

Dževad Bibić, Ivan Filipović, Aleš Hribernik, Boran Pikula

ISSN 0350-350X
GOMABN 54, 3, 216-228
Izvorni znanstveni rad

KARAKTERISTIKA OSLOBAĐANJA TOPLINE KOD MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM M POSTUPKOM UBRIZGAVANJA GORIVA

Sažetak

Opisivanje procesa izgaranja u motoru s unutarnjim izgaranjem (sui) obično se vrši putem takozvanih parametara izgaranja, kao što su: maksimalni tlak izgaranja, maksimalna temperatura ciklusa, kut početka izgaranja, kutni interval trajanja izgaranja, karakteristika oslobađanja topline, prirast ukupne količine razvijene topline, kutni interval pritajenog izgaranja, prijenos topline i slično. Zbog složenosti procesa izgaranja u motoru sui do danas još uvijek ne postoje modeli koji bi na efikasan i prije svega pouzdan način omogućili predviđanje karakteristike oslobađanja topline za vrlo široku paletu različitih tipova motora sui. Ciljano se istražuju fenomenološki, empirijski i CFD modeli za konkretne konstruktivne osobitosti motora i primijenjenog goriva. U okviru ovog rada predstavljen je način određivanja karakteristike oslobađanja topline putem aproksimativnih funkcija izgaranja na primjeru vrlo specifičnog načina pripreme smjese goriva i zraka, u dizelovom motoru sui, tzv. M-postupak ubrizgavanja goriva. Validacija primijenjenih aproksimativnih funkcija izvršena je preko eksperimentalnih rezultata ispitivanja na konkretnom motoru sui.

Ključne riječi: *motor sui, izgaranje, aproksimativna funkcija, M-postupak*

1. Uvod

Realni proces koji se odvija pri izgaranju u dizelovom motoru je iznimno kompleksan fenomen na koji utječu različite veličine, počevši od hidrauličnih u sustavu za ubrizgavanje goriva, preko onih u fazi formiranja i raspada mlaza goriva, isparavanja kapljica goriva, miješanja, zapaljenja pa sve do suštinske transformacije energije putem oksidacije goriva i stvaranja različitih oblika emisija zagađujućih tvari. Uspoređivanjem i analiziranjem postupaka stvaranja smjese kod dizelovog motora, ottovog motora, te u industrijskom plameniku može se primijetiti da postoji znatna temperaturna razlika između goriva i zraka koji se miješaju. Iz Arrheniusovog zakona [1] je poznato da temperatura ima znatan utjecaj na odvijanje kemijskih reakcija.

Ukoliko se gorivo miješa s vrućim zrakom u dizelovom motoru, vrlo visoka temperatura će utjecati i na strukturu goriva. Pri tome do izražaja dolaze osobine goriva čije molekule, pogotovu u slučaju heterogenih mješavina, naginju stvaranju peroksida sa spontanom djelomičnim reakcijama. Zbog toga dolazi do procesa raspadanja molekula koje s jedne strane pospješuju samozapaljenje, a s druge strane oslobađanjem djelića bogatih vodikom ostatak od molekula postaje sve bogatiji ugljikom, koji je reakcijski inertan i koji se na kraju pojavljuje kao čađa u ispušnim plinovima. Oslobađanjem vodika iz molekule, ona ostaje bez prirodnog katalizatora, jer reakcija ugljika se ubrzava do željene mjere putem krajnjeg produkta reakcije vodika, ali samo onda ako se ona odvija na molekularnoj razini. Što više temperatura raste tijekom izgaranja, to i procesi raspadanja, koje se tada ne može više zaustaviti, dovode do potpunog raspada molekula. Tako nastaje uobičajeni karakter reakcija u dizelovom motoru: u početnoj fazi velika brzina reakcija, povezane s bukom, na kraju sporo naknadno izgaranje (dogorijevanje) inertnog ugljika. U okviru ovih reakcijskih kinetičkih procesa treba tražiti uzroke nedovoljno dobrog miješanja goriva i zraka u dizelovom motoru; jer što se bolje tekuće gorivo pomiješa s vrućim zrakom za izgaranje to će veće količine goriva biti podložne, povezano sa samozapaljenjem, opisanom procesu raspadanja. Povećanjem učinka miješanja povećava se početna brzina reakcija, ali količina reakcijski inertnog ugljika se također povećava. U spektralno analitičkim ispitivanjima (eksperimentima) ovi procesi u dizelovom motoru se jasno raspoznaju. S druge strane se istim ovim postupkom može ustanoviti da izgaranje plinskih ulja, npr. u plameniku, nije povezano s tako izraženim raspadom molekula. Plamenik radi u području vrlo bogatih smjesa bez čađe. Spora predoksidacija u ovom slučaju u znatnoj mjeri mijenja tijek reakcija u plamenu. Eksperimentalnim istraživanjima ustanovljeno je da način stvaranja mješavine zrak – gorivo ima odlučujući utjecaj na karakter zapaljenja i izgaranja; mnogo je teže oksidirati uljne plinove koji se sastoje od neraspadnutog goriva i zraka nego mješavinu u obliku magle s kapljicama goriva.

