

بررسی سازوکار کاهش آلاینده‌های دوده و NO در موتورهای دیزل پاشش مستقیم با استفاده از راهکار پاشش دومرحله‌ای سوخت

کامران پورقاسمی^{۱*}، فتح اله امی^{۲**}، وحید اصفهانیان^{۳***} و حامد طنابی^{۱****}

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، گروه مهندسی مکانیک

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک

۳- دانشگاه تهران، دانشکده مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۸۹/۹/۲۳)

هدف مقاله بررسی نحوه کاهش آلاینده‌های دوده و NO در پاشش دومرحله‌ای سوخت در موتورهای دیزل پاشش مستقیم است. در این پژوهش پاشش دومرحله‌ای بهینه سوخت به عنوان یک روش مفید و مؤثر برای کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و NO معرفی شده است. تحقیقات بر روی یک موتور دیزل پاشش مستقیم ساخت شرکت موتورسازان تبریز انجام گرفت. برای ارزیابی مزایای به کارگیری راهکار پاشش دومرحله‌ای و بررسی سازوکار احتراق، از کد سه بعدی KIVA-3V استفاده شد. نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که راهکار پاشش دومرحله‌ای با فاصله زمانی مناسب بین مراحل پاشش می‌تواند در کاهش همزمان آلاینده‌های مذکور مؤثر باشد. همچنین بر پایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، سازوکار کاهش آلاینده NO همانند پاشش یک مرحله‌ای با به تأخیر انداختن زمان پاشش است. کاهش دوده نیز به این علت است که در پاشش دومرحله‌ای به دلیل توقف بین دو مرحله پاشش، ناحیه غنی از سوخت در نوک اسپری که عامل تولید دوده است، حذف می‌شود. نتایج به دست آمده از تحقیق برای موتور مورد نظر نشان داد که با استفاده از راهکار پاشش دو مرحله‌ای مقدار دوده و NO در گازهای خروجی به ترتیب ۳۳ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

کلیدواژه: موتور دیزل پاشش مستقیم، پاشش دومرحله‌ای سوخت، KIVA-3V، دوده، NOx

مقدمه

فرایند احتراق در موتورهای دیزل به شدت وابسته به مشخصه‌های پاشش سوخت و پدیده پودرسازی (Atomization) برای افزایش نرخ اختلاط و تبخیر سوخت است. عوامل فشار پاشش سوخت، زمان شروع و نرخ پاشش، هندسه نازل و شرایط محیط داخل سیلندر بر نرخ اختلاط، احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی موتور دیزل پاشش مستقیم تأثیر زیادی دارند [۱]. مطالعات در مورد تأثیر پاشش با فشار بالا و هندسه ورودی نازل افشانه (Injector) جهت تزریق سوخت با قطر متوسط کوچک‌تر برای کاهش آلاینده‌های موتور محدود است [۲]. لذا محققان همواره به دنبال راهکارهای جدیدی برای کاهش بیشتر آلاینده‌ها در پاسخ به استانداردهای سختگیرانه آلاینده‌ها هستند.

مشکل اصلی در موتورهای دیزلی کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و NOx است. زیرا این دو آلاینده در تقابل هم بوده و کاهش هر کدام افزایش دیگری را در پی دارد [۳]. راهکارهای مختلفی برای کاهش هر یک از این آلاینده‌ها ارائه شده است ولی بیشتر این راهکارها تنها قابلیت کاهش یکی از این دو آلاینده را داشته و سبب افزایش دیگری می‌شوند. یکی از راهکارهای

* کارشناس ارشد، مربی - نویسنده مخاطب (ایمیل: Kamran.poorghasemi@gmail.com)

