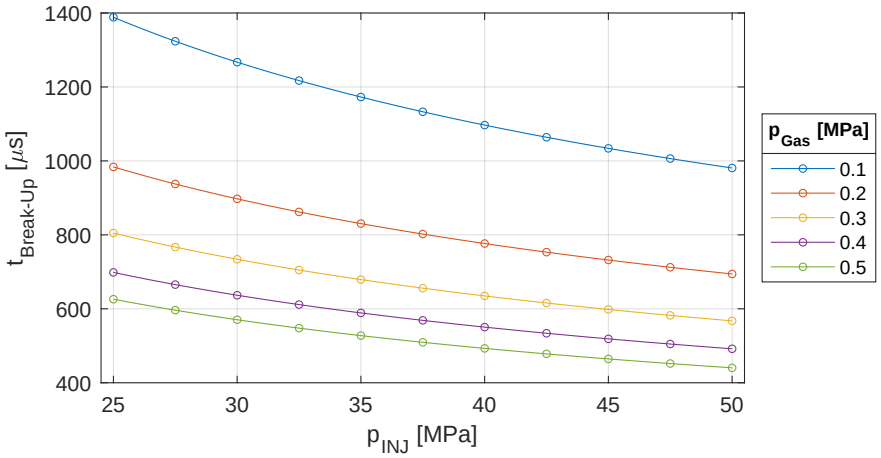
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
%
    % Hiroyasu H, Arai M:
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
    % SAE-paper 900475
    % str. 6, izraz (5)

% Pregled oznaka i jedinica
% p_Inj             [Pa]       pritisak ubrizgavanja
% p_Gas             [Pa]       pritisak gasa u cilindru
% rhoFuel           [kg/m3]    gustina goriva
% rhoGas            [kg/m3]    gustina gasa u cilindru
% D_NozzleOut       [m]        prečnik izlaznog otvora mlaznice
% timeBreak         [s]        vreme raspada mlaza
```

```
% Korekcioni faktori za preračunavanje ulaznih jedinica
corr_p=1.0E-00;      % -
corr_L=1.0E+00;      % -
corr_rho=1.0E-00;    % -

% Izračunavanje članova
dp=(p_Inj-p_Gas).*corr_p;
C0=28.65;
C1=(rhoFuel.*corr_rho).*(D_Nozzle.*corr_L);
C2=(rhoGas.*corr_rho.*dp).^(-0.5);

% Izračunavanje vremena raspada mlaza
BreakupTime=C0.*C1.*C2;
```



Slika 6.20: Vremena primarnog raspada mlaza dizel-goriva u funkciji pritiska ubrizgavanja goriva za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora - niskopritisni deo ciklusa.

Vreme raspada mlaza indirektno ukazuje i na manju dužinu tečnog jezgra mlaza (analiza će biti prikazana u poglavlju 6.4). Načelno, skraćenje dužine tečnog jezgra smanjuje rizik od interakcije mlaza sa zidovima komore i time se smanjuje i rizik od deponovanja tečne faze i formiranje nesagorelih naslaga.

Za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa, može se konstatovati da načelno, na smanjenje vremena raspada mlaza utiče povećanja obe pritisne veličine - i pritiska gasa u cilindru i pritiska ubrizgavanja. Iz ove analize, sledi zaključak i načelna preporuka o izboru viših pritisaka ubrizgavanja.

6.3.2 Uticaj pritiska gasa na vreme raspada mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom sabijanja - model Hirojasu-Arai

Koristeći prethodno razvijenu osnovnu funkciju za izračunavanje vremena primarnog raspada mlaza prema modelu Hirojasua i Araija, napisati program za analiziranje vremena raspada mlaza za uslove obrazovanja smeše tokom sabijanja. Pretpostaviti sledeće uslove za izvođenje proračuna:

- Promena stanja u cilindru je izentropska; ubrizgavanje se obavlja na opsegu pritisaka gasa u cilindru od 0,5 MPa do 6,5 MPa;
- Pretpostaviti referentne uslove u odnosu na koje se proračunavaju termodinamički parametri u cilindru - temperatura i pritisak gasa su 323 K i 0,1 MPa;
- Zanemariti promenu temperature gasa tokom ubrizgavanja;
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 200 MPa.

Pretpostaviti da je gas u cilindru čist vazduh i da se gorivo ubrizgava u mirnu sredinu. Rezultate proračuna vremena primarnog raspada mlaza prikazati grafički u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u cilindru.

Rešenje

U odnosu na prethodni primer, u ovom zadatku je neophodno, najpre, odrediti temperaturu gasa u cilindru, pretpostavlajući izentropsku promenu stanja:

$$T_{G,i} = T_{G,0} \cdot \left(\frac{p_{G,i}}{p_{G,0}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \tag{6.32}$$

$$\rho_{G,i} = \frac{p_{G,i}}{R \cdot T_{G,i}} \tag{6.33}$$

Ili, izračunati gustinu gasa neposredno, koristeći osnovni izraz za promenu gustine gasa za izentropsku promenu stanja preko zadatih vrednosti pritiska:

$$\rho_{G,i} = T_{G,0} \cdot \left(\frac{p_{G,i}}{p_{G,0}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \tag{6.34}$$

Program 6.29: `VremeRaspadaMlaza02.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada mlaza
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
```

```
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=250E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_Gas0=1.0E+05;
p_GasMin=5.0E+05;
p_GasMax=65.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
% T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
T_Gas0=323.0;
T_Gas=T_Gas0.*(p_Gas./p_Gas0).^((n-1)./n);

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

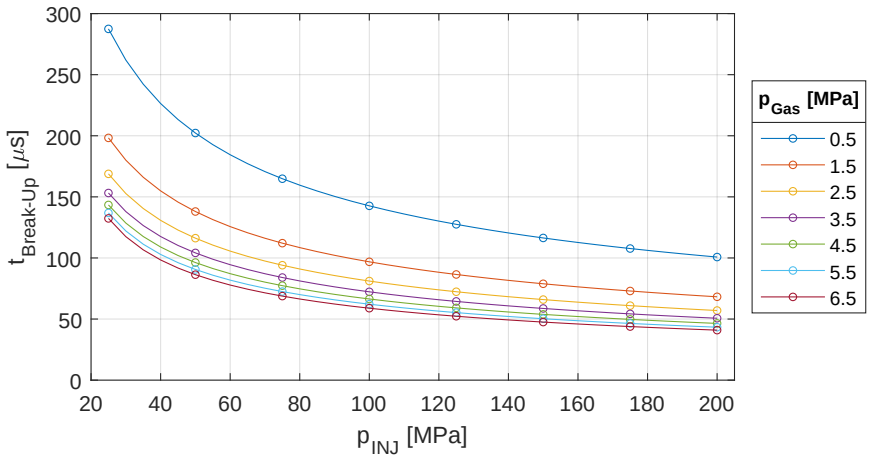
%-------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
```

```
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_Nozzle=ND.dOut;

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_pGas
        [PrimaryBreakTime(i,j)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas(1,j),...
                    rhoFuel,rhoGas(1,j),D_Nozzle);
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
figure(1)
plot(p_Rail.*1.0E-06,PrimaryBreakTime.*1.0E+06, '-o',...
    'MarkerIndices',1:5:length(PrimaryBreakTime(:,1)),'MarkerSize', 3.5)
grid on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('t_{Break-Up} [\mus]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside');
title(lgd,'p_{Gas} [MPa] ');
```



Slika 6.21: Vremena primarnog raspada mlaza dizel-goriva u funkciji pritiska ubrizgavanja goriva za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora - visokopritisni deo ciklusa.

Zavisnost je ista kao i u slučaju obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa. Međutim, vreme raspada mlaza se skraćuje višestruko (do 10 puta, zavisno od posmatrane kombinacije pritisak gasa - pritisak goriva), na osnovu čega sledi važan zaključak o obrazovanju smeše pri višim pritiscima gasa u komori kao povoljnijem slučaju.

6.4 Dužina jezgra mlaza

6.4.1 Uticaj pritiska goriva u uslovima obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai

Koristeći empirijski model Hirojasua i Araija [46], napisati funkciju za izračunavanje dužine jezgra mlaza dizel-goriva, a zatim napisati program za izračunavanje dužine jezgra mlaza za sledeće uslove obrazovanja predmešane smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa (sistem PCCI - *eng.: Pre-mixed Charge Compression Ignition*):

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri ($p = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$ do $0{,}5\,\mathrm{MPa}$, $T = 298\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru je od $20\,\mathrm{MPa}$ do $200\,\mathrm{MPa}$;
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$.
- Radijus ivice na ulaznom preseku mlaznice je $10 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$.
- Odnos dužine i prečnika mlaznice 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Rešenje

Prema modelu Hirojasua i Araija [46], dužina jezgra mlaza, a istovremeno i rastojanje na kome dolazi do raspada mlaza, izračunava se sledećim izrazom:

$$L_{BU} = 7 \cdot D_N \cdot \left(1 + 0{,}4\frac{r_{0,IN}}{D_N}\right) \cdot \left(\frac{p_G}{\rho_F \cdot u_{INJ}^2}\right)^{0{,}05} \cdot \left(\frac{L_N}{D_N}\right)^{0{,}13} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0{,}5} \tag{6.35}$$

Veličine su definisane na sledeći način:

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

$r_{0,IN}$ [m] Radijus ivice na ulaznom preseku mlaznice;

L_N [m] Dužina mlaznice brizgača;

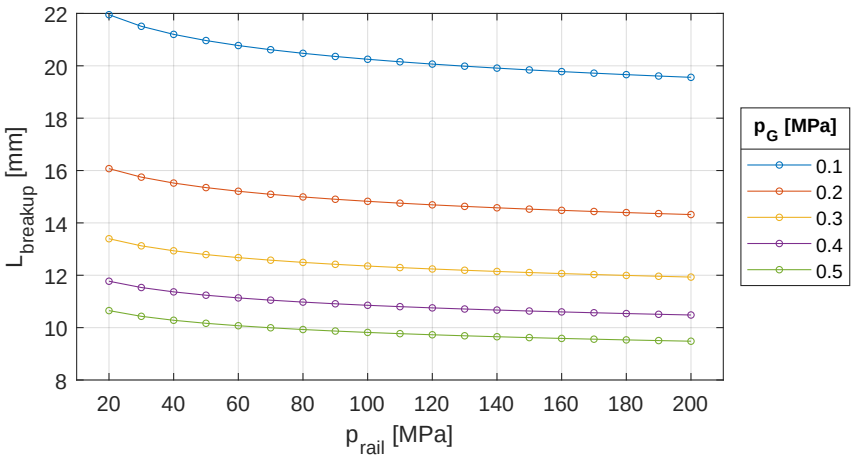
ρ_F [kg/m³] Gustina goriva;

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [s] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [Pa] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru.

U nastavku, prikazana je funkcija `SBL_Hiroyasu.m` i glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza `JezgroMlaza01.m`. Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.22.



Slika 6.22: Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska dizel-goriva u magistrali za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora za niskopritisni delo ciklusa.

Uočava se da sa porastom pritiska ubrizgavanja dužina tečnog jezgra za izabranu diskretnu vrednost pritiska gasa u komori opada. Rezultat na prvi pogled deluje neočekivano, međutim uticaj povišenog pritiska ubrizgavanja na ranu pojavu raspada mlaza odražava se i na skraćenje jezgra mlaza. Očekivano, dužina jezgra opada sa povećanjem pritiska gasa u cilindru (indirektno, preko povećanja gustine i otpora strujanja.

Program 6.30: `JezgroMlaza01.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
```

```
    % Hiroyasu H, Arai M (1990)
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
    % SAE paper 900475

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=1.0E+05;
p_GasMax=5.0E+05;
dp_Gas=1.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
% T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
T_Gas=298.0;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
% Slučaj kada se zanemaruje uticaj pritiska i temperature goriva na gustinu
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
% Slučaj kada se ne zanemaruje uticaj pritiska i temperature goriva na gustinu
FuelType='EN590ref'
T_Fuel=313.0; % [K]

% [rhoFuel, kT, betaT]=DFD_Payri(pFuel,TFuel,FuelType);
% [ViscDyn]=VFD_Barus(ViscDyn0,pFuel,FuelType);
```

```
%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
miFuel=niFuel.*rhoFuel;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_pGas
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,j)./(R_Gas.*T_Gas);

        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u]=NozzleVelocity(p_Rail(1,i),p_Gas(1,j),rhoFuel,L_Nozzle,D_NozzleOut);

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u,niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoGas,sigmaFuel);

        [BuL_Hiroyasu(i,j)]=SBL_Hiroyasu(D_NozzleOut,L_Nozzle,r0_Nozzle,u,...
                                         rhoFuel,rhoGas,p_Gas(1,j));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
colororder('default');
figure(1)
plot(p_Rail.*1.0E-06,BuL_Hiroyasu.*1.0E+03, '-o','LineWidth',0.5,'MarkerSize',3)
grid on;
xlabel ('p_{rail} [MPa]');
ylabel('L_{breakup} [mm]');
xtickformat('%.0f')
```

```
ytickformat('%.0f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','eastoutside');
title(lgd,'p_{G} [MPa] ');
```

Program 6.31: `UnitConverterDensity.m`

```
function [DensityOut]=UnitConverterDensity(DensityIn, DensityUnitIn, DensityUnitOut
    )
% Funkcija za preračunavanje jedinica kinematske viskoznosti
% DensityIn         [ ]       Vrednost površinskog napona u jedinicama
    SurfTensUnitIn
% DensityUnitIn     [ ]       Ulazna jedinica za gustinu
%                             [kg/m3]
%                             []
%
% DensityUnitOut    [ ]       Izlazna jedinica za gustinu
%                             [kg/m3]
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje ulazne jedinice (SurfTensUnitIn)
    u [N/m]
switch DensityUnitIn
    case '[kg/m3]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[kg/dm3]'
        CorrFactIn=1.0E+03;
    case '[kg/cm3]'
        CorrFactIn=1.0E+06;
    case '[g/m3]'
        CorrFactIn=1.0E-03;
    case '[g/dm3]'
        CorrFactIn=1.0E+00;
    case '[g/cm3]'
        CorrFactIn=1.0E+03;
    otherwise
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Ulazna jedinica nije prepoznata');
end
% Određivanje faktora korekcije za preračunavanje [N/m] u izlazne jedinice (
    SurfTensUnitOut)
switch DensityUnitOut
    case '[kg/m3]'
        CorrFactOut=1.0E+00;
    otherwise
        disp('Funkcija SurfTensUnitConverter: Izlazna jedinica nije prepoznata');
end
DensityOut=CorrFactIn.*CorrFactOut.*DensityIn;
```

Program 6.32: `NozzleVelocity.m`

```
function [u_Nozzle]=NozzleVelocity(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,L_Nozzle,D_Nozzle)
% Funkcija za izračunavanje brzine strujanja kroz mlaznicu brizgača
% u_Nozzle              [m/s]   Brzina strujanja u mlaznici
% D_Nozzle              [m]     Prečnik mlaznice
% DischargeCoeff        [-]     Koeficijent protoka
% p_Rail                [Pa]    Pritisak u akumulatoru (pritisak ispred brizgača)
% p_Gas                 [Pa]    Pritisak gasa u cilindru (pritisak iza brizgača)
% rhoFuel               [kg/m3] Gustina goriva
% ------------------------------------------------------------
% Teorijska osnova: Bernulijeva (Bernoulli) jednačina
% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja u mlaznici
% Mithun Das*, Mouktik Sarkar, Amitava Datta, Apurba Kumar Santra
% Study on viscosity and surface tension properties of biodiesel-diesel
% blends and their effects on spray parameters for CI engines
% Fuel 220 (2018) 769-779
Cd=0.827-0.0085.*(L_Nozzle./D_Nozzle);

% Wei Zeng, Min Xu, Ming Zhang, Yuyin Zhang, David J. Cleary
% Macroscopic characteristics for direct-injection multi-hole sprays using
% dimensionless analysis
% Experimental Thermal and Fluid Science 40 (2012) 81-92
% Cd=1./(1.23+58.0.*(L_Nozzle./D_Nozzle)./ReNum);
% Cd=1.0;
u_Nozzle=Cd.*sqrt(2.0.*(p_Rail-p_Gas)./rhoFuel);
```

Program 6.33: `SBL_Hiroyasu.m`

```
function [BreakupLength]=SBL_Hiroyasu(D_Nozzle,L_Nozzle,r0_Nozzle,u,...
                                      rhoLiquid,rhoGas,pGas)

% Funkcija za izračunavanje dužine tečnog jezgra mlaza
% - rastojanje na kome počinje primarni raspad -
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.
% Gunnar Stiesch
% Modeling Engine Spray and Combustion Processes, Springer-Verlag BerlinHeidelberg
    GmbH
% ISBN 978-3-642-05629-1
% ISBN 978-3-662-08790-9 (eBook)
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
    % Hiroyasu H, Arai M (1990)
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
    % SAE paper 900475

C1=(1.0+0.4.*r0_Nozzle./D_Nozzle);
C2=(pGas./(rhoLiquid.*(u.^2)));
```

```
C3=(L_Nozzle./D_Nozzle);
C4=(rhoLiquid./rhoGas);
BreakupLength=7.0.*D_Nozzle.*C1.*(C2.^(+0.05)).*(C3.^(+0.13)).*(C4.^(+0.50));
```

6.4.2 Uticaj pritiska goriva u uslovima obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai

Koristeći program razvijen za izračunavanje dužine tečnog jezgra mlaza za uslove iz prethodnog zadatka, sprovesti proračun za uslove obrazovanja predmešane smeše tokom faze sabijanja. Pretpostaviti da je radna materija čist vazduh i da je promena stanja izentropska (u prvom približenju zanemariti realan sastav gasa i uticaj prenosa toplote). Proračun sprovesti za sledeće parametre:

- Temperatura na početku sabijanja: 400 K
- Opseg pritisaka tokom sabijanja: od 5 MPa do 55 MPa
- Pritisak goriva u akumulatoru: 20 MPa do 200 MPa
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}$ m.
- Radijus ivice na ulaznom preseku mlaznice je $10 \cdot 10^{-6}$ m.
- Odnos dužine i prečnika mlaznice je jednak 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Rešenje

U osnovi, ovaj zadatak se rešava izmenom nekoliko osnovnih parametara iz prethodnog zadatka kojima se definiše opseg promene termodinamičkih parametara. Pošto su osnovni parametri na strani sistema ubrizgavanja ostali nepromenjeni (karakteristike goriva, opseg pritiska ubrizgavanja, geometrija mlaznice), problem se svodi na utvrđivanje uticaja gustine gasa na tečno jezgro mlaza. Promena stanja u cilindru posmatra se na pojednostavljen način uz zanemarivanje realnog sastava gasa (uticaj goriva, zaostalih produkata sagorevanja i eventualno recirkulacije izduvnih gasova) i efekata prenosa toplote (cilindar - gas i gas - cilindar). Polazi se od osnovnog izraza za izentropsku (adijabatsku) promenu stanja:

$$p_1 \cdot V_1^{\kappa} = p_2 \cdot V_2^{\kappa} \tag{6.36}$$

Ili, zamenom zapremine iz jednačine stanja idealnog gasa i prelaskom na vezu u p-T koordinatama:

$$\frac{T_1^{\kappa}}{p_1^{\kappa-1}} = \frac{T_2^{\kappa}}{p_2^{\kappa-1}} \tag{6.37}$$

Odakle se dobija izraz za izračunavanje temperature za proizvoljnu vrednost pritiska:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \tag{6.38}$$

Ili, u odnosu na pretpostavljene vrednosti pritiska i temperature na početku sabijanja (p_{ref}, T_{ref})

$$T_i = T_{\text{ref}} \left(\frac{p_i}{p_{\text{ref}}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \tag{6.39}$$

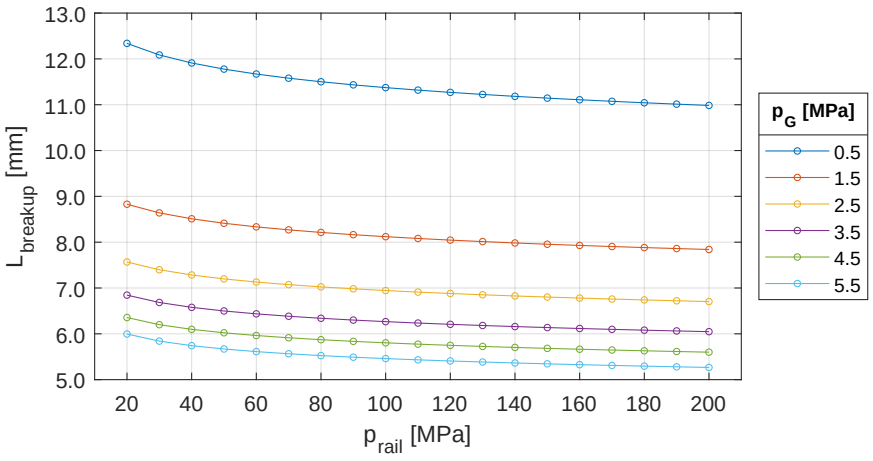
Iz ovog izraza, gustina gasa se za proizvoljnu vrednost pritiska iz zadatakog opsega može izračunati primenom jednačine stanja idealnog gasa. Ukoliko podatak o temperaturi gasa nije potreban za dalji proračun (npr. za izračunavanje viskoznosti gasa koji figuriše u izrazima za Rejnoldsov broj), isti rezultat, može se dobiti direktno, polazeći od direktne veze pritiska i gustine pri izentropskoj promeni stanja:

$$\frac{p_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}}^{\kappa}} = \frac{p_i}{\rho_{\text{i}}^{\kappa}} \tag{6.40}$$

Odnosno:

$$\rho_i = \rho_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{p_i}{p_{\text{ref}}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \frac{p_{\text{ref}}}{R \cdot T_{\text{ref}}} \cdot \left(\frac{p_i}{p_{\text{ref}}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \tag{6.41}$$

Rezultati proračuna za zadate uslove prikazani su na slici 6.23. Poređenjem sa rezultatima proračuna za uslove obrazovanja smeše tokom niskopritisnog ciklusa, za iste parametre ubrizgavanja, očekivana dužina jezgra mlaza se smanjuje za oko 50%.



Slika 6.23: Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska dizel-goriva u magistrali za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora za visokopritisni delo ciklusa.

Program 6.34: `JezgroMlaza02.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza
%
% Prikaz uticaja pritiska i temperature gasa u komori pri različitim vrednostima
    pritiska
% ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa (sabijanje)
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
```

```
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=5.0E+05;
p_GasMax=55.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
T_GasMin=400;
T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
% T_Gas=298.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
miFuel=niFuel.*rhoFuel;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
```

```
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_pGas
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,j)./(R_Gas.*T_Gas(1,j));

        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u]=NozzleVelocity(p_Rail(1,i),p_Gas(1,j),rhoFuel,L_Nozzle,D_NozzleOut)

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u,niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoGas,sigmaFuel);

        [BuL_Hiroyasu(i,j)]=SBL_Hiroyasu(D_NozzleOut,L_Nozzle,r0_Nozzle,u,...
                                         rhoFuel,rhoGas,p_Gas(1,j));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
colororder('default');
figure(1)
plot(p_Rail.*1.0E-06,BuL_Hiroyasu.*1.0E+03,'-o','LineWidth',0.5,'MarkerSize',3)
grid on;
xlabel ('p_{rail} [MPa]');
ylabel('L_{breakup} [mm]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','eastoutside');
title(lgd,'p_{G} [MPa] ');
```

6.4.3 Uticaj dužine kanala mlaznice - model Hirojasu-Arai

Za uslove obrazovanja smeše vazduha i dizel-goriva u završnoj fazi sabijanja (pritisak gasa 5 MPa, temperatura gasa 800 K) ispitati uticaj promene odnosa dužine i prečnika mlaznice na dužinu tečnog jezgra mlaza pri različitim pritiscima ubrizgavanja. Proračun sprovesti za sledeće uslove:

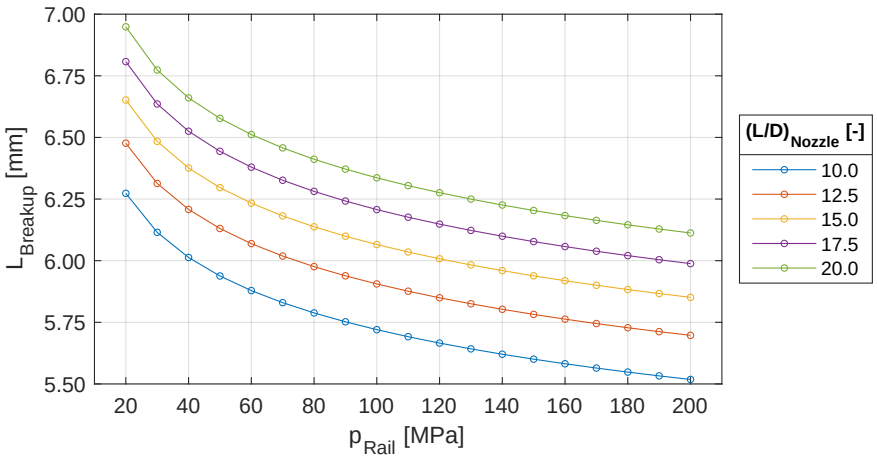
- Pritisak goriva u akumulatoru: 20 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}$ m.

- Radijus ivice na ulaznom preseku mlaznice je $10 \cdot 10^{-6}$ m.
- Opseg odnosa dužine i prečnika mlaznice: 4 do 8

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja, za diskretne vrednosti odnosa dužine i prečnika mlaznice.

Rešenje

Rezultati proračuna za nekoliko diskretnih vrednosti odnosa dužine i nazivnog prečnika mlaznice (4, 5, 6, 7 i 8) prikazani su na slici 6.23. Povećanje dužine mlaznice sa faktorom 2, na osnovu pojednostavljenog proračuna, daje povećanje dužine tečnog jezgra od približno 10% za sve vrednosti pritiska ubrizgavanja koje su obuhvaćene postavkom zadatka.



Slika 6.24: Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska goriva u magistrali za različite vrednosti odnosa karakterističnih veličina mlaznice (L/D).

Program 6.35: `JezgroMlaza03.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza
%
% Prikaz uticaja karakteristike mlaznice (L/D) promenom dužine kanala mlaznice
% pri različitim vrednostima pritiska ubrizgavanja
% tokom visokopritisnog dela ciklusa (sabijanje)
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
```

```
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=50.0E+05;
p_GasMax=50.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
T_GasMin=800;
T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
% T_Gas=298.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

%------------------------------------------------------------
```

```
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
miFuel=niFuel.*rhoFuel;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
% L_Nozzle=ND.L;
L_NozzleMin=ND.L;
L_NozzleMax=2.*ND.L;
dL_Nozzle=0.25.*ND.L;
L_Nozzle=L_NozzleMin:dL_Nozzle:L_NozzleMax;
[m_L_Nozzle n_L_Nozzle]=size(L_Nozzle);

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_L_Nozzle
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,1)./(R_Gas.*T_Gas(1,1));

        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u]=NozzleVelocity(p_Rail(1,i),p_Gas(1,1),rhoFuel,L_Nozzle(1,j),D_NozzleOut
            );

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u,niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoGas,sigmaFuel);

        [BuL_Hiroyasu(i,j)]=SBL_Hiroyasu(D_NozzleOut,L_Nozzle(1,j),r0_Nozzle,u,...
                                         rhoFuel,rhoGas,p_Gas(1,1));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
colororder('default');
figure(1)
plot(p_Rail.*1.0E-06,BuL_Hiroyasu.*1.0E+03, '-o','LineWidth',0.5,'MarkerSize',3)
```

```
grid on;
xlabel ('p_{Rail} [MPa]');
ylabel('L_{Breakup} [mm]');
yticks([5.5:0.25:7])
ytickformat('%.2f');
xtickformat('%.0f');
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
LegendLabel=num2str([L_Nozzle./D_NozzleOut]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','eastoutside');
title(lgd,'(L/D)_{Nozzle} [-] ');
```

6.4.4 Uticaj radijusa ulazne ivice mlaznice - model Hirojasu-Arai

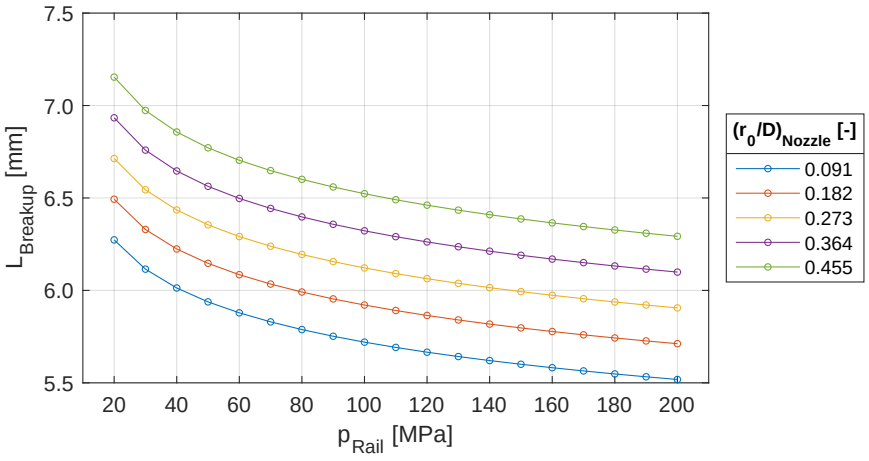
Koristeći prethodno razvijene programe za proračun dužine tečnog jezgra mlaza, sprovesti proračun uticaja radijusa ivice na ulaznom preseku mlaznice za slučaj obrazovanja smeše u završnoj fazi sabijanja (pritisak gasa 5 MPa, temperatura gasa 800 K). Proračun sprovesti za sledeće uslove:

- Pritisak goriva u akumulatoru: 20 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}$ m.
- Opseg radijusa ivice na ulaznom preseku mlaznice je $10 \cdot 10^{-6}$ m do $50 \cdot 10^{-6}$ m.
- Odnos dužine i prečnika mlaznice: 4

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja, za diskretne vrednosti radijusa ivice na ulaznom preseku mlaznice.

Rešenje

Rezultati proračuna za nekoliko diskretnih vrednosti odnosa radijusa ulazne ivice mlaznice i nazivnog prečnika mlaznice (0,1 do 0,5) prikazani su na slici 6.23. Povećanje radijusa ulazne ivice mlaznice sa 10 μm na 50 μm utiče na povećanje dužine tečnog jezgra za sve vrednosti pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega. Rezultat je logičan i očekivan i ukazuje na to da postojanje radijusa napadne ivice potpomaže formiranje stabilne struje u mlaznici, smanjuje efekat odvajanja strujnica od zida mlaznice i utiče na homogenu strukturu mlaza u početnoj fazi isticanja. Efekat je jasno uočljiv, relativna promena iznosi oko 15%, ali je u apsolutnom domenu slabo izražen i iznosi manje od 1 mm.



Slika 6.25: Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska goriva u magistrali za različite vrednosti odnosa karakterističnih veličina mlaznice (L/D).

Program 6.36: `JezgroMlaza04.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza
%
% Prikaz uticaja karakteristike mlaznice (r0/D) promenom radijusa na ulaznom
    preseku
% mlaznice pri različitim vrednostima pritiska ubrizgavanja
% tokom visokopritisnog dela ciklusa (sabijanje)
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
```

```
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=50.0E+05;
p_GasMax=50.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
T_GasMin=800;
T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
% T_Gas=298.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
miFuel=niFuel.*rhoFuel;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
```

```
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
L_Nozzle=ND.L;
r0_Nozzle=ND.r0In;
r0_NozzleMin=r0_Nozzle;
r0_NozzleMax=5.*r0_Nozzle;
dr0_Nozzle=r0_Nozzle;
r0_Nozzle=r0_NozzleMin:dr0_Nozzle:r0_NozzleMax;
[m_r0 n_r0]=size(r0_Nozzle);

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_r0
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,1)./(R_Gas.*T_Gas(1,1));

        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u]=NozzleVelocity(p_Rail(1,i),p_Gas(1,1),rhoFuel,L_Nozzle,D_NozzleOut);

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u,niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u,rhoGas,sigmaFuel);

        [BuL_Hiroyasu(i,j)]=SBL_Hiroyasu(D_NozzleOut,L_Nozzle,r0_Nozzle(1,j),u,...
                                         rhoFuel,rhoGas,p_Gas(1,1));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
colororder('default');
figure(1)
plot(p_Rail.*1.0E-06,BuL_Hiroyasu.*1.0E+03, '-o','LineWidth',0.5,'MarkerSize',3)
grid on;
xlabel ('p_{Rail} [MPa]');
ylabel('L_{Breakup} [mm]');
xtickformat('%.0f');
ytickformat('%.1f');
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
LegendLabel=num2str([r0_Nozzle./D_NozzleOut]',['%.3f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','eastoutside');
title(lgd,'(r_{0}/D)_{Nozzle} [-] ');
```

6.4.5 Uticaj prečnika izlaznog otvora mlaznice - model Hirojasu-Arai

Primenom modela Hirojasu [46], ispitati uticaj nazivnog prečnika mlaznice na dužinu tečnog jezgra mlaza. Proračun sprovesti za slučaj obrazovanja smeše u završnoj

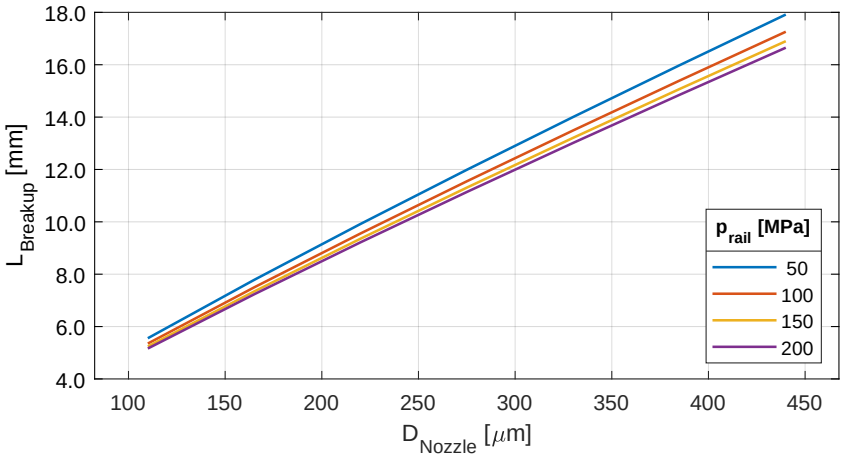
fazi sabijanja (pritisak gasa 5 MPa, temperatura gasa 800 K) pri sledećim uslovima:

- Opseg pritiska goriva u akumulatoru: 50 MPa do 200 MPa
- Opseg nazivnog (izlaznog) prečnika mlaznice: $100 \cdot 10^{-6}$ m do $400 \cdot 10^{-6}$ m
- Radijus ivice na ulaznom preseku mlaznice: $10 \cdot 10^{-6}$ m
- Odnos dužine i prečnika mlaznice: 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od nazivnog prečnika mlaznice, za diskretne vrednosti pritiska ubrizgavanja.

Rešenje

Rezultati proračuna za nekoliko diskretnih vrednosti nazivnog prečnika mlaznice (100 μm do 400 μm) sa nepromenjenom vrednošću radijusa ulazne ivice mlaznice i odnosa dužine i prečnika mlaznice prikazani su na slici 6.23. Za razliku od ostalih geometrijskih parametara, prečnik mlaznice ima presudan uticaj na dužinu tečnog jezgra. Izražena je linearna zavisnost, a na zadatom opsegu prečnika mlaznice sa faktorom povećanja 4, povećanje dužine jezgra mlaza je sa faktorom 3 za sve diskretne vrednosti pritiska ubrizgavanja.



Slika 6.26: Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji prečnika mlaznice brizgača za različite vrednosti pritiska goriva u magistrali.

Program 6.37: `JezgroMlaza05.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti dužine tečnog jezgra mlaza
%
% Prikaz uticaja karakteristike mlaznice (L/D) promenom dužine kanala mlaznice
% pri različitim vrednostima pritiska ubrizgavanja
% tokom visokopritisnog dela ciklusa (sabijanje)
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
```

```
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

% Arai M, Hiroyasu H (1984)
% Disintegrating process and spray characterization of fuel jet
% injected by diesel nozzle
% SAE paper 840275
% str. 6, izraz (4)

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=500E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=500.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=50.0E+05;
p_GasMax=50.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
```

```
T_GasMin=700;
T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
% T_Gas=298.0;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
miFuel=niFuel.*rhoFuel;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;
D_NozzleMin=ND.dOut;
D_NozzleMax=4.*ND.dOut;
dD_Nozzle=0.5.*ND.dOut;
D_NozzleOut=D_NozzleMin:dD_Nozzle:D_NozzleMax;
[m_D_Nozzle n_D_Nozzle]=size(D_NozzleOut);

for i=1:1:n_pRail
    for j=1:1:n_D_Nozzle
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas=p_Gas(1,1)./(R_Gas.*T_Gas(1,1));

        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u]=NozzleVelocity(p_Rail(1,i),p_Gas(1,1),rhoFuel,L_Nozzle,D_NozzleOut(1,j)
            );

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid]=dlqReynolds((D_NozzleOut(1,j)),u,niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid]=dlqWeber((D_NozzleOut(1,j)),u,rhoFuel,sigmaFuel);
```

```
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut(1,j)),u,rhoGas,sigmaFuel);

        [SCL_Hiroyasu(i,j)]=SBL_Hiroyasu(D_NozzleOut(1,j),L_Nozzle,r0_Nozzle,u,...
                                          rhoFuel,rhoGas,p_Gas(1,1));
        [SCL_Arai(i,j)]=SBL_Arai(0,D_NozzleOut(1,j),rhoFuel,rhoGas);
    end
end
% Izračunavanje relativnog odstupanja dužine jezgra mlaza primenom modela
% Hiroyasu i Arai za slučaj maksimalnog pritiska ubrizgavanja
for j=1:1:n_D_Nozzle
    deltaSCL(1,j)=(SCL_Arai(n_pRail,j)-SCL_Hiroyasu(n_pRail,j))./SCL_Arai(n_pRail,j
        ).*100
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
colororder('default');
figure(1)
colororder('default');
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,SCL_Hiroyasu.*1.0E+03, '-o','LineWidth',0.5,'
        MarkerSize',3)
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('D_{Nozzle} [\mum]');
    ylabel('L_{Breakup} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
    xlim([(D_NozzleMin-0.5.*dD_Nozzle).*1.0E+06,(D_NozzleMax+0.5.*dD_Nozzle).*1.0E
        +06]);

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
LegendLabel=num2str([p_Rail.*1.0E-06]','%.0f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','North');
title(lgd,'(p)_{Rail} [MPa] ');


colororder('default');
figure(2)
yyaxis left
colororder('default');
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,SCL_Hiroyasu.*1.0E+03, '-o','LineWidth',0.5,'
        MarkerSize',3)
    hold on;
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,SCL_Arai.*1.0E+03, '--o','LineWidth',0.5,'MarkerSize'
        ,3)
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('D_{Nozzle} [\mum]');
    ylabel('L_{Breakup} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
yyaxis right
colororder('default');
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,deltaSCL, 'k:x','LineWidth',1.25,'MarkerSize',3)
```

```
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('D_{Nozzle} [\mum]');
    ylabel('\delta_{SprayCoreLength} [%]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
% xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-05,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-05]);
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
ax.YAxis(2).Color ='k';
LegendLabel = num2str([p_Rail.*1.0E-06]','%.0f');
LegendLabel = cellstr(LegendLabel)
LegendLabel = [LegendLabel;{'SCL\_Arai'}]'

lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,'(p)_{Rail} [MPa] ');
```

6.4.6 Zadaci za samostalan rad

Programe korišćene za proračune obuhvaćene primerima od 6.4.1 do 6.4.3 dograditi i rezultate proračuna, umesto u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja, prikazati u zavisnosti od brzine mlaza goriva, Rejnoldsovog broja i Veberovog broja.

6.5 Prodor vrha mlaza

6.5.1 Prodor vrha mlaza - model Hirojasu-Arai

Koristeći empirijski model Hirojasua i Araija (Hiroyasu & Arai) [46], napisati funkciju za izračunavanje prodora vrha mlaza dizel-goriva, a zatim kombinujući ga sa prethodno razvijenom funkcijom za izračunavanje vremena primarnog raspada mlaza (`SBT_Hiroyasu.m`) napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza pretpostavljajući uslove obrazovanja smeše kao u eksperimentu kojim je model potvrđen:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri ($p = 3{,}0\,\mathrm{MPa}$, $T = 700\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru $50\,\mathrm{MPa}$;
- Vreme trajanja ubrizgavanja ograničiti na $0{,}25\,\mathrm{ms}$;
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$.

Rezultate proračuna prikazati grafički, posebnim linijama za period pre i nakon pojave raspada mlaza.

Rešenje

Prema modelu Hirojasua i Araija [46], prodor vrha mlaza se izračunava posebnim izrazima za period pre i nakon pojave primarnog raspada mlaza. Za slučaj pre pojave

raspada mlaza izraz za prodor vrha mlaza ima oblik linearne zavisnosti od vremena ubrizgavanja:

$$t < t_{BU}: \quad L_{STP} = 0{,}39 \cdot \left[\frac{2 \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_F}\right]^{0{,}5} \cdot t \tag{6.42}$$

Nakon pojave primarnog raspada mlaza, zavisnost od vremena ubrizgavanja prelazi iz linearne prelazi u stepenu i ima sledeći oblik:

$$t > t_{BU}: \quad L_{STP} = 2{,}95 \cdot \left[\frac{p_{INJ} - p_G}{\rho_G}\right]^{0{,}25} \cdot (D_N \cdot t)^{0{,}5} \tag{6.43}$$

gde je t_{BU}:

$$t_{BU} = 28{,}65 \cdot \frac{\rho_F \cdot D_N}{(\rho_g \cdot (p_{INJ} - p_G))^{0{,}5}} \tag{6.44}$$

Veličine su definisane na sledeći način:

t_{BU} [s] Vreme primarnog raspada;

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

ρ_F [kg/m³] Gustina goriva;

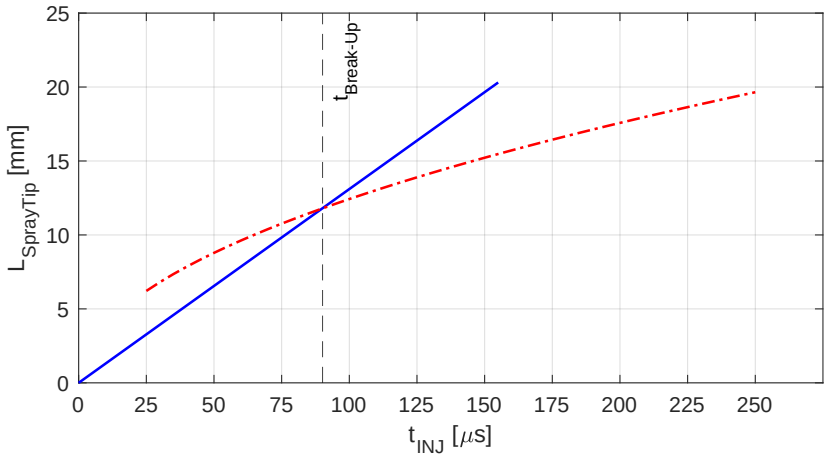
ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [s] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [Pa] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru;

t [s] Tekuće vreme od početka ubrizgavanja.

Da bi se posebno naglasili različiti karakteri zavisnosti prodora mlaza od vremena ubrizgavanja u pojedinim fazama ubrizgavanja, proračun za fazu isticanja tečne faze biće produžen za 50% u odnosu na procenjeno vreme raspada. Slično tome, proračun prodora mlaza za drugu fazu nakon pojave raspada mlaza biće započet na 50% od procenjenog vremena raspada mlaza. U nastavku, prikazani su glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `ProdorMlaza01.m` (6.38) i funkcija `STP_Hiroyasu.m` (6.39). Funkcija za određivanje vremena početka raspada mlaza (vreme početka primarnog raspada) `SBT_Hiroyasu.m` (6.28) i funkcije `FuelData.m` (6.4) i `NozzleData.m` (6.6) su date u zadatku 6.3.1. Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.27.



Slika 6.27: Prodor mlaza za uslove postavljene zadatkom.

Program 6.38: `ProdorMlaza01.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza u
% zavisnosti od vremena
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
% gorivo: dizel
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M: S
% tructures of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE-paper 900475

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača

% FD         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
```

```
% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear;
close all;
clc;

p_Rail=500.0E+05;
p_Gas=30.0E+05;
T_Gas=700.0;
R_Gas=287.15;
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FD]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FD.rho;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeSOI=0.00E-06;
timeEOI=250E-06;
dtimeInj=5E-06;
timeInj=timeSOI:dtimeInj:timeEOI;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=100e-06; %ND.dOut;
D_NozzleIn=120E-06; %ND.dIn;
% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.5:ND.dOut.*3.0]';
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
[timeBreak]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
for i=1:1:nt
    if timeInj(1,i)<=timeBreak.*0.25
       % izračunavanje prodora mlaza na intervalu t=timeSOI do
       % t=timeBreak.*1.75
        [L_SprayTipBBU(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                          D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak.*1.75);
        nt2=i;
    elseif timeInj(1,i)>timeBreak.*0.25 && timeInj(1,i)<timeBreak.*1.75
       % izračunavanje prodora mlaza na intervalu t=timeSOI do t=timeBreak.*1.50
        [L_SprayTipBBU(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                          D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak.*1.75);
        % izračunavanje prodora mlaza na intervalu t=timeBreak.*0.25 do t=timeEOI
        [L_SprayTipABU(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                          D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak.*0.25);
        nt1=i;
    elseif timeInj(1,i)>=timeBreak.*1.75
        % izračunavanje prodora mlaza na intervalu t=timeBreak.*0.25 do t=timeEOI
        [L_SprayTipABU(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                          D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak.*0.25);
    else
    end
end
```

```
figure(1);
    plot(timeInj(1,1:nt1).*1.0E+06,L_SprayTipBBU(1,1:nt1)*1.0E+03,'b-',...
        'LineWidth',1.2);
    grid on;
    hold on;
    plot(timeInj(1,nt2+1:nt).*1.0E+06,L_SprayTipABU(1,nt2+1:nt)*1.0E+03,'r-.',...
        'LineWidth',1.2);
    grid on;
    hold on;
xline(timeBreak.*1.0E+06, 'k--',{'t_{Break-Up}'});
    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*5E+06):(timeEOI.*1.0E+06)]);
    yticks([0.0:5:60]);
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xlim([(timeSOI).*1.0E+06,(timeEOI+5.*dtimeInj).*1.0E+06]);
```

Program 6.39: `STP_Hiroyasu.m`

```
function [L_SprayTip]=STP_Hiroyasu(p_Inj,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                   D_NozzleOut,timeInj,timeBreak)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% Model Hiroyasu 1990
% S. J. Popović
% 202403.v01

% Osnovna referenca:
    % Hiroyasu H, Arai M:
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
    % SAE-paper 900475
    % str. 6, izrazi (3) i (4)

% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Mohammad Taghi Shervani-Tabar, Soran Parsa, Morteza Ghorbani
% Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the
% characteristics of fuel spray
% Mathematical and Computer Modelling 56 (2012) 105-117

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Komentar za izračunavanje prodora vrha mlaza
```

```
% razlika u eksponentu za 1. član izraza za time>timeBreak
% po izrazu Hiroyasu: Baumgarten, (2.5b), str. 13 ..... exp=0.25
% po izrazu Hiroyasu: Shervani-Tabar, (19), str. 10 .... exp=0.50
% po izrazu Hiroyasu: Tian, (2), str. 4 ................ exp=0.25

% Pregled oznaka i jedinica
% p_Inj             [Pa]       pritisak ubrizgavanja
% p_Gas             [Pa]       pritisak gasa u cilindru
% rhoFuel           [kg/m3]    gustina goriva
% rhoGas            [kg/m3]    gustina gasa u cilindru
% D_NozzleOut       [m]        prečnik izlaznog otvora mlaznice
% timeInj           [s]        proteklo vreme od početka ubrizgavanja goriva
% timeBreak         [s]        vreme raspada mlaza

% Korekcioni faktori za preračunavanje ulaznih jedinica
corr_dp=1.0E-00;    % -
corr_D=1.0E+00;     % -
corr_t=1.0E+00;     % -
corr_rho=1.0E-00;   % -

% Provera kriterijuma da li je nastupio raspad mlaza
if timeInj<timeBreak
%     disp('time < timeBreak...Hiroyasu')
% Izračunavanje prodora vrha mlaza pre pojave raspada mlaza
    C11=((p_Inj-p_Gas).*corr_dp)./(rhoFuel.*corr_rho);
    [L_SprayTip]=0.39.*((2.0.*C11).^0.5).*(timeInj.*corr_t);
else
%     disp('time > timeBreak...Hiroyasu')
% Izračunavanje prodora vrha mlaza nakon pojave raspada mlaza
    C12=((p_Inj-p_Gas).*corr_dp)./(rhoGas.*corr_rho);
    C2=(D_NozzleOut.*corr_D).*(timeInj.*corr_t);
    [L_SprayTip]=2.95.*(C12.^0.25).*(C2.^0.50);
end
```

6.5.2 Prodor vrha mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai

Koristeći prethodno razvijene osnovne funkcije za izračunavanje vremena primarnog raspada i prodor vrha mlaza prema modelu Hirojasua i Araija [46], napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza pretpostavljajući sledeće uslove obrazovanja smeše u cilindru:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri atmosferskim uslovima ($p = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$, $T = 298\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 200 MPa;

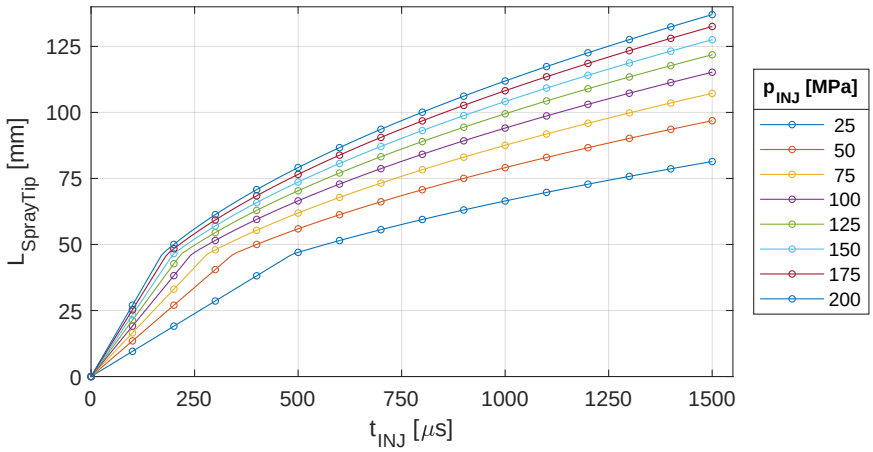
Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

- Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru;

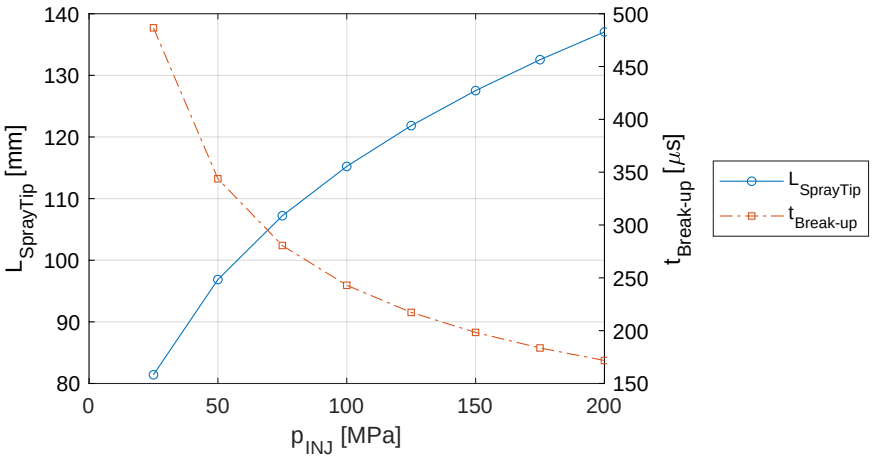
- Prodor vrha mlaza i vreme primarnog raspada mlaza u zavisnosti od pritiska goriva u akumulatoru.

