

# بررسی تأثیر تزریق دومرحله‌ای سوخت بر آلاینده‌های منتشره از موتور دیزل MT4.244

حامد یغمائی بنیسی<sup>۱</sup> و رضا ابراهیمی<sup>۲</sup> امیرحسین شامخی<sup>۳</sup> اسماعیل امیری<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا      دانشکده مهندسی مکانیک      دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۹/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۲)

## چکیده

هدف از این تحقیق بررسی امکان کاهش همزمان آلاینده‌های  $NO_x$  و دوده در یک موتور دیزل تزریق مستقیم با استفاده از روش تزریق دومرحله‌ای سوخت می‌باشد. بدین منظور، از نرم افزار FIRE جهت شبیه‌سازی عملکرد موتور مورد مطالعه استفاده شده است. در این مطالعه، فرض شده که موتور در شرایط بار کامل کار می‌کند و سرعت موتور برابر ۲۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. برای اعتباردهی به نتایج، مدل تزریق یک‌مرحله‌ای با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی بر روی موتور مقایسه شده و پس از یافتن مدل تزریق یک‌مرحله‌ای مناسب از آن به عنوان حالت پایه موتور، استفاده شده است. در ادامه، مودهای مختلف تزریق سوخت، شامل پیش پاشش و پاشش اصلی یا پاشش اصلی و پس پاشش با تغییر درصد سوخت تزریق شده در هر مرحله و فواصل زمانی مختلف بین دو مرحله تزریق مدل شده و مود مناسب از لحاظ پارامترهای عملکردی موتور و کاهش سطح آلاینده‌ها انتخاب شده است. با توجه به نتایج حاصله، مشاهده می‌شود که تزریق دومرحله‌ای سوخت میزان تولید آلاینده‌های  $NO_x$  و دوده را به طور همزمان کاهش می‌دهد. در نهایت، مود تزریق پیشنهادی برای موتور مورد مطالعه در تحقیق حاضر، یعنی موتور MT4.244، عبارت است از مودی که درصد سوخت تزریقی در مرحله اول و دوم در آن بترتیب برابر ۷۵ و ۲۵ بوده و فاصله بین دو تزریق ۲۵ درجه میل‌لنگ باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تزریق دومرحله‌ای، اسپری، موتور دیزل، دوده،  $NO_x$

## An Investigation of the Effect of Split Injection in Reduction of Pollutants Emitted from MT4.244 Diesel Engine

H. Yaghmaei-Benis and R. Ebrahimi      A.H. Shamekhi      E. Amiri  
Aerospace Eng. Dep't.      Mech. Eng. Dep't.      Aerospace Eng. Dep't.  
Khaje Nasireddinn Toosi Univ. of Tech.

### ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the possibility of simultaneous reduction of soot and  $NO_x$  emissions in a direct injection diesel engine, using split injection method. For showing the effect of applying this injection system on pollutants of MT-4.244 DI diesel engine, the three-dimensional AVL\_FIRE\_CFD software was used. It was assumed that the engine was working under full-load condition and engine speed was 2000 rpm. First, the results of the simulation in single injection mode were validated, using the base state experimental data to find the base single injection mode. Then, different split injection modes were considered, in which the effects of pre-injection and post-injection were investigated by changing the mass of fuel in each pulse of injection. The effects of varying dwell time between injection pulses was analyzed as well. Then, the results of different split injection modes were compared with the base single injection one and finally the optimum mode of injection and optimum dwell time between injection pulses were selected. According to the results, the optimum injection mode for this engine for simultaneous reduction of soot and  $NO_x$  emissions was achieved by injecting 75 percent of fuel in first pulse and 25 percent in the second with dwell time of 25 crank angle degrees between injection pulses.

**Keywords:** Split Injection, Spray, Diesel Engine, Soot,  $NO_x$

۱- کارشناس ارشد: h.yaghmaei@hotmail.com

۲- دانشیار(نویسنده پاسخگو): rebrahimi@kntu.ac.ir

۳- استادیار: shamekhi@kntu.ac.ir

۴- کارشناس ارشد: esmael\_amiri@yahoo.com

## ۱- مقدمه

موتورهای دیزل به خاطر راندمان بالا، مصرف سوخت ویژه کمتر و عمر نسبتاً زیاد برای استفاده در اتومبیل‌های سبک و سنگین، وسایل حمل و نقل دریایی و دستگاه‌های با کاربرد صنعتی، تولید می‌شوند [۱]. امروزه به دلیل اهمیت حفظ محیط زیست، بسیاری از تحقیقات با هدف کاهش آلاینده‌ها انجام می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم کاهش  $NO_x$ ، به تأخیر انداختن زمان تزریق سوخت (ریتارد کردن پاشش) می‌باشد. برای کاهش دوده نیز می‌توان فشار پاشش را افزایش داد، ولی محدودیت‌هایی برای افزایش فشار پاشش سوخت مثل استحکام مواد و هزینه سیستم سوخت‌رسانی وجود دارد [۲]. همچنین، افزایش فشار پاشش سوخت باعث افزایش دمای ماکزیمم محفظه احتراق شده و میزان تولید  $NO_x$  را افزایش می‌دهد [۳]. کاهش یکی از آلاینده‌های  $NO_x$  یا دوده با این روش‌ها منجر به افزایش تولید آلاینده دیگر خواهد شد. از طرفی با تدوین استانداردهای جدید آلاینده‌گی، لازم است تا هر دو آلاینده به‌طور همزمان کاهش داده شود به‌طوری که پارامترهای عملکردی موتور کاهش نیابند. سیستم تزریق دومرحله‌ای<sup>۱</sup> سوخت یکی از روش‌های موجود برای حل این مشکل است. در سال ۱۹۳۷ این روش تزریق با هدف کاهش سر و صدای احتراق و استفاده از سوخت‌های با کیفیت پایین (عدد ستان پایین)، برای اولین بار توسط جفر<sup>۲</sup> مورد آزمایش قرار گرفت [۴]. با انجام تحقیقات بیشتر، این روش بعنوان ابزاری قوی برای کاهش همزمان آلاینده‌های  $NO_x$  و دوده در آمد. تزریق دومرحله‌ای به منظور کاهش زمان پرپود تأخیر در اشتعال و کنترل افزایش ناگهانی فشار درون سیلندر در سال ۱۹۸۹ توسط شولت<sup>۳</sup> و همکارانش بکار رفت. در سال ۱۹۹۱ محققینی چون میاکی<sup>۴</sup> و همکارانش نشان دادند که این روش تزریق با کاهش زمان پرپود تأخیر در اشتعال از شدت احتراق پیش آمیخته کاسته و از آنجا که قسمت اعظم اکسیدهای نیتروژن در این فاز احتراقی تولید می‌شود، منجر به کاهش میزان این آلاینده نیز می‌گردد [۴].

دورنهورلز<sup>۵</sup> و همکارانش [۵] در سال ۱۹۹۴ تأثیر پیش پاشش را بر روی رفتار آلاینده‌های یک موتور دیزلی تزریق مستقیم به صورت تجربی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با این روش، سر و صدای احتراق تا ۱۰ دسی بل و اکسیدهای نیتروژن تا ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کنند در حالی که میزان دوده ثابت می‌ماند. توو<sup>۶</sup> و همکارانش [۱] در سال ۱۹۹۵ مطالعه تجربی خود را با استفاده از یک سیستم سوخت ریل مشترک با انژکتور واحد که به طور الکترونیکی کنترل می‌شد و قابلیت تغییر تعداد مراحل پاشش و نیز طول پاشش در هر سیکل را داشت بر روی موتور دیزل سنگین تزریق مستقیم در دو حالت ۷۵٪ و ۲۵٪ بار کامل انجام دادند. نتایج نشان می‌دهند که تزریق دومرحله‌ای با فاصله زمانی طولانی بین پاشش‌ها در شرایط ۷۵٪ بار کامل، آلاینده دوده را بدون هیچ افزایشی در میزان اکسیدهای نیتروژن و فقط ۲/۵ درصد افزایش مصرف سوخت ویژه، تا سه برابر تزریق یک‌مرحله‌ای پایین می‌آورد.

ژیانون<sup>۷</sup> و همکارانش [۶] در سال ۱۹۹۶ یک مدل احتراقی پدیده‌ای چندمنطقه‌ای را برای بررسی پارامترهای تزریق چندمرحله‌ای شامل، فاصله زمانی بین مراحل تزریق، میزان سوخت پاشیده شده و فشار تزریق سوخت در مرحله دوم، توسعه دادند. نتایج پیش بینی شده توسط مدل آن‌ها، نشان می‌دهد که در شرایط بار کامل، با تزریق ۳۰-۱۰ درصد کل سوخت در حدود ۱۵ درجه بعد از نقطه مرگ بالا در مرحله دوم، منجر به کاهش آلاینده دوده بدون افزایش اکسیدهای نیتروژن و مصرف سوخت خواهد شد. این محققین در نهایت طرح پاشش بهینه را به این صورت بیان کردند: فشار تزریق نسبتاً پایین سوخت در اولین تزریق (برای کاهش اکسیدهای نیتروژن و تشکیل دوده) و فشار تزریق سوخت بالا در دومین تزریق (برای افزایش اکسیداسیون دوده و در نتیجه کاهش تولید دوده). در ضمن نتایج کارهای تجربی توو و همکاران، تصدیق کننده این مطلب می‌باشند.

با توسعه روش‌های عددی و رایانه‌ها، جهت کاهش هزینه‌ها و همچنین، زمان طولانی آزمون‌های تجربی، توسعه مدل‌های محاسباتی به منظور فهم جزئیات بیشتری از اثرات

1- Split Injection System

2- Jefer

3- Schulte

4- Miyaki

5- Durnholz

6- Tow

7- Jianwen

## ۲- روش‌های مورد استفاده و روابط حاکم

معادلات بقای مورد استفاده برای شبیه‌سازی فرآیندهای دینامیکی و ترمودینامیکی، عبارتند از:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} (\hat{\rho} \hat{U}_j), \quad (1)$$

معادله حرکت:

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{U}_i}{Dt} = \hat{\rho} \frac{D\hat{U}_i}{Dt} + \hat{\rho} \hat{U}_j \frac{D\hat{U}_i}{Dx_j} = \hat{\rho} \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$= \rho g_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{U}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \hat{U}_k}{\partial x_k} \delta)],$$

معادله انرژی:

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{H}}{Dt} = \hat{\rho} (\frac{\partial \hat{H}}{\partial t} + \hat{U}_j \frac{\partial \hat{H}}{\partial x_j}) \quad (3)$$

$$= \hat{\rho} \hat{q}_g + \frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\hat{\tau}_{ij} \hat{U}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j}),$$

و معادله غلظت:

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{C}}{Dt} = \hat{\rho} (\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} + \hat{U}_j \frac{\partial \hat{C}}{\partial x_j}) = \hat{\rho} \hat{r} + \frac{\partial}{\partial x_j} (D \frac{\partial \hat{C}}{\partial x_j}). \quad (4)$$

در بیشتر کدهای دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل کردن آشفستگی، مدل k-ε به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. این مدل به‌خصوص در محاسبات صنعتی کاربرد دارد. در این تحقیق نیز مدل اغتشاش k-ε استاندارد برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان داخل محفظه احتراق به کار رفته است [۱۲].

