

# بررسی تأثیر پاشش چند مرحله‌ای سوخت بر عملکرد و کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل پاشش مستقیم

فتح اله امی<sup>۱\*</sup>؛ کامران پورقاسمی<sup>۲</sup>؛ وحید اصفهانیان<sup>۳</sup>؛ علی میرمحمدی<sup>۴</sup>

## چکیده

هدف این مقاله بررسی چگونگی کاهش آلاینده‌های دوده و مونواکسیدنیترژن در پاشش چند مرحله‌ای سوخت به عنوان یک راهکار مؤثر در کنترل آلاینده‌گی موتورهای دیزل پاشش مستقیم (DI) است. ابتدا روند کاهش آلاینده‌ها با استفاده از پاشش دو مرحله‌ای سوخت مطالعه گردیده و پس از بررسی حالت‌های مختلف پاشش دو مرحله‌ای، بهینه‌ترین حالت پاشش سوخت برای یک موتور دیزل پاشش مستقیم ساخت داخل ارائه شده است. آزمون‌های لازم برای درستی عوامل عملکردی و آلاینده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند احتراق موتور در مرکز تحقیقات موتورسازان تبریز انجام شده است. مقدار سوخت در هر پالس پاشش و فاصله زمانی بین دو پالس عوامل اصلی مورد بررسی هستند. نتایج تحقیق نشان دادند که با استفاده از پاشش دو مرحله‌ای سوخت مقدار آلاینده دوده تا ۳۳٪ و اکسید نیترژن تا حدود ۱۱٪ کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** موتور دیزل پاشش مستقیم (DI)، پاشش دو مرحله‌ای سوخت، کیوا-۷۳، دوده و مونواکسید نیترژن.

## *Investigation on Effect of Multiple Injection on Performance and Emission Reduction in a DI Diesel Engine*

F. Ommi; K. Poorghasemi; V. Esfahanian; A. Mirmohammadi

### ABSTRACT

Aim of this paper is to investigate mechanism of NO and soot reduction by using multiple injection as useful strategy for reducing DI diesel engines emissions. In this paper, we first studied the mechanism of NO and soot reduction by using double injection. Then after investigating different modes of injection, at last we introduce optimum mode of fuel injection for a DI diesel engine manufactured in our country. Experiments were induced at Motorsazan Tabriz to validate results of CFD simulation. Amount of fuel in each pulse and dwell time between injection pulses are essential parameters. Results showed that by using double injection soot and NO will reduce by 33% and 11% respectively.

**KEYWORDS:** DI diesel engine, multiple injections, KIVA-3V, Soot, NO.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱۹

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۴/۱

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول و استادیار بخش مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران؛ F\_Omni@yahoo.com

<sup>۲</sup> مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر؛ Poorghasemi\_Kamran@hotmail.com

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران؛ evahid@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران؛ mirmohammadi.ali@gmail.com

مقدار کمی پیش پاشش سوخت در مرحله تراکم تزریق شود ارتقاء قابل توجهی بر روی عملکرد موتور مانند شروع سرد و صدای احتراق خواهد داشت [۷و۶].

هدف اصلی از به کار بردن راهکار پاشش چند مرحله‌ای بهبود احتراق نفوذی در مرحله انبساط، کاهش دمای داخل محفظه احتراق تا حد بهینه و ایجاد زمان کافی برای سوختن دوده است [۸و۹]. در این پژوهش با بررسی چگونگی کاهش آلاینده‌های موتور MT-4.244 با استفاده از شبیه‌سازی CFD و به کمک داده‌های تجربی، مشخصه‌های پاشش بهینه سوخت در روش چندمرحله‌ای برای این موتور تعیین شده‌است که می‌تواند راه مناسبی در صنعت تولید موتورهای دیزل در کشور باشد.

## ۲- مدل‌سازی فرآیند احتراق

برای بررسی عددی و شبیه‌سازی فرآیند احتراق موتور دیزل از برنامه دینامیک سیالات محاسباتی سه‌بعدی کیوا-۳۷ استفاده شده است. برنامه کیوا-۳۷ حل جریان‌های سه‌بعدی ناپایا، تراکم‌پذیر، متلاطم و واکنشی را به روش حجم محدود انجام می‌دهد که در شبیه‌سازی عملکرد موتورهای احتراق داخلی کاربرد فراوان دارد [۱۰]. مدل‌های اصلی به کار رفته در کد عبارت از مدل آشفستگی K-ε استاندارد برای جریان متلاطم داخل محفظه سیلندر، مدل احتراق ماگنوسن- هجرتاگر و آرینیوس، مدل زلدویچ توسعه‌یافته برای محاسبه مونوکسید نیتروژن و مدل هیروياسو برای محاسبه دوده است. همچنین برای حل میدان جریان و فشار داخل سیلندر از الگوی سیمپل استفاده شده است.

مدل شکست قطره مورد استفاده در این کد مدل قیاسی تیلور (TAB) است. این مدل بر پایه قیاس بین سیستم جرم و فنر با نوسانات اجباری و یک قطره نوسانی که با سرعت نسبی  $u_{rel}$  به محیط گازی نفوذ می‌کند بنا شده است. (شکل (۱)) همان‌طور که نیروی آیرودینامیکی قطرات را تغییر شکل داده و نوسان جرم را ایجاد می‌کند، نیروی  $F$  نوسان جرم  $m$  را آغاز می‌نماید. نیروی نخیره شده  $F_{spring} = k \cdot x$  با نیروی کشش سطحی مقایسه می‌شود که سعی می‌کند قطرات را کروی نگه داشته و تغییر شکل آنها را به حداقل رساند. نیروی میرا کننده  $F_{damping} = d \cdot \dot{x}$  با نیروی اصطکاک از لزجت دینامیکی داخل قطره مایع مقایسه می‌شود. معادله دیفرانسیل مرتبه دوم حرکت برای سیستم جرم و فنر میرا شده به صورت رابطه (۱) است:

$$\ddot{x} = \frac{F}{m} - \frac{k}{m}x - \frac{d}{m}\dot{x} \quad (1)$$

که  $x$  جابجایی جرم از حالت آزاد است.

فرآیند احتراق در موتورهای دیزل به شدت وابسته به مشخصه‌های پاشش سوخت و پدیده اتمی شدن جهت افزایش نرخ تبخیر و اختلاط سوخت و هوا است. عوامل فشار پاشش سوخت، زمان شروع، نرخ پاشش، هندسه نازل و شرایط محیط داخل سیلندر اثر زیادی بر نرخ اختلاط، احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی موتور دیزل پاشش مستقیم دارند [۱]. مطالعات در مورد تاثیر پاشش با فشار بالا و هندسه ورودی نازل انژکتور برای ایجاد افشانه سوخت با قطر متوسط کوچکتر، برای کاهش آلاینده‌های موتور راهکاری محدود است [۲]. بنابراین محققان همواره به دنبال راهی جدید برای کاهش بیشتر آلاینده‌ها در پاسخ به استانداردهای سختگیرانه آلاینده‌ها هستند. مشکل اصلی در موتورهای دیزلی کاهش هم‌زمان آلاینده‌های دوده و اکسیدهای نیتروژن است. زیرا این دو آلاینده در تقابل باهم بوده و کاهش هر یک افزایش دیگری را در پی دارد [۳].