Temeljem prethodno opisanih reakcijskih kinetičkih procesa može se izvesti niz zaključaka, te ih predstaviti u obliku preporuka za način stvaranja smjese. Nepovoljne posljedice procesa raspadanja, koji je neizbježan kod samozapaljenja, moguće je najbolje premostiti ukoliko se ispune sljedeća tri uvjeta [2]:

1. Ograničiti, što je moguće više, udio goriva u samozapaljenju.

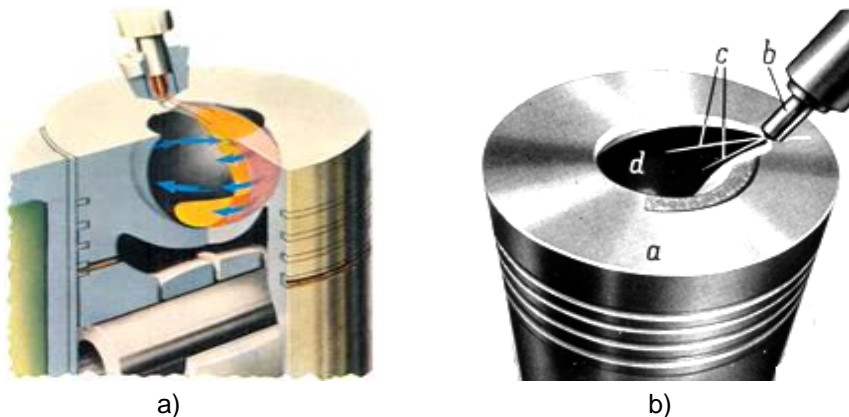
Ova mala količina goriva treba biti pomiješana s vrućim zrakom, i to baš na način kako se to inače ostvaruje u dizelovim motorima s cjelokupnom količinom goriva. Na kraju je ipak neophodno i cjelokupni preostali dio goriva pomiješati sa zrakom, kako bi i on izgorio. Ali da bi se mogao pomiješati s vrućim zrakom, a da pri tome ne nastanu nedostaci, potrebno je gorivo prethodno pripremiti. Ovo se, temeljem iskustava dobivenih istraživanjem plamena izgaranja dizelskog goriva, može ostvariti putem sljedeća dva uvjeta.

2. Pružiti mogućnost sporog prethodnog oksidiranja goriva, bez njegovog pregrijavanja.

3. Gorivo koje ispari, po mogućnosti u izvornom stanju, treba miješati s vrućim zrakom sukcesivno u malim količinama, ali tako brzo da se prije pojave samozapaljenja uspostavi približno stehimoterijski odnos u smjesi, te da ga je moguće zapaliti nekim stranim izvorom.

Putem uobičajenog zapreminskog postupka stvaranja smjese prethodna tri uvjeta se ne mogu ispoštovati; prema prvom uvjetu samo mali dio goriva se smije neposredno miješati sa zrakom. Ukoliko se cjelokupna količina goriva rasprši ili dođe u dodir s vrućim površinama, neće se moći ispoštivati niti prvi niti drugi uvjet, pa na taj način ne postoji ni mogućnost da se ispoštuje i treći uvjet. U svrhu stvaranja smjese prema prethodno utvrđenim uvjetima, kod M postupka ubrizgavanja goriva, gorivo se ne ubrizgava u zrak koji se nalazi u prostoru za izgaranje, koji približno ima oblik polukugle, već se ubrizgava na zid prostora za izgaranje na koji se u stvari nanosi u obliku širokog tankog filma, slika 1 a) i b).

Film goriva, pri punom opterećenju motora, ima srednju debljinu od približno 12 μm . Tako uvedeno gorivo se ne miješa prisilno sa zrakom na visokoj temperaturi, kao što je to uobičajeno kod drugih sustava pripreme smjese gorivo zrak, već se preko zida prostora zagrijava samo do dopuštene vrijednosti. Tako kisik iz zraka, na neki način može se reći toplinski prigušeno, može gorivo prihvatiti u malim količinama, a da ne nastupi hidraulično prigušivanje dovođenja kisika (kao kod predkomornih motora) uz istovremeno pregrijavanje molekule goriva. Na taj način isključeno je samozapaljenje nekontrolirane veće količine goriva [2].



Slika 1: Ubrizgavanje goriva kod M postupka (a - klip, b - brizgaljka, c - mlaz goriva, d - zid prostora u klipu u obliku polukugle)

Biranjem malog rastojanja između otvora brizgaljke i zida prostora za izgaranje samo će se mala količina goriva odvojiti od ubrizganog mlaza, koja će za razliku od one količine goriva koja se nanosi na zid proživjeti procese samozapaljenja koji su uobičajeni za dizelov motor. Dio goriva koji se nalazi na zidu postupno se zagrijava i počinje isparavati; brzina isparavanja je ovisna od razlike temperature između zida i

plina (s vremenom sve veća) kao i stalno narastajućim zračenjem plina. Samo onaj dio goriva koji ispari može sudjelovati u stvaranju smjese, koja se odvija vrlo brzo s jedne strane zbog goriva u parnom stanju, a s druge strane zbog velike brzine kretanja zraka. Ispareni dijelovi goriva nisu pretrpjeli nikakvo ili vrlo malo raspadanje, te tako stvaraju upravo mješavinu koja zbog dugog vremena indukcije ne dostiže točku samozapaljenja nego izgara zbog paljenja drugim izvorima. Kao izvori zapaljenja služe usijani djelići ugljika stvoreni samozapaljenjem male količine goriva iz inicijalne faze.