Rešenje

Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slikama 6.28 i 6.28.



Slika 6.28: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska ubrizgavanja.



Slika 6.29: Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska ubrizgavanja.

Uočava se da prodor mlaza raste sa povećanjem pritiska ubrizgavanja, što je očekivano imajući u vidu uticaj pritiska na brzinu strujanja i time na energiju mlaza. Takođe, uočava se da sa porastom pritiska ubrizgavanja, vreme raspada mlaza opada, a u zadatom opsegu pritisaka ubrizgavanja, promena je u odnosu 3 : 1.

U nastavku, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `ProdorMlaza02.m` (6.40). Funkcija `STP_Hiroyasu.m` (6.39) i ostale prateće funkcije su prikazane u prethodnim zadacima.

Program 6.40: `ProdorMlaza02.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja razlike pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori za
% sagorevanje za različita vremena trajanja ubrizgavanja
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE-paper 900475

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=250E+05;
p_RailMax=2000.0E+05;
dp_Rail=250.0E+05;
```

```
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[mpr, npr]=size(p_Rail);

% Definisanje osnovnih termodinamičkih parametara
p_Gas=1.0E+05;
T_Gas=298.0;
R_Gas=287.15;
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje vremenske baze
timeSOI=0.00E-06;
timeEOI=1500E-06;
dtimeInj=10E-06;
timeInj=timeSOI:dtimeInj:timeEOI;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1';
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.5:ND.dOut.*3.0]';
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
for i=1:1:npr
    [timeBreak(1,i)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
    for j=1:1:nt
        [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleOut,timeInj(1,j),timeBreak(1,i));
    end
    figure(1)
    plot(timeInj.*1.0E+06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o',...
        'MarkerIndices',1:4:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.0,'
            MarkerIndices',1:10:nt)
    grid on;
    hold on;

end
    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*25E+06):(timeEOI.*1.0E+06)]);
    yticks([0.0:25:500]);
    xlim([(timeSOI).*1.0E+06,(timeEOI+5.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    LegendLabel=num2str(p_Rail'.*1.0E-06);
    lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside');
    title(lgd,'p_{INJ} [MPa]')

% Grafički prikaz rezultata
% Zavisnost prodora vrha mlaza i vremena raspada mlaza od prečnika otvora mlaznice
figure(2)
```

```
yyaxis left
    plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip(:,nt).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 4)
    xlabel('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    ytickformat('%.0f')
    yticks([0.0:10:500]);
    hold on;
yyaxis right
    plot(p_Rail.*1.0E-06,timeBreak.*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4)
    % grid on;
    % ax.YColor='k';
    ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
    ytickformat('%.0f')
    grid on;
    ax = gca;
    ax.YAxis(1).Color ='k';
    ax.YAxis(2).Color ='k';
    LegendLabel={'L_{SprayTip}';'t_{Break-up}'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside');
```

6.5.3 Prodor vrha mlaza, uticaj veličine mlaznice - model Hirojasu-Arai

Koristeći prethodno razvijene osnovne funkcije za izračunavanje vremena primarnog raspada i prodor vrha mlaza prema modelu Hirojasua i Araija [46], napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza dizel-goriva u zavisnosti od prečnika izlaznog otvora mlaznice u opsegu od 100 do $300 \cdot 10^{-6}$ m. Pretpostaviti sledeće uslove za izvođenje proračuna:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri atmosferskim uslovima ($p = 0{,}1$ MPa, $T = 298$ K);
- Pritisak goriva u akumulatoru je nepromenjen i iznosi 100 MPa;
- Vreme trajanja ubrizgavanja ograničiti na 1,6 ms;

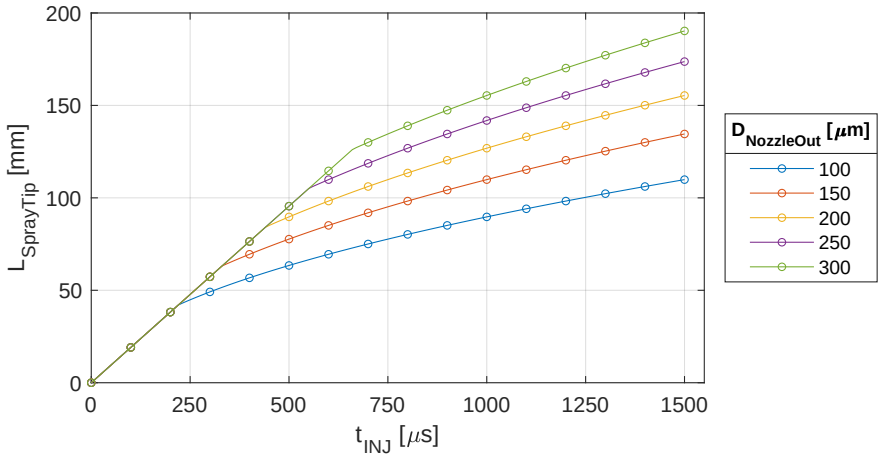
Rezultate proračuna vremena primarnog raspada mlaza prikazati grafički na sledeći način:

- Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika izlaznog otvora mlaznice;
- Prodor vrha mlaza i vreme primarnog raspada mlaza u zavisnosti od prečnika izlaznog otvora mlaznice za slučaj maksimalnog vremena ubrizgavanja.

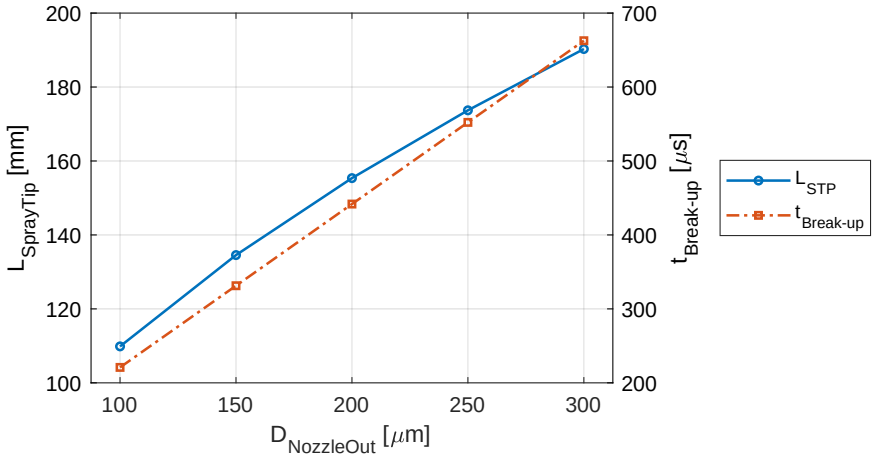
Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.30 i 6.31. Očekivano, povećanje prečnika izlaznog otvora mlaznice utiče na povećanje prodora mlaza. Može se zaključiti

da povećanje prečnika mlaznice utiče na homogenost strujnog polja u kanalu mlaznice i homogenost tečnog jezgra, pa odatle sledi i povećanje vremena raspada mlaza.



Slika 6.30: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti prečnika mlaznice.



Slika 6.31: Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji prečnika mlaznice.

Program 6.41: `ProdorMlaza03.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja prečnika mlaznice za različita vremena trajanja
% ubrizgavanja pri nepromenjenoj razlici pritisaka ubrizgavanja i pritiska
% u komori
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
```

```
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE-paper 900475

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje pritiska ubrizgavanja
p_Rail=1000.0E+05;

% Definisanje osnovnih termodinamičkih parametara
p_Gas=1.0E+05;
T_Gas=298.0;
R_Gas=287.15;
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje vremenske baze
timeSOI=0.00E-06;
timeEOI=1500E-06;
dtimeInj=10E-06;
timeInj=timeSOI:dtimeInj:timeEOI;
[mt, nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Učitavanje podataka o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleOutMin=100E-06;
D_NozzleOutMax=300E-06;
```

```
dD_NozzleOut=50E-06;
D_NozzleOut=[D_NozzleOutMin:dD_NozzleOut:D_NozzleOutMax];
[mDN nDN]=size(D_NozzleOut);

% proračun prodora vrha mlaza prema modelu Hiroyasu
for i=1:1:nDN
    [timeBreak(1,i)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut(1,i));
    for j=1:1:nt
        [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                       D_NozzleOut(1,i),timeInj(1,j),timeBreak(1,i)
                                           );
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
% Zavisnost prodora vrha mlaza od vremena za diskretne vrednosti prečnika otvora
    mlaznice
colororder('default');
figure(1)
for i=1:1:nDN
    plot(timeInj.*1.0E+06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o',...
        'MarkerIndices',1:10:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.5)
    grid on;
    hold on;
end
    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.0f')
    xticks([0.0:(dtimeInj.*25E+06):(timeEOI.*1.0E+06)]);
    xlim([(timeSOI).*1.0E+06,(timeEOI+5.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    LegendLabel=num2str(D_NozzleOut'.*1.0E+06);
    lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
    title(lgd,'D_{NozzleOut} [\mum] ')

% Zavisnost prodora vrha mlaza i vremena raspada mlaza od prečnika otvora mlaznice
figure(2)
yyaxis left
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,L_SprayTip(:,nt).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 3.5)
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    ytickformat('%.0f')
    hold on;
yyaxis right
    plot(D_NozzleOut.*1.0E+06,timeBreak.*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4);
    % grid on;
    % ax.YColor='k';
    ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
    ytickformat('%.0f')
    grid on;
    xlabel('D_{NozzleOut} [\mum]')
    xlim([(D_NozzleOutMin-dD_NozzleOut.*0.25).*1.0E+06,(D_NozzleOutMax+dD_NozzleOut
        .*0.25).*1.0E+06])
    ax = gca;
    ax.YAxis(1).Color ='k';
    ax.YAxis(2).Color ='k';
```

```
LegendLabel={'L_{STP}';'t_{Break-up}'};
lgd = legend(LegendLabel,'location','northWest');
```

6.5.4 Prodor vrha mlaza, sistem obrazovanja smeše PCCI tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu Arai

Koristeći prethodno razvijene osnovne funkcije za izračunavanje vremena primarnog raspada i prodor vrha mlaza prema modelu Hirojasua i Araija [46], napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza dizel-goriva u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za sledeće uslove obrazovanja smeše:

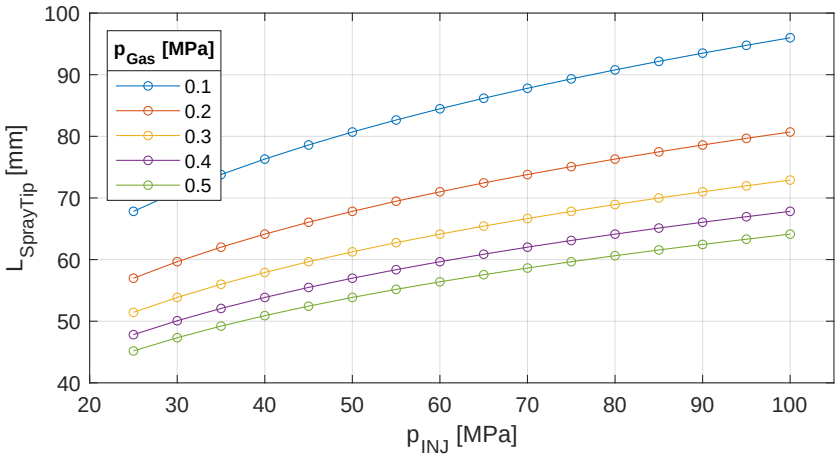
- Ubrizgavanje se obavlja tokom niskopritisnog dela ciklusa (sistem obrazovanja predmešane smeše kod motora sa paljenjem sabijanjem: PCCI - *Pre-mixed Charge Compression Ignition*) na opsegu pritisaka gasa u cilindru od 0,1 MPa do 0,5 MPa;
- Temperatura u cilindru tokom ubrizgavanja je konstantna i nepromenljiva za sve zadate vrednosti pritiska gasa u cilindru i iznosi 323 K (pretpostavlja se primena sistema natpunjenja sa međuhlađenjem, temperatura vazduha za punjenje je konstantna, a zagrevanje gasa u cilindru tokom niskopritisnog dela ciklusa se zanemaruje);
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 100 MPa;
- Prečnik izlaznog otvora mlaznice iznosi $100 \cdot 10^{-6}$ m.

Pretpostaviti da je gas u cilindru čist vazduh i da se gorivo ubrizgava u mirnu sredinu. Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

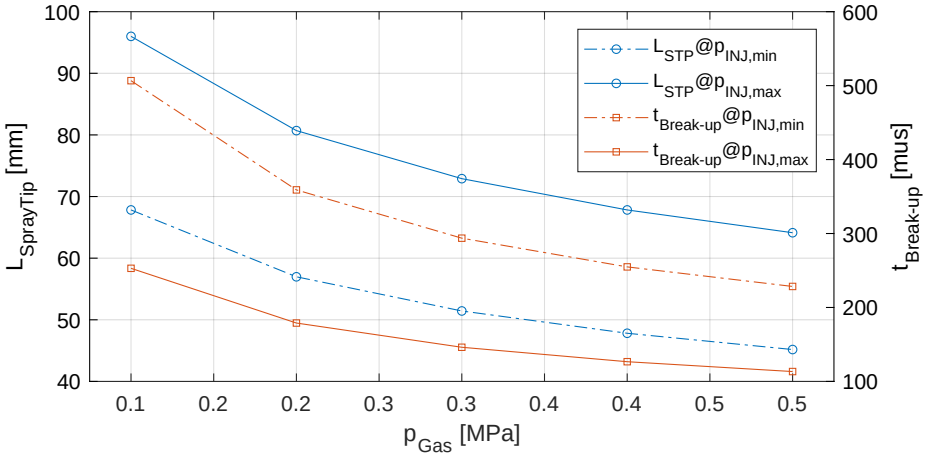
- Dijagram 1: prodor vrha mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u cilindru;
- Dijagram 2: prodor vrha mlaza i vreme primarnog raspada mlaza u zavisnosti od pritiska gasa u cilindru za diskretne slučajeve najnižeg i najvišeg pritiska ubrizgavanja.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.32 i 6.33



Slika 6.32: Prodor mlaza u funkciji pritiska ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska gasa u cilindru.



Slika 6.33: Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska gasa u cilindru.

Pritisak gasa u komori (protivpritisak, eng.: *backpressure*) utiče na smanjenje dometa mlaza. Ubrizgavanje pri višim vrednostima pritiska u komori utiče na skraćenje dometa mlaza i smanjuje rizik od udarca mlaza u površinu čela klipa. Ovo je važan zaključak i treba da posluži kao smernica za odluku o izboru optimalnih uslova za početak i kraj ubrizgavanja.

Program 6.42: `ProdorMlaza04.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja pritska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja i nepromenjenoj temperaturi gasa
% Slučaj ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa sa različitim
% vrednostima pritiska punjenja
```

```
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% Teorijska podloga:
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE-paper 900475

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza
clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=250E+05;
p_RailMax=1000E+05;
dp_Rail=50.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=1.0E+05;
p_GasMax=5.0E+05;
dp_Gas=1.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_Gas=323.0;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
```

```
R_Gas=287.15;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Definisanje vremena ubrizgavanja
timeInj=1000.0E-06;

% Učitavanje podataka o brizgaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.25:ND.dOut.*3.0];
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)

for i=1:1:n_pGas
    for j=1:1:n_pRail
        [timeBreak(i,j)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i),
            D_NozzleOut);
        [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i),
            ...
                                        D_NozzleOut,timeInj,timeBreak(i,j));
    end
end


% Dijagramski prikaz zavisnosti
figure(1)
% colororder(['k';'r';'b';'g';'m';'c']);
colororder('default');
for i=1:1:n_pGas
    plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o','MarkerSize', 4)
    grid on;
    hold on;
end
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06])
LegendLabel=num2str([p_Gas*1.0E-06]',[%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthWest');
title(lgd,'p_{Gas} [MPa] ');

figure(2)
yyaxis left
    plot(p_Gas'.*1.0E-06,L_SprayTip(:,1).*1.0E+03,'-.o','MarkerSize',4,...
        'LineWidth',1.2)
    hold on;
    plot(p_Gas'.*1.0E-06,L_SprayTip(:,n_pRail).*1.0E+03,'-o','MarkerSize',4,...
```

```
        'LineWidth',1.2)
    hold on;
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    ytickformat('%.0f')
yyaxis right
    plot(p_Gas.*1.0E-06,timeBreak(:,1).*1.0E+06,'-.square','MarkerSize',4,...
        'LineWidth',1.2)
    hold on;
    plot(p_Gas.*1.0E-06,timeBreak(:,n_pRail).*1.0E+06,'-square','MarkerSize',4,...
        'LineWidth',1.2)
    hold on;
    grid on;
    ylabel('t_{Break-up} [mus]');
    ytickformat('%.0f')
xlabel('p_{Gas} [MPa]')
xtickformat('%.1f')
xlim([(p_GasMin-dp_Gas.*0.25).*1.0E-06,(p_GasMax+dp_Gas.*0.25).*1.0E-06])

ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
ax.YAxis(2).Color ='k';
LegendLabel={'L_{STP}@p_{INJ,min}';'L_{STP}@p_{INJ,max}';...
    't_{Break-up}@p_{INJ,min}';'t_{Break-up}@p_{INJ,max}'};
lgd = legend(LegendLabel,'location','NorthEast');
```

6.5.5 Zadatak: Prodor vrha mlaza, slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu-Arai

Na osnovu proračuna iz prethodnog primera, za isto gorivo i iste karakteristike brizgača (mlaznice), koristeći iste modele i razvijene funkcije, sprovesti analizu uticaja pritiska ubrizgavanja za slučaj obrazovanja smeše tokom sabijanja gasa pretpostavljajući sledeće uslove za izvođenje proračuna:

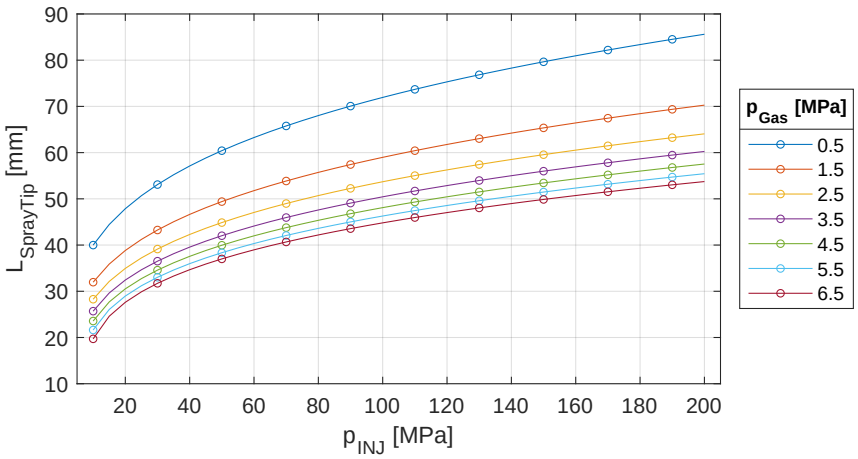
- Promena stanja u cilindru je izentropska;
- Ubrizgavanje se obavlja na opsegu pritisaka gasa u cilindru od 0,5 MPa do 6,5 MPa;
- Pretpostaviti referentne uslove u odnosu na koje se proračunavaju termodinamički parametri u cilindru - temperatura i pritisak gasa su 323 K i 0,1 MPa, respektivno;
- Zanemariti promenu temperature tokom ubrizgavanja;
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 200 MPa;
- Pretpostaviti da je gas u cilindru čist vazduh i da se gorivo ubrizgava u mirnu sredinu.

Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

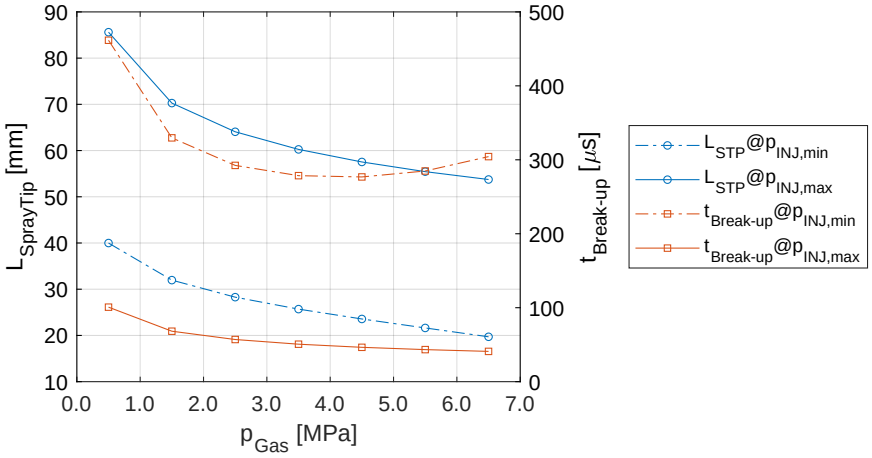
- Dijagram 1: prodor vrha mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u cilindru;
- Dijagram 2: prodor vrha mlaza i vreme primarnog raspada mlaza u zavisnosti od pritiska gasa u cilindru za diskretne slučajeve najnižeg i najvišeg pritiska ubrizgavanja.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.34 i 6.35.



Slika 6.34: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska ubrizgavanja.



Slika 6.35: Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska ubrizgavanja.

Uočen trend za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa postoji i u slučaju obrazovanja smeše tokom sabijanja. Za iste vrednosti pritiska ubrizgavanja, dalje povećanje pritiska gasa u komori utiče na smanjenje dometa vrha mlaza. Ovo

je važan zaključak jer upućuje na slučaj obrazovanja smeše tokom sabijanja kao povoljniji sa aspekta izbegavanja kontakta mlaza i delova komore. Sa druge strane, skraćenje dometa mlaza, trebalo bi da se odrazi na povećanje ugla konusa i ukupnu zapreminu mlaza što indirektno može uticati na poboljšanje prostorne raspodele goriva i bolju homogenizaciju.

Program 6.43: `ProdorMlaza05.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja pritska i temperature gasa u komori pri različitim vrednostima
    pritiska
% ubrizgavanja
% Slučaj ubrizgavanja goriva pri različitim pritiscima i temperaturama gasa tokom
    sabijanja
% Pretpostavke:
% 1. izentropska/politropska promena stanja (p*T^((kapa-1)/kapa)=idem.)
% 2. termodinamički uslovi se ne menjaju tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% Teorijska podloga:
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE-paper 900475
% Dent J.C.: A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for
% Studying Spray Penetration, SAE paper 710571

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza
clear;
```

```
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=100E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_Gas0=1.0E+05;
p_GasMin=5.0E+05;
p_GasMax=65.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
% T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);
T_Gas0=323.0;
T_Gas=T_Gas0.*(p_Gas./p_Gas0).^((n-1)./n);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Definisanje vremena ubrizgavanja
timeInj=0.001;

% Učitavanje podataka o brizgaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.25:ND.dOut.*3.0];
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)

for i=1:1:n_pGas
    for j=1:1:n_pRail
        [timeBreak(i,j)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i),
            D_NozzleOut);
        [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i),
            ...
```

```
                                        D_NozzleOut,timeInj,timeBreak(i,j));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
figure(1)
colororder('default');
for i=1:1:n_pGas
    plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o',...
        'MarkerIndices',1:4:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.5)
    grid on;
    hold on;
end
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06])
LegendLabel=num2str([p_Gas*1.0E-06]','%.1f');
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside'); % NorthWest
title(lgd,'p_{Gas} [MPa] ');

figure(2)
yyaxis left
    plot(p_Gas'.*1.0E-06,L_SprayTip(:,1).*1.0E+03,'-.o','MarkerSize', 3.5)
    hold on;
    plot(p_Gas'.*1.0E-06,L_SprayTip(:,n_pRail).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 3.5)
    hold on;
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    ytickformat('%.0f')
yyaxis right
    plot(p_Gas.*1.0E-06,timeBreak(:,1).*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4.0);
    hold on;
    plot(p_Gas.*1.0E-06,timeBreak(:,n_pRail).*1.0E+06,'-square','MarkerSize', 4.0);
    hold on;
    grid on;
    ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
    ytickformat('%.0f')
xlabel('p_{Gas} [MPa]')
xtickformat('%.1f')
% xlim([(p_GasMin-dp_Gas).*1.0E-05,(p_GasMax+dp_Gas).*1.0E-05])
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
ax.YAxis(2).Color ='k';
LegendLabel={'L_{STP}@p_{INJ,min}';'L_{STP}@p_{INJ,max}';'t_{Break-up}@p_{INJ,min}'
    ;'t_{Break-up}@p_{INJ,max}'};
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside'); % NorthEast
```

6.5.6 Prodor vrha mlaza, uticaj temperature gasa - model Hirojasu-Arai

Koristeći prethodno razvijene osnovne funkcije za izračunavanje vremena primarnog raspada i prodor vrha mlaza prema modelu Hirojasua i Araija [46], napisati program

za izračunavanje prodora vrha mlaza dizel-goriva u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti temperature gasa u cilindru. Pretpostaviti sledeće uslove za obrazovanje smeše:

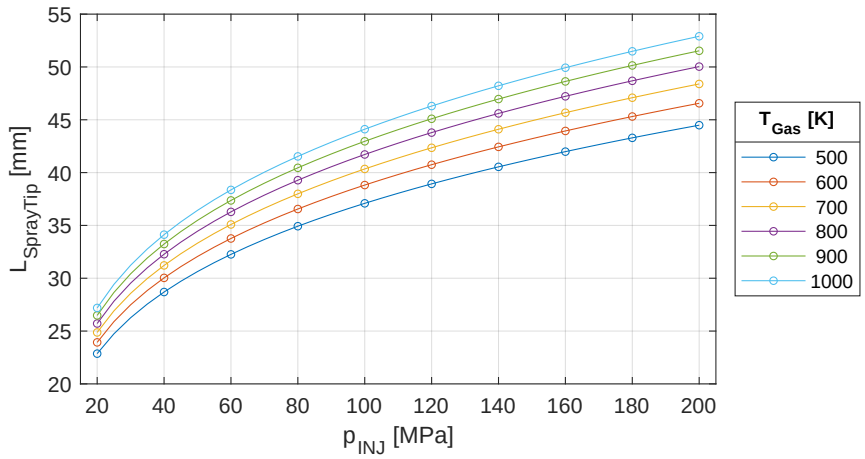
- Ubrizgavanje se obavlja na pritisku gasa u cilindru od 6,5 MPa;
- Temperatura gasa u cilindru definisana je u opsegu od 500 K do 1000 K;
- Zanemariti promenu temperature tokom ubrizgavanja;
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 25 MPa do 200 MPa;

Pretpostaviti da je gas u cilindru čist vazduh i da se gorivo ubrizgava u mirnu sredinu. Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

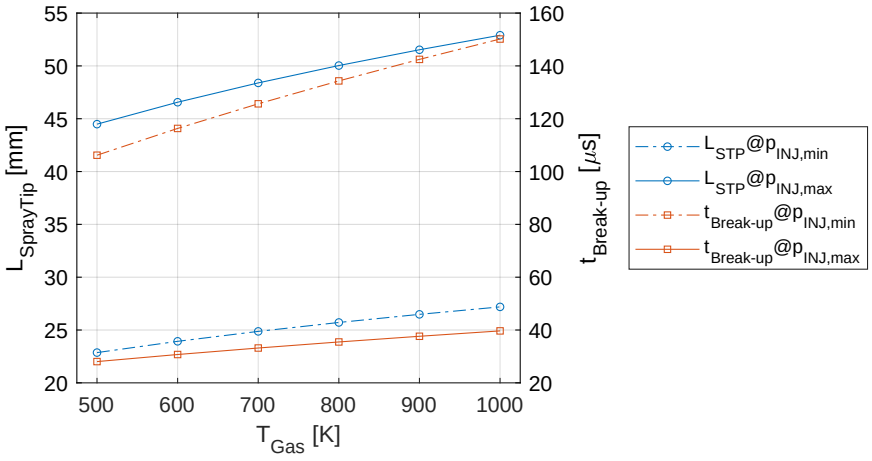
- Dijagram 1: prodor vrha mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti temperature gasa u cilindru;
- Dijagram 2: prodor vrha mlaza i vreme primarnog raspada mlaza u zavisnosti od temperature gasa u cilindru za diskretne slučajeve najnižeg i najvišeg pritiska ubrizgavanja.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.36 i 6.37.



Slika 6.36: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti temperature gasa u cilindru.



Slika 6.37: Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji temperature gasa u cilindru.

U ovom numeričkom primeru promenljiva je temperatura gasa, dok je pritisak gasa ostao nepromenjen na nivou koji odgovara slučaju ubrizgavanja dizel-goriva u završnoj fazi sabijanja. Primer treba da pokaže kako primena kondicioniranja vazduha za punjenje koja utiče na temperaturu gasa na kraju takta sabijanja može uticati na domet mlaza. Imajući u vidu da sa porastom temperature gasa pri istom, nepromenjenom pritisku gustina opada, očekivano je da dođe do povećanja dometa vrha mlaza. Isti efekat se primećuje i u slučaju vremena raspada mlaza.

Program 6.44: `ProdorMlaza06.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja temperature gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% Teorijska podloga:
% Dent J.C.: A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for
% Studying Spray Penetration, SAE paper 710571

clear;
close all;
```

```
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=65.0E+05;
p_GasMax=65.0E+05;
dp_Gas=65.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_GasMin=500.0;
dT_Gas=100.0;
T_GasMax=1000.0;
T_Gas=T_GasMin:dT_Gas:T_GasMax;
[m_TGas n_TGas]=size(T_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
% T_Gas=T_GasMin.*(p_Gas./p_GasMin).^((n-1)./n);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas(1,1)./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Definisanje vremena ubrizgavanja
timeInj=0.001;

% Učitavanje podataka o brizgaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_Nozzle=ND.dOut;
% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.25:ND.dOut.*3.0];
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)

for i=1:1:n_TGas
    for j=1:1:n_pRail
        [timeBreak(i,j)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,n_pGas),rhoFuel,rhoGas(1,
```

```
            i),D_Nozzle);
        [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,j),p_Gas(1,1),...
                                                    rhoFuel,rhoGas(1,i),...
                                                    D_Nozzle,timeInj,timeBreak(i,j));
    end
end

% Dijagramski prikaz zavisnosti
figure(1)
    colororder('default');
    plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip.*1.0E+03, '-o',...
        'MarkerIndices',1:4:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.5)
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.0f')
    xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06])
    LegendLabel=num2str([T_Gas]','%.0f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside');% NorthWest
    title(lgd,'T_{Gas} [K] ');

figure(2)
yyaxis left
    plot(T_Gas,L_SprayTip(:,1).*1.0E+03,'-.o','MarkerSize', 3.5)
    hold on;
    plot(T_Gas,L_SprayTip(:,n_pRail).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 3.5)
    hold on;
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    ytickformat('%.0f')
yyaxis right
    plot(T_Gas,timeBreak(:,1).*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4)
    hold on;
    plot(T_Gas,timeBreak(:,n_pRail).*1.0E+06,'-square','MarkerSize', 4)
    hold on;
    grid on;
    ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
    ytickformat('%.0f')
xlabel('T_{Gas} [K]')
xtickformat('%.0f')
xlim([(T_GasMin-dT_Gas.*0.25),(T_GasMax+dT_Gas.*0.25)])
ax = gca;
ax.YAxis(1).Color ='k';
ax.YAxis(2).Color ='k';
LegendLabel={'L_{STP}@p_{INJ,min}';'L_{STP}@p_{INJ,max}';'t_{Break-up}@p_{INJ,min}'
    ;'t_{Break-up}@p_{INJ,max}'};
lgd = legend(LegendLabel,'location','EastOutside'); % East
```

6.5.7 Prodor vrha mlaza - poređenje modela Hirojasu, Vakuri i Dent

Koristeći funkciju `STP_Hiroyasu.m` kao osnovu, napisati posebne funkcije za izračunavanje prodora mlaza prema modelima Vakurija (*Wakuri*) [47] i Denta (*Dent*)

[48]. Napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza primenom 3 različita modela - Hirojasu, Vakuri i Dent, pretpostavljajući sledeće uslove obrazovanja smeše:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri ($p = 3{,}0\,\mathrm{MPa}$, $T = 700\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru 50 MPa;
- Vreme trajanja ubrizgavanja ograničiti na 0,25 ms;
- Izlazni prečnik mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}$ m.

Modelom Vakuri, proračun sprovesti za sledeće slučajeve:

- Bez uticaja kontrakcije mlaza u kanalu mlaznice ($C_c = 1{,}0$) i sa uglom konusa mlaza $\theta = 16°$
- Sa uticajem kontrakcije mlaza ($C_c = 0{,}6$) i sa uglom konusa mlaza $\theta = 16°$

Modelom Dent, proračun sprovesti za sledeće slučajeve:

- bez uzimanja u obzir uticaja isparavanja goriva usled povišene temperature goriva
- sa uzimanjem u obzir uticaja isparavanja goriva usled povišene temperature goriva

Rezultate proračuna prodora mlaza za sva tri model prikazati grafički u zavisnosti od vremena ubrizgavanja.

Rešenje

Oba modela, Vakurijev i Dentov, razlikuju se od modela Hirojasu-Arai po tome što u obzir ne uzimaju gustinu goriva i prema tome, može se odmah dati ključna napomena da su oba modela verifikovana isključivo za slučaj dizel-goriva. Postoji mogućnost da se korekcija uvede preko odnosa gustine goriva za koji se vrši proračun i izvornih vrednosti gustine za dizel-gorivo. Prema modelu Vakurija [47], prodor vrha mlaza određuje se jedinstvenim izrazom i u obzir se ne uzima raspad mlaza, kao ni gustina goriva. Za razliku od modela Hirojasu-Arai, u obzir se uzimaju dodatni parametri - koeficijent kontrakcije u mlaznici C_c i ugao konusa mlaza θ:

$$L_{STP@Wakuri} = \left[\frac{2 \cdot C_c \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot (D_N \cdot t)^{0,5} \cdot \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^{-0,5} \tag{6.45}$$

Veličine i jedinice su definisane na sledeći način:

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [s] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [s] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru;

C_c [−] Koeficijent kontrakcije mlaza u kanalu mlaznice;

θ [°] Ugao konusa mlaza;

t [s] Tekuće vreme od početka ubrizgavanja.

Dentov model [48], slično Vakurijevom, ne uzima u obzir raspad mlaza i promenu prodora mlaza usled njegovog raspada, pa se prodor mlaza računa jedinstvenim izrazom na celokupnom intervalu tokom koga se vrši ubrizgavanje. Kako je napomenuto, model ne uzima u obzir gustinu goriva, ali posebnim članom u obzir uzima uticaj isparavanja goriva koji je intenzivan na vrhu mlaza. Model je u izvornom obliku prikazan za fizičke veličine čije su jedinice definisane u imperijalnom sistemu mera (*lb-inch-s*) i u tom smislu je potrebno pažljivo pripremiti odgovarajuće korekcione faktore za prelazak sa jednog sistema jedinica na drugi. Izvorni izraz je dat u sledećem obliku:

$$L_{STP@Dent} = 13{,}6 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot (D_N \cdot t)^{0,5} \cdot \left[\frac{530}{T_G}\right]^{-0,5} \tag{6.46}$$

Veličine i jedinice su definisane na sledeći način:

D_N [inch] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

ρ_G [$^{\text{lb}}/_{\text{inch}^3}$] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [psi] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [psi] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru;

T_g [°R] Temperatura gasa;

θ [°] Ugao konusa mlaza;

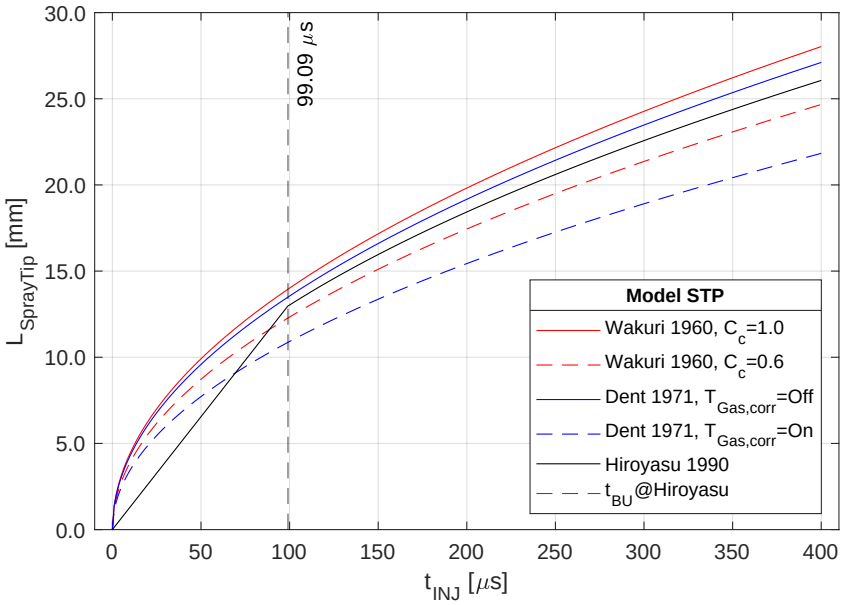
t [s] Tekuće vreme od početka ubrizgavanja.

U tabeli 6.3 su prikazani korekcioni faktori za preračunavanje odgovarajućih veličina iz imperijalnog sistema jedinica u metrički sistem jedinica (SI sistem).

Opis	Relacija
Dužinska mera	$1\,\mathrm{m} = 39{,}3700787\,\mathrm{inch}$
Gustina	$1\,{}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3} = 3{,}6127292 \cdot 10^{-5}\,{}^{\mathrm{lb}}/_{\mathrm{inch}^3}$
Pritisak	$1\,\mathrm{Pa} = 0{,}000145037744\,\mathrm{psi}$
Temperatura	$1\,\mathrm{K} = \frac{9}{5}\,^{\circ}\mathrm{R}$

Tabela 6.3: Korekcioni faktori za preračunavanje odgovarajućih veličina iz imperijalnog sistema jedinica u metrički sistem jedinica.

Rezultati proračuna za zadate modele i uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.38.



Slika 6.38: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše.

Može se konstatovati da su razlike u apsolutnom domenu relativno male i da se mogu pripisati različitim uslovima eksperimenata u kojima su modeli verifikovani, kao i činjenici da su modeli nastali u periodu od 30 godina i da su tehničke mogućnosti i dostupnost merne opreme uticali na tačnost. Ovo se posebno odnosi na model Vakuri koji je prvi put prikazan 1960. godine.

Ono što predstavlja ključnu razliku jeste oblik zavisnosti u početnoj fazi isticanja koja ima drugačiji karakter zbog homogenosti jezgra mlaza. Taj fenomen se uočava kod modela Hirojasu, ali ne i kod modela Vakuri i Dent. Takođe, model Dent uzima u obzir efekat isparavanja goriva i to se jasno uočava na liniji koja se odnosi na proračun sa uključenom korekcijom za taj slučaj.

U narednim primerima, biće prikazani i poboljšani modeli za početnu fazu isticanja koji se oslanjaju na osnovni pristup Hirojasua i Araija.

U nastavku, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora mlaza za tri navedena modela `ProdorMlaza081.m` (6.45).

Program 6.45: `ProdorMlaza081.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza u
% zavisnosti od vremena
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
% gorivo: dizel
% Poređenje rezultata primene najčešće korišćenih modela proračuna
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Yutaro WAKURI, Masaru FUJII, Tatsuo AMITANI, Reijiro TSUNEYA
% Studies on the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine
% JSME 1960 Volume 3 Issue 9 Pages 123-130, 10.1299/jsme1958.3.123
% str. 3, izraz (13)

% Dent J.C.: A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for
% Studying Spray Penetration,
% SAE paper 710571, doi.org/10.4271/710571.

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
```

```
% LS_xxx     [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

p_Rail=500.0E+05;
p_Gas=30.0E+05;
T_Gas=700.0; % 300, 670, 700, 760, za kontrolu...
R_Gas=287; %
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
TFuel=313.0;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=400E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInj=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleIn=ND.dIn;
D_NozzleOut=ND.dOut;

% Izračunavanje vremena raspada mlaza - model Hiroyasu
[timeBreakHA]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut)
% Izračunavanje dužine prodora mlaza u f-ji vremena
for i=1:1:nt
    % ------------------------------------------------
    % Wakuri 1960
    [LS_Wakuri0(1,i)]=STP_Wakuri(D_NozzleOut,p_Rail,p_Gas,rhoGas,...
                                 16,1.0,timeInj(1,i));

    [LS_Wakuri1(1,i)]=STP_Wakuri(D_NozzleOut,p_Rail,p_Gas,rhoGas,...
                                 16,0.6,timeInj(1,i));
    % ------------------------------------------------
    % Dent 1971
    [LS_Dent0(1,i)]=STP_Dent(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                               D_NozzleOut,0,timeInj(1,i),0);

    [LS_Dent1(1,i)]=STP_Dent(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                               D_NozzleOut,0,timeInj(1,i),T_Gas);
    % ------------------------------------------------
    % Hiroyasu 1990
    [LS_Hiroyasu(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                  D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
```

```
end

colororder('default');
figure(1)
    % Wakuri (1960)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Wakuri0*1.0E+03, '-r')
    hold on;
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Wakuri1*1.0E+03, '--r')
    hold on;
    % Dent (1970)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Dent0*1.0E+03, '-b')
    hold on;
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Dent1*1.0E+03, '--b')
    hold on;
    % Hiroyasu (1990)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-k')
    grid on;
    hold on;

    xlabel('t_{INJ} [\mus]')
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]')
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.1f')
    xlim([(timeInjMin-dtimeInj.*10).*1.0E+06,(timeInjMax+dtimeInj.*10).*1.0E+06])
    LegendTitle='Model STP';
    LegendLabel={'Wakuri 1960, C_{c}=1.0',...
                 'Wakuri 1960, C_{c}=0.6',...
                 'Dent 1971, T_{Gas,corr}=Off',...
                 'Dent 1971, T_{Gas,corr}=On',...
                 'Hiroyasu 1990'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);

labelHA=num2str(timeBreakHA.*1.0E+06,'%.2f');
x1=xline(timeBreakHA.*1.0E+06,'--k',[labelHA,' \mus'],'DisplayName','t_{BU}@
    Hiroyasu','LabelVerticalAlignment','top');
```

6.5.8 Prodor vrha mlaza, korekcija za početnu fazu isticanja - model Kostas-Taškiran

Napisati funkciju za izračunavanje prodora vrha mlaza dizel-goriva prema osnovnom modelu Kostas-Taškiran (*Kostas-Taşkiran*) [49, 50]. Sprovesti proračun prodora vrha mlaza za slučaj obrazovanja smeše u sledećim ulovima:

- Pritisak goriva ispred brizgača 120 MPa.
- Pritisak gasa u cilindru 3 MPa;
- Temperatura gasa u cilindru 600 K;
- Karakteristike cilindrične mlaznice: prečnik izlaznog otvora $240 \cdot 10^{-6}$ m;

- Karakteristike konvergentne mlaznice: prečnik ulaznog otvora $255 \cdot 10^{-6}$ m, prečnik izlaznog otvora $240 \cdot 10^{-6}$ m;
- Karakteristike divergentne mlaznice: prečnik ulaznog otvora $240 \cdot 10^{-6}$ m, prečnik izlaznog otvora $255\,10^{-6}$ m,
- Vreme trajanja ubrizgavanja je 1 ms.

Rezultate proračuna prodora vrha mlaza prema osnovnom modelu Kostas-Taškiran uporediti sa rezultatima proračuna primenom modela Hirojasu-Arai [46] za iste uslove obrazovanja smeše i grafički ih predstaviti u vremenskom domenu.