راهکارهای مختلفی برای کاهش هر یک از این آلاینده‌ها ارائه شده است ولی بیشتر این راهها فقط قابلیت کاهش یکی از این دو آلاینده را داشته و سبب افزایش دیگری می‌شوند. یکی از راهکارهای جدید در کاهش هم‌زمان این آلاینده‌ها، پاشش چندمرحله‌ای سوخت در هر سیکل موتور است. سیستم‌های ابتکاری پاشش سوخت در دهه اخیر مانند سیستم "ریل مشترک" امکان اعمال پاشش چندمرحله‌ای سوخت را فراهم کرده است. واژه "چند مرحله‌ای" معانی مختلفی دارد که شامل پیش پاشش یا پایلوت، پاشش‌های مجزا و سایر شکل‌های پاشش است که در پالس‌های جداگانه پاشش صورت می‌گیرند. در پاشش پایلوت به نسبت مقدار کمی از سوخت چند درجه چرخش میل‌لنگ زودتر از پاشش اصلی به محفظه احتراق تزریق می‌شود. پاشش مجزا شامل دو مرحله پاشش سوخت است که با مقادیر مختلف سوخت و فاصله بین دو مرحله پاشش به نسبت زیاد، انجام می‌شود. سایر شکل‌های پاشش شامل پاشش دوبل، سه مرحله‌ای و چهار مرحله‌ای و غیره است. در این مقاله منظور از پاشش چندمرحله‌ای، سوخت پاشش دو مرحله‌ای (مجزا) سوخت با مقادیر مختلف سوخت در هر پالس است [۴].

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پاشش چندمرحله‌ای سوخت، اختلاط بهتری نسبت به پاشش یک مرحله‌ای ایجاد کرده و بدون کاهش توان موتور، سطح دوده را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد [۵و۴]. همچنین در پاشش چندمرحله‌ای وقتی

$$t_d = \frac{2 \rho_l r^2}{C_d \mu_l} \quad (10)$$

$$\omega^2 = C_k \frac{\sigma}{\rho_d r^3} - \frac{1}{t_d^2} \quad (11)$$

$$\dot{y}_0 = (dy/dt)_{t=0}, y_0 = y_{l=0} \quad (12)$$

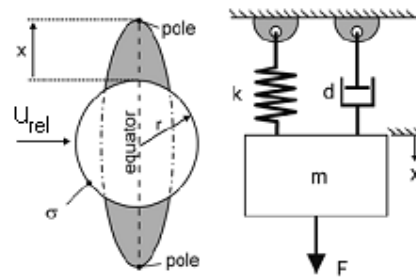
که  $We_g$  عدد وبر گاز،  $u_{rel}$  سرعت نسبی بین قطره و گاز احاطه‌کننده آن،  $r$  شعاع قطره و  $\sigma$  کشش سطحی مایع است.  $t_d$  زمان میرایی لزج،  $\mu_l$  گرانیروی ویسکوزیته مایع و  $\omega^2$  مجذور فرکانس نوسان است. برای هر ذره ابتدا باید  $We_g$  و  $\omega$  محاسبه شوند. عدد وبر بحرانی بدست آمده از داده‌های تجربی در اولین شکست قطره برابر با ۶ است و فرض می‌شود در صورتی که تغییر شکل در  $x \geq 0.5r$  بدست آمده و  $y \geq 1.0$ ،  $C_b = 0$  شود، شکست رخ می‌دهد. ثابت‌های مدل برابر با  $C_F = 1/3$ ،  $C_k = 8$  و  $C_d = 5$  هستند [۱۱].

### ۳- مشخصات موتور پایه

برای بررسی درستی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند احتراق با پاشش چندمرحله‌ای سوخت، از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی موتور دیزل پاشش مستقیم MT-4.244 ساخت شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز استفاده شده است. مشخصات موتور در جدول (۱) آمده است. آزمون‌های آزمایشگاهی با روش ۸- مد انجام شد. مشخصات برخی از تجهیزات بکار رفته در آزمون‌های موتور عبارتند از:

۱- سیستم اندازه‌گیر فشار داخل سیلندر مدل ایندیمتر ۶۲۱ شرکت ای وی ال اتریش برای اندازه‌گیری فشار داخل ریل سوخت، فشار داخل سیلندر و ارتفاع سوزن انژکتور استفاده شد. محدوده اندازه‌گیری این دستگاه ۰-۲۵۰ bar و دقت آن  $\pm 0.2$  bar است.

۲- سیستم اندازه‌گیر دود مدل ۴۱۵ شرکت ای وی ال اتریش برای اندازه‌گیری دوده خروجی از موتور و تحلیلگر گاز مدل دی کام ۴۰۰۰ شرکت ای وی ال اتریش برای بررسی مقدار گازهای خروجی استفاده شد. به این صورت که، دود با کدری ۰-۱۰۰٪ و دقت ۰.۱٪، جذب (k-value)  $0.9999 \text{ m}^{-1}$  و دقت  $0.01 \text{ Vol}$ ، گاز مونوکسیدکربن با محدوده اندازه‌گیری ۰-۱۰٪ و دقت ۰.۰۱٪ Vol، گاز دی‌اکسیدکربن با محدوده اندازه‌گیری حجم ۰-۲۰٪ و دقت حجم ۰.۱٪، HC با محدوده اندازه‌گیری حجم ppm ۰-۲۰,۰۰۰ و دقت ppm ۱، NOx با محدوده اندازه‌گیری vol ppm ۰-۵,۰۰۰ و دقت ppm ۱، O<sub>2</sub> با محدوده



شکل (۱): سری مدل شکست قطره TAB، [۱۱]

طبق قیاس، ضرایب رابطه فوق باید با روابطه (۲) تا (۴) جایگزین شوند:

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2} \quad (2)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3} \quad (3)$$

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g u_{rel}^2}{\rho_l r} \quad (4)$$

طبق شکل (۱) جابجایی خط استوایی قطر از محل تعادلی و  $C$  ثابت‌های مدل و  $r$  شعاع قطره کروی است. کمیت  $y_p$  با تغییر و جابجایی سطح قطره نسبت به حالت تعادلش و عکس شعاع قطره متناسب است. با استفاده از جابجایی بدون بعد  $y = x/C_b r$  معادله حرکت به صورت رابطه (۵) تبدیل می‌شود:

$$\ddot{y} = \frac{C_F \rho_g u_{rel}^2}{C_b \rho_l r^2} - C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3} y - C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y} \quad (5)$$

