



## بررسی عددی تاثیر توابع پاششی مختلف در یک انژکتور مقطع حلقوی بر روی عملکرد موتور دیزل

رسول اسمعیل نژاد<sup>1</sup>، محمدتقی شروانی‌تبار<sup>2\*</sup>، محرم جعفری<sup>3</sup>، سید اسماعیل رضوی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 5166616471، msherv@tabrizu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 آبان 1396

پذیرش: 05 بهمن 1396

ارائه در سایت: 26 بهمن 1396

کلید واژگان:

انژکتور مقطع حلقوی

تابع پاشش انژکتور

روش عددی

عملکرد موتور دیزل

یکی از راهکارهای بهبود عملکرد موتورهای دیزلی استفاده از آهنگ پاشش مناسب سوخت می‌باشد. در این مقاله شش تابع پاشش سوخت مختلف انتخاب و اثر آن بر روی عملکرد موتور دیزل به روش عددی، با استفاده از نرم افزار فایر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد انژکتور مقطع حلقوی با افزایش زاویه سوخت موجب توزیع مناسب آن در داخل محفظه احتراق موتور می‌شود. با استفاده از توابع پاششی مناسب سوخت، توان موتور افزایش و مقدار آلاینده‌های تولیدی آن کاهش می‌یابد. پاشش سوخت شبه مثلثی در مقایسه با نرخ پاشش ثابت دارای عملکرد مناسب‌تری می‌باشد و در این تابع مصرف سوخت ویژه تا  $0.2043 \text{ kg/kJ}$  کم می‌شود و این در حالی است که مقدار توان در این حالت تا  $27.5\%$  افزایش و مقدار اکسید نیتروژن اندکی افزایش می‌یابد. در تابع ثابت-کاهشی مقدار مصرف سوخت ویژه تا  $0.2029 \text{ kg/kJ}$  کاهش ولی در این حالت مقدار اکسید نیتروژن در مقایسه با تابع ثابت افزایش می‌یابد. تابع ثابت-افزایشی دارای توان تولیدی تقریباً برابر با تابع ثابت بوده ولی در این حالت مقدار اکسید نیتروژن تولیدی به مقدار مناسبی کاهش می‌یابد.

## Numerical study on the effects of different injection patterns in an annulus injector on the performance of a diesel engine

Rasool Esmaelnajad<sup>1</sup>, Mohamad Taghi Shervani-Tabar<sup>1\*</sup>, Moharram Jafari<sup>1</sup>, Seyed Esmail Razavi<sup>1</sup>

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, msherv@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 November 2017  
Accepted 25 January 2018  
Available Online 15 February 2018

### Keywords:

Annulus Injector  
Injector spray function  
Numerical methods  
Diesel engine performance

### ABSTRACT

One of the important ways for improving performance of diesel engines is selecting of a proper and efficient fuel injection pattern. In this study six different patterns of fuel injection have been considered and performance of a diesel engine by using these patterns of fuel injection have been investigate numerically by employing AVL Fire. An annulus nozzle have been consider for the fuel injection system. It is expected that considering an annulus nozzle lead to increase of spry cone angle and proper distribution of the fuel inside the combustion chamber. Results show that employing proper and efficient patterns of fuel injection lead to increase of engine power and decrease of exhaust pollutants gases. Results also show that by employing a quasi-triangle fuel injection pattern, the diesel engine has better performance in competition with the case of using a constant fuel injection. It is found that by employing a quasi-triangle pattern of fuel injection, SFC reduces to  $0.2043 \text{ kg/kJ}$ , while the engine power increased by  $27.5\%$  and the magnitude of NO increases slightly. In the case of employing a constant-decreasing fuel injection pattern, the magnitude of SFC reduces to  $0.2029 \text{ kg/kJ}$  whereas the magnitude of NO increases in comparison with the case of using constant fuel injection pattern. Numerical results show that by employing a constant-increasing pattern of fuel injection, the engine power is approximately equal to the engine's power in the case of using a constant fuel injection pattern. But in this case the magnitude of NO reduces considerably.

### 1- مقدمه

درون‌سوز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. بهبود رفتار اسپری سوخت با تغییر هندسه انژکتور و کنترل جرم ورودی آن یکی از روش‌های کارآمد در بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق می‌باشد. تعریف هر روش و مسیر برای رسیدن به بهبود عملکرد در موتورهای دیزلی منجر به تغییر سایر پارامترهای احتراقی می‌شود. بنابراین عوامل احتراقی و آلایندگی

افزایش تعداد موتورهای درون‌سوز و به تبع آن افزایش آلاینده‌های حاصل از احتراق موجب به وجود آمدن استانداردهای مختلف آلایندگی در دهه‌های اخیر شده است. که این استانداردها به دنبال کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های حاصل از احتراق می‌باشند. برای بهبود عملکرد موتورهای

### Please cite this article using:

R. Esmaelnajad, M. T. Shervani-Tabar, M. Jafari, S. E. Razavi, Numerical study on the effects of different injection patterns in an annulus injector on the performance of a diesel engine, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 02, pp. 423-433, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

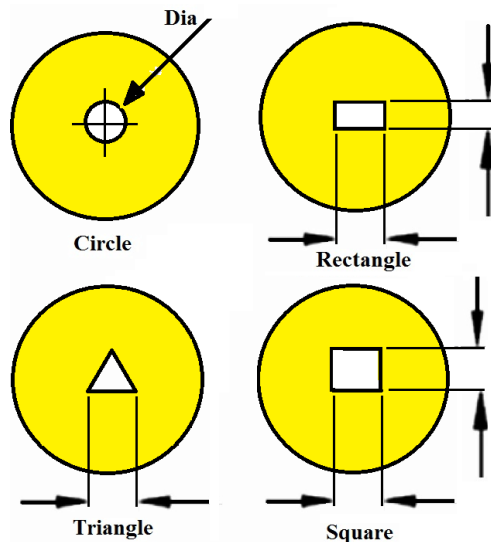


Fig. 1 Circular and non-circular cross sections of different kind of injector orifices

شکل 1 انواع مقاطع دایروی و غیردایروی اریفیس انژکتور

امکان پذیر شد. با تغییر فشار پاشش می توان مقدار جرم ورودی به داخل سیلندر را تغییر داد. پاشش سوخت در فشارهای بالا عموماً موجب بهبود رفتار اسپری سوخت شده و همچنین استفاده از توابع پاششی مختلف موجب بهبود عملکرد آن می شود [18-21]. از توابع جرم سوخت ورودی مختلف برای کنترل عملکرد موتور می توان استفاده نمود [22,23]. مهم ترین کاربرد آن برای کاهش مقدار آلاینده های اکسید نیتروژن و دوده می باشد [24]. اعمال توابع مختلف با روش های مختلفی صورت می گیرد [25]. با توجه به اینکه استخراج تابع پاشش مناسب به روش تجربی کاری زمان بر و پرهزینه می باشد. بنابراین استخراج اثر توابع پاششی مختلف به روش عددی بیشتر مورد توجه محققان بوده است [26,27]. استفاده از توابع پاششی مختلف، پاشش به صورت استراتژی یگانه یا چندگانه صورت می گیرد [28-30]. به منظور بهبود عملکرد در موتورهای بنزینی نیز امروزه از توابع پاششی مختلف استفاده می شود [31,32].

در کار حاضر یک انژکتور با اریفیس حلقوی معرفی شده است این نوع از انژکتور دارای اریفیس خروجی، با مقطع حلقه ای شکل می باشد. با این که سطح مقطع خروجی اریفیس حلقوی به مقدار جزئی بیشتر از سطح مقطع یک اریفیس معمولی با سطح مقطع دایره ای می باشد. اما از آن جا که ضخامت اریفیس حلقوی در مقایسه با قطر اریفیس دایروی به مراتب کوچکتر است. لذا در اولین مراحل پاشش سوخت به محفظه ای احتراق قطرات سوخت خروجی از اریفیس حلقوی به مراتب کوچکتر از قطرات سوخت خروجی از اریفیس معمول با سطح مقطع دایره ای می باشد. همچنین در این مقاله شش الگوی مختلف آهنگ پاشش در حالت اریفیس حلقوی در نظر گرفته شده و عملکرد موتور احتراقی دیزل در این شش حالت مقایسه و بررسی گردیده است. بررسی موارد ذکر شده، به روش دینامیک سیالات محاسباتی با شبیه سازی در نرم افزار فایر<sup>1</sup> انجام شده است؛ اما شایان ذکر است که نمونه ای مورد مطالعه و شرایط مرزی استفاده شده عیناً مطابق با شرایط کاری موتور دیزل کوپوتا V3300 است.

## 2- روش عددی

تاثیرگذار باید مورد دقت قرار گیرند [1].

استفاده از انژکتورهای چند سوراخه موجب بهبود عملکرد انژکتورها می شود این نوع از انژکتورها قطرات به صورت ریزتر و یکنواخت تر در داخل سیلندر پخش می نمایند. استفاده از این نوع از انژکتورها عملکرد احتراقی موتور را بهبود بخشیده و موجب کاهش مقدار آلاینده های تولیدی می شود. این نوع انژکتورها با اینکه اسپری سوخت را در مقایسه با انژکتورهای تک سوراخه به صورت یکنواخت تر در داخل سیلندر پخش می نمایند. ولی باز در اسپری این نوع از انژکتورها نواحی فقیر و غنی از سوخت وجود دارد. در این زمینه کارهای متعددی عددی و تجربی صورت گرفته است [2-5]. یکی از فناوری های برای رفع این مشکل مطرح شده است استفاده از سوراخ های گروهی میکرونی است هدف استفاده از نازل هایی با سوراخ های بسیار ریز و بسیار نزدیک به هم، بهبود بخشیدن به روند تبخیر سوخت، بدون لطمه زدن به مقدار عمق نفوذ انژکتور، از طریق برخورد دو اسپری با هم است. این نوع از انژکتورها نیز توانسته اند به مقدار مناسبی تشکیل دوده و اکسید نیتروژن را در موتورهای دیزلی کاهش داده و موجب بهبود عملکرد آن ها شوند [6-8].