Rešenje

Eksperiment koji prikazan u radu Kostasa [49] pokazao je da model Hirojasu-Arai daje precenjene vrednosti dometa vrha mlaza u početnoj fazi isticanja goriva, što je u određenoj meri i očekivano, ako se u obzir uzme činjenica da je eksperiment Hirojasua obavljen u uslovima neprekidnog stacionarnog isticanja goriva kroz mlaznicu, dok je Kostasov eksperiment obavljen u dinamičkim uslovima sa impulsnim isticanjem goriva kroz mlaznicu, što je bliže realnim uslovima obrazovanja smeše u cilindru motora. U tom smislu, Kostas je za fazu isticanja pre pojave primarnog raspada mlaza, umesto linearne, predložio eksponencijalnu zavisnost prodora mlaza od vremena:

$$L_{STP} = A \cdot t^{1,5}, t < t_{UB} \tag{6.47}$$

pri čemu je parametar A u izvornom radu dat u tabelarnom obliku za nekoliko karakterističnih vrednosti pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori. Taškiran (Taşkiran) je dalje razvio ovaj model i za izračunavanje prodora vrha mlaza u početnoj fazi isticanja predložio funkciju po obliku sličnu onoj koja je navedena u modelu Hirojasu-Arai, u kojoj je uveden odnos gustina gasa i goriva i eksponencijalni član za vreme mereno od početka ubrizgavanja. Treba napomenuti da je model Kostas-Taškiran, u obe reference, prikazan na nekonzistentan način u pogledu izbora jedinica za pojedine veličine. Za prvu fazu isticanja, pre raspada mlaza, izrazi su postavljeni tako da se vreme računa u milisekundama, a prodor mlaza u milimetrima. Izraz u izvornom obliku, uzimajući u obzir navedene nekonzistentnosti, izmenjen je i uvedeni su odgovarajući koeficijenti za preračunavanje dužine i vremena u metrima i sekundama, respektivno:

$$L_{STP} = 10^{-3} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0,25} \cdot \left[\frac{\rho_G^{0,33} \cdot (p_{INJ} - p_G)}{12 \cdot \rho_F}\right]^{0,5} \cdot \left(t \cdot 10^3\right)^{1,5} \mid t < t_{BU} \tag{6.48}$$

Ili, nakon svođenja koeficijenta:

$$L_{STP} = 9{,}13 \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0,25} \cdot \left[\frac{\rho_G^{0,33} \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_F}\right]^{0,5} \cdot t^{1,5} \;\mid\; t < t_{BU} \tag{6.49}$$

Za izračunavanje prodora vrha mlaza u drugoj fazi, nakon pojave primarnog raspada mlaza, preuzet je izraz iz modela Hirojasu-Arai. Za slučaj konične mlaznice sa kontrakcijom protočnog preseka, uvedena je korekcija preko koeficijenta koničnosti mlaznice u sledećem obliku:

$$L_{STP} = 2{,}95 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot \left(C_N^Z \cdot D_N \cdot t\right)^{0,5} \;\mid\; t > t_{BU} \tag{6.50}$$

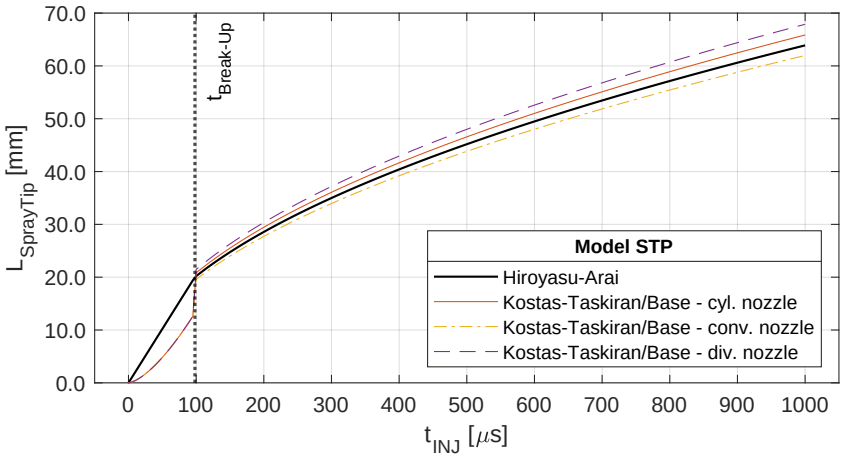
gde je koeficijent koničnosti mlaznice C_N definisan je na sledeći način:

$$C_N = \frac{D_{N,In}}{D_{N,Out}} \tag{6.51}$$

a eksponent Z uzima sledeće diskretne vrednosti u zavisnosti od geometrije mlaznice:

$$Z = \begin{cases} -1, & C_N > 0 \,(\text{konvergentna mlaznica}) \\ 0, & C_N = 0 \,(\text{cilindrična mlaznica}) \\ +1, & C_N < 0 \,(\text{konkavna mlaznica}) \end{cases} \tag{6.52}$$

Uvedena korekcija za početnu fazu isticanja ima fizički smisao, jer je u fazi izdizanja iglice brizgača poptuno očekivana i mala brzina isticanja goriva. Eksponencijalna promena dometa vrha mlaza, načelno prati nelinearnu promenu protočnog preseka mlaznice i nelinearnu promenu brzine isticanja tokom faze izdizanja iglice brizgača. Ono što se uočava jeste jasno izražen diskontinuitet u trenutku u kome se prema proračunu Hirojasua pojavljuje raspad mlaza. Ovo upućuje na zaključak da se kod primene modela Kostas-Taškiran mora uzeti u obzir i korekcija za produženo vreme raspada mlaza. Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.39.



Slika 6.39: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše.

U nastavku, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora mlaza `ProdorMlaza071.m` (6.46).

Program 6.46: `ProdorMlaza071.m`

```
% Program za poređenje procenjene dužine prodora mlaza
% Modeli Hiroyasu i Kostas-Taskiran
% gorivo: dizel
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Model Hiroyasu
    % Hiroyasu H, Arai M:
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
    % SAE-paper 900475
    % str. 6, izrazi (3) i (4)

% Model Kostas
    % J. Kostas *, D. Honnery, J. Soria
    % Time resolved measurements of the initial stages of fuel spray penetration
    % Fuel 88 (2009) 2225-2237
    % Str. 10, izraz (1-4),

% Model Taskiran
    % Ozgur Oguz Taskiran, Metin Ergeneman
    % Experimental Study on Diesel Spray Characteristics and Autoignition Process
    % Journal of Combustion, Volume 2011, Article ID 528126, doi
        :10.1155/2011/528126
    % Hindawi Publishing Corporation
    % str. 8, izraz (10) - pre raspada mlaza
    % str. 10, izraz (11) - nakon raspada mlaza
```

```
clear;
close all;
clc;

p_Rail=1200.0E+05;
p_Gas=60.0E+05;
T_Gas=700.0;
R_Gas=287.15;


rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FD]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FD.rho;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=1000E-06;
dtimeInj=5E-06;
timeInj=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
% D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_NozzleIn=ND.dIn;
D_NozzleOut=240.0E-06;
D_NozzleIn=255.0E-06;

% D_Nozzle=[ND.dOut:ND.dOut.*0.5:ND.dOut.*3.0]';
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)

[timeBreak]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);

for i=1:1:nt
%     [L_SprayTipKText(1,i)]=STP_TaskiranExt(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                         D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),
    timeBreak);
    [L_SprayTipKTbaseCIL(1,i)]=STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleIn,D_NozzleIn,timeInj(1,i),timeBreak);
        [L_SprayTipKTbaseCNV(1,i)]=STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak);
            [L_SprayTipKTbaseDIV(1,i)]=STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas
                ,...
                                    D_NozzleOut,D_NozzleIn,timeInj(1,i),timeBreak);
    [L_SprayTipH(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                     D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak);
end

colororder('default');
figure(1)
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipH.*1E+03,'-k','LineWidth',1.0)
```

```
    hold on
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKTbaseCIL.*1E+03,'-')
    hold on
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKTbaseCNV.*1E+03,'-.')
    hold on
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKTbaseDIV.*1E+03,'--')
    hold on
%     plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKText.*1E+03,'-.k')
    grid on;
    hold on;
    xline(timeBreak.*1.0E+06, 'k:',{'t_{Break-Up}'}, 'LineWidth',1.5);

    xlabel('t_{INJ} [\mus]')
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]')
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.1f')
    xlim([(timeInjMin-dtimeInj.*10).*1.0E+06,(timeInjMax+dtimeInj.*10).*1.0E+06])
    LegendTitle='Model STP';
    LegendLabel={'Hiroyasu-Arai',...
                 'Kostas-Taskiran/Base - cyl. nozzle',...
                 'Kostas-Taskiran/Base - conv. nozzle',...
                 'Kostas-Taskiran/Base - div. nozzle'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);
```

6.5.9 Prodor vrha mlaza - 1. korekcija modela Kostas-Taškiran za vreme raspada mlaza

Funkcija za izračunavanje prodora mlaza prema osnovnom modelu Kostas-Taškiran, odlikuje niža vrednost gradijenta prodora mlaza u početnoj fazi, što navodi na zaključak da će i procenjeno vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza biti duže od onog koje se određuje primenom modela Hirojasu-Arai. Ukoliko se primeni kriterijum iz radova [47, 48] i vreme raspada mlaza izračunava prema modelu Hirojasu-Arai, pojaviće se diskontinuitet u vrednostima prodora mlaza za faze pre i nakon pojave raspada mlaza. Odrediti vreme raspada mlaza za model Kostas-Taškiran pretpostavljajući da raspad mlaza nastupa u presečnoj tački zavisnosti prodora mlaza za faze pre i nakon pojave raspada mlaza, a zatim odrediti i razliku u odnosu na vrednost dobijenu modelom Hirojasu-Arai. Proračun sprovesti za slučaj obrazovanja smeše iz prethodnog primera. Rešenje prikazati grafički za oba primenjena modela.

Smernice za rad

Načelno, problem se može rešiti eksplicitno, izjednačavanjem funkcija za izračunavanje dometa mlaza pre ($L_{STP,1}$) i nakon pojave raspada mlaza ($L_{STP,2}$), a zatim, rešavanjem jednačine po vremenu, što predstavlja postupak primenjen i u radu Hirojasua [46] za određivanje vremena raspada mlaza. Izrazi za prodor mlaza u obe faze isticanja dati su u poznatom obliku:

$$L_{STP,1} = 9{,}13 \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0,25} \cdot \left[\frac{\rho_G^{0,33} \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_F}\right]^{0,5} \cdot t^{1,5} \mid t < t_{BU} \tag{6.53}$$

$$L_{STP,2} = 2{,}95 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot \left(C_N^Z \cdot D_N \cdot t\right)^{0,5} \mid t > t_{BU} \tag{6.54}$$

Iz uslova da se vreme raspada mlaza t_{BU} dobija u presečnoj tački navedenih funkcija:

$$L_{STP,1} = L_{STP,2} \mid t = t_{BU} \tag{6.55}$$

Dobija se sledeći izraz:

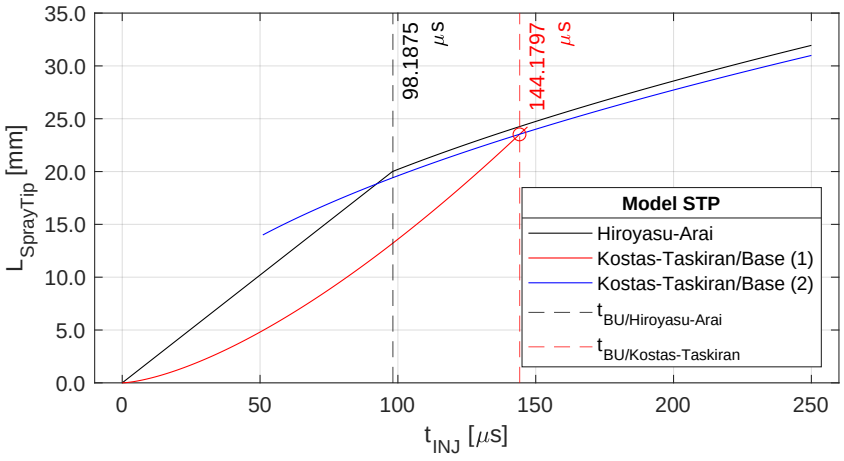
$$9{,}13 \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0,25} \cdot \left[\frac{\rho_G^{0,33} \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_F}\right]^{0,5} \cdot t^{1,5} = 2{,}95 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot \left(C_N^Z \cdot D_N \cdot t\right)^{0,5} \tag{6.56}$$

Rešavanjem prethodnog izraza po vremenu dobija se konačni izraz za eksplicitno izračunavanje vremena raspada po modelu Kostas-Taškiran:

$$t_{BU} = 0{,}323 \cdot \left[\frac{\rho_F}{(p_{INJ} - p_G)}\right]^{0,25} \cdot \frac{\left(C_N^Z \cdot D_N \cdot t\right)^{0,5}}{\rho_G^{0,165}} \tag{6.57}$$

Drugi pristup, podrazumeva grafo-analitičko rešenje koje se lako može sprovesti u programskom okruženju Matlab. Jedan od mogućih pristupa podrazumevao bi najpre pouzdano definisanje vremenskog intervala na kome se očekuje presečna tačka funkcija kojima se računa prodor mlaza pre i nakon raspada mlaza, vezujući ga npr. za već utvrđeno vreme raspada mlaza prema modelu Hirojasu-Arai. Na tom intervalu treba potražiti, najpre, razliku tako dobijenih vrednosti prodora mlaza, zatim izvršiti interpolaciju dobijenih vrednosti razlike prodora mlaza sa povećanom rezolucijom vremenske baze i na tako dobijenom nizu identifikovati tačku na kojoj razlike prodora mlaza menjaju znak. Time je određen položaj presečne tačke, a time i očekivano, najverovatnije vreme raspada za promenjene režime strujanja u početnoj fazi isticanja goriva koji su obuhvaćeni modelom Kostas-Taškiran.

Rezultati proračuna primenom eksplicitnog izraza i grafo-analitičke metode za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.40.



Slika 6.40: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše.

6.5.10 Zadatak: Prodor vrha mlaza - 2. korekcija modela Kostas-Taškiran za vreme raspada mlaza, Prodor mlaza (SP) - zadatak 10

Funkcija za izračunavanje prodora mlaza prema osnovnom modelu Kostas-Taškiran daje skokovit prelaz za diskretnu vrednost vremena raspada mlaza koja se izračunava primenom modela Hirojasu-Arai. Uvesti korekciju u osnovni model tako da se u skladu sa realnim uslovima obrazovanja smeše dobije kontinualna, dinamička promena prodora mlaza na prelazu iz faze pre u fazu nakon pojave raspada mlaza. Rezultate proračuna po modelu Hirojasu-Arai, osnovnom i korigovanom modelu Kostas-Taškiran prikazati za slučaj konvergentne mlaznice i uslove obrazovanja smeše iz prethodnog primera. Proračun ograničiti na početnu fazu ubrizgavanja u trajanju od 0.25 ms.

Smernice za rad

Osnovni model Kostas-Taškiran oslanja se na proračun vremena raspada mlaza po modelu Hirojasu-Arai. Direktna primena kombinovanog modela Kostas-Taškiran daje singularitet za procenjeno vreme pojave raspada mlaza prema modelu Hirojasu-Arai. Korigovanim modelom, umesto proračuna diskretne vrednosti vremena raspada po modelu Hirojasu-Arai, paralelno se proračunavaju prodori mlaza po jednačinama za period pre i nakon raspada mlaza. U intervalu u kome se vrednosti prodora mlaza približavaju po jednačinama za period pre i nakon raspada mlaza uvodi aproksimacija primenom sigmoidalne funkcije za obezbeđenje kontinualnog, dinamičkog prelaza iz jedne faze u drugu. Prodor mlaza u karakterističnim fazama računa se prema prethodno prikazanim izrazima 6.53 i 6.54.

Uvodi se tekuća razlika prodora mlaza za obe faze:

$$\Delta L_{STP} = L_{STP,2} - L_{STP,1} \tag{6.58}$$

Da bi se obezbedio kontinualni prelaz iz jedne faze u drugu, najpre se uvodi interval korekcije koji se može definisati u odnosu na procenjeno vreme pojave raspada mlaza t_{BU}, npr. uvođenjem relativnih granica preko odgovarajućih faktora k_{t1} (< 1.0) za početak i k_{t2} (> 1.0) za kraj intervala. Na osnovu tako definisanog intervala korekcije, mogu se definisati sledeći kriterijumi za izmenu metode proračuna u zavisnosti od vremena nakon početka ubrizgavanja:

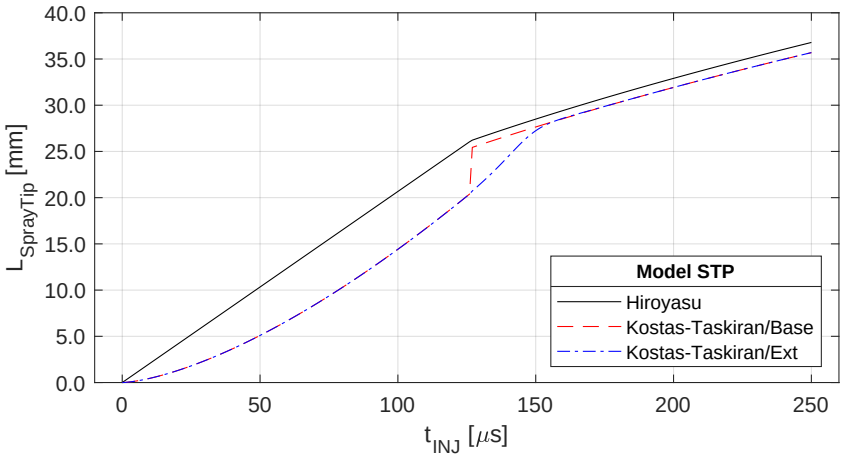
$$L_{STP} = \begin{cases} L_{STP,1} & \mid\ t_i < k_{t1} \cdot t_{BU} \\ L_{STP,1} + \Delta L_{STP} \cdot f_\sigma\left(\left(t_i - t_{BU}\right),a,c\right) & \mid\ k_{t1} \cdot t_{UB} < t_i < k_{t2} \cdot t_{BU} \\ L_{STP,2} & \mid\ t_i > k_{t2} \cdot t_{BU} \end{cases} \tag{6.59}$$

Gde je sigmoidalna funkcija f_σ data na sledeći način:

$$f_\sigma\left(\left(t_i - t_{BU}\right),a,c\right) = \frac{1}{1 + e^{-a\cdot[(t_i - t_{BU}) - c]}} \tag{6.60}$$

Proračun se u prvom približenju može sprovesti sa sledećom kombinacijom parametara: $k_{t1} = 1$, $k_{t2} = 1{,}5$, $a = 0{,}2$ i $c = 20$.

Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.41. Koristeći dopunjeni model Kostas-Taškiran, sprovesti proračun prodora mlaza za različite dužine intervala korekcije i parametre sigmoidalne funkcije.



Slika 6.41: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše.

U nastavku, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `ProdorMlaza073.m` (6.47).

Program 6.47: `ProdorMlaza073.m`

```
% Program za poređenje procenjene dužine prodora mlaza
% Modeli Hiroyasu i Kostas-Taskiran
% gorivo: dizel
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
% Model Hiroyasu
    % Hiroyasu H, Arai M:
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
    % SAE-paper 900475
    % str. 6, izrazi (3) i (4)

% Model Kostas
    % J. Kostas *, D. Honnery, J. Soria
    % Time resolved measurements of the initial stages of fuel spray penetration
    % Fuel 88 (2009) 2225-2237
    % Str. 10, izraz (1-4),

% Model Taskiran
    % Ozgur Oguz Taskiran, Metin Ergeneman
    % Experimental Study on Diesel Spray Characteristics and Autoignition Process
    % Journal of Combustion, Volume 2011, Article ID 528126, doi
        :10.1155/2011/528126
    % Hindawi Publishing Corporation
    % str. 8, izraz (10) - pre raspada mlaza
    % str. 10, izraz (11) - nakon raspada mlaza

clear;
close all;
clc;

p_Rail=1200.0E+05;
p_Gas=30.0E+05;
T_Gas=600.0;
R_Gas=287.15;

rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FD]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FD.rho;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=250E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInj=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
```

```
[ND]=NozzleData();
% D_NozzleOut=ND.dOut;
% D_NozzleIn=ND.dIn;
D_NozzleOut=240.0E-06;
D_NozzleIn=255.0E-06;

[timeBreak]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);

for i=1:1:nt
    [L_SprayTipKText(1,i)]=STP_TaskiranExt(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                        D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak
                                            );
    [L_SprayTipKTbase(1,i)]=STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                      D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak);
    [L_SprayTipH(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                       D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreak);
end

colororder('default');
figure(1)
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipH.*1E+03,'-k')
    hold on
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKTbase.*1E+03,'--r')
    hold on
    plot(timeInj.*1E+06,L_SprayTipKText.*1E+03,'-.b')
    grid on;
    hold on;

    xlabel('t_{INJ} [\mus]')
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]')
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.1f')
    xlim([(timeInjMin-dtimeInj.*10).*1.0E+06,(timeInjMax+dtimeInj.*10).*1.0E+06])
    LegendTitle='Model STP';
    LegendLabel={'Hiroyasu',...
                 'Kostas-Taskiran/Base',...
                 'Kostas-Taskiran/Ext'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);

%     figure(2)
%     plot(timeInj.*1E+06,f_sigm,'-.b')
%     grid on;
%     hold on;
```

6.5.11 Prodor mlaza - model Aregle

Napisati funkciju za izračunavanje prodora vrha mlaza za model Aregle (*Arregle*) [51] i odgovarajući program za poređenje rezultata proračuna modelom Aregle i Hirojasu-Arai za uslove obrazovanja smeše koji su korišćeni pri verifikaciji modela i dati u tabeli 6.4.

Naziv veličine	Slučaj 1	Slučaj 2
Pritisak goriva ispred brizgača	70 MPa	110 MPa
Pritisak gasa u cilindru motora	6 MPa	6 MPa
Temperatura gasa u cilindru	700 K	700 K
Prečnik izlaznog otvora mlaznice	$110 \cdot 10^{-6}$ m	$190 \cdot 10^{-6}$ m
Vreme trajanja ubrizgavanja	1,5 ms	1,5 ms

Tabela 6.4: Uslovi za postavljanje modela.

Uporediti dobijene rezultate sa rezultatima eksperimenta i uvesti linearni korekcioni faktor za model Aregle.

Rešenje

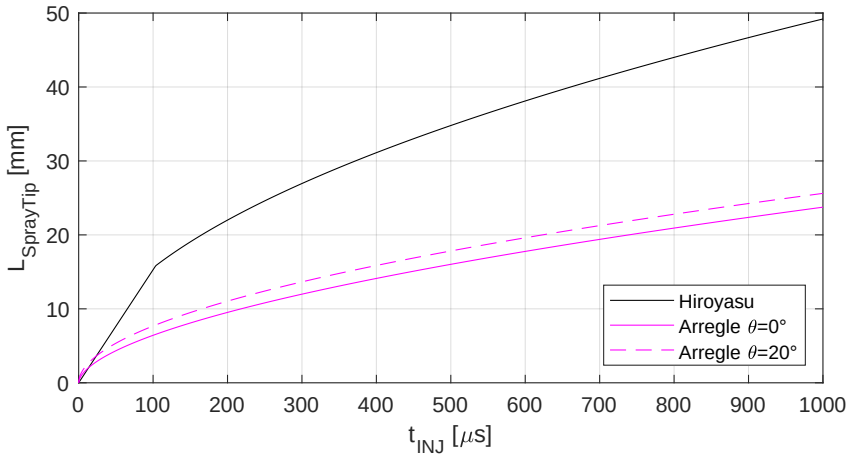
Aregle je za osnovu svog modela izabrao zavisnosti koje su za prodor mlaza utvrdili Vakuri i Dent, tj. jednostepenu funkciju kojom se opisuje prodor mlaza, ne uzimajući u obzir pojavu raspada mlaza. Proporcionalnost je prikazana u sledećem obliku:

$$L_{STP} \cong D_N^{0,370} \cdot p_{inj}^{0,262} \cdot \rho_G^{-0,406} \cdot t^{0,568} \tag{6.61}$$

Ili, ako se u obzir uzme i uticaj ugla konusa mlaza:

$$L_{STP} \cong D_N^{0,608} \cdot p_{inj}^{0,283} \cdot \rho_G^{-0,242} \cdot t^{0,523} \cdot \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]^{0,523} \tag{6.62}$$

Rezultati proračuna primenom ova dva modela i poređenje sa rezultatima proračuna primenom modela Hirojasu-Arai, prikazani su na slici 6.42.



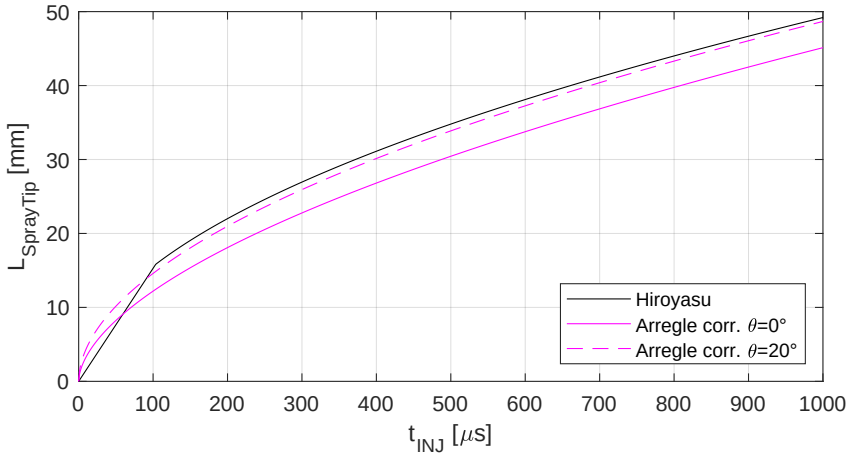
Slika 6.42: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu i Aregle bez korekcije (slučaj 1).

Poređenjem sa izvornim rezultatima prikazanim u radu [51], a takođe i sa rezultatima proračuna modelom Hirojasu-Arai, konstatuje se da model daje potcenjene

vrednosti prodora mlaza, bez obzira na to da li se ugao konusa mlaza uzima u obzir ili ne. U tom smislu je neophodno uvesti odgovarajuću linearnu korekciju, prikazanu u opštem obliku na sledeći način:

$$L_{STP,corr} = C_{corr} \cdot L_{STP}\left(D_N, p_{INJ}, \rho_G, t, \theta\right) \tag{6.63}$$

Rezultati proračuna za diskretno izabranu vrednost korekcije od $C_{corr} = 1{,}9$ prikazani su na slici 6.43.



Slika 6.43: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu i Aregle sa linearnom korekcijom $C_{corr} = 1{,}9$ (slučaj 1).

Zadatak za samostalni rad: Modifikovati izvorni program i prilagoditi ga primeni optimizacionog algoritma za programsku identifikaciju linearne korekcije tako da zbir kvadratnih odstupanja na definisanom vremenskom domenu na kome se obavlja proračun bude minimalan.

Program 6.48: `ProdorMlaza082.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza u
% zavisnosti od vremena
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
% gorivo: dizel
% Poređenje rezultata primene najčešće korišćenih modela proračuna
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
```

```
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% LS_xxx     [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear;
close all;
clc;

p_Rail=700.0E+05;
p_Gas=60.0E+05;
T_Gas=700; % 300, 670, 700, 760, za kontrolu...
R_Gas=287; %
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
TFuel=313.0;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=1000E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInj=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt nt]=size(timeInj);
```

```
% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
% D_NozzleIn=ND.dIn;
% D_NozzleOut=ND.dOut;
D_NozzleOut=190.0E-06;
D_NozzleIn=190.0E-06;
% Izračunavanje vremena raspada mlaza - model Hiroyasu
[timeBreakHA]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut)
% [timeBreakKT]=SBT_KostasTaskiran(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleIn,
    D_NozzleOut)
% [timeBreakK]=SBT_Kegl(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut)
% Izračunavanje dužine prodora mlaza u f-ji vremena
for i=1:1:nt
    % -------------------------------------------------
    % 1960...1990
    [LS_Hiroyasu(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
%       [LS_Dent(1,i)]=STP_Dent(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                    D_NozzleOut,0,timeInj(1,i),0);
%       [LS_Wakuri(1,i)]=STP_Wakuri(D_NozzleOut,p_Rail,p_Gas,rhoGas,...
%                                    16,0,timeInj(1,i));
    % -------------------------------------------------
    % 1990...
%     [LS_TianNVS(1,i)]=...
%         STP_TianNV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj(1,i));
%
%     [LS_TianVSL(1,i), LS_TianVSV(1,i)]=...
%         STP_TianV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj(1,i),T_Gas);
    [LS_Arregle(1,i)]=STP_Arregle(p_Rail,rhoGas,D_NozzleOut,timeInj(1,i),0);
    [LS_ArregleA(1,i)]=STP_Arregle(p_Rail,rhoGas,D_NozzleOut,timeInj(1,i),20);

%     [LS_Taskiran(1,i)]=...
%         STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                       D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
%     [LS_Bohl(1,i)]=STP_Bohl(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                    TFuel,D_NozzleOut,timeInj(1,i),0);
%     [LS_Kegl(1,i)]=STP_Kegl_01(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                    D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakK);
end

colororder('default');
figure(1)
% % Wakuri (1960)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Wakuri*1.0E+03, '-r')
% hold on;
% % Dent (1970)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Dent*1.0E+03, '--r')
% hold on;

% Hiroyasu
plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-k')
grid on;
hold on;

% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianNVS*1.0E+03, '--r', LineWidth=1.5)
```

```
% hold on;
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianVSL*1.0E+03, '--b', LineWidth=1.5)
% hold on;
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianVSV*1.0E+03, '--k', LineWidth=1.5)
% hold on;

% % Arregle (1999)
plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Arregle*1.0E+03, '-m')
hold on;
plot(timeInj.*1.0E+06,LS_ArregleA*1.0E+03, '--m')
hold on;
% Taskiran (2009)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Taskiran*1.0E+03, '--b')
% hold on;
% Bohl (2017)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Bohl*1.0E+03, '-.k')
% hold on;
% % Kegl (2018)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Kegl*1.0E+03, '--r')
% hold on;

xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
yticks([0.0:10:150]);
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.0f')

legend('Hiroyasu','Arregle corr. \theta=0°','Arregle corr. \theta=20°',...
    'location','SouthEast')

% figure (2)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianNVS*1.0E+03, '--ro', LineWidth=1.5)
% hold on;
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianVSL*1.0E+03, '--bo', LineWidth=1.5)
% hold on;
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_TianVSV*1.0E+03, '--ko', LineWidth=1.5)
% hold on;
%
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, ':r')
% grid on;
% hold on;
```

Program 6.49: `STP_Arregle.m`

```
function [L_SprayTip]=STP_Arregle(p_Rail,rhoGas,D_Nozzle,timeInj,theta)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% S. J. Popović
% 202403.v01

% Ref.
% Arregle JM, Pastor JV, Ruiz S.
% The Influence of injection parameters on diesel spray
% characteristics, SAE International, SAE paper 1999-01-0200, 1999.
```

```
% Breda Kegl*, Luka Lešnik
% Modeling of macroscopic mineral diesel and biodiesel spray characteristics
% Fuel 222 (2018) 810-820
    % Napomena:
    % Tabela 3, ref [29]
    % Greška u izrazu -
    % konstanta 1E-03 je pogrešna, treba da bude 1.0
    % vreme je dato u [ms], a treba da bude u [s]


corr_p=1.0E-00; % Pa > kPa
corr_D=1.0E+00; % m > mm
corr_t=1.0E+00; % sec > ms
corr_rho=1.0E-00; %kg/m3 > gr/cm3?
if theta<=0
    C0=1.9
    C1=(D_Nozzle.*corr_D).^(+0.370);
    C2=(p_Rail.*corr_p).^(+0.262);
    C3=(rhoGas.*corr_rho).^(-0.406);
    C4=(timeInj.*corr_t).^(+0.568);
    C5=tand(theta./2);
        [L_SprayTip]=C0.*C1.*C2.*C3.*C4;
elseif theta>0
    C0=1.9
    C1=(D_Nozzle.*corr_D).^(+0.608);
    C2=(p_Rail.*corr_p).^(+0.283);
    C3=(rhoGas.*corr_rho).^(-0.242);
    C4=(timeInj.*corr_t).^(+0.523);
    C5=(tand(theta./2)).^(-0.500);
        [L_SprayTip]=C0.*C1.*C2.*C3.*C4.*C5;
else
end
```

6.5.12 Prodor mlaza - model Bol i Kegl

Napisati funkcije za izračunavanje prodora mlaza primenom modela Bol (*Bohl*) [52] i Kegl [53] a zatim dograditi program iz prethodnog primera i uporediti rezultate proračuna primenom modela Hirojasu, Kostas-Taškiran, Bol i Kegl. Proračun sprovesti za sledeći slučaj obrazovanja smeše:

- Pritisak goriva ispred brizgača 60 MPa;
- Pritisak gasa u cilindru 6 MPa;
- Temperatura gasa u cilindru 700 K;
- Karakteristike cilindrične mlaznice: prečnik izlaznog otvora $150 \cdot 10^{-6}$ m;
- Karakteristike konvergentne mlaznice: prečnik ulaznog otvora $165 \cdot 10^{-6}$ m, prečnik izlaznog otvora $150 \cdot 10^{-6}$ m;
- Vreme trajanja ubrizgavanja 1 ms.

Rešenje

Ovaj primer treba da pomogne da se kritički sagledaju i procene uticaji tehnološkog napretka u izradi sistema za ubrizgavanje i mernih tehnika na rezultate ekperimenata i modela koji iz njih proizilaze. Modeli Bol, Kegl i Kostas-Taškiran izabrani su za poređenje jer prate pristup prikazan u modelu Hirojasu-Arai koji podrazumeva različite zavisnosti za prodor mlaza pre i nakon raspada mlaza. Ovim primerom biće prikazane ne samo razlike u konkretnim izrazima, već i nesavršenosti modela koje se ogledaju u postojanju diskontinuiteta u vrednostima prodora mlaza na prelazu pojedinih faza, a koje autori nisu ni konstatovali ni objasnili.

Razlike u obliku funkcionalnih zavisnosti, a pre svega u vrednostima eksponenata za pojedine članove, proističu iz različitih uslova izvođenja eksperimenata koji su korišćeni za verifikaciju modela. Model Hirojasu-Arai je verifikovan za uslove stacionarnog, dakle potpuno razvijenog istrujavanja goriva iz mlaznice, što se uslovno može smatrati kao prihvatljiv prikaz realnog stanja u cilindru ako se uzme u obzir tehnološki nivo i dostupnost merne tehnike u vremenu kada je model nastao. Preostala tri modela razvijena su i verifikovana sa vremenskom distancom od oko 20 do 25 godina i to za uslove impulsnog istrujavanja goriva iz mlaznice, što odgovara realnim uslovima primene brizgača i uslovima obrazovanja smeše u cilindru, uz napomenu da su modeli Bol i Kegl, takođe, verifikovani i za različite mešavine standardnog i biodizel-goriva. Bol polazi od toga da su vreme raspada i prodor mlaza i pre pojave raspada korektno određeni i definisani modelom Hirojasu-Arai i zadržava funkcionalne zavisnosti navedene u tom modelu. Za fazu isticanja nakon raspada mlaza uvodi sledeću zavisnost:

$$L_{STP,2@Bohl} = 0{,}34161 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,25} \cdot D_N^{0,5} \cdot \rho_F^{0,3387} \cdot t^{0,5432} \;\mid\; t > t_{BU} \quad (6.64)$$

Kegl uvodi po obliku identičan izraz za izračunavanje vremena raspada mlaza, ali sa izmenjenim linearnim koeficijentom. Takođe izmenjeni su eksponenti pojedinih članova u izrazima za izračunavanje prodora mlaza pre i nakon raspada mlaza:

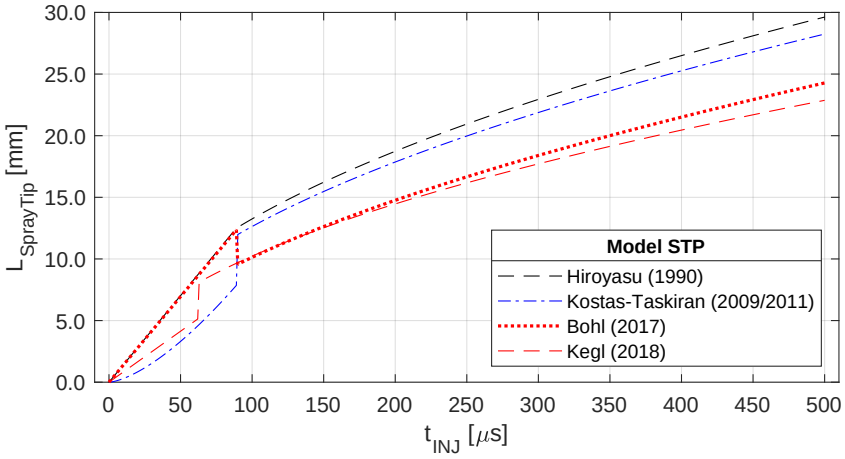
$$t_{BU@Kegl} = 20 \cdot \frac{\rho_F \cdot D_N}{\sqrt{\rho_G \cdot (p_{INJ} - p_G)}} \quad (6.65)$$

$$L_{STP,1@Kegl} = 0{,}39 \cdot \left[\frac{2 \cdot (p_{INJ} - p_G)}{\rho_F}\right]^{0,455} \cdot t \;\mid\; t < t_{BU} \quad (6.66)$$

$$L_{STP,2@Kegl} = 2{,}909 \cdot \left[\frac{(p_{INJ} - p_G)}{\rho_G}\right]^{0,233} \cdot (D_N \cdot t)^{0,5} \;\mid\; t > t_{BU} \quad (6.67)$$

Veličine i jedinice definisane su kao i u prethodnim primerima. Rezultati proračuna

prikazani su na slici 6.44. Vizuelno, razlike se čine velikim, međutim u apsolutnom domenu, razlike u prodoru mlaza su reda veličine milimetra. Treba imati u vidu da su uslovi u komori u svim eksperimentima definisani na gotovo identičan način (pritisak 20 . . . 30 MPa i temperatura oko 300 K), ali su pritisci ubrizgavanja vrlo različiti (do 80 MPa kod modela Hirojasu-Arai, i do 180 MPa kod modela Bol). Ista konstatacija važi i za izabrane prečnike mlaznica, od 160 μm za model Bol, preko 300 μm za model Hirojasu pa do 680 μm za model Kegl. Na kraju treba istaći da u uočenim razlikama figuriše i primena različitih eksperimentalnih tehnika za određivanje dometa mlaza, od jonizujuće tehnike u slučaju modela Hirojasu-Arai, do ultra-brze vizualizacije korišćene u eksperimentima za modele Bol i Kegl.



Slika 6.44: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu, Kostas-Taškiran, Bol i Kegl.

Program 6.50: `ProdorMlaza083.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza u
% zavisnosti od vremena
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
% gorivo: dizel
% Poređenje rezultata primene najčešće korišćenih modela proračuna
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
```

```
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% LS_xxx     [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear;
close all;
clc;

p_Rail=600.0E+05;
p_Gas=60.0E+05;
T_Gas=700; % 300, 670, 700, 760, za kontrolu...
R_Gas=287; %
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
TFuel=313.0;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=500E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInj=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt nt]=size(timeInj);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
```

```
% D_NozzleIn=ND.dIn;
% D_NozzleOut=ND.dOut;
D_NozzleOut=150.0E-06;
D_NozzleIn=165.0E-06;
% Izračunavanje vremena raspada mlaza - model Hiroyasu
[timeBreakHA]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
% [timeBreakKT]=SBT_KostasTaskiran(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleIn,
    D_NozzleOut);
[timeBreakK]=SBT_Kegl(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
% Izračunavanje dužine prodora mlaza u f-ji vremena
for i=1:1:nt
    % ------------------------------------------------
    % 1960...1990
    [LS_Hiroyasu(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
%     [LS_Dent(1,i)]=STP_Dent(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                     D_NozzleOut,0,timeInj(1,i),0);
%     [LS_Wakuri(1,i)]=STP_Wakuri(D_NozzleOut,p_Rail,p_Gas,rhoGas,...
%                                      16,0,timeInj(1,i));
    % ------------------------------------------------
    % 1990...
%     [LS_TianNVS(1,i)]=...
%         STP_TianNV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj(1,i));
%
%     [LS_TianVSL(1,i), LS_TianVSV(1,i)]=...
%         STP_TianV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj(1,i),T_Gas);
%     [LS_Arregle(1,i)]=STP_Arregle(p_Rail,rhoGas,D_NozzleOut,timeInj(1,i),0);
%     [LS_ArregleA(1,i)]=STP_Arregle(p_Rail,rhoGas,D_NozzleOut,timeInj(1,i),20);

    [LS_Taskiran(1,i)]=...
        STP_TaskiranBase(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                    D_NozzleIn,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
    [LS_Bohl(1,i)]=STP_Bohl(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    TFuel,D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakHA);
    [LS_Kegl(1,i)]=STP_Kegl_01(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleOut,timeInj(1,i),timeBreakK);

end

colororder('default');
figure(1)
    % Hiroyasu (1990)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '--k');
    grid on;
    hold on;
    % Taskiran (2009)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Taskiran*1.0E+03, '-.b');
    hold on;
    % Bohl (2017)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Bohl*1.0E+03, ':r', 'LineWidth',1.5);
    hold on;
    % % Kegl (2018)
    plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Kegl*1.0E+03, '--r');
    hold on;
```

```
    xlabel('t_{INJ} [\mus]')
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]')
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.1f')
    xlim([(timeInjMin-dtimeInj.*10).*1.0E+06,(timeInjMax+dtimeInj.*10).*1.0E+06])
    LegendTitle='Model STP';
    LegendLabel={'Hiroyasu (1990)',...
                 'Kostas-Taskiran (2009/2011)',...
                 'Bohl (2017)',...
                 'Kegl (2018)'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);
```

Program 6.51: `SBT_Kegl.m`

```
function [BreakupTime]=SBT_Kegl(p_Inj,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_Nozzle)
% Funkcija za izračunavanje vremena početka raspada mlaza goriva
% - vreme početka primarnog raspada -
% S. J. Popović
% 202403.v01

% Ref.
% Breda Kegl*, Luka Lešnik
% Modeling of macroscopic mineral diesel and biodiesel spray characteristics
% Fuel 222 (2018) 810-822

% Pregled oznaka i jedinica
% p_Inj             [Pa]       pritisak ubrizgavanja
% p_Gas             [Pa]       pritisak gasa u cilindru
% rhoFuel           [kg/m3]    gustina goriva
% rhoGas            [kg/m3]    gustina gasa u cilindru
% D_NozzleOut       [m]        prečnik izlaznog otvora mlaznice
% timeBreak         [s]        vreme raspada mlaza

% Korekcioni faktori za preračunavanje ulaznih jedinica
corr_p=1.0E-00;     % Pa > Pa
corr_D=1.0E+03;     % m > mm
corr_rho=1.0E-00;   % kg/m3 > kg/m3
corr_t=1.0E-03;     % ms > s

% Izračunavanje članova
dp=(p_Inj-p_Gas).*corr_p;
C0=20.0;
C1=(rhoFuel.*corr_rho).*(D_Nozzle.*corr_D);
C2=(rhoGas.*corr_rho.*dp).^(-0.5);

% Izračunavanje vremena raspada mlaza
BreakupTime=corr_t.*C0.*C1.*C2;
```

Program 6.52: `STP_Bohl.m`

```
function [L_SprayTip]=STP_Bohl(p_Inj,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                               T_Fuel,D_Nozzle,timeInj,timeBreak)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.
% Thomas Bohl, Guohong Tian, Andrew Smallbone, Anthony P. Roskilly
% Macroscopic spray characteristics of next-generation bio-derived diesel
% fuels in comparison to mineral diesel
% Applied Energy 186 (2017) 562-573
% str. 10, izraz (9)


% disp('Bohl')

corr_dp=1.0E+00; % Pa > kPa
corr_D=1.0E+00; % m > mm
corr_t=1.0E+00; % sec > ms
corr_rho=1.0E+00; %kg/m3 > gr/cm3?
FuelType='EN590ref';

[rhoFuel, kT, betaT]=DFD_Payri(p_Inj,T_Fuel,FuelType);

if timeInj<timeBreak
%     disp('time<timeBreak...Hiroyasu');
    C11=((p_Inj-p_Gas).*corr_dp)./(rhoFuel.*corr_rho);
    [L_SprayTip]=0.39.*((2.0.*C11).^0.5).*(timeInj.*corr_t);
else
%     disp('time>timeBreak...Hiroyasu');
    C0=2.95.*0.1158;
%     C0=2.95.*0.1518;
    C12=((p_Inj-p_Gas).*corr_dp)./(rhoGas.*corr_rho);
    C2=D_Nozzle.*corr_D;
    C3=rhoFuel.*corr_rho;
    C4=(timeInj.*corr_t);
    [L_SprayTip]=C0.*(C12.^0.25).*(C2.^0.50).*(C3.^0.3387).*(C4.^0.5432);
end
```

Program 6.53: `STP_Kegl_01.m`

```
function [L_SprayTip]=STP_Kegl_01(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                  D_Nozzle,timeInj,timeBreak)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% S. J. Popović
% 202404.v01
% Ref.
% Ref.
% Breda Kegl*, Luka Lešnik
% Modeling of macroscopic mineral diesel and biodiesel spray characteristics
% Fuel 222 (2018) 810-822

% NAPOMENA:
```

```
% U izrazu br. 2, str. 5, postoji greška
% Ako je prečnik izlaznog otvora mlaznice (do) dat u [mm] onda umesto prečnika (do)
     mora biti
% uveden član (do/1000) i u tom slučaju koeficijent na početku izraza 92 ostaje
    nepromenjen.

% Ako je prečnik izlaznog otvora mlaznice (do) dat u [m], onda koeficijent
% na početku izraza mora imati vrednost 2.95
% Isti komentar može važiti i za vreme od početka ubrizgavanja t
% Vrednost koeficijenta 2.95 figuriše i u modelu Hirojasu-Arai i u modelu
% Kostas, s tim što je u modelu Hirojasu-Arai eksplicitno naznačeno da su
% sve jedinice u skladu sa SI

% disp('Kegl')

corr_dp=1.0E-00;  % Pa > kPa
corr_rho=1.0E-00; % kg/m3 > kg/m3?
corr_D=1.0E+03;   % m > mm
corr_t=1.0E+03;   % sec > ms
corr_L=1.0E-03;   % mm > m

if timeInj<timeBreak
%     disp('time<timeBreak...Kegl')
    C10=0.39;
    C11=((p_Rail-p_Gas).*corr_dp)./(rhoFuel.*corr_rho);
    [L_SprayTip]=corr_L.*C10.*((2.0.*C11).^(+0.455)).*(timeInj.*corr_t);
else
%     disp('time>timeBreak...Kegl')
    % Vidi napomenu koja se odnosi na vrednost koeficijenta C20 i jedinice u kojima
        se zadaje
    % prečnika mlaznice
    C20=92;
    C21=((p_Rail-p_Gas).*corr_dp)./(rhoGas.*corr_rho);
    C22=(D_Nozzle.*corr_D./1000).*(timeInj.*corr_t);
    [L_SprayTip]=corr_L.*C20.*(C21.^(+0.233)).*(C22.^(+0.50));
end
```

6.5.13 Prodor vrha mlaza, slučaj ubrizgavanja motornog benzina - model Tijan

Koristeći empirijski model Tijana (*Tian*) [54], napisati funkcije za izračunavanje prodora vrha mlaza motornog benzina za slučaj bez i sa isparavanjem goriva, a zatim i program za izračunavanje prodora vrha mlaza pretpostavljajući uslove obrazovanja smeše kao u eksperimentu u kojim je model potvrđen:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri ($p = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$, $T = 300\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru 20 MPa;
- Vreme trajanja ubrizgavanja ograničiti na 1.0 ms;
- Izlazni prečnik mlaznice je $96 \cdot 10^{-6}$ m.

Uporediti rezultate proračuna za zadati slučaj sa rezultatima primene modela Hirojasu-Arai koji je prilagođen i verifikovan za dizel-gorivo (prethodno razvijene funkcije `SBT_Hiroyasu.m` 6.28 i `STP_Hiroyasu.m` 6.39). Rezultate proračuna prikazati grafički, posebnim linijama za različite modele i različite strukture mlaza.