با فرض سرعت نسبی  $u_{rel}$  ثابت که در فرآیندهای حل عددی در فاصله زمانی معین صادق است، معادله حرکت می‌تواند به طور تحلیلی حل شود که جواب آن به صورت رابطه (۶) است:

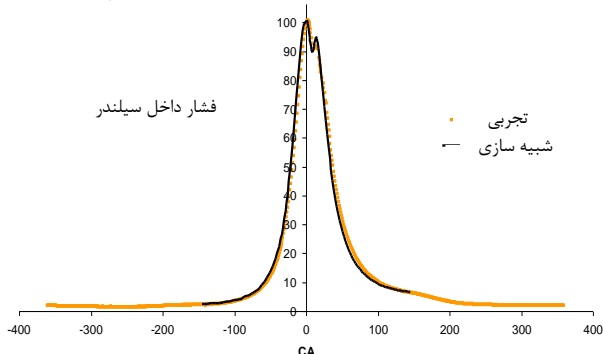
$$y(t) = \frac{C_F}{C_k C_b} We_g + \exp\left(-t/t_d\right) \left[ A \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} B \sin \omega t \right] \quad (6)$$

$$A = \left( y_0 - \frac{C_F}{C_k C_b} We_g \right), \quad (7)$$

$$B = \left( \dot{y} t_d + y_0 - \frac{C_F}{C_k C_b} We_g \right) \quad (8)$$

$$We_g = \frac{\rho u_{rel}^2 r}{\sigma} \quad (9)$$

بدست آمده از نتایج عددی و تجربی برابری خوبی با هم دارند.



شکل (۳): مقایسه تغییرات فشار داخل سیلندر بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه سازی

برای بررسی دقت مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌گویی آلاینده‌ها مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در جدول (۲) مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی از بعضی عوامل مؤثر مانند اصطکاک و اثرات آن چشم‌پوشی شده است، دیده می‌شود که بیشینه فشار داخل سیلندر کمی بیشتر از مقدار تجربی پیش‌بینی شده است. هم‌چنین با توجه به ساده‌سازی مدل آلاینده‌ها و صرف‌نظر از مدل‌های پیچیده و زنجیری واکنش‌های سینتیکی احتراق در برنامه کیوا-۳، مقدار شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است.

جدول (۲): مقدار آلاینده‌های موتور دیزل در حالت پایه

مقدار شبیه‌سازی (gr/kW.h)	مقدار تجربی (gr/kW.h)	آلاینده
۷/۶۸	۶/۸۴	مونواکسید نیتروژن
۱/۰۲	۰/۸۷	دوده

## ۵- تحلیل نتایج

مهم‌ترین عوامل در پاشش چندمرحله‌ای عبارتند از: تعداد مراحل پاشش سوخت، زمان پاشش سوخت، مقدار سوخت در هر مرحله از پاشش و فاصله زمانی بین پاشش‌ها. با انتخاب بهینه عوامل فوق می‌توان به یک برابری در کاهش هم‌زمان آلاینده‌های دوده و اکسید نیتروژن موتور دیزل دست یافت. برای آسانی در بیان مقدار پاشش سوخت در هر مرحله، فاصله بین دو پالس پاشش قرارداد (شروع پاشش) - % سوخت در مرحله دوم (فاصله بین دو پاشش) % سوخت در مرحله اول) در نظر گرفته شده است. برای مثال ۲-۱۰(۸)۹۰ به این معنی است که شروع پاشش سوخت از ۲ درجه پس از نقطه مرگ بالا با ۹۰ درصد سوخت در پالس اول پاشش انجام شده و پس از ۸ درجه چرخش میل‌لنگ فاصله از اتمام پالس اول ۱۰ درصد سوخت باقی‌مانده نیز پاشش می‌شود. در ادامه حالت‌های

اندازه‌گیری ۰-۲۵،۰۰۰ ppm vol و دقت ۰،۰۰۱ ppm،  $\lambda$  با محدوده اندازه‌گیری ۰-۹۹۹۹ و دقت ۰،۰۰۱ است.

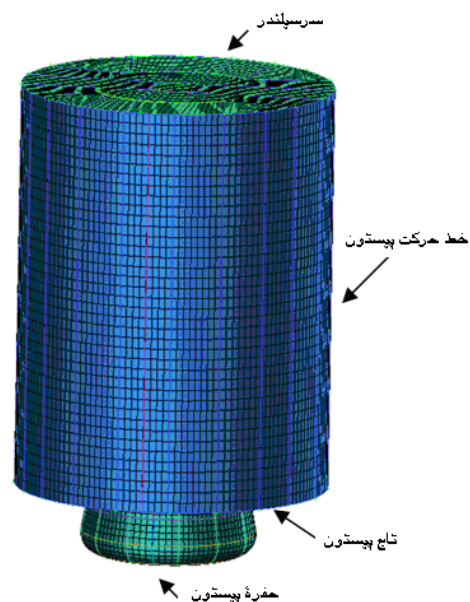
در مورد هر مشخصه دیگری از موتور که در برنامه نیاز بود مقدار مربوط به موتور فوق تهیه شده و به عنوان داده‌های ورودی در برنامه وارد شده است.

جدول (۱): مشخصات و شرایط اولیه موتور

مدل موتور	MT_4.244
قطر پیستون	۱۰۰ mm
کورس پیستون	۱۲۷ mm
نسبت تراکم	۱۷/۵:۱
زمان تزریق سوخت	۲ ATDC
تعداد نازل‌های انژکتور	۵ عدد
فشار پاشش سوخت	۲۵۰ bar
سرعت موتور	۲۰۰۰ rpm
شکل پیستون	نوع (D)

## ۴- درستی نتایج شبیه‌سازی

شبکه‌بندی محفظه احتراق موتور به دلیل نداشتن تقارن محوری به صورت ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. شکل (۲) شبکه‌بندی محفظه داخل سیلندر را نشان می‌دهد. تعداد تقسیمات شبکه در برای شعاعی برابر با ۲۰ است و ۲ ردیف شبکه لایه‌مرزی و ۶ سلول در نقطه مرگ بالا برای ناحیه فشردگی در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): شبکه بندی محفظه احتراق