پس از اینکه جت سوخت از دهانه نازل انژکتور خارج شد، دچار فرآیندهای مختلفی می‌شود از جمله اتمیزاسیون اسپری سوخت، تبخیر قطرات حاصله، برخورد قطرات به دیواره و ...، که هرکدام از آنها باید در شبیه‌سازی عددی احتراق دیزل، به دقت مدل شوند (شکل ۱) [۱۲].

جت سوخت یک جریان چند فازی است، بنابراین شبیه‌سازی آن نیازمند حل همزمان معادلات بقاء برای دو فاز مایع و گاز می‌باشد. امروزه محاسبات جت در فاز مایع بر اساس یک روش آماری موسوم به روش قطرات مجزا (DDM<sup>5</sup>) انجام

پارامترهای تزریق روی مشخصه‌های احتراق و تشکیل آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفت.

پترسون<sup>۱</sup> و همکارانش [۷] در سال ۱۹۹۴ کد سه‌بعدی KIVA-II را پس از انجام اصلاحاتی بر روی آن، برای مطالعه اثر زمان‌بندی تزریق، فشار آن و تزریق چندمرحله‌ای بکار بردند. ریتز<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] در سال ۱۹۹۶ توسط کد سه-بعدی KIVA-II تأثیر تزریق چندمرحله‌ای را بررسی کردند.

بیانچی<sup>۳</sup> و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۱ قابلیت تزریق چندمرحله‌ای در کاهش آلاینده‌های دوده و اکسیدهای نیتروژن موتورهای دیزل HSDI را با کد KIVAIII بررسی کردند. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که تزریق چندمرحله-ای در کاهش اکسیدهای نیتروژن و دوده خیلی موثر است.

ژیل، مارینر، سیسون و ژائو [۱۰] در سال ۲۰۰۵ با انجام مطالعات تجربی روی تزریق چندمرحله‌ای در یک موتور دیزل یک سیلندر آزمایشگاهی (اپتیکال) تأثیر این روش تزریق را بر روی اختلاط و احتراق بررسی کردند و توانستند تصاویری گویا از اسپری و احتراق در این موتور تهیه کنند.

هاسبرگ و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۸ به‌صورت تجربی و عددی با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی STAR-CD، تأثیر پیش‌پاشش را بر روی آلایندگی بررسی و موفق به کاهش همزمان اکسیدهای نیتروژن و دوده شدند.

با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های تجربی بر روی موتور، استفاده از روش‌های عددی راه حلی مناسب برای حذف این مشکلات و پاسخ‌گویی سریع‌تر به مسائل طراحی می‌باشد. در این میان روش‌های دینامیک سیالاتی علاوه بر کمک به درک جزئیات بیشتری از جریان پیچیده احتراق داخل سیلندر و کمک به بهینه کردن طرح اولیه، می‌توانند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش زمان و هزینه‌های انجام آزمایش‌ها داشته باشد. به همین دلیل و نیز به علت عدم امکان انجام آزمایش تجربی تزریق دومرحله‌ای سوخت به خاطر نداشتن امکانات لازم، در کار حاضر از نرم افزار FIRE که یک کد دینامیک سیالات عددی<sup>۴</sup> معتبر می‌باشد، استفاده شده است.

1- Patterson  
2- Reitz  
3- Bianchi  
4- CFD

می‌گیرد که منجر به یک معادله انتشار می‌شود و رشد آشفتنگی اولیه بر روی سطح مایع را به طول موج و دیگر پارامترهای دینامیکی و فیزیکی مایع پاشیده شده و گاز اطراف آن ربط می‌دهد.

در مدل ویو، آهنگ تغییر شعاع قطرات ناپایدار اولیه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{\tau} \quad (5)$$

قطرات کوچک جدید با شعاع  $r$  متناسب با طول موج مربوط به امواج سطحی موجود در سطح جت سوخت ( $\Lambda$ ) می‌باشند که رابطه آن‌ها به صورت زیر است:

$$r = C_1 \Lambda \quad (6)$$

زمان شکست قطرات جت سوخت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{3.726 C_2 a}{\Lambda \Omega} \quad (7)$$

مقدار ثابت  $C_1$  برای اسپری دیزل توسط ریتز در سال ۱۹۸۷ برابر با ۰/۶۱ پیشنهاد شده است. ثابت زمانی تجزیه  $C_2$  به ویژگی‌های نازل انژکتور و به سطح آشفتنگی اولیه در فرآیند تجزیه مایع وابسته بوده و محدوده آن بین ۵-۶۰ می‌باشد که در این کار برابر ۱۲ فرض شده است. مبنای این انتخاب، انطباق بین نتایج تجربی و عددی در تزریق یک مرحله‌ای سوخت می‌باشد و هر چه مقدار این ثابت کمتر باشد زمان اتمیزاسیون جت سوخت کوتاه‌تر می‌شود [۱۲].

با استفاده از تحلیل پایداری جت، می‌توان طول موج  $\Lambda$  و آهنگ رشد موج  $\Omega$  را به دست آورد.

$$\Lambda = 9.02a \frac{(1 + 0.45Oh^{0.5})(1 + 0.4T^{0.7})}{(1 + 0.87We_g^{1.67})^{0.6}}, \quad (8)$$

$$\Omega = \left(\frac{\rho_g a^3}{\sigma}\right)^{-0.5} \frac{0.34 + 0.38We_g^{1.5}}{(1 + Oh)(1 + 1.4T^{0.6})}, \quad (9)$$

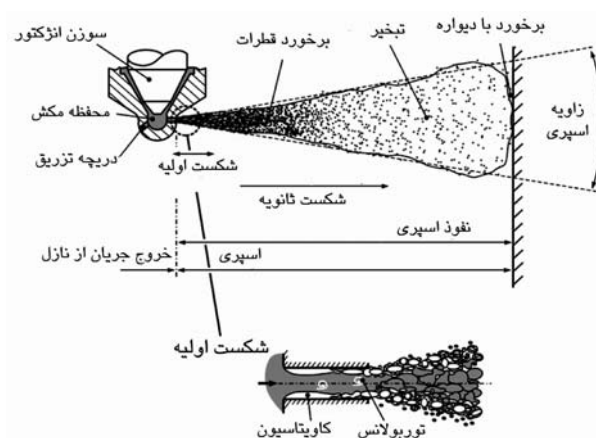
$$Oh = \sqrt{We_l} / Re_l, \quad (10)$$

$$We_l = \rho_l a u_{rel}^2 / \sigma, We_g = \rho_g a u_{rel}^2 / \sigma, \quad (11)$$

$$T = Oh \cdot We_g^{0.5}, \quad (12)$$

که در آن،  $Oh$  عدد Ohnesorge است.

می‌گیرد. در این روش معادلات مسیر، مومنتم، انتقال گرما و انتقال جرم برای قطرات مجزا که عضو یک گروه قطرات یکسان غیر واکنشی با هم تحت عنوان بسته قطرات هستند، حل می‌شوند. بنابراین، هر قطره نماینده کل قطرات درون بسته از لحاظ دما، سرعت و اندازه می‌باشد. با توجه به اینکه بین قطرات سوخت مایع و گاز اطراف آن در سیلندر تبادل جرم، مومنتم و انرژی وجود دارد، معادلات در هر دو فاز باید با هم کوپل شوند. در اینجا از توضیح معادلات دیفرانسیل مربوط به مسیر و سرعت بسته‌های ذرات خودداری می‌شود برای کسب اطلاعات کامل‌تر در این زمینه می‌توان به مرجع [۱۳] مراجعه کرد.



شکل (۱): شماتیک خروج اسپری سوخت از دهانه نازل انژکتور و فرآیندهای مربوطه [۱۲].

مدل مورد استفاده برای شکست جت سوخت در کار حاضر مدل ویو<sup>۱</sup> استاندارد می‌باشد. در این مدل برای تشریح اتمیزاسیون مایع تزریق شده، از نتایج یک تحلیل پایداری خطی مرتبه اول جت‌های مایع، استفاده می‌شود. بدین منظور پایداری یک ستون مایع خارج شده از یک اوریفیس دایره‌ای به شعاع  $a$  را به داخل یک محیط گازی شکل تراکم ناپذیر ساکن، مورد توجه قرار می‌دهند. به خاطر اثرات آیرودینامیکی بین مایع و گاز که باعث رشد موج ناپایدار بر روی سطح جت مایع می‌شود شکست جت روی می‌دهد. توصیف نوسانات بوسیله معادلات پیوستگی و حرکت، انجام

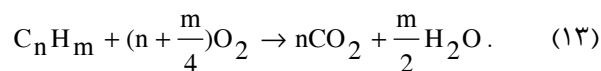
می‌دهد و در طول دوره تأخیر در اشتعال، سوخت تبخیر می‌شود تا اینکه اولین منطقه مخلوط قابل اشتعال با نسبت تعادل مطلوب ( $0.7 < \lambda < 0.5$ ) تشکیل شود. علاوه بر این، واکنش‌های شیمیایی در این منطقه باید رادیکال‌های کافی به منظور شروع احتراق تولید کنند. زمان تأخیر در اشتعال به شدت تابعیت دما دارد و افزایش دما، این زمان را کاهش می‌دهد. این مدل یک مکانیزم سینتیکی کاهش یافته که شامل ۵ گونه و ۸ واکنش کلی است را به کار می‌گیرد تا پدیده خوداشتعالی سوخت‌های هیدروکربنی را شبیه‌سازی کند [۱۳].

یکی از مدل‌های احتراقی مورد استفاده در Fire، مدل احتراقی کنترل آشفته‌گی<sup>۵</sup> می‌باشد، در این مدل فرض می‌شود که هنگام تشکیل شعله‌های آشفته پیش‌آمخته، واکنش دهنده‌ها (سوخت و اکسیژن) دارای ادی‌های یکسان هستند و از ادی‌های در برگیرنده محصولات داغ احتراقی جدا می‌شوند. آهنگ اضمحلال این ادی‌ها است که نرخ احتراق را تعیین می‌کند [۷]. این مدل برای پیش‌بینی نوسانات گونه‌های واکنش دهنده، استفاده نمی‌شود بلکه نرخ میانگین واکنش طبق مدل مگنوسن و هرتاژر<sup>۶</sup> بیان می‌شود [۱۳].

تشکیل دوده، یعنی تبدیل هیدروکربن‌های غنی، نتیجه فرآیندهای پیچیده‌ای است که صدها واکنش و تعداد زیادی گونه‌های میانی و رادیکال‌ها را در بر می‌گیرد. اکسیداسیون ذرات عمدتاً به دلیل برخورد اکسیژن اتمی به ذرات کربنی تحت دمای بالا رخ می‌دهد [۱۵].

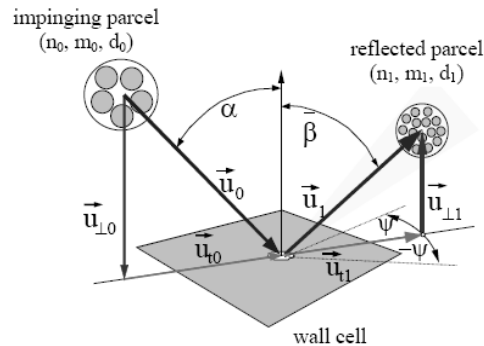
با وجود پیچیدگی فرآیندهای اساسی، واکنش‌های خاصی که در آهنگ تشکیل و اکسیداسیون دوده شرکت می‌کنند، با پارامترهای شناخته شده شعله از قبیل کسر جرمی سوخت، فشار جزئی اکسیژن، دمای شعله و شدت اختلاط آشفته مرتبط هستند [۱۳].