Rešenje:

Za razliku od modela Hirojasu-Arai i nekih izvedenih (Kostas-Taškiran, Bol, Kegl) koji su razvijani i verifikovani za dizel-gorivo i uključuju dve faze - fazu pre i nakon raspada mlaza, kod modela Tijan mlaz se sagledava kroz agregatna stanja goriva, pa se u tom smislu posebno posmatra i izračunava prodor mlaza bez isparavanja goriva i prodor mlaza u kome postoji isparavanje goriva, u okviru koga se posebno izračunavaju dometi tečne i gasovite faze. Izraz za prodor mlaza bez isparavanja goriva (eng.: *Non-Vaporizing Spray*) prikazan je kroz proizvod istih članova kao i u većini prethodnih modela - gustine gasa, pada pritiska na mlaznici, prečnika mlaznice i vremena od početka ubrizgavanja uz izmenjene eksponente pojedinih članova:

$$L_{STP,NV} = 0{,}1045 \cdot \rho_G^{-0{,}25} \cdot (p_{INJ} - p_G)^{0{,}7106} \cdot D_N^{0{,}5} \cdot t^{1{,}0327} \tag{6.68}$$

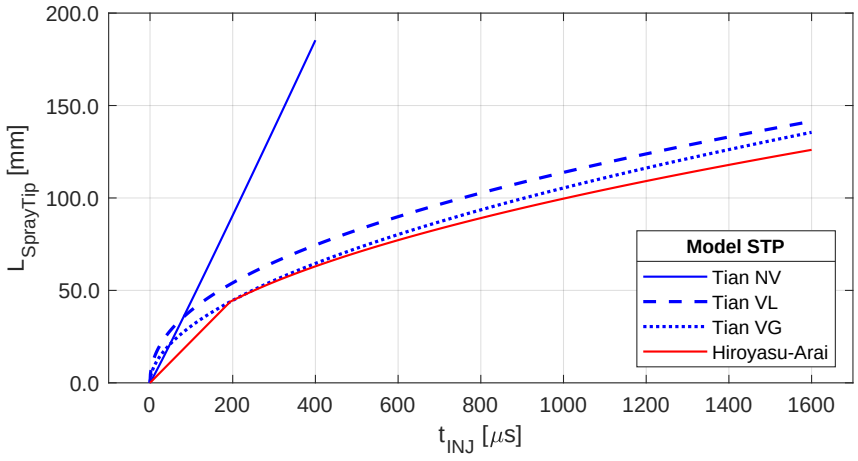
Iako je uticaj vremena prikazan kroz eksponencijalnu zavisnost, vrednost eksponenta neznatno je veća od 1, pa se svodi na linearnu zavisnost i formu modela Hirojasu-Arai za fazu isticanja pre raspada mlaza. Za slučaj mlaza u uslovima u kojima dolazi do isparavanja goriva, kakav je npr. slučaj ubrizgavanja goriva pod visokim pritiskom i u kasnijim fazama takta sabijanja, modelom su obuhvaćeni izrazi za izračunavanje prodora tečne faze i gasne faze izrazima koji po formi prate onaj koji je dao Dent [48] za dizel-gorivo. Izraz za prodor tečne faze da je u sledećem obliku:

$$L_{STP,VL} = 9{,}4059 \cdot \rho_G^{-0{,}3193} \cdot (p_{INJ} - p_G)^{0{,}2120} \cdot D_N^{0{,}5607} \cdot t^{0{,}4624} \cdot \left(\frac{294}{T_G}\right)^{0{,}6934} \tag{6.69}$$

Izraz za izračunavanje prodora gasovite faze dat je u istom obliku sa:

$$L_{STP,VG} = 14{,}6757 \cdot \rho_G^{-0{,}4033} \cdot (p_{INJ} - p_G)^{0{,}2592} \cdot D_N^{0{,}6588} \cdot t^{0{,}5345} \cdot \left(\frac{294}{T_G}\right)^{0{,}5388} \tag{6.70}$$

U navedenim izrazima prema modelu Tijana, linearni koeficijenti su izmenjeni u odnosu na izvorne navedene u radu [54], a dobijeni su usklađivanjem svih jedinica sa onim koji se koriste u ovom priručniku. Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.44.



Slika 6.45: Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Tijan i Hirojasu-Arai.

Program 6.54: `ProdorMlaza100.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza u
% zavisnosti od vremena
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
% gorivo: motorni benzin
% Poređenje rezultata primene najčešće korišćenih modela proračuna
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača
```

```
% FP          []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND          []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak   [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% LS_xxx      [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

p_Rail=1250.0E+05;
p_Gas=1.0E+05;
T_Gas=300.0; % 300, 670, 700, 760, za kontrolu...
R_Gas=287; %
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Motorni benzin EN228
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Zadavanje vremena ubrizgavanja
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=1600E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInjVS=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt ntVS]=size(timeInjVS);
timeInjNVS=timeInjMin:dtimeInj:(0.25.*timeInjMax);
[mt ntNVS]=size(timeInjNVS);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleIn=ND.dIn;
D_NozzleOut=ND.dOut;
% Izračunavanje vremena raspada mlaza - model Hiroyasu
[timeBreak]=SBT_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);

% Izračunavanje dužine prodora mlaza u f-ji vremena
% Izračunavanje prodora mlaza po modelu Tian bez isparavanja goriva
% (ograničeno na prvih 25% intervala ubrizgavanja goriva)
for i=1:1:ntNVS
    [LS_TianNVS(1,i)]=...
        STP_TianNV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjNVS(1,i));
end
% Izračunavanje prodra mlaza po modelu Hirojasu-Arai i po modelu Tian sa
    isparavanjem goriva
for i=1:1:ntVS
    [LS_Hiroyasu(1,i)]=STP_Hiroyasu(p_Rail,p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
                                    D_NozzleOut,timeInjVS(1,i),timeBreak);
    [LS_TianVSL(1,i), LS_TianVSV(1,i)]=...
        STP_TianV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjVS(1,i),T_Gas);
end
```

```
colororder('default');
% figure(1)
% Hiroyasu (1990)
% plot(timeInj.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-.r')
% grid on;
% hold on;
% xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
% ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
% yticks([0.0:10:150]);
% xtickformat('%.0f')
% ytickformat('%.0f')


figure (1)
    plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS*1.0E+03, '-b', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =1.0);
    hold on;
    plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL*1.0E+03, '--b', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =1.5);
    hold on;
    plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV*1.0E+03, ':b', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =1.5);
    hold on;
    plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-r', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =1.0);
    grid on;
    hold on;

    xlabel('t_{INJ} [\mus]')
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]')
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.1f')
    xlim([(timeInjMin-dtimeInj.*100).*1.0E+06,(timeInjMax+dtimeInj.*100).*1.0E+06])
    LegendTitle='Model STP';
    LegendLabel={'Tian NV',...
                 'Tian VL',...
                 'Tian VG',...
                 'Hiroyasu-Arai'};
    lgd = legend(LegendLabel,'location','SouthEast');
    title(lgd,LegendTitle);
```

Program 6.55: `STP_TianNV.m`

```
function [L_SprayTip]=STP_TianNV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.

% Teorijska podloga:
% Dent J.C.: A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for
% Studying Spray Penetration, SAE paper 710571
```

```
% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% disp('Tian - Non-vaporizing spray')

% Komentar za jedinice
% U originalnom članku ne postoji eksplicitno navođenje jedinica
% U članku:
% Medina, M., Fatouraie, M., and Wooldridge, M.,
% High-Speed Imaging Studies of Gasoline Fuel Sprays at Fuel Injection
% Pressures from 300 to 1500 bar
% SAE Technical Paper 2018-01-0294, 2018, doi:10.4271/2018-01-0294.
% su navedene jedinice na sl. način...

% corr_dp=1.0E-03;  % Pa > kPa
% corr_D=1.0E+03;   % m > mm
% corr_t=1.0E+03;   % sec > ms
% corr_rho=1.0E-03; % kg/m3 > gr/cm3
% corr_L=1.0E-03;   % mm > m
% C0=0.0635;

corr_dp=1.0E+00;  % Pa > Pa
corr_D=1.0E+00;   % m > m
corr_t=1.0E+00;   % sec > sec
corr_rho=1.0E+00; % kg/m3 > kg/m3?
corr_L=1.0E+00;   % m > m
C0=0.1045;

C1=(rhoGas.*corr_rho).^(-0.25);
C2=(D_Nozzle.*corr_D).^(+0.50);
C3=(timeInj.*corr_t).^(+1.0327);
C4=((p_Rail-p_Gas).*corr_dp).^(+0.7106);

% A1=(corr_rho).^(-0.25);
% A2=(corr_D).^(+0.50);
% A3=(corr_t).^(+1.0327);
% A4=(corr_dp).^(+0.7106);
% A0=C0.*A1.*A2.*A3.*A4.*corr_L

[L_SprayTip]=C0.*C1.*C2.*C3.*C4.*corr_L;
```

Program 6.56: `STP_TianV.m`

```
function [L_SprayTipLiquid, L_SprayTipVapor]=...
          STP_TianV(p_Rail,p_Gas,rhoGas,D_Nozzle,timeInj,T_Gas)
% Funkcija za izračunavanje dužine prodora vrha mlaza
% Model Tian, slučaj bez isparavanja
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.
```

```
% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Dent J.C.: A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for
% Studying Spray Penetration, SAE paper 710571
% ---------------------------------------------------------------------

% disp('Tian - Vaporizing spray')
% Komentar za jedinice
% U originalnom članku ne postoji eksplicitno navođenje jedinica
% U članku:
% Medina, M., Fatouraie, M., and Wooldridge, M.,
% High-Speed Imaging Studies of Gasoline Fuel Sprays at Fuel Injection
% Pressures from 300 to 1500 bar
% SAE Technical Paper 2018-01-0294, 2018, doi:10.4271/2018-01-0294.
% su navedene jedinice na sl. način...

% corr_dp=1.0E-00;  % Pa > kPa
% corr_D=1.0E+03;   % m > mm
% corr_t=1.0E+03;   % sec > ms
% corr_rho=1.0E-00; % kg/m3 > gr/cm3?
% corr_L=1.0E-03;   % mm > m
% C0lph=8.0187;
% C0vph=3.8610;

corr_dp=1.0E-00;    % Pa > Pa
corr_D=1.0E+00;     % m > m
corr_t=1.0E+00;     % sec > sec
corr_rho=1.0E-00;   % kg/m3 > kg/m3 ?
corr_L=1.0E-00;     % m > m
C0lph=9.4059;
C0vph=14.6757;

% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanja dometa tečne faze mlaza

C1lph=(rhoGas.*corr_rho).^(-0.3193);
C2lph=(D_Nozzle.*corr_D).^(+0.5607);
C3lph=(timeInj.*corr_t).^(+0.4624);
C4lph=((p_Rail-p_Gas).*corr_dp).^(+0.2120);
C5lph=(294./T_Gas).^(+0.6934);

[L_SprayTipLiquid]=C0lph.*C1lph.*C2lph.*C3lph.*C4lph.*C5lph.*corr_L;

% ------------------------------------------------------------
% Izračunavanja dometa gasne faze mlaza
C1vph=(rhoGas.*corr_rho).^(-0.4033);
C2vph=(D_Nozzle.*corr_D).^(+0.6588);
C3vph=(timeInj.*corr_t).^(+0.5345);
C4vph=((p_Rail-p_Gas).*corr_dp).^(+0.2592);
C5vph=(294./T_Gas).^(+0.5388);
```

```
[L_SprayTipVapor]=C0vph.*C1vph.*C2vph.*C3vph.*C4vph.*C5vph.*corr_L;
```

6.5.14 Prodor vrha mlaza, ubrizgavanje benzina tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Tijan

Koristeći prethodno razvijene funkcije za izračunavanje prodora mlaza po modelu Tijan [54] i Hirojasu [46], napisati program za izračunavanje prodora vrha mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za uslove obrazovanja smeše tokom faze usisavanja. Pretpostaviti sledeće uslove:

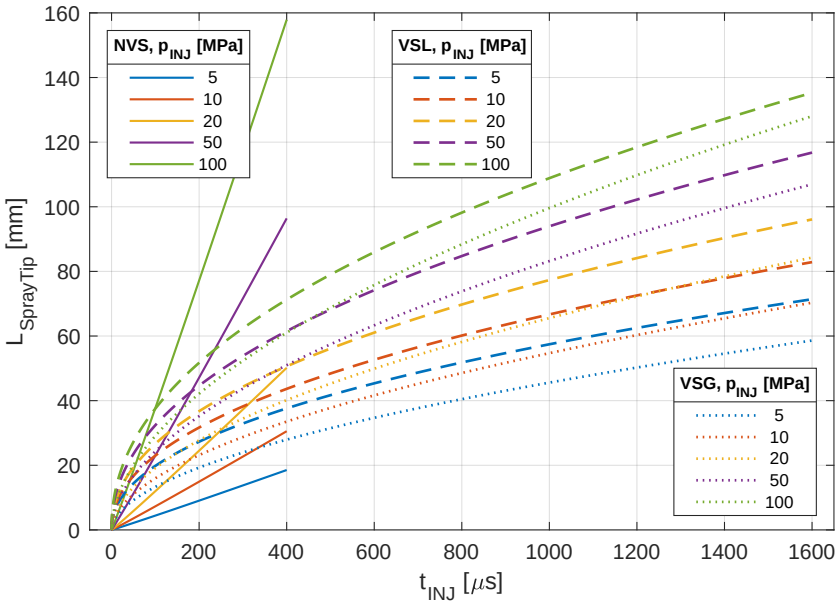
- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri atmosferskim uslovima ($p = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$, $T = 298\,\mathrm{K}$);
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 5 MPa do 100 MPa;
- Vremenski interval ograničiti na 1,6 ms.

Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru;
- Dijagram 2: prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega.

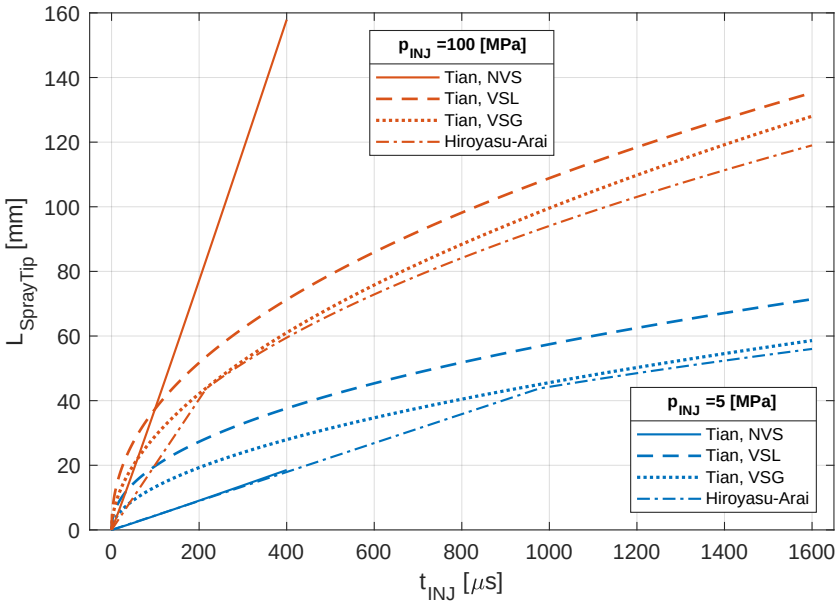
Rešenje:

Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.46 i slici 6.47.



Slika 6.46: Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru.

Model Tijan omogućava da se sagleda uticaj prisustva tečne i parne vaze na prodor vrha mlaza. Jasno se uočava da primena visokih pritisaka ubrizgavanja nije produktivna u uslovima obrazovanja smeše tokom usisavanja jer je očekivani domet mlaza, bez obzira na agregatna stanja u kojima se gorivo može naći, uporediva sa hodom klipa većine benzinskih motora. U tom slučaju može se očekivati kolizija mlaza i čela klipa i prateći fenomeni nekontrolisanog rasprskavanja goriva i deponovanja na čelu klipa i zazoru klipa i košuljice.



Slika 6.47: Prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega.

Na slici 6.47 upoređeni su rezultati proračuna modelom Tijan i modelom Hirojasu-Arai. Relativne razlike su velike u početnoj fazi isticanja, za obe granične vrednosti pritiska ubrizgavanja. Načelno, slaganje modela je dobro za uslove razvijenog stabilnog strujanja.

U nastavku prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `ProdorMlaza101.m` (6.57).

Program 6.57: `ProdorMlaza101.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja razlike pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori za
% sagorevanje za različita vremena trajanja ubrizgavanja
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
    Zhang
```

```
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje pritiska ubrizgavanja
% p_RailMin=50E+05;
% p_RailMax=1200.0E+05;
% dp_Rail=250.0E+05;
% p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
p_Rail=[50.0, 100.0, 200.0, 500.0, 1000.0].*1.0E+05;
[mpr, npr]=size(p_Rail);

% Definisanje osnovnih termodinamičkih parametara
p_Gas=1.0E+05;
T_Gas=298.0;
R_Gas=287.15;
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje vremenske baze
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=1600E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInjVS=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt ntVS]=size(timeInjVS);
timeInjNVS=timeInjMin:dtimeInj:(0.25.*timeInjMax);
[mt ntNVS]=size(timeInjNVS);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Motorni benzin EN228
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
```

```
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;

for i=1:1:npr
    [timeBreak(1,i)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
%     for j=1:1:nt
%         [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                     D_NozzleOut,timeInj(1,j),timeBreak(1,i));
%     end
%     figure(1)
%     plot(timeInj.*1.0E+06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o',...
%         'MarkerIndices',1:4:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.0,'
    MarkerIndices',1:10:nt)
%     grid on;
%     hold on;

% end

    for j=1:1:ntNVS
        [LS_TianNVS(i,j)]=...
            STP_TianNV(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjNVS(1,j));
    end
    % Izračunavanje prodora mlaza po modelu Hirojasu-Arai i po modelu Tian sa
        isparavanjem goriva
    for k=1:1:ntVS
        [LS_Hiroyasu(i,k)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
            D_NozzleOut,timeInjVS(1,k),timeBreak(1,i));
        [LS_TianVSL(i,k), LS_TianVSV(i,k)]=...
            STP_TianV(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjVS(1,k),T_Gas);
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
% Poređenje prodora mlaza za različite pritiske ubrizgavanja za model Tian
colororder('default');
figure(1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg01=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS*1.0E+03, '-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.0);
    hold on;
    grid on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg02=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL*1.0E+03, '--', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg03=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
%     plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize', 3.5,
    LineWidth=1.25);
%     grid on;
%     hold on;
    set(gca)
```

```
    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
%     yticks([0.0:25:500]);
    xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    grid on;
    LegendLabel=num2str(p_Rail'.*1.0E-06);

lgd01=legend(dg01,LegendLabel,'Location','NorthWest', 'FontSize',8);
title(lgd01,{'NVS, p_{INJ} [MPa]'});
a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

lgd02=legend(a,dg02,LegendLabel,'Location','North', 'FontSize',8);
title(lgd02,{'VSL, p_{INJ} [MPa]'});
a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

lgd03=legend(a,dg03,LegendLabel,'Location','SouthEast', 'FontSize',8);
title(lgd03,{'VSG, p_{INJ} [MPa]'});

% figure(2)
%     colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg11=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(1,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%     dg12=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(npr,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg13=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(1,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.25);
%     hold on;
%     dg14=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(npr,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.25);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg15=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(1,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
     LineWidth=1.5);
%     hold on;
%     dg16=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(npr,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.5);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg17=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(1,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%     dg18=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(npr,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%     grid on;
```

```
%
%     xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
%     ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
%     xtickformat('%.0f');
%     ytickformat('%.0f');
%     xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
% % %     yticks([0.0:25:500]);
%     xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06])
    ;
%     LegendLabel={num2str(p_Rail(1,1).*1.0E-06);num2str(p_Rail(1,npr).*1.0E-06)};
%
%     lgd1112=legend([dg11,dg12],LegendLabel,'Location','NorthWest', 'FontSize',8);
%     title(lgd1112,{'NVS, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1314=legend(a,[dg13,dg14],LegendLabel,'Location','North', 'FontSize',8);
%     title(lgd1314,{'VSL, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1516=legend(a,[dg15,dg16],LegendLabel,'Location','NorthEast', 'FontSize
    ',8);
%     title(lgd1516,{'VSG, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1718=legend(a,[dg17,dg18],LegendLabel,'Location','SouthEast', 'FontSize
    ',8);
%     title(lgd1718,{'Hiroyasu, p_{INJ} [MPa]'});

figure(3)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg11=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(1,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.0);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg13=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(1,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg15=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(1,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.5);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg17=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(1,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize', 3.5,
         LineWidth=1.0);
    hold on;

    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg12=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(npr,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.0);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg14=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(npr,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.25);
    hold on;
```

```
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg16=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(npr,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
         LineWidth=1.5);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg18=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(npr,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.0);
    hold on;
    grid on;

    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
% % %     yticks([0.0:25:500]);
    xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    LegendTitle_pMin=['p_{INJ} =',num2str(p_Rail(1,1).*1.0E-06),' [MPa]'];
    LegendTitle_pMax=['p_{INJ} =',num2str(p_Rail(1,npr).*1.0E-06),' [MPa]'];
    LegendLabel={'Tian, NVS'; 'Tian, VSL'; 'Tian, VSG';'Hiroyasu-Arai'};

    lgd1357=legend([dg11,dg13, dg15, dg17],LegendLabel,'Location','SouthEast', '
        FontSize',8);
    title(lgd1357,LegendTitle_pMin);
    a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

    lgd2468=legend(a,[dg12,dg14, dg16, dg18],LegendLabel,'Location','North', '
        FontSize',8);
    title(lgd2468,LegendTitle_pMax);
    a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

% % Grafički prikaz rezultata
% % Zavisnost prodora vrha mlaza i vremena raspada mlaza od prečnika otvora
    mlaznice
% figure(2)
% yyaxis left
%     plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip(:,nt).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 4)
%     xlabel('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
%     ytickformat('%.0f')
%     yticks([0.0:10:500]);
%     hold on;
% yyaxis right
%     plot(p_Rail.*1.0E-06,timeBreak.*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4)
%     % grid on;
%     % ax.YColor='k';
%     ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
%     ytickformat('%.0f')
%     grid on;
%     ax = gca;
%     ax.YAxis(1).Color ='k';
%     ax.YAxis(2).Color ='k';
%     LegendLabel={'L_{SprayTip}';'t_{Break-up}'};
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','East');
```

6.5.15 Prodor vrha mlaza tokom visokopritisnog dela ciklusa - modeli Tijan i Hirojasu-Arai

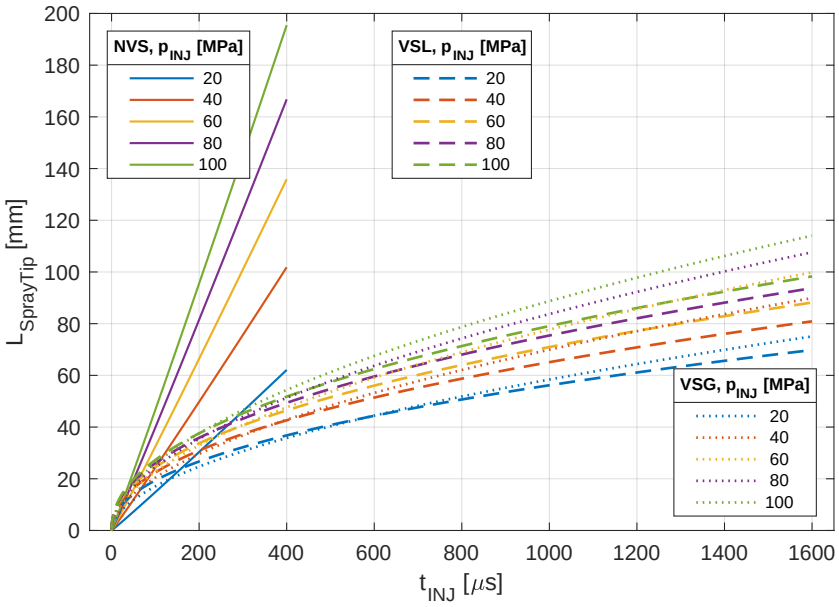
Na osnovu rešenja problema iz prethodnog primera, sprovesti istovetnu analizu i poređenje rezultata primene modela Tijan i Hirojasu-Arai za uslove obrazovanja smeše motornog benzina i vazduha u završnoj fazi sabijanja, pretpostavljajući sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri pritisku $p = 3\,\mathrm{MPa}$ i temperaturi gasa $T = 700\,\mathrm{K}$;
- Pritisak goriva u akumulatoru se kreće u opsegu od 20 MPa do 100 MPa;
- Vremenski interval ubrizgavanja ograničiti na 1,6 ms;

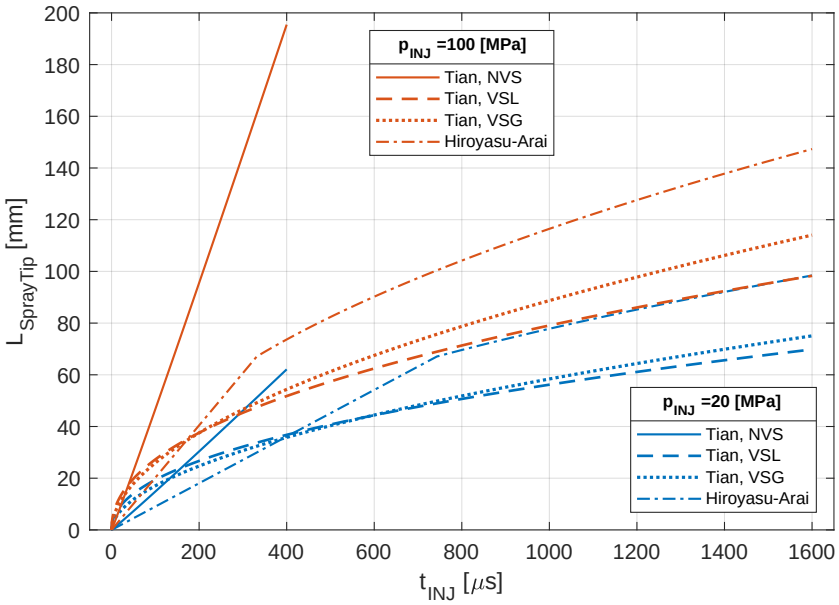
Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru;
- Dijagram 2: Prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega.

Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.48 i slici 6.48.



Slika 6.48: Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru (model Tijan).



Slika 6.49: Prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega.

U uslovima ubrizgavanja u završnoj fazi sabijanja, modeli Tijan i Hirojasu-Arai kao i kod ubrizgavanja u tokom usisavanja, imaju istovetan karakter. Međutim, treba istaći da je razlika ipak znatna i da se efekat isparavanja goriva koji se eksplicitno uzima u obzir kod modela Tijan jasno vidi u rezultatima. Evidentno niže vrednosti dometa mlaza dobijene ovim modelom potiču od korekcije za efekat isparavanja.

U nastavku, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjene vrednosti vremena primarnog raspada `ProdorMlaza102.m` (6.58).

Program 6.58: `ProdorMlaza102.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti prodora vrha mlaza
%
% Prikaz uticaja razlike pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori za
% sagorevanje za različita vremena trajanja ubrizgavanja
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu u atmosferskim uslovima)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Teorijska podloga:
% Hiroyasu H, Arai M:
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
% SAE-paper 900475

% Jiangping Tian, Ming Zhao, Wuqiang Long, Keiya Nishida, Tatsuya Fujikawa, Wu
```

```
    Zhang
% Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection
% pressure for DISI engines
% Fuel 186 (2016) 365-374

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)

% timeBreak  [s]         vreme od početka ubrizgavanja do pojave raspada mlaza
% L_SprayTip [m]         rastojanje od mlaznice do vrha mlaza, prodor vrha mlaza

clear all;
close all;
clc;

% Definisanje pritiska ubrizgavanja
% p_RailMin=50E+05;
% p_RailMax=1200.0E+05;
% dp_Rail=250.0E+05;
% p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
p_Rail=[200.0, 400.0, 600.0, 800.0, 1000.0].*1.0E+05;
[mpr, npr]=size(p_Rail);

% Definisanje osnovnih termodinamičkih parametara
p_Gas=1.0E+05;
T_Gas=700.0;
R_Gas=287.15;
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje vremenske baze
timeInjMin=0.0;
timeInjMax=1600E-06;
dtimeInj=1E-06;
timeInjVS=timeInjMin:dtimeInj:timeInjMax;
[mt ntVS]=size(timeInjVS);
timeInjNVS=timeInjMin:dtimeInj:(0.25.*timeInjMax);
[mt ntNVS]=size(timeInjNVS);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Motorni benzin EN228
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;
```

```
% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=ND.dOut;

for i=1:1:npr
    [timeBreak(1,i)]=SBT_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,D_NozzleOut);
%     for j=1:1:nt
%         [L_SprayTip(i,j)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
%                                     D_NozzleOut,timeInj(1,j),timeBreak(1,i));
%     end
%     figure(1)
%     plot(timeInj.*1.0E+06,L_SprayTip(i,:).*1.0E+03, '-o',...
%         'MarkerIndices',1:4:length(L_SprayTip(i,:)),'MarkerSize', 3.0,'
    MarkerIndices',1:10:nt)
%     grid on;
%     hold on;

% end

    for j=1:1:ntNVS
        [LS_TianNVS(i,j)]=...
            STP_TianNV(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjNVS(1,j));
    end
    % Izračunavanje prodora mlaza po modelu Hirojasu-Arai i po modelu Tian sa
        isparavanjem goriva
    for k=1:1:ntVS
        [LS_Hiroyasu(i,k)]=STP_Hiroyasu(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoFuel,rhoGas,...
            D_NozzleOut,timeInjVS(1,k),timeBreak(1,i));
        [LS_TianVSL(i,k), LS_TianVSV(i,k)]=...
            STP_TianV(p_Rail(1,i),p_Gas,rhoGas,D_NozzleOut,timeInjVS(1,k),T_Gas);
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
% Poređenje prodora mlaza za različite pritiske ubrizgavanja za model Tian
colororder('default');
figure(1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg01=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS*1.0E+03, '-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.0);
    hold on;
    grid on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg02=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL*1.0E+03, '--', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg03=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
%     plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize', 3.5,
    LineWidth=1.25);
%     grid on;
%     hold on;
```

```
    set(gca)
    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
%     yticks([0.0:25:500]);
    xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    grid on;
    LegendLabel=num2str(p_Rail'.*1.0E-06);

lgd01=legend(dg01,LegendLabel,'Location','NorthWest', 'FontSize',8);
title(lgd01,{'NVS, p_{INJ} [MPa]'});
a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

lgd02=legend(a,dg02,LegendLabel,'Location','North', 'FontSize',8);
title(lgd02,{'VSL, p_{INJ} [MPa]'});
a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

lgd03=legend(a,dg03,LegendLabel,'Location','SouthEast', 'FontSize',8);
title(lgd03,{'VSG, p_{INJ} [MPa]'});

% figure(2)
%     colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg11=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(1,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%     dg12=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(npr,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg13=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(1,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.25);
%     hold on;
%     dg14=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(npr,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.25);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg15=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(1,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
     LineWidth=1.5);
%     hold on;
%     dg16=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(npr,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.5);
%     hold on;
%
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     dg17=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(1,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
%     dg18=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(npr,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
    3.5, LineWidth=1.0);
%     hold on;
```

```
%     grid on;
%
%     xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
%     ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
%     xtickformat('%.0f');
%     ytickformat('%.0f');
%     xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
% % %     yticks([0.0:25:500]);
%     xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06])
    ;
%     LegendLabel={num2str(p_Rail(1,1).*1.0E-06);num2str(p_Rail(1,npr).*1.0E-06)};
%
%     lgd1112=legend([dg11,dg12],LegendLabel,'Location','NorthWest', 'FontSize',8);
%     title(lgd1112,{'NVS, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1314=legend(a,[dg13,dg14],LegendLabel,'Location','North', 'FontSize',8);
%     title(lgd1314,{'VSL, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1516=legend(a,[dg15,dg16],LegendLabel,'Location','NorthEast', 'FontSize
    ',8);
%     title(lgd1516,{'VSG, p_{INJ} [MPa]'});
%     a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
%
%     lgd1718=legend(a,[dg17,dg18],LegendLabel,'Location','SouthEast', 'FontSize
    ',8);
%     title(lgd1718,{'Hiroyasu, p_{INJ} [MPa]'});

figure(3)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg11=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(1,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.0);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg13=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(1,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.25);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg15=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(1,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1.5);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    dg17=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(1,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize', 3.5,
         LineWidth=1.0);
    hold on;

    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg12=plot(timeInjNVS.*1.0E+06,LS_TianNVS(npr,:)*1.0E+03, '-', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.0);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg14=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSL(npr,:)*1.0E+03, '--', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.25);
```

```
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg16=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_TianVSV(npr,:)*1.0E+03, ':', 'MarkerSize', 3.5,
         LineWidth=1.5);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    dg18=plot(timeInjVS.*1.0E+06,LS_Hiroyasu(npr,:)*1.0E+03, '-.', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=1.0);
    hold on;
    grid on;

    xlabel ('t_{INJ} [\mus]');
    ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    xticks([0.0:(dtimeInj.*200E+06):(timeInjMax.*1.0E+06)]);
% % %     yticks([0.0:25:500]);
    xlim([(timeInjMin-50.*dtimeInj).*1.0E+06,(timeInjMax+50.*dtimeInj).*1.0E+06]);
    LegendTitle_pMin=['p_{INJ} =',num2str(p_Rail(1,1).*1.0E-06),' [MPa]'];
    LegendTitle_pMax=['p_{INJ} =',num2str(p_Rail(1,npr).*1.0E-06),' [MPa]'];
    LegendLabel={'Tian, NVS'; 'Tian, VSL'; 'Tian, VSG';'Hiroyasu-Arai'};

    lgd1357=legend([dg11,dg13, dg15, dg17],LegendLabel,'Location','SouthEast', '
        FontSize',8);
    title(lgd1357,LegendTitle_pMin);
    a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

    lgd2468=legend(a,[dg12,dg14, dg16, dg18],LegendLabel,'Location','North', '
        FontSize',8);
    title(lgd2468,LegendTitle_pMax);
    a=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');

% % Grafički prikaz rezultata
% % Zavisnost prodora vrha mlaza i vremena raspada mlaza od prečnika otvora
    mlaznice
% figure(2)
% yyaxis left
%     plot(p_Rail.*1.0E-06,L_SprayTip(:,nt).*1.0E+03,'-o','MarkerSize', 4)
%     xlabel('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('L_{SprayTip} [mm]');
%     ytickformat('%.0f')
%     yticks([0.0:10:500]);
%     hold on;
% yyaxis right
%     plot(p_Rail.*1.0E-06,timeBreak.*1.0E+06,'-.square','MarkerSize', 4)
%     % grid on;
%     % ax.YColor='k';
%     ylabel('t_{Break-up} [\mus]');
%     ytickformat('%.0f')
%     grid on;
%     ax = gca;
%     ax.YAxis(1).Color ='k';
%     ax.YAxis(2).Color ='k';
%     LegendLabel={'L_{SprayTip}';'t_{Break-up}'};
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','East');
```

6.6 Ugao konusa mlaza

Ugao konusa mlaza jedan je od ključnih geometrijskih parametara mlaza goriva. Značaj ovog parametra nije ništa manji od značaja npr. prodora vrha ili jezgra mlaza. Zajedno sa prodorom vrha mlaza, ugao konusa mlaza definiše zapreminu prostora koji mlaz zauzima, a odatle i zapreminu u kojoj se gorivo distribuira. Logičan zaključak koji se nameće jeste da, ako je cilj dobra prostorna raspodela goriva kao preduslov dobre homogenizacije smeše, ugao konusa mlaza treba da bude što veći. Primeri koji slede treba da pokažu na koji način pojedini geometrijski i termodinamički parametri utiču na vrednost ugla konusa mlaza.

6.6.1 Uporedni prikaz modela Hirojasua, Araija i Zame

Napisati funkcije za izračunavanje ugla konusa mlaza dizel-goriva po modelu Hirojasu-Arai [55, 56], modifikovanom modelu za visokopritisne sisteme ubrizgavanja Hirojasu-Arai-Zama [57, 58, 56, 59], a zatim i funkciju za izračunavanje ugla konusa razvijenog mlaza po modelu Hirojasu-Arai [46], i koristeći navedene modele sprovesti proračun ugla konusa mlaza za uslove obrazovanja smeše u širem opsegu pritisaka gasa u komori, polazeći od sledećih uslova:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu koja je pri pritisku od 0,5 MPa do 4,5 MPa;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 10 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $150 \cdot 10^{-6}$ m;
- Prečnik komore iglice: $1 \cdot 10^{-3}$ m;
- Odnos dužine i prečnika mlaznice je 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Pretpostaviti izentropsku promenu stanja u cilindru (zanemariti prenos toplote i realni sastav gasa). Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Rešenje

Empirijski modeli Hirojasua i Araija [55, 46] koji opisuju makro-karakteristike mlaza goriva, u koje se ubrajaju i verzije drugih autora koje su nastale modifikacijom osnovnih izraza, bilo za potrebe specifičnih uslova rada ili za specifične uslove eksperimenta na kome su modeli verifikovani, spadaju u najčešće primenjene modele iz ove oblasti u literaturi. Na ovom primeru biće prikazane razlike u rezultatima proračuna za iste uslove obrazovanja smeše, ali modelima koji su verifikovani u različitim uslovima osnovnih eksperimenata.

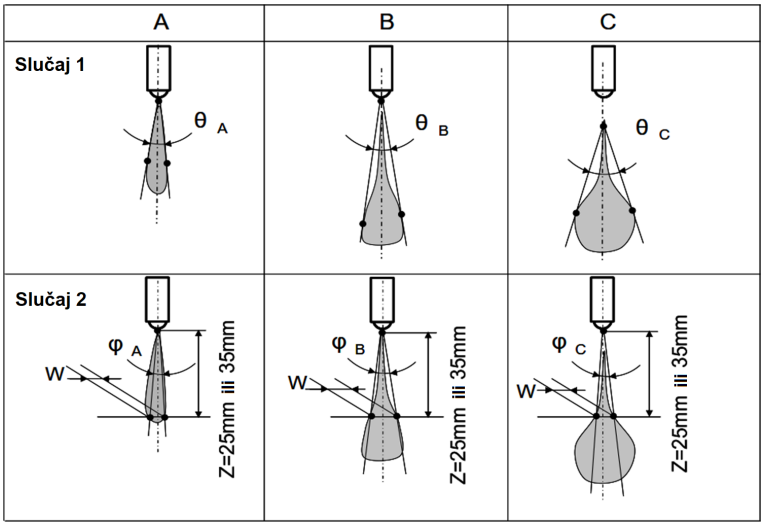
Različiti aspekti načina određivanja ugla konusa mlaza prikazani su u radovima Zame [57] i Araija [56], a grafički su interpretirani na slici 6.50. Prikazi u kolonama A, B i C odgovaraju početnoj fazi ubrizgavanja, uslovima stabilnog isticanja i uslovima zatvaranja brizgača, respektivno. Slučaj 1 odgovara eksperimentu u kome se ugao konusa mlaza određuje na osnovu maksimalne širine mlaza uočene na datom prikazu (snimku), bez obzira na kom aksijalnom rastojanju od mlaznice je ta širina mlaza određena. U slučaju 2, ugao konusa se određuje na osnovu širine mlaza na unapred definisanom rastojanju od mlaznice brizgača Z (u slučaju modela Zama [57, 56] ta vrednost je 25 mm i 35 mm).

Slučaj 1:

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{W}{Z}\right) \\ W &= W_{max} \\ Z &= var. \end{aligned} \tag{6.71}$$

Slučaj 2:

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1}\left(\frac{W}{Z}\right) \\ W &= W_{max}@Z \\ Z &= const.\,(25:35\,mm) \end{aligned} \tag{6.72}$$



Slika 6.50: Grafička interpretacija načina određivanja ugla konusa mlaza.

Osnovni model za izračunavanje ugla konusa mlaza Hirojasua i Araija [55, 56] odnosi se na uslove eksperimenta koji odgovaraju kratkom intervalu otvaranja brizgača i pritiscima ubrizgavanja do 15 MPa. Pretpostavka je da je model postavljen na

osnovu analize fotografija dobijene u završnoj fazi ubrizgavanja kojoj odgovara veći ugao konusa mlaza i da je identifikacija parametara modela sprovedena za maksimalne vrednosti konusa, bez obzira na rastojanje od mlaznice brizgača (slučaj 1-C).

Model je prikazan sledećim jednostavnim izrazom:

$$\theta = 0{,}05 \cdot \left[\frac{\rho_g \cdot (p_{inj} \cdot p_G) \cdot D_N^2}{\mu_F^2}\right]^{0{,}25} \tag{6.73}$$

Veličine su definisane na sledeći način:

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

μ_F [Pa/s] Dinamička viskoznost goriva;

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

p_{INJ} [s] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [s] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata sa visokopritisnim akumulatorskim sistemima ubrizgavanja na pritiscima od 90 MPa i 150 MPa, analizirajući radijalnu meru mlaza na diskretnom rastojanju od mlaznice (25 mm ili 35 mm) za slučaj razvijenog strujanja (slučaj 2-B), Zama [57, 58, 56, 59] je došao do zaključka da model Hirojasua i Araija daje precenjene vrednosti, ali da osnovna struktura modela i međusobne zavisnosti uticajnih činilaca koje je teorijski postavio Vakuri [47], ostaju nepromenjeni, i da se samo izmenom koeficijenta može dobiti bolje slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Za drugačije intervale ubrizgavanja i za visoke pritiske karakteristične za akumulatorske sisteme ubrizgavanja, Zama je postavio sledeći model:

$$\theta = 0{,}017 \cdot \left[\frac{\rho_g \cdot (p_{inj} \cdot p_G) \cdot D_N^2}{\mu_F^2}\right]^{0{,}25} \tag{6.74}$$

Hirojasu i Arai su takođe dali empirijski model koji omogućava proračun ugla konusa razvijenog mlaza, tj. mlaza sa kontinualnim stabilnim isticanjem iz mlaznice koji uključuje dodatne geometrijske karakteristike mlaznice. Ovaj model bi trebalo da se odnosi na uslove isticanja prikazane za slučajeve 1-B i 2-B. Model je prikazan na sledeći način:

$$\theta = 83{,}5 \cdot \left[\frac{L_N}{D_N}\right]^{-0{,}22} \cdot \left[\frac{D_N}{D_{NS}}\right]^{+0{,}15} \cdot \left[\frac{\rho_G}{\rho_F}\right]^{+0{,}26} \tag{6.75}$$

Gde su veličine definisane na sledeći način:

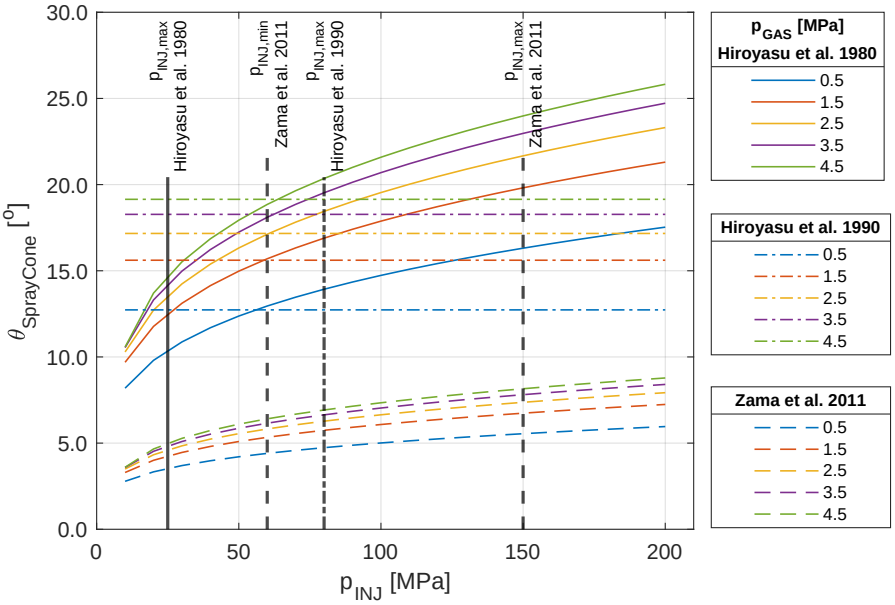
L_N [m] Dužina kanala mlaznice brizgača;

D_{NS} [m] Prečnik komore iglice brizgača;

ρ_F [kg/m³] Gustina goriva.

Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.51.

Eksperiment Hirojasua i Araija sa potpuno razvijenim mlazom i neprekinutim isticanjem pokazuje da u slučaju razvijenog mlaza, pritisak do 15 MPa ne utiče na ugao konusa mlaza i u tom smislu, solidno slaganje rezultata postoji sa osnovnim modelom Hirojasua i Araija u opsegu do 20 MPa. Za više pritiske ubrizgavanja (iznad 40 MPa) ovaj model nije verifikovan, pa ekstrapolaciju u oblastima viših pritisaka treba prihvatiti sa rezervom. Međutim, primena visokih pritisaka ubrizgavanja, u opsegu od 60 MPa do 150 MPa koji je primenjen u radovima Zame, pokazuje da pritisak ima uticaj na kontrakciju mlaza i taj efekat se jasno uočava kroz razliku u rezultatima proračuna.



Slika 6.51: Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora.

U nastavku, kao reprezentativni primer, prikazan je glavni program za izračunavanje procenjenih vrednosti konusa mlaza `UgaoKonusaMlaza_01.m` (6.59). Takođe, prikazane su funkcije `SCA_Hiroyasu1980.m` (6.60), `SCA_Zama2011.m` (6.61) i `SCA_Hiroyasu1990.m` (6.62).

Program 6.59: `UgaoKonusaMlaza_01.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori za sagorevanje
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
% (opseg pritisaka tokom sabijanja 5...45 bar)
% Pretpostavke:
% Temperatura gasa se izračunava za izentropsku promenu stanja
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
%
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj    [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;

clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=100E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=5.0E+05;
p_GasMax=45.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_GasMin=300.0;

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
```

```
R_Gas=287.15;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
rhoFuel=FP.rho;

% Podaci o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleOut=150.0E-06;      % [m]
D_NozzleIn=150.0E-06;       % [m]
r0_Nozzle=10.0E-06;         % [m]
L_Nozzle=4.0.*D_NozzleOut; % [m]
D_NozzleSAC=1.0E-03;        % [m]

for i=1:1:n_pGas
    for j=1:1:n_pRail
% Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
        T_Gas(i,j)=T_GasMin.*(p_Gas(1,i)./p_GasMin).^((n-1)./n);
% Izračunavanje gustine gasa u komori
        rhoGas(i,j)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(i,j));

% Dinamička viskoznost vazduha u Pa*s
        muGas=0.000041522;
        [thetaHiroyasu1980(i,j)]=SCA_Hiroyasu1980(D_NozzleOut,rhoGas(i,j),p_Rail(1,
            j),p_Gas(1,i),muGas);
        [thetaZama2011(i,j)]=SCA_Zama2011(D_NozzleOut,rhoGas(i,j),p_Rail(1,j),p_Gas
            (1,i),muGas);
        [thetaHiroyasu1990(i,j)]=SCA_Hiroyasu1990(L_Nozzle,D_NozzleOut,D_NozzleSAC,
            rhoGas(i,j),rhoFuel);
    end
end

% Definisanje opsega pritiska goriva u akumulatoru za za koje su pojedini
% modeli verifikovani
p_Rail_Hiroyasu1980Max=25.0;     % MPa;
p_Rail_Zama2011Min=60.0;         % MPa;
p_Rail_Zama2011Max=150.0;        % MPa;
p_Rail_Hiroyasu1990Min=20;       % MPa;
p_Rail_Hiroyasu1990Max=80.0;     % MPa;

% Grafički prikaz rezultata
figure (1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p1=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaHiroyasu1980(:,:),'-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p2=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaZama2011(:,:),'--', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p3=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaHiroyasu1990(:,:),'-.', 'MarkerSize', 3.5,
```

```
        LineWidth=0.75);
        hold on;
        grid on;
% Prikaz graničnih vrednosti pritiska ubrizgavanja za pojedine modele
x1=xline(p_Rail_Hiroyasu1980Max,'-k',{'p_{INJ,max}','Hiroyasu et al. 1980'});
    x1.LineWidth=1.5;
    x1.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x1.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x1.FontSize=8;
    hold on;
x2=xline(p_Rail_Hiroyasu1990Max,'-.k',{'p_{INJ,max}','Hiroyasu et al. 1990'});
    x2.LineWidth=1.5;
    x2.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x2.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x2.FontSize=8;
    hold on;
x3=xline(p_Rail_Zama2011Min,'--k',{'p_{INJ,min}','Zama et al. 2011'});
    x3.LineWidth=1.5;
    x3.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x3.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x3.FontSize=8;
    hold on;
x4=xline(p_Rail_Zama2011Max,'--k',{'p_{INJ,max}','Zama et al. 2011'});
    x4.LineWidth=1.5;
    x4.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x4.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x4.FontSize=8;
    hold on;

xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.1f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);

% Prikaz legende
LegendTitle_Hiroyasu1980={'p_{GAS} [MPa]'; 'Hiroyasu et al. 1980'};
LegendTitle_Zama2011={'Zama et al. 2011'};
LegendTitle_Hiroyasu1990={'Hiroyasu et al. 1990'};
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.1f');
% Prikaz legende za model Hiroyasu et al. 1980
lgd_p1=legend([p1],LegendLabel,'Location','NorthEastOutSide','FontSize',8);
% [0.73,0.67,0.2,0.2]
title(lgd_p1,LegendTitle_Hiroyasu1980);
a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Zama et al. 2011
lgd_p2=legend(a2,[p2],LegendLabel,'Position',[0.738 0.13 0.2 0.2],'FontSize',8);
title(lgd_p2,LegendTitle_Zama2011);
a3=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Hiroyasu et al. 1990
lgd_p3=legend(a3,[p3],LegendLabel,'Position',[0.738 0.4 0.2 0.2],'FontSize',8);
title(lgd_p3,LegendTitle_Hiroyasu1990);
```