Bez obzira što se prethodno opisani pojedinačni procesi međusobno vremenski preklapaju, moguće je napraviti shemu iz koje proizlazi razlika tijekom stvaranja smjese u uobičajenim dizelovim motorima i kod M.A.N. M-postupka. U prvom redu se kod M-postupka primjećuje podjela ukupne količine goriva na dva dijela. Veći dio od ukupne količine goriva se uvodi u mješavinu tek nakon isparavanja, dok se kod uobičajenog dizelovog procesa gorivo uvodi u mješavinu prije njegovog isparavanja. Zidovi prostora za izgaranje, prvenstveno onaj dio koji se nalazi u klipu, ima sličan zadatak kao rasplinjač kod ottovog motora, i on pri visokom tlaku i visokim temperaturama dovodi do isparavanja čak i onih dijelova goriva koji imaju visoku točku vrelišta. Stvaranje smjese neposredno prije njenog izgaranja ostavlja vrlo malo vremena za djelovanje tlaka, tako da se zvukovi (kucanje) uzrokovani naglom promjenom tlaka izbjegavaju. Način vođenja izgaranja bitno utječe i na oblik karakteristike oslobađanja topline, tako da su evidentne i razlike u njenom karakteru u odnosu na motore s izravnim ubrizgavanjem cjelokupnog mlaza u radni prostor [3]. U nastavku rada predstavljena je aproksimativna funkcija karakteristike oslobađanja topline prilagođena za korištenje na motorima s M postupkom ubrizgavanja goriva, a koji kao gorivo koristi dizel ili biodizel.

2. Eksperimentalna postavka i rubni uvjeti

Za eksperimente je korišten 6-cilindarski, četverotaktni dizelov motor namijenjen za upotrebu kao pogonski agregat u autobusima. U tablici 1 dani su osnovni podaci ispitivanog motora.

Tablica 1: Osnovni podaci ispitivanog motora

Motor	Prirodni usis, 4-taktni s M postupkom ubrizgavanja goriva
Broj cilindara	6
Promjer i hod klipa	125 mm x 155 mm
Radni volumen	11,413 dm ³
Stupanj stlačivanja	18
Kut početka ubrizgavanja goriva	23 °KV prije GMT
Nominalna snaga/pri broju okretaja	160 kW/2200 min ⁻¹
Maksimalni okretni moment/pri broju okretaja	775 Nm/1400 min ⁻¹

Određivanje relevantnih pokazatelja rada motora sui izvršeno je na ispitnom stolu u laboratoriju *Tehniške fakultete Univerze v Mariboru* u kontroliranim uvjetima. Ispitivanja su vršena na parcijalnim i na maksimalnom opterećenju motora sui, kao i kroz cjelokupno brzinsko područje. Za mjerenje fizikalnih veličina, poput tlaka, temperature, protoka energenata korištene su normirane i za ovu oblast ispitivanja uobičajene metode. Pokazatelji rada motora sui su određivani za fosilno i biodizelsko grivo. Korištena goriva su zadovoljavala kriterije o kvaliteti navedene u odgovarajućim normama i preporukama (za fosilni dizel EN 590, za biodizel EN 14214). Osnovne karakteristike korištenih goriva prikazane su u tablici 2.

Tablica 2: Karakteristike dizela i biodizela

Gorivo	Dizel	Biodizel
Kinematička viskoznost pri 30 °C [mm ² /s]	3,34	5,51
Površinska napetost pri 30 °C [N/m]	0,0255	0,028
Ogrjevna vrijednost [kJ/kg]	43.800	38.177
Cetanski broj [-]	45-55	>51

Zbog različitih fizikalnih osobina fosilnog goriva i biodizela [4] javljaju se i određene razlike u procesu formiranja radne smjese goriva i zraka [5]. Razlike u osobinama promatranih goriva prvenstveno utječu na optimalni kut ubrizgavanja goriva [6], fizikalne procese miješanja goriva i zraka, razdoblje pritajenog izgaranja [6], što u konačnici ima utjecaja na izgaranje unutar motora sui, odnosno performanse motora s aspekta razvijene snage i emisija ispušnih plinova. Tijekom istraživanja zaključeno je da je za dostizanje optimalnih performansi motora sui, pri korištenju biodizelskog goriva, neophodno smanjivati kut ubrizgavanja goriva [7]. Osnovne karakteristike promatranih goriva koje doprinose ovakvom zaključku u prvom redu su viskoznost i cetanski broj. Prema preporukama proizvođača motora sui za fosilno dizelsko gorivo optimalni kut ubrizgavanja je 23 °KV prije GMT, a prema provedenim istraživanjima pokazalo se da je za biodizel optimalan kut ubrizgavanja 21 °KV prije GMT [8].