تحت شرایط ایده‌آل، احتراق سوخت‌های هیدروکربنی تشکیل  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  می‌دهند. مقدار اکسیژن لازم، اکسیژن استوکیومتریک  $\text{O}_{2, \text{st}}$  است که از معادله زیر محاسبه می‌شود:



با توجه به اهمیت برخورد اسپری با دیواره و اثرات آن، لازم است مدل مناسبی بسته به موتور و شرایط آن انتخاب شود. مدل در نظر گرفته شده در این مطالعه مدل وال‌جت<sup>۱</sup> است که در آن فرض می‌شود یک لایه بخار بین قطرات و دیواره در شرایط کاری موتور تشکیل شده و بسته به عدد وبر قطره باعث برگشتن قطرات از دیواره یا لغزیدن آن‌ها روی دیواره می‌شود (شکل ۲). عدد وبر بحرانی که حد انتقال بین این دو حالت می‌باشد برابر ۸۰ است. در مقادیر کمتر از این حد، برگشت قطرات از دیواره را داریم و مؤلفه مماسی سرعت ثابت مانده اما مؤلفه عمودی سرعت در جهت عکس قبلی و به صورت تابعی از عدد وبر قطره تغییر می‌کند. بالاتر از عدد وبر بحرانی، تشکیل جت دیواره را داریم که سرعت انعکاس جت را با فرض ثابت بودن مقدار آن و فقط تغییر زاویه انعکاس، به دست می‌آورند [۱۳].

در شکل ۲،  $\vec{u}_t$  و  $\vec{u}_\perp$  مؤلفه عمودی و مماسی سرعت،  $n$ ،  $m$ ،  $d$  قطر، جرم و تعداد قطرات موجود در بسته قطرات و  $\Psi$  نشان دهنده زاویه مربوط به جهت مماسی قطرات منعکس شده بر روی سطح می‌باشد.



شکل (۲): برخورد بسته قطرات به دیواره [۱۳].

برای مدل‌سازی خوداشتعالی از مدل اشتعالی شل<sup>۲</sup> که توسط هالستد<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۱۹۷۷ ارائه شده است، استفاده می‌شود [۱۴]. خوداشتعالی هیدروکربن‌ها در موتورهای دیزل یک فرآیند شاخه‌ای زنجیری<sup>۴</sup> است که شامل چهار دسته واکنش می‌باشد. احتراق بعد از طی زمان تأخیر در اشتعال رخ

- 1- Walljet1
- 2- Shell
- 3- Halstead
- 4- Branched Chain



شکل (۳): پیستون موتور MT 4.244

(از مرکز تحقیقات و توسعه شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز).

### جدول (۱): مشخصات موتور دیزلی MT 4.244

(از مرکز تحقیقات و توسعه شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز).

ساخت و مدل موتور	پرکینز MT 4.244
نوع موتور	موتور دیزلی پاشش مستقیم چهار زمانه
تعداد سیلندر	۴ سیلندر
حالت سیلندر	بصورت سری و حالت عمودی
تعداد سوراخ‌های انژکتور	۵ عدد
قطر پیستون	۱۰۰ میلی متر
کورس پیستون	۱۲۷ میلی متر
گنجایش	۳/۹۹ لیتر
نسبت تراکم	۱۷/۵:۱
فشار پاشش سوخت	۲۵۰ بار
دور موتور در حداکثر گشتاور	۱,۴۰۰ دور در دقیقه
حداکثر گشتاور خروجی	۳۶۰ نیوتن متر
زمان شروع پاشش سوخت	۴ درجه قبل از نقطه مرگ بالا
مدت زمان پاشش سوخت	۲۰ درجه میل لنگ
زمان باز شدن سوپاپ ورودی	۲۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا
زمان بسته شدن سوپاپ ورودی	۳۴ درجه بعد از نقطه مرگ پائین
زمان باز شدن سوپاپ خروجی	۱۵۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا
زمان بسته شدن سوپاپ خروجی	۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا
دور موتور در حداکثر توان	۲,۰۰۰ دور در دقیقه
حداکثر توان خروجی	۸۲ اسب بخار
کاسه پیستون	شکل و خارج از مرکز

مقدار اکسیژن واقعی موجود برای احتراق، با نسبت هوای اضافی  $\lambda = \frac{O_2}{O_{2,st}}$ ، یا با نسبت تعادل (اکی‌والانس  $\phi$ )، بیان می‌شود:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{O_{2,st}}{O_2} \quad (۱۴)$$

در نسبت‌های تعادل  $\phi > 1$ ، پتانسیل زیادی برای تشکیل دوده وجود دارد. بررسی شعله‌های پیش‌آمیخته نشان می‌دهد که مولکول‌های سوخت به رادیکال‌ها و عمدتاً استیلن، تبدیل می‌شوند. سپس این رادیکال دوبعدی با واکنش‌های شیمیایی، جدایی هیدروژن و افزایش استیلن رشد می‌کند. در مراحل بعدی مولکول‌ها سه‌بعدی می‌شوند و با انعقاد، ذرات کربنی شکل می‌گیرند. بعد از اتمام تبدیل گاز به جامد، ذرات دوده رشد می‌کنند (رشد سطحی) [۱۳].

آهنگ تشکیل دوده توسط مدل هیرویسو بیان می‌شود ( $M_{fv}$  عبارتست از جرم بخار سوخت):

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = K_f M_{fv} \quad (۱۵)$$

با توجه به رابطه تشکیل دوده می‌توان نتیجه گرفت که آهنگ تشکیل آرنیوسی دوده با جرم بخار سوخت متناسب است. ضریب تشکیل دوده (تابعی از فشار و دما) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_f = A_f P^{0.5} \exp(-E_f / RT), \quad (۱۶)$$

که در آن، P فشار بر حسب bar است.

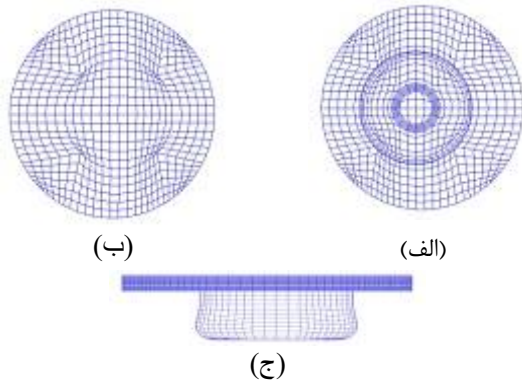
در این تحقیق، به‌منظور بررسی نحوه تشکیل NO، از روش توسعه یافته زلدویچ استفاده شده است [۱۳].

### ۳- مشخصات موتور مورد مطالعه

موتور مورد بررسی در این کار، موتور دیزل MT 4.244 ساخت شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز می‌باشد. کاسه پیستون این موتور همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، حالت تقارن نداشته و خارج از مرکز است و لذا مدل کردن آن در محیط نرم‌افزار Fire به سادگی ممکن نیست.

مشخصات هندسی موتور مورد بررسی به همراه اطلاعات مربوط به زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌های ورودی و خروجی در جدول ۱ ارائه شده است.

۴- نتایج  
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی ارائه می‌شود. بعد از بررسی استقلال از شبکه، اعتبار نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی موجود برای موتور در حالت پایه بررسی خواهد شد. با توجه به اینکه دور توان حداکثر موتور (۲,۰۰۰ دور در دقیقه) بحرانی‌ترین حالت کارکردی از لحاظ تولید آلایندها می‌باشد، این حالت مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل (۴): شبکه‌بندی محفظه احتراق،

(الف) دید از بالا، (ب) دید از پائین، (ج) پیستون در TDC.

شرایط اولیه اعمال شده برای تحلیل موتور، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۳): شرایط اولیه.

۱/۹۰	فشار اولیه داخل سیلندر [bar]
۰/۰۶۴	جرم سوخت تزریقی در یک سیکل [gr]
۳۵۰	دمای اولیه داخل سیلندر [K]
۰/۰۰۴۲	دبی سوخت [kg/s]
۲۸۰۰	چرخش [1/min] (swirl/tumble)

شرایط مرزی سر سیلندر و دیواره سیلندر به عنوان یک دیوار ثابت و شرط مرزی پیستون به صورت یک دیوار متحرک در نظر گرفته شده است. دمای شرایط مرزی دیواره یعنی دمای سر سیلندر، دیواره سیلندر و سطح پیستون که بستگی به شرایط کارکرد موتور دارد بر اساس آزمایش‌های تجربی تعیین می‌شود. در این کار فرض شده است که دما روی دیواره‌های محفظه احتراق نسبت به زمان ثابت می‌ماند که با توجه به خنک‌کاری پیوسته موتور و کارکرد آن در حالت پایدار، فرضی قابل قبول است و در نتیجه نوسانات ناشی از تغییر دمای گازهای درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ در هر سیکل تأثیر چندانی روی دمای دیواره نخواهد داشت، لذا قرار دادن مقداری متوسط به عنوان دمای ثابت در

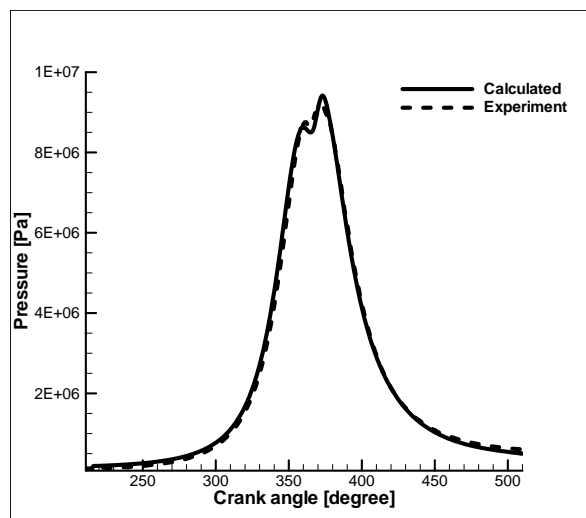
پس از طراحی هندسه موتور توسط نرم‌افزار Solidworks و مش‌بندی آن به کمک نرم افزار ANSYS ICEM CFD10 انجام شده است. شبکه‌بندی به دلیل عدم تقارن کاسه پیستون باید بصورت ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شود. تعداد سلول‌ها در نقطه مرگ بالا ۱۴,۳۰۸ سلول می‌باشد. شبیه‌سازی موتور بصورت سیکل بسته بوده و از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی (IVC) در مرحله تراکم تا باز شدن سوپاپ خروجی (EVO) در مرحله انبساط می‌باشد.