** استادیار (ایمیل: fommi@modares.ac.ir)

*** استاد (ایمیل: evahid@ut.ac.ir)

**** کارشناس ارشد، مربی (ایمیل: h.tanabi@gmail.com)

نوین در کاهش همزمان این آلاینده‌ها پاشش چندمرحله‌ای سوخت در هر سیکل موتور است. سیستم‌های ابتکاری پاشش سوخت در دهه اخیر مانند سیستم "ریل مشترک (Common Rail)" با قابلیت پاشش چند مرحله‌ای سوخت توسعه داده شده‌اند تا آلاینده‌های مذکور را کنترل کنند. کلمه "چند مرحله‌ای (Multiple Injection)" معانی مختلفی دارد که شامل پیش پاشش یا پایلوت (Pilot Injection)، پاشش‌های مجزا (Split Injection) و سایر شکل‌های پاشش است. در پاشش پایلوت مقدار نسبتاً کمی از سوخت چند درجه چرخش میل‌لنگ زودتر از پاشش اصلی به محفظه احتراق تزریق می‌شود. پاشش مجزای سوخت شامل دو مرحله پاشش سوخت است که با مقادیر مختلف سوخت و فاصله نسبتاً زیاد بین دو مرحله پاشش انجام می‌شود. سایر شکل‌های پاشش شامل پاشش دو تایی، سه مرحله‌ای، چهار مرحله‌ای و ... هستند. در این مقاله منظور از پاشش چندمرحله‌ای سوخت پاشش دو مرحله‌ای سوخت با مقادیر مختلف سوخت در هر پالس پاشش است.

نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که پاشش چندمرحله‌ای سوخت اختلاط بهتر نسبت به پاشش یک مرحله‌ای ایجاد کرده و بدون کاهش توان موتور سطح دوده را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد [۵ و ۴]. همچنین در پاشش چندمرحله‌ای وقتی یک میزان کوچک پیش پاشش سوخت در مرحله تراکم تزریق شود بهبود قابل توجهی بر روی عملکرد موتور مانند روشن شدن سرد و صدای احتراق خواهد داشت [۷ و ۶].

هدف اصلی از به‌کارگیری راهکار پاشش چندمرحله‌ای بهبود احتراق نفوذی در مرحله انبساط، کاهش دمای داخل محفظه احتراق، رسیدن نرخ آزاد شدن گرما (HRR- Heat Release Rate) تا حد بهینه و ایجاد زمان کافی برای سوختن دوده است [۹ و ۸]. در این کار پژوهشی با بررسی سازوکار کاهش آلاینده‌های موتور MT-4.244 با استفاده از شبیه‌سازی عددی موتور به کمک داده‌های تجربی، مشخصه‌های پاشش بهینه سوخت در پاشش دومرحله‌ای برای این موتور تعیین شده است که می‌تواند راه روشنی فراروی صنعت تولید موتورهای دیزل در کشور باشد.

مدلسازی فرایند احتراق

برای بررسی عددی و شبیه‌سازی فرایند احتراق موتور دیزل از کد سه‌بعدی KIVA-3V استفاده شده است. کد KIVA-3V حل جریان‌های سه‌بعدی ناپایا، تراکم‌پذیر، مغشوش 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 این کد عبارت‌اند از: مدل اغتشاشی K-ε برای جریان مغشوش داخل محفظه سیلندر و مدل احتراق ماگنوسن-هجرتاگر (Magnusson-Hjertager). برای حل میدان جریان و فشار داخل سیلندر از الگوریتم سیمپلر (Simpler) استفاده شده است. در این پژوهش برای نیل به هدف مقاله، مدل شکست اسپری ویو (Wave) همراه با تغییراتی جهت اعمال پاشش چندمرحله‌ای مورد نظر به کد KIVA-3V اضافه شده است [۱۱]. سازوکار استفاده شده در KIVA-3V برای سینتیک تشکیل NO سازوکار توسعه یافته زلدوویچ است. این سازوکار شامل معادلات زیر است که توسط آقای باومن ارائه شده است [۱۲]:



از طرفی رابطه زیر برای رادیکال‌های هیدروژن برقرار است:



با فرض حالت پایا برای N در معادلات بالا، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{d}{dt}[\text{NO}] = 2K_{1f}[\text{O}][\text{N}_2] \left\{ \frac{1 - [\text{NO}]^2 / K_{1f}[\text{O}_2][\text{N}_2]}{1 + K_{1b}[\text{NO}] / (K_{2f}[\text{O}_2] + K_{3f}[\text{OH}])} \right\} \quad (5)$$

که در آن $K_{12} = (k_{1f}/k_{1b})(k_{2f}/k_{2b})$ است. فرض می‌شود O، OH، و O₂ و N₂ در تعادل ترمودینامیکی هستند [۱۳]. ثابت‌های نرخ تشکیل NO از معادله آرینیوسی با ضرایب تجربی محاسبه می‌شوند.