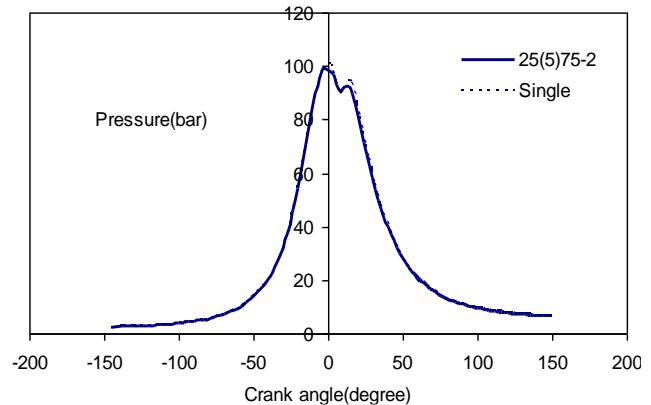
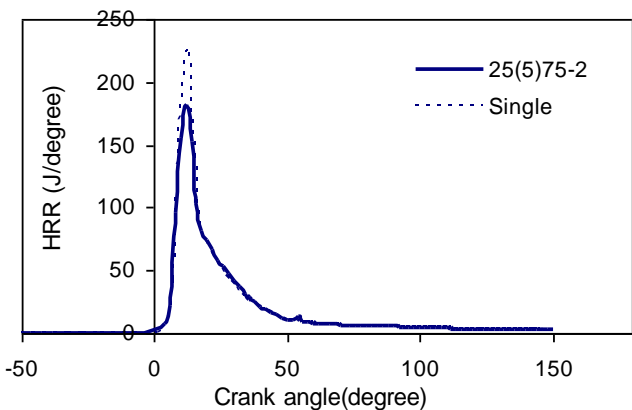
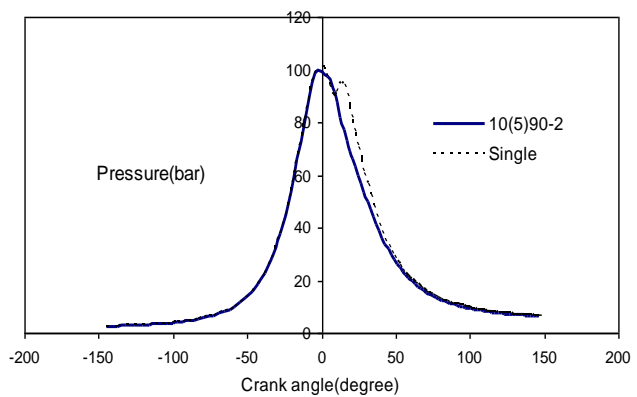
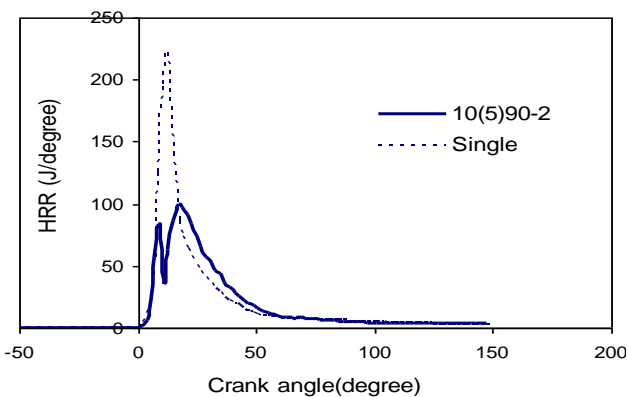
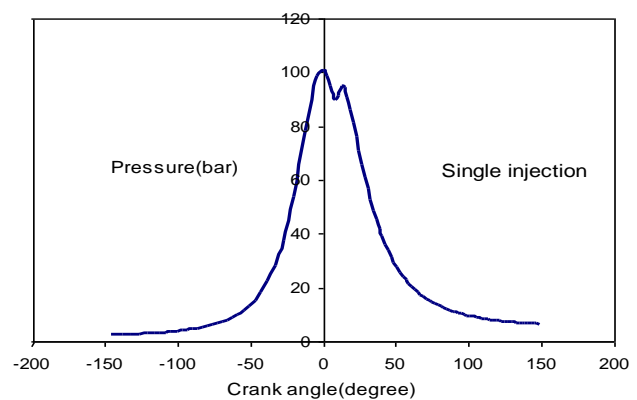
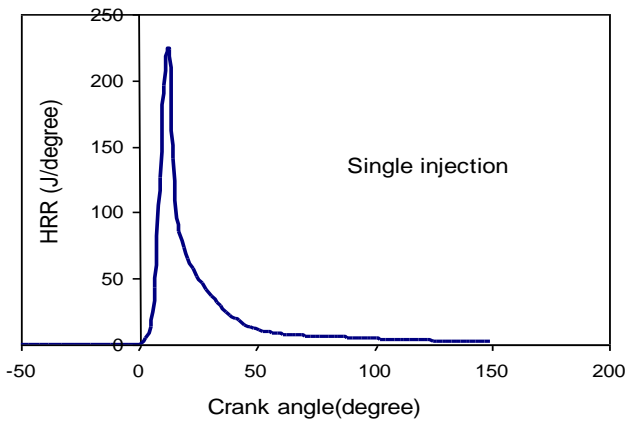
شکل (۳) منحنی تغییر فشار داخل سیلندر بدست آمده از شبیه‌سازی موتور را در مقایسه با منحنی فشار بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که منحنی فشار

فشار داخل سیلندر در برخی از حالت‌های پاشش، حالت بهینه وقتی است که مقدار بیشتری از سوخت در مرحله اول تزریق شود تا توان موتور کاهش نیابد.