3. Matematičko modeliranje karakteristike oslobađanja topline

Zbog složenosti procesa koji se odvijaju pri izgaranju u motoru sui, na prvi pogled tako složenoj stvarnosti izgleda primjeren i adekvatno složen postupak modeliranja koji bi pojedinačne procese mogao opisati u prostoru i vremenu. Trodimenzionalni proračunski kodovi koji danas stoje na raspolaganju zaista posjeduju potencijal za rješavanje ovog zadatka. Međutim, trud koji treba uložiti za točan opis geometrije radnog prostora motora sui je velik, vrijeme potrebno za provođenje proračuna je znatno i njihova točnost je zbog nepotpunog poznavanja zakonitosti pojedinih procesa ograničena. Kao druga krajnost, nasuprot trodimenzionalnim modelima još uvijek se u primjeni nalaze, prije svega zbog svoje jednostavne strukture i potrebnog kratkog vremena za dobivanje konkretnih rezultata, tzv. bez- ili nul-dimenzijanski modeli.

Pošto karakteristika oslobađanja topline u biti opisuje karakter odvijanja procesa izgaranja u motoru sui, njeno poznavanje je od iznimne važnosti za izvedene i za projektirane motore. Kod izvedenih motora se najčešće karakteristika oslobađanja topline (KOT) određuje putem snimljenih indikatorskih dijagrama, pošto je točnost koja se na taj način može postići dobra i zadovoljavajuća. Kod projektiranih motora karakteristiku oslobađanja topline je vrlo teško odrediti. Najčešće se u tim slučajevima zadovoljava s indikatorskim dijagramima motora slične izvedbe, ili se pretpostavljaju određeni oblici karakteristike oslobađanja topline pa se analiziraju njihovi utjecaji na odvijanje procesa u motoru sui [9].

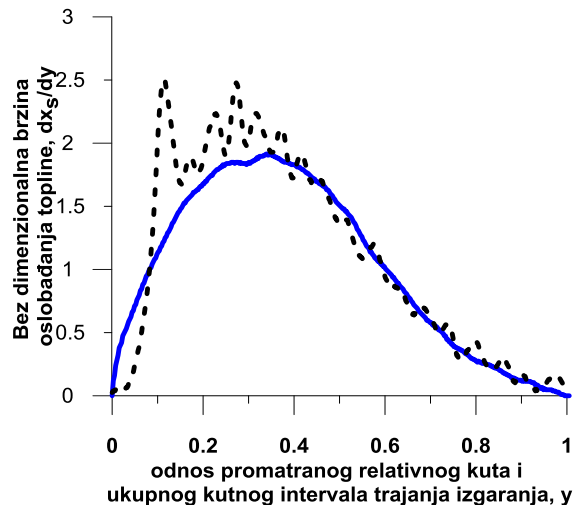
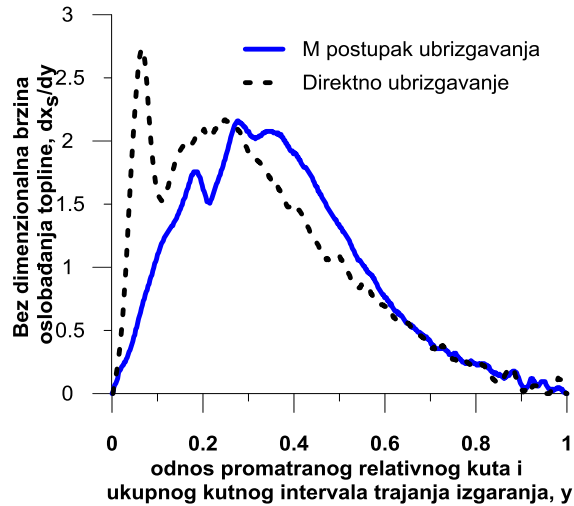
Na slici 2, gdje su prikazane karakteristike oslobađanja topline za usisni dizelov motor s M postupkom i prehranjivani dizelov motor s izravnim ubrizgavanjem goriva, za dva brzinska režima, jasno se vide razlike u karakteru izgaranja. Ovdje predstavljena aproksimativna funkcija zasniva se zapravo na korelacijskom izrazu Marzouk – Watsona, uz zadržavanje, naravno, osnovne ideje, to jest da se KOT predstavi superponiranjem dvije međusobno povezane funkcije. Da bi se dobila što bolja moguća korelacija, izvršena su ispitivanja na motoru sui za različite kutove ubrizgavanja (21 °KV i 23 °KV prije GMT) i to za oba goriva, dizel i biodizel.

Korištenjem statističkih metoda, kao i metoda za „fitanje“ krivulja poput metode razlike najmanjih kvadrata i sličnih, izvršena je korekcija izraza tako da se dobivaju upotrebljivi izrazi za simuliranje KOT kod dizelovog motora s M postupkom ubrizgavanja goriva uzimajući u obzir i različita goriva. Kod dizelovog motora s M postupkom ubrizgavanja goriva početni „šiljak“ na karakteristici oslobađanja topline je mnogo manje naglašen (usprkos činjenici da se veliki dio goriva ubrizga tijekom razdoblja zakašnjenja paljenja), iako je ukupno razdoblje izgaranja otprilike jednako, dok se čak „šiljak“ na većim brzinskim režimima i gubi (slika 2, desno). Nažalost, predmetni motori se ne mogu uspoređivati sa stajališta početka ubrizgavanja i razdoblja zakašnjenja paljenja, te intenziteta izgaranja, pošto se radi o drukčijim koncepcijama motora, a samim tim i kutovi ubrizgavanja goriva su različiti, kao i sami sustavi za dobavu goriva. Slika je dana ilustrativno kako bi se pokazala razlika u karakteru karakteristike oslobađanja topline.