با توجه به اینکه یکی از موضوعات مهم در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، استقلال نتایج از اندازه شبکه می‌باشد، جهت بررسی این مسئله به ترتیب تعداد ۱۷,۷۳۷، ۱۴,۳۰۸ و ۸,۵۴۸ سلول در نقطه مرگ بالا در نظر گرفته شد. معیار استقلال حل از شبکه، حداکثر فشار داخل سیلندر حاصل از احتراق در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصله از لحاظ مقدار و موقعیت حداکثر فشار داخل سیلندر و زمان انجام محاسبات، شبکه با تعداد سلول ۱۴,۳۰۸ در نقطه مرگ بالا، به عنوان شبکه محاسباتی مناسب انتخاب شده است.

جدول (۲): مطالعه استقلال حل از شبکه.

تعداد سلول در TDC	حداکثر فشار داخل سیلندر [MPa]	موقعیت حداکثر فشار داخل سیلندر [Degree ATDC]	زمان محاسبات (ساعت)
۰	۹/۱۲۵۵۰	۱۳	۰
۸۵۴۸	۸/۶۳۲۶۹	۱۲/۵	۳/۴
۱۴۳۰۸	۹/۴۱۸۰۶	۱۳	۴
۱۷۷۳۷	۹/۵۲۵۷۶	۱۲	۷/۵

زمان محاسبات ارائه شده برای رایانه‌ای با پردازشگر به مشخصات 5000 Dual core – AMD Athlone و RAM

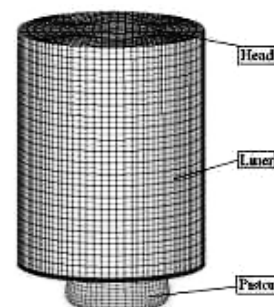


شکل (۶): مقایسه فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل لنگ برای نتایج محاسباتی و تجربی موتور پایه در شرایط بار کامل.

با توجه به اینکه در این موتور تزریق سوخت در نزدیکی نقطه مرگ بالا یا به عبارتی با تأخیر زیاد صورت می‌گیرد (۴) درجه قبل از نقطه مرگ بالا، روی منحنی فشار در نزدیکی TDC (بعد از پیک اول) افت نسبی فشار وجود دارد. این امر به دلیل تزریق دیر هنگام سوخت بعلاوه وجود پرپود تأخیر در اشتعال می‌باشد. در ابتدا مقدار کمی سوخت بصورت پیش-آمیخته مشتعل می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌کند که بعد از نقطه مرگ بالا با حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ پایین و کاهش فشار ناشی از انبساط، افت نسبی فشار به وجود می‌آید ولی در ادامه با افزایش آهنگ آزادسازی انرژی، فشار افزایش می‌یابد. اثر محسوس این روند در پیک دوم منحنی فشار مشاهده می‌شود.

لازم به توضیح است که این موتور در حالت پایه برای کارکرد در دو حالت تزریق تک‌مرحله‌ای سوخت قبل و بعد از نقطه مرگ بالا طراحی شده است. تزریق بعد از نقطه مرگ بالا برای کاهش NOx جهت دستیابی به استاندارد Stage II می‌باشد ولی این کار منجر به کاهش توان می‌گردد و حالت تزریق قبل از نقطه مرگ بالا برای حفظ توان در حد مطلوب و همچنین، کاهش دوده می‌باشد. در تحقیق حاضر اطلاعات دریافتی بر اساس زاویه شروع تزریق ۴ درجه قبل از نقطه مرگ بالا می‌باشند.

طول زمان شبیه‌سازی فرضی منطقی می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های مربوط به دما در دیواره‌های محفظه احتراق در موتورهای دیزل، این دماها برای سر سیلندر برابر ۵۵۰ درجه کلوین، برای دیواره سیلندر ۴۰۰ درجه کلوین و برای سطح پیستون برابر با ۵۹۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده‌اند. عناوین قسمت‌های مختلف شرایط مرزی در شکل ۵ آمده است.

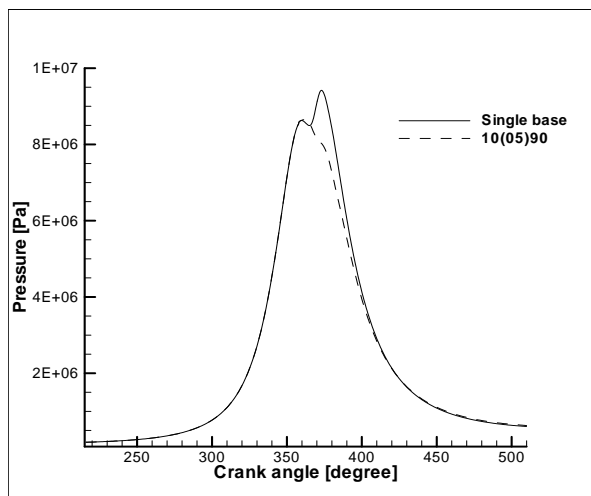


شکل (۵): عناوین قسمت‌های مختلف شرایط مرزی.

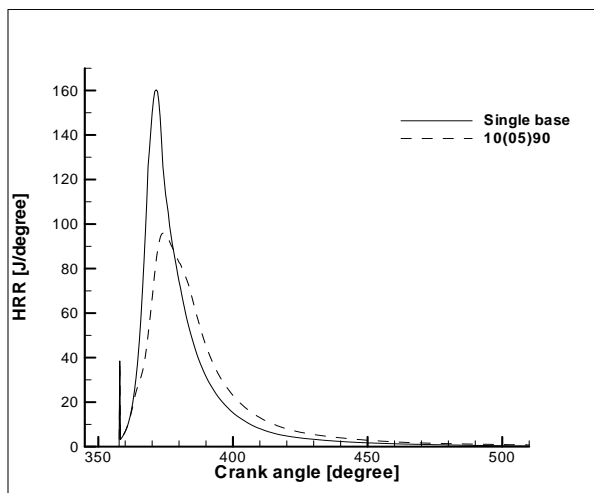
برای اعتباردهی به نتایج شبیه‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حالت تزریق یک‌مرحله‌ای با نتایج آزمایش موتور در حالت پایه با تزریق یک‌مرحله‌ای سوخت در حالت تمام بار (۲,۰۰۰ rpm)، مقایسه شده است. حداکثر فشار داخل سیلندر حاصل از شبیه‌سازی برابر ۹,۴۱۸,۰۶۰ پاسکال است که در موقعیت ۱۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا رخ می‌دهد و در مقایسه با حداکثر فشار داخل سیلندر تجربی (۹,۱۲۵,۵۰۰ پاسکال) و در موقعیت ۱۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا توافق خوبی را نشان می‌دهد. خطای بین حداکثر فشار عددی و تجربی ۳/۱۱٪ می‌باشد که خطایی قابل قبول است (شکل ۶). البته همانطور که در قسمت مقدمه نیز مطرح گردید، به دلیل عدم وجود تجهیزات لازم برای انجام آزمایش روی موتور در حالت تزریق دو مرحله‌ای سوخت، اعتباردهی به نتایج فقط بر اساس تنظیمات مربوط به حالت تزریق تک-مرحله‌ای صورت گرفته و در ادامه کار جهت بررسی تزریق دو مرحله‌ای این تنظیمات را ثابت نگه داشته و فقط پارامترهای مربوط به تزریق سوخت عوض شده‌اند تا تأثیر آن‌ها بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور مورد بررسی قرار بگیرد.



کمتر است و لذا توان موتور نیز در این حالات درمقایسه با حالت پایه کمتر خواهد بود و با توجه به فرض ثابت ماندن دبی سوخت، مصرف سوخت ویژه موتور افزایش می‌یابد. از منحنی‌های فشار شکل‌های ۷-۱۱ چنین نتیجه گرفته می‌شود که هر چه درصد سوخت تزریق شده در مرحله اول بیشتر باشد، توان اندیکه موتور نیز با توان حالت پایه مطابقت بیشتری خواهد داشت و در مورد مصرف سوخت ویژه نیز همین مطلب صادق می‌باشد. بنابراین، مود تزریق مناسب مودی است که در آن درصد بیشتر سوخت در مرحله اول تزریق می‌شود.



(الف)



(ب)

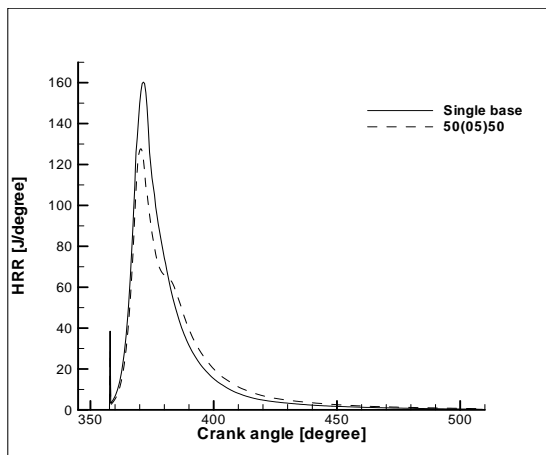
شکل (۷): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار

داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۱۰(۰۵)۹۰ و حالت پایه.

در آغاز برای سادگی و هماهنگی در بیان اختصاری موده‌های مختلف تزریق سوخت، ایجاد یک قرارداد در نامگذاری ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور موده‌های تزریق با ترتیب (درصد سوخت تزریقی در مرحله دوم (فاصله زمانی بین دو تزریق) درصد سوخت تزریقی در مرحله اول) بیان شده است. بنابراین قرارداد، وقتی یک مود تزریق به صورت ۱۰(۲۵)۹۰ بیان می‌شود، منظور از عدد اول، درصد سوخت تزریق شده در مرحله اول (عدد سمت چپ پرانتز و در مورد این مثال یعنی ۹۰ درصد سوخت تحت عنوان تزریق اصلی در مرحله اول تزریق می‌شود)، عدد داخل پرانتز نشان‌دهنده فاصله زمانی توقف تزریق سوخت بین مراحل (در این مورد عدد ۲۵ یعنی اینکه به مدت ۲۵ درجه میل‌لنگ تزریق سوخت متوقف می‌شود) و عدد بعدی نشانگر میزان سوخت تزریق شده در مرحله دوم می‌باشد (عدد سمت راست پرانتز و در اینجا یعنی ۱۰ درصد سوخت تحت عنوان پس پاشش در مرحله دوم تزریق می‌شود).

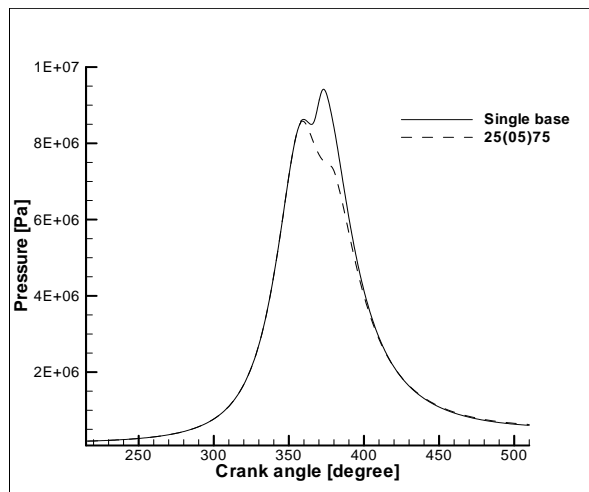
برای شروع شبیه‌سازی تزریق دومرحله‌ای ابتدا فاصله بین دو تزریق را ثابت گرفته و سوخت تزریق شده در مرحله اول را طی ۵ مرحله از ۹۰-۱۰ درصد کل سوخت افزایش داده و متقابلاً سوخت تزریق شده در مرحله دوم کاهش داده شده است بطوریکه مجموع جرم تزریق شده در دو مرحله برابر جرم سوخت تزریقی در حالت پایه باشد. ابتدا با مود ۹۰(۰۵)۱۰ شروع کرده و فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرما در این مود با حالت پایه مقایسه شده است (شکل ۷). سپس همانطور که اشاره شد، درصد سوخت تزریق شده در مرحله اول افزایش یافته که در این راستا موده‌های ۷۵(۰۵)۲۵، ۵۰(۰۵)۵۰، ۲۵(۰۵)۷۵ و ۱۰(۰۵)۹۰ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرمای مربوطه بترتیب در شکل‌های ۸-۱۱ ارائه شده‌اند.