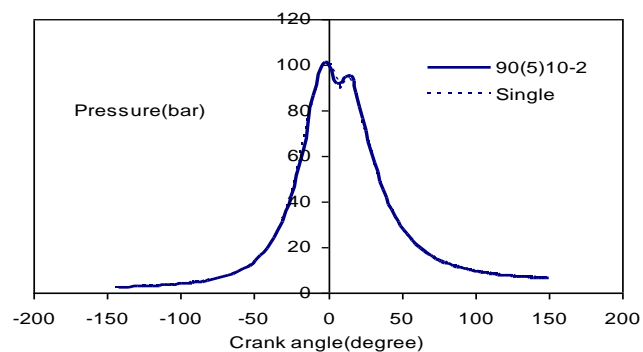
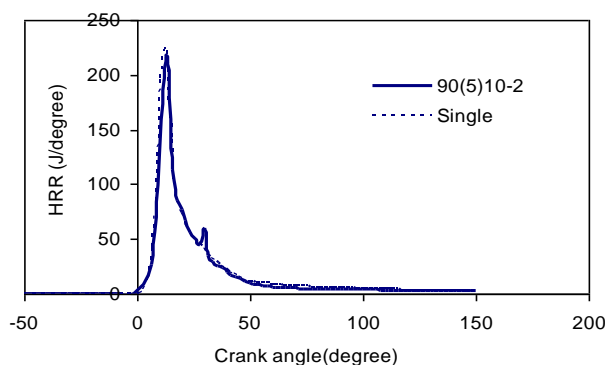
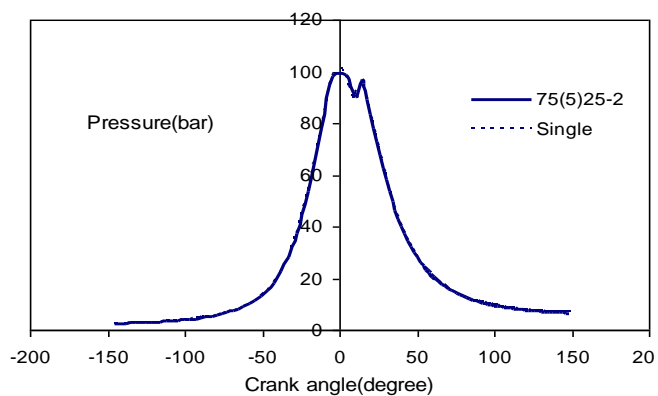
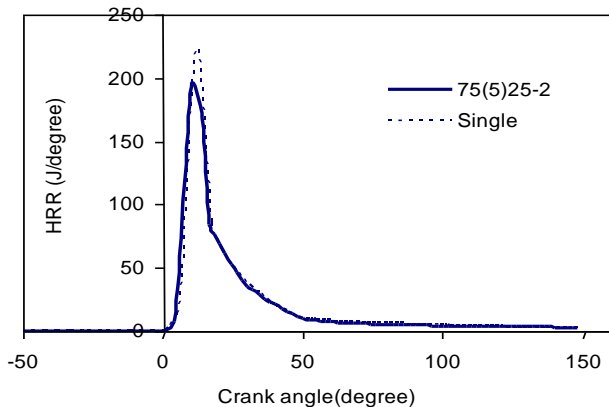
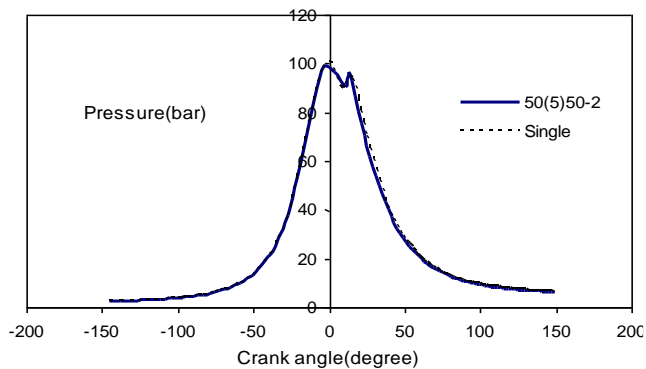
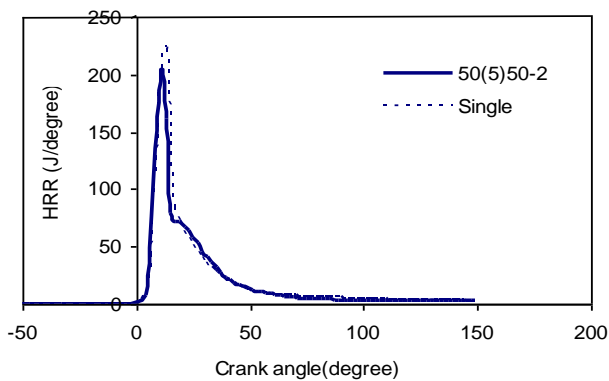
جدول (۳) مقدار تولید آلاینده‌های دوده و مونو اکسید نیتروژن را برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت نشان می‌دهد. دیده می‌شود که هر چه مقدار سوخت در پاشش ثانویه بیشتر باشد مقدار مونو اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش بیشینه نرخ آزادسازی حرارت و احتراق پیش‌آمیخته و در نتیجه کاهش دمای سیلندر است.

مختلف تزریق دومرحله‌ای در نظر گرفته شده است که شامل حالت‌های (پیش پاشش + پاشش اصلی) و (پاشش اصلی + پس پاشش) با مقادیر مختلف سوخت در هر مرحله و فاصله‌های زمانی مختلف توقف پاشش است.

شکل (۴) منحنی فشار داخل سیلندر و نرخ آزاد شدن حرارت را در شش حالت پاشش سوخت نشان می‌دهد. دیده می‌شود که برای حالت‌هایی از پاشش سوخت که مقدار بیشتر سوخت در پالس دوم پاشش می‌شود بیشینه نرخ آزادسازی حرارت کاهش می‌یابد که علت آن کاهش احتراق پیش‌آمیخته است و رفتار احتراق مانند حالت تأخیر است. با توجه به افت



شکل (۴): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر و آزادسازی حرارت بر حسب زاویه میل‌لنگ برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت



ادامه شکل (۴): منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر و آزادسازی حرارت بر حسب زاویه میل‌لنگ برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت

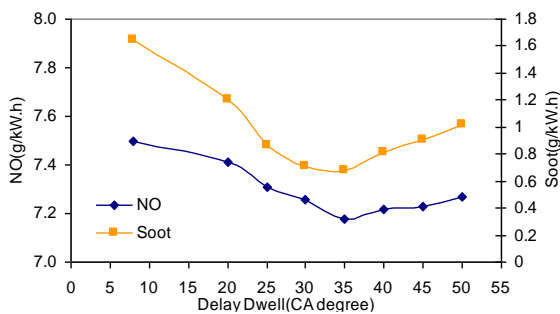
می‌یابد. در یافتن حالت بهینه‌ای که هم‌زمان بیشینه نرخ آزادسازی حرارت کم باشد تا مونو اکسید نیتروژن کاهش یابد و همچنین دمای احتراق بدست آمده از پالس اول پاشش و زمان اکسید شدن (فاصله بین دو پاشش) کافی باشد تا از تولید دوده در پیشانی اسپری پاشش ثانویه جلوگیری شود، حالت‌های ۲-۲۵(۵)۷۵ و ۲-۱۰(۵)۹۰ برای بررسی بیشتر انتخاب شده‌اند.

شکل (۵) مقدار آلاینده‌های مونو اکسید نیتروژن و دوده را برای حالت ۲-۲۵(۵)۷۵ بر حسب فاصله زمانی مختلف بین دو پالس پاشش نشان می‌دهد. دیده می‌شود که برای حالت پاشش ۲-۲۵(۳۵)۷۵، دو آلاینده کمترین مقدار خود را دارند. نتایج نشان می‌دهند که در این فاصله زمانی بین دو

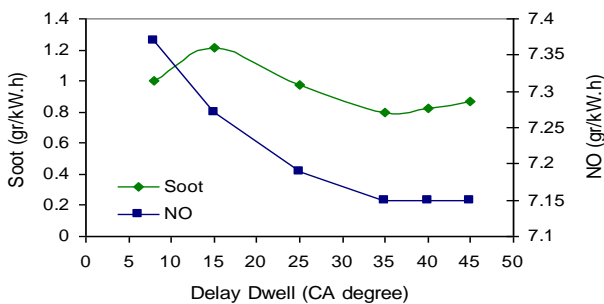
جدول (۳): آلاینده‌های تولید شده در حالت‌های مختلف پاشش سوخت