Kroz povijest, prvi aproksimativni analitički izrazi koji su korišteni za opisivanje karakteristike oslobađanja topline (KOT) imali su vrlo jednostavne oblike trokuta, dva trokuta, četverokuta i slično [10]. S ovakvim opisom KOT pri simuliranju procesa u motoru sui mogu se postići zadovoljavajuća slaganja vrijednosti tlaka, snage, potrošnje goriva i sl. Međutim, u slučajevima kada su se ovako prosti oblici KOT primjenjivali za uspoređenja gradijenata tlaka ili vrednovanja snimljenih indikatorskih dijagrama, vrlo brzo se naišlo na granice ove aproksimativne metode. Zaključak je, da bi aproksimativne metode mogle dati zadovoljavajuće rezultate, neophodno je da djelomično sadrže i elemente koji opisuju pojave u procesu izgaranja ustanovljene makro-razmatranjem procesa izgaranja.

Aproksimativne funkcije koje opisuju KOT, a koji su dobiveni radom na različitim koncepcijama i modelima zapravo direktno ili indirektno uzimaju u obzir sljedeće parametre:

- režim rada motora koji je definiran ekvivalentnim odnosom zraka α i brojem okretaja motora n
- stanje na početku izgaranja definirano razdobljem zakašnjenja paljenja T_{id}
- stanje svježije radne materije na ulazu u motor ili u trenutku kada se usisni ventil zatvara.



Slika 2: Karakteristika oslobađanja topline za motor s M postupkom ubrizgavanja i za motor s izravnim ubrizgavanjem goriva, režim maksimalnog opterećenja i dva brzinska režima

Zbog prethodno spomenutih specifičnosti karakteristike oslobađanja topline kod dizelovog motora s M postupkom ubrizgavanja goriva, često korištene aproksimativne funkcije, kao što su vobeova jedno i više stupanjska funkcija, nisu mogle zadovoljiti uvjete za uspoređivanje gradijenata tlaka i vrednovanja snimljenih indikatorskih dijagrama. U nastavku se daje novo razvijena aproksimativna funkcija karakteristike oslobađanja topline koja omogućava vrlo dobro simuliranje procesa u motoru sui, pri korištenju dizelskog i biodizelskog goriva.

Novi korelacijski izraz koji u dobroj mjeri opisuje KOT kod dizelovog motora s M postupkom, dobiven temeljem korekcije izraza Marzouk-Watsona, glasi [5]:

$$\frac{dx_s}{dy} = \beta^* \cdot f_1^*(y) + (1 - \beta^*) \cdot f_2^*(y) \quad (1)$$

$$f_1^*(y) = C_1^* \cdot C_2^* \cdot y^{(C_1^*-1,2)} \cdot (0,9999 - y^{C_1^*})^{(C_2^*-1,15)} \quad (2)$$

$$f_2^*(y) = C_3^* \cdot C_4^* \cdot y^{(C_3^*-0,3)} \cdot e^{(-C_5^* \cdot y^{(C_4^*+C_5^*)})} \quad (3)$$

$$\beta^* = \frac{-0,324 \frac{\varphi_{id}}{\alpha}}{-26,75 + \frac{\varphi_{id}}{\alpha}}; \varphi_{id} [^\circ\text{KV}], \alpha [-] \quad (4)$$

$$y = \frac{\varphi - \varphi_{CB}}{\varphi_{CD}} \quad (5)$$

dok se izrazi za računanje konstanti daju u sljedećem obliku:

$$\left. \begin{aligned} C_1^* &= 0,175 \cdot 0,9997^{\tau_{id} \cdot n} \cdot (\tau_{id} \cdot n)^{0,54}; \tau_{id} [\text{ms}], n [\text{min}^{-1}] \\ C_2^* &= \exp \left[-49,73 + \frac{7239}{\tau_{id} \cdot n} + 7,43 \ln(\tau_{id} \cdot n) \right]; \tau_{id} [\text{ms}], n [\text{min}^{-1}] \\ C_3^* &= \frac{7,8}{\exp \left[\frac{-(\tau_{id} \cdot n - 1207)^2}{22,82 \cdot 10^5} \right]}; \tau_{id} [\text{ms}], n [\text{min}^{-1}] \\ C_4^* &= \frac{1,52}{\exp \left[\frac{-\left(\frac{\varphi_{id}}{\alpha} - 6,35\right)^2}{38,9} \right]}; \varphi_{id} [^\circ\text{KV}], \alpha [-] \\ C_5^* &= \frac{CN \cdot 3,25}{43,33 + 28,14 \frac{\varphi_{id}}{\alpha} - 2,56 \left(\frac{\varphi_{id}}{\alpha}\right)^2}; \varphi_{id} [^\circ\text{KV}], \alpha [-] \end{aligned} \right\} (6)$$

U odnosu na Marzouk-Watsonov korelacijski izraz u prvom redu su na osnovi eksperimentalnih istraživanja korigirane konstante u eksponentima funkcija $f_1(y)$ i $f_2(y)$ (izrazi (2) i (3)), a zatim su se korištenjem različitih metoda optimizacije odredile konstante za dani režim rada motora.

