

Ivan Filipović, Boran Pikula, Dževad Bibić

ISSN 0350-350X

GOMABN 50, 3, 215-232

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

UDK 621.436.013.4.038.5.001.572.001.575 : 532.525 : 516.3

UTJECAJ BRIZGALJKE NA KARAKTERISTIKE RASPRŠIVANJA GORIVA KOD DIZELOVOG MOTORA

Sažetak

Proces izgaranja goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem (SUI) najviše ovisi o pripravi gorive smjese i uvjetima u kojima se odvija miješanje. Proces miješanja goriva i zraka može se analizirati preko unesene energije gorivom i zrakom, u odnosu na potrebnu energiju za racionalno formiranje smjese gorivo-zrak. Za kvalitetu smjese gorivo-zrak, kod dizelskog motora, presudnu ulogu ima energija unesena gorivom, odnosno karakteristike raspršivanja goriva. Ove karakteristike se izražavaju uglavnom dometom mlaza, kutom širenja mlaza goriva i fizikalnom i kemijskom strukturom mlaza goriva po različitim presjecima. Fizikalna struktura mlaza goriva najčešće se izražava preko srednjeg Sauterovog promjera kapljica. Pristupi za izračunavanje ovih parametara su:

- modeliranje i izračunavanje nekom od numeričkih metoda sa 2D ili 3D modelom, ovisno o okolnim uvjetima, ili
- različiti poluempirijski izrazi za proračun nabrojanih parametara.

Svaki pristup izračunavanju karakteristika mlaza goriva zahtijeva poznavanje tzv. „graničnih i početnih“ uvjeta, koji su definirani izlazom goriva kroz mlaznicu brizgaljke. Na primjeru dometa mlaza goriva, u radu će se objasniti dosadašnji način uzimanja graničnih uvjeta na brizgaljke, uloga same brizgaljke na konkretnom primjeru, te novi pristup definiranju graničnih uvjeta.