دوده (g / kW. h)	مونواکسید نیتروژن (g / kW. h)	حالت‌های پاشش
۱/۰۲	۷/۶۸	حالت پایه
۲/۵۱	۳/۵۸	۱۰ (۵) ۹۰-۲
۲/۷۶	۶/۵۰	۲۵ (۵) ۷۵-۲
۲/۵۹	۶/۸	۵۰ (۵) ۵۰-۲
۱/۲۶	۷/۳۲	۷۵ (۵) ۲۵-۲
۱/۱۲	۷/۵۶	۹۰ (۵) ۱۰-۲

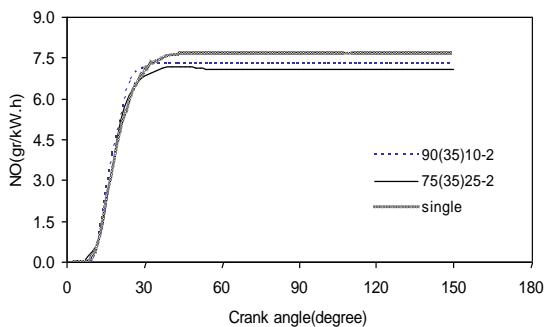
همچنین نتایج نشان می‌دهند که هرچه مقدار سوخت در پالس دوم پاشش بیشتر شود دوده تولیدی زمان کافی برای اکسید شدن را پیدا نمی‌کند بنابراین مقدار نهایی آن افزایش



شکل (۵): تغییرات مقدار آلاینده‌های NO و دوده برحسب فاصله زمانی بین دو پالس پاشش سوخت برای حالت ۲۵٪-۷۵٪



شکل (۶): تغییرات مقدار آلاینده‌های NO و دوده برحسب فاصله زمانی بین دو پالس پاشش سوخت برای حالت ۹۰٪-۱۰٪



شکل (۷): منحنی تشکیل آلاینده‌های دوده و مونو اکسید نیتروژن برای حالت پاشش تک مرحله‌ای و دو حالت پاشش بهینه

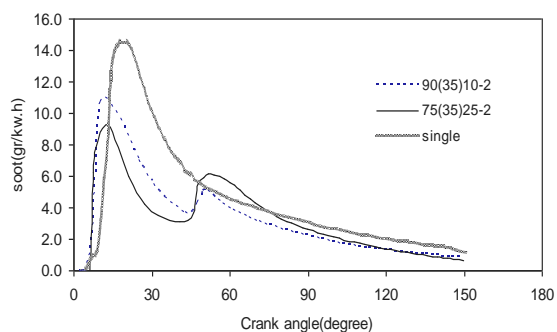
همزمان پاشش دو نازل ممکن نیست. بنابراین عدم تقارن احتراق به این دلیل است. همان‌طور که دیده می‌شود در شرایط ۱۹ATDC در مناطق با دمای بیشینه، حالت پاشش دو مرحله‌ای به مراتب کمتر از حالت پایه است که همین علت کمتر شدن تولید مونو اکسید نیتروژن است. همچنین به دلیل کمتر بودن جرم سوخت پاشیده شده در پالس اول پاشش دو مرحله‌ای مقدار سوخت کمتری نسبت به حالت پاشش یک مرحله‌ای باقی می‌ماند که در نتیجه بنابراین مقدار دوده کاهش می‌یابد. در ۴۵ و ۵۳ درجه چرخش میل‌لنگ پس از نقطه مرگ بالا دیده می‌شود که در احتراق با پاشش یک مرحله‌ای، سوخت تزریق شده با مقدار حرکت زیاد به منطقه غنی از سوخت و دمای به نسبت

پاشش هر دو آلاینده مونو اکسید نیتروژن و دوده کمینه هستند زیرا از طرفی با کاهش سهم احتراق پیش‌آمیخته تولید مونو اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد و از طرف دیگر در این فاصله زمانی دمای محفظه برای سوختن دوده تولیدی بدست آمده از پالس اول پاشش مناسب است. در فاصله زمانی بیشتر از ۳۵ درجه چرخش میل‌لنگ NO افزایش می‌یابد. زیرا با قطع پاشش سوخت در فاصله زمانی زیاد، عمل خنک‌کنندگی سوخت در محفظه حذف شده و دمای محفظه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر سوخت پاشیده شده در مرحله دوم فرصت کافی برای اکسید شدن کامل نداشته و دوده نیز افزایش می‌یابد. درصد کاهش آلاینده‌ها برای دو حالت بهینه پاشش در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): میزان کاهش آلاینده‌ها برای دو حالت بهینه پاشش

حالت‌های پاشش	مونو اکسید نیتروژن (%)	دوده (%)
۲-۲۵ (۳۵) ۷۵	۱۰/۸۷	۲۳/۸۵
۲-۱۰ (۳۵) ۹۰	۷/۶۸	۲۱/۵۶

در شکل (۶) نتایج فوق برای حالت پاشش ۲-۱۰ (۳۵) ۹۰ نیز ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در این حالت پاشش بهینه‌ترین پاشش ۲-۱۰ (۳۵) ۹۰ است.

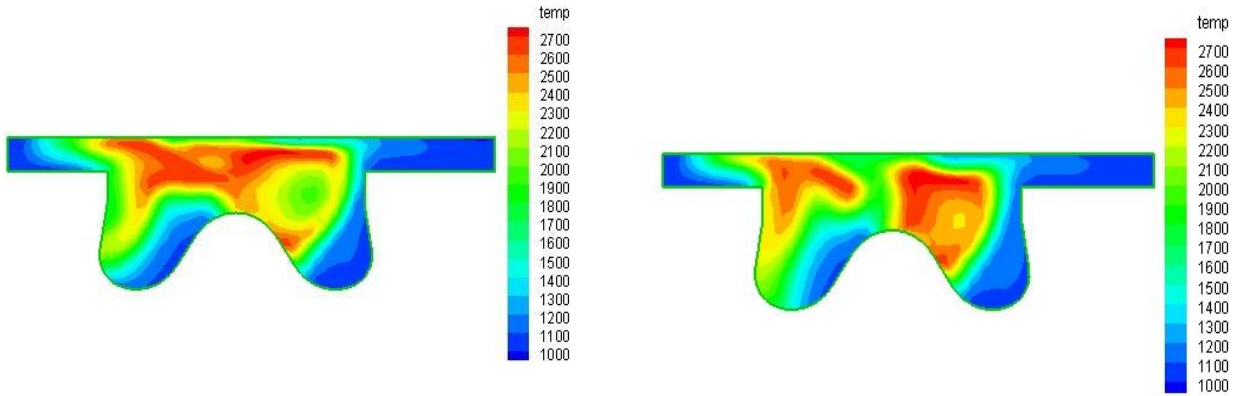


شکل (۷) مقایسه بین تشکیل آلاینده‌های مونو اکسید نیتروژن و دوده را برای دو حالت پاشش بهینه ارائه داده است. دیده می‌شود که در همه نتایج، حالت پاشش ۲-۲۵ (۳۵) ۷۵ نتایج بهتری دارد. درصد کاهش آلاینده‌ها برای هر دو حالت بهینه پاشش در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به داده‌ها دیده می‌شود که از بین حالت‌های بهینه پاشش موردنظر حالت پاشش ۲-۲۵ (۳۵) ۷۵ دارای مشخصه‌های بهتری است.