$$k_f = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

مدل به کار رفته در کد KIVA-3V برای محاسبه مقدار دوده از دو مرحله تولید دوده و اکسیداسیون آن تشکیل می‌شود و مقدار نهایی دوده تولیدی از تفاضل این دو مرحله به دست می‌آید [۱۳]. نرخ تشکیل دوده توسط آقای هیروياسو (Hiroyasu) مدل شده است که عبارت است از:

$$\frac{d(M_s)}{dt} = \dot{M}_{sf} - \dot{M}_{so} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، Ms جرم نهایی دوده، \dot{M}_{sf} نرخ تشکیل دوده و \dot{M}_{so} نرخ اکسیداسیون دوده هستند. نرخ تشکیل آرینیوسی دوده با جرم بخار سوخت متناسب است. لذا:

$$\dot{M}_{sf} = K_f M_{fv} \quad (8)$$

در رابطه فوق، K_f ضریب تشکیل دوده، تابعی از فشار و دما، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_f = A_{sf} P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_{sf}}{RT}\right) \quad (9)$$

نرخ اکسیداسیون دوده توسط مدل نیگر و استریکلند [۱۳] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{M}_{so} = K_0 M_s \quad (10)$$

و ضریب اکسایش تابعی از فشار، دما و کسر مولی اکسیژن است که به صورت زیر ارائه شده است:

$$K_0 = A_{SO} X_{O_2} P_{1.8} \exp\left(-\frac{E_{so}}{RT}\right) \quad (11)$$

مدل دوده یک مرحله‌ای و دو فرایندی هیروياسو به صورت طرحواره نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود سوخت ابتدا به دوده و سپس به محصولات تبدیل می‌شود.



در کد استفاده شده در این تحقیق شکل بهینه شده مدل مذکور استفاده شده است. بدین صورت که معادله نرخ اکسیداسیون آرینیوسی (۲۲) با نرخ اکسیداسیون نیگر (Nagle) و استریکلند (Strickland-Constable) (NSC)، که یک رابطه تجربی است، جایگزین شده است. در این مدل بر اساس نتایج آزمایشگاهی اکسیداسیون گرافیت کربن در محیط اکسیژن (O₂) در محدوده معینی از فشار جزئی، نرخ اکسیداسیون توسط دو سازوکار مدل می‌شود که وابسته به دو سطوح شیمیایی A و B است. سطوح A سطوح واکنش‌پذیر قوی و سطوح B سطوح واکنش‌پذیر ضعیف هستند. با تعاریف ارائه شده ضریب نرخ اکسیداسیون، رابطه (۲۲)، با رابطه زیر جایگزین می‌شود [۱۴]:

$$K_0 = \frac{6}{\rho_s D_{nom}} \dot{W}_{nsc}^n \quad (13)$$

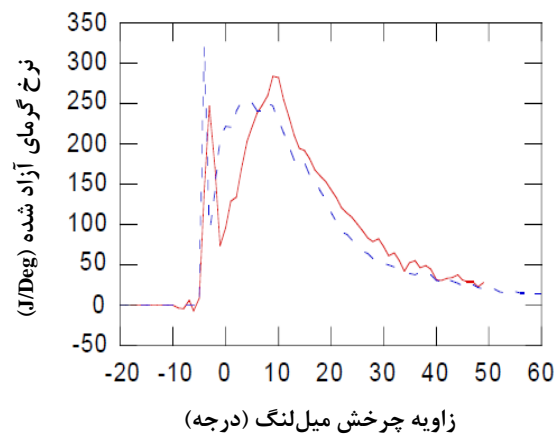
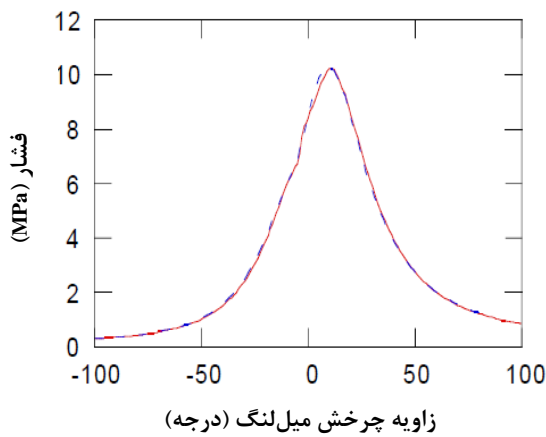
که \dot{W}_{nsc}^n نرخ اکسیداسیون دوده در واحد سطح، D_{nom} اندازه اسمی ذرات کروی دوده برابر ۲۵ nm و ρ_s دانسیته دوده برابر ۲/۵g/cm³ است.