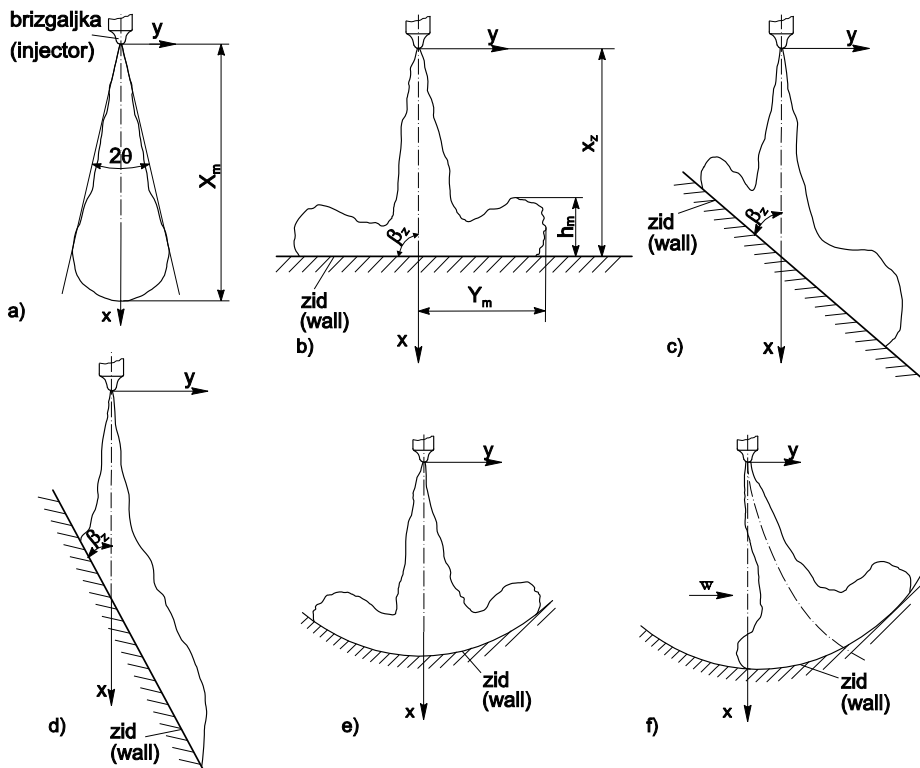
1. Uvod

Proces izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem, s izravnim ubrizgavanjem goriva u cilindru motora, ovisi o procesu miješanja goriva i zraka. Proces miješanja goriva i zraka može se pratiti preko unesene energije gorivom i zrakom u motor. Kod dizelovog motora, posebno onih s većim radnim obujmom, dominantnu ulogu u procesu miješanja goriva i zraka čini energija unesena gorivom. U realnim uvjetima energija unesena gorivom manifestira se karakteristikama mlaza raspršenog goriva. Karakteristike mlaza goriva, u uvjetima sredine u kojoj se mlaz razvija, izražavaju se u obliku:

- dimenzija mlaza (domet ulaza (X_m), kut širenja mlaza goriva (2θ), dimenzije mlaza goriva nakon udara o čvrstu prečku (Y_m , h_m), itd.),
- fizikalne i kemijske strukture mlaza goriva, gdje se fizikalna struktura mlaza goriva izražava najčešće preko srednjeg Sauterovog promjera (d_{32}) kapljice goriva. Kemijska struktura ovisi o sastavu goriva u uvjetima okoline i za nju se ne koriste kriteriji za ocjenu.

Najčešće se u analizi procesa miješanja gorivo-zrak spominju karakteristike oblika (dimenzije) mlaza goriva, na osnovi čega se mogu donositi zaključci o homogenosti mješavine u cijelom prostoru za izgaranje, prekrivanje susjednih mlazova goriva, utjecaj graničnih zidova prostora za izgaranje, itd. U tom kontekstu i većina istraživača analizira oblik mlazova goriva u različitim uvjetima i daje utjecajne faktore na dimenzije mlaza goriva.

U procesu analize karakteristika mlaza najčešće se spominju oblici mlazova prikazane na slici 1., gdje je na slici 1 a) prikazan oblik mlaza koji se formira u mirnoj sredini, bez granica.



Slika 1: Karakteristični oblici mlaza goriva u različitim uvjetima okruženja

Na slikama 1 b), c) i d) prikazani su oblici mlazova u mirnoj sredini, koji udaraju o ravan zid na razmaku XZ , pod kutom βz , dok su na slikama 1 e) i f) dati mlazovi koji udaraju o zakrivljeni zid u mirnu sredinu (slika 1 e) s brzinom nastrujavanja zraka w (slika 1 f). Ovo su samo neki karakteristični primjeri koji se mogu koristiti za analizu kvalitete raspršivanja. U realnim uvjetima motora SUI, pored promjenjivog tlaka i temperature okolnog zraka, prisutni su i različiti vidovi strujanja zraka (vrtložno, poprečno, uzdužno strujanje) i promjenjiva granica prostora. U ovakvim uvjetima analize mlazova postaju daleko kompliciranije, i vrlo rijetko se susreću u literaturi. U analizama se najčešće susreću karakteristične veličine [1], [2], [3]:

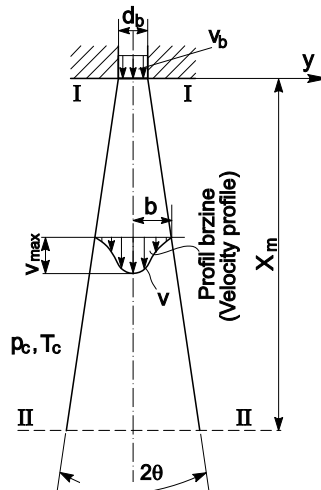
- domet mlaza (X_m),
- dimenzije mlaza nakon udara o zid (Y_m, h_m) i
- kut širenja mlaza goriva (2θ).

Na primjeru dometa mlaza u funkciji vremena ubrizgavanja ($X_m = f(t)$), biti će pokazan utjecaj konstruktivnih karakteristika brizgaljke i hidrodinamičkih karakteristika goriva.

2. Analiza karakteristika mlaza goriva

Uobičajeni putovi definiranja i analize karakteristika mlaza goriva su:

- eksperimentalni,
- računski, korištenjem složenih 2D i 3D modela,
- računski, korištenjem korelacijskih (poluempirijskih) izraza.