با برخورد سوخت به محفظه ای احتراق در سرعت های بالا، توزیع سوخت در محفظه احتراق و مخلوط شدن با هوا تضعیف خواهد شد. این مسئله مقدار هوای نفوذ یافته به درون اسپری سوخت را کاهش می دهد و موجب افزایش دوده می شود. حالتی بهینه برای طراحی فرآیند احتراق حالتی است که در آن هم مقدار تبخیر شدن اسپری سوخت و هم عمق نفوذ آن در حد مطلوبی باشند. به همین دلایل قطر سوراخ انژکتور نیز یک پارامتر اساسی در عملکرد موتور دیزلی می باشد. قطر بزرگ موجب افزایش قطر قطرات و همچنین افزایش طول نفوذ و برخورد قطرات به سرسیلندر می شود. قطر کم موجب کاهش جرم ورودی و طول نفوذ می شود [9,10].

ایجاد شیارهایی در داخل اریفیس انژکتورهای چند سوراخه روشی نوین برای چرخاندن اسپری سوخت ورودی می باشد. نتایج نشان می دهد که این چرخش اولیه اسپری سوخت موجب اختلاط مناسب سوخت و هوا شده و همچنین موجب افزایش زاویه ای مخروط اسپری می شود. با استفاده از این نوع از انژکتورها مقدار آلاینده های تولیدی به مقدار مناسبی کاهش یافت [11].

مقاطع اریفیس غیردایروی در فشارهای کم انژکتور در صنایع کشاورزی و دارویی مورد استفاده قرار می گیرد [12]. استفاده از مقاطع مربعی، مثلثی و مستطیلی در فشارهای خیلی بالا به منظور استفاده از آن ها برای اسپری سوخت در سال های اخیر مورد توجه بوده است. نمونه هایی از مقاطع مورد استفاده در "شکل 1" آمده است. نتایج نشان می دهد که انژکتورها تخت دارای زاویه اسپری بهتری می باشند [13].

میگلکیو و همکاران [14] در سال 2017 رفتار اسپری سوخت خروجی از انژکتورهای مقطع حلقوی در فشارهای بسیار بالا را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آن ها اسپری حاصل از انژکتور مقطع حلقوی دارای زاویه ای پاشش بالا و طول نفوذ کم می باشد که می توان با استفاده از آن مقدار زیادی از سوخت را در زمان کم تزریق نمود.

در کار حاضر چون جرم ورودی متغیر می باشد بنابراین اثر پرخروانی موتور نیز در نظر گرفته شده است. با پاشش زیاد سوخت به داخل سیلندر نیاز به هوای بیشتر برای احتراق صحیح می باشد. در عمل این کار توسط توربوشارژر و سوپر شارژرها اتفاق می افتد [15-17].

با توسعه ای انژکتورهای ریل مشترک و استفاده از کنترل الکترونیکی در آن ها، ایجاد فشارهای بسیار بالا و توابع جرمی سوخت مختلف در انژکتورها

<sup>1</sup> AVL Fire

در این مقاله از روش حجم محدود برای شبیه‌سازی توسعه اسپری سوخت و فرآیند احتراق در محفظه استفاده شده است. جریان داخلی انژکتور به‌منظور در نظر گرفتن پدیده کاویتاسیون؛ به‌صورت جریان چندفازی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی از رویکرد اوایلر-اوایلر و روش VOF برای توصیف جریان چندفازی داخل نازل استفاده شده است. شبیه‌سازی توسعه اسپری سوخت در محفظه احتراق با استفاده از رویکرد اوایلر-لاگرانژ انجام گرفته است. در این رویکرد حرکت قطرات درون محفظه احتراق به صورت لاگرانژی در یک محیط غالب اوایلری ردیابی می‌شوند. رویکرد اوایلری نیز به منظور شبیه‌سازی هوای متراکم درون محفظه احتراق استفاده می‌شود. با توجه به این که خروجی انژکتور مقطع حلقوی به‌صورت ورقه‌ای می‌باشد. برای شبیه‌سازی نحوه رفتار اسپری در داخل سیلندر از مدل ورقه‌ای<sup>1</sup> استفاده شد. این مدل نشان‌دهنده یک مدل نیمه تجربی برای شکست اولیه<sup>2</sup> ورقه خروجی از انژکتور می‌باشد. از این مدل به‌منظور تعیین شرایط اولیه اسپری مانند ضخامت ورق (لایه)، سرعت و طول شکست، استفاده می‌شود. "شکل 2" نحوه مدل‌سازی را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

در این مدل ضخامت ورق سیال با استفاده از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید [33]:

$$S_{fu} = \bar{\rho} \bar{r} = \frac{C_{fu}}{\tau_r} \bar{\rho} \min \left( \bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}_{ox}}{S}, \frac{C_{pr} \bar{y}_{pr}}{1+S} \right) \quad (7)$$

مدل دوده مورد استفاده در این پژوهش براساس الگوی آلاینده‌ی هیروایسو می‌باشد. در این مدل با ترکیب دو فرآیند فیزیکی و شیمیایی به منظور نمایش رویداد رشد رویه و اکسایش استفاده می‌شود. تشکیل ذرات و رشد رویه به ترتیب، تابعی از سوخت در جایی معین از محفظه احتراق و غلظت هسته‌ی دوده‌ی آن ناحیه است [35]. در این مدل دوده‌ی اکسایش یافته و دوده‌ی به‌وجود آمده مدل می‌شوند:

$$\frac{dM_{soot}}{dt} = \frac{dM_{form}}{dt} - \frac{dM_{oxide}}{dt} \quad (8)$$

در این مدل تشکیل دوده به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dM_{form}}{dt} = A_f M_{fv} P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) \quad (9)$$

و آهنگ اکسایش دوده برطبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dM_{oxide}}{dt} = \frac{6MW_c}{\rho_s D_s} M_s R_{tot} \quad (10)$$

آهنگ کاهش مخلوط براساس آهنگ اضمحلال و آهنگ مقدار محلی انرژی سینتیک آشفته آن تعیین می‌شود.

الگوی نیتروژن اکسید مورد استفاده در نرم‌افزار فایر، مدل زدوویج می‌باشد. این الگو به شدت وابسته به دما بوده، به‌وسیله واکنش نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا در دماهای بالا تولید می‌شود. غلظت نیتروژن اکسید، تأثیر بسیار کمی روی جریان دارد و بازه زمانی واکنش‌های نیتروژن اکسید، بیشتر از بازه زمانی است که برای آشفته‌ی فرآیند اختلاط و همچنین احتراق، که آزادسازی گرما را پایش می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین محاسبات نیتروژن اکسید می‌تواند جدای از محاسباتی باشد که برای واکنش اصلی پیش‌بینی می‌شود. در این مدل کاهش شیمیایی چند مرحله‌ای براساس تعادل جزئی واکنش‌های مقدماتی به‌صورت زیر می‌باشند.



واکنش کلی زیر از ضرب کردن طرف‌های راست و چپ معادله بالا به دست می‌آید:



از این رو طبق رابطه‌ی زیر آهنگ تشکیل اکسید نیتروژن استخراج می‌شود:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f [N_2][O_2] \quad (13)$$

از رابطه‌ی زیر آهنگ واکنش نیز استخراج می‌شود [36,33]:

2" نحوه مدل‌سازی را به‌صورت شماتیک نمایش می‌دهد. در این مدل ضخامت ورق سیال با استفاده از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید [33]:

$$h = \left[ \frac{A \cdot 12 \cdot m_1 \cdot \mu_1 \cdot (1+X)}{\pi \cdot \rho_1 \cdot d_{out} \Delta p (1-X)^2} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$X = \frac{(d_{out} - 2 \cdot h)^2}{d_{out}^2} \quad (2)$$

از آن جایی که  $h, x$  می‌توانند از معادلات (1) و (2) پیدا شوند، یک روش تکراری برای محاسبه‌ی ضخامت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ضریب سرعت  $K_V$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_V = \frac{v}{(2 \cdot \Delta p / \rho_1)^{0.5}} \quad (3)$$

که  $K_V$  می‌تواند از دو معادله (1) و (2) به‌صورت زیر محاسبه شود:

$$K_V = \frac{C_3}{\cos \theta} \cdot \left( \frac{1-X}{1+X} \right)^{0.5} \quad (4)$$

برای محاسبه‌ی طول شکست ورقه سیال از رابطه‌ی دکووویج - کلارک<sup>3</sup> استفاده می‌شود [33].

$$B_L = B \cdot \left[ \frac{\rho_l \cdot \sigma \cdot \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) \cdot \dot{h} \cdot \cos \theta}{\rho_g^2 \cdot V_{rel}^2} \right]^{0.5} \quad (5)$$

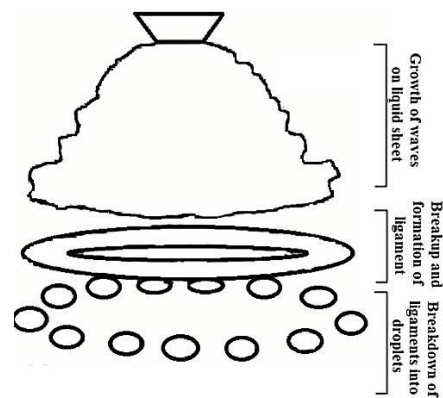


Fig. 2 Schematic of sheet breakup model

شکل 2 شماتیک مدل شکست ورقه‌ای سیال

<sup>1</sup> sheet  
<sup>2</sup> primary break-up  
<sup>3</sup> Clark-Dukowicz

$$k_f = \frac{a}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (14)$$

### 3- مدل سازی

مشخصات اصلی و شرایط عملکردی موتور مورد استفاده در این پژوهش در "جدول 1" آمده است. هندسه‌ی موتور استفاده شده همانند موتور کوبوتا V3300<sup>1</sup> می‌باشد. این موتور، یک موتور دیزلی تزریق مستقیم چهار زمانه با مکش طبیعی می‌باشد.