با توجه به منحنی‌های فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرمای ارائه شده، در مودهایی که درصد بیشتر سوخت در مرحله دوم تزریق می‌شود به دلیل کاهش احتراق پیش آمیخته حداکثر مقدار حرارت آزاد شده نیز کاهش می‌یابد، چنین رفتاری در موتورهایی با تزریق سوخت ریتارد شده مشاهده می‌شود همچنین، در این موده‌ها سطح زیر منحنی فشار نسبت به مود تزریق تک‌مرحله‌ای حالت پایه

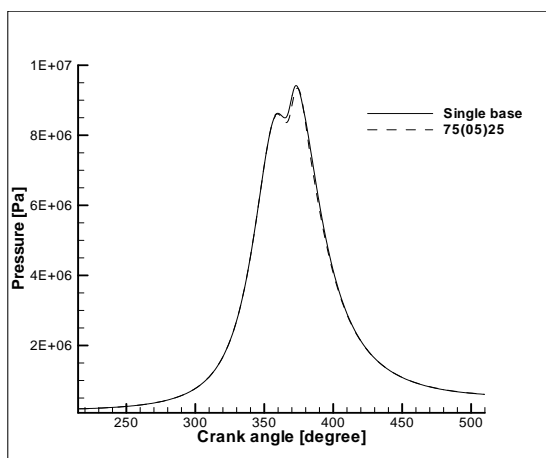


(ب)

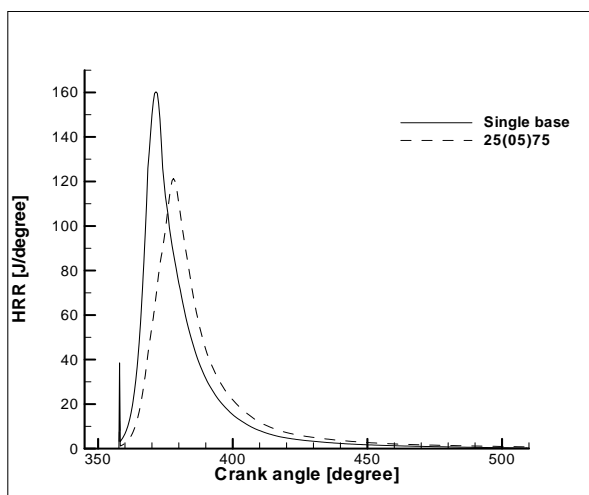
شکل (۹): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۵۰(۰۵)۵۰ و حالت پایه.



(الف)

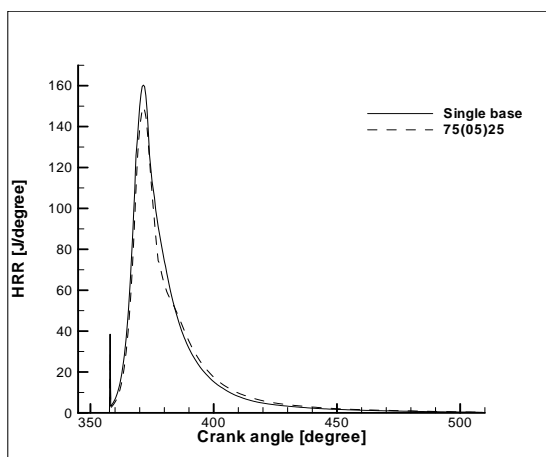


(الف)



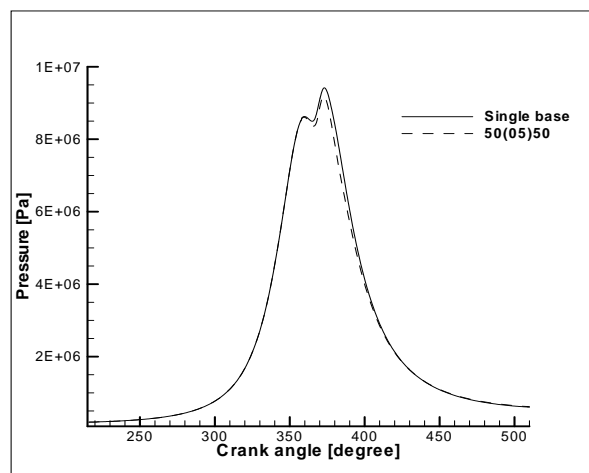
(ب)

شکل (۸): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵(۰۵)۷۵ و حالت پایه.



(ب)

شکل (۱۰): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۷۵(۰۵)۲۵ و حالت پایه.



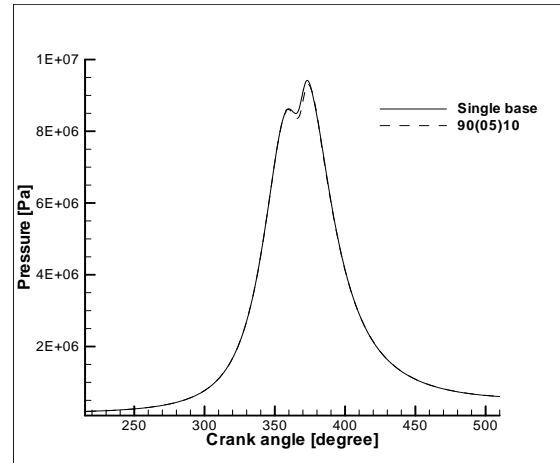
(الف)

تولید دوده افزایش می‌یابد. بنابراین باید حالت بینابینی را یافت که در آن دمای محفظه احتراق، نه به قدری زیاد باشد که باعث افزایش تولید اکسید نیتروژن شود و نه به قدری کم باشد که مانع اکسیداسیون مناسب دوده شده و منجر به افزایش تولید دوده گردد. با توجه به نتایج جدول ۴ ملاحظه می‌شود که در دو مود تزریق ۲۵(۰۵)۷۵ و ۱۰(۰۵)۹۰ مقدار آلاینده‌های دوده و اکسید نیتروژن رفتاری نزدیک به هم دارند و میزان آلاینده‌ها برای این دو حالت کمتر از سایر مودهای تزریق است و با توجه به منحنی‌های شکل‌های ۱۱-۱۰ دیده می‌شود که در مودهای تزریق ۲۵(۰۵)۷۵ و ۱۰(۰۵)۹۰ منحنی فشار نسبتاً نزدیک به حالت پایه می‌باشد. در نتیجه این دو مود را انتخاب کرده و جهت یافتن مود تزریق مناسب با تغییر فاصله زمانی بین مراحل تزریق سوخت در این مودها، مطالعات ادامه می‌یابد.

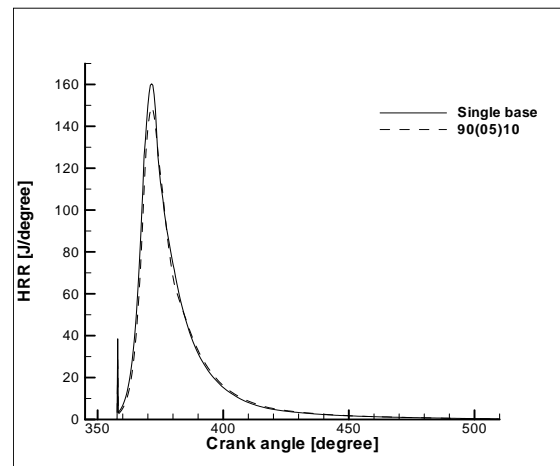
**جدول (۴):** مقادیر آلاینده‌های تولیدی در مودهای تزریق مختلف.

دوده [g / kW-hr]	اکسید نیتروژن [g / kW-hr]	مود تزریق
۰/۳۱	۸/۳۱	حالت پایه
۰/۷۵	۵/۰۶	۹۰(۰۵)۱۰
۰/۷۰	۶/۴۲	۲۵(۰۵)۷۵
۰/۶۴	۷/۴۰	۵۰(۰۵)۵۰
۰/۵۴	۸/۲۷	۷۵(۰۵)۲۵
۰/۵۷	۸/۵۵	۹۰(۰۵)۱۰

از آنجا که نتایج حاصل به ازای فاصله بین دو تزریق برابر ۵ درجه با مقادیر قابل قبول اختلاف زیادی دارند، به منظور بررسی تأثیر فاصله زمانی بین دو مرحله تزریق سوخت بر روی فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرما، منحنی‌های مربوطه ارائه می‌شود. شکل‌های ۱۸-۱۲ مربوط به منحنی فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرما در مودهای مختلف تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و مقایسه آن‌ها با مود تزریق حالت پایه می‌باشد،<sup>۱</sup> D.T نشان‌دهنده فاصله زمانی بین دو



(الف)

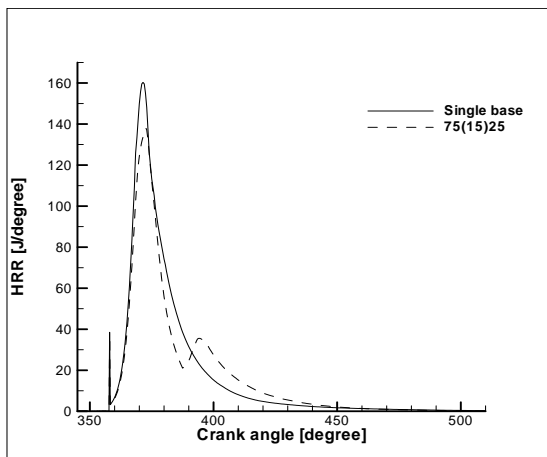


(ب)

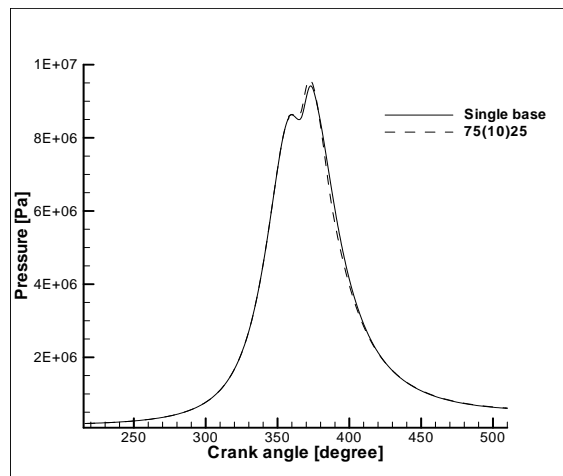
**شکل (۱۱)** مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۱۰(۰۵)۹۰ و حالت پایه.