Slika 2: Fizikalni modeli slobodnog mlaza

Najčešće se u literaturi susreće posljednji spomenuti način definiranja karakteristika mlaza goriva. Pregledom literature može se primijetiti veliki broj poluempirijskih izraza za proračun karakteristika X_m , Y_m , h_m , 2θ i d_{32} . Karakteristične veličine X_m , Y_m i h_m , a u prvom redu domet mlaza (X_m), praktično kod svih istraživača, imaju isti oblik poluempirijskog izraza s različitim konstantama.

Svi istraživači u ovom području ([1], [3] i [4]) polaze od poznatog fizikalnog modela za domet mlaza prikazanog na slici 2 i koriste matematički model za tzv. stacionarne mlazove, za koje se može reći da je količina gibanja mlaza (K) goriva, na razumno kratkim dužinama mlaza, konstantna. Ovo bi se matematički moglo napisati kao jednakost količine gibanja u presjeku I-I i II-II (slika 2), tj.:

$$K_{I-I} = K_{II-II} \quad (1)$$

Uzeta je pretpostavka da je profil brzina u mlazu, izvan potencijalne jezgre mlaza, funkcija $v = v_{\max} f(\eta)$, gdje je $\eta = y/b$, a funkcija f najbolje odgovara Gaussovoj funkciji pogreške. Veličina količine gibanja u presjeku I-I se može napisati kao:

$$K_{I-I} = \rho_L \frac{d_b^2 \pi}{4} v_b^2 = \frac{\pi}{2} C_b^2 d_b^2 \Delta p \quad (2)$$

gdje se brzina goriva na izlazu iz brizgaljke (v_b) računa pomoću Bernoullijeve jednadžbe za referentne položaje ulaz u brizgaljku i izlaz iz brizgaljke, kao:

$$v_b = C_b \sqrt{2\Delta p / \rho_L} \quad (3)$$

gdje je: Δp - pad tlaka od ulaza u brizgaljku do izlaza iz mlaznice

($\Delta p = p_A - p_C$, slika 3 a)),

ρ_L - gustoća goriva,

C_b - koeficijent koji uzima u obzir sve gubitke u brizgaljku,

p_c - tlak okoline.

Količina gibanja za presjek II-II se može pisati kao:

$$K_{II-II} = \int_0^b \rho_m v^2 2\pi y dy = 2\pi \rho_c v_{\max}^2 b^2 \varphi_1 \quad (4)$$

gdje je $\varphi_1 = \int_0^1 f^2(\eta) \eta d\eta$,

$\rho_c = p_c / (RT_c)$ gustoća okoline,

T_c - temperatura okoline,

R - plinska konstanta.

Uvodeći pretpostavke da je širina b proporcionalna dometu mlaza ($b = C_1 X_m$), gustoća u mlazu (ρ_m) približno jednaka gustoći okoline (ρ_c) tj. $\rho_m \approx \rho_c$, kao i činjenicu da se maksimalna brzina v_{\max} može napisati kao $v_{\max} = dX_m / dt$, može se na osnovi izraza (1), (2) i (4) napisati konačno izraz za domet mlaza:

$$X_m = C d_b^{0,5} \left(\frac{\Delta p}{\rho_c} \right)^{0,25} t^{0,5} \quad (5)$$

gdje se konstanta C izražava kao:

$$C = \left(C_b C_1^{-1} \varphi_1^{-0,5} \right)^{0,5} \quad (6)$$

Većina autora koji razvijaju korelacijske izraze za domet mlaza (X_m) koriste polazni izraz (5), koji važi u zoni dometa mlaza izvan potencijalne jezgre, odnosno izvan zone neprekinutog mlaza goriva. Izraz (5) se vrlo često susreće u literaturi, gdje vrijedi: konstanta C kreće se u granicama 3,01 do 3,9 ([5],[6] i [7]) I pad tlaka Δp smatra se konstantnom veličinom.