در مقاله حاضر بررسی رفتار انژکتور مقطع حلقوی تحت شرایط جریان بالا و پایین دست مختلف مدنظر می‌باشد. برای این منظور باید جریان داخل آن شبیه‌سازی شود، "شکل 3" هندسه انژکتور و نحوه خروج سوخت از پایین آن را نشان می‌دهد. در این شکل نمای نصف سوخت داخل انژکتور مقطع حلقوی که شبکه‌بندی شده، آمده است. ضخامت حلقه خروجی اریفیس در این مقاله 0.01mm می‌باشد. این انژکتور دارای طول اریفیس 0.5mm، قطر حلقه‌ی 2mm و خروجی نازل دارای زاویه واگرا<sup>2</sup> به اندازه 10<sup>0</sup> می‌باشد.

در این مقاله از توابع پاششی مختلف برای پاشش سوخت به محفظه‌ی احتراق استفاده شده است که باعث شده است مقدار جرم سوخت ورودی در هر سیکل در 6 حالت مختلف باشد. توابع مورد استفاده برای این 6 حالت در "شکل 4" آمده است. تمام توابع دارای طول پاشش 20 درجه می‌باشند. تابع

جدول 1 هندسه موتور

Table 1 Engine geometry

4	تعداد سیلندر
98	قطر سیلندر (mm)
110	کورس (mm)
3.32	حجم موتور (L)

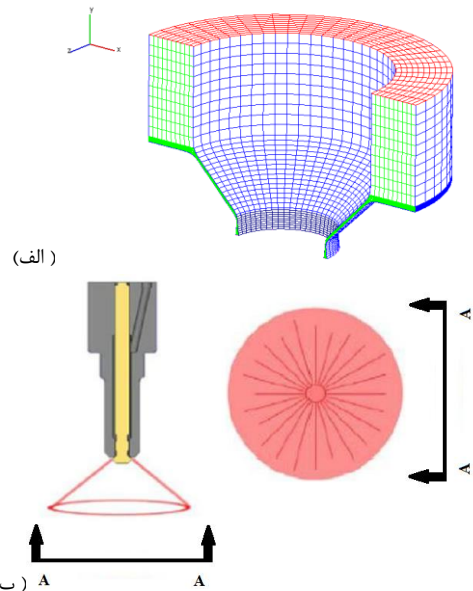


Fig. 3 a: flow field inside nozzle in discretized form b: Injector geometry and hollow cone produced spray profile

شکل 3 الف: میدان سیال داخل نازل به صورت گسسته سازی شده ب: هندسه انژکتور و پروفیل اسپری توخالی تولید شده

اول نرخ پاششی ثابت می‌باشد این حالت برای مقایسه تاثیر استفاده از توابع در انژکتورهای مقطع حلقوی در مقایسه با نرخ پاشش ثابت استفاده می‌شود. همچنین از نتایج آن برای مقایسه عملکرد انژکتور معمولی با انژکتور مقطع حلقوی نیز استفاده خواهد شد. تابع شبه مثلثی در تابع دوم و سوم استفاده شد این نوع از نرخ پاشش در انژکتورهای معمولی بسیار استفاده می‌شود. تابع چهارم ابتدا نرخ ورود جرم ثابت بعد از 5 درجه شروع به کاهش می‌نماید جرم پاشیده شده در ابتدا تا نقاط دور دست محفظه‌ی احتراق می‌رسد و با شروع احتراق مقدار پاشش کاهش می‌یابد که باعث ایجاد مهلت برای اختلاط بیشتر می‌شود. تابع پنجم شکل خاصی از تابع کاهشی-افزایشی به کار رفته است پاشش اولیه به منظور شروع احتراق می‌باشد و در ادامه با کاهش نرخ پاششی به مخلوط محترق شده مهلت اختلاط داده می‌شود و بعد از آن نرخ پاشش افزایش داده می‌شود. تابع ششم ابتدا نرخ ورود جرم ثابت و بعد از گذشت 5 درجه شروع به افزایش می‌نماید در این تابع هدف شروع احتراق با مخلوط غنی اکسیژن می‌باشد تا با استفاده از توپولانس ایجاد شده از حرکت جبهه شعله در داخل سیلندر، سوخت وارد شده در مرحله بعد به خوبی با هوای داخل سیلندر مخلوط شود. البته با افزایش نرخ جرم ورودی طول نفوذ افزایش می‌یابد که با افزایش دمای اولیه ایجاد شده از احتراق اولیه، این عامل کنترل می‌شود.

"شکل 5" مخزن احتراق را در دو حالت نقطه مرگ بالا و ابتدای تراکم نشان می‌دهد. نوع سرسیلندر مورد استفاده در کار حاضر با اندکی تغییر همراه بوده است چرا که انژکتور مقطع حلقوی به صورت پاشش به منطقه مرکزی سیلندر عمل می‌نماید ولی انژکتورهای چند سوراخه (مورد استفاده در موتور کوبوتا) با زاویه‌ی مشخص به سمت بدنه سیلندر پاشش را انجام می‌دهد. به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی از نرم‌افزار فایر استفاده شد. در کار حاضر نوع سوخت و دمای سوخت ورودی ثابت می‌باشد. مقادیر در نظر گرفته شده برای ویژگی‌های سوخت ورودی در "جدول 2" آورده شده است.

شرایط داخلی سیلندر در ابتدای تراکم در تمامی حالات مورد بررسی ثابت در نظر گرفته شده است مشخصات مورد استفاده برای آن در "جدول 3" آمده است.

### 4- بررسی استقلال از شبکه‌بندی جواب‌ها

نتایج حل ارائه شده باید مستقل از تعداد مش‌بندی مورد استفاده باشد. به همین منظور با تولید شبکه‌هایی با تعداد سلول‌های متفاوت، مناسب‌ترین

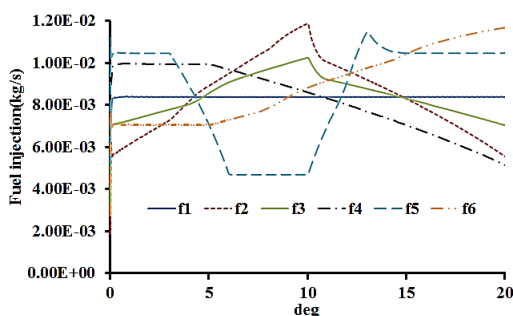


Fig. 4 Deferent injection patterns for an annulus nozzle during injection time (20 degrees)

شکل 4 الگوهای پاشش سوخت در انژکتور مقطع حلقوی در طول زمان پاشش (20 درجه)

<sup>1</sup> Kubota V3300

<sup>2</sup> Cone angle

اسپری سوخت از روش قطره ویسکوز<sup>1</sup>، تجزیه ثانویه قطرات اسپری سوخت از روش موج استاندارد<sup>2</sup>، برای پیشگویی مقدار تبخیر ایجاد شده در قطرات اسپری سوخت از روش تبخیر داکویچ<sup>3</sup> و برای پیش‌گویی برخورد قطرات [38,37,33]. نتایج به‌دست آمده برای توان، گشتاور، میزان مصرف سوخت ویژه ترمزی و میزان تولید آلاینده‌های اکسید نیتروژن و دوده با نتایج تجربی حسن و همکاران [39] مقایسه و اعتبارسنجی شد که نتایج شبیه‌سازی عددی حاکی از تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی بودند. نتایج تحلیل عددی و نتایج تست تجربی در "جدول 4" برای عملکرد موتور و در "شکل 7" برای آلاینده‌های تولیدی آمده است.