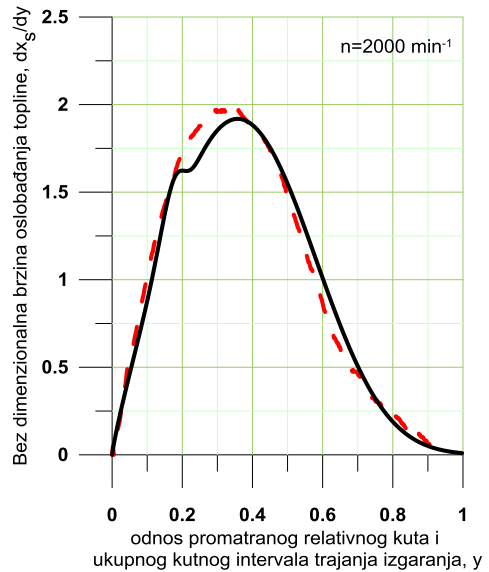
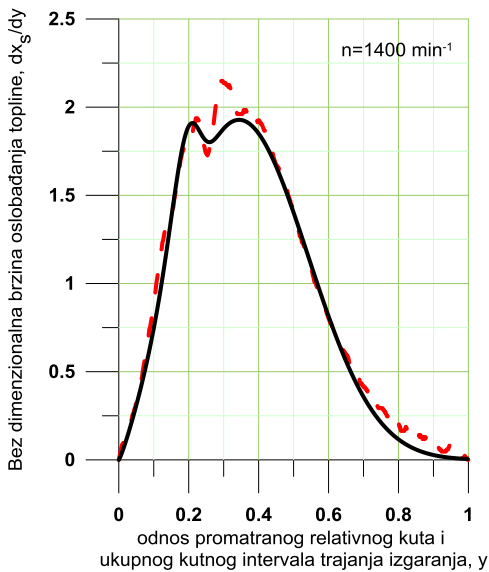
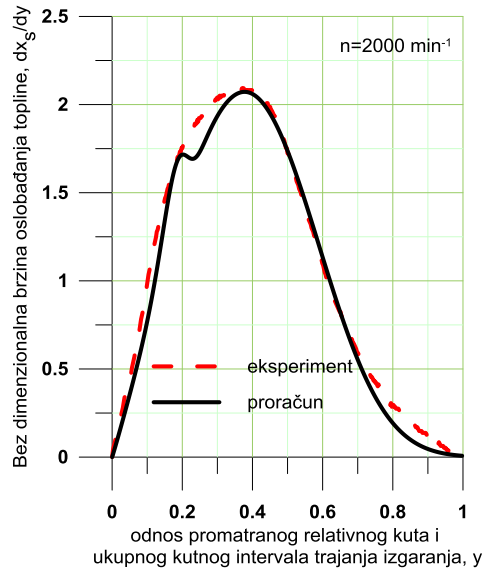
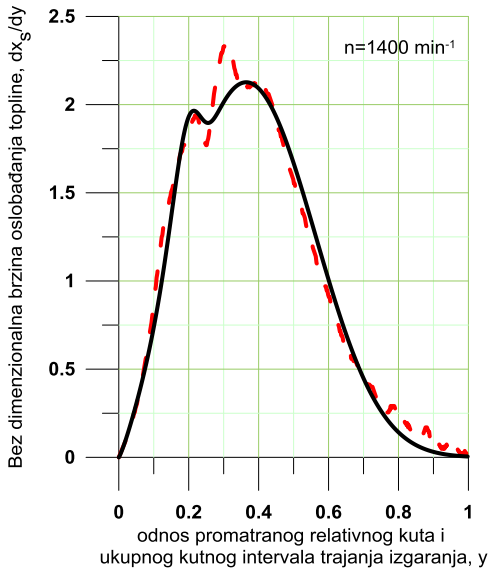
Naime, pri korekciji izraza Marzouk-Watson vodilo se računa o tome da se radni režim motora definira parametrima kao što su ekvivalentni odnos zraka (α), broj okretaja motora (n), razdoblje zakašnjenja paljenja (τ_{id}, φ_{id}), pošto je upravo ovim parametrima definirano trenutačno radno stanje motora sui; ekvivalentni odnos zraka (α) i broj okretaja motora (n) određuju radni režim motora, dok je razdobljem zakašnjenja paljenja (τ_{id}, φ_{id}) uzeto u obzir i stanje radne materije u trenutku zatvaranja usisnog ventila kao i kut ubrizgavanja goriva. Uvođenjem nove konstante C_5^* u izrazu modificirane funkcije $f_2^*(y)$, putem cetanskog broja (CN), uzet je u obzir i utjecaj vrste goriva na KOT.