Domet mlaza (X_m) ima značajan utjecaj i na dimenzije mlaza poslije udara o zid. Tako se npr. veličine Y_m i h_m (slika 1) mogu izraziti preko korelacijskih izraza:

$$Y_m = C_2 \Delta p^{0,89} \rho_c^{-0,24} (t - t_z)^{0,48} \quad (7)$$

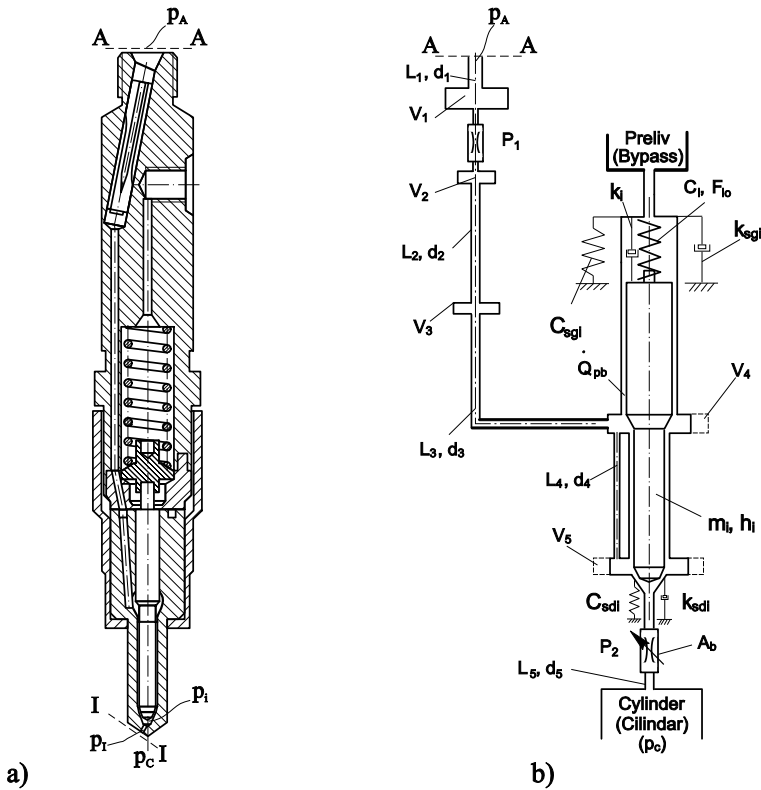
$$h_m = C_3 \Delta p^{0,52} \rho_c^{0,048} (t - t_z)^{0,35} \quad (8)$$

gdje je također prisutan pad tlaka kroz brizgaljku (Δp) i konstante C_2 i C_3 u kojima ima utjecaja i koeficijent otpora protjecanju (koeficijent gubitaka) C_b u brizgaljci. Veličina t_z predstavlja vrijeme kontakta mlaza goriva i zida. Zbog sličnog utjecaja pada tlaka Δp i koeficijenta gubitaka u brizgaljci C_b , u nastavku će pažnja biti posvećena dometu mlaza goriva X_m i preko njega će biti napravljena analiza utjecaja konstrukcije brizgaljke na karakteristike mlaza raspršenog goriva.

S obzirom da je proces ubrizgavanja goriva nestacionaran proces i da se pad tlaka mijenja tijekom jednog ciklusa ubrizgavanja, većina autora uzima kod definiranja veličine Δp , srednji tlak tijekom procesa ubrizgavanja goriva ili osrednjeni tlak ubrizgavanja u prvih 0,5 ms procesa ubrizgavanja [8]. S obzirom na ove dileme i činjenicu da konstanta C ima rasipanje više od 30 %, neophodno je posvetiti veću pažnju ulozi sustava ubrizgavanja i same brizgaljke na izbor konstante C .

3. Rezultati istraživanja na konkretnoj brizgaljci

Za analizu je uzeta realna brizgaljka marke Bosch, tipa DLL 25S834 s jednom mlaznicom promjera $d_b = 0,68$ mm i dužinom mlaznice $l_b = 2$ mm. Izgled brizgaljke dan je na slici 3 a), dok je na slici 3 b) dan fizikalni model iste brizgaljke.