Program 6.60: `SCA_Hiroyasu1980.m`

```
function [theta]=SCA_Hiroyasu1980(D_Nozzle,rhoGas,p_Rail,p_Gas,muGas)
% Funkcija za izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu
% Hiroyasu & Arai 1980
% ------------------------------------------------------------
% S. J. Popović
% 202404.v01
%
% Ref.
% Osnovna referenca:
% H.Hiroyasu, and M.Arai,
% Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines,
% Trans. JSAE, Vol.21, 5-11, 1980.

% Y.Zama, W.Ochiai, T.Furuhata and M.Arai,
% Study on Behaviour of Diesel Spray under High Ambient Density Condition,
% Proceedings of ILASS-Asia 2011, Taiwan, Oct. 275-282, 2011.

% Yoshio Zama,* Wataru Ochiai, Tomohiko Furuhata, & Masataka Arai
% EXPERIMENTAL STUDY ON SPRAY ANGLE AND VELOCITY DISTRIBUTION OF DIESEL SPRAY UNDER
% HIGH AMBIENT PRESSURE CONDITIONS
% Atomization and Sprays, 21 (12): 989-1007 (2011)

% Masataka Arai:
% Physics behind Diesel Sprays
% ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and
    Spray Systems,
% Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012

% Ibrahim Najar, Benjamin Stengel, Fabian Pinkert, Bert Buchholz, Egon Hassel
% Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry
% ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-4
    September 2019, Paris, France

corr_p=1.0E-00;   % Pa > Pa
corr_D=1.0E+00;   % m > m
% corr_t=1.0E+00;   % sec > sec
corr_rho=1.0E-00; % kg/m3 > kg/m3
corr_mu=1.0E-00;  % Pa*s > Pa*s
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje razlike pritiska na mlaznici
dp=p_Rail-p_Gas;
H1=(corr_rho.*rhoGas);
H2=(corr_p.*dp);
H3=((corr_D.*D_Nozzle).^2.0);
H4=((corr_mu.*muGas).^2.0);
theta=0.05.*(H1.*H2.*H3./H4).^(+0.25);
```

Program 6.61: SCA_Zama2011.m

```
function [theta]=SCA_Zama2011(D_Nozzle,rhoGas,p_Rail,p_Gas,muGas)
% Funkcija za izračunavanje ugla konusa mlaza po modifikovanom modelu
% Hiroyasu & Arai 1980
% izmena modela: Zama et al. 2011
% ------------------------------------------------------------
% S. J. Popović
% 202404.v01
%
% Ref.
% Osnovna referenca:
% H.Hiroyasu, and M.Arai,
% Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines,
% Trans. JSAE, Vol.21, 5-11, 1980.

% Y.Zama, W.Ochiai, T.Furuhata and M.Arai,
% Study on Behaviour of Diesel Spray under High Ambient Density Condition,
% Proceedings of ILASS-Asia 2011, Taiwan, Oct. 275-282, 2011.

% Yoshio Zama,* Wataru Ochiai, Tomohiko Furuhata, & Masataka Arai
% EXPERIMENTAL STUDY ON SPRAY ANGLE AND VELOCITY DISTRIBUTION OF DIESEL SPRAY UNDER
% HIGH AMBIENT PRESSURE CONDITIONS
% Atomization and Sprays, 21 (12): 989-1007 (2011)

% Masataka Arai:
% Physics behind Diesel Sprays
% ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and
    Spray Systems,
% Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012

% Ibrahim Najar, Benjamin Stengel, Fabian Pinkert, Bert Buchholz, Egon Hassel
% Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry
% ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-4
    September 2019, Paris, France

corr_p=1.0E-00;   % Pa > Pa
corr_D=1.0E+00;   % m > m
% corr_t=1.0E+00;   % sec > sec
corr_rho=1.0E-00; % kg/m3 > kg/m3
corr_mu=1.0E-00;  % Pa*s > Pa*s
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje razlike pritiska na mlaznici
dp=p_Rail-p_Gas;
H1=(corr_rho.*rhoGas);
H2=(corr_p.*dp);
H3=((corr_D.*D_Nozzle).^2.0);
H4=((corr_mu.*muGas).^2.0);
theta=0.017.*(H1.*H2.*H3./H4).^(+0.25);
```

Program 6.62: `SCA_Hiroyasu1990.m`

```
function [theta]=SCA_Hiroyasu1990(L_Nozzle,D_Nozzle,D_SAC,rhoGas,rhoFuel)
% Funkcija za izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu
% Hiroyasu & Arai 1980
% ------------------------------------------------------------
% S. J. Popović
% 202404.v01
%
% Ref.
% Osnovna referenca:
    % Hiroyasu H, Arai M:
    % Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines,
    % SAE-paper 900475

% Ibrahim Najar, Benjamin Stengel, Fabian Pinkert, Bert Buchholz, Egon Hassel
% Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry
% ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-4
    September 2019, Paris, France

% corr_p=1.0E-00;   % Pa > Pa
corr_DN=1.0E+00;    % m > m
corr_DS=1.0E+00;    % m > m
corr_L=1.0E+00;    % m > m
% corr_t=1.0E+00;   % sec > sec
corr_rho=1.0E-00; % kg/m3 > kg/m3
% corr_mu=1.0E-00;  % Pa*s > Pa*s
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje razlike pritiska na mlaznici
% dp=p_Rail-p_Gas;
    H1=((corr_L.*L_Nozzle)./(corr_DN.*D_Nozzle)).^(-0.22);
    H2=((corr_DN.*D_Nozzle)./(corr_DS.*D_SAC)).^(+0.15);
    H3=(rhoGas./rhoFuel).^(+0.26);
    theta=83.5.*H1.*H2.*H3;
```

6.6.2 Poređenje modela Hirojasua, Zame i Varde

Sprovesti uporedni proračun za ugao konusa mlaza koristeći modele Hirojasua [55], Zame [57, 56] i Varde [60] za slučaj obrazovanja smeše u završnoj fazi sabijanja, pretpostavljajući sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri $p = 5\,\mathrm{MPa}$ i $T = 900\,\mathrm{K}$;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 10 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $150 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$;
- Odnos dužine i prečnika mlaznice 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja.

Rešenje

Model Varde predstavlja jedan od prvih eksperimentalno verifikovanih načina za proračun ugla konusa mlaza u širokom opsegu pritisaka ubrizgavanja, uključujući i pritiske iznad 100 MPa koji se koriste u savremenim visokopritisnim sistemima za obrazovanje smeše. Model Varde potvrđen je na širokim opsezima ključnih parametara koji utiču na ugao konusa mlaza: pritiska ubrizgavanja (40 MPa do 130 MPa), pritisaka gasa u komori (2 $^{kg}/_{m^3}$ do 40 $^{kg}/_{m^3}$), prečnika mlaznice (0,18 mm do 0,53 mm) i odnosa dužine i prečnika mlaznice (2,2 do 10,8). Zbog toga je interesantno proveriti njegovo slaganje sa rezultatima drugih modela koji su potvrđeni na ograničenim opsezima pojedinačnih parametara,

Model Varde [60] prikazan je u opštem obliku kao funkcional karakterističnih veličina za proces ubrizgavanja:

$$\tan(\theta) = f\left(D_N, \frac{L_N}{D_N}, u_{INJ}, \mu_F, \sigma_F, \rho_F, \rho_G, ...\right) \tag{6.76}$$

Grupisanjem pojedinačnih uticajnih činilaca i prelaskom na poznate bezdimenzione veličine, dobija se sledeći izraz:

$$\tan(\theta) = C_1 \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot (Re_F)^{\frac{1}{3}} \cdot (We_F)^{C_2} \tag{6.77}$$

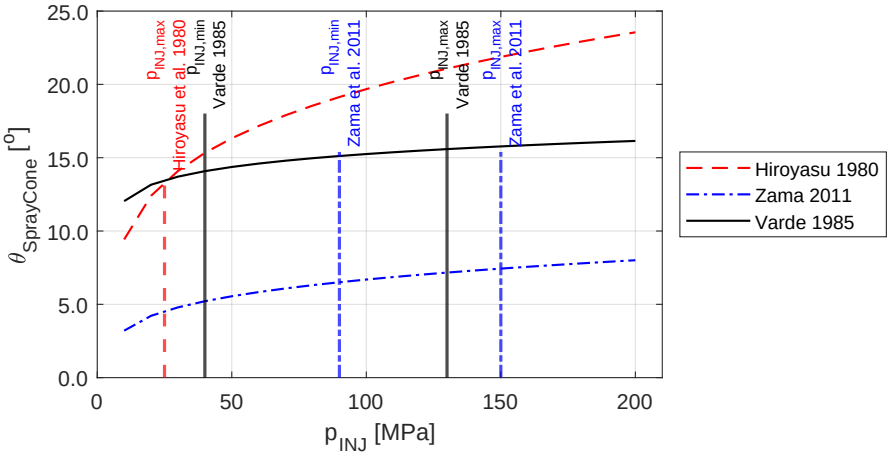
Geometrijski parametri obuhvaćeni su članovima C_1 i C_2 na sledeći način:

$$C_1 = \begin{cases} 0{,}0001 \cdot \left(\frac{L_N}{D_N}\right)^5 & \mid \frac{L_N}{D_N} < 6 \\ 0{,}7 & \mid \frac{L_N}{D_N} > 6 \end{cases} \tag{6.78}$$

$$C_2 = \frac{3 - \frac{L_N}{D_N}}{3 \cdot \frac{L_N}{D_N}} \tag{6.79}$$

U nastavku prikazan je sadržaj funkcije za izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu Varde, a rezultati proračuna prikazani su na slici 6.52.

Model Varde očigledno daje vrednosti koje se nalaze između onih dobijenih modelom Hirojasu i Arai [55] i modelom Zama [57, 56]. Ako se rezultati porede sa onim dobijenim modelom Hirojasua i Araija [46] (videti prethodni primer) koji su dobijeni za uslove neprekinutog razvijenog istrujavanja iz mlaznice, može se zaključiti da je slaganje dobro, uz napomenu da model Varde uključuje i uticaje pritiska ubrizgavanja, viskoznosti i površinskog napona goriva, što omogućuje širu primenu.



Slika 6.52: Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora.

Program 6.63: `UgaoKonusaMlaza_02.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i pritiska u komori za sagorevanje
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
%
% Pretpostavke:
% Temperatura gasa se izračunava za izentropsku promenu stanja
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
% Poređenje rezultata modela Hiroyasu et. al (1980), Zama et al. (2011) i Varde
    (1985)
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev
% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail      [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas       [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas       [K]         temperatura gasa
% R_Gas       [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas      [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel     [kg/m3]     gustina goriva
% timeInj     [s]         vreme trajanja ubrizgavanja
% D_Nozzle    [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP          []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND          []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;

clear;
close all;
clc;
```

```
% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=100E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% Promeniti granice za proračun na širem opsegu
p_GasMin=50.0E+05;
p_GasMax=50.0E+05;
dp_Gas=10.0E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_Gas=900.0;

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelSI]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
% muFuelSI=niFuelSI.*rhoFuel;

% Podaci o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleOut=150.0E-06;      % [m]
D_NozzleIn=150.0E-06;       % [m]
r0_Nozzle=10.0E-06;         % [m]
L_Nozzle=4.0.*D_NozzleOut; % [m]
D_NozzleSAC=1.0E-03;        % [m]

for i=1:1:n_pGas
% Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
% izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
% Izračunavanje gustine gasa u komori
    rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas);
    for j=1:1:n_pRail
```

```
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,...
                                L_Nozzle,D_NozzleOut);
% Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut,u(i,j),niFuelSI,0.0);
% Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut,u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
% Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
%         [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut,u(i,j),rhoGas(i,j),sigmaFuel);
% Izračunavanje Onezorgeovog broja
%         [OhNum(i,j)]=dlqOhnesorge(ReNumLiquid(i,j), WeNumLiquid(i,j));
%-------------------------------------------------------------
% Dinamička viskoznost vazduha u Pa*s
        muGas=0.000041522;
        [thetaHiroyasu1980(i,j)]=SCA_Hiroyasu1980(D_NozzleOut,rhoGas(1,i),p_Rail(1,
            j),p_Gas(1,i),muGas);
        [thetaZama2011(i,j)]=SCA_Zama2011(D_NozzleOut,rhoGas(1,i),p_Rail(1,j),p_Gas
            (1,i),muGas);
%         [thetaHiroyasu1990(i,j)]=SCA_Hiroyasu1990(L_Nozzle,D_NozzleOut,
    D_NozzleSAC,rhoGas(1,i),rhoFuel);
        [thetaVarde(i,j)]=SCA_Varde(L_Nozzle,D_NozzleOut,rhoGas(1,i),rhoFuel,...
                                    ReNumLiquid(i,j),WeNumLiquid(i,j),0.0);
    end
end

% Definisanje opsega pritiska goriva u akumulatoru za za koje su pojedini
% modeli verifikovani
p_Rail_Hiroyasu1980Max=25.0;     % MPa;
p_Rail_Zama2011Min=90.0;         % MPa;
p_Rail_Zama2011Max=150.0;        % MPa;

p_Rail_VardeMin=40.0;         % MPa;
p_Rail_VardeMax=130.0;        % MPa;

% Grafički prikaz rezultata
figure (1)
%     colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p1=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaHiroyasu1980(:,:),'--r', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',2)
    p2=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaZama2011(:,:),'-.b', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=1);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',3)
    p3=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaVarde(:,:),'-k', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =1);
        hold on;
        grid on;
% Prikaz graničnih vrednosti pritiska ubrizgavanja za pojedine modele
x1=xline(p_Rail_Hiroyasu1980Max,'--r',{'p_{INJ,max}','Hiroyasu et al. 1980'});
    x1.LineWidth=1.5;
    x1.LabelVerticalAlignment = 'top';
```

```
    x1.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x1.FontSize=8;
    hold on;
% x2=xline(p_Rail_Hiroyasu1990Max,'-.k',{'p_{INJ,max}','Hiroyasu et al. 1990'});
%     x2.LineWidth=1.5;
%     x2.LabelVerticalAlignment = 'top';
%     x2.LabelHorizontalAlignment = 'center';
%     x2.FontSize=8;
%     hold on;
x3=xline(p_Rail_Zama2011Min,'-.b',{'p_{INJ,min}','Zama et al. 2011'});
    x3.LineWidth=1.5;
    x3.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x3.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x3.FontSize=8;
    hold on;
x4=xline(p_Rail_Zama2011Max,'-.b',{'p_{INJ,max}','Zama et al. 2011'});
    x4.LineWidth=1.5;
    x4.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x4.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x4.FontSize=8;
    hold on;


x5=xline(p_Rail_VardeMin,'-k',{'p_{INJ,min}','Varde 1985'});
    x5.LineWidth=1.5;
    x5.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x5.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x5.FontSize=8;
    hold on;
x6=xline(p_Rail_VardeMax,'-k',{'p_{INJ,max}','Varde 1985'});
    x6.LineWidth=1.5;
    x6.LabelVerticalAlignment = 'top';
    x6.LabelHorizontalAlignment = 'center';
    x6.FontSize=8;
    hold on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
xtickformat('%.0f')
ytickformat('%.1f')
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);

leg = legend([p1 p2 p3],...
     {'Hiroyasu 1980',...
     'Zama 2011',...
     'Varde 1985'},...
     'Location','EastOutside')
```

Program 6.64: `SCA_Varde.m`

```
function [theta]=SCA_Varde(L_Nozzle,D_Nozzle,rhoGas,rhoFuel,ReNumLiquid,WeNumLiquid
    ,par)
% Funkcija za izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu Varde
% ------------------------------------------------------------
```

```
% K. S. Varde
% Spray cone angle and its correlation in a high pressure fuel spray
% The Canadian Journal of Chemical Engineering, 63(2), 183-187. doi:10.1002/cjce
    .5450630202

% Ibrahim Najar, Benjamin Stengel, Fabian Pinkert, Bert Buchholz, Egon Hassel
% Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry
% ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-4
    September 2019, Paris, France

% L_Nozzle          [m] ......... dužina kanala mlaznice
% D_Nozzle          [m] ......... prečnik izlaznog otvora mlaznice

% rhoGas            [kg/m3] ..... gustina gasa u komori
% rhoFuel           [kg/m3] ..... gustina goriva
% ReNumLiquid       [-] ......... Rejnoldsov broj za gorivo
% WeNumLiquid       [-] ......... Veberov broj za gorivo
% par               [-] ......... geometrijskog člana C1
%                                 =0.0 - izračunava se na osnovu geom. podataka za
    mlaznicu
%                                 >0.0 - uzima se zadata vrednost
% theta             [deg] ....... ugao konusa mlaza

% disp(par)
LDR=(L_Nozzle./D_Nozzle);
% Izračunavanje geometrijskog člana C1
% Pažnja: Uvedene su korekcije za granične vrednosti parametra LDR kako bi
% se dobili trendovi prikazani u radu VArde, str. 3 diag. 4
if par>0.0
    C1=par;
elseif (LDR<=6)   % original: (LDR<=6.0)
    C1=0.0001.*(LDR.^5.0);
elseif (LDR>6)    % original: (LDR>6.0)
    C1=0.7;         % original: (0.7)
end
% Izračunavanje eksponenta C2
C2=(3.0-LDR)/(3.0.*LDR);
% Izračunavanje članova V1, V2 i V3
V1=(rhoGas./rhoFuel).^(1./3);
V2=ReNumLiquid.^(1./3);
V3=WeNumLiquid.^C2;
% Izračunavanje tan(theta)
tf=C1.*V1.*V2.*V3;
% Izračunavanje ugla konusa mlaza
theta=atand(tf);
```

6.6.3 Uticaj veličine cilindrične mlaznice - modeli Hirojasu i Varde

Koristeći prethodno razvijene funkcije za proračun ugla konusa mlaza po modelu Hirojasua i Araija za uslove neprekidnog potpuno razvijenog istrujavanja iz mlaznice (`SCA_Hiroyasu1990.m`) i modela Varde (`SCA_Varde.m`), sprovesti sistematsku analizu uticaja prečnika izlaznog otvora cilindrične mlaznice za slučaj obrazovanja smeše u

završnoj fazi sabijanja, pretpostavljajući sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri $p = 5\,\mathrm{MPa}$ i $T = 900\,\mathrm{K}$;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnici mlaznice su $100 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$, $150 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$, $200 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$ i $300 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$;
- Prečnik komore iglice: $1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$;
- Odnos dužine i prečnika mlaznice 4.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

Rešenje

Direktno poređenje osnovnih izraza za modele Hirojasu i Varde nije moguće, s obzirom na to da se jednim direktno aproksimira ugao, a drugim se aproksimira trigonometrijska funkcija ugla.

$$\theta = 83{,}5 \cdot \left(\frac{L_N}{D_N}\right)^{-0{,}22} \cdot \left(\frac{D_N}{D_{NS}}\right)^{-0{,}15} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{+0{,}26} \tag{6.80}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(0{,}0001 \cdot \left(\frac{L_N}{D_N}\right)^{5} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re_F^{\frac{1}{3}} \cdot We_F^{\frac{D_N}{L_N}-0{,}33}\right) \tag{6.81}$$

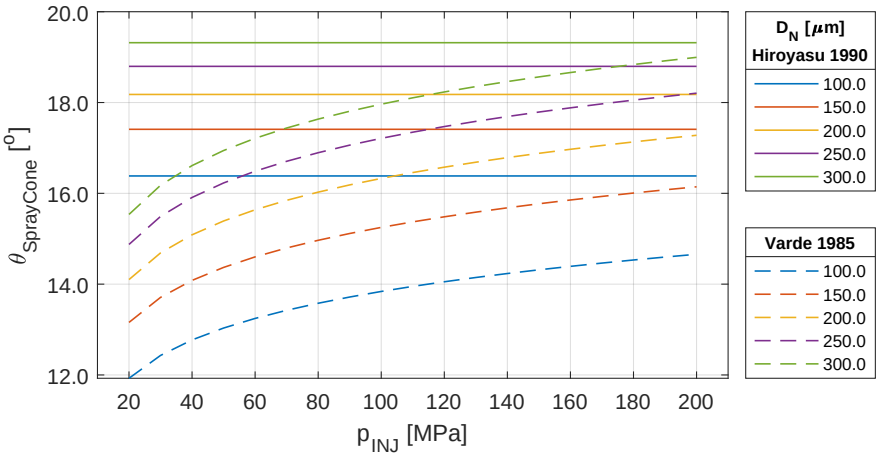
Ono što se može zaključiti jeste da odnos dužine kanala i izlaznog prečnika mlaznice, s obzirom da je postavkom problema taj parametar definisan kao konstanta, neće uticati na rezultat, pa se na osnovu toga može doći i do pogrešnog zaključka da je proračun modelom Varde neosetljiv na vrednost prečnika mlaznice. Međutim, prečnik izlaznog otvora mlaznice se pojavljuje kao nezavisna promenljiva u oba modela. Kod modela Hirojasua i Araija to će biti kroz odnos prečnika izlaznog otvora mlaznice i prečnika komore mlaznice $^{D_N}/_{D_{NS}}$, a kod modela Varde kroz vrednosti Rejnoldsovog i Veberovog broja:

$$Re = \frac{D_N \cdot u_{rel}}{\nu_F} \tag{6.82}$$

$$We = \frac{D_N \cdot \rho_F \cdot u_{rel}^2}{\sigma_F} \tag{6.83}$$

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.53. Analiza pokazuje da sa porastom prečnika izlaznog otvora mlaznice raste i ugao konusa i u tom smislu, su oba modela saglasna. Međutim, model Varde, uzimajući u obzir i uticaj pritiska ubrizgavanja

indirektno preko brzine istrujavanja koja figuriše i u Rejnoldsovom i u Veberovom broju, daje jasniju sliku o uticaju prečnika mlaznice na širem opsegu pritisaka.



Slika 6.53: Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora.

Program 6.65: `UgaoKonusaMlaza_03.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i prečnika izlaznog otvora mlaznice
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
%
% Pretpostavke:
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
% Poređenje rezultata modela Hiroyasu et. al (1990) i Varde (1985)
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail      [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas       [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas       [K]         temperatura gasa
% R_Gas       [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas      [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel     [kg/m3]     gustina goriva
% D_Nozzle    [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP          []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND          []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;

clear;
close all;
clc;
```

```
% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_Gas=50.0E+05;

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_Gas=900.0;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Dinamička viskoznost vazduha u Pa*s
muGas=0.000041522;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelSI]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
% muFuelSI=niFuelSI.*rhoFuel;

% Podaci o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleOutMin=100.0E-06;     % [m]
D_NozzleOutMax=300.0E-06;     % [m]
dD_NozzleOut=50.0E-06;        % [m]
D_NozzleOut=D_NozzleOutMin:dD_NozzleOut:D_NozzleOutMax;
[m_DN n_DN]=size(D_NozzleOut);

% D_NozzleIn=150.0E-06;      % [m]
r0_Nozzle=10.0E-06;         % [m]
D_NozzleSAC=1.0E-03;        % [m]
L_Nozzle=4.0.*D_NozzleOut; % [m]

for i=1:1:n_DN
    for j=1:1:n_pRail
```

```
%-----------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_Gas,rhoFuel,...
                                L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut(1,i));
% Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),niFuelSI,0.0);
% Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
% Izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu Varde
        [thetaHiroyasu1990(i,j)]=SCA_Hiroyasu1990(L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut(1,i),
            D_NozzleSAC,rhoGas,rhoFuel);
        [thetaVarde(i,j)]=SCA_Varde(L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut(1,i),rhoGas,rhoFuel,
            ...
                                    ReNumLiquid(i,j),WeNumLiquid(i,j),0.0);
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
figure (1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p1=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaHiroyasu1990(:,:),'-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p2=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaVarde(:,:),'--', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =0.75);
        hold on;
        grid on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
xtickformat('%.0f');
xticks([p_RailMin:2.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
ytickformat('%.1f');

% Prikaz legende
LegendTitle_Hiroyasu1990={'D_{N} [\mum]';'Hiroyasu 1990'};
LegendTitle_Varde={'Varde 1985'};
LegendLabel=num2str((D_NozzleOut.*1.0E+06)','%.1f');
% Prikaz legende za model Hiroyasu et al. 1990
lgd_p1=legend([p1],LegendLabel,'Location','NortheastOutside','FontSize',8);

title(lgd_p1,LegendTitle_Hiroyasu1990);
a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Varde
lgd_p2=legend(a2,[p2],LegendLabel,'Position',[0.78 0.22 0.145 0.2],'FontSize',8);
title(lgd_p2,LegendTitle_Varde);
```

6.6.4 Uticaj dužine kanal mlaznice - modeli Hirojasu i Varde

Koristeći prethodno razvijene funkcije za modele Hirojasua [55] i Varde [60] sprovesti analizu uticaja dužine kanala cilindrične mlaznice na ugao konusa mlaza

za slučaj obrazovanja smeše iz prethodnog primera sa prečnikom izlaznog otvora mlaznice od $150 \cdot 10^{-6}$ m. Koristiti diskretne vrednosti odnosa dužine kanala mlaznice i prečnika izlaznog otvora mlaznice 2, 4, 5, 6 i 10. Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice.

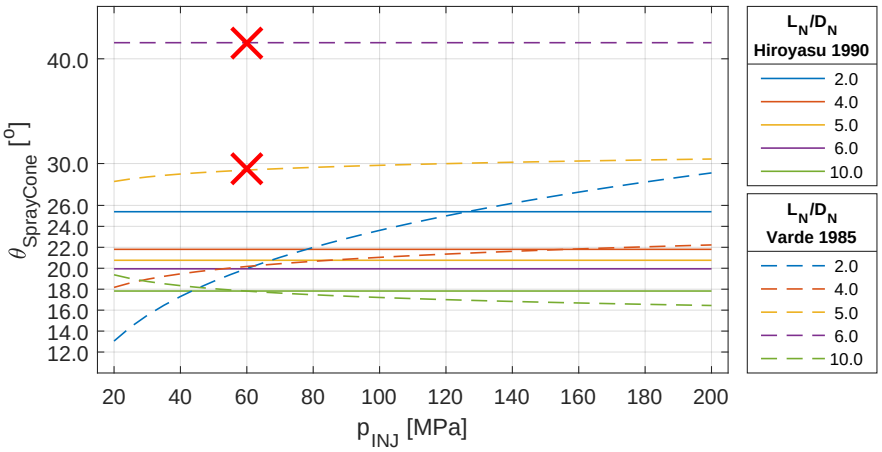
Rešenje

Iako model Hirojasua i Araia [55] ne prikazuje uticaj pritiska ubrizgavanja na ugao konusa mlaza (ni direktno ni indirektno), model je interesantan jer za potpuno razvijeno neprekidno strujanje i brzine isticanja iznad $150\,{}^{m}/_{s}$ daje dosta pouzdane rezultate, pa se u tom smislu može uzeti u obzir kao referenca za ocenu drugih modela. Model Varde sa druge strane, uključuje i član koji u obzir uzima i uticaj pritiska ubrizgavanja preko Rejnoldsovog i Veberovog broja (relativna brzina strujanja) pa može poslužiti za ocenu uticaja pritiska u širokom opsegu na ugao konusa mlaza. Na ovom primeru će biti prikazane dobre strane modela Hirojasua i Araia u pogledu globalne tačnosti, detaljnost modela Varde u pogledu osetljivosti na vrednost pritiska ubrizgavanja i loše predviđanje ugla konusa mlaza za vrednosti odnosa ${}^{L_N}/_{D_N}$ koji se u praksi najčešće koriste.

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.54. Uočava se da je za vrednosti ${}^{L_N}/_{D_N} = 2$ i ${}^{L_N}/_{D_N} = 4$, slaganje dva modela vrlo dobro. Model Varde pokazuje da pri niskim pritiscima ubrizgavanja ugao konusa mlaza opada, što je i očekivano jer je efekat kontrakcije mlaza u samoj mlaznici manje izražen. Sa porastom pritiska, kontrakcija mlaza u kanalu mlaznice je izraženija, što utiče na raniji početak raspada mlaza i rasipanje kapljica goriva pri napuštanju mlaznice. Ovi rezultati su u potpunoj saglasnosti sa eksperimentom prikazanim u radu [61]. Za vrednosti ${}^{L_N}/_{D_N} = 5$ i ${}^{L_N}/_{D_N} = 6$, koje se u praksi najčešće sreću, model Varde daje precenjene vrednosti, a što je i očekivano, s obzirom da je u strukturi modela odnos ${}^{L_N}/_{D_N} = 6$ upravo ona prelomna tačka na kojoj se uvodi diskretna konstantna vrednost za član koji u obzir uzima uticaj ${}^{L_N}/_{D_N}$. Eksperimenti prikazani u radovima[60, 61] pokazuju da se za vrednosti ${}^{L_N}/_{D_N}$ između 4 i 7 postiže maksimalni ugao konusa mlaza, a da za veće vrednosti ugao počinje da opada kao posledica stabilizacije strujne slike u kanalu mlaznice. Model Varde jasno pokazuje da se sa povećanjem pritiska ubrizgavanja ugao konusa mlaza za veće dužine kanal mlaznice postepeno smanjuje, što je konkretno u primeru pokazano za vrednost ${}^{L_N}/_{D_N} = 10$.

Primer treba da posluži kao ilustracija ograničene upotrebljivosti pojedinih modela, čak i u slučajevima kada je verifikacija obavljena na širokim opsezima pojedinačnih uticajnih parametara, i da se u tom smislu preporučuje uporedna provera rezultata sa više različitih modela i sa više različitih opsega kako bi se eliminisala mogućnost

greške.



Slika 6.54: Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora.

Program 6.66: `UgaoKonusaMlaza_04.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i dužine kanala mlaznice
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
%
% Pretpostavke:
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
% Model Najar et al.
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail      [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas       [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas       [K]         temperatura gasa
% R_Gas       [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas      [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel     [kg/m3]     gustina goriva
% D_Nozzle    [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP          []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND          []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;

clear;
close all;
clc;
```

```
% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=50.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_Gas=60.0E+05;

% Definisanje početne vrednosti temperature gasa
T_Gas=800.0;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Dinamička viskoznost vazduha u Pa*s
muGas=0.000041522;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelSI]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
% muFuelSI=niFuelSI.*rhoFuel;

% Podaci o brizgaču (mlaznici)
% D_NozzleInMin=150.0E-06;     % [m]
% D_NozzleInMax=150.0E-06;     % [m]
% dD_NozzleIn=50.0E-06;        % [m]
% D_NozzleIn=D_NozzleInMin:dD_NozzleIn:D_NozzleInMax;
% [m_DN n_DN]=size(D_NozzleIn);
D_NozzleOut=400.0E-06;       % [m]
% r0_Nozzle=10.0E-06;        % [m]
D_NozzleSAC=1.0E-03;       % [m]
% Definisanje opsega odnosa dužine i izlaznog prečnika kanala mlaznice
LDR=[2,4,5,6,10];
% Izračunavanje opsega dužine kanala mlaznice
L_Nozzle=LDR.*D_NozzleOut;   % [m]
[m_LN n_LN]=size(L_Nozzle);
for i=1:1:n_LN
```

```
    for j=1:1:n_pRail
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_Gas,rhoFuel,...
                                L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut);
% Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut,u(i,j),niFuelSI,0.0);
% Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut,u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);

        [thetaHiroyasu1990(i,j)]=SCA_Hiroyasu1990(L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut,
            D_NozzleSAC,rhoGas,rhoFuel);
        [thetaVarde(i,j)]=SCA_Varde(L_Nozzle(1,i),D_NozzleOut,rhoGas,rhoFuel,...
                                    ReNumLiquid(i,j),WeNumLiquid(i,j),0.0);
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
figure (1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p1=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaHiroyasu1990(:,:),'-', 'MarkerSize', 3.5,
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p2=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaVarde(:,:)','--', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth
        =0.75);
        hold on;
        grid on;
    p3=plot(60,41.5','xr', 'MarkerSize', 20, LineWidth=2);
        hold on;
    p4=plot(60,29.5','xr', 'MarkerSize', 20, LineWidth=2);
        hold on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
xtickformat('%.0f');
xticks([p_RailMin:4.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
ytickformat('%.1f')
yticks([12:2:26,30,40]);
% ylim([12,26]);

% Prikaz legende
LegendTitle={'L_{N}/D_{N}'};
LegendTitle_Hiroyasu1990={'L_{N}/D_{N}';'Hiroyasu 1990'};
LegendTitle_Varde={'L_{N}/D_{N}';'Varde 1985'};
LegendLabel=num2str((LDR)','%.1f');
lgd_p1=legend([p1],LegendLabel,'Location','NortheastOutside','FontSize',8);
title(lgd_p1,LegendTitle_Hiroyasu1990);

a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Varde
lgd_p2=legend(a2,[p2],LegendLabel,'Position',[0.782 0.25 0.145 0.2],'FontSize',8);
title(lgd_p2,LegendTitle_Varde);
```

6.6.5 Određivanje uticaja koničnosti mlaznice - model Nađar

Napisati funkciju za izračunavanje ugla konusa mlaza prema modelu Nađara (*Najar* et al. [59]), a zatim sprovesti analizu uticaja koničnosti mlaznice na ugao konusa mlaza za slučaj obrazovanja smeše u završnoj fazi sabijanja, pretpostavljajući sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu pri $p = 5\,\mathrm{MPa}$ i $T = 900\,\mathrm{K}$;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Uzlazni prečnici mlaznice: $120 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$ do $170 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}$;
- Izlazni prečnik mlaznice: $120 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost ugla konusa mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti ulaznog prečnika mlaznice (ili faktora koničnosti mlaznica);
- Dijagram 2: u zavisnosti od ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznice) ugao konusa mlaznice za diskretne vrednosti pritiska (leva y-osa) i koeficijenta pražnjenja konične mlaznice (desna y-osa).

Rešenje

Prethodno prikazani modeli ne daju potpun uticaj geometrije mlaznice i mogu se primeniti isključivo za tzv. cilindrične mlaznice kod kojih su prečnici ulaznog i izlaznog otvora jednaki. Model Nađara [59] uspostavlja vezu između ugla konusa mlaza i faktora koničnosti mlaznice, uzimajući u obzir kontrakciju protočnog preseka mlaznice kod savremenih brizgača. Model je verifikovan na pritiscima iznad 100 MPa i u tom smislu prati potrebe simulacije procesa obrazovanja smeše kod savremenih akumulatorskih visokopritisnih sistema ubrizgavanja. Model je u izvornom obliku prikazan jednostavnim izrazom u zavisnosti od prečnika ulaznog otvora mlaznice:

$$\theta = 10{,}5 \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{0{,}22} \cdot (p_{INJ} - p_G)^{0{,}11} \cdot D_{N,in}^{-0{,}5} \cdot \left(\frac{C_{d0}}{C_{dc}}\right)^{0{,}53} \cdot (1 + 0{,}05 \cdot K) \qquad (6.84)$$

Gde su veličine definisane na sledeći način:

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru;

ρ_F [kg/m³] Gustina goriva;

p_{INJ} [Pa] Pritisak goriva ispred otvora mlaznice brizgača;

p_G [Pa] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru;

$D_{N,in}$ [m] Prečnik ulaznog otvora mlaznice brizgača;

C_{d0} [−] Koeficijent pražnjenja cilindrične mlaznice;

C_{dc} [−] Koeficijent pražnjenja konične mlaznice;

K [%] Faktor koničnosti mlaznice.

Faktor koničnosti mlaznice ili konicitet, definisan je u izvornom obliku kao odnos razlike ulaznih i izlaznih prečnika mlaznice i dužine kanala mlaznice, izražen u procentima:

$$K = \frac{D_{N,in} - D_{N,out}}{L_N} \cdot 100 \tag{6.85}$$

Koeficijent pražnjenja cilindrične mlaznice određen je eksperimentalno prema vrednosti prečnika ulaznog otvora:

$$C_{d0} = 0{,}654 \cdot D_{N,in}^{0{,}007} \tag{6.86}$$

Koeficijent pražnjenja konične mlaznice određen je korekcijom koeficijenta pražnjenja cilindrične mlaznice:

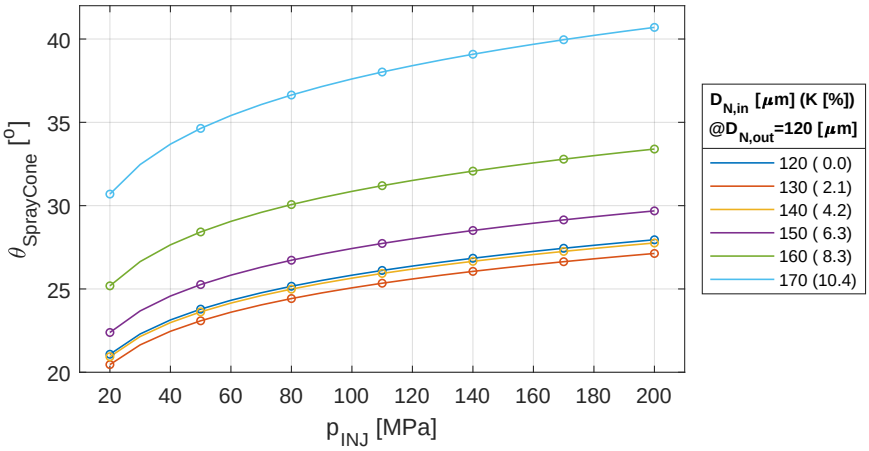
$$C_{dc} = C_{d0} + \Delta C_{dc} \tag{6.87}$$

Gde je korekcija ΔC_{dc} dobijena aproksimacijom eksperimentalnih rezultata u zavisnosti od faktora koničnosti mlaznice:

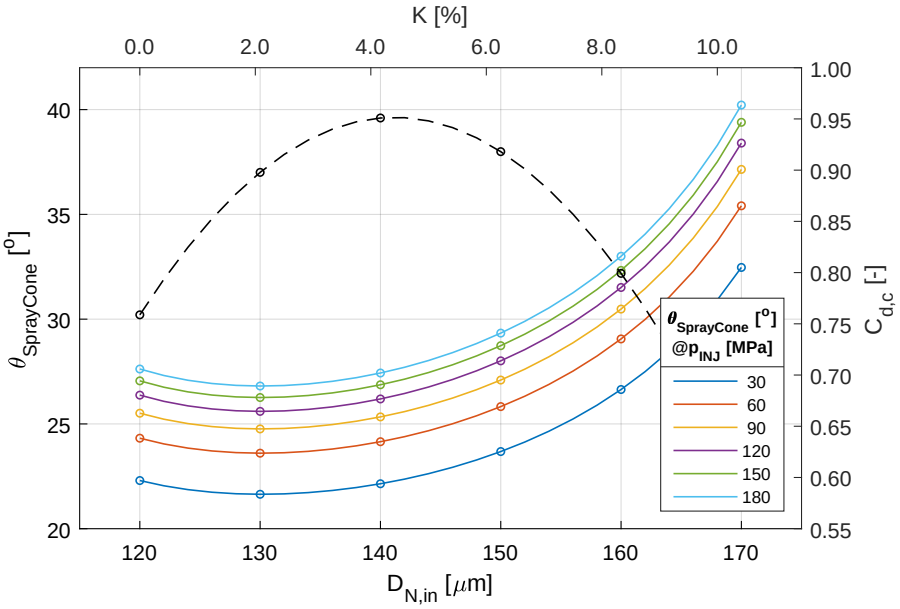
$$\Delta C_{dc} = 0{,}1144 + 0{,}0872 \cdot K + 0{,}0099 \cdot K^2 \tag{6.88}$$

Na slici 6.55 prikazana je zavisnost ugla konusa mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti ulaznog prečnika mlaznice (u legendi je navedena i vrednost faktora koničnosti mlaznice za datu vrednost ulaznog prečnika mlaznice). Jasno se uočava trend porasta ugla konusa sa povećanjem pritiska ubrizgavanja za svaku od izabranih vrednosti prečnika ulaznog otvora mlaznice. Međutim, uočava se i karakterističan efekat cilindrične mlaznice na ugao konusa mlaza, tj. sa cilindričnom mlaznicom ugao konusa je veći nego što je to slučaj sa najmanjim faktorom koničnosti (npr. 2,1%). Ovo je posledica kontrakcije struje unutar mlaznica izazvane nailaskom goriva na oštru ulaznu ivicu kanala mlaznice. Dalje povećanje ulaznog prečnika mlaznice (povećanje faktora koničnosti) dovodi do progresivnog povećanja ugla konusa mlaza. Ovaj efekat se još bolje može uočiti ako se analizira zavisnost ugla konusa mlaza u odnosu na prečnik ulaznog otvora mlaznice. Ova zavisnost, za

nekoliko izabranih vrednosti pritiska u zadatom opsegu, prikazana je na slici 6.56, a radi lakšeg praćenja i razumevanja, zavisnost se može pratiti i u odnosu na faktor koničnosti mlaznice (gornja x-osa). Takođe, uočava se da koeficijent pražnjenja mlaznice (desna y-osa) optimalne vrednosti dostiže za koničnu mlaznicu za vrednosti faktora koničnosti između 4% i 5%, odnosno, za poluugao konusnog kanala mlaznice između 1° i 1,5°. Načelno, povećanje koničnosti iznad $10\% - 11\%$ (poluugao konusa kanala mlaznice preko 3° dovodi do smanjenja koeficijenta pražnjenja ispod 0,5 što se smatra nepoželjnim).



Slika 6.55: Zavisnost ugla konusa mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznica).



Slika 6.56: Ugao konusa mlaznice (leva y-osa) za diskretne vrednosti pritiska i koeficijenta pražnjenja konične mlaznice (desna y-osa) u zavisnosti od ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznice).

Program 6.67: `UgaoKonusaMlaza_05.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i faktora koničnosti mlaznice
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
%
% Pretpostavke:
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
% Model Najar et al.
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;
```

```
clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=100.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_Gas=50.0E+05;

% Definisanje opsega promene temperature gasa
T_Gas=900.0;

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);
%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelSI]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti
% muFuelSI=niFuelSI.*rhoFuel;

% Podaci o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleInMin=120.0E-06;     % [m]
D_NozzleInMax=170.0E-06;     % [m]
dD_NozzleIn=2.0E-06;        % [m]
D_NozzleIn=D_NozzleInMin:dD_NozzleIn:D_NozzleInMax;

[m_DN n_DN]=size(D_NozzleIn);
D_NozzleOut=120.0E-06;       % [m]
% r0_Nozzle=10.0E-06;        % [m]
D_NozzleSAC=1.0E-03;       % [m]
L_Nozzle=4.0.*D_NozzleOut; % [m]

for i=1:1:n_DN
% Izračunavanje koničnosti mlaznice
```

```
    for j=1:1:n_pRail
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje teorijske brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
%         [uth(1,j)]=NozzleVelocityTh(p_Rail(1,j),p_Gas,rhoFuel,...
%                                     L_Nozzle,D_NozzleOut);
% Izračunavanje Rejnoldsovog broja
%         [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut,u(i,j),niFuelSI,0.0);
% Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
%         [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
% Dinamička viskoznost vazduha u Pa*s
%         muGas=0.000041522;

        [K(1,i), gama(1,i), dCd(1,i), Cdc(1,i), thetaNajar(i,j)]=SCA_Najar(
            D_NozzleIn(1,i),D_NozzleOut,L_Nozzle,...
                                                                p_Rail(1,j),p_Gas,
                                                                    rhoGas,rhoFuel);
    end
end

% Grafički prikaz rezultata
nMarkerSkip_D=5;
nMarkerSkip_p=3;
figure (1)
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p10=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaNajar(1:nMarkerSkip_D:n_DN,:),'-',LineWidth
        =0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p11=plot(p_Rail(1,1:nMarkerSkip_p:n_pRail).*1E-06,thetaNajar(1:nMarkerSkip_D:
        n_DN,1:nMarkerSkip_p:n_pRail),'o', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth=0.75);
        hold on;
        grid on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
xtickformat('%.0f');
xticks([p_RailMin:2.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
ytickformat('%.0f');
yticks(20.0:2.0:44.0);
ylim([20,44]);


% Prikaz legende
LegendTitle1={'D_{N,in} [\mum] (K [%])';'@D_{N,out}=120 [\mum]'};
LegendLabel11=num2str((D_NozzleIn(1,1:nMarkerSkip_D:n_DN).*1.0E+06)','%.0f');
LegendLabel12=num2str(K(1,1:nMarkerSkip_D:n_DN)','%.1f');
[m_L n_L]=size(LegendLabel11);
for i=1:1:m_L
    LegendLabel1(i,:)=[LegendLabel11(i,:),' (',LegendLabel12(i,:),')'];
end
% Prikaz legende
lgd_p11=legend([p10],LegendLabel1,'Location','EastOutside','FontSize',8);
title(lgd_p11,LegendTitle1);
```

```
figure (2)
nMarkerSkip_p2=3;
    colororder('default');
    t = tiledlayout(1,1);
    ax1 = axes(t);
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p20=plot(D_NozzleIn(1,:).*1E+06, thetaNajar(:,2:nMarkerSkip_p:n_pRail),'-',
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p21=plot(D_NozzleIn(1,1:nMarkerSkip_D:n_DN).*1E+06, thetaNajar(1:nMarkerSkip_D:
        n_DN,2:nMarkerSkip_p:n_pRail),'o', 'MarkerSize', 3.5, LineWidth=0.75);
        ax1.XColor = 'k';
        ax1.YColor = 'k';
        hold on;
        grid on;
        ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
        ytickformat('%.0f');
        yticks(20.0:5:40.0);
        ylim([20,42]);
        xlabel ('D_{N,in} [\mum]');
        xtickformat('%.0f');
        xticks([D_NozzleInMin:nMarkerSkip_D.*dD_NozzleIn:D_NozzleInMax].*1.0E+06);
        xlim([(D_NozzleInMin-0.5.*nMarkerSkip_D.*dD_NozzleIn).*1.0E+06,(
            D_NozzleInMax+0.5.*nMarkerSkip_D.*dD_NozzleIn).*1.0E+06]);

    ax2 = axes(t);
    p22=plot(K(1,:),Cdc(1,:),'--k', LineWidth=0.75);
        hold on;
    p23=plot(K(1,1:nMarkerSkip_D:n_DN),Cdc(1,1:nMarkerSkip_D:n_DN),'ok', '
        MarkerSize', 3.5, LineWidth=0.75);
        ax2.XAxisLocation = 'top';
        ax2.YAxisLocation = 'right';
        ax2.Color = 'none';
        ax1.XColor = 'k';
        ax1.YColor = 'k';
        ax1.Box = 'off';
        ax2.Box = 'off';
        hold on;
        ylabel('C_{d,c} [-]');
        ytickformat('%.2f');
        xlabel ('K [%]');
    xtickformat('%.1f');
    xlim([K(1,1)-((K(1,nMarkerSkip_D+1)-K(1,1)).*0.5),K(1,n_DN)+((K(1,n_DN)-K(1,
        n_DN-nMarkerSkip_D)).*0.5)]);
% Prikaz legende
LegendTitle2={'\theta_{SprayCone} [^o]'; '@p_{INJ} [MPa]'};
LegendLabel2=num2str((p_Rail(1,2:nMarkerSkip_p:n_pRail).*1.0E-06)','%.0f');
% Prikaz legende
lgd_p2=legend([p20],LegendLabel2,'Location','SouthEast','FontSize',8);
title(lgd_p2,LegendTitle2);
```

Program 6.68: `SCA_Najar.m`

```
function [ConeFactor, gama, dCd, Cdc, theta]=SCA_Najar(D_NozzleIn,D_NozzleOut,
    L_Nozzle,p_Rail,p_Gas,rhoGas,rhoFuel)
% Funkcija za izračunavanje ugla konusa mlaza po modelu Najar
% ------------------------------------------------------------
% Ibrahim Najar, Benjamin Stengel, Fabian Pinkert, Bert Buchholz, Egon Hassel
% Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry
% ILASS-Europe 2019, 29th Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2-4
    September 2019, Paris, France

% D_NozzleIn        [m] ......... prečnik ulaznog otvora mlaznice
% D_NozzleOut       [m] ......... prečnik izlaznog otvora mlaznice
% L_Nozzle          [m] ......... dužina kanala mlaznice
% p_Rail            [Pa] ........ pritisak goriva
% p_Gas             [Pa] ........ pritisak gasa u komori
% rhoGas            [kg/m3] ..... gustina gasa u komori
% rhoFuel           [kg/m3] ..... gustina goriva
% ConeFactor        [%] ......... faktor koničnosti mlaznice
% gama              [deg] ....... poluugao konusa mlaznice
% dCd               [-] ......... korekcija koef. pražnjenja cilindrične mlaznice
% Cdc               [-]  ........ koef. pražnjenja konične mlaznice
% theta             [deg] ....... ugao konusa mlaza

corr_p=1.0E-05; % [Pa] > [bar]
dp=(p_Rail-p_Gas).*corr_p;
% Izračunavanje koef. pražnjenja cilindrične mlaznice prema ulaznom prečniku
    mlaznice
Cd0=0.654.*(D_NozzleIn.*1.0E+03).^0.007;
% Izračunavanje korekcije koef. pražnjenja mlaznice
% Koničnost mlaznice ConeFactor
ConeFactor=(D_NozzleIn-D_NozzleOut)./L_Nozzle.*100;
gama=atand((D_NozzleIn-D_NozzleOut)./(2.*L_Nozzle));
% Korekcija se izračunava na osnovu zavisnosti za (CD-CDi) i koničnosti mlaznice
% (str. 5, Tab. 2)
dCd=-0.0099.*ConeFactor.^2 + 0.0872.*ConeFactor + 0.1144;
Cdc=Cd0+dCd;

NC0=10.5;
NC1=(rhoGas./rhoFuel).^(+0.22);
NC2=dp.^(+0.11);
NC3=(D_NozzleIn.*1.0E+03).^(-0.5);
NC4=(Cd0./Cdc).^(+0.53);
NC5=1.0+0.05.*ConeFactor;
theta=NC0.*NC1.*NC2.*NC3.*NC4.*NC5;
```

6.6.6 Uticaj gustine gasa u komori na ugao konusa mlaza - model Nađar

Koristeći model Nađara za ugao konusa mlaza, ispitati uticaj gustine gasa u komori za jednu cilindričnu i jednu koničnu mlaznicu, pretpostavljajući obrazovanje predmešane smeše (*eng.: PCCI - Pre-mixed Charge Compression Ignition*) u različitim položajima kolenastog vratila tokom sabijanja. Proračun sprovesti za sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Pritisci gasa u komori na početku ubrizgavanja: $p = 3\,\text{MPa}$ do $6\,\text{MPa}$;
- Referentno stanje gasa (npr. na pri zatvaranju usisnog ventila): $p = 0{,}2\,\text{MPa}$, $T = 330\,\text{K}$;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od $50\,\text{MPa}$ do $150\,\text{MPa}$;
- Uzlazni prečnici konične mlaznice: $150 \cdot 10^{-6}\,\text{m}$;
- Izlazni prečnik mlaznice: $120 \cdot 10^{-6}\,\text{m}$.