4. Analiza rezultata

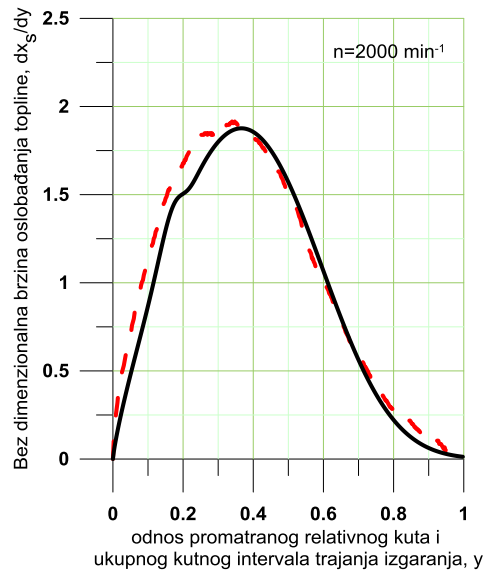
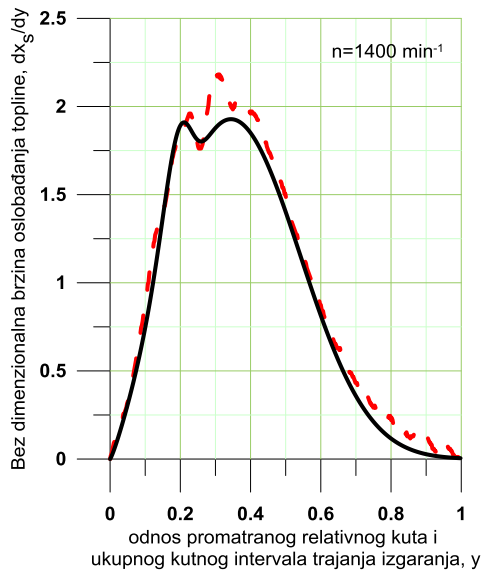
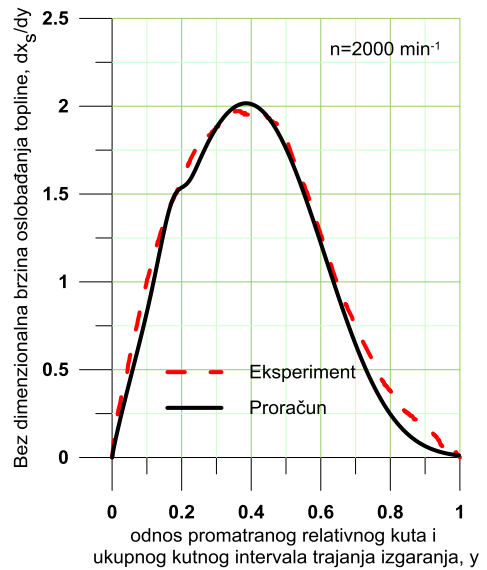
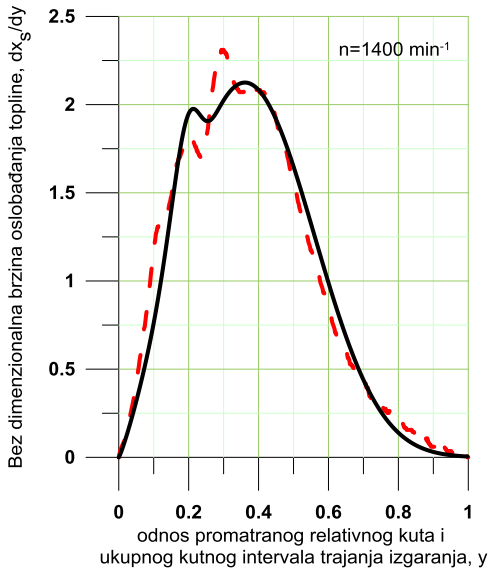
Korištenjem aproksimativne funkcije (1) dobivene su KOT za dizelov motor s M postupkom koje su uspoređivane s eksperimentalno dobivenim karakteristikama. Na slici 3 uspoređene su bezdimenzionalne brzine oslobađanja topline (dx_s/dy) dobivene na putem eksperimenta i proračuna za dizelsko i biodizelsko gorivo, razmatrajući režim maksimalnog opterećenja, te dva brzinska režima s kutom početka ubrizgavanja goriva od 21 °KV prije GMT. Kao što se može i vidjeti sa slike, predložena aproksimativna funkcija za bezdimenzionalnu brzinu izgaranja, zasnovana na korelaciji Marzouk-Watsona, prati promjene u karakteru krivulje koje su posljedica korištenja različitog goriva, kao i različitih brzinskih režima rada, odnosno daje vrlo dobra slaganja s eksperimentalnim rezultatima, kako po intenzitetu tako i po karakteru u različitim radnim režimima motora s M postupkom.

Da bi se provjerila nova aproksimativna funkcija s aspekta promjene kuta početka ubrizgavanja goriva, na slici 4 uspoređene su bezdimenzionalne brzine oslobađanja topline (dx_s/dy) dobivene na putem eksperimenta i proračuna za dizelsko i biodizelsko gorivo, razmatrajući režim maksimalnog opterećenja, te dva brzinska režima s kutom početka ubrizgavanja goriva od 23 °KV prije GMT.

Kao i u prethodnom primjeru nova aproksimativna funkcija za bezdimenzionalnu brzinu izgaranja zasnovana na korelaciji Marzouk-Watsona daje vrlo dobra slaganja po intenzitetu i po karakteru u svim radnim režimima motora s M postupkom, te je time potvrđena i osjetljivost aproksimativne funkcije i s aspekta promjene kuta početka ubrizgavanja goriva.