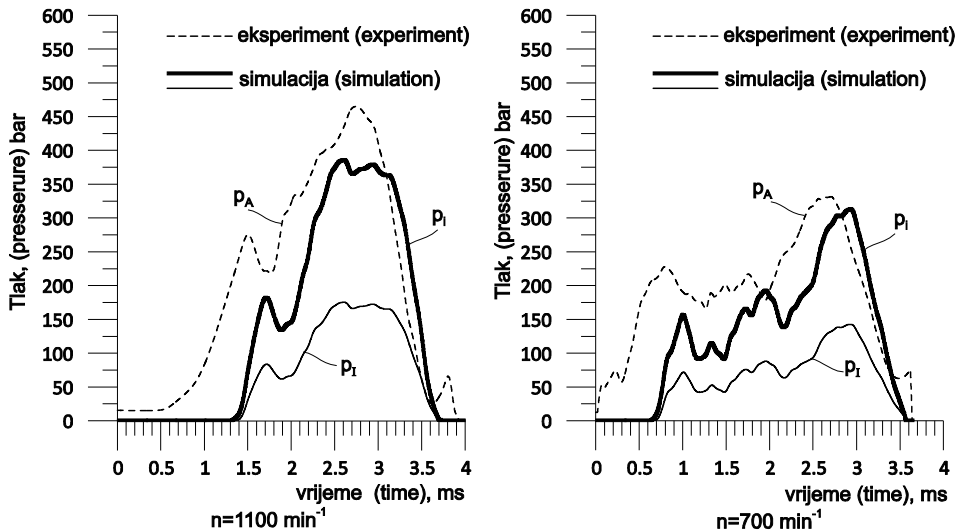
Slika 3: Realni izgled brizgaljke a) i odgovarajući fizikalni model b)

Proračun karakteristika dometa mlaza goriva kod svih poluempirijskih izraza temelji se na razlici tlaka $\Delta p = p_A - p_C$, s obzirom da se tlak p_A može jednostavno izmjeriti. Međutim, kada se računa brzina istjecanja goriva iz brizgaljke (v_b) moraju se predvidjeti energetske gubici u brizgaljci, koji se ne mogu jednoznačno odrediti. To se najbolje vidi iz Bernoullijeve jednadžbe za presjek A-A i I-I (slika 3 a), koja glasi:

$$p_A + \frac{\rho_L v_A^2}{2} = p_C + \frac{\rho_L v_b^2}{2} + \sum_i \xi_i \frac{\rho_L v_i^2}{2} + \sum_j \lambda_j \frac{l_j}{d_j} \frac{\rho_L v_j^2}{2}, \quad (9)$$

odakle se može računati brzina goriva na izlazu iz brizgaljke v_b , što je dato izrazom (3) gdje su svi gubici (linijski i lokalni) izraženi preko koeficijenta gubitaka C_b . Iz izraza (9) i (3) jasno se vidi da vrijednost koeficijenta C_b ovisi o konstruktivnim karakteristikama brizgaljke i hidrodinamičkim uvjetima toka u brizgaljci.

Ovaj koeficijent, pored toga što nije konstantan, ne može se jednoznačno izračunati bez ozbiljnijeg modeliranja hidrodinamičkih procesa u brizgaljci. Za konkretnu brizgaljku na slici 3 a) napravljen je fizikalni model prikazan na slici 3 b) koji omogućava analizu i proračun karakteristika toka goriva duž cijele brizgaljke, kao i proračun kinematičkih karakteristika igle brizgaljke. U matematičkom modelu je korišten kombinirani nuldimenzionalni i jednodimenzionalni model, gdje su korištene jednačba kontinuiteta i jednačba količine gibanja. Za definiranje hoda igle brizgaljke korišten je drugi Newtonov zakon. Model je detaljno opisan u [2], a ovdje su dani samo neki rezultati promjene tlaka na ulazu u brizgaljku (p_A), tlak ispod sjedišta igle brizgaljke (p_i) i tlak na kraju mlaznice brizgaljke (p_l) na slici 4, za dvije karakteristične brzine vrtnje pumpe visokog tlaka ($n = 1100 \text{ min}^{-1}$ i $n = 700 \text{ min}^{-1}$).