یکی از علل اختلاف کم بین نتایج اعتبارسنجی با نتایج تجربی در نمودار دوده (شکل 6-الف) و اختلاف بیشتر نتایج تجربی با عددی در نمودار اکسید نیتروژن (شکل 6-ب)، در زوایای میل‌لنگ زیاد، ناشی از مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزار فایر است. مدل تشکیل دوده و مدل تشکیل اکسید

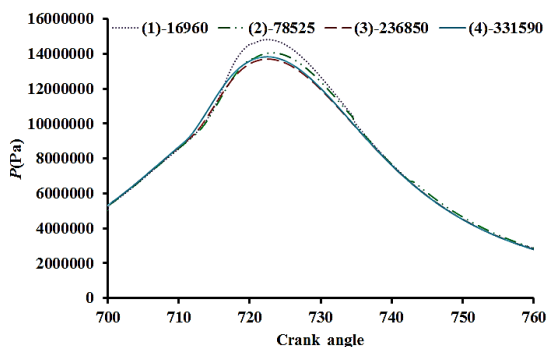


Fig. 6 variations of the pressure inside the chamber for different cell numbers

شکل 6 تغییرات فشار محفظه در شبکه‌بندی‌های مختلف

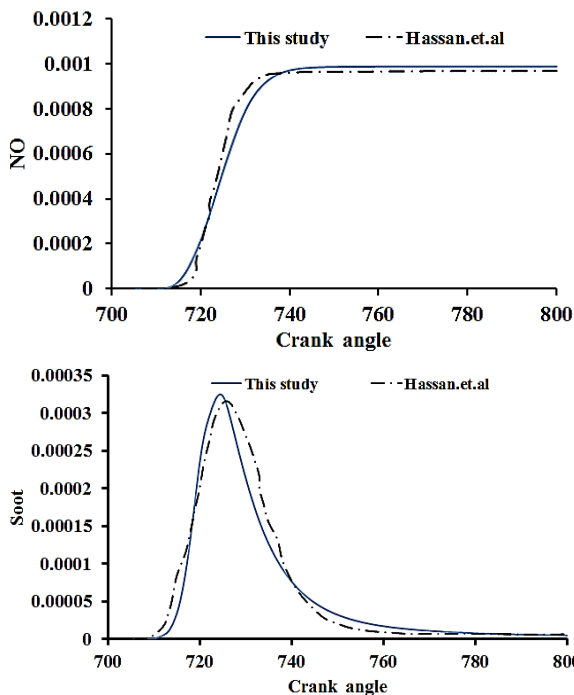


Fig. 7 pollutant emissions validation

شکل 7 صحت‌سنجی نتایج آلاینده‌ها

<sup>1</sup> Blob method  
<sup>2</sup> Standard WAVE  
<sup>3</sup> Dukowicz

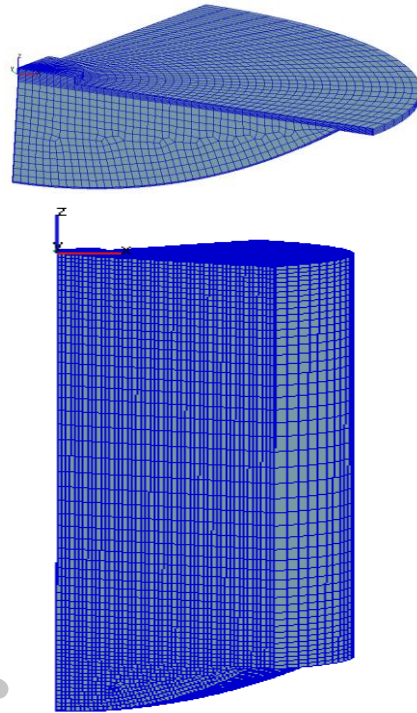


Fig. 5 Combustion chamber at bottom dead center and top dead center

شکل 5 مخزن احتراق در دو حالت نقطه مرگ بالا و ابتدای تراکم

جدول 2 خواص سوخت دیزل مورد استفاده در دمای استاندارد

Table 2 Properties of the diesel fuel used in standard temperature

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ویسکوزیته دینامیکی (Ns/m <sup>2</sup> )	دمای سوخت ورودی (K)
830	0.00214	293.15

جدول 3 شرایط داخل سیلندر در ابتدای تراکم

Table 3 Condition of the cylinder at the beginning of the compression

حالت	دما (K)	فشار (kPa)	چگالی هوا (kg/m <sup>3</sup> )
1	423	250	2.3

شبکه از لحاظ تعداد سلول انتخاب شد. مبنای استقلال از شبکه، نتایج حاصل از فشار داخلی سیلندر است. در این کار از چهار شبکه محاسباتی مختلف استفاده شد. تعداد سلول‌ها مورد استفاده و تغییرات فشار در مقابل زاویه‌ی میل‌لنگ در نمودار "شکل 6" آمده است. همان‌طور که در "شکل 6" مشاهده می‌شود از حالت دو به بعد تغییرات فشار بسیار اندک می‌باشد از این‌رو می‌توان از شبکه‌هایی که تعداد سلول آن‌ها بیشتر از 78525 می‌باشد، استفاده نمود.

### 5- اعتبارسنجی روش عددی

قبل از تغییر نوع انژکتور در موتور کوبوتا از انژکتور معمولی چند سوراخه به انژکتور مقطع حلقوی، عملکرد احتراقی موتور کوبوتا V3300 با انژکتور متداول آن شبیه‌سازی شد. آزمایش موتور و شبیه‌سازی عددی آن در دور موتور 2600rpm و نسبت تراکم 22.6 انجام شده است پاشش سوخت نیز 20 درجه قبل از نقطه‌ی مرگ بالا آغاز و مقدار آن 36mg در هر بار پاشش می‌باشد. برای شبیه‌سازی آشتگی از k-e استاندارد، تجزیه اولیه قطرات



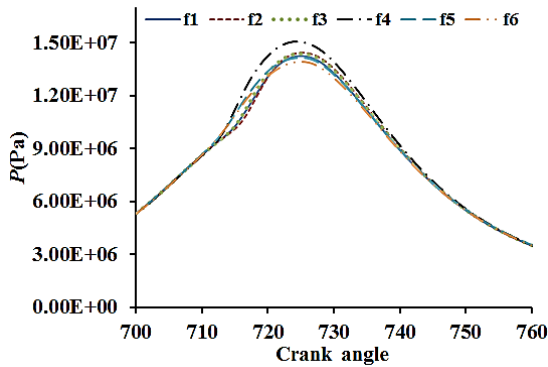


Fig. 9 Pressure variations for different injection patterns

شکل 9 تغییرات فشار برای توابع پاششی مختلف

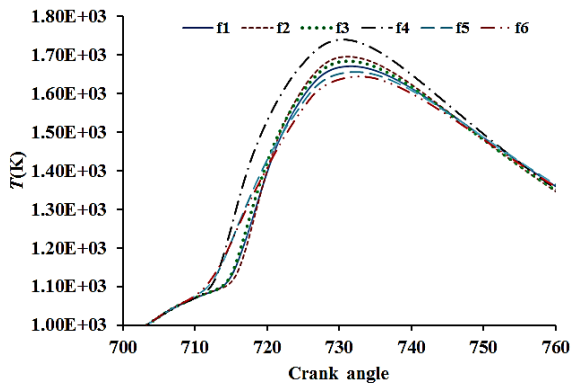


Fig. 10 Temperature variations for different injection patterns

شکل 10 تغییرات دما برای توابع پاششی مختلف

بازدهی احتراق بیشتر باشد موجب بهتر سوختن سوخت دیزل شده و در نتیجه دما و فشار میانگین را افزایش خواهد داد. همچنین هر چه جرم ورودی سوخت بیشتر باشد موجب افزایش فشار و دمای درون محفظه احتراق می شود چرا که جرم سوخت بیشتر معادل انرژی بیشتری می باشد. همان طور که در این دو شکل مشاهده می شود رفتار فشار و دما یکسان می باشد، تابع چهارم دارای بیشترین و تابع ششم دارای کمترین دما و فشار می باشد. با آن که تابع چهارم دارای بیشترین مقدار جرم سوخت ورودی نمی باشد ولی مقدار فشار و دمای داخل سیلندر برای آن بیشترین مقدار می باشد. این نتیجه به معنای رفتار احتراقی مناسب این تابع پاششی می باشد همچنین با آن که تابع ششم دارای کمترین جرم سوخت ورودی نمی باشد ولی دارای کمترین مقدار دما و فشار می باشد که این نتیجه به معنای رفتار احتراقی نامناسب این تابع پاششی می باشد.

در "جدول 5" مقدار توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه در یک سیکل کاری موتور آمده است. در این جدول نتایج تجربی برای موتور کوپوتا V3300 با انژکتور معمولی در کنار نتایج عددی برای شش تابع جرم ورودی با انژکتور مقطع حلقوی - به منظور مقایسه - در کنار هم آورده شده است. ابتدا نتایج تجربی با نتایج تابع اول که تابع ثابت می باشد، مقایسه می شود. با مقایسه نتایج برای تابع اول با نتایج ارائه شده برای انژکتور معمولی می توان این نتیجه را گرفت که با تغییر انژکتور از حالت معمولی به انژکتور مقطع حلقوی عملکرد موتور کوپوتا بهبود یافته است چون مقدار مصرف سوخت ویژه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین با تغییر نوع انژکتور مقدار توان و گشتاور تولیدی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است که این

جدول 4 مقایسه نتایج عددی و تجربی

Table 4 Comparison of numerical and experimental results

تجربی	عددی	
176	179.6	گشتاور (Nm)
47.9	48.88	توان (kW)
0.237	0.244	SFC (kg/kW h)

نیترژن در نرم افزار فایر به ترتیب مدل هیروپاسو و مدل زلدوویچ توسعه یافته است. مدل زلدوویچ از فرضیات تعادل جزئی واکنش های مقدماتی برای کاهش سیستماتیک شیمیایی چند مرحله ای استفاده می نماید که این فرضیات موجب ایجاد خطا جزئی در پیش بینی مقدار اکسید نیترژن تولیدی می شود.

### 6- نتایج

در این مقاله با ثابت نگه داشتن نوع سوخت، نسبت تراکم و هندسه موتور کوپوتا V3300 و تغییر شکل سرسیلندر و نوع نازل از اریفیس معمولی شش سوراخه به اریفیس با مقطع حلقوی تاثیر انژکتور مقطع حلقوی بر عملکرد موتور و همچنین اثر توابع پاششی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی حاصل از این تحقیق در قالب رفتار هیدرودینامیکی، الگوی توسعه ای اسپری سوخت، پارامترهای عملکردی موتور و نیز میزان تولید آلاینده های خروجی ارائه شده است. شش تابع جرم ورودی برای انژکتور مقطع حلقوی با هم مقایسه شده اند تا تأثیر افزایش زاویه اسپری سوخت و کاهش طول نفوذ اسپری سوخت بر تولید آلاینده های اکسید نیترژن و دوده بررسی شود.