برای تحلیل تأثیر تزریق دومرحله‌ای سوخت بر روی رفتار موتور علاوه بر پارامترهای عملکردی موتور، باید تأثیر این روش بر میزان تولید آلاینده‌ها که هدف اصلی این تحقیق می‌باشد نیز بررسی شود. بدین منظور مقدار آلاینده‌های دوده و اکسید نیتروژن در مودهای مختلف تزریق سوخت در جدول ۴ آمده است. با توجه به جدول ۴ ملاحظه می‌شود که هر چه مقدار سوخت تزریق شده در مرحله اول کمتر باشد به دلیل پائین‌تر بودن نسبی دمای محفظه احتراق، مقدار تولید اکسید نیتروژن نیز کاهش پیدا می‌کند اما از طرف دیگر هر چه مقدار سوخت تزریقی در مرحله اول کاهش و متقابلاً سوخت تزریقی در مرحله دوم افزایش یابد، دوده تولیدی زمان کافی برای اکسید شدن پیدا نکرده و در نتیجه مقدار

1- Dwell Time

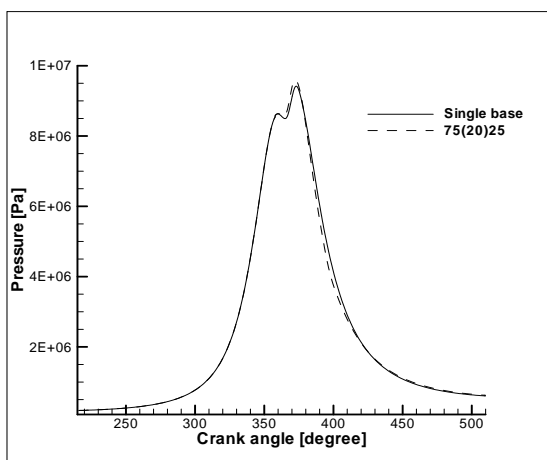


(ب)

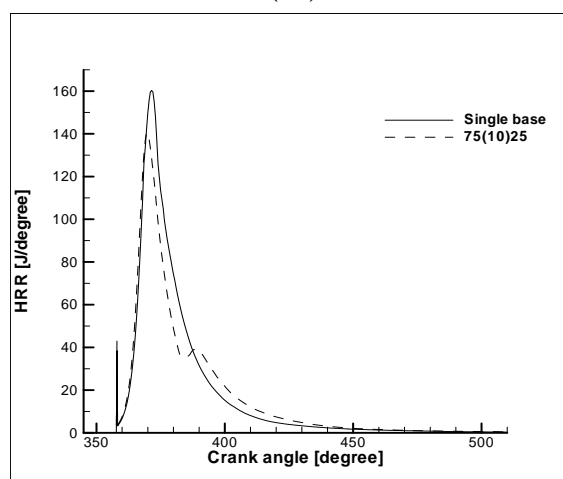


(الف)

شکل (۱۳): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۱۵) ۷۵ و حالت پایه.

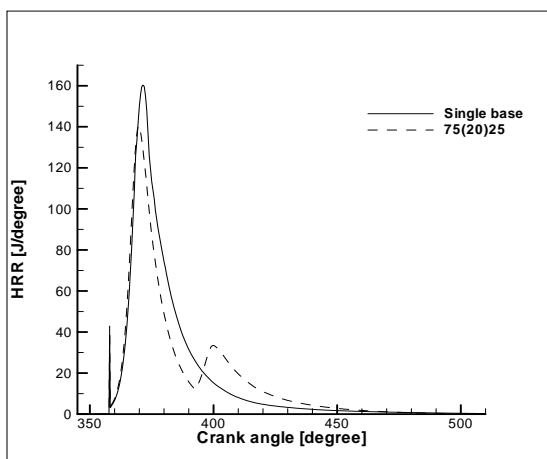


(الف)

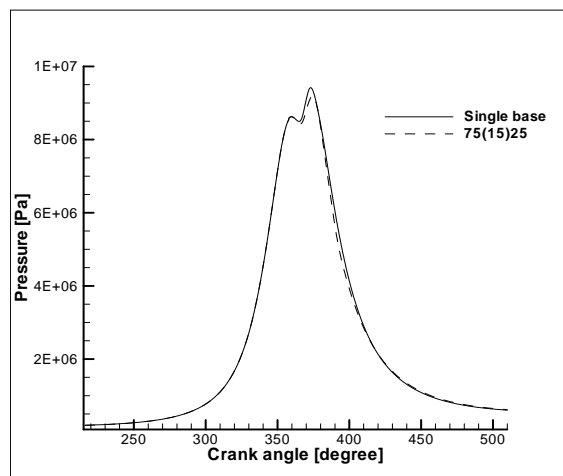


(ب)

شکل (۱۲): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۱۰) ۷۵ و حالت پایه.

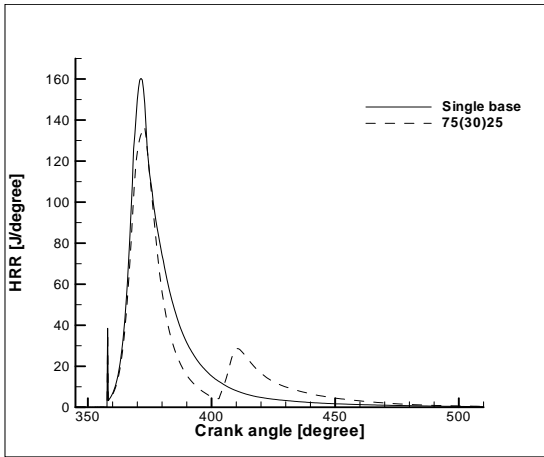


(ب)

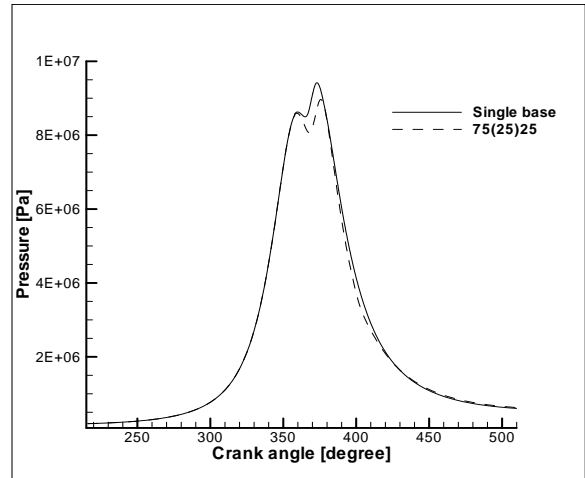


(الف)

شکل (۱۴): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۲۰) ۷۵ و حالت پایه.

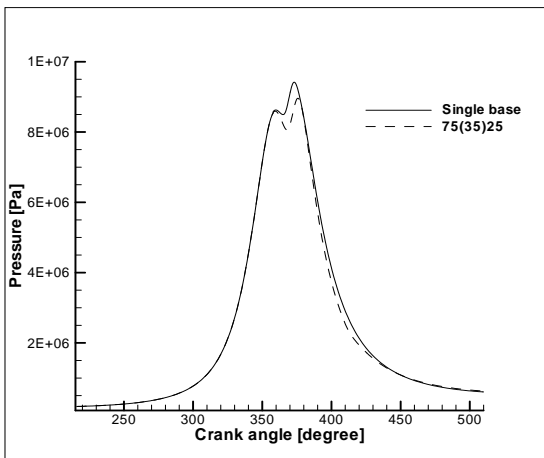


(ب)

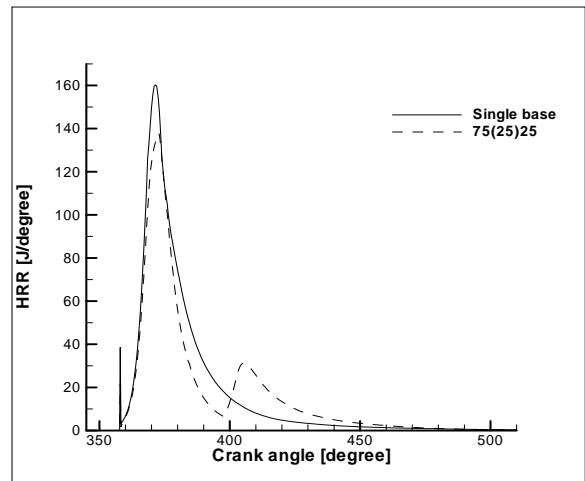


(الف)

شکل (۱۶): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۳۰) ۷۵ و حالت پایه.

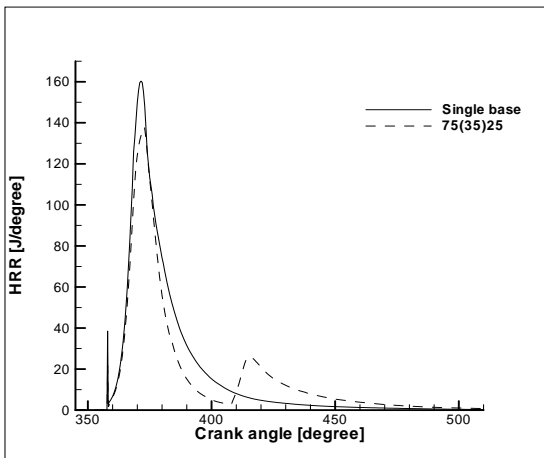


(الف)

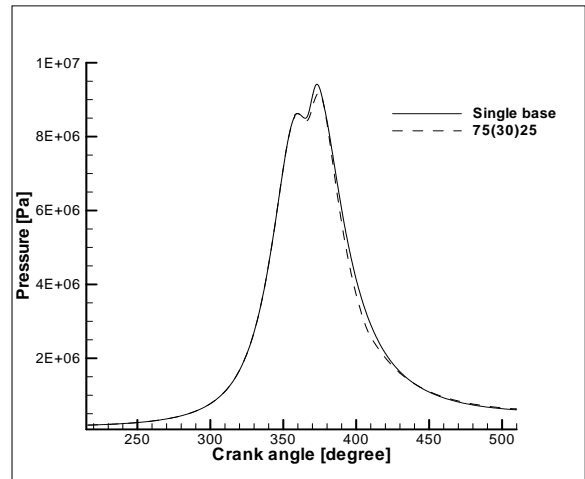


(ب)

شکل (۱۵) مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۲۵) ۷۵ و حالت پایه.