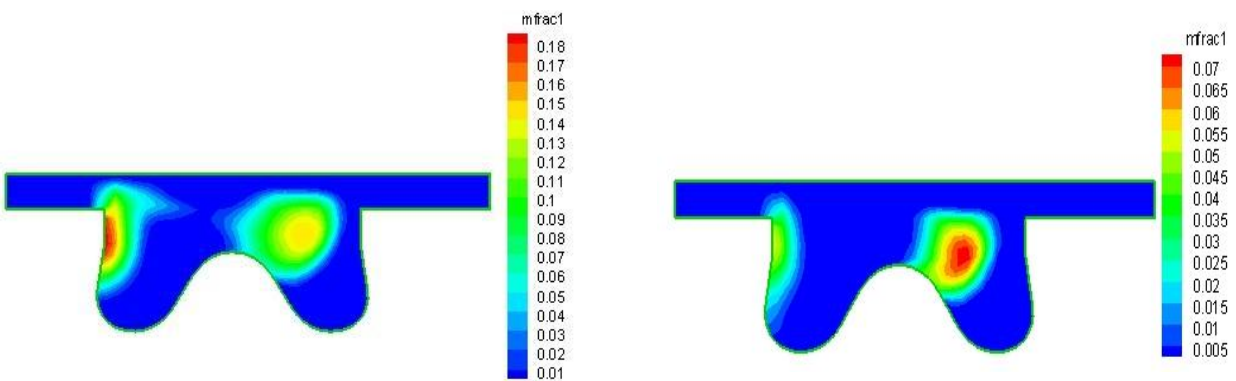
شکل ۸ توزیع دما و کسر مولی سوخت داخل سیلندر را برای دو پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در ۴۵ و ۵۳ درجه چرخش میل‌لنگ بعد از نقطه مرگ بالا نشان می‌دهد. با توجه به تعداد نازل‌ها و عدم تقارن، نشان دادن

پالس اول پاشش سوخت باقی مانده است، در نتیجه از تشکیل و انباشتگی سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی و تولید دوده جلوگیری می‌شود.

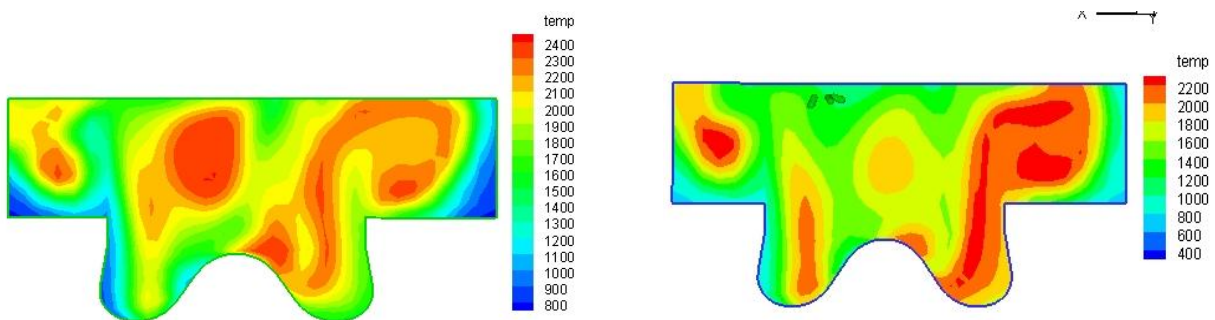
پایین در نوک جت نفوذ کرده و به طور پیوسته وارد منطقه غنی از سوخت شده و تولید دوده می‌نماید. ولی در پاشش دو مرحله‌ای، سوخت پاششی در مرحله دوم وارد یک منطقه دما بالا و رقیق از سوخت می‌شود که از احتراق بدست آمده از



توزیع دما در داخل سیلندر در ۱۹ ATDC



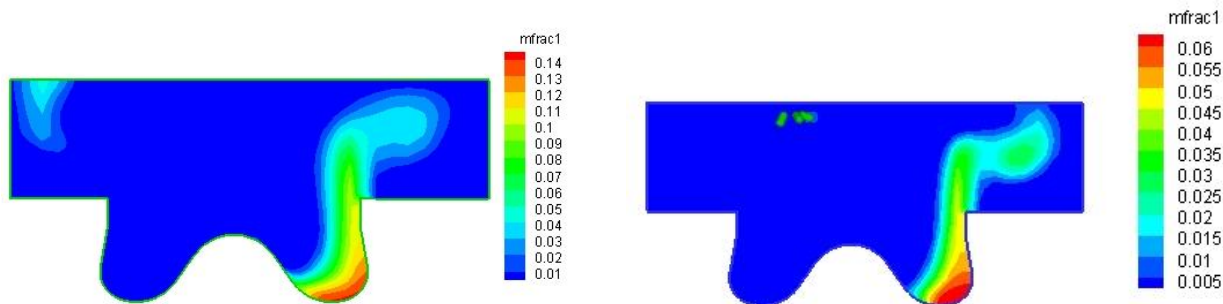
توزیع کسر مولی سوخت ۱۹ ATDC



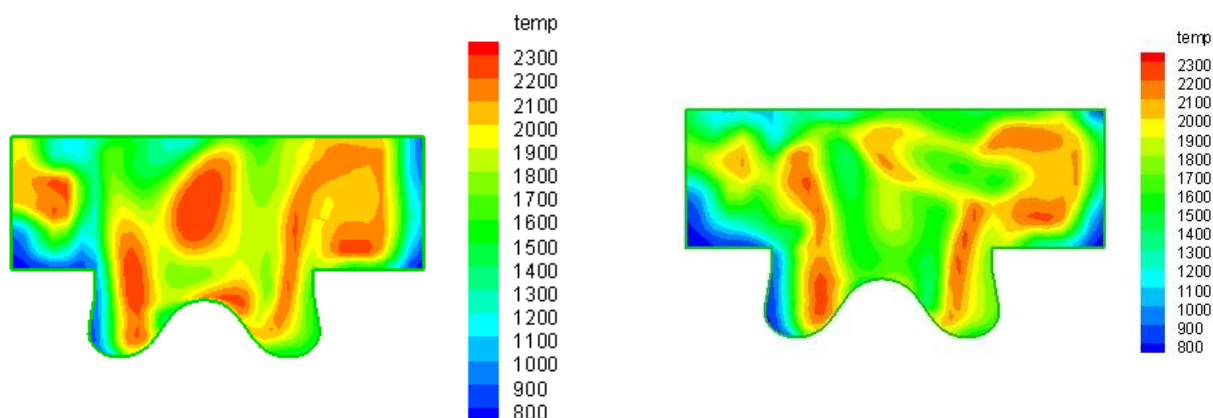
توزیع دمای داخل سیلندر در ۴۵ ATDC

شکل (۸): توزیع دما، کسر مولی سوخت داخل سیلندر برای دو پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در زاویه های ۱۹، ۴۵ و ۵۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا (سمت چپ پاشش یک مرحله‌ای و سمت راست پاشش دو مرحله‌ای ۲۵ (۳۵) (۷۵)