Slika 4: Promjena tlaka na karakterističnim mjestima brizgaljke za dva brzinska režima pumpe visokog tlaka

Poznavanjem tlaka p_l (kraj mlaznice brizgaljke), umjesto tlaka p_A na ulazu u brizgaljku, pojednostavljuje se izraz (3) i postaje $v_b = \sqrt{2(p_l - p_C) / \rho_L}$, a izraz (6) za konstantu C postaje:

$$C^* = (C_1^{-1} \phi^{-0,5})^{0,5} \quad (10)$$

Poznavajući karakter veličina C_1 i ϕ_1 , koje su za odgovarajuće okolne uvjete (p_C, T_C) praktično konstantne veličine, veličina C^* postaje konstantna i ne ovisi o konstruktivnim karakteristikama brizgaljke i hidrodinamičkim karakteristikama toka goriva u brizgaljci.

4. Zaključak

Na osnovi svega iznesenog u vezi proračuna karakteristika raspršenog mlaza goriva jasno je ukazano na utjecaj konstruktivnih i hidrodinamičkih karakteristika brizgaljke. Zbog različitih konstruktivnih karakteristika brizgaljke kao i različitih karakteristika tlaka i brzine toka goriva u brizgaljci, prisutni korelacijski izrazi za domet mlaza (X_m) u literaturi nisu do sada izražavali eksplicitno utjecaj brizgaljke, izuzev promjera mlaznice. Zbog utjecaja gubitaka u brizgaljci (C_b), vrijednost konstante (C) (6) ima značajna rasipanja kod različitih autora.

Predlažući model za proračun brzine (v_b) i tlaka (ρ) na izlazu iz brizgaljke, problemi ovog tipa nestaju, a nova konstanta u korelacijskim izrazima (C) predstavlja i suštinski konstantu bez razlike o kakvoj se brizgaljci radi i koliki su gubici protjecanja kroz brizgaljku, kao i cijeli sustav ubrizgavanja.

Literatura

1. Filipović I., Bibić Dž., Pikula B.:
Sistemi za dobavu goriva kod dizel motora, Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2010.
2. Pikula B.: Istraživanje karakteristika sistema za ubrizgavanje pri upotrebi dizela, biodizela i njihovih mješavina u različitim eksploatacionim uslovima, disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2007.
3. Yule A. J., Mirza M. R., Filipović I.:
Correlations for Diesel Spray Penetration Including the Effects of the Break-up Zone, 5th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS 91), Gaithersberg, MD, 1991, SAD.
4. Idoum A., Packer J. P., Wallace F. J., Charlton S. J.:
An Experimental and Analytical Study of Jet Impingement and Wall Jets in High Swirl D.I. Diesel Engines using the Hydraulic Analogy, SAE 850263, 1985.
5. Dent J. C.:
A Basis for the comparison of various experimental methods for studying penetration, SAE Trans, vol. 80, Paper No 710571, 1971.
6. Pischinger F.:
Verfahren zur Untersuchung von Diesel-Einspritzstrahlen, MaschBau Warmew, 10, 1955.
7. Arai M., Tabata M., Hiroyasu H.:
Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle, SAE 840275, 1984.
8. Filipović I., Gebert K., Černež A., Lasić D., Dobovišek Ž.:
Utjecaj pritiska ubrizgavanja na proces dezintegracije mlaza goriva, Goriva i maziva, br. 1-2, 1992.

UDK	kjučne riječi	key words
621.436.013.4	dizelski motor, ubrizgavanje i raspršivanje goriva	diesel engine, fuel injection and dispersion
621.436.038.5	uređaji za ubrizgavanje goriva u dizelski motor	diesel engine fuel injection devices
.001.572	gledište ispitivanja na teorijskom modelu	theoretical model investigation viewpoint
.001.575	gledište ispitivanja na materijalnom modelu	real model investigation viewpoint
532.525	istjecanje iz sapnica	fluid flow through nozzles
516.3	mrežni sistem prostornih koordinata	mesh system of space coordnates

Autori

prof. dr. sc. Ivan Filipović, doc. dr. sc. Boran Pikula, doc. dr. sc. Dževad Bibić
Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Bosna i Hercegovina
E-adresa: fillipovic@mef.unsa.ba, bibic@mef.unsa.ba

Primljeno

15.09.2010.

Prihvaćeno

06.05.2011.