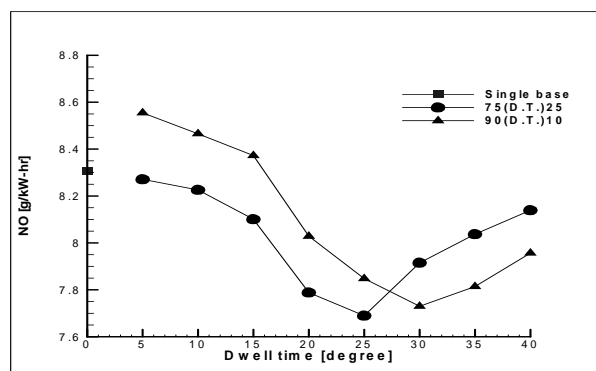
(ب)



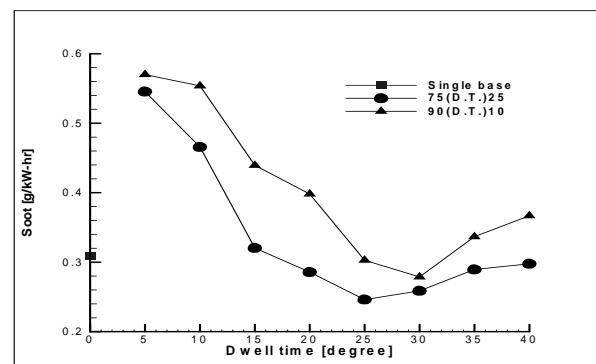
(الف)

شکل (۱۷): مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵ (۳۵) ۷۵ و حالت پایه.

احتراق با تغییر D.T. به مقدار جزئی تغییر می‌کند، از این رو در این مودها انحراف توان ترمزی موتور و مصرف سوخت ویژه ترمزی نیز از حالت پایه کمتر خواهد بود. همچنین، با توجه به منحنی‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله زمانی بین مراحل تزریق سوخت، پیک ثانویه در منحنی آزادسازی گرما ظاهر می‌شود این پیک ثانویه در منحنی‌های فوق به معنی وجود یک احتراق دیگر به دلیل وجود فشار و دمای نسبتاً بالای داخل سیلندر در لحظه دومین تزریق سوخت می‌باشد. منحنی تغییرات آلاینده‌های اکسید نیتروژن و دوده به ازای فاصله زمانی بین دو مرحله تزریق سوخت برای مودهای ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰ در شکل ۱۹ ارائه شده است. بمنظور ایجاد امکان مقایسه بهتر این نتایج، منحنی آلاینده‌های اکسید نیتروژن و دوده به ازای زاویه میل‌لنگ برای مودهای ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰ در شکل‌های ۲۰-۲۳ نشان داده شده‌اند.

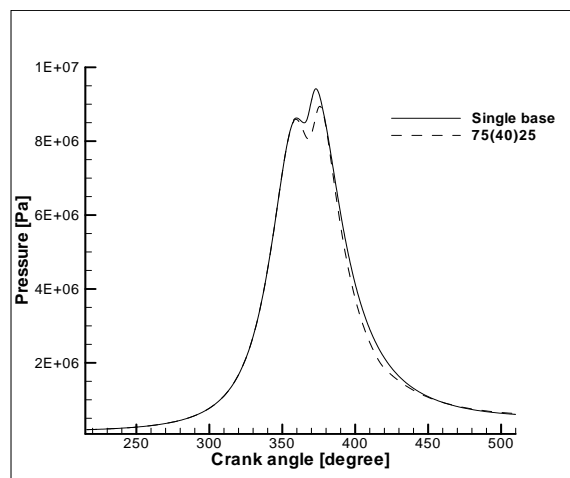


(الف)

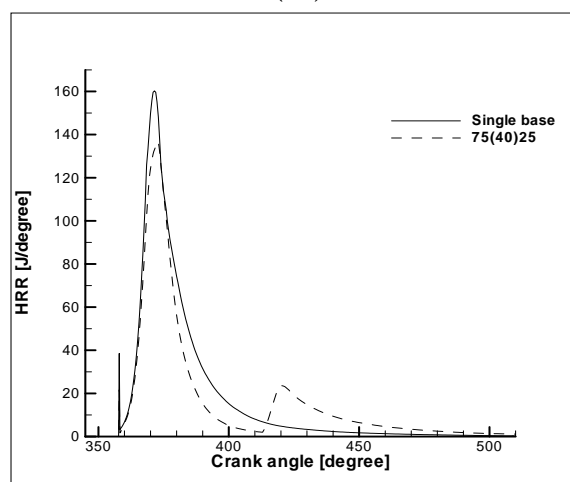


(ب)

**شکل (۱۹):** تغییرات آلاینده‌های اکسید نیتروژن (الف) و دوده (ب) بر حسب فاصله زمانی بین دو مرحله تزریق سوخت در مودهای تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰.



(الف)



(ب)

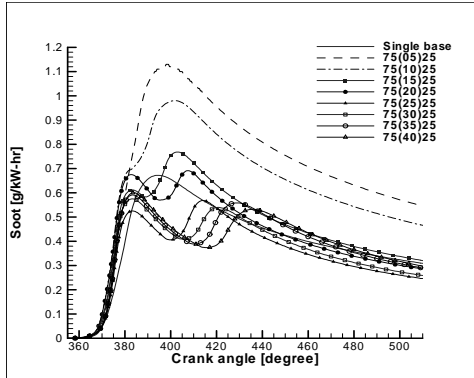
**شکل (۱۸)** مقایسه منحنی‌های تغییرات (الف) فشار داخل سیلندر و (ب) آزادسازی گرما برای مود ۲۵(۴۰)۷۵ و حالت پایه.

مرحله تزریق بوده و از ۱۰-۴۰ درجه میل‌لنگ متغیر است. برای جلوگیری از تکرار، از ارائه مجدد منحنی فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرمای مود تزریق ۲۵(۰۵)۷۵ خودداری می‌شود.

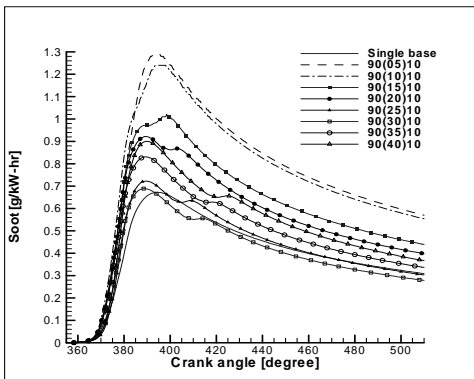
منحنی فشار داخل سیلندر و آهنگ آزادسازی گرما برای مودهای مختلف تزریق ۱۰(D.T.)۹۰ نیز دارای رفتاری مشابه می‌باشد لذا از ارائه آن‌ها خودداری شده است.

با توجه به منحنی‌های شکل‌های ۱۸-۱۲، ملاحظه می‌شود که در مودهای تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ (و همین‌طور ۱۰(D.T.)۹۰) افزایش فاصله زمانی بین دو تزریق تأثیر چندانی بر منحنی فشار نداشته و حداکثر فشار حاصل از

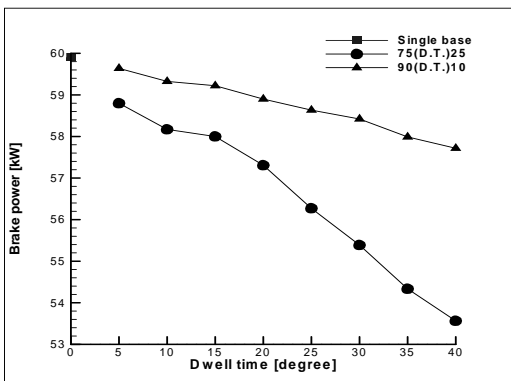
تغییرات توان ترمزی موتور و مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب فاصله زمانی بین دو مرحله تزریق سوخت در مودهای تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰ در شکل‌های ۲۴-۲۵ ارائه شده است.



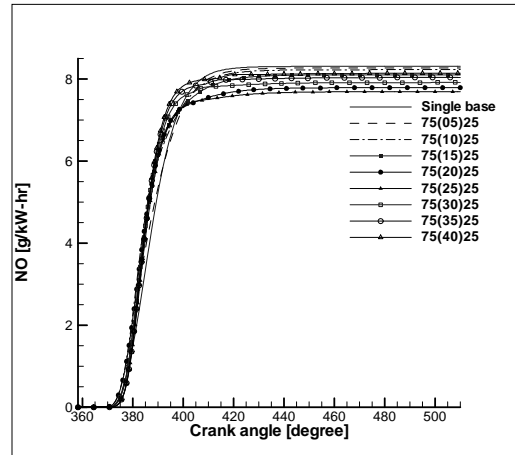
شکل (۲۲): مقایسه منحنی‌های آلاینده دوده در مودهای مختلف تزریق ۲۵(D.T.)۷۵.



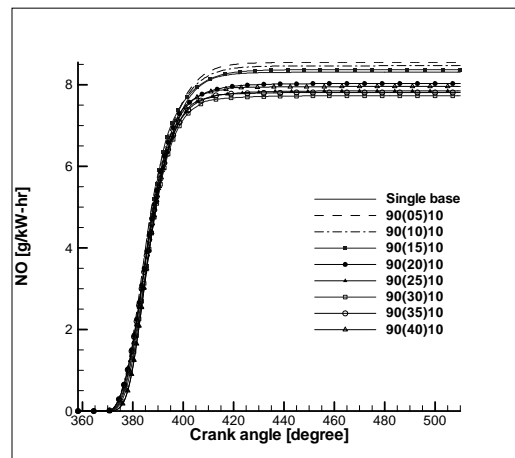
شکل (۲۳): مقایسه منحنی‌های آلاینده دوده در مودهای مختلف تزریق ۱۰(D.T.)۹۰.



شکل (۲۴): تغییرات توان ترمزی موتور در مودهای مختلف تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰.



شکل (۲۰): مقایسه منحنی‌های آلاینده اکسید نیتروژن در مودهای مختلف تزریق ۲۵(D.T.)۷۵.



شکل (۲۱): مقایسه منحنی‌های آلاینده اکسید نیتروژن در مودهای مختلف تزریق ۱۰(D.T.)۹۰.

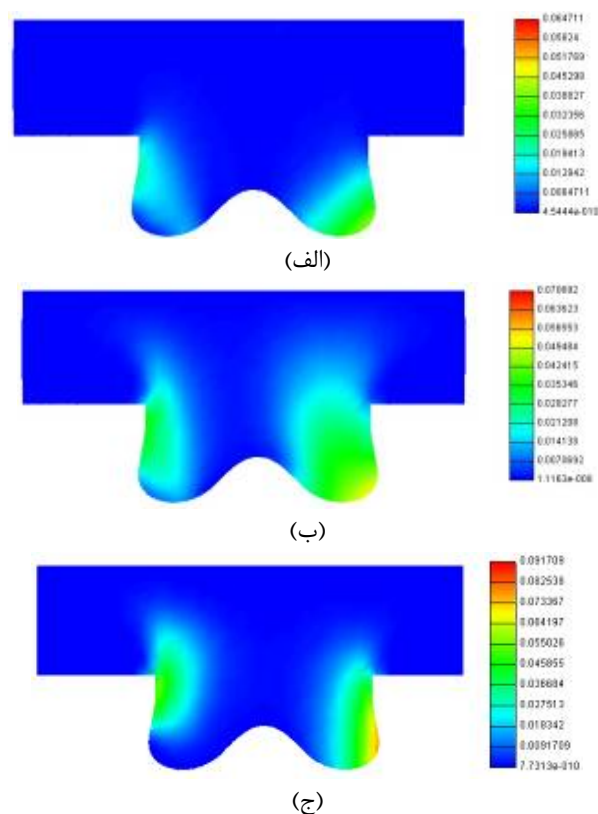
همانطور که در منحنی‌های شکل‌های ۲۰-۲۳ مشاهده می‌شود، در مود ۲۵(D.T.)۷۵ به ازای فاصله پاشش ۲۵ درجه میل‌لنگ و در مود ۱۰(D.T.)۹۰ به ازای فاصله پاشش ۳۰ درجه میل‌لنگ، میزان آلاینده‌ها در خروج از سیلندر کمترین مقدار را در مقایسه با بقیه مودها دارد.