"شکل 8" تغییرات جرم سوخت ورودی در هر سیکل به داخل سیلندر را برای 6 تابع مختلف، نشان می دهد. برای آن که مقایسه با شرایط بهتری صورت بگیرد سعی شده که مقدار جرم سوخت ورودی برای توابع مختلف از همدیگر زیاد فاصله نگیرد چرا که هندسه موتور برای حالت های مختلف پاششی یکسان بود بنابراین اختلاف زیاد بین مقدار جرم ورودی باعث عدم مقایسه مناسب می شد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تغییرات مقدار جرم سوخت ورودی زیاد نمی باشد بیشترین مقدار پاشش سوخت برای تابع پنجم با مقدار پاشش 41.6 میلی گرم و کمترین آن ها برای تابع دوم با 40 میلی گرم می باشد که معادل 4 درصد اختلاف مابین بیشترین مقدار پاشش و کمترین آن هاست.

"شکل 9" و "شکل 10" تاثیر توابع پاششی مختلف بر فشار و دمای داخل محفظه احتراق را در زاویه میلنگ از 700 تا 760 درجه را نشان می دهند. چون تمام شرایط ابتدای تراکم برای شش تابع مورد بررسی یکسان می باشد. بنابراین دو عامل بازدهی احتراق و مقدار جرم سوخت پاشیده شده موجب افتراق فشار و دمای ماکزیمم برای شش تابع خواهد شد. هر چه

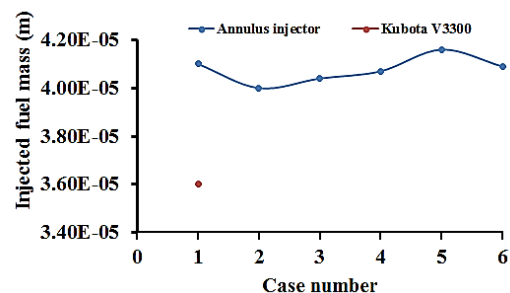


Fig. 8 Variations of fuel input mass for different injection patterns

شکل 8 تغییرات جرم سوخت ورودی برای توابع پاششی مختلف

باید برای هر موتور تابع‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد تا تابع مناسب برای آن موتور انتخاب شود.

با شروع احتراق و بالا رفتن دمای داخل سیلندر مقدار اکسید نیتروژن تولیدی افزایش می‌یابد. زیرا با شروع احتراق دمای موضعی داخل سیلندر افزایش یافته و نیتروژن شروع به تجزیه شدن در نقاط دما بالا می‌کند. مقدار تغییرات اکسید نیتروژن برای شش تابع مختلف مورد بررسی در این مقاله در "شکل 11" آمده است. مقدار این آلاینده پس از چند درجه از نقطه‌ی مرگ بالا، به مقدار ثابت می‌رسد. چون بعد از چند درجه پس از نقطه مرگ بالا تمام سوخت می‌سوزد بنابراین نقاط دما بالا از بین می‌رود. همچنین بعد از نقطه مرگ بالا محفظه احتراق شروع به انبساط می‌کند که نتیجه آن کاهش دما می‌باشد. البته در هنگام انبساط فرایند اختلاط سریع‌تر و بهتر صورت می‌گیرد که منجر به اختلاط نقاط دما بالا و دما پایین در محفظه احتراق می‌شود. با از بین رفتن نقاط دما بالا در داخل سیلندر تجزیه نیتروژن متوقف می‌شود.

از مقایسه مقدار تغییرات اکسید نیتروژن برای تابع اول در "شکل 11" و تغییرات اکسید نیتروژن در "شکل 7" می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از انژکتور مقطع حلقوی در موتور کوپوتا V3300 موجب بهبود رفتار موتور از لحاظ تولید آلاینده اکسید نیتروژن شده است. چرا که حداکثر مقدار اکسید نیتروژن برای تابع اول برابر 0.00109 می‌باشد این در حالی است که حداکثر مقدار اکسید نیتروژن تولیدی در "شکل 7" برابر 0.00095 می‌باشد. پس با تغییر نوع انژکتور از انژکتور معمولی به انژکتور مقطع حلقوی مقدار اکسید نیتروژن تولیدی به میزان 14.7 درصد افزایش یافته است و این در حالی است که مقدار توان تولیدی 27.4 درصد افزایش یافته است. این بدان معنی می‌باشد که انژکتور مقطع حلقوی در مقایسه با انژکتور معمولی سوخت را به صورت یکنواخت‌تر در داخل سیلندر پخش نموده و موجب کاهش تشکیل نقاط دما بالا شده است.

جدول 5 نتایج عملکرد کلی موتور

Table 5 The results of the overall engine performance

SFC [kg/kWh]	توان [kW]	گشتاور [Nm]	
0.2087	61.3	225.12	f1
0.2043	61.1	224.44	f2
0.2069	61	223.92	f3
0.2029	62.6	229.72	f4
0.2133	60.9	223.76	f5
0.2126	60	220.56	f6
0.237	47.9	176	کوپوتا VV3300

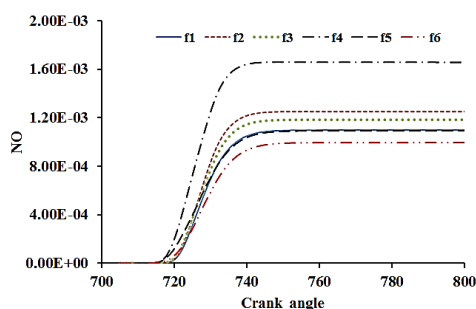


Fig. 11 NO variations for different injection patterns

شکل 11 تغییرات اکسید نیتروژن برای توابع پاششی مختلف

افزایش توان و گشتاور به دو دلیل می‌باشد: 1. مقدار جرم ورودی افزایش یافته است. 2. فرآیند احتراق بهبود یافته است. مقدار سوخت ورودی از 36 میلی‌گرم به مقدار 41 میلی‌گرم رسیده است که افزایش 14 درصدی را نشان می‌دهد. این در حالی می‌باشد که مقدار توان از 47.9 کیلووات به 61 کیلووات رسیده است و این یعنی مقدار توان 27.4 درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار گشتاور از 176 نیوتون متر به مقدار 225.12 رسیده است و در نتیجه مقدار گشتاور نیز 27.9 درصد افزایش یافته است. بنابراین استفاده از انژکتور مقطع حلقوی در موتور کوپوتا V3300 به جای انژکتور معمولی موجب افزایش توان و گشتاور آن شده و عملکرد این موتور را نیز بهبود می‌دهد. در انژکتورهای معمولی با مقطع اریفیس دایره‌ای افزایش جرم سوخت ورودی با مشکلاتی همراه می‌باشد و در اکثر موارد موجب افزایش قطر میانگین قطرات و کاهش کیفیت اسپری سوخت و در نتیجه کاهش عملکرد موتور می‌شود. ولی در انژکتورهای مقطع حلقوی افزایش جرم ورودی سوخت به راحتی اتفاق افتاده و برای این کار فقط باید مقدار قطر حلقه افزایش یابد (البته بدون تغییر مقدار ضخامت حلقه). به همین دلیل در موتور کوپوتا با این که مقدار جرم ورودی با تغییر نوع انژکتور افزایش یافت ولی عملکرد آن در مقایسه با انژکتور معمولی بهبود یافت.

با مقایسه عملکرد موتور برای شش تابع پاششی مختلف ارائه شده در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از تابع پاششی شبه مثلثی یعنی توابع دوم و سوم و همچنین تابع چهارم در مقایسه با تابع یکنواخت (تابع اول) موجب بهبود عملکرد موتور می‌شود چرا که مقدار مصرف سوخت ویژه برای این سه تابع پاششی کمتر از حالت یکنواخت می‌باشد. همچنین مقدار توان و گشتاور تولیدی برای این سه حالت تقریباً برابر با توان و گشتاور تابع یکنواخت می‌باشد و این در حالی می‌باشد که مقدار جرم سوخت پاشیده شده برای آن سه تابع کمتر از مقدار جرم سوخت پاشیده شده برای حالت یکنواخت می‌باشد. علت این موضوع آن است که مقدار کمتری از انرژی قبل از نقطه مرگ بالا آزاد شده و موجب کاهش مقاومت در مقابل حرکت پیستون در مرحله کار می‌شود. تابع دوم دارای عملکرد مناسب‌تری در مقایسه با تابع سوم می‌باشد یعنی تابع شبه مثلثی با شیب زیاد دارای عملکرد مناسب‌تر نسبت به حالت با شیب کم می‌باشد. علت این موضوع آن است که در تابع شبه مثلثی با شیب زیاد میزان تغییرات ورود سوخت زیاد می‌باشد. که باعث افزایش موضعی سرعت در داخل سیلندر شده و میزان اختلاط سوخت و هوا را افزایش داده و موجب افزایش عملکرد این تابع نسبت به حالت تابع شبه مثلثی با شیب کم می‌شود. تابع چهارم دارای بهترین عملکرد در بین شش تابع ارائه شده می‌باشد و توان و گشتاور تولیدی بیشتر و کمترین مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی را دارد. چرا که در این حالت سوخت بیشتری قبل از شروع احتراق بخار شده و موجب افزایش آهنگ آزاد شدن انرژی در فاز احتراق پیش مخلوط می‌شود. دو تابع پنجم و ششم دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به حالت اول می‌باشد. این دو حالت در مقایسه با انژکتور معمولی باز عملکرد بهتری دارند. علت افزایش عملکرد موتور کوپوتا با تابع‌های پاششی متغیر نسبت به تابع پاششی ثابت این موضوع می‌باشد که در موتورهای دیزلی، سرعت حرکت هوا در داخل محفظه احتراق نسبتاً کم می‌باشد. پس چنانچه سوخت با فشار زیاد و همراه با تابع‌های پاششی مختلف وارد محفظه احتراق شود موجب افزایش موضعی سرعت هوا و در نتیجه افزایش اختلاط سوخت و هوا در مقایسه با تابع ثابت خواهد شد. نتیجه این تغییر، افزایش عملکرد موتور دیزلی خواهد بود. البته هندسه محفظه احتراق و سرعت حرکت پیستون و نوع پاشش در اختلاط هوا-سوخت موثر می‌باشد. به همین دلیل

دوده هیچ مشکلی ندارد. بنابراین استفاده از انژکتور مقطع حلقوی در موتور کوبوتا V3300 از لحاظ آلاینده‌گی دوده هیچ مشکلی ایجاد نخواهد نمود. در توابع پنجم و ششم به علت طول نفوذ زیاد اسپری و در نتیجه برخورد ذرات بیشتری به سر پیستون، ابتدا نزدیک نقطه مرگ بالا تولید دوده بیشتر می‌شود ولی در ادامه به علت دمای مناسب محفظه و شرایط اختلاطی مناسب به وجود آمده تمام دوده تولید شده، اکسایش می‌یابد.