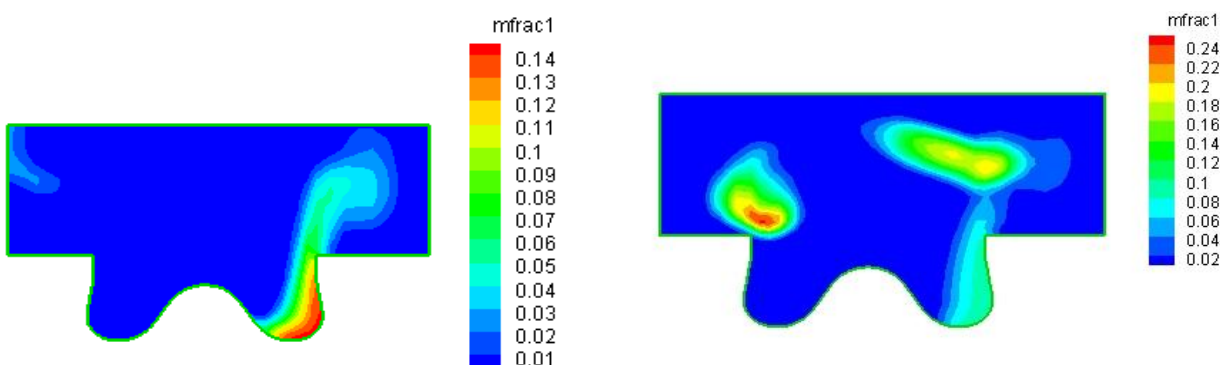




توزیع سوخت در 45 ATDC



توزیع دمای داخل سیلندر در 53 ATDC



توزیع سوخت در 53 ATDC

ادامه شکل (۸): توزیع دما، کسر مولی سوخت داخل سیلندر برای دو پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در زاویه های ۱۹، ۴۵ و ۵۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا (سمت چپ پاشش یک مرحله‌ای و سمت راست پاشش دو مرحله‌ای ۲۵ (۳۵) ۷۵)

## ۶- نتیجه گیری

دست آمده عبارتند از:  
 ۱- در پاشش دو مرحله‌ای به دلیل افت بیشینه نرخ آزادسازی حرارت و تاخیر در پاشش دوم مقدار آلاینده مونواکسید نیتروژن کاهش می‌یابد.

در مقاله حاضر با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی به کمک کد کیوا-۳ و بررسی درستی آن با نتایج تجربی بدست آمده از آزمون حالت پایه موتور، راهکار پاشش دو مرحله‌ای سوخت برای کاهش همزمان آلاینده‌های مونواکسید نیتروژن و دوده در موتورهای دیزل پاشش مستقیم ارائه گردید. نتایج به

منطقه دما بالا و رقیق از سوخت می شود در نتیجه از انباشتگی سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی از سوخت جلوگیری می شود. در نتیجه مقدار دوده تولیدی کاهش چشمگیری پیدا می کند.

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت بهینه سازی مصرف سوخت به دلیل حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی می نمایند. همچنین از مرکز تحقیقات شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز به خاطر انجام آزمون های تجربی موتور و همکاری آن ها قدردانی می شود.

۲- فاصله بین دو پاشش سوخت باید به حد کافی کوتاه باشد تا دمای مورد نیاز برای اکسید شدن دوده ی پالس اول تامین شود. همچنین فاصله زمانی بین دو پاشش باید به حد کافی زیاد باشد تا مقدار زیادی از دوده قبل از آغاز پاشش ثانویه اکسید شود. بنابراین لازم است که یک حالت بهینه انتخاب شود.

۳- نتایج بررسی ها نشان می دهد حالت بهینه پاشش چندمرحله ای برای موتور MT-4.244، حالت ۲-۲۵(۳۵)۷۵ است و با این روش مونواکسید نیتروژن ۱۱٪ و دوده ۳۳٪ کاهش می یابد.

۴- با توجه به نتایج به دست آمده، در پاشش دو مرحله ای سوخت پاششی در پالس دوم پاشش وارد یک

## ۸- مراجع

- [۷] Ghafarpour, M. R., Noorpoor, A. R., "A Numerical study of Pilot or Split Rate Injection to Reduce Diesel engine Noise", Proc.IMEchE, Vol. 221, pp. 457-464, 2007.
- [۸] Liu, Y.; "Diesel Engine Modeling and Optimization for Emission Reduction", PhDs Thesis, University of Wisconsin- Madison, 2005.
- [۹] Mendez, S. and Thirouard, B.; "Using Multiple Injection Strategies in Diesel Combustion: Potential to Improve Emissions, Noise and Fuel Economy Trade-Off in Low CR Engines", SAE Technical Paper 2008-8-01- 1329, 2008.
- [۱۰] Amsden A.A; KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with sprays, Los Alamos National Laboratory report, LA-11560-MS, 1989.
- [۱۱] O'Rourke P. J., Amsden, A.; "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup", SAE Paper 872089, 1987.
- [۱] Heywood, J. B.; Internal Combustion Engine Fundamentals, 2<sup>nd</sup> edition McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.
- [۲] Pierpont, D. A. and Reitz, R. D.; "Effect of injection Pressure and Nozzle Geometry on Emissions and Performance in a D.I Diesel", SAE Paper 950604, 1995.
- [۳] Nehmer, D. A. and Reitz, R. D.; "Measurement of the Effect of injection rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", SAE Paper 940668, 1994.
- [۴] Lee, T.; "An Experimental Study of Emission Reduction Mechanisms in a High Speed Direct Injection Diesel Engine With Multiple Injection and EGR", PhDs Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2002.
- [۵] Ricaud, J.C. and Lavoisier, F.; "Optimizing the Multiple Injection Settings on an HSDI Diesel Engine", THESEL 2002 Conference, 2002.
- [۶] Ayub, N. S. and Reitz, R.; "Multidimensional modeling of fuel effects and split injections on diesel engine cold- starting", J. Propulsion Power, Vol.13(1), pp. 123-130, 1997.

## ۹- لغات انگلیسی:

CFD	مکانیک سیالات محاسباتی	NO	مونواکسید نیتروژن
Simple	سیمیپل	Soot	دوده
TDC	نقطه مرگ بالا	Multiple Injection	پاشش چند مرحله ای
ATDC	بعد از نقطه مرگ بالا	Common Rail	ریل مشترک
Direct injection	پاشش مستقیم	Pilot Injection	پیش پاشش سوخت
Kiva-3V Code	کد کیوا-۳	Split Injection	پاشش مجزا