در شکل ۱۹ بخوبی می‌توان دید که مقدار  $NO_x$  و دوده تولید شده به ازای فواصل پاشش ۲۵ و ۳۰ درجه میل‌لنگ، برتریب در مودهای تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰ بطور همزمان کاهش می‌یابد. البته این رفتار مصالحه‌ای مناسب بین تولید  $NO_x$  و دوده با تغییر فاصله بین دو تزریق از بین می‌رود.

می‌یابد و در نتیجه مصرف سوخت ویژه ترمزی افزایش می‌یابد. بنابراین، علیرغم نتایج قابل‌قبول تزریق دومرحله‌ای سوخت در کاهش همزمان آلاینده‌های اکسید نیتروژن و دوده، استفاده از این روش منجر به افزایش جزئی مصرف سوخت ویژه ترمزی در مقایسه با حالت پایه می‌گردد.

توزیع دمای داخل سیلندر برای پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در زاویه ۴۵ درجه میل‌لنگ بعد از TDC در شکل ۲۶ نشان داده شده است. با توجه به کانتورهای شکل ۲۶ مشاهده می‌شود که مناطق دما بالا در حالت تزریق دو مرحله‌ای کمتر از حالت پایه می‌باشد و همین امر باعث پائین بودن میزان تولید  $NO_x$  در این دو مود می‌باشد.

برای بسط مناسب‌تر این موضوع کانتورهای مربوط به توزیع کسر مولی سوخت داخل سیلندر در ۴۵ درجه میل‌لنگ بعد از TDC نیز در شکل ۲۷ ارائه می‌گردد.



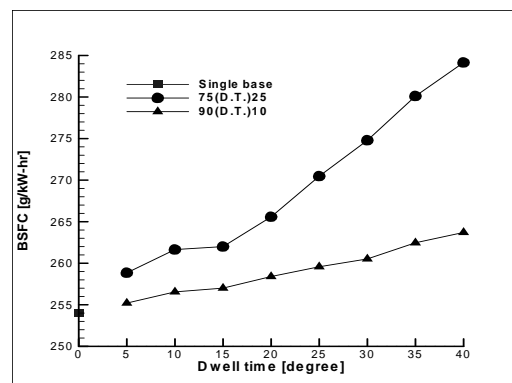
شکل (۲۷): توزیع کسر مولی سوخت داخل سیلندر برای

تزریق یک‌مرحله‌ای و دو‌مرحله‌ای بهینه در ATDC ۴۵.

(الف) پاشش دو مرحله‌ای ۲۵(۲۵)۷۵،

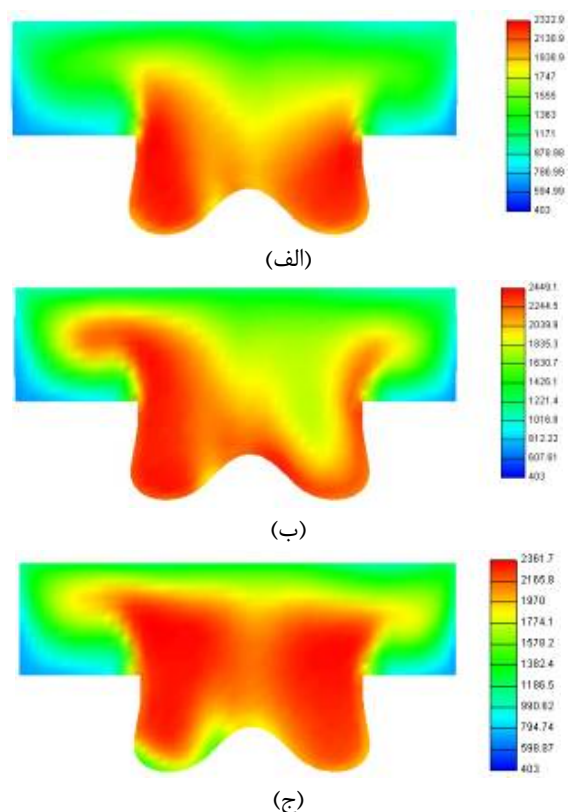
(ب) پاشش دو مرحله‌ای ۱۰(۳۰)۹۰،

(ج) پاشش یک مرحله‌ای.



شکل (۲۵): تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور در

مودهای مختلف تزریق ۲۵(D.T.)۷۵ و ۱۰(D.T.)۹۰.



شکل (۲۶): توزیع دمای داخل سیلندر برای تزریق

یک‌مرحله‌ای و دو‌مرحله‌ای بهینه در ATDC ۴۵.

(الف) پاشش دو مرحله‌ای ۲۵(۲۵)۷۵،

(ب) پاشش دو مرحله‌ای ۱۰(۳۰)۹۰،

(ج) پاشش یک مرحله‌ای.

با توجه به شکل‌های ۲۴-۲۵ ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله زمانی بین دو تزریق توان ترمزی موتور کاهش



(۴) بهترین مودهای تزریق در شرایط کاری موتور مورد مطالعه به منظور کاهش همزمان آلاینده‌های اکسید نیتروژن و دوده، مودهای ۷۵(۲۵)۲۵ و ۹۰(۳۰)۱۰ می‌باشد.

#### قدردانی

نویسندگان از مهندسین و مسئولین محترم شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز که با ارائه اطلاعات در انجام این تحقیق کمک شایانی نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

#### مراجع

۱. فرزانه، ن.، "سوخت رسانی در موتورهای دیزل"، انتشارات کارنو، ۱۳۸۴.
2. Tow, T.C., Piperpont, D.A., and Reitz, R.D., "Reducing Particulate and NO<sub>x</sub> Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty DI Diesel Engine", SAE Paper 940897, 1994.
3. Liu, Y., Tao, F., Foster, D., and Reitz, R.D., "Application of a Multiple-Step Phenomenological Soot Model to HSDI Diesel Multiple Injection Modeling", SAE Paper 2005-01-0924, 2005.
4. Nehemer, D.A. and Reitz, R.D., "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injection on Diesel Engine Soot and NO<sub>x</sub> Emissions", SAE Paper 940668, pp. 55-66, 1994.
5. Durnhalz, M., Endres, H., and Frisse, P., "Preinjection a Measure to Optimize the Emission Behavior of DI-Diesel Engine", SAE Paper 940674, pp. 123-129, 1994.
6. Jianwen, L., Jae, O.C., Lee, S.M., and Jeong, J.S. "Modeling the Effects of Split Injection Scheme on Soot and NO Emissions of Direct Injection Diesel Engines by a Phenomenological Combustion Model", SAE Paper 962062, pp. 169-174, 1996.
7. Patterson, M.A., Kong, S.C., Hampson, G.J., and Reitz, R.D., "Modeling the Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NO<sub>x</sub> Emissions", SAE Paper 940523, pp. 101-117, 1994.
8. Han, Zh., Uludogan, A., Hampson, G.J., and Reitz, R.D., "Mechanism of Soot and NO<sub>x</sub> Emission Reduction, Using Multiple-Injection in a Diesel Engine", SAE Paper 960633, pp. 87-102, 1996.
9. Bianchi, G.M., Pelloni, P. Corcione, F.E., and Luppino, F., "Numerical Analysis of Passenger Car HSDI Diesel Engines with the 2<sup>nd</sup> Generation of Common Rail Injection Systems: The Effect of Multiple Injections on Emissions", SAE Paper 2001-01-1068, 2001.

با توجه به کانتورهای شکل‌های ۲۶-۲۷ ملاحظه می‌شود که در تزریق دومرحله‌ای، سوخت تزریق شده در مرحله دوم وارد یک محیط دما بالای نسبتاً رقیق می‌شود؛ در نتیجه از انباشته شدن سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی جهت تولید دوده جلوگیری می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت که مودهای تزریق دومرحله‌ای ۷۵(۲۵)۲۵ و ۹۰(۳۰)۱۰ حالات بهینه برای شرایط عملکردی موتور مورد مطالعه می‌باشند، چرا که در این مودهای تزریق، دما، زمان و اکسیژن کافی برای احتراق کامل و اکسیداسیون دوده موجود بوده و به دلیل کاهش دمای متوسط داخل سیلندر، مقدار آلاینده NO<sub>x</sub> نیز کاهش می‌یابد. هر چند درصد کاهش آلاینده‌ها در مود ۷۵(۲۵)۲۵ بیشتر است ولی در این مود مصرف سوخت ویژه ترمزی در مقایسه با مود ۹۰(۳۰)۱۰ نیز بیشتر است. در نهایت، با در نظر گرفتن مطالب فوق باید بین کاهش بیشتر در میزان آلاینده‌ها و افزایش کمتر در مصرف سوخت ویژه ترمزی یکی انتخاب شود، که با معطوف کردن توجه خود به مسئله آلایندگی، مود ۷۵(۲۵)۲۵ به عنوان مود تزریق بهینه در این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج ارائه شده و بحث‌های انجام گرفته در این تحقیق را می‌توان بصورت زیر جمع‌بندی نمود:

(۱) تغییر مقدار سوخت تزریق شده در هر مرحله تاثیر قابل توجهی بر روی منحنی فشار و آزادسازی گرما می‌گذارد،  
 (۲) اگر بیشتر سوخت در مرحله دوم تزریق شود، افت فشار داخل سیلندر افزایش یافته و در نتیجه توان موتور افت می‌کند که منجر به افزایش مصرف سوخت ویژه می‌گردد. در نتیجه بهتر است درصد بیشتر سوخت در مرحله اول تزریق شود،

(۳) با توجه به کانتورهای ارائه شده در تزریق دومرحله‌ای، سوخت تزریق شده در مرحله دوم وارد یک محیط دما بالای نسبتاً رقیق می‌شود در نتیجه از انباشته شدن سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی جهت تولید دوده جلوگیری می‌شود و

10. Gill, k., Marriner, C., Sison, K., and Zhao, H., "In-Cylinder Studies of Multiple Diesel Fuel Injection in a Single Cylinder Optical Engine", SAE Paper 2005-01-0915, 2005.
11. Husberg, T., Denbratt, I., and Karlsson, A., "Analysis of Advanced Multiple Injection Strategies in a Heavy-Duty Diesel Engine, Using Optical Measurement and CFD-Simulations", SAE Paper 2008 -01-1328.
12. Baumgarten, C., "Mixture Formation in Internal Combustion Engines", Springer, Heidelberg, 2006.
13. The Help of CFD AVL FIRE Software, Parts: "Combustion" and "Spray".
14. Halstead, M.P., Kirsch, L.J., and Quinn, C.P., "The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperature and Pressure-Fitting of a Mathematical Model", Combustion and Flame, Vol. 30, pp. 45-60, 1977.
15. Noyle, J. and Strickland, R.F., "Oxidation of Carbon Between 1000-2000°C", Proceedings of The 5th Conf. on Carbon, Pergamon, New York, 1962.