Slika 3: Bezdimenzijska brzina oslobađanja topline dx_s/dy za dizelov motor s M postupkom korištenjem biodizelskog i dizelskog goriva, za brzinske režime 1400 min^{-1} i 2000 min^{-1} i statički kut ubrizgavanja od 21°KV prije GMT: biodizel (gore), dizel (dolje)



Slika 4: Bezdimezionalna brzina oslobađanja topline dx_s/dy za dizelov motor s M postupkom korištenjem dizelskog i biodizelskog goriva, za brzinske režime 1400 min^{-1} i 2000 min^{-1} i statički kut ubrizgavanja od 23°KV prije GMT: biodizel (gore), dizel (dolje)

5. Zaključak

U radu su predstavljeni rezultati istraživanja na uspostavljanju aproksimativne funkcije karakteristike oslobađanja topline kod linijskog, hlađenog, srednje brzohodnog dizelovog motora s izravnim ubrizgavanjem goriva putem tzv. M-postupka ubrizgavanja goriva. Nova aproksimativna funkcija, koja je bazirana na korelacijskom izrazu Marzouk-Watsona, preko odgovarajućih parametara ciklusa uzima u obzir promjene režima rada motora sui i primjenu goriva različitih cetanskih vrijednosti čime je omogućeno promatranje karakteristike oslobađanja topline koja se dobiva pri korištenju dizelskog i biodizelskog goriva.

Upotrebljivost nove aproksimativne funkcije je testirana upotrebom eksperimentalnih rezultata. Pokazana su vrlo dobra slaganja računskih i eksperimentalnih rezultata, i po intenzitetu i po karakteru u svim radnim režimima motora, kao i pri promjeni kuta početka ubrizgavanja goriva.

Predstavljenom aproksimativnom funkcijom dobiva se alat koji će omogućiti analiziranje procesa izgaranja pri upotrebi dizelskog goriva i biodizela, te donošenja odgovarajućih zaključaka s obzirom na različitosti procesa izgaranja pri upotrebi različitih goriva kod motora s M postupkom ubrizgavanja goriva.

Literatura

- [1] Kuo K. K., Principles of Combustion, John Wiley&Sons, New York, 1986.
- [2] Meurer J. S., Das M.A.N. - M-Verbrennungsverfahren, M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg – Nürnberg.
- [3] Lee D. I., Combustion Simulations of Direct Injection Diesel Engine Having „M“ Type Combustion Chamber, International Symposium COMODIA 85 (1985).
- [4] Kegl B., Project Mobilis – Civitas II – Fuel Properties, WD 5.4.L-4, University of Maribor, Maribor, 2005.
- [5] Bibić Dž., Karakteristike sagorijevanja biodizela i njegovih mješavina sa fosilnim gorivima u dizel motorima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo, 2007.
- [6] Bibić Dž., Filipović I., Hribernik A., Pikula B.; Investigation Into The Effect of Different Fuels on Ignition Delay of M-Type Diesel Combustion Process, Thermal Science: vol. 12 (2008), no. 1, pp. 103-114, Belgrad, Serbia (ISSN 0354-9836).
- [7] Bibić Dž., Hribernik A., Filipović I., Kegl B., Utjecaj biogoriva na performance dizelovog motora, Goriva i maziva, godina 50, br. 4, X-XII, 317-325, 2011, ISSN 0350-350X, Zagreb.
- [8] Kegl B., Hribernik A., Experimental Analysis of Injection characteristics Using Biodiesel Fuel, Energy & Fuels, 2006, 20, 2239 – 2243.
- [9] Pischinger R., Kraßnig G., Taučar G., Sams Th., Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer – Verlag Wien, 2010.

- [10] Jankov R., Matematičko modeliranje strujno – termodinamičkih procesa i pogonskih karakteristika dizel motora – kvazistacionarni modeli. I dio, Naučna knjiga Beograd, 1984.

Korištene oznake:

n – broj okretaja

$C_1^*, C_2^*, C_3^*, C_4^*, C_5^*$ – konstante

y – odnos promatranog relativnog kuta i ukupnog kutnog intervala trajanja izgaranja

$\frac{dx_3}{dy}$ – bezdimenzionalna brzina oslobađanja topline

$f_1^*(y)$ - funkcija

$f_2^*(y)$ - funkcija

α – ekvivalentni odnos zraka

β^* – konstanta

φ – kut radilice motora

φ_{CB} – kut radilice motora pri početku izgaranja

φ_{CD} – kutni interval trajanja izgaranja

φ_{id} – kutni interval zakašnjenja početka izgaranja

τ_{id} – vremenski interval zakašnjenja početka izgaranja

KOT – karakteristika oslobađanja topline

GMT – gornja mrtva točka

Autori

izv. prof. dr sc. Dževad Bibić, prof. dr. sc. Ivan Filipović, izv. prof. dr sc. Boran Pikula
Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Vilsonovo šetalište 9,
71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, tel./fax. +387 33 650 841;

e-adresa: bibic@mef.unsa.ba, fillipovic@mef.unsa.ba, pikula@mef.unsa.ba

prof. dr. sc. Aleš Hribernik; Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo,

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Republika Slovenija,

e-adresa: ales.hribernik@uni-mb.si

Primljeno

15.12.2014.

Prihvaćeno

3.3.2015.