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Pretpostaviti izentropsku promenu stanja u komori (zanemariti realan sastav gasa i razmenu toplote sa okolinom). Rezultate proračuna prikazati grafički na sledeći način:

- Dijagram 1: zavisnost ugla konusa mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti ulaznog prečnika mlaznice (ili faktora koničnosti mlaznica)
- Dijagram 2: u zavisnosti od ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznice) ugao konusa mlaznice za diskretne vrednosti pritiska (leva y-osa) i koeficijenta pražnjenja konične mlaznice (desna y-osa).

Rešenje

Podatak o gustini gasa dobija se na osnovu pretpostavke o izentropskoj promeni stanja tokom sabijanja, pri čemu se realan sastav gasa zanemaruje (prisustvo goriva i zaostalih produkata sagorevanja), što je za prvo približenje i sticanje slike o razmerama uticaja gustine na ugao konusa mlaza sasvim prihvatljivo. Gustina se može izračunati primenom jednačine stanja idealnog gasa, pri čemu je temperatura gasa za zadatu vrednost pritiska dobijene primenom izraza za izentropsku promenu stanja:

$$T_G = T_{G,0} \cdot \left(\frac{p_G}{p_{G,0}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \tag{6.89}$$

$$\rho_G = \frac{p_G}{R \cdot T_G} \tag{6.90}$$

ili direktno, primenom izraza za gustinu kod izentropske promene stanja u zavisnosti od pritiska:

$$\rho_G = \rho_{G,0} \cdot \left(\frac{p_G}{p_{G,0}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \frac{p_{G,0}}{R \cdot T_{G,0}} \cdot \left(\frac{p_G}{p_{G,0}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \tag{6.91}$$

Gde su veličine definisane na sledeći način:

$\rho_{G,0}$ [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru pri referentnim uslovima;

ρ_G [kg/m³] Gustina gasa (vazduha) u cilindru za zadate uslove;

ρ_F [kg/m³] Gustina goriva;

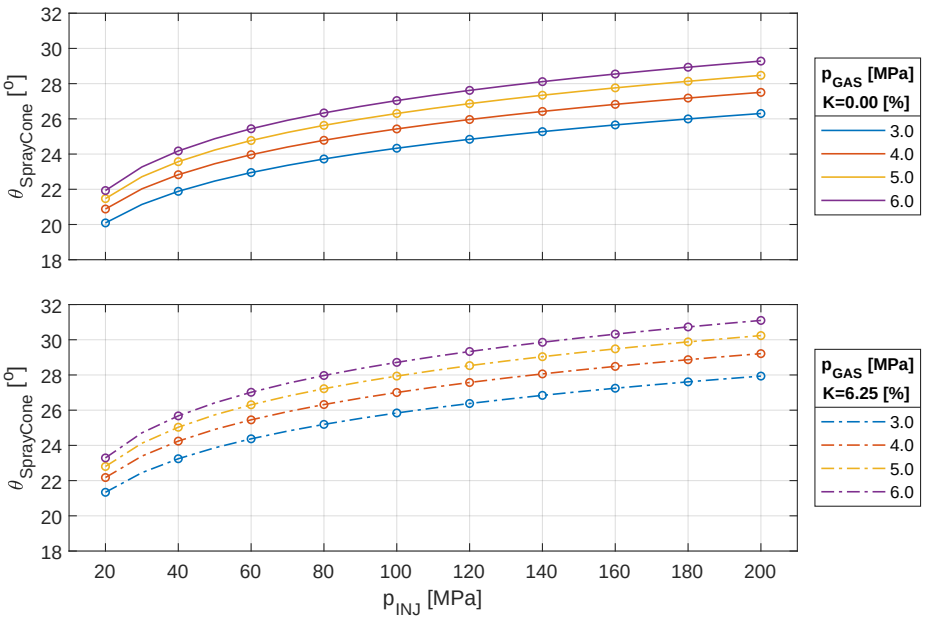
$p_{G,0}$ [Pa] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru pri referentnim uslovima;

p_G [Pa] Pritisak gasa (vazduha) u cilindru;

$T_{G,0}$ [K] Temperatura gasa (vazduha) u cilindru pri referentnim uslovima;

T_G [K] Temperatura gasa (vazduha) u cilindru.

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.57 na dva odvojena dijagrama sa zajedničkom x-osom na kojoj su date vrednosti pritiska ubrizgavanja.



Slika 6.57: Zavisnost ugla konusa mlaza od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti faktora koničnosti mlaznica.

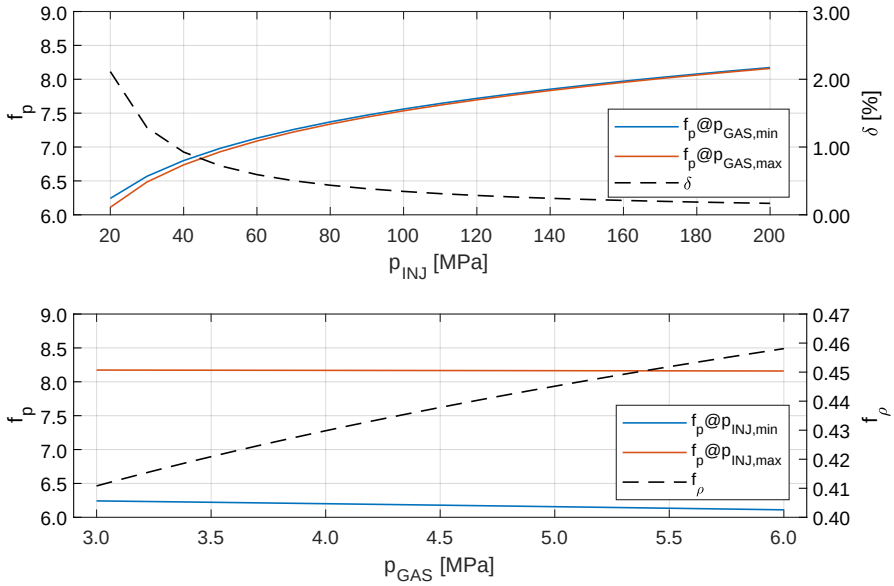
Na gornjem dijagramu prikazani su rezultati proračuna za cilindričnu mlaznicu (označena diskretnom vrednošću faktora koničnosti mlaznice $K = 0$, dok su na donjem dijagramu prikazani rezultati koji se odnose na koničnu mlaznicu (označena diskretnom vrednošću faktora koničnosti mlaznice $K = 6{,}25$. Zavisnosti su gotovo identične i razlike se uočavaju u numeričkim vrednostima. Načelno, povećanje gustine gasa dovodi do povećanja ugla konusa mlaza i taj efekat se mogao očekivati i na osnovu analize osnovnog izraza za ugao konusa mlaza:

$$\theta = 10{,}5 \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_F}\right)^{0,22} \cdot (p_{INJ} - p_G)^{0,11} \cdot D_{N,in}^{-0,5} \cdot \left(\frac{C_{d0}}{C_{dc}}\right)^{0,53} \cdot (1 + 0{,}05 \cdot K) \qquad (6.92)$$

Da bi se lakše uočila i analizirala zavisnost, članovi koji ne zavise od gustine gasa (direktan uticaj) i pritiska gasa (indirektan uticaj) se mogu izolovati i prikazati kao konstante ili funkcije:

$$\theta = C_1 \cdot f_\rho \cdot f_p \cdot f_D \cdot f_{Cd} \cdot f_K \qquad (6.93)$$

Koji od funkcijskih članova koji uzimaju u obzir gustinu gasa f_ρ i pritisak gasa f_p ima veći uticaj može se analizirati ako se izračunaju i prikažu posebno u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i od pritiska gasa. Vrednosti ova dva funkcijska člana su identične za cilindričnu i koničnu mlaznicu i prikazane su na slici 6.58.



Slika 6.58: Uticaj pritiska ubrizgavanja p_{INJ} i pritiska gasa p_G na funkcionalne zavisnosti f_p i f_ρ za cilindričnu i koničnu mlaznicu.

Glavni skript: `UgaoKonusaMlaza_06.m`

```
% Program za izračunavanje procenjene vrednosti ugla konusa mlaza
% u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja i gustine gasa u komori
% Slučaj ubrizgavanja tokom sabijanja
%
% Pretpostavke:
% Termodinamički uslovi tokom trajanja ubrizgavanja se ne menjaju
% Gorivo: dizel
% Model Najar et al.
% S. J. Popović
% 202404.v01
% P. Mrđa rev

% Pregled korišćenih oznaka
% p_Rail     [Pa]        pritisak goriva u akumulatoru, pritisak goriva ispred
    mlaznice
% p_Gas      [Pa]        pritisak gasa u komori za sagorevanje
% T_Gas      [K]         temperatura gasa
% R_Gas      [J/kgK]     gasna konstanta za gas u komori (vazduh)
% rhoGas     [kg/m3]     gustina gasa u komori
% rhoFuel    [kg/m3]     gustina goriva
% D_Nozzle   [m]         prečnik mlaznice brizgača

% FP         []          struktura sa karakteristikama goriva (FP - FuelProperties)
% ND         []          struktura sa karakteristikama mlaznice (ND - NozzleData)
    clear all;

clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;   % [Pa]
p_RailMax=2000E+05;  % [Pa]
dp_Rail=100.0E+05;   % [Pa]
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=30.0E+05;   % [Pa]
p_GasMax=60.0E+05;   % [Pa]
dp_Gas=1.0E+05;      % [Pa]
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Pritisak i temperatura na početku sabijanja
p_GasIVC=2.0E+05;   % [Pa]
T_GasIVC=330;       % [K]

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;
kapa=1.4;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
```

```
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelSI]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

%-------------------------------------------------------------
% Podaci o brizgaču (mlaznici)
D_NozzleIn_Cyl=120.0E-06;      % [m]
D_NozzleIn_Con=150.0E-06;      % [m]
D_NozzleOut=120.0E-06;        % [m]
LDR=4.0;
L_Nozzle=LDR.*D_NozzleOut;    % [m]

for i=1:1:n_pGas
    % Izračunavanje gustine gasa u komori
    T_Gas(1,i)=T_GasIVC.*((p_Gas(1,i)./p_GasIVC).^((kapa-1)./kapa));
    rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));

    for j=1:1:n_pRail
%-------------------------------------------------------------
% Slučaj cilindrične mlaznice
        [K_Cyl(i,j), gama_Cyl(i,j), dCd_Cyl(i,j), Cdc_Cyl(i,j), thetaNajar_Cyl(i,j)
            ]=SCA_Najar(D_NozzleIn_Cyl,D_NozzleOut,L_Nozzle,...
p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoGas(1,i),rhoFuel);
fp(i,j)=(p_Rail(1,j)-p_Gas(1,i)).^0.11;

frho(i,j)=(rhoGas(1,i)./rhoFuel).^0.22;
% Slučaj konične mlaznice
        [K_Con(i,j), gama_Con(i,j), dCd_Con(i,j), Cdc_Con(i,j), thetaNajar_Con(i,j)
            ]=SCA_Najar(D_NozzleIn_Con,D_NozzleOut,L_Nozzle,...
p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoGas(1,i),rhoFuel);
    end
end
for j=1:1:n_pRail
    dfp(1,j)=(fp(1,j)-fp(n_pGas,j))./fp(1,j).*100;
end

% Grafički prikaz rezultata
% Redukcija broja tačaka za prikaz na dijagramu
nMarkerSkip_pGas=10;
nMarkerSkip_pRail=2;

figure (1)
t=tiledlayout(2,1);
ax1=nexttile(1);
    colororder('default');
```

```
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p10=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaNajar_Cyl(1:nMarkerSkip_pGas:n_pGas,:),'-',
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p11=plot(p_Rail(1,1:nMarkerSkip_pRail:n_pRail).*1E-06,thetaNajar_Cyl(1:
        nMarkerSkip_pGas:n_pGas,1:nMarkerSkip_pRail:n_pRail),'o', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=0.75);
        hold on;
        grid on;
% xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
% xtickformat('%.0f');
% xticks([p_RailMin:2.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
xticklabels({})
ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
ytickformat('%.0f');
yticks(18.0:2.0:32);
ylim([18,32]);
% Prikaz legende
LegendTitle10={'p_{GAS} [MPa]';'K=0.00 [%]'};
LegendLabel10=num2str((p_Gas(1,1:nMarkerSkip_pGas:n_pGas).*1.0E-06)','%.1f');
lgd_p10=legend([p10],LegendLabel10,'Location','EastOutside','FontSize',8);
title(lgd_p10,LegendTitle10);

ax2=nexttile(2);
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p20=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,thetaNajar_Con(1:nMarkerSkip_pGas:n_pGas,:),'-.',
        LineWidth=0.75);
        hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p21=plot(p_Rail(1,1:nMarkerSkip_pRail:n_pRail).*1E-06,thetaNajar_Con(1:
        nMarkerSkip_pGas:n_pGas,1:nMarkerSkip_pRail:n_pRail),'o', 'MarkerSize',
        3.5, LineWidth=0.75);
        hold on;
        grid on;

xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xticks([p_RailMin:2.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);

ylabel('\theta_{SprayCone} [^o]');
ytickformat('%.0f');
yticks(18.0:2.0:32);
ylim([18,32]);

LegendTitle20={'p_{GAS} [MPa]';'K=6.25 [%]'};
LegendLabel20=num2str((p_Gas(1,1:nMarkerSkip_pGas:n_pGas).*1.0E-06)','%.1f');
lgd_p20=legend([p20],LegendLabel20,'Location','EastOutside','FontSize',8);
title(lgd_p20,LegendTitle20);

t.TileSpacing = 'compact';
t.Padding = 'compact';
```

```
figure(2)
t=tiledlayout(2,1);
ax1=nexttile(1);
    yyaxis left
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p210=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,fp([1,n_pGas],:),'-',LineWidth=0.75);
    hold on;
    grid on;
xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
xtickformat('%.0f');
xticks([p_RailMin:2.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06);
xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);

ylabel('f_{p}');
ytickformat('%.1f');
yticks(6:0.5:9);
ylim([6,9]);
    ax11=gca;
    ax11.YColor = 'k';

    yyaxis right
    p211=plot(p_Rail(1,:).*1E-06,dfp(1,:),'--k',LineWidth=0.75);
    hold on;
    grid on;
    ylabel('\delta [%]');
    ytickformat('%.2f');
%     yticks(0.40:0.01:0.47);
%     ylim([0.40,0.47]);
    ax22=gca;
    ax22.YColor = 'k';
% Prikaz legende
% LegendTitle21={'p_{GAS} [MPa]'};
% LegendLabel21=num2str([p_GasMin, p_GasMax]'.*1.0E-06,'%.1f');
LegendLabel21={'f_{p}@p_{GAS,min}';'f_{p}@p_{GAS,max}';'\delta'};
lgd_p21=legend([p210;p211],LegendLabel21,'Location','SouthEast','FontSize',8);
% title(lgd_p21,LegendTitle21);

ax2=nexttile(2);
    yyaxis left
    colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p220=plot(p_Gas(1,:).*1E-06,fp(:,[1,n_pRail]),'-',LineWidth=0.75);
    hold on;
%     p221=plot(p_Gas(1,:).*1E-06,fp(:,n_pRail));
%     hold on;
    grid on;
    ylabel('f_{p}');
    ytickformat('%.1f');
    yticks(6:0.5:9);
    ylim([6,9]);
    ax21=gca;
    ax21.YColor = 'k';

    yyaxis right
```

```
%         set(gca,'ColorOrderIndex',5)
    p221=plot(p_Gas(1,:).*1E-06,frho(:,n_pRail),'--k',LineWidth=0.75);
    hold on;
    grid on;
    ylabel('f_{\rho}');
    ytickformat('%.2f');
    yticks(0.40:0.01:0.47);
    ylim([0.40,0.47]);
    ax22=gca;
    ax22.YColor = 'k';

xlabel ('p_{GAS} [MPa]');
xtickformat('%.1f');
xticks([p_GasMin:5.*dp_Gas:p_GasMax].*1.0E-06);
xlim([(p_GasMin-dp_Gas).*1.0E-06,(p_GasMax+dp_Gas).*1.0E-06]);

% Prikaz legende
% LegendTitle22={'f_{p}, f_{\rho} vs. p_{GAS}'};
LegendLabel22={'f_{p}@p_{INJ,min}';'f_{p}@p_{INJ,max}';'f_{\rho}'};
% num2str([p_GasMin, p_GasMax]'.*1.0E-06,'%.1f');
lgd_p220=legend([p220;p221],LegendLabel22,'Location','SouthEast','FontSize',8);
% title(lgd_p220,LegendTitle22);
```

6.7 Srednji Sauterov prečnik

Veličina koja karakteriše kvalitet raspršivanja je srednji Sauterov prečnik kapljice (SMD, eng.: *Sauter Mean Diameter*). Srednji Sauterov prečnik predstavlja prečnik fiktivne kapljice (indeks m) čiji bi odnos zapremine i površine bio isti kao i odnos zbira zapremina svih čestica (V) koje se nalaze u smeši i zbira površina (A) svih pojedinačnih kapljica u smeši. Drugim rečima, kada bi sve formirane kapljice imale prečnik SMD, odnos zapremina ($V = \frac{4}{3}\pi r^3$) i površina ($A = 4\pi r^2$) takvih kapljica bi bio isti kao i za stvarne kapljice različitih prečnika.

$$\left(\frac{V}{A}\right)_m = \frac{\frac{\pi}{6} \cdot SMD^3}{\pi \cdot SMD^2} = \frac{SMD}{6} \tag{6.94}$$

$$SMD = \left(\frac{V}{A}\right)_{spray} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^3}{6 \cdot \sum_{i=1}^{n} d_i^2} \tag{6.95}$$

Što je manji SMD, veći je odnos površine kapljice i njene zapremine, što je povoljno sa aspekta isparavanja i formiranja smeše.

Definicijom srednjeg Sauterovog prečnika nije obuhvaćena raspodela veličina kapljica u mlazu, što predstavlja problem jer to znači da mogu postojati dva proizvoljna mlaza sa istim SMD i potpuno različitom raspodelom veličine čestica.

U ovom poglavlju biće prikazano nekoliko načina za određivanje srednjeg Sautero-

vog prečnika, a numerički modeli biće iskorišćeni za analizu uticaja geometrijskih karakteristika mlaznice, parametara ubrizgavanja i termodinamičkih uslova u komori.

6.7.1 Srednji Sauterov prečnik, slučaj ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu

Napisati funkcije za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika prema modelu Hirojasua [46, 62], a zatim koristeći navedeni model sprovesti proračun srednjeg Sauterovog prečnika u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za nekoliko diskretnih vrednosti pritiska gasa u komori, pretpostavljajući uslove obrazovanja predmešane smeše dizel-goriva tokom niskopritisnog dela ciklusa. Uslovi su dati na sledeći način:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Pritisak gasa u cilindru definisan je u opsegu od 0,1 MPa do 0,5 MPa;
- Temperatura gasa za početnu vrednost pritiska je 330 K;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $300 \cdot 10^{-6}$ m.
- Odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice: 4;

Zanemariti uticaj pritiska u akumulatoru na gustinu i viskoznost goriva. Pretpostaviti izentropsku promenu stanja u cilindru (zanemariti prenos toplote i realni sastav gasa). Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Rešenje

Kao i u slučaju drugih karakteristika mlaza, empirijski modeli Hirojasu [62, 46] koji opisuju promenu srednjeg Sauterovog prečnika ubrajaju se u najčešće primenjene modele iz ove oblasti. Na ovom primeru biće prikazan izdvojen uticaj pritiska gasa u komori za sagorevanja na procenjenu vrednost srednjeg Sauterovog prečnika za slučaj obrazovanja predmešane smeše dizel-goriva tokom niskopritisnog dela ciklusa, sa posebnim naglaskom na razlike koje se javljaju tokom faze nepotpuno (eng. *Incomplete Spray*) i faze potpuno razvijenog mlaza (eng. *Complete Spray*).

Osnovni model Hirojasua za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika obuhvata posebne izraze za izračunavanje relativnog srednjeg Sauterovog prečnika za nepotpuno i potpuno razvijen mlaz. Ovi modeli su pogodni za izračunavanje iz nekoliko praktičnih razloga.

Rezultat je dat u relativnom obliku kao odnos srednjeg Sauterovog prečnika i izlaznog prečnika mlaznice, što znači da će konačna vrednost srednjeg Sauterovog

prečnika, za sve ostale nepromenjene uslove biti približno linearno zavisna od prečnika izlaznog otvora mlaznice (postoje i indirektni uticaji prečnika mlaznice na ostale veličine u proračunu). Iz ovoga sledi važan zaključak da prečnik izlaznog otvora mlaznice ključno utiče na prečnik kapljice, pa odatle sledi i glavni tehnički kriterijum: za minimizaciju prečnika kapljice na kraju procesa atomizacije treba birati i primenjivati prečnik mlaznice na granici tehnoloških mogućnosti u datom trenutku.

Funkcijski članovi koji opisuju uslove strujanja prikazani su kroz vrednosti značica - Rejnoldsovog i Veberovog broja. To znači da je u teorijskom smislu lako praviti poređenja za slične strujne uslove koji se mogu dobiti različitim kombinacijama tehničkih karakteristika sistema za ubrizgavanje i termodinamičkih uslova u cilindru.

Treći razlog koji ovaj model čini interesantnim jeste taj da su funkcijski članovi koji zavise od fizičkih karakteristika tečne i gasovite faze, tj. za gorivo i gas u cilindru, dati u obliku njihovih odnosa, pa mogućnost za grešku u proračunu zbog izbora jedinica ili nedostatka potpune informacije o izboru jedinica, što je čest slučaj kod većine modela, ovde ne postoji. Na kraju, ako se koristi univerzalni pristup u izboru jedinica prema SI sistemu za sve veličine koje figurišu u proračunu, mogućnost za grešku ne postoji.

Konačno, treba istaći i činjenicu da je model verifikovan na širokim opsezima svih ključnih parametara - pritisku gasa, pritisku ubrizgavanja, viskoznosti goriva, što ga bez obzira na vreme proteklo od objavljivanja još uvek čini interesantnim i primenljivim u velikom broju slučajeva.

Za slučaj nepotpuno razvijenog mlaza data je sledeća zavisnost:

$$\frac{SMD_{IS}}{D_N} = 4{,}12 \cdot Re_F^{0,12} \cdot We_F^{-0,75} \cdot \left(\frac{\mu_F}{\mu_G}\right)^{0,54} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{0,18} \tag{6.96}$$

Za slučaj potpuno razvijenog mlaza, izraz ima identičnu strukturu, ali je uticaj gustina goriva i gasa dat sa negativnim eksponentom:

$$\frac{SMD_{CS}}{D_N} = 0{,}38 \cdot Re_F^{0,25} \cdot We_F^{-0,32} \cdot \left(\frac{\mu_F}{\mu_G}\right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{-0,47} \tag{6.97}$$

Gde su veličine definisane na sledeći način:

D_N [m] Prečnik izlaznog otvora mlaznice brizgača;

μ_F,μ_G [Pa/s] Dinamička viskoznost goriva i gasa, respektivno;

ρ_F,ρ_G [kg/m³] Gustina goriva i gasa u cilindru, respektivno;

Re_F [−] Rejnoldsov broj za tečnu fazu (gorivo);

We_F [−] Veberov broj za tečnu fazu (gorivo).

S obzirom na to da se procesi ubrizgavanja i raspada mlaza odigravaju jednovremeno, faze nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza se ne mogu fizički odvojiti, ni prostorno ni vremenski, pa se konačna vrednost srednjeg Sauterovog prečnika određuje kao najnepovoljniji slučaj:

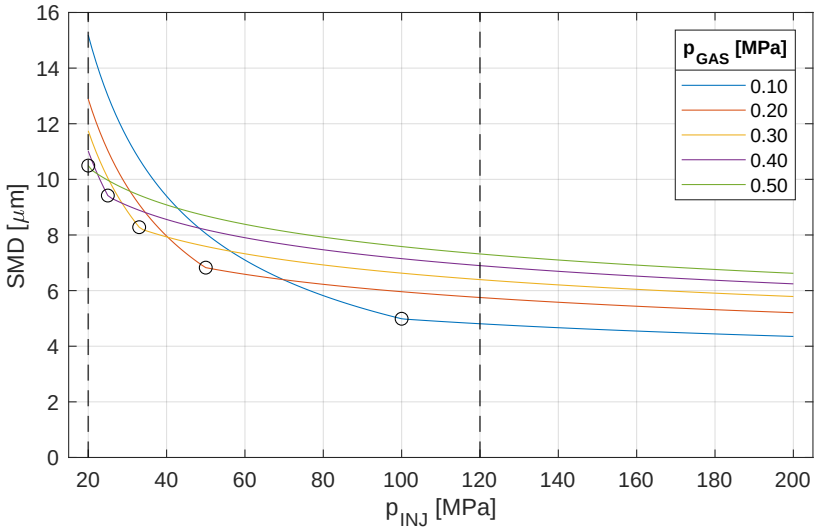
$$\frac{SMD}{D_N} = \max\left[\frac{SMD_{IS}}{D_N}, \frac{SMD_{CS}}{D_N}\right] \tag{6.98}$$

U nastavku, kao reprezentativni primer, prikazana je funkcija `SMD_Hiroyasu.m`. Rezultati proračuna za zadate uslove obrazovanja smeše prikazani su na slici 6.59. Uočava se da na svakoj od zavisnosti za diskretnu vrednost pritiska gasa postoji diskontinuitet, tj. tačka na kojoj se arbitrarno prelazi sa dominantnih uslova nepotpuno razvijenog mlaza u uslove potpuno razvijenog mlaza. Ova oblast, koja se za zadate uslove proračuna završava na pritiscima ubrizgavanja od oko 110 MPa, označena je isprekidanim linijama, izdvojena je i uvećano prikazana na slici 6.60. Prikaz je dopunjen isprekidanim linijama za uslove nepotpuno razvijenog mlaza i tačkastim linijama za uslove potpuno razvijenog mlaza.

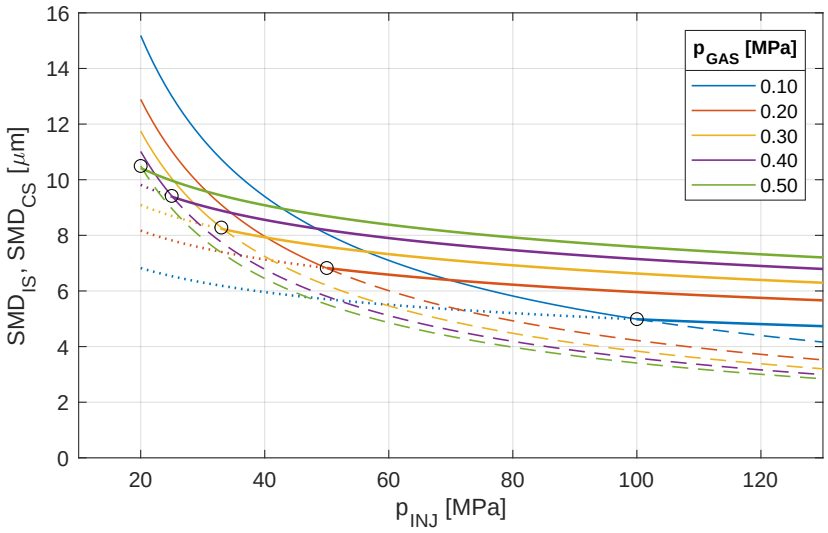
Najvažniji zaključak jeste da povećanje pritiska ubrizgavanja u svim slučajevima obuhvaćenim ovim primerom doprinosi smanjenju srednjeg Sauterovog prečnika, pa odatle i ključna preporuka i stav o neophodnosti primene visokopritisnih sistema ubrizgavanja. Drugi zaključak, logičan i očekivan, a na osnovu položaja tačaka diskontinuiteta, jeste da se sa smanjenjem pritiska gasa produžava faza nepotpuno razvijenog mlaza, tj. da je za prelaz u fazu potpuno razvijenog mlaza neophodno primeniti proporcionalno više vrednosti pritiska ubrizgavanja - za prelaz sa pritiska gasa 0,5 MPa na 0,1 MPa, neophodno je pritisak ubrizgavanja povećati sa oko 22 MPa na oko 110 MPa. Iz ovoga proizilazi problem prodora mlaza i problem interakcije mlaza sa delovima klipa i komore, a koji se moraju proveriti primenom nekog od modela za proračun dometa vrha mlaza, i još važnije dužine tečnog jezgra mlaza.

Treći zaključak se odnosi na različite uticaje pritiska gasa i goriva u različitim fazama atomizacije, ali se ovaj uticaj zapravo prati kroz odnos gustina gasovite i tečne faze.

U fazi nepotpuno razvijenog mlaza, kome odgovaraju načelno i niže vrednosti pritiska goriva, niži pritisak gasa utiče na održavanje kompaktnosti mlaza i kapljice i to se uočava kroz više vrednosti SMD. U oblasti potpuno razvijenog mlaza, uticaj odnosa gustina je obrnut, najverovatnije kroz intenziviranje spajanja kapljica usled sudara.



Slika 6.59: SMD na osnovu [46, 62] u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.



Slika 6.60: Uvećan prikaz promene SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Program 6.69: `SMD_01.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja dizel-goriva tokom niskopritisnog dela ciklusa (sistem sagorevanja
    PCCI)
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
```

```
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=1E+05;
p_GasMax=5E+05;
dp_Gas=1E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Referentna temperatura gasa
T_Gas0=330.0;
```

```
% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%-----------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-----------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=3.0.*ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;

for i=1:1:n_pGas
    for j=1:1:n_pRail

        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
        T_Gas(1,i)=T_Gas0.*(p_Gas(1,i)./p_GasMin).^((n-1)./n);
        rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));
        % viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
        [muGas(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_Gas(1,i),T_Gas(1,i));


        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,D_NozzleOut
            );

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(i,j),niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
```

```
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
%         [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD(i,j), SMDDis(i,j),SMDDcs(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i));
    end
end
SMD=SMDD.*D_NozzleOut;
SMD_IncompleteSpray=SMDDis.*D_NozzleOut;
SMD_CompleteSpray=SMDDcs.*D_NozzleOut;
dSMD(:,:)=SMD_IncompleteSpray(:,:)-SMD_CompleteSpray(:,:);
% grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
dSMD2(:,:)=(dSMD(:,:).*1E+06).^2;
for i=1:1:n_pGas
    IS2CS(1,i)=min(dSMD2(i,:),[],2);
    posX(1,i)=find(dSMD2(i,:)==IS2CS(1,i));
    posY(1,i)=SMD(i,posX(1,i));
end

% figure(1000)
% plot(SMD(1,:).*1E+06,':k'); hold on; grid on;
% plot(SMD_IncompleteSpray(1,:).*1E+06,'--b'); hold on;
% plot(SMD_CompleteSpray(1,:).*1E+06,'-.r'); hold on;
% plot(dSMD(1,:).*1E+06,'-c'); hold on;
% plot((dSMD(1,:).*1E+06).^2,'-m'); hold on;

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
colororder('default');
figure(1)
    plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    grid on;
    plot(p_Rail(1,posX).*1.0E-06,posY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
    hold on;
    xline(20,'--k', LineWidth=0.75);
    hold on;
    xline(120,'--k', LineWidth=0.75);
    hold on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    ylim([0,16]);
    yticks=0:2:16;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
    LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
```

```
    title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% figure(2)
% colororder('default');
% set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(:,:).*1.0E+06, '--')
%     grid on;
%     xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('SMD_{IS} [\mum]');
%     xtickformat('%.0f');
%     ytickformat('%.0f');
%     ylim([0,16]);
%     yticks=0:2:16;
%     xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% figure(3)
% colororder('default');
% set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(:,:).*1.0E+06, ':', LineWidth
    =1.0)
%     grid on;
%     xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('SMD_{CS} [\mum]');
%     xtickformat('%.0f')
%     ytickformat('%.0f')
%     xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% figure(4)
% colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     semilogx(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(:,:).*1.0E+06, '--',
    LineWidth=0.75)
%     hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     semilogx(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(:,:).*1.0E+06, ':', LineWidth
    =1.2)
%     hold on;
%     grid on;
%     semilogx(p_Rail(1,posX).*1.0E-06,posY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;
%     xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('SMD_{IS}, SMD_{CS} [\mum]');
%     xtickformat('%.0f')
%     ytickformat('%.0f')
%     xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');
```

```
% figure(5)
% colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%     semilogx(ReNumLiquid(2,:),SMD_IncompleteSpray(2,:).*1.0E+06, '--', LineWidth
    =0.75)
%     hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
%
%     semilogx(ReNumLiquid(2,:),SMD_CompleteSpray(2,:).*1.0E+06, ':', LineWidth
    =1.5)
%     hold on;
%     grid on;
%     xlabel ('Re_{F} [-]');
%     ylabel('SMD_{IS}, SMD_{CS} [\mum]');
%     xtickformat('%.1f')
%     ytickformat('%.0f')
% %     xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+dp_Rail).*1.0E-06]);
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% figure(6)
% colororder('default');
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
% for i=1:1:n_pGas
%     set(gca,'ColorOrderIndex',i)
%     p61(i)=semilogx(p_Rail(1,(1:posX(i))).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(i,(1:posX(
    i))).*1.0E+06, '-', LineWidth=0.75);
%     hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',i)
%     p62=semilogx(p_Rail(1,(posX(i):n_pRail)).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(i,(posX
    (i):n_pRail)).*1.0E+06, '--', LineWidth=0.75);
%     hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',i)
%     p63=semilogx(p_Rail(1,(1:posX(i))).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(i,(1:posX(i)))
    .*1.0E+06, ':', LineWidth=1.2);
%     hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',i)
%     p64=semilogx(p_Rail(1,(posX(i):n_pRail)).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(i,(posX(i
    ):n_pRail)).*1.0E+06, '-', LineWidth=1.2);
%     hold on;
% end
%     grid on;
%     p65=semilogx(p_Rail(1,posX).*1.0E-06,posY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;
%     xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
%     ylabel('SMD_{IS}, SMD_{CS} [\mum]');
%     xtickformat('%.0f')
%     ytickformat('%.0f')
%     xticks=[10, 100];
% %     xlim([20, 2000]);
%     ylim([0,16]);
%     yticks=0:2:16;
%
%     xlim([(p_RailMin-dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+10.*dp_Rail).*1.0E-06]);
```

```
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
%     lgd = legend([p61],LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
figure(7)
colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
for i=1:1:n_pGas
    set(gca,'ColorOrderIndex',i)
    p71(i)=plot(p_Rail(1,(1:posX(i))).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(i,(1:posX(i)))
        .*1.0E+06, '-', LineWidth=0.75);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',i)
    p72=plot(p_Rail(1,(posX(i):n_pRail)).*1.0E-06,SMD_IncompleteSpray(i,(posX(i):
        n_pRail)).*1.0E+06, '--', LineWidth=0.75);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',i)
    p73=plot(p_Rail(1,(1:posX(i))).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(i,(1:posX(i))).*1.0E
        +06, ':', LineWidth=1.2);
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',i)
    p74=plot(p_Rail(1,(posX(i):n_pRail)).*1.0E-06,SMD_CompleteSpray(i,(posX(i):
        n_pRail)).*1.0E+06, '-', LineWidth=1.2);
    hold on;
end
    grid on;
    p75=plot(p_Rail(1,posX).*1.0E-06,posY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
    hold on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{IS}, SMD_{CS} [\mum]');
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.0f')
    xticks=[20:20:120];
    xlim([10, 130]);
    ylim([0,16]);
    yticks=0:2:16;

    LegendLabel71=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.1f');
    lgd71 = legend([p71],LegendLabel,'location','NorthEast');
    title(lgd71,'p_{GAS} [MPa] ');
```

Program 6.70: `SMD_Hiroyasu.m`

```
function [SMDD, SMDDis, SMDDcs]=SMD_Hiroyasu(ReNum,WeNumLiquid,ViscDynFuel,
    ViscDynGas,rhoFuel,rhoGas)
% Funkcija za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika (SSP)
```

```
% Model Hiroyasu - Arai
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.
% Gunnar Stiesch
% Modeling Engine Spray and Combustion Processes, Springer-Verlag BerlinHeidelberg
    GmbH
% ISBN 978-3-642-05629-1
% ISBN 978-3-662-08790-9 (eBook)
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% str 15(33) izraz (2.12)
    % Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989) Empirical Equations for the Sauter Mean
        Di-
    % ameter of a Diesel Spray.
    % SAE paper 890464
    % Str. 10, izraz (8), (9) i (10)
    % Hiroyasu H, Arai M (1990) Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
    % SAE-paper 900475
    % Str. 11, izraz (10), (10a) i (10b)

% Izračunavanje relativnog SMD za slučaj nepotpunog mlaza - izraz (8)
% (Incomplete Spray, Hiroyasu, X32_LS)
Cis1=ReNum.^(+0.12);
Cis2=WeNumLiquid.^(-0.75);
Cis3=(ViscDynFuel./ViscDynGas).^(+0.54);
Cis4=(rhoFuel./rhoGas).^(+0.18);
SMDDis=4.12.*Cis1.*Cis2.*Cis3.*Cis4;

% Izračunavanje relativnog SMD za slučaj formiranog mlaza - izraz (10)
% (Complete Spray, Hiroyasu, X32_HS)
Ccs1=ReNum.^(+0.25);
Ccs2=WeNumLiquid.^(-0.32);
Ccs3=(ViscDynFuel./ViscDynGas).^(+0.37);
Ccs4=(rhoFuel./rhoGas).^(-0.47);   % Proveriti!!!
SMDDcs=0.38.*Ccs1.*Ccs2.*Ccs3.*Ccs4; % Original

% Određivanje relativnog SMD na osnovu kriterijuma Hiroyasu
SMDD=max(SMDDis,SMDDcs);
```

6.7.2 Srednji Sauterov prečnik, slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa - model Hirojasu

Po ugledu na prethodni primer, koristeći isti model Hirojasua [46, 62], sprovesti proračun za srednji Sauterov prečnik kapljice u uslovima obrazovanja smeše dizel-goriva tokom visokopritisnog dela ciklusa. Pretpostaviti sledeće uslove:

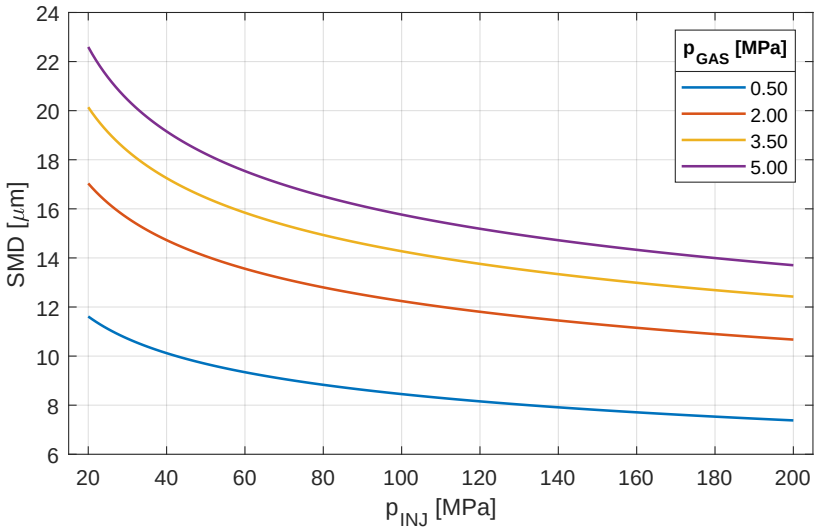
- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Pritisak gasa u cilindru definisan je u opsegu od 0,5 MPa do 5 MPa;

- Temperatura gasa za početnu vrednost pritiska je 450 K;
- Pritisak goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Izlazni prečnik mlaznice je $300 \cdot 10^{-6}$ m.
- Odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice: 4;

Zanemariti uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Pretpostaviti izentropsku promenu stanja u cilindru (zanemariti prenos toplote i realni sastav gasa). Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Rešenje

Cilj ovog primera jeste da se pokaže fundamentalni uticaj odnosa gustina, a zapravo odnosa pritisaka dva fluida - goriva i gasa. Rezultati proračuna prikazani su na slici6.61. Prema analizi izraza za model Hirojasua, očekivano, efekat neće biti pozitivan i može se pokazati analizom rezultata za dve karakteristične vrednosti pritiska ubrizgavanja, npr. 50 MPa i 200 MPa. U slučaju ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa (prethodni primer), očekivani srednji Sauterov prečnik za pritisak ubrizgavanja od 50 MPa je od 6 μm do 8 μm dok je u slučaju ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa od 8,7 μm do 16,5 μm. Sličan odnos se dobija i za maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja: od 4 μm do 6 μm za slučaj niskopritisnog dela ciklusa i od 6,6 μm do 12,4 μm za slučaj visokopritisnog dela ciklusa. Treba napomenuti da u ovom primeru, radi pojadnostavljenja, uticaj pritiska i temperature na gustinu goriva nije uzet u obzir i da bi rezultat proračuna bio drugačiji i nešto povoljniji u pogledu očekivane vrednosti srednjeg Sauterovog prečnika. Takođe, može se zaključiti da bi u slučaju ubrizgavanja pri višim vrednostima protivpritiska (pritiska gasa u cilindru), izbor goriva manje gustine dalo povoljniji rezultat.



Slika 6.61: SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori koji odgovaraju visokopritisnom delu ciklusa.

6.7.3 Uticaj prečnika otvora mlaznice - model Hirojasu

Koristeći model Hirojasua [62, 46] proveriti uticaj izabranog prečnika izlaznog otvora mlaznice na srednji Sauterov prečnik kapljice za slučaj ubrizgavanja dizel goriva u završnoj fazi procesa sabijanja za širok opseg pritiska ubrizgavanja. Pretpostaviti sledeće uslove:

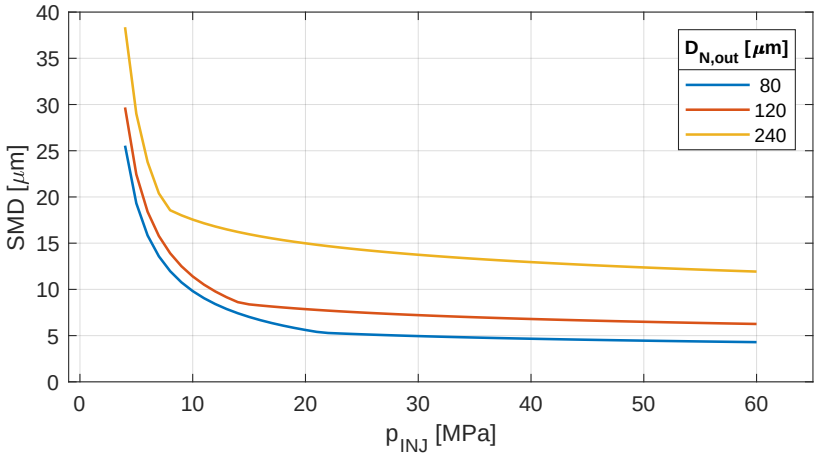
- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Pritisak i temperatura gasa u cilindru na početku ubrizgavanja su 6 MPa i 950 K;
- Opseg pritiska goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Diskretne vrednosti prečnika izlaznog otvora mlaznice su $80 \cdot 10^{-6}$ m, $120 \cdot 10^{-6}$ m i $240 \cdot 10^{-6}$ m
- Odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice: 4;

Zanemariti uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti veličine mlaznice brizgača.

Rešenje

Ovaj jednostavan primer treba da potvrdi zaključak koji se nameće iz analize samog izraza, da srednji Sauterov prečnik približno linearno zavisi od izabranog prečnika izlaznog otvora mlaznice. Međutim, faktor proporcionalnosti nije konstantan i nije jednak prečniku mlaznice. Prečnik izlaznog otvora mlaznice figuriše u izrazu za

brzinu, a brzina dalje sa prvim i drugim stepenom u Rejnoldsovom i Veberovom broju, respektivno. Konačno Rejnoldsov i Veberov broj sa svojim različitim eksponentima ulaze u proračun srednjeg Sauterovog prečnika za dve različite faze ponašanja mlaza (potpuno i nepotpuno razvijen mlaz). Takođe, uslovima proračuna definisan je isti odnos dužine i prečnika mlaznice, a taj podatak je od značaja za određivanje koeficijenta pražnjenja mlaznice. Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.62.



Slika 6.62: SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača.

Program 6.71: `SMD_03.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja dizel-goriva tokom visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464
```

```
% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=40E+05;
p_RailMax=600E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Pritisak gasa @SOI
p_GasSOI=20E+05; % [Pa];
% Temperatura gasa @SOI
T_GasSOI=550.0;

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;
% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

%-------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
```

```
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=[80, 120, 240].*1E-06; % [m]
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
% r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L_d.*D_NozzleOut;
[m_DN n_DN]=size(D_NozzleOut);

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGasSOI=p_GasSOI./(R_Gas.*T_GasSOI);
% viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
[muGasSOI, niGasSOI]=VA_Sutherland(p_GasSOI,T_GasSOI);

for i=1:1:n_DN
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasSOI,rhoFuel,L_Nozzle(1,i),
            D_NozzleOut(1,i));

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
%         [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD(i,j), SMDDis(i,j),SMDDcs(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasSOI,rhoFuel,rhoGasSOI);
    end
end
SMD=SMDD.*D_NozzleOut';
SMD_IncompleteSpray=SMDDis.*D_NozzleOut';
SMD_CompleteSpray=SMDDcs.*D_NozzleOut';
dSMD(:,:)=SMD_IncompleteSpray(:,:)-SMD_CompleteSpray(:,:);
% grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
dSMD2(:,:)=(dSMD(:,:).*1E+06).^2;
% for i=1:1:n_pGas
%     IS2CS(1,i)=min(dSMD2(i,:),[],2);
%     posX(1,i)=find(dSMD2(i,:)==IS2CS(1,i));
%     posY(1,i)=SMD(i,posX(1,i));
% end

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
```

```
colororder('default');
figure(1)
    plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD(:,:).*1.0E+06, '-','LineWidth',1.2);
    hold on;
    grid on;
%     plot(p_Rail(1,posX).*1.0E-06,posY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;

    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
%     ylim([0,16]);
    yticks=0:2:16;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
    LegendLabel=num2str([D_NozzleOut.*1.0E+06]','%.0f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
    title(lgd,'D_{N,out} [\mum]');
```

6.7.4 Uticaj dužine kanala mlaznice - model Hirojasu

Koristeći model Hirojasua [62, 46] proveriti uticaj odnosa dužine kanala i prečnika izlaznog otvora mlaznice na srednji Sauterov prečnik kapljice za slučaj ubrizgavanja dizel goriva u završnoj fazi procesa sabijanja za širok opseg pritiska ubrizgavanja. Pretpostaviti sledeće uslove:

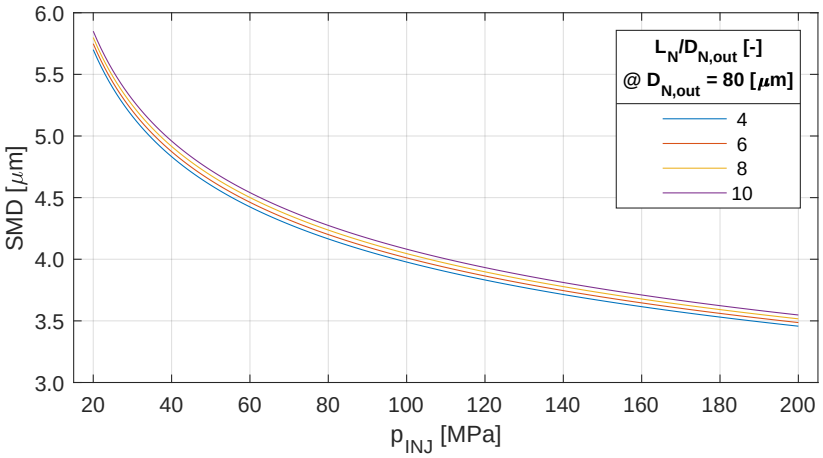
- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Pritisak i temperatura gasa u cilindru na početku ubrizgavanja su 6 MPa i 950 K;
- Opseg pritiska goriva u akumulatoru je od 20 MPa do 200 MPa;
- Diskretne vrednosti prečnika izlaznog otvora mlaznice su $80 \cdot 10^{-6}$ m;
- Odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice: 4, 6, 8 i 10;

Zanemariti uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti veličine mlaznice brizgača.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.63. Na prvi pogled, dužina kanala mlaznice, ako se analizira izraz za model Hirojasua, nema nikakav uticaj. Međutim, uticaj je indirektan jer se dužina kanala mlaznice pojavljuje u jednom od raspoloživih izraza za proračun koeficijenta pražnjenja mlaznice, a zatim se taj uticaj reflektuje na brzinu strujanja i dve bezdimenzione veličine. Jasno se uočava da je taj uticaj mali i da se, ako se razlika posmatra između kanala najmanje i najveće dužine, izražena u

apsolutnom domenu, kreće oko 0,1 μm do 0,15 μm, a da izražena relativno ne prelazi 2,6%. Ipak, važno je napomenuti da povećanje dužine kanala mlaznice utiče na ugao smanjenje konusa mlaza (zapreminu mlaza) i povećanje dužine jezgra mlaza, pa u tom smislu je i očekivano da će za posledicu imati i povećanje srednjeg Sauterovog prečnika.