از "شکل 13" تا "شکل 16" کانتورهای نسبت هم ارزی، اکسید نیتروژن، دمای داخل سیلندر و دوده در لحظه مرگ بالا و 40 درجه پس از آن، نشان داده شده‌اند. "شکل 13" توزیع دما و نحوه حرکت جبهه شعله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود. احتراق از قسمت مرکزی شروع شده و رفته‌رفته به قسمت بدنه‌ی سیلندر حرکت می‌نماید. البته در ابتدای حرکت به سمت بدنه سرعت حرکت شعله زیاد می‌باشد که با انبساط محفظه‌ی احتراق از سرعت آن کاسته شده و در نهایت قسمت‌هایی از مخلوط دما بالا به سمت دیواره منتقل می‌شود. این نحوه ایجاد جبهه شعله موجب بالا رفتن دمای سرسیلندر می‌شود. که در صورت برخورد قطرات سوخت ممکن است موجب خوداشتعالی گردد، اما دمای بالای سرسیلندر

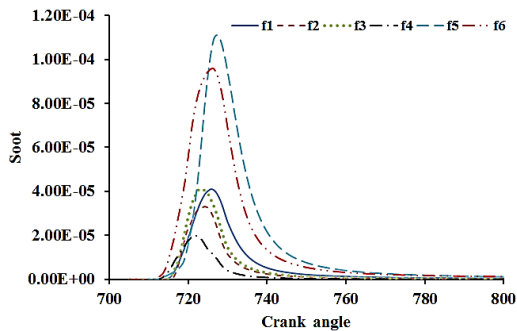


Fig. 12 Soot variations for different injection patterns  
شکل 12 تغییرات دوده برای توابع پاششی مختلف

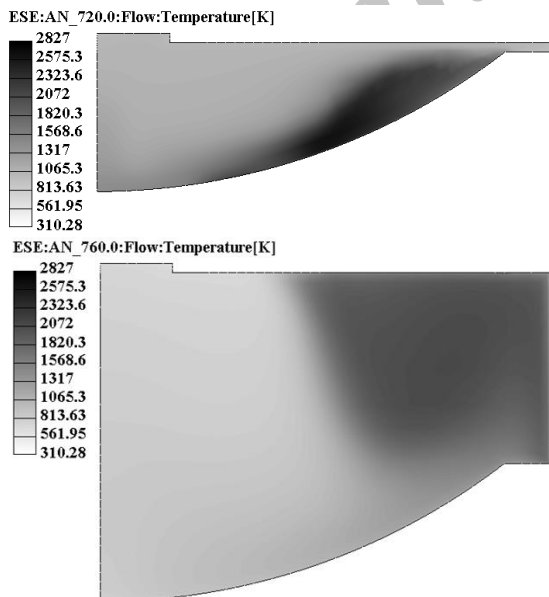


Fig. 13 Temperature distribution in combustion chamber at two different crank angles after SOI

شکل 13 توزیع دما در محفظه‌ی احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

تغییر در تابع پاشش و به تبع آن تغییر در جرم ورودی سوخت و شکل اسپری تشکیل شده، موجب تغییر در فشار و دمای محفظه‌ی احتراق شده، که شکل‌گیری آلاینده‌ها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. با افزایش دمای میانگین محفظه در توابع پاششی مختلف مقدار تولید اکسید نیتروژن افزایش می‌یابد. بالاترین دمای میانگین مربوط به تابع چهارم می‌باشد. بالاترین تولید اکسید نیتروژن نیز مربوط به تابع چهارم می‌باشد. کمترین دما مربوط به تابع ششم می‌باشد که کمترین تولید نیتروژن نیز برای این تابع می‌باشد. در تابع چهارم مقدار تولید نیتروژن به مقدار 72 درصد افزایش یافته است. یعنی استفاده از انژکتور مقطع حلقوی با تابع چهارم باعث افزایش تولید اکسید نیتروژن در مقایسه با انژکتور معمولی شده است. ولی با توجه به این که این حالت کمترین مقدار مصرف سوخت ویژه را داشت چنان‌چه از جاذب‌های اکسید نیتروژن در خروجی موتور استفاده نشود این تابع موجب تولید آلاینده بیشتر خواهد شد. در تابع دوم نیز مقدار افزایش اکسید نیتروژن کمی بیشتر از مقدار افزایش توان می‌باشد. در تمام توابع پاششی دیگر درصد افزایش مقدار اکسید نیتروژن کمتر از درصد افزایش توان می‌باشد. در "جدول 6" مقدار افزایش توان و اکسید نیتروژن برای تمام توابع پاششی آمده است. در این جدول مقدار افزایش توان و اکسید نیتروژن برای موتور کوبوتا با تغییر انژکتور از نوع معمولی به انژکتور مقطع حلقوی آمده است. پس میزان اکسید نیتروژن تولیدی انژکتورهای مقطع حلقوی در مقایسه با انژکتورهای معمولی در اکثر حالات کمتر می‌باشد با آن که مقدار توان تولیدی تقریباً بالاتر دارند. این موضوع به خاطر این است که زاویه اسپری سوخت در انژکتورهای مقطع حلقوی بسیار بیشتر از انژکتورهای معمولی می‌باشد. در این نوع از انژکتورها قطرات سوخت پاشیده شده به صورت یکنواخت‌تر داخل سیلندر پخش می‌شود. این ویژگی‌های انژکتورهای مقطع حلقوی باعث کاهش نقاط دما بالا در محفظه احتراق می‌شوند.

"شکل 12" کسر جرمی دوده را برحسب زاویه میل‌لنگ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با شروع احتراق و بالا رفتن دمای محفظه به علت سرعت واکنش‌ها و عدم اکسیژن رسانی مناسب به سوخت در حال احتراق، مقدار دوده افزایش یافته و پس از اتمام احتراق اصلی به دلیل کند شدن واکنش‌های شیمیایی ناشی از احتراق و همچنین دمای مناسب و شدت توربلانس ایجاد شده در داخل سیلندر، دوده ایجاد شده به مقدار مناسب اکسیده شده و کاهش می‌یابد. علت افزایش اول ناشی از احتراق پیش آمیخته است. زیرا هنگامی که احتراق پیش آمیخته رخ می‌دهد اکسیژن در اطراف شعله به شدت کاهش می‌یابد ولی با گذشت زمان و پیش رفتن شعله در داخل محفظه بعد از نقطه مرگ بالا، اکسایش دوده شروع می‌شود. با گذشت زمان ذرات کربن با اکسیژنی که بعداً در اختیار مولکول‌ها قرار می‌گیرد ترکیب و مصرف می‌شوند. در تمام توابع مورد استفاده برای پاشش سوخت، دوده به خوبی در انتهای احتراق اکسایش یافته؛ از بین می‌رود و موتور از لحاظ تولید

جدول 6 درصد افزایش مقدار اکسید نیتروژن و توان

Table 6 Increase amount of NO and power in percent

درصد افزایش توان	درصد افزایش اکسید	
	نیتروژن	توان
27.9	14.7	f1
27.5	31.5	f2
27.3	24.2	f3
30.6	72	f4
27.1	14.6	f5
25.2	4.7	f6



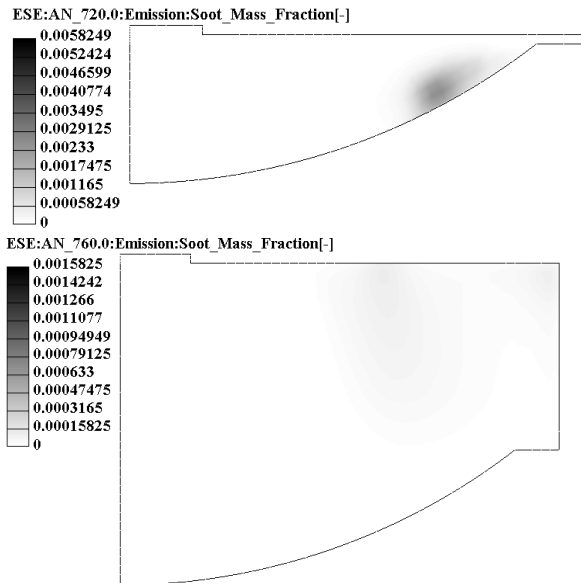


Fig. 16 Distribution of soot in combustion chamber at two different crank angles after SOI

شکل 16 توزیع دوده در محفظه‌ی احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

می‌باشند یعنی با کاهش یکی دیگری افزایش می‌یابد دوده در دماهای پایین و اکسید نیتروژن در دماهای بالا تولید می‌شود. "شکل 16" کانتور دوده را نشان می‌دهد. دوده در منطقه‌ی جبهه شعله و در نقاط فقیر اکسیژن، یعنی جایی که آهنگ نفوذ اکسیژن به ناحیه احتراقی جهت رسیدن به شرایط استوکیومتریک کافی نمی‌باشد، تولید شده است. این محل‌ها بیشتر نقاط نزدیک به سرسیلندر می‌باشند. با مقایسه‌ی کانتور دوده در دو حالت مرگ بالا و 40 درجه بعد از آن، می‌توان دریافت که دوده تولید شده در ابتدای احتراق به خوبی در انتهای آن اکسایش شده و از بین رفته است. این یعنی دمای محفظه احتراق به مقدار مناسب بوده است که موجب اکسایش دوده تولیدی در ابتدای فرآیند احتراق شده است.