Slika 6.63: SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice brizgača.

Glavni program: `SMD_04.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja dizel-goriva tokom visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464
```

```
% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475


clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=200E+05;
p_RailMax=2000E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Pritisak gasa @SOI
p_GasSOI=50E+05; % [Pa];
% Temperatura gasa @SOI
T_GasSOI=950.0;

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;
% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='diesel EN590 ED2023/L1'
[FP]=FuelData(FuelType);

%-------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
```

```
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=80.*1E-06; % [m]
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
% r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=D_NozzleOut.*[4, 6, 8, 10];
[m_LN n_LN]=size(L_Nozzle);

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGasSOI=p_GasSOI./(R_Gas.*T_GasSOI);
% viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
[muGasSOI, niGasSOI]=VA_Sutherland(p_GasSOI,T_GasSOI);

for i=1:1:n_LN
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasSOI,rhoFuel,L_Nozzle(1,i),
            D_NozzleOut);

        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut,u(i,j),niFuel,0.0);

        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut,u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);

        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
%         [WeNumGas]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD(i,j), SMDDis(i,j),SMDDcs(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasSOI,rhoFuel,rhoGasSOI);
    end
end
SMD=SMDD.*D_NozzleOut';
SMD_IncompleteSpray=SMDDis.*D_NozzleOut';
SMD_CompleteSpray=SMDDcs.*D_NozzleOut';
% dSMD(:,:)=SMD_IncompleteSpray(:,:)-SMD_CompleteSpray(:,:);
% grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
% dSMD2(:,:)=(dSMD(:,:).*1E+06).^2;
% % for i=1:1:n_pGas
%     IS2CS(1,i)=min(dSMD2(i,:),[],2);
%     posX(1,i)=find(dSMD2(i,:)==IS2CS(1,i));
%     posY(1,i)=SMD(i,posX(1,i));
% end
DeltaSMD=SMD(n_LN,:)-SMD(1,:);
deltaSMD=DeltaSMD./SMD(n_LN,:).*100;

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
```

```
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
colororder('default');
figure(1)

    plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.1f');
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);

    LegendLabel=num2str([L_Nozzle/D_NozzleOut]','%.0f');
    titleR1='L_{N}/D_{N,out} [-]';
    titleR2str=['@ D_{N,out} = ',num2str(D_NozzleOut.*1E+06),' [\mum]'];
    titleR2=join(titleR2str," ");
    lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
    title(lgd,{titleR1; titleR2});

set(gca,'ColorOrderIndex',1)
figure(2)
yyaxis left
    plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,DeltaSMD(1,:).*1E+06, '-k');
    hold on;
    ax21=gca;
    ax21.YColor = 'k';
yyaxis right
    plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,deltaSMD(1,:), '--k');
    hold on;
    grid on;
    ax22=gca;
    ax22.YColor = 'k';
```

6.7.5 Slučaj ubrizgavanja benzina - model Hirojasu

Sprovesti proračun za srednji Sauterov prečnik koristeći model Hirojasua [62, 46] za slučaj direktnog ubrizgavanja motornog benzina u cilindar tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa. Pretpostaviti sledeće uslove obrazovanja smeše:

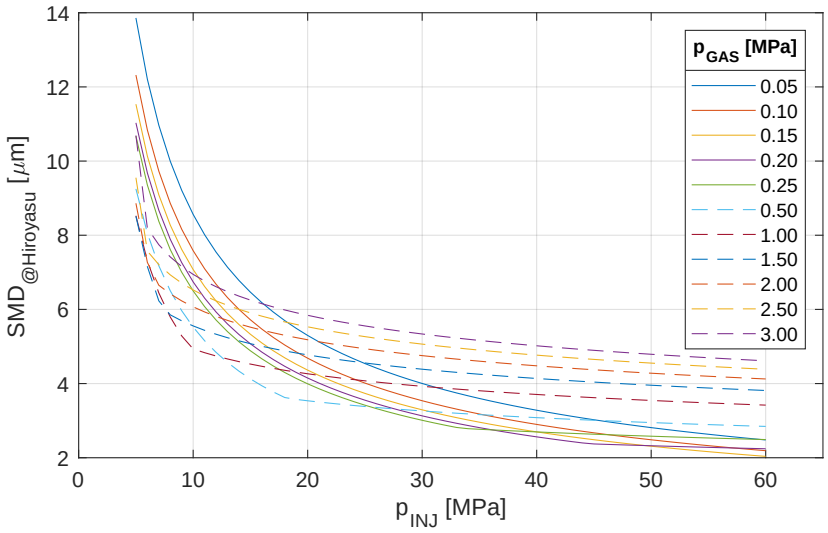
- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Opseg pritiska gasa u komori za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa: 0,05 MPa do 0,25 MPa;
- Pretpostaviti da se temperatura gasa za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa ne menja i da iznosi 330 K;
- Opseg pritiska gasa u komori za slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa: 0,5 MPa do 3,0 MPa;

- Pretpostaviti da je promena stanja gasa za slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa izentropska i da se može odrediti u odnosu na referentno stanje (pretpostaviti slučaj primene određenog nivoa natpunjenja sa referentnim pritiskom i temperaturom na početku sabijanja, 0,2 MPa i 330 K, respektivno)
- Opseg pritiska goriva u akumulatoru je od 5 MPa do 60 MPa;
- Prečnika izlaznog otvora mlaznice je $100 \cdot 10^{-6}$ m, a odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice 4;

Zanemariti uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u komori.

Rešenje

Ovaj primer ima višestruku ulogu. S jedne strane treba da pokaže koji je uticaj vrste goriva na procenjenu vrednost srednjeg Sauterovog prečnika i da omogući donošenje zaključka o prednosti ili nedostatku primene jednog od dva uobičajena goriva. Sa druge strane, treba da pokaže uticaj pritiska gasa na procenjenu vrednost srednjeg Sauterovog prečnika kapljice u širokom opsegu gustine gasa na osnovu čega se može indirektno doći do zaključka o tome koji su termodinamički uslovi povoljniji za obrazovanje smeše. Rezultati proračuna prikazani su na slici 6.64.



Slika 6.64: SMD na osnovu [46, 62] u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori.

Punim linijama prikazane su vrednosti srednjeg Sauterovog prečnika za uslove obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa, a isprekidanim za uslove visoko-

pritisnog dela ciklusa. Povoljni uslovi se dobijaju u kombinaciji pritiska ubrizgavanja do oko 20 MPa, ako se umesto tokom niskopritisnog dela ciklusa, tj. tokom usisavanja, ubrizgavanje pomeri neposredno iza zatvaranja usisnog ventila u deo ciklusa u kome je pritisak gasa iznad 0,25 MPa. Povećanje pritiska ubrizgavanja daje bolju atomizaciju za uslove niskih pritisaka u komori. Sa povećanjem pritiska u komori, kao i u slučaju dizel-goriva, raste srednji Sauterov prečnik, pa se može zaključiti da su ovakvi uslovi načelno nepovoljni. Međutim da li će se to odraziti negativno na ukupan kvalitet atomizacije i homogenizaciju smeše na osnovu ovog proračuna se ne može jednoznačno zaključiti jer se ne vidi uticaj temperature gasa na isparavanje, kao ni uticaj smanjenja dometa mlaza, ili eventualne interakcije mlaza i delova komore.

Program 6.72: `SMD_05.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja motornog benzina tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
% Model Hiroyasu
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464
% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475

clear;
close all;
clc;

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=50E+05;
p_RailMax=600E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
```

```
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% - niskopritisni deo ciklusa
p_GasLPMin=0.5E+05;
p_GasLPMax=2.5E+05;
dp_GasLP=0.5E+05;
p_GasLP=p_GasLPMin:dp_GasLP:p_GasLPMax;
[m_pGasLP n_pGasLP]=size(p_GasLP);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% - visokopritisni deo ciklusa
p_GasHPMin=5.0E+05;
p_GasHPMax=30.0E+05;
dp_GasHP=5E+05;
p_GasHP=p_GasHPMin:dp_GasHP:p_GasHPMax;
[m_pGasHP n_pGasHP]=size(p_GasHP);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Referentno stanje gasa
p_Gas0=2.0E+05;  % [Pa]
T_Gas0=330.0;    % [K]

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=1.0.*ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
```

```
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;

for i=1:1:n_pGasLP
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
%             T_Gas(1,i)=T_Gas0.*(p_Gas(1,i)./p_GasMin).^((n-1)./n);
%             rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));
            T_Gas(1,i)=T_Gas0;
            rhoGasLP(1,i)=p_GasLP(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));
        % Viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
            [muGasLP(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_GasLP(1,i),T_Gas(1,i));
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
            [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasLP(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,
                D_NozzleOut);
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
            [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(i,j),niFuel,0.0);
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
            [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
            [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGasLP(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD_LP_H(i,j), SMDDisLP_H(i,j),SMDDcsLP_H(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid
            (i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasLP(1,i),rhoFuel,rhoGasLP(1,i));
    end
end
SMD_LP_H=SMDD_LP_H.*D_NozzleOut;
% SMD_LPIncompleteSpray=SMDDisLP.*D_NozzleOut;
% SMD_LPCompleteSpray=SMDDcsLP.*D_NozzleOut;
% dSMDLP1(:,:)=SMD_LPIncompleteSpray(:,:)-SMD_LPCompleteSpray(:,:);
% % grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
% dSMDLP2(:,:)=(dSMDLP1(:,:).*1E+06).^2;
% for i=1:1:n_pGasLP
%     IS2CSLP(1,i)=min(dSMDLP2(i,:),[],2);
%     posLPX(1,i)=find(dSMDLP2(i,:)==IS2CSLP(1,i));
%     posLPY(1,i)=SMD_LP(i,posLPX(1,i));
% end

for i=1:1:n_pGasHP
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
            T_GasHP(1,i)=T_Gas0.*(p_GasHP(1,i)./p_Gas0).^((n-1)./n);
            rhoGasHP(1,i)=p_GasHP(1,i)./(R_Gas.*T_GasHP(1,i));
        % Viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
            [muGasHP(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_GasHP(1,i),T_GasHP(1,i));
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
            [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasHP(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,
                D_NozzleOut);
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
            [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(i,j),niFuel,0.0);
```

```
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
            [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
            [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGasHP(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD_HP_H(i,j), SMDDisHP_H(i,j),SMDDcsHP_H(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid
            (i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasHP(1,i),rhoFuel,rhoGasHP(1,i));
    end
end
SMD_HP_H=SMDD_HP_H.*D_NozzleOut;

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
colororder('default');
figure(1)
    p1=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    ylim([0,12]);
    yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
%     xticks=[p_RailMin:5.*dp_Rail:p_RailMax].*1.0E-06;
    LegendLabel1=num2str([p_GasLP.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd1 = legend([p1],LegendLabel1,'location','NorthEast');
    title(lgd1,'p_{GAS} [MPa] ');

colororder('default');
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
figure(2)
    p2=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_H(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    ylim([0,12]);
    yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
    LegendLabel2=num2str([p_GasHP.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd2 = legend([p2],LegendLabel2,'location','NorthEast');
    title(lgd2,'p_{GAS} [MPa] ');

figure(3)
colororder('default');
    set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p31=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1)
    p32=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_H(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    grid on;
```

```
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu} [\mum]');
    xtickformat('%.0f')
    ytickformat('%.0f')
%     xticks=[20:20:200];
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
%     ylim([0,20]);
%     yticks=0:2:20;

    LegendLabel31=num2str([p_GasLP,p_GasHP]'.*1.0E-06,'%.2f');
    lgd31 = legend([p31;p32],LegendLabel31,'location','NorthEast');
    title(lgd31,'p_{GAS} [MPa] ');
```

6.7.6 Slučaj ubrizgavanja benzina - model Elkotb

Za uslove iz prethodnog zadatka, sprovesti proračun srednjeg Sauterovog prečnika koristeći model Elkotba [63] i uporediti sa rezultatima dobijenim primenom modela Hirojasu [46, 62].

Rešenje

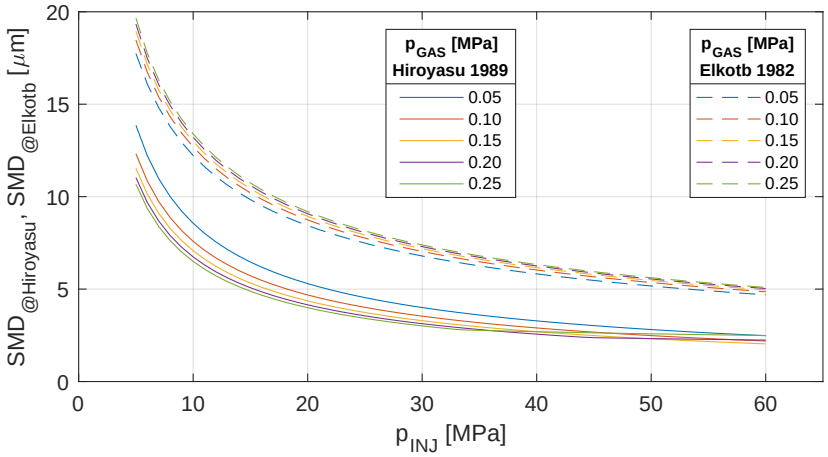
Model Elkotb [63], posmatrano hronološki, prethodi modelu Hirojasu [46, 62]. Opseg pritiska ubrizgavanja na kome je ovaj model verifikovan je ograničen (11,8 MPa) i ako se primenjuje na slučaj ubrizgavanja dizel-goriva, na sadašnjem nivou tehnologije, ovaj model bi se teško mogao svrstati u kategoriju referentnih ili u kategoriju prvog izbora. Sa druge strane, verifikacija je obavljena na širokom dijapazonu sastava (mešavina) goriva, temperature goriva i gustine gasa u komori, što ga čini interesantnim za primenu kod ubrizgavanja motornog benzina.

Izraz za model Elkotb dat je kao proizvod karakterističnih funkcijskih članova u kojima se indirektno u obzir uzimaju uslovi istrujavanja goriva (Rejnoldsov i Veberov broj, koeficijent pražnjenja mlaznice) i uslovi u cilindru (gustina gasa):

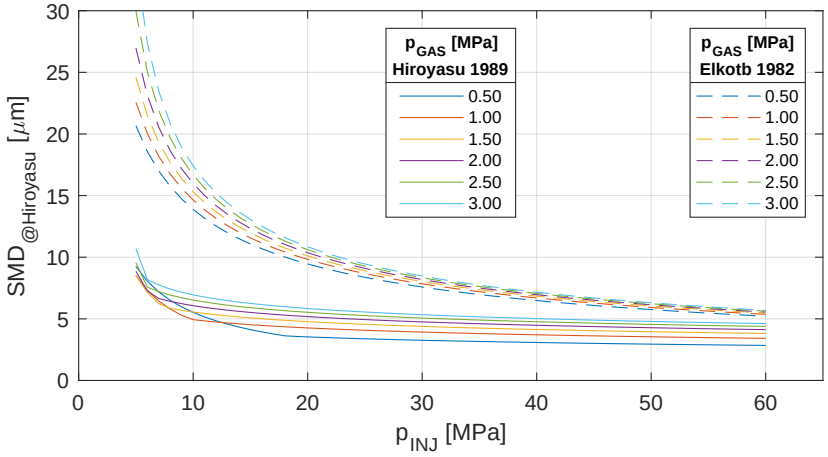
$$\frac{SMD}{D_N} = 107 \cdot Re_F^{-0,183} \cdot We_F^{-0,442} \cdot C_D^{-0,442} \cdot \left(\frac{\rho_F}{\rho_G}\right)^{-0,05} \tag{6.99}$$

Kao i u slučaju modela Hirojasu, i ovaj model ima očiglednu prednost jer se u osnovi radi o bezdimenzionom modelu, tj. svi članovi se svode ili na jednu od značica (Rejnoldsov i Veberov broj za gorivo) ili na odnos istih fizičkih veličina (gustina ili prečnik, npr.), što znači da u slučaju konzistentnog i sistematskog pristupa u upotrebi jedinica za pojedine veličine, mogućnost za grešku praktično ne postoji. Na slici 6.65 prikazan je rezultat proračuna primenom dva modela za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela ciklusa, a na slici 6.66 rezultati za slučaj obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa. Na oba dijagrama, punim linijama prikazani su rezultati dobijeni primenom modela Hirojasu, a isprekidanim linijama rezultati dobijeni modelom Elkotb. Za slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog dela

ciklusa, model Elkotb daje veće vrednosti, pri čemu je razlika na punom opsegu pritiska ubrizgavanja približno 100%. Međutim, za uslove obrazovanja smeše tokom visokopritisnog dela ciklusa, razlike između modela su oko 300% za niske pritiske ubrizgavanja i oko 100% za visoke pritiske ubrizgavanja, a razlika se smanjuje sa povećanjem pritiska ubrizgavanja. Relativne razlike su vrlo izražene, ali u apsolutnom domenu razlike se mogu čak i zanemariti jer se radi o prečnicima reda veličine 10 μm. Takođe, oba modela su u pogledu karaktera zavisnosti potpuno saglasna. Treba napomenuti da su u slučaju oba modela verifikacije obavljene sa mlaznicama višestruko većih prečnika, pa se odstupanja mogu pripisati i toj činjenici.



Slika 6.65: SMD u funkciji pritiska ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa prema modelima Hirojasu i Elkotb.



Slika 6.66: SMD u funkciji pritiska ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa prema modelima Hirojasu i Elkotb.

Program 6.73: `SMD_06.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja motornog benzina tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
% Model Hiroyasu i Elkotb
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev.
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464
% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475
% Elkotb, M. M.:
% Fuel Atomization for Spray Modelling
% Progress in Enegry Combustion Science, Vol. 8, pp. 61-91, 1982

clear all;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=50E+05;
p_RailMax=600E+05;
dp_Rail=10.0E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% - niskopritisni deo ciklusa
p_GasLPMin=0.5E+05;
```

```
p_GasLPMax=2.5E+05;
dp_GasLP=0.5E+05;
p_GasLP=p_GasLPMin:dp_GasLP:p_GasLPMax;
[m_pGasLP n_pGasLP]=size(p_GasLP);

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% - visokopritisni deo ciklusa
p_GasHPMin=5.0E+05;
p_GasHPMax=30.0E+05;
dp_GasHP=5E+05;
p_GasHP=p_GasHPMin:dp_GasHP:p_GasHPMax;
[m_pGasHP n_pGasHP]=size(p_GasHP);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Referentno stanje gasa
p_Gas0=2.0E+05;  % [Pa]
T_Gas0=330.0;    % [K]

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;


%------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%------------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=1.0.*ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;
```

```
for i=1:1:n_pGasLP
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
%             T_Gas(1,i)=T_Gas0.*(p_Gas(1,i)./p_GasMin).^((n-1)./n);
%             rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));
            T_GasLP(1,i)=T_Gas0;
            rhoGasLP(1,i)=p_GasLP(1,i)./(R_Gas.*T_GasLP(1,i));
        % Viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
            [muGasLP(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_GasLP(1,i),T_GasLP(1,i));
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
            [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasLP(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,
                D_NozzleOut);
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
            [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(i,j),niFuel,0.0);
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
            [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
            [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGasLP(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD_LP_H(i,j), SMDDisLP_H(i,j),SMDDcsLP_H(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid
            (i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasLP(1,i),rhoFuel,rhoGasLP(1,i));
        [SMDD_LP_E(i,j), SMD_LP_E(i,j), AE(i,j)]=SMD_Elkotb(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),rhoFuel,rhoGasLP(1,i),0.7,D_NozzleOut);
    end
end
SMD_LP_H=SMDD_LP_H.*D_NozzleOut;

% SMD_LPIncompleteSpray=SMDDisLP.*D_NozzleOut;
% SMD_LPCompleteSpray=SMDDcsLP.*D_NozzleOut;
% dSMDLP1(:,:)=SMD_LPIncompleteSpray(:,:)-SMD_LPCompleteSpray(:,:);
% % grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
% dSMDLP2(:,:)=(dSMDLP1(:,:).*1E+06).^2;
% for i=1:1:n_pGasLP
%     IS2CSLP(1,i)=min(dSMDLP2(i,:),[],2);
%     posLPX(1,i)=find(dSMDLP2(i,:)==IS2CSLP(1,i));
%     posLPY(1,i)=SMD_LP(i,posLPX(1,i));
% end

for i=1:1:n_pGasHP
    for j=1:1:n_pRail
        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
            T_GasHP(1,i)=T_Gas0.*(p_GasHP(1,i)./p_Gas0).^((n-1)./n);
            rhoGasHP(1,i)=p_GasHP(1,i)./(R_Gas.*T_GasHP(1,i));
        % Viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
            [muGasHP(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_GasHP(1,i),T_GasHP(1,i));
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
            [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasHP(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,
                D_NozzleOut);
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
            [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(i,j),niFuel,0.0);
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
```

```
            [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
            [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(i,j),rhoGasHP(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD_HP_H(i,j), SMDDisHP_H(i,j),SMDDcsHP_H(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid
            (i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasHP(1,i),rhoFuel,rhoGasHP(1,i));
        [SMDD_HP_E(i,j), SMD_HP_E(i,j), AE(i,j)]=SMD_Elkotb(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),rhoFuel,rhoGasHP(1,i),0.7,D_NozzleOut);
    end
end
SMD_HP_H=SMDD_HP_H.*D_NozzleOut;

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
colororder('default');
figure(1)
    p11=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    p12=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_E(:,:).*1.0E+06, '--');
    grid on;
%     plot(p_Rail(1,posLPX).*1.0E-06,posLPY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;
%     xline(20,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
%     xline(120,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu}, SMD_{@Elkotb} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    ylim([0,20]);
%     yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
% Prikaz legende za model Hiroyasu
    LegendTitle={'p_{GAS} [MPa]'};
    LegendTitle_Hiroyasu={'p_{GAS} [MPa]';'Hiroyasu 1989'};
    LegendLabel1=num2str([p_GasLP.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd_p11=legend([p11],LegendLabel1,'Location','North','FontSize',8);
    title(lgd_p11,LegendTitle_Hiroyasu);
% Prikaz legende za model Elkotb
    a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
    LegendTitle_Elkotb={'p_{GAS} [MPa]';'Elkotb 1982'};
    lgd_p12=legend(a2,[p12],LegendLabel1,'Location','NorthEast','FontSize',8);
    title(lgd_p12,LegendTitle_Elkotb);

colororder('default');
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
figure(2)
    p21=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
```

```
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    p22=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_E(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    grid on;
%     plot(p_Rail(1,posLPX).*1.0E-06,posLPY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;
%     xline(20,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
%     xline(120,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu}, SMD_{@Elkotb} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
    ylim([0,30]);
%     yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);

% Prikaz legende za model Hiroyasu
    LegendTitle={'p_{GAS} [MPa]'};
    LegendTitle_Hiroyasu={'p_{GAS} [MPa]';'Hiroyasu 1989'};
    LegendLabel2=num2str([p_GasHP.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd_p21=legend([p21],LegendLabel2,'Location','North','FontSize',8);
    title(lgd_p21,LegendTitle_Hiroyasu);
% Prikaz legende za model Elkotb
    a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
    LegendTitle_Elkotb={'p_{GAS} [MPa]';'Elkotb 1982'};
    lgd_p22=legend(a2,[p22],LegendLabel2,'Location','NorthEast','FontSize',8);
    title(lgd_p22,LegendTitle_Elkotb);
```

6.7.7 Uticaj prečnika mlaznice - model Elkotb

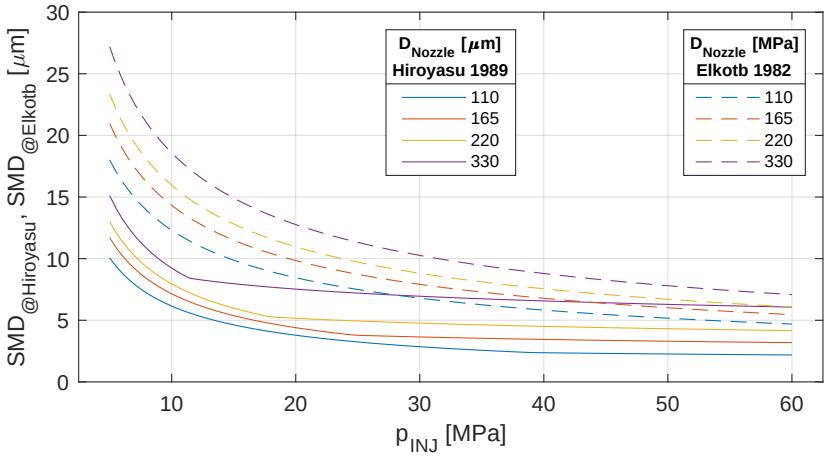
Koristeći modele Hirojasua i Elkotba izračunati i uporediti vrednosti srednjeg Sauterovog prečnika za nekoliko karakterističnih prečnika mlaznice za po jedan slučaj obrazovanja smeše tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa. Pretpostaviti sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Stanje gasa u komori za slučaj ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa: pritisak 0,2 MPa, temperatura 330 K;
- Stanje gasa u komori za slučaj ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa: pritisak 2,5 MPa, temperatura 680 K;
- Opseg pritiska goriva u akumulatoru je od 5 MPa do 60 MPa;
- Diskretne vrednosti prečnika izlaznog otvora mlaznice su $100 \cdot 10^{-6}$ m, $150 \cdot 10^{-6}$ m, $200 \cdot 10^{-6}$ m, $300 \cdot 10^{-6}$ m,
- Odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice 4;

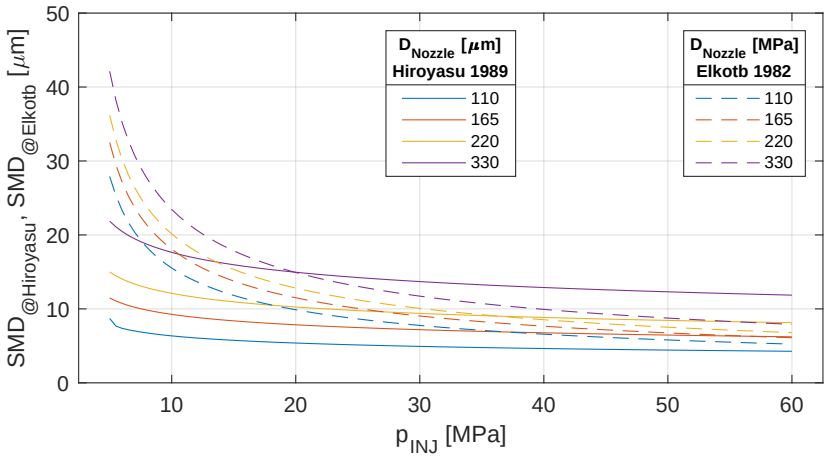
Zanemariti uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika izlaznog otvora mlaznice.

Rešenje

Rezultati proračuna prikazani su na slikama 6.671 i 6.68, za slučajeve obrazovanja smeše tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa, respektivno. Najveće razlike, prema očekivanju postoje za oblast niskih pritisaka ubrizgavanja. Sa porastom pritiska ubrizgavanja razlike u vrednostima srednjeg Sauterovog prečnika se smanjuju. Takođe, razlike su manje kada se posmatraju mlaznice većih prečnika. Može se indirektno zaključiti da se razlike smanjuju kako se u proračunu uslovi približavaju onim koji su korišćeni u eksperimentima za verifikaciju modela, a to su mlaznice većih izlaznih prečnika, viši pritisci goriva i gasa, što su uslovi reprezentativni za rad sistema ubrizgavanja dizel-goriva.



Slika 6.67: SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača za niskopritisni deo ciklusa.



Slika 6.68: SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača za visokopritisni deo ciklusa.

Program 6.74: `SMD_07.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
% ubrizgavanja motornog benzina tokom niskopritisnog i visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
% Model Hiroyasu i Elkotb
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Di-
% ameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464
% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475
% Elkotb, M. M.:
% Fuel Atomization for Spray Modelling
% Progress in Enegry Combustion Science, Vol. 8, pp. 61-91, 1982

clear;
close all;
```

```
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
p_RailMin=50E+05;
p_RailMax=600E+05;
dp_Rail=5E+05;
p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
[m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);

% % Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% % - niskopritisni deo ciklusa
% p_GasLPMin=0.5E+05;
% p_GasLPMax=2.5E+05;
% dp_GasLP=0.5E+05;
% p_GasLP=p_GasLPMin:dp_GasLP:p_GasLPMax;
% [m_pGasLP n_pGasLP]=size(p_GasLP);
%
% % Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
% % - visokopritisni deo ciklusa
% p_GasHPMin=5.0E+05;
% p_GasHPMax=30.0E+05;
% dp_GasHP=5E+05;
% p_GasHP=p_GasHPMin:dp_GasHP:p_GasHPMax;
% [m_pGasHP n_pGasHP]=size(p_GasHP);

% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Pritisak i temperatura gasa u komori
p_GasLP=2.0E+05;  % [Pa]
T_GasLP=330.0;    % [K]
p_GasHP=25.0E+05;  % [Pa]
T_GasHP=680.0;    % [K]

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

%-------------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
```

```
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType
    );
% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
[rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

niFuel=niFuel0;
% niFuel=niFuel0.*0.4:niFuel0.*0.05:niFuel0.*1.0;
%-------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
muFuel=niFuel.*rhoFuel;


% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=[1.0, 1.5, 2.0, 3.0].*ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
[m_DN n_DN]=size(D_NozzleOut);
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=4.*D_NozzleOut;

% Izračunavanje gustine gasa u komori
rhoGasLP=p_GasLP./(R_Gas.*T_GasLP);
rhoGasHP=p_GasHP./(R_Gas.*T_GasHP);
% Viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
[muGasLP, niGasLP]=VA_Sutherland(p_GasLP,T_GasLP);
[muGasHP, niGasHP]=VA_Sutherland(p_GasHP,T_GasHP);
for i=1:1:n_DN
    for j=1:1:n_pRail
    % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasLP,rhoFuel,L_Nozzle(1,i),
            D_NozzleOut(1,i));
    % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),niFuel,0.0);
    % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
    % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber(D_NozzleOut(1,i),u(i,j),rhoGasLP,sigmaFuel);

        [SMDD_LP_H(i,j), SMDDis_LP_H(i,j),SMDDcs_LP_H(i,j),]=SMD_Hiroyasu(
            ReNumLiquid(i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasLP,rhoFuel,rhoGasLP);
        [SMDD_LP_E(i,j), SMD_LP_E(i,j), AE(i,j)]=SMD_Elkotb(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),rhoFuel,rhoGasLP,0.7,D_NozzleOut(1,i));
    end
end
SMD_LP_H=SMDD_LP_H.*D_NozzleOut';

for i=1:1:n_DN
    for j=1:1:n_pRail
    % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
        [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_GasHP,rhoFuel,L_Nozzle(1,i),
            D_NozzleOut(1,i));
    % Izračunavanje Rejnoldsovog broja
        [ReNumLiquid(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut(1,i)),u(i,j),niFuel,0.0);
```

```
    % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number)
        [WeNumLiquid(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut(1,i)),u(i,j),rhoFuel,sigmaFuel);
    % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number)
        [WeNumGas(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut(1,i)),u(i,j),rhoGasHP,sigmaFuel);

        [SMDD_HP_H(i,j), SMDDisHP_H(i,j),SMDDcsHP_H(i,j)]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquid(
            i,j),WeNumLiquid(i,j),muFuel,muGasHP,rhoFuel,rhoGasHP);
        [SMDD_HP_E(i,j), SMD_HP_E(i,j), AE(i,j)]=SMD_Elkotb(ReNumLiquid(i,j),
            WeNumLiquid(i,j),rhoFuel,rhoGasHP,0.7,D_NozzleOut(1,i));
    end
end
SMD_HP_H=SMDD_HP_H.*D_NozzleOut';

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
colororder('default');
figure(1)
    p11=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    p12=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_LP_E(:,:).*1.0E+06, '--');
    grid on;
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu}, SMD_{@Elkotb} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
%     ytickformat('%.0f');
%     ylim([0,20]);
%     yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);
% Prikaz legende za model Hiroyasu
    LegendTitle={'D_{Nozzle} [\mum]'};
    LegendTitle_Hiroyasu={'D_{Nozzle} [\mum]';'Hiroyasu 1989'};
    LegendLabel1=num2str([D_NozzleOut.*1.0E+06]','%.0f');
    lgd_p11=legend([p11],LegendLabel1,'Location','North','FontSize',8);
    title(lgd_p11,LegendTitle_Hiroyasu);
% Prikaz legende za model Elkotb
    a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
    LegendTitle_Elkotb={'D_{Nozzle} [MPa]';'Elkotb 1982'};
    lgd_p12=legend(a2,[p12],LegendLabel1,'Location','NorthEast','FontSize',8);
    title(lgd_p12,LegendTitle_Elkotb);

colororder('default');
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
figure(2)
    p21=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    p22=plot(p_Rail(1,:).*1.0E-06,SMD_HP_E(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    grid on;
%     plot(p_Rail(1,posLPX).*1.0E-06,posLPY.*1.0E+06,'ok', MarkerSize=6);
%     hold on;
%     xline(20,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
%     xline(120,'--k', LineWidth=0.75);
%     hold on;
```

```
    xlabel ('p_{INJ} [MPa]');
    ylabel('SMD_{@Hiroyasu}, SMD_{@Elkotb} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    ytickformat('%.0f');
%     ylim([0,30]);
%     yticks=0:2:12;
    xlim([(p_RailMin-5.*dp_Rail).*1.0E-06,(p_RailMax+5.*dp_Rail).*1.0E-06]);

% Prikaz legende za model Hiroyasu
    LegendTitle={'D_{Nozzle} [\mum]'};
    LegendTitle_Hiroyasu={'D_{Nozzle} [\mum]';'Hiroyasu 1989'};
    LegendLabel1=num2str([D_NozzleOut.*1.0E+06]','%.0f');
    lgd_p21=legend([p21],LegendLabel1,'Location','North','FontSize',8);
    title(lgd_p21,LegendTitle_Hiroyasu);
% Prikaz legende za model Elkotb
    a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
    LegendTitle_Elkotb={'D_{Nozzle} [MPa]';'Elkotb 1982'};
    lgd_p22=legend(a2,[p22],LegendLabel1,'Location','NorthEast','FontSize',8);
    title(lgd_p22,LegendTitle_Elkotb);
```

6.7.8 Prečnik kapljice nakon primarnog raspada - model Rajc

Primenom modela Rajc [64] proračunati očekivanu vrednost prečnika kapljice goriva nakon primarnog raspada i rezultate proračuna uporediti sa vrednostima srednjeg Sauterovog prečnika dobijenim modelom Hirojasu [46, 62]. Proračun sprovesti za slučaj obrazovanja smeše benzina i vazduha tokom početne faze sabijanja pri različitim pritiscima u komori pri nepromenjenom pritisku goriva u akumulatoru. Pretpostaviti sledeće uslove:

- Ubrizgavanje se obavlja u mirnu sredinu;
- Opseg pritiska u cilindru tokom obrazovanja smeše: 0,1 MPa do 0,3 MPa;
- Stanje gasa u cilindru u referentnom položaju klipa (zatvoren usisni ventil): pritisak 0,1 MPa, temperatura 330 K;
- Pritisak i temperatura goriva u akumulatoru: 60 MPa i 350 K;
- Opseg brzine strujanja kroz mlaznicu: 1 $^{m}/_{s}$ do 300 $^{m}/_{s}$;
- Prečnika izlaznog otvora mlaznice je $150 \cdot 10^{-6}$ m, a odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice 4.

Uzeti u obzir uticaj pritiska na promenu gustine i viskoznosti goriva. Pretpostaviti izentropsku promenu stanja u cilindru. Rezultate proračuna prikazati grafički, u zavisnosti od brzine strujanja kroz mlaznicu za diskretne vrednosti pritiska gasa u cilindru.

Rešenje

Ovaj primer na prvi pogled nema pun fizički smisao i rezultati, pa i zaključci mogu biti donekle sporni jer se postavkom zadatka traži poređenje rezultata proračuna prečnika kapljice na kraju primarnog raspada i vrednosti srednjeg Sauterovog prečnika kao globalne slike krajnjeg rezultata procesa formiranja kapljice. Međutim, za razliku od prethodnih primera u kojima je proračun sproveden za širok opseg pritiska goriva, u ovom primeru se proračun sprovodi za širok opseg brzina istrujavanja goriva čime se akcenat stavlja i na fenomene koji se mogu javiti pri niskim brzinama istrujavanja goriva, kakav je slučaj npr. na početku pri odizanju iglice brizgača ili na kraju procesa ubrizgavanja pri njenom spuštanju u sedište.

Izraz za Rajcov model za proračun prečnika kapljice nakon primarnog raspada predstavlja aproksimaciju rešenja složenog sistema jednačina u kojem figuriše talasna dužina oscilatornih pojava na periferiji mlaza (teorija raspada izazvana talasom, Kelvin-Helmholcova teorija). Izraz je u izvornom obliku dat kao odnos talasne dužine i karakterističnog poluprečnika mlaza izražen u funkciji značica:

$$\frac{\Lambda}{a} = 9{,}02 \cdot \frac{(1 + 0{,}45 \cdot Oh^{0,5})^{0,12} \cdot \left(1 + 0{,}4 \cdot \left(Oh \cdot We_G^{0,5}\right)^{0,7}\right)}{\left(1 + 0{,}87 \cdot We_G^{1,67}\right)^{0,6}} \tag{6.100}$$

Na sličan način prikazana je i aproksimacija rešenja za najveći stepen rasta amplitude talasnih poremećaja:

$$\Omega \cdot \left(\frac{\rho_F \cdot a^3}{\sigma_F}\right)^{0,5} = \frac{0{,}34 + 0{,}38 \cdot We_G^{1,5}}{(1 + Oh) \cdot \left(1 + 1{,}4 \cdot \left(Oh \cdot We_G^{0,5}\right)^{0,6}\right)} \tag{6.101}$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We_F}}{Re_F} \tag{6.102}$$

Veličina a pretpostavlja karakterističnu dužinsku veličinu mlaza. Prema izvornom obliku izraza, ta veličina bi mogla predstavljati polovinu pretpostavljenog prečnika mlaza D_S, ili u prvom približenju polovinu prečnika izlaznog otvora mlaznice D_N:

$$a = 0{,}5 \cdot D_S \approx 0{,}5 \cdot D_N \tag{6.103}$$

Kritična vrednost prečnika kapljice nakon primarnog raspada procenjuje se sledećim empirijskim izrazom:

$$D_{BU1,crit} \approx 2 \cdot B_0 \cdot \Lambda \mid B_0 = 0{,}61 \tag{6.104}$$

Vrednost prečnika kapljice se u sledećem koraku procenjuje na osnovu poređenja sa karakterističnim prečnikom mlaza:

$$D_{BU1} = \min \begin{cases} D_{BU1,crit} & D_{BU1,crit} \leq 2 \cdot a \text{ ili } D_{BU1,crit} \leq D_N \\ 2 \cdot \left(\dfrac{3 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot u}{8 \cdot \Omega} \right)^{0,33} & D_{BU1,crit} > 2 \cdot a \text{ ili } D_{BU1,crit} > D_N \\ 2 \cdot \left(\dfrac{3 \cdot a^2 \cdot \Lambda}{16} \right)^{0,33} & \end{cases} \tag{6.105}$$

$$D_{BU1} = \min \begin{cases} D_{BU1,crit} & \mid D_{BU1,crit} \leq 2 \cdot a \text{ ili } D_{BU1,crit} \leq D_N \\ 2 \cdot \left(\dfrac{3 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot u}{8 \cdot \Omega} \right)^{0,33} & \mid D_{BU1,crit} > 2 \cdot a \text{ ili } D_{BU1,crit} > D_N \\ 2 \cdot \left(\dfrac{3 \cdot a^2 \cdot \Lambda}{16} \right)^{0,33} & \end{cases} \tag{6.106}$$

Ostale veličine definisane su na sledeći način:

Λ [m] Talasna dužina talasnog poremećaja na površini mlaza;

Ω [m/s] Maksimalna stopa rasta amplitude talasnog poremećaja na površini mlaza;

a [m] Karakteristični poluprečnik mlaza, u prvom približenju se može pretpostaviti da je prečnik mlaza približno jednak prečniku izlaznog otvora mlaznice brizgača D_N;

D_{BU1} [m] Prečnik kapljice nakon primarnog raspada;

Re_F [−] Rejnoldsov broj za tečnu fazu (gorivo);

We_F [−] Veberov broj za tečnu fazu (gorivo);

We_G [−] Veberov broj za gasnu fazu (vazduh);

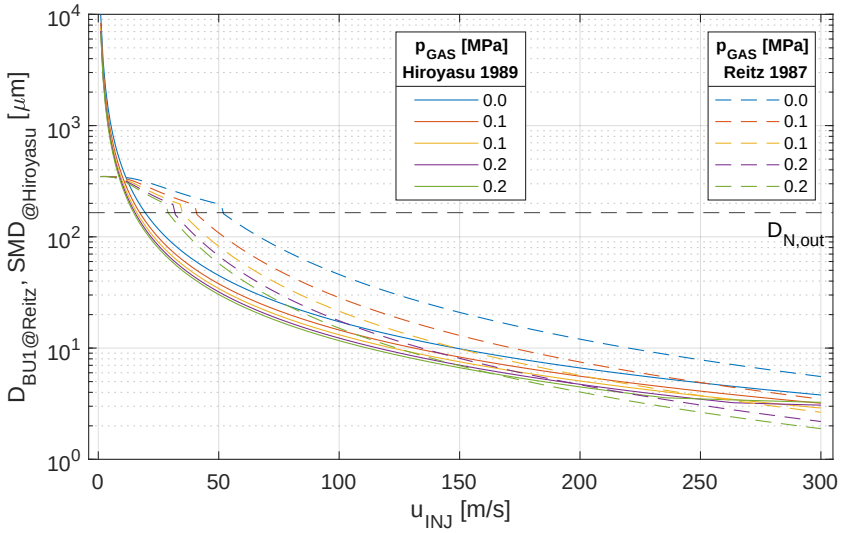
Oh [−] Onezorgeov broj (Z).

Rezultati proračuna veličine kapljice prikazani su na logaritamskoj skali na slici 6.69. Jasno se uočava da bez obzira na vrednost pritiska u komori, oba modela za niske brzine istrujavanja goriva daju vrednosti prečnika kapljice veće od prečnika otvora mlaznice koji je označen isprekidanom horizontalnom linijom.

Model Hirojasu, međutim, daje nerealno visoke vrednosti srednjeg Sauterovog prečnika za minimalne brzine strujanja, više od 10 mm (10^4 m), što je gotovo 70 puta više od zadatog prečnika izlaznog otvora mlaznice. Model Rajc takođe daje visoke vrednosti, približno 300 μm, ali se takav slučaj može smatrati očekivanim i

granično prihvatljivim imajući u vidu osnovne odlike Rejlijevog režima strujanja koje je karakteristično za niske brzine isticanja. Zaključak koji se može izvući i na osnovu toga dati preporuka, jeste da se pri proračunu veličine kapljice u dinamičkim uslovima, pri čemu se u obzir uzima dinamika izdizanja iglice brizgača i postupno uspostavljanje punog protoka kroz brizgač, tokom kojih se menja i brzina istrujavanja goriva ne mogu koristiti modeli sa globalnim prikazom, kakvi su npr. modeli Hirojasu ili Elkotb.