"شکل 17" نحوه اسپری سوخت به داخل محفظه احتراق را نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های انژکتورهای مقطع حلقوی افزایش زاویه مخروط اسپری می‌باشد. انژکتور مورد استفاده در کار حاضر نیز به خوبی این وظیفه را انجام داده است. با دقت در قطرات توزیع شده می‌توان دریافت که قطر قطرات نزدیک به هم بوده و به صورت متوازن از قسمت مرکزی تا قسمت یال مخروط اسپری توزیع شده‌اند. به همین دلیل بررسی کانتورهای دما، نسبت هم ارزی و آلاینده اکسید نیتروژن به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که افزایش زاویه مخروط اسپری و توزیع یکنواخت قطرات سوخت یکی از فاکتورهای موثر در کاهش متوازن آلاینده‌ها می‌باشند.

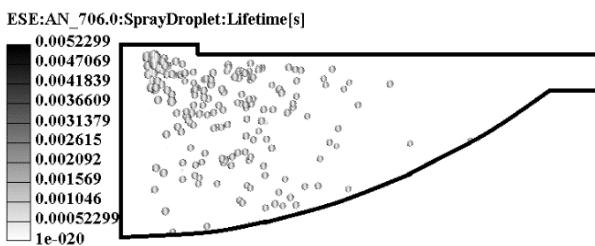


Fig. 17 Development of the fuel spray in the combustion chamber  
شکل 17 نحوه توسعه اسپری سوخت در داخل محفظه‌ی احتراق

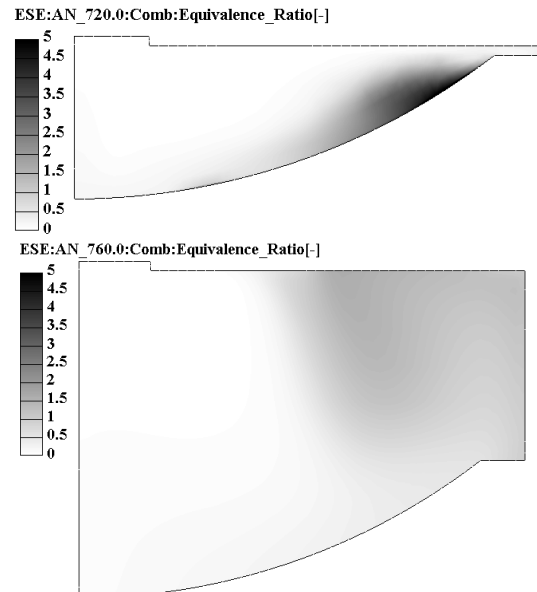


Fig. 14 Distribution of equivalence ratio in combustion chamber at two different crank angles after SOI

شکل 14 توزیع نسبت هم ارزی در محفظه‌ی احتراق در دو زاویه میل لنگ متفاوت

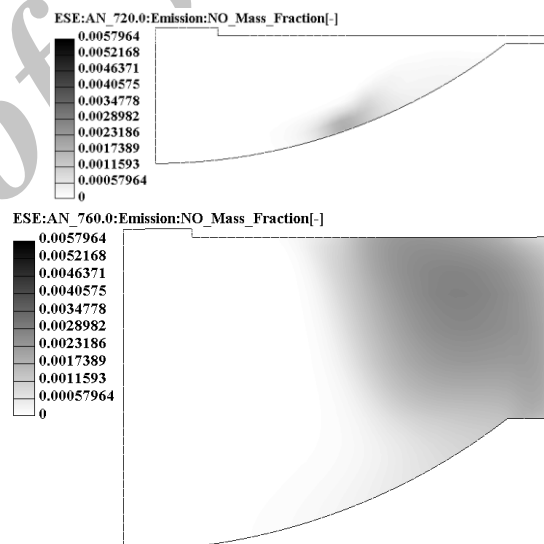


Fig. 15 Distribution of NO in combustion chamber at two different crank angles after SOI

شکل 15 توزیع اکسید نیتروژن در محفظه‌ی احتراق در دو زاویه متفاوت پس از شروع پاشش

سبب تشکیل لایه بخار سوخت روی آن شده و موجب کاهش زمان برخورد قطرات سوخت شده و قطرات سوخت بسیار سریع‌تر از سطح سرسیلندر جدا خواهند شد. همان‌طور که در "شکل 14" مشاهده می‌شود احتراق در نواحی با نسبت هم‌ارزی بالاتر از 2 رخ می‌دهد.

با دقت در کانتورهای توزیع دوده و اکسید نیتروژن، هر دو آلاینده بیشتر در نقاط دما بالا تولید می‌شوند. اکسید نیتروژن در منطقه فقیرتر ناحیه دما بالا و دوده در منطقه غنی ناحیه دما بالا تشکیل می‌شود. بیشترین مقدار اکسید نیتروژن در مناطق با نسبت هم ارزی برابر با واحد و دمای بالای 2000 کلوین، می‌باشد. با استفاده از الگوی زلدویچ می‌توان مقدار تولید ناکسید نیتروژن را پیش‌بینی نمود. با افزایش دما واکنش‌های الگوی زلدویچ در جهت رفت پیشرفت می‌کنند. همچنین دو آلاینده دارای رفتار متضاد

7- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد و انتشار آلاینده‌گی موتور کوپوتا V3300 با سوخت استاندارد دیزل به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عملکرد موتور و انتشار آلاینده‌گی از نرم‌افزار فایر استفاده شد. نتایج این تحقیق با دقت بالایی با نتایج تجربی حسن و همکاران مقایسه و اعتبارسنجی شد و تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی به دست آمد. قدرت موتور، گشتاور، مصرف سوخت ویژه و انتشار آلاینده‌گی در محفظه احتراق برای انژکتور مقطع حلقوی در حالت پاشش سوخت یکنواخت و پنج تابع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق به منظور توزیع یکنواخت‌تر قطرات و افزایش زاویه مخروط اسپری از اریفیس با مقطع حلقوی استفاده شد. استفاده از این نوع انژکتور منجر به کاهش دما در نقاط دما بالای درون محفظه احتراق می‌شود. این امر تأثیر بسزایی در کاهش آلاینده‌ی اکسید نیتروژن داشت. همچنین افزایش مناسب زاویه مخروط در انژکتور مقطع حلقوی، بدون ایجاد ناحیه‌ی خیلی رقیق، باعث ایجاد توازن خوب بین تولید اکسید نیتروژن و دوده در این نوع از انژکتور شد.

مقدار مصرف سوخت ویژه با تغییر انژکتور از حالت معمولی به انژکتور مقطع حلقوی 13 درصد کاهش یافت. با این تغییر مقدار آلاینده‌های تولیدی نیز کاهش یافتند. استفاده از توابع پاششی مختلف با نتایج متفاوت همراه شد. در توابع شبه مثلی عملکرد موتور بهبود یافت و مقدار مصرف سوخت ویژه تا 0.2043 کاهش یافت ولی در این حالت‌ها به علت بالا رفتن دما، مقدار اکسید نیتروژن تولیدی در تابع شبه مثلی با شیب تغییرات زیاد به مقدار 16.8 درصد و در تابع شبه مثلی با شیب تغییرات کم به مقدار 9.5 درصد نسبت به تابع ثابت افزایش یافت. تابع چهارم دارای کمترین مصرف سوخت به ازای توان تولیدی بود. ولی در این تابع مقدار اکسید نیتروژن تولیدی افزایش یافت. در تابع پنجم هم مقدار مصرف سوخت ویژه و هم مقدار آلاینده‌های تولیدی در مقایسه با تابع ثابت بیشتر شدند. مقدار مصرف سوخت ویژه تابع ششم، در مقایسه با تابع یکنواخت به میزان 1.8 افزایش یافت. ولی در این تابع مقدار اکسید نیتروژن تولیدی 10 درصد کاهش یافت. این تابع از لحاظ آلاینده‌گی بهترین عملکرد را داشت. استفاده از انژکتور مقطع حلقوی در موتور کوپوتا و تغییر جرم پاشش موجب تغییر مقدار دوده در ابتدای فرایند احتراق شد. ولی در ادامه احتراق دوده تولید شده به خوبی برای تمام توابع اکسایش یافتند.

8- فهرست علائم

$A$	ثابت $A=400$
$a$	فاکتور پیش نمای
$A_f$	فاکتور پیش نمای
$B$	ثابت با مقدار استاندارد $B=3$
$B_L$	طول شکست ورقه سیال
$C_3$	ثابت با مقدار استاندارد $C_3=1.17$
$C_{pr}$	ضریب تجربی
$C_{ju}$	ضریب تجربی
$D_s$	قطر میانگین دوده
$d_{out}$	قطر اریفیس در خروج (m)
$E_a$	انرژی اکتیواسیون
$E_f$	انرژی اکتیواسون
$h$	ضخامت ورق مایع در اوریفیس نازل (m)
$K_V$	ضریب سرعت

$m_1$	جرم سیال جاری (kg/s)
$M_{fv}$	جرم بخار سوخت
$Ms$	جرم دوده
$MW_c$	وزن مولکولی کربن
$\ln(\eta/\eta_0)$	پارامتر بی بعد تجربی
$Re$	عدد رینولدز
$R_{tot}$	آهنگ واکنش
$P$	فشار
$\Delta P$	اختلاف فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$SFC(\text{kg/kWh})$	مصرف سوخت ویژه
$V$	سرعت واقعی تخلیه ( $\text{ms}^{-1}$ )
$V_{rel}$	سرعت نسبی بین مایع و گاز ( $\text{ms}^{-1}$ )
$X$	نسبت هوا به سطح کل
$\gamma$	کسر جرمی
<b>علائم یونانی</b>	
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\tau_r$	مقیاس زمانی اختلاط آشفته
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\rho_s$	چگالی دوده
$\theta$	نصف زاویه‌ی بیرونی مخروط

9- مراجع

- W. P. Willard, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Second Edition, pp. 10-30, New Jersey, Editorial Prentice Hall, 2004.
- Y. Zhang, K. Nishida, S. Nomura, T. Ito, Spray characteristics of group-hole nozzle for DI diesel engine, *SAE Technical Paper*, No. 2003- 0148-7191, 2003.
- S. W. Park, H. K. Suh, C. S. Lee, N. Abani, R. D. Reitz, Modeling of group hole nozzle sprays using grid size, hole location and time step independent models, *Atomization and Sprays*, Vol. 19, No. 6, pp. 567-582, 2009.
- S. W. Park, R. D. Reitz, Optimization of fuel/air mixture formation for stoichiometric diesel combustion using a 2 spray angle group hole nozzle, *Fuel*, Vol. 88, No. 5, pp. 843-852, 2009.
- J. Gao, Y. Matsumoto, M. Namba, K. Nishida, An investigation of mixture formation and in-cylinder combustion processes in direct injection diesel engines using group-hole nozzles, *International Journal of Engine Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 27-44, 2009.
- A. Pawlowski, R. Kneer, A. M. Lippert, S. E. Parrish, Investigation of the interaction of sprays from clustered orifices under ambient conditions relevant for diesel engines, *SAE International Journal of Engines*, Vol. 1, No. 2008-01-0928, pp. 514-527, 2008.
- J. Gao, Y. Matsumoto, K. Nishida, Experimental study on spray and mixture properties of the group-hole nozzle for direct-injection diesel engines, part I: a comparative analysis with the single-hole nozzle, *Atomization and Sprays*, Vol. 19, No. 4, pp. 321-337, 2009.
- K. Nishida, J. Gao, Y. Matsumoto, Experimental study on spray and mixture properties of the group-hole nozzle for direct-injection diesel engines, Part II: effects of included angle and interval between orifices, *Atomization and Sprays*, Vol. 19, No. 4, pp. 339-355, 2009.
- D. L. Siebers, B. Higgins, Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions, *SAE Technical Paper*, No. 2001-0148-7191, 2001.
- P. Bergstrand, M. Försth, I. Denbratt, The influence of orifice diameter on flame lift-off length, *18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, ILASS-Europe, Zaragoza, Spain, 9-11 September, 2002.
- H. Mohammadi, P. Jabbarzadeh, M. Jabbarzadeh, M. T. Shrevani-Tabar, Numerical investigation on the hydrodynamics of the internal flow and spray behavior of diesel fuel in a conical nozzle orifice with the spiral rifling like guides, *Fuel*, Vol. 196, pp. 419-430, 2017.
- P. Sharma, T. Fang, Breakup of liquid jets from non-circular orifices, *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 2, pp. 1666, 2014.
- P. Sharma, T. Fang, Spray and atomization of a common rail fuel injector with non-circular orifices, *Fuel*, Vol. 153, pp. 416-430, 2015.
- M. Migliaccio, A. Montanaro, C. Beatrice, P. Napolitano, L. Allocca, V. Fraioli, Experimental and numerical analysis of a high-pressure outwardly opening hollow cone spray injector for automotive engines, *Fuel*, Vol. 196, pp. 508-519, 2017.
- F. Nishiguchi, Y. Sumi, K. Yamane, Reduction in the polar moment of inertia of an automotive turbocharger by controlling aerodynamic blade loading, *Proceedings of Turbocharging and Turbochargers*, London,

- [28] Z. Wang, M. L. Wyszynski, H. Xu, N. R. Abdullah, J. Piaszyk, Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies, *Fuel Processing Technology*, Vol. 132, pp. 118-132, 2015.
- [29] M. Özkan, D. B. Özkan, O. Özener, H. Yılmaz, Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 53, No. 1, pp. 21-30, 2013.
- [30] H. G. Roh, D. Lee, C. S. Lee, Impact of DME-biodiesel, diesel-biodiesel and diesel fuels on the combustion and emission reduction characteristics of a CI engine according to pilot and single injection strategies, *Journal of the Energy Institute*, Vol. 88, No. 4, pp. 376-385, 2015.
- [31] J. Benajes, S. Molina, A. García, J. Monsalve-Serrano, R. Durrett, Performance and engine-out emissions evaluation of the double injection strategy applied to the gasoline partially premixed compression ignition spark assisted combustion concept, *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 90-101, 2014.
- [32] J. Jeon, S. Park, Effects of pilot injection strategies on the flame temperature and soot distributions in an optical CI engine fueled with biodiesel and conventional diesel, *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 581-591, 2015.
- [33] AVL FIRE Manual, Part: Spray, V 2013.
- [34] B. Ahmadi-Befrui, A. Gosman, F. Lockwood, A. Watkins, Multidimensional calculation of combustion in an idealised homogeneous charge engine: a progress report, *SAE Technical Paper*, No. 1981-0148-7191, 1981.
- [35] K. Nishida, H. Hiroyasu, Simplified three-dimensional modeling of mixture formation and combustion in a DI diesel engine, *SAE Technical Paper*, No. 1989-0148-7191, 1989.
- [36] J. K. Dukowicz, A particle-fluid numerical model for liquid sprays, *Journal of Computational Physics*, Vol. 35, No. 2, pp. 229-253, 1980.
- [37] M. M. Naghizadeh, A. R. Ghahremani, M. H. Saidi, Numerical simulation of spray characteristics of bio-ethanol and its blend with gasoline in a direct injection combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 112-122, 2015. (in Persian فارسی)
- [38] S. Sarmast, A. H. Shamekhi, M. Z. Basharhagh, A. H. Parivar, The Effect of Injector Angle and Start of Injection on Spray-Wall Interaction in Gasoline Direct Injection Engine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 95-105, 2017. (in Persian فارسی)
- [39] N. Hassan, M. Rasul, C. A. Harch, Modelling and experimental investigation of engine performance and emissions fuelled with biodiesel produced from Australian Beauty Leaf Tree, *Fuel*, Vol. 150, pp. 625-635, 2015.
- England, paper C, Vol. 34, pp. 123-127, 1982.
- [16] K. Pattas, A. Stamatelos, Transient behaviour of turbocharged-engined vehicles equipped with diesel particulate traps, *SAE Technical Paper*, No. 1992-0148-7191, 1992.
- [17] C. S. Lee, N. J. Choi, A study on the characteristics of transient response in a turbocharged diesel engine, *SAE Technical Paper*, No. 1991-912461, 1991.
- [18] C. S. Lee, N. J. Choi, Effect of air injection on the characteristics of transient response in a turbocharged diesel engine, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 63-71, 2002.
- [19] K. Nishida, W. Zhang, T. Manabe, Effects of micro-hole and ultra-high injection pressure on mixture properties of DI diesel spray, *SAE Technical Paper*, No. 2007-0148-7191, 2007.
- [20] I. Celikten, An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 16, pp. 2051-2060, 2003.
- [21] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, Second Edition, pp. 52-201, Cambridge, Prentice-Hall, Englewood Cliffs Pearson, 2003.
- [22] P. Das, P. Subbarao, J. Subrahmanyam, Control of combustion process in an HCCI-DI combustion engine using dual injection strategy with EGR, *Fuel*, Vol. 159, pp. 580-589, 2015.
- [23] M. Jęfici, M. Zheng, A study of the effect of post injection on combustion and emissions with premixing enhanced fueling strategies, *Applied Energy*, Vol. 157, pp. 861-870, 2015.
- [24] S. H. Park, S. H. Yoon, Injection strategy for simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and soot emissions using two-stage injection in DME fueled engine, *Applied Energy*, Vol. 143, pp. 262-270, 2015.
- [25] V. Macian, R. Payri, S. Ruiz, M. Bardi, A. H. Plazas, Experimental study of the relationship between injection rate shape and Diesel ignition using a novel piezo-actuated direct-acting injector, *Applied Energy*, Vol. 118, pp. 100-113, 2014.
- [26] B. Mohan, W. Yang, W. Yu, K. L. Tay, S. K. Chou, Numerical investigation on the effects of injection rate shaping on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled CI engine, *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 737-745, 2015.
- [27] K. L. Tay, W. Yang, F. Zhao, W. Yu, B. Mohan, A numerical study on the effects of boot injection rate-shapes on the combustion and emissions of a kerosene-diesel fueled direct injection compression ignition engine, *Fuel*, Vol. 203, pp. 430-444, 2017.

Archive