Takođe, kod rezultata proračuna modelom Rajc, uočava se eksponencijalni pad prečnika kapljice sa velikim gradijentom u oblasti niskih brzina strujanja, a zatim i diskontinuitet u oblasti u kojoj se menja diskretan kriterijum za izračunavanje prečnika kapljice na kraju primarnog raspada. Može se konstatovati da je za proces formiranja smeše, na osnovu procenjenih vrednosti prečnika kapljice, zapravo, kritična oblast niskih brzina istrujavanja goriva. U oblasti najvećih brzina strujanja posmatranih u okviru ovog primera uočava se da rezultat primarnog raspada kapljice ne odstupa bitno od vrednosti očekivanog srednjeg Sauterovog prečnika, što upućuje na zaključak da se pri visokim brzinama istrujavanja (visoki pritisci ubrizgavanja) u principu, velike promene ne očekuju na kraju sekundarnog raspada.



Slika 6.69: Prečnik kapljice i SMD za različite brzine strujanja goriva kroz mlaznicu prema modelima Hirojasu i Rajc.

Program 6.75: `SMD_08.m`

```
% Program za izračunavanje srednjeg Sauterovog prečnika kapljice (SMD -
% Sautter Mean Diameter)
%
% Prikaz uticaja pritiska gasa u komori pri različitim vrednostima pritiska
```

```
% ubrizgavanja dizel-goriva tokom visokopritisnog dela ciklusa
% slučaj nepromenjenih termodinamičkih uslova tokom ubrizgavanja
% (ubrizgavanje u mirnu sredinu sa promenljivim vrednostima gustine)
%
% S. J. Popović
% 202403.v01
% P. Mrđa rev.
%
% Ref.
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5

% Hiroyasu H, Arai M, Tabata M (1989)
% Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray.
% SAE paper 890464

% Hiroyasu H, Arai M (1990)
% Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines.
% SAE-paper 900475

clear;
close all;
clc;

% p_Rail=50E+05:50.0E+05:2000.0E+05;
% p_Gas=50.0E+05;
% B=5;
% rhoGasSOI=17.00;      % u [kg/m3]
% rhoGas=1.2;           % u [kg/m3]
% p_Gas=1.0E+05:1.0E+05:5.0E+05;
% R_Gas=287.15;
% rhoGas=p_Gas./(R_Gas.*T_Gas);

% Definisanje opsega promene pritiska ubrizgavanja
% p_RailMin=50E+05;
% p_RailMax=600E+05;
% dp_Rail=10.0E+05;
% p_Rail=p_RailMin:dp_Rail:p_RailMax;
% [m_pRail n_pRail]=size(p_Rail);
p_Rail=600.0E+05;
T_Fuel=350;

% Definisanje opsega promene pritiska gasa u komori za sagorevanje
p_GasMin=0.5E+05;
p_GasMax=2.5E+05;
dp_Gas=0.5E+05;
p_Gas=p_GasMin:dp_Gas:p_GasMax;
% p_Gas=[1.364, 2.160].*1.0E+05;
% rhoGas=[1.378, 1.960];
[m_pGas n_pGas]=size(p_Gas);

% Definisanje opsega brzine strujanja kroz mlaznicu
```

```
u_Min=1.0;
u_Max=300.0;
du=1.0;
u=u_Min:du:u_Max;
[m_u n_u]=size(u);


% Definisanje eksponenta izentrope/politrope
n=1.4;

% Referentna temperatura gasa
T_Gas0=330.0;
p_Gas0=1.0E+05;

% Učitavanje podataka o karakteristikama goriva
% Dizel-gorivo EN590
FuelType='gasoline EN228'
[FP]=FuelData(FuelType);

% Definisanje gasne konstante za gas
% Pretpostavka: gas u komori je vazduh i ponaša se kao idealan
R_Gas=287.15;

%-----------------------------------------------------------
% Izračunavanje dinamičke viskoznosti goriva
% % muFuel=niFuel.*rhoFuel;
ViscDyn0=VFG_Vogel(T_Fuel,'RON95');
ViscDyn=VFG_Barus(ViscDyn0,p_Rail,'RON95_LL');
muFuel=ViscDyn;

% Izračunavanje gustine goriva
[rhoFuel]=DFG_Trost(T_Fuel,'RON95','Polynominal');
niFuel=muFuel/rhoFuel; % [m^2/s]

%-----------------------------------------------------------
% Preračunavanje jedinica
% Preračunavanje kinematske viskoznosti na jedinice SI sistema
[niFuelRef]=UnitConverterViscosity(FP.Viscosity,FP.ViscUnit,FP.ViscUnitSI,FP.
    ViscType);
[niFuel0]=UnitConverterViscosity(niFuel,FP.ViscUnitSI,FP.ViscUnitSI,FP.ViscType);
niFuel=niFuel0;

% Preračunavanje površinskog napona na jedinice SI sistema
[sigmaFuel]=UnitConverterSurfTens(FP.SurfTens,FP.SurfTensUnit,FP.SurfTensUnitSI);
% sigmaFuel=0.02; % [N/m] surface tension
% Preračunavanje gustine na jedinice SI sistema
% [rhoFuel]=UnitConverterDensity(FP.rho, FP.rhoUnit, FP.rhoUnitSI);

% Učitavanje podataka o brigaču (mlaznici)
[ND]=NozzleData();
D_NozzleOut=1.5.*ND.dOut;
% D_Nozzle=ND.dOut:ND.dOut.*0.1:ND.dOut.*3.0;
% [DN_m DN_n]=size(D_Nozzle)
r0_Nozzle=ND.r0In;
L_Nozzle=ND.L;
```

```
for i=1:1:n_pGas
    for j=1:1:n_u

        % Izračunavanje gustine gasa u komori
        % Izračunavanje temperature gasa za definisani opseg pritiska gasa i
        % izabranu vrstu promene stanja (izentropa/politropa)
        T_Gas(1,i)=T_Gas0.*(p_Gas(1,i)./p_Gas0).^((n-1)./n);
        rhoGas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_Gas(1,i));
%         rhoGas_Calc(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*T_GasCalc(1,i));
%         T_Gas(1,i)=p_Gas(1,i)./(R_Gas.*rhoGas(1,i));
        % viskoznost gasa (pretpostavka da je gas u komori čist vazduh)
        [muGas(1,i), niGas(1,i)]=VA_Sutherland(p_Gas(1,i),T_Gas(1,i));

% ------------------------------
    % Model Hiroyasu
        % Izračunavanje brzine strujanja na izlazu iz mlaznice brizgača
%         [u(i,j)]=NozzleVelocity(p_Rail(1,j),p_Gas(1,i),rhoFuel,L_Nozzle,
    D_NozzleOut);
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja za model Hiroyasu
        [ReNumLiquidH(i,j)]=dlqReynolds((D_NozzleOut),u(1,j),niFuel,0.0);
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number) za model
            Hiroyasu
        [WeNumLiquidH(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(1,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number) za model Hiroyasu
        [WeNumGasH(i,j)]=dlqWeber((D_NozzleOut),u(1,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);

        [SMDD(i,j), SMDDis(i,j),SMDDcs(i,j),]=SMD_Hiroyasu(ReNumLiquidH(i,j),
            WeNumLiquidH(i,j),muFuel,muGas(1,i),rhoFuel,rhoGas(1,i));

% ------------------------------
    % Model Reitz & Arcoumanis @ SP
    % Primarni raspad
        a=0.5.*D_NozzleOut;
        % Izračunavanje Rejnoldsovog broja za model Reitz
        [ReNumLiquidR(i,j)]=dlqReynolds(a,u(1,j),niFuel,0.0);
        % Izračunavanje Veberovog broja za tečnost (Weber Liquid Number) za model
            Reitz
        [WeNumLiquidR(i,j)]=dlqWeber(a,u(1,j),rhoFuel,sigmaFuel);
        % Izračunavanje Onezorgeovog broja za model Reitz
        [OhNumLiquidR(i,j)]=dlqOhnesorge(ReNumLiquidR(i,j), WeNumLiquidR(i,j));
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number) za model Reitz
        [WeNumGasR(i,j)]=dlqWeber(a,u(1,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);
        % Prečnik kapljice za primarni raspad
        [D_BU11(i,j), kriterijum(i,j)]=DDBU1_Reitz(WeNumGasR(i,j), OhNumLiquidR(i,j
            ), rhoFuel,sigmaFuel, u(1,j), a, 0);
    % Sekundarni raspad
        % Izračunavanje Veberovog broja za gas (Weber Gas Number) za
        % sekundarni raspad
        u2(1,j)=u(1,j).*1;
        T_Fuel2=0.5.*(T_Fuel+T_Gas(1,i));
        ViscDyn0=VFG_Vogel(T_Fuel2,'RON95');
        p_Fuel2=p_Rail; %p_Gas(1,i)
        ViscDyn=VFG_Barus(ViscDyn0,p_Fuel2,'RON95_LL');
        muFuel2=ViscDyn;
```

```
        [rhoFuel2]=DFG_Trost(T_Fuel2,'RON95','Polynominal');
        [WeNumGas2(i,j)]=dlqWeber(D_BU11(i,j),u2(1,j),rhoGas(1,i),sigmaFuel);
%
%
%
% ----------------------------
%     % Model Reitz & Arcoumanis @ MK
%
%     [SMD_A22(i,j), D_BU12(i,j), We_gas1(i,j), We_gas2(i,j), t_BU1(i,j), t_BU2(i,j
    ), t_BU(i,j)]=...
%                     FuelWBM(D_NozzleOut,rhoFuel,rhoGas(1,i),u(1,j));

    end
end
SMD_H=SMDD.*D_NozzleOut;
% SMD_IncompleteSpray=SMDDis.*D_NozzleOut;
% SMD_CompleteSpray=SMDDcs.*D_NozzleOut;
% dSMD(:,:)=SMD_IncompleteSpray(:,:)-SMD_CompleteSpray(:,:);
% % grad_dSMD(1,:)=gradient(dSMD(1,:));
% dSMD2(:,:)=(dSMD(:,:).*1E+06).^2;
% for i=1:1:n_pGas
%     IS2CS(1,i)=min(dSMD2(i,:),[],2);
%     posX(1,i)=find(dSMD2(i,:)==IS2CS(1,i));
%     posY(1,i)=SMD(i,posX(1,i));
% end

% Grafički prikaz zavisnosti SMD od pINJ i pGAS
% Označavanje režima prelaska iz oblasti nepotpuno u zonu potpuno
% razvijenog mlaza
% Prikaz linije SMDvspINJ sa promenljivim karakteristikama u oblasti
% nepotpuno i potpuno razvijenog mlaza
% Prikaz u linearnim koordinatama, na ograničenom opsegu pINJ u kojoj se
% nalaze prelazni režimi
% colororder('default');
% figure(1)
%     plot(u(1,:),SMD_H(:,:).*1.0E+06, '-');
%     hold on;
%     grid on;
%     xlabel ('u_{INJ} [m/s]');
%     ylabel('SMD_{@Hiroyasu} [\mum]');
%     xtickformat('%.0f');
%     ytickformat('%.1f');
%     ylim([0,10]);
%     yticks=0:1:10;
%     xlim([(u_Min-5.*du),(u_Max+5.*du)]);
%     LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.2f');
%     lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
%     title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

colororder('default');
figure(2)
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    y21=semilogy(u(1,:),SMD_H(:,:).*1.0E+06, '-');
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
```

```
    y22=semilogy(u(1,:),D_BU11(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    y23=yline(D_NozzleOut.*1.0E+06,'k--',{'D_{N,out}'},'LabelVerticalAlignment','
        bottom');
        y1.LineWidth=1.5;
        y1.LabelVerticalAlignment = 'top';
        y1.LabelHorizontalAlignment = 'center';
        y1.FontSize=8;
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('u_{INJ} [m/s]');
    ylabel('D_{BU1@Reitz}, SMD_{@Hiroyasu} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    xlim([(u_Min-5.*du),(u_Max+5.*du)]);
    LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
    title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% Prikaz legende
LegendTitle_Hiroyasu={'p_{GAS} [MPa]'; 'Hiroyasu 1989'};
LegendTitle_Reitz=   {'p_{GAS} [MPa]'; '  Reitz 1987  '};
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.1f');
% Prikaz legende za model Hiroyasu
lgd_y21=legend([y21],LegendLabel,'Location','North','FontSize',8);
title(lgd_y21,LegendTitle_Hiroyasu);
a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Zama et al. 2011
lgd_y22=legend(a2,[y22],LegendLabel,'Location','NorthEast','FontSize',8);
title(lgd_y22,LegendTitle_Reitz);


colororder('default');
figure(3)
%     set(gca,'ColorOrderIndex',1);
%     y21=plot(u(1,:),SMD_H(:,:).*1.0E+06, '-');
%     hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    y32=plot(u(1,:),D_BU11(:,:).*1.0E+06, '--');
    hold on;
    set(gca,'ColorOrderIndex',1);
    y33=plot(u(1,:),SMD_A21(:,:).*1.0E+06, ':');
    hold on;
    y34=yline(D_NozzleOut.*1.0E+06,'k--',{'D_{N,out}'});
        y1.LineWidth=1.5;
        y1.LabelVerticalAlignment = 'top';
        y1.LabelHorizontalAlignment = 'center';
        y1.FontSize=8;
    hold on;
    grid on;
    xlabel ('u_{INJ} [m/s]');
    ylabel('D_{BU1@Reitz}, SMD_{@Hiroyasu}, SMD2_{@Arcoumanis} [\mum]');
    xtickformat('%.0f');
    xlim([(u_Min-5.*du),(u_Max+5.*du)]);
    LegendLabel=num2str([p_Gas.*1.0E-06]','%.2f');
    lgd = legend(LegendLabel,'location','northeast');
```

```
    title(lgd,'p_{GAS} [MPa] ');

% Prikaz legende
LegendTitle_Hiroyasu={'p_{GAS} [MPa]'; 'Hiroyasu 1989'};
LegendTitle_Reitz=   {'p_{GAS} [MPa]'; '  Reitz 1987  '};
LegendLabel=num2str((p_Gas.*1.0E-06)','%.1f');
% Prikaz legende za model Hiroyasu
lgd_y21=legend([y21],LegendLabel,'Location','North','FontSize',8);
title(lgd_y21,LegendTitle_Hiroyasu);
a2=axes('position',get(gca,'position'),'visible','off');
% Prikaz legende za model Zama et al. 2011
lgd_y22=legend(a2,[y22],LegendLabel,'Location','NorthEast','FontSize',8);
title(lgd_y22,LegendTitle_Reitz);
```

Program 6.76: `DDBU1_Reitz.m`

```
function [D_BU1, crit]=DDBU1_Reitz(WeNumGas, OhNum, rhoFuel, sigmaFuel, u, a, par)
% function [D_BU1, crit]=DDBU1_Reitz(WeNumFuel, WeNumGas, ReNumFuel, OhNum, rhoFuel
    , sigmaFuel, u, D, par)
% Funkcija za izračunavanje prečnika kapljice nakon primarnog raspada
% Model Reitz
% S. J. Popović
% 202403.v01
% Ref.
% Gunnar Stiesch
% Modeling Engine Spray and Combustion Processes, Springer-Verlag BerlinHeidelberg
    GmbH
% ISBN 978-3-642-05629-1
% ISBN 978-3-662-08790-9 (eBook)
% Carsten Baumgarten
% Mixture Formation in Internal Combustion Engines
% ISBN 1860-4846
% ISBN 10 3-540-30835-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
% ISBN 13 978-3-540-30835-5
% str 15(33) izraz (2.12)
    % Reitz, R. D.:
    % Modeling atomization process in high pressure vaporizing sprays
    % Atomization and spray technology 3 (1987) 309-337
    % str.8, izr. 4, 5
    % str.13, izr. 10a, 10b

% Pregled korišćenih oznaka
% D              [m]          prečnik mlaza (prečnik otvora mlaznice)
% WeNumFuel      [-]          Veberov broj za gorivo
% WeNumGas       [-]          Veberov broj za gas
% ReNumFuel      [-]          Rejnoldsov broj za gorivo
% OhNum          [-]          Onezorgeov broj
% D_BUprim       [m]          prečnik kapljice nakon primarnog raspada


D=2*a;
% Izračunavanje vrednosti članova u izrazu za Lambda/a
% OhNum=(WeNumFuel.^(+0.50))./ReNumFuel;
```

```
T=OhNum.*(WeNumGas.^(+0.50));
R10=9.02;
R11=1.0+0.45.*(OhNum.^(+0.50));
R12=1.0+0.40.*(T.^(+0.70));
R13=1.0+0.87.*(WeNumGas.^(+1.67));
Lambda_a=R10.*R11.*R12./(R13.^(+0.60));
Lambda=Lambda_a.*(a);

% Izračunavanje vrednosti članova u izrazu za Omega
R21=0.34+0.38.*WeNumGas.^(+1.50);
R22=1.0+OhNum;
R23=1.0+1.4.*T.^(+0.60);
R24=(rhoFuel.*((a).^(+3.0))./sigmaFuel).^(+0.50);
Omega=R21/(R22.*R23.*R24);

% Određivanje koeficijenta B0
if par==0
    B0=0.61;
else
    B0=par;
end

D_crit=2.*B0.*Lambda;
% Provera kriterijuma za način izračunavanja prečnika kapljice
if D_crit<=D
    D_BU1=D_crit;
    crit=1;
elseif D_crit>D
    fOmega_1=2.0.*(3.0.*3.14.*((a).^(+2.0)).*u./(2.*Omega)).^(+0.33);
    fOmega_2=2.0.*(3.0.*((a).^(+2.0).*Lambda./4.0)).^(+0.33);
    D_BU1=min(fOmega_1, fOmega_2);
    crit=2;
else
end
```

Spisak slika

1.1 Zavisnost dinamičke viskoznosti vazduha od temperature. 2
1.2 Zavisnost kinematske viskoznosti vazduha od temperature za zadate diskretne vrednosti pritiska. 2
1.3 Objedinjeni prikaz zavisnost dinamičke i kinematske viskoznosti vazduha u funkciji pritiska za zadate diskretne vrednosti eksponenta politrope. 5
1.4 Specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku za H_2O. . . . 22
1.5 Specifična entalpija za H_2O. 23
1.6 Specifična standardna entropija za H_2O. 23

2.1 Zavisnost gustine normalnog oktana od temperature za različite vrednosti pritiska. 29
2.2 Zavisnost modula stišljivosti normalnog oktana (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska. 29
2.3 Zavisnost gustine normalnog oktana od pritiska za različite vrednosti temperature. 34
2.4 Zavisnost modula stišljivosti normalnog oktana (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od pritiska za različite vrednosti temperature. 34
2.5 Zavisnost gustine različitih ugljovodonika od pritiska za različite vrednosti temperature. 35
2.6 Zavisnost modula stišljivosti različitih ugljovodonika od pritiska za različite vrednosti temperature. 36
2.7 Gustina različitih ugljovodoničnih goriva u funkciji pritiska za različite temperature goriva. 38
2.8 Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *n-heptan*. 38
2.9 Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *n-oktan*. 39

2.10 Zavisnost modula stišljivosti i koeficijenta stišljivosti od pritiska za diskretne vrednosti temperature za *etanol*. 39
2.11 Zavisnost gustine različitih ugljovodonika u funkciji temperature određeni prema modelu Elbro. 47
2.12 Zavisnost dinamičke viskoznosti od temperature za različite alkane (model Arenijus). 51
2.13 Zavisnost dinamičke viskoznosti od pritiska za različite alkane (model Barus). 54

3.1 Zavisnost gustine dizel-goriva od temperature za različite vrednosti pritiska (model Pairi). 61
3.2 Zavisnost modula stišljivosti dizel-goriva (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska (model Pairi). 62
3.3 Gustine letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi). 66
3.4 Moduli stišljivosti (*Bulk Modulus*) letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi). 66
3.5 Izotermski koeficijenti stišljivosti letnjeg i zimskog (w) dizel-goriva u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska u magistrali (model Pairi). 67
3.6 Zavisnost gustine goriva od temperature za različite vrednosti pritiska (model Tejt-Taman). 70
3.7 Zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) od temperature za različite vrednosti pritiska (model Tejt-Taman). 71
3.8 Gustina dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature. 75
3.9 Brzina zvuka za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (Safarov). 77
3.10 Koeficijent stišljivosti za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (β) određen na osnovu jednačine 3.5 i brzine zvuka iz [21] (Safarov). . 78
3.11 Koeficijent stišljivosti za dizel-gorivo u funkciji pritiska i temperature (β) prikazan na osnovu podataka iz [21] (Safarov). 78
3.12 Zavisnost gustine motornog benzina od pritiska za različite vrednosti temperature (model Klaus). 85
3.13 Zavisnost modula stišljivosti (leva y-osa) i koeficijenta stišljivosti (desna y-osa) motornog benzina od pritiska za različite vrednosti temperature (model Klaus). 85

3.14 Dinamička viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus). 92
3.15 Kinematska viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus). 93
3.16 Gustina dizel-goriva (ULSD) u funkciji temperature za različite vrednosti pritiska (model Barus). 93
3.17 Gustina dizel-goriva (ULSD) u funkciji pritiska za različite vrednosti temperature (model Barus). 94
3.18 Dinamička viskoznost dizel-goriva (ULSD) u funkciji pritiska za različite vrednosti temperature(model Barus). 94
3.19 Dinamička viskoznost dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature [23]. 101
3.20 Dinamička viskoznost dizel-goriva u funkciji pritiska i temperature. . 101
3.21 Dinamička viskoznost motornih benzina u funkciji temperature - model Vogel [24]. 105
3.22 Dinamička viskoznost motornih benzina u funkciji pritiska za diskretne vrednosti tetemperature - model Barus [18]. 105
3.23 Entalpija isparavanja za vodu i pojedine ugljovodonike u funkciji temperature [25]. 110
3.24 Podešavanje početnih uslova tražene aproksimacije. 112
3.25 Pritisak zasićene pare vode, metanola, benzena i acetona u funkciji temperature. 113

4.1 Osnovni podaci dati u Periodnom sistemu elemenata. 115
4.2 Donja toplotna moć alkana i emisija CO_2 pri njihovom potpunom sagorevanju. 139
4.3 Sastav produkata sagorevanja u funkciji sastava smeše za niskotemperaturski model sagorevanja i gorivo sastava $CH_{2,25}O_{0,25}$. 144

5.1 Grafička interpretacija protočne karakteristike brizgača, vremena ubrizgavanja i vremena rampe. 148
5.2 Šema eksperimentalne instalacije za ispitivanje protočne karakteristike brizgača i vremena rampe u dinamičkim uslovima. 157
5.3 Populacija rešenja pri određivanju dinamičke karakteristike brizgača. 160
5.4 Histogram rešenja za karakteristiku brizgača i pozicija konačnih rešenja. 160
5.5 Histogram rešenja za vreme rampe i pozicija konačnih rešenja. 161
5.6 Tok struje kroz visokoomski brizgač za tri različita režima ubrizgavanja. 165

5.7 Profil struje kroz brizgače i kroz primar induktivnog kalema (datoteka `T0001`). 166
5.8 Profil struje kroz brizgače i kroz primar induktivnog kalema (datoteka `T0002`). 166
5.9 Struja pobude induktivnih brizgača (niskoomski, *Peak & Hold* upravljanje). 168

6.1 Zavisnost prečnika kapljice standardnog motornog benzina od relativne brzine strujanja goriva u opsegu od 10 $^{m}/_{s}$ do 100 $^{m}/_{s}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 1 $^{kg}/_{m^3}$ do 2 $^{kg}/_{m^3}$. 173
6.2 Zavisnost prečnika kapljice standardnog motornog benzina od relativne brzine strujanja goriva u opsegu od 100 $^{m}/_{s}$ do 500 $^{m}/_{s}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 4 $^{kg}/_{m^3}$ do 20 $^{kg}/_{m^3}$. 173
6.3 Zavisnost prečnika kapljice dizel-goriva od relativne brzine strujanja goriva za opseg gustine gasa od 1,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 4,0 $^{kg}/_{m^3}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 1 $^{kg}/_{m^3}$ do 4 $^{kg}/_{m^3}$. 177
6.4 Zavisnost prečnika kapljice dizel-goriva od relativne brzine strujanja goriva za opseg gustine gasa od 5,0 $^{kg}/_{m^3}$ do 65,0 $^{kg}/_{m^3}$ ubrizganog u vazduh gustina u opsegu od 5 $^{kg}/_{m^3}$ do 65 $^{kg}/_{m^3}$. 177
6.5 Relativna brzina strujanja dizel-goriva u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 182
6.6 Rejnoldsov broj dizel-goriva u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 182
6.7 Zavisnost tečnog (za dizel-gorivo) i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 183
6.8 Relativna brzina strujanja motornog benzina u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 190
6.9 Rejnoldsov broj za motorni benzin u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 191
6.10 Zavisnost tečnog (za motorni benzin) i gasnog Veberovog broja u zavisnosti od pada pritiska na mlaznici brizgača za diskretne vrednosti prečnika mlaznice. 191
6.11 Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (linearna osa) za različite modele. 194
6.12 Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji *Re* (logaritamska osa) za različite modele. 194

6.13 Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji Re (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose ${}^{r_{oN}}/_{D_{N,\text{out}}}$. 202
6.14 Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji Re (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose ${}^{L_N}/_{D_N}$. 211
6.15 Koeficijent pražnjenja mlaznice brizgača u funkciji Re (logaritamska osa) za različite modele i različite odnose ${}^{D_{N,\text{in}}}/_{D_{N,\text{out}}}$. 216
6.16 Kavitacioni broj u funkciji Re za različite modele i različite odnose ${}^{D_{N,\text{in}}}/_{D_{N,\text{out}}}$. 223
6.17 Kavitacioni broj u funkciji Re za različite modele i različite odnose ${}^{D_{N,\text{in}}}/_{D_{N,\text{out}}}$. 223
6.18 Kavitacioni broj za različite pritiske gasa u komori i kritični kavitacioni broj za različite radijuse zaobljenja za cilindričnu mlaznicu brizgača. 229
6.19 Kavitacioni broj za različite pritiske gasa u komori i kritični kavitacioni broj za različite radijuse zaobljenja za konusnu mlaznicu brizgača. . . 229
6.20 Vremena primarnog raspada mlaza dizel-goriva u funkciji pritiska ubrizgavanja goriva za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora - niskopritisni deo ciklusa. 236
6.21 Vremena primarnog raspada mlaza dizel-goriva u funkciji pritiska ubrizgavanja goriva za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora - visokopritisni deo ciklusa. 239
6.22 Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska dizel-goriva u magistrali za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora za niskopritisni delo ciklusa. 241
6.23 Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska dizel-goriva u magistrali za različite vrednosti pritiska gasa (vazduha) u cilindru motora za visokopritisni delo ciklusa. 248
6.24 Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska goriva u magistrali za različite vrednosti odnosa karakterističnih veličina mlaznice (L/D). . 251
6.25 Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji pritiska goriva u magistrali za različite vrednosti odnosa karakterističnih veličina mlaznice (L/D). . 255
6.26 Dužina jezgra mlaza goriva u funkciji prečnika mlaznice brizgača za različite vrednosti pritiska goriva u magistrali. 258
6.27 Prodor mlaza za uslove postavljene zadatkom. 264
6.28 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska ubrizgavanja. 268
6.29 Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska ubrizgavanja. 268

6.30 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti prečnika mlaznice. 272
6.31 Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji prečnika mlaznice. 272
6.32 Prodor mlaza u funkciji pritiska ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska gasa u cilindru. 276
6.33 Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska gasa u cilindru. 276
6.34 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti pritiska ubrizgavanja. 280
6.35 Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji pritiska ubrizgavanja. 280
6.36 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za različite vrednosti temperature gasa u cilindru. 284
6.37 Prodor mlaza i vreme primarnog raspada u funkciji temperature gasa u cilindru. 285
6.38 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše. 290
6.39 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše. 296
6.40 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše. 300
6.41 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za zadate uslove obrazovanja smeše. 301
6.42 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu i Aregle bez korekcije (slučaj 1). 304
6.43 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu i Aregle sa linearnom korekcijom $C_{corr} = 1{,}9$ (slučaj 1). 305
6.44 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Hirojasu, Kostas-Taškiran, Bol i Kegl. 311
6.45 Prodor mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja za modele Tijan i Hirojasu-Arai. 318
6.46 Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru. 324
6.47 Prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega. 325
6.48 Prodor vrha mlaza u zavisnosti od trajanja ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska u akumulatoru (model Tijan). 331

6.49 Prodor vrha mlaza - poređenje modela Tijan i Hirojasu-Arai za minimalnu i maksimalnu vrednost pritiska ubrizgavanja iz zadatog opsega. 332
6.50 Grafička interpretacija načina određivanja ugla konusa mlaza. 339
6.51 Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora. 341
6.52 Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora. 349
6.53 Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora. 355
6.54 Ugao konusa mlaza za uslove postavljene zadatkom prema proračunu različitih autora. 359
6.55 Zavisnost ugla konusa mlaza u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznica). 364
6.56 Ugao konusa mlaznice (leva y-osa) za diskretne vrednosti pritiska i koeficijenta pražnjenja konične mlaznice (desna y-osa) u zavisnosti od ulaznog prečnika mlaznice (faktora koničnosti mlaznice). 365
6.57 Zavisnost ugla konusa mlaza od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti faktora koničnosti mlaznica. 371
6.58 Uticaj pritiska ubrizgavanja p_{INJ} i pritiska gasa p_G na funkcionalne zavisnosti f_p i f_ρ za cilindričnu i koničnu mlaznicu. 372
6.59 SMD na osnovu [46, 62] u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori. 381
6.60 Uvećan prikaz promene SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori. 381
6.61 SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori koji odgovaraju visokopritisnom delu ciklusa. 390
6.62 SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača. 391
6.63 SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti odnos dužine i prečnika izlaznog otvora mlaznice brizgača. 395
6.64 SMD na osnovu [46, 62] u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti pritiska gasa u komori. 399
6.65 SMD u funkciji pritiska ubrizgavanja tokom niskopritisnog dela ciklusa prema modelima Hirojasu i Elkotb. 405

6.66 SMD u funkciji pritiska ubrizgavanja tokom visokopritisnog dela ciklusa prema modelima Hirojasu i Elkotb. 405
6.67 SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača za niskopritisni deo ciklusa. 411
6.68 SMD u zavisnosti od pritiska ubrizgavanja za diskretne vrednosti prečnika mlaznice brizgača za visokopritisni deo ciklusa. 412
6.69 Prečnik kapljice i SMD za različite brzine strujanja goriva kroz mlaznicu prema modelima Hirojasu i Rajc. 419

Spisak tabela

1.1 Komponente i njihovi molarni udeli. 13
1.2 Termodinamičke karakteristike komponenti. 13
1.3 Relativne molarne mase elemenata od kojih su sačinjene komponente smeše. 13
1.4 Maseni udeli i molarne mase komponenti smeše. 14
1.5 Koeficijenti polinoma NASA 7 za vodenu paru. 19
1.6 Koeficijenti polinoma NASA 9 za H_2O. 22

2.1 Vrednosti koeficijenata polinoma za izračunavanje gustine čistih ugljovodonika u zavisnosti od temperature na referentnom pritisku[12, 13]. 28
2.2 Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman [13, 14] pri $p_0 = 0{,}101325\,\mathrm{MPa}$. 28
2.3 Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine čistih ugljovodonika u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$. 37
2.4 Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-heptana i n-oktana u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$. 37
2.5 Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-heptana i etanola u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$. 37
2.6 Vrednosti koeficijenta polinoma za izračunavanje temperaturno zavisnih članova B_T i C_T u izrazu za izračunavanje gustine smeše n-oktana i etanola u zavisnosti od pritiska i temperature po modelu Tejt-Taman, jednačina Abdusalama [15], $p_0 = 0{,}1\,MPa$. 38

2.7 Koeficijenti polinoma za izračunavanje priraštaja zapremine ugljovodonične grupe u zavisnosti od temperature [16](„=" je simbol dvovalentne veze). 46
2.8 Koeficijenti za izračunavanje dinamičke viskoznosti prema modelu Arenijusa [17]. 50
2.9 Koeficijenti za izračunavanje dinamičke viskoznosti prema modelu Arenijusa [17]. 54

3.1 Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine u zavisnosti od temperature i pritiska (model Pairi) [19]. 61
3.2 Koeficijenti polinoma za izračunavanje izotermskog modula stišljivosti različitih goriva za dizel motore u zavisnosti od temperature i pritiska (model Pairi) [19]. 61
3.3 Koeficijenti polinoma za izračunavanje gustine u zavisnosti od temperature i pritiska (model Tejt-Taman) [19]. 70
3.4 Parametri eksponencijalnog modela za izračunavanje gustine motornih benzina i smeša sa butanolom [22]. 83
3.5 Vrednosti koeficijenata za polinomski model 3.12 [22]. 83
3.6 Vrednosti piezokoeficijenata viskoznosti za dizel-goriva različitih nivoa mazivosti [18]. 91
3.7 Koeficijenti Vogelovog modela za različite motorne benzine i smeše goriva [24]. 104
3.8 Vrednosti piezokoeficijenata viskoznosti za motorne benzine i antidetonatore [18]. 104
3.9 Temperature ključanja. 111

4.1 Zapreminski i maseni udeli komponenti u suvom vazduhu [27]. 125
4.2 Stehiometrijski odnosi za različita goriva. 130
4.3 Molarni udeli komponenata u sastavu prirodnog gasa. 133
4.4 Molarni udeli komponenata i ekvivalentni broj atoma pojedinih hemijskih elemenata opštoj hemijskoj formuli prirodnog gasa. 134
4.5 Zapreminski udeli komponenata u mešavinama ugljovodonika. 134
4.6 Vrednosti toplotne moći izabranih čistih ugljovodonika. 138
4.7 Orijentacione vrednosti toplotne moći goriva. 138
4.8 Maseni udeli za ispitivani benzin. 142

6.1 Osnovne karakteristike standardnih goriva. 172
6.2 Koeficijent gubitaka na ulazu ξ_r u zavisnosti od radijusa zaobljenja ulazne ivice r_{0N} [42]. 201

6.3 Korekcioni faktori za preračunavanje odgovarajućih veličina iz imperijalnog sistema jedinica u metrički sistem jedinica. 290
6.4 Uslovi za postavljanje modela. 304

Bibliografija

[1] F. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. New York, NY: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, Jan. 2010.

[2] C. R. Ferguson and A. T. Kirkpatrick, *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*, 2nd ed. New York: Wiley, Nov. 2000.

[3] S. Gordon and B. J. McBride, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations," Mar. 1976, nTRS Author Affiliations: Lewis Research Center NTRS Report/Patent Number: NASA-SP-273 NTRS Document ID: 19780009781 NTRS Research Center: Glenn Research Center (GRC). [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/citations/19780009781

[4] T. K. Risch, "Curve Fits of the NIST-JANAF Thermochemical Tables Fourth Edition," 2021. [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205003319/downloads/H3289FinalVol%201.pdf

[5] B. J. Mcbride, S. Gordon, and M. A. Reno, "Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species," NASA, Tech. Rep. NASA-TM-4513, Oct. 1993, nTRS Author Affiliations: NASA Lewis Research Center, Gordon, Sanford, Cleveland, Heidelberg Coll. NTRS Document ID: 19940013151 NTRS Research Center: Legacy CDMS (CDMS). [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/citations/19940013151

[6] Combustion Laboratory, "GRI-Mech Thermodynamics," 1999. [Online]. Available: http://combustion.berkeley.edu/gri_mech/data/nasa_plnm.html

[7] B. McBride, M. Zehe, and S. Gordon, "NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species," 2002. [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20020085330/downloads/20020085330.pdf

[8] "OpenFOAM," Dec. 2024. [Online]. Available: https://www.openfoam.com/

[9] Elke Goos, "OpenFOAM-2.2.x/etc/thermoData/therm.dat at master · OpenFOAM/OpenFOAM-2.2.x." [Online]. Available: https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-2.2.x/blob/master/etc/thermoData/therm.dat

[10] "Open-source chemical kinetics, thermodynamics, and transport - Cantera," 2025. [Online]. Available: https://cantera.org/

[11] "Species Thermodynamic Models - Cantera 3.1.0 documentation," 2025. [Online]. Available: https://cantera.org/stable/reference/thermo/species-thermo.html

[12] I. Cibulka, "Saturated liquid densities of 1-alkanols from C1 to c10 and n-alkanes from C5 to C16: A critical evaluation of experimental data," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 89, no. 1, pp. 1–18, Aug. 1993. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037838129385042K

[13] I. Cibulka and L. Hnědkovský, "Liquid Densities at Elevated Pressures of n-Alkanes from C5 to C16: A Critical Evaluation of Experimental Data - Murdoch University," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 41, no. 4, pp. 657 – 668, 1996. [Online]. Available: https://researchportal.murdoch.edu.au/esploro/outputs/journalArticle/Liquid-Densities-at-Elevated-Pressures-of/991005541164607891

[14] I. Cibulka and M. Zikova, "Liquid Densities at Elevated Pressures of 1-Alkanols from C1 to C10: A Critical Evaluation of Experimental Data," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 39, no. 4, pp. 876–886, Oct. 1994, publisher: American Chemical Society. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/je00016a055

[15] A. A. Abdussalam, G. R. Ivaniš, I. R. Radović, and M. L. Kijevčanin, "Densities and derived thermodynamic properties for the (*n*-heptane + *n*-octane), (*n*-heptane + ethanol) and (*n*-octane + ethanol) systems at high pressures," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 100, pp. 89–99, Sep. 2016. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021961416300428

[16] H. S. Elbro, A. Fredenslund, and P. Rasmussen, "Group contribution method for the prediction of liquid densities as a function of temperature for solvents, oligomers, and polymers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 30, no. 12, pp. 2576–2582, Dec. 1991, publisher: American Chemical Society. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/ie00060a011

[17] J. H. Dymond and H. A. Oye, "Viscosity of Selected Liquid n-Alkanes," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 23, no. 1, pp. 41–53, Jan. 1994. [Online]. Available: https://doi.org/10.1063/1.555943

[18] P. Arkoudeas, "Crude Oil - New Technologies and Recent Approaches - Gasoline Lubricity," in *Crude Oil - New Technologies and Recent Approaches*, M. E. Abdel-Raouf and M. H. El-Keshawy, Eds. IntechOpen, Jun. 2022. [Online]. Available: https://www.intechopen.com/chapters/undefined/chapters/79932

[19] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, and G. Bracho, "The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels," *Fuel*, vol. 90, no. 3, pp. 1172–1180, Mar. 2011. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110006290

[20] A. J. Rowane, V. Mahesh Babu, H. B. Rokni, J. D. Moore, M. Gavaises, M. Wensing, A. Gupta, and M. A. McHugh, "Effect of Composition, Temperature, and Pressure on the Viscosities and Densities of Three Diesel Fuels," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 64, no. 12, pp. 5529–5547, Dec. 2019, publisher: American Chemical Society. [Online]. Available: https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00652

[21] J. Safarov, U. Ashurova, B. Ahmadov, E. Abdullayev, A. Shahverdiyev, and E. Hassel, "Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures," *Fuel*, vol. 216, pp. 870–889, Mar. 2018. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236117315399

[22] D. Trost, A. Polcar, D. Boldor, D. B. Nde, A. Wolak, and V. Kumbár, "Temperature Dependence of Density and Viscosity of Biobutanol-Gasoline Blends," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, p. 3172, Jan. 2021, number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3172

[23] C. Schaschke, I. Fletcher, and N. Glen, "Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature," *Processes*, vol. 1, no. 2, pp. 30–48, Sep. 2013, number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2227-9717/1/2/30

[24] D. Trost, A. Polcar, P. Dostal, J. Jelinek, J. Cupera, and V. Kumbar, "Mathematical models for temperature dependent viscosity of biobutanol and gasoline blends," *MendelNet*, vol. 27, no. 1, pp. 486–491, Nov. 2020, publisher:

MendelNet. [Online]. Available: http://mendelnet.cz/artkey/mnt-202001-0087_Mathematical-models-for-temperature-dependent-viscosity-of-biobutanol-and-gasoline-blends.php

[25] Dortmund Data Bank - DDBST GmbH, "Heat of Vaporization Calculation by PPDS12 Equation (Methanol)," 2025. [Online]. Available: http://ddbonline.ddbst.com/PPDS12HVPCalculation/HVP_PPDS12CalculationCGI.exe

[26] Paul Alan, "Periodic Table Download Free (Windows) - 3.9.1," 2013. [Online]. Available: https://www.softpedia.com/get/Others/Home-Education/Freshney-Periodic-Table.shtml

[27] C. W. Allen and A. N. Cox, *Allen's Astrophysical Quantities*. Springer Science & Business Media, 2002, google-Books-ID: w8PK2XFLLH8C.

[28] "Fuel Gases - Heating Values." [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/heating-values-fuel-gases-d_823.html

[29] M. R. Radovanović, *Goriva*. Beograd, Srbija: Mašinski fakultet, 1994, vol. 4.

[30] Kalyan Annamalai, Ishwar K. Puri, and Milind A. Jog, *Advanced Thermodynamics Engineering*, 2nd ed. CRC Press, 2011. [Online]. Available: https://www.routledge.com/Advanced-Thermodynamics-Engineering/Annamalai-Puri-Jog/p/book/9781439805725?srsltid=AfmBOor0Su8mKJpDI2GtXF1nvicQO8nsDd9gzf05YKfkII91cf4qmgya

[31] W. Boie, "Fuel technology calculations," *Energietechnik*, vol. 3, pp. 309–16, 1953.

[32] G. Marlair, C. Cwiklinski, and A. Tewarson, "An analysis of some practical methods for estimating heats of combustion in fire safety studies," Edimbourg, United Kingdom, Jun. 1999. [Online]. Available: https://ineris.hal.science/ineris-00972167

[33] Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K., "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." IGES, 2006, vol. 2, Section 1.4.1.2, Box 1.1. [Online]. Available: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp

[34] US EPA, "Methodology for Thermal Efficiency and Energy Input Calculations and Analysis of Biomass Cogeneration Unit Characteristics," 2007. [Online]. Available: https://www3.epa.gov/ttn/utility/fnl_biomass_cogen_TSD_04_19_07.pdf

[35] International Organization for Standardization, "ISO 5167-3:2003," 2003. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/30191.html

[36] Chauvin Arnoux Group, "AC/DC current clamp E3N." [Online]. Available: https://www.tme.eu/Document/46068cd2ce78ce8b73d4294e72e7d6cd/CA-E3N_M.PDF

[37] Tektronix, "MSO2000 and DPO2000 Series Oscilloscopes - User Manual." [Online]. Available: https://download.tek.com/manual/071231902_RevA_web_1.pdf

[38] Allegro Microsystems, "ACS712 - Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC," 2019. [Online]. Available: https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712

[39] A. Lichtarowicz, R. K. Duggins, and E. Markland, "Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow through Long Orifices," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 7, no. 2, pp. 210–219, Jun. 1965, publisher: IMECHE. [Online]. Available: https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1965_007_029_02

[40] C. v. K. Sarre, S.-C. Kong, R. D. Reitz, C. v. K. Sarre, S.-C. Kong, and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays." SAE International, Jan. 1999. [Online]. Available: https://saemobilus.sae.org/papers/modeling-effects-injector-nozzle-geometry-diesel-sprays-1999-01-0912

[41] J. M. Desantes, J. J. López, M. Carreres, and D. López-Pintor, "Characterization and prediction of the discharge coefficient of non-cavitating diesel injection nozzles," *Fuel*, vol. 184, pp. 371–381, Nov. 2016. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116306214

[42] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance, 4th Edition Revised and Augmented*. Begell House, 2008. [Online]. Available: https://www.begellhouse.com/ebook_platform/monograph/book/5877598576b05c67.html

[43] W. H. Nurick, "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 98, no. 4, pp. 681–687, Dec. 1976. [Online]. Available: https://doi.org/10.1115/1.3448452

[44] ——, "Flow Characteristics and Status of CFD Hydrodynamic Model Development in Sudden Contraction Manifold/Orifice Configurations," 2011, aDA553634. [Online]. Available: https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA553634

[45] V. Macian, R. Payri, X. Margot, and F. J. Salvador, "A CFD analysis of the influence of diesel nozzle geometry on the inception of cavitation," *Atomization and Sprays*, vol. 13, no. 5&6, 2003, publisher: Begel House Inc. [Online]. Available: https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,141fbb052ab43686,3c1aa4f57fec777c.html

[46] H. Hiroyasu and M. Arai, "Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 900475, Feb. 1990, iSSN: 0148-7191, 2688-3627. [Online]. Available: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/900475/

[47] Y. Wakuri, M. Fujii, T. Amitani, and R. Tsuneya, "Studies on the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine," *Bulletin of JSME*, vol. 3, no. 9, pp. 123–130, 1960. [Online]. Available: http://www.jstage.jst.go.jp/article/jsme1958/3/9/3_9_123/_article

[48] J. C. Dent, "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 710571, Feb. 1971, iSSN: 0148-7191, 2688-3627. [Online]. Available: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/710571/

[49] J. Kostas, D. Honnery, and J. Soria, "Time resolved measurements of the initial stages of fuel spray penetration," *Fuel*, vol. 88, no. 11, pp. 2225–2237, Nov. 2009. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236109002312

[50] O. O. Taskiran and M. Ergeneman, "Experimental Study on Diesel Spray Characteristics and Autoignition Process," *Journal of Combustion*, vol. 2011, no. 1, p. 528126, 2011, _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2011/528126. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2011/528126

[51] J. Arrègle, J. V. Pastor, and S. Ruiz, "The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 1999-01-0200, Mar. 1999, iSSN: 0148-7191, 2688-3627. [Online]. Available: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/1999-01-0200/

[52] T. Bohl, G. Tian, A. Smallbone, and A. P. Roskilly, "Macroscopic spray characteristics of next-generation bio-derived diesel fuels in comparison to mineral diesel," *Applied Energy*, vol. 186, pp. 562–573, Jan. 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916315264

[53] B. Kegl and L. Lešnik, "Modeling of macroscopic mineral diesel and biodiesel spray characteristics," *Fuel*, vol. 222, pp. 810–820, Jun. 2018. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118303648

[54] J. Tian, M. Zhao, W. Long, K. Nishida, T. Fujikawa, and W. Zhang, "Experimental study on spray characteristics under ultra-high injection pressure for DISI engines," *Fuel*, vol. 186, pp. 365–374, Dec. 2016. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116308250

[55] H. Hiroyasu and M. Arai, "Fuel spray penetration and spray angle in diesel engines," *Trans. JSAE*, vol. 21, pp. 5–11, 1980.

[56] M. Arai, "Physics behind Diesel Sprays," Heidelberg, Germany, 2012. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/Physics-behind-Diesel-Sprays-Arai/a26b92cdb6911c045db064cab5e581aca048bb78

[57] Y. Zama, W. Ochiai, M. Furuhata, and M. Arai, "Study on Behaviour of Diesel Spray under High Ambient Density Condition," in *Proceedings of ILASS-Asia 2011*, Taiwan, 2011, pp. 275–282.

[58] Y. Zama, W. Ochiai, T. Furuhata, and M. Arai, "Experimental study on spray angle and velocity distribution of diesel spray under high ambient pressure conditions," *Atomization and Sprays*, vol. 21, no. 12, pp. 989–1007, 2011, publisher: Begel House Inc. [Online]. Available: https://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,3c5f07e62bb08581,4259eb580747b29e.html

[59] K. Najar, B. Stengel, F. Pinkert, B. Buchholz, and E. Hassel, "Spray cone angle prediction model considering nozzle hole geometry," Paris, France, Sep. 2019.

[60] K. S. Varde, "Spray cone angle and its correlation in a high pressure fuel spray," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 183–187, 1985, _eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cjce.5450630202. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.5450630202

[61] K. S. Varde and D. M. Popa, "Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressures," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 830448, Feb. 1983, iSSN: 0148-7191, 2688-3627. [Online]. Available: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/830448/

[62] H. Hiroyasu, M. Arai, and M. Tabata, "Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray," SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 890464, Feb. 1989, iSSN: 0148-7191, 2688-3627. [Online]. Available: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/890464/

[63] M. M. Elkotb, "Fuel atomization for spray modelling," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 8, no. 1, pp. 61–91, Jan. 1982. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128582900090

[64] R. D. Reitz, "Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays," *Atomisation Spray Technology*, vol. 3, pp. 309–337, Jan. 1987, aDS Bibcode: 1987AtST....3..309R. [Online]. Available: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987AtST....3..309R