برای ارزش‌دهی مدل‌های مذکور در کد KIVA-3V در مرجع [۱۴] راهکار پاشش دومرحله‌ای بر روی یک موتور دیزل پاشش مستقیم تولید شرکت کاترپیلار، مجهز به سیستم ریل مشترک، اعمال شد. جدول (۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست تجربی در مقاله مرجع [۱۴] را ارائه می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این مرجع تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد. لذا مدل‌های بالا از دقت خوبی برخوردارند. همچنین برای اعتباردهی نتایج مدل حالت پایه موتور منحنی‌های فشار داخل سیلندر و نرخ گرمای آزاد شده مورد مقایسه قرار گرفتند که در مقاله مذکور به صورت زیر ارائه شده است. با توجه به شکل (۱) تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و عددی دیده می‌شود.

جدول ۱- مقایسه بین مقدار انتشار آلاینده‌های دوده و NOx برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی [۱۴]

حالت‌های پاشش	NOx تجربی (g/bhp-hr)	NOx حاصل از شبیه‌سازی (g/bhp-hr)	دوده تجربی (g/bhp-hr)	دوده حاصل از شبیه‌سازی (g/bhp-hr)
حالت پایه	۰/۰۸۳	۰/۰۷۸	۵/۷۲	۶/۲۸
۹۰ (۳)	۰/۱۶۳	۰/۲۰۰	۴/۲۶	۳/۷۸
۹۰ (۸)	۰/۱۸۴	۰/۱۹۰	۴/۰۲	۴/۱۱
۷۵ (۳)	۰/۰۹۵	۰/۰۸	۴/۶۶	۴/۱۸
۷۵ (۸)	۰/۰۸۴	۰/۰۶۷	۴/۸۸	۴/۰۴
۵۰ (۳)	۰/۱۰۰	۰/۱۱۶	۵/۴۰	۵/۱۶
۵۰ (۸)	۰/۰۸۳	۰/۰۷	۵/۱۵	۴/۴۵
۲۵ (۳)	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸	۶/۰۲	۵/۶۱
۲۵ (۸)	۰/۰۷۴	۰/۰۶۹	۵/۸۱	۵/۱۰



شکل ۱- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی از لحاظ منحنی‌های نرخ گرمای آزاد و فشار داخل سیلندر برای موتور مذکور در مرجع [۱۴] با زمان شروع پاشش ۱۰/۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا

صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی

برای ارزش‌دهی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند احتراق با پاشش دومرحله‌ای سوخت، نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی موتور دیزل پاشش مستقیم MT-4.244 (DI) ساخت شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز استفاده شده است. مشخصات موتور در جدول (۲) ارائه شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی ۸-مد (8- Mode) با دستگاه‌های آزمون ای وی ال (AVL) انجام شد. در مورد هر مشخصه دیگر از موتور که در کد نیاز بود نیز مقدار مربوط به موتور مذکور تهیه شده و به عنوان اطلاعات ورودی در کد وارد شده است. آزمون تجربی و شبیه‌سازی در بار کامل و دور ۲۰۰۰ در بر دقیقه انجام شده است. چرخه بسته برای مدل کردن موتور مورد نظر استفاده شده است. شبکه‌بندی محفظه احتراق موتور به صورت ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده است و سلول‌های محاسباتی به شکل شش وجهی (Hexa) هستند. شکل (۲) شبکه‌بندی محفظه داخل

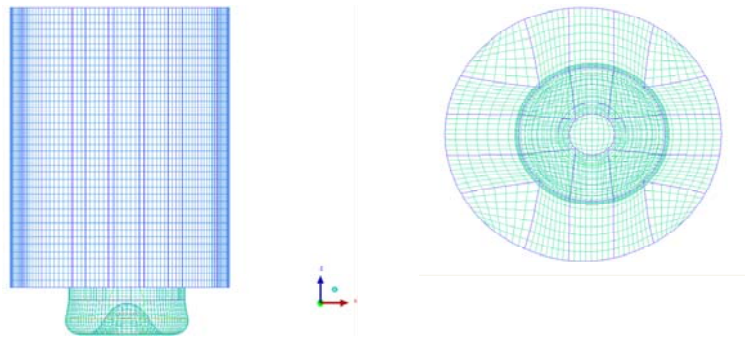
سیلندر را نشان می‌دهد. تعداد تقسیمات شبکه در جهت شعاعی برابر ۲۰ است و ۲ ردیف شبکه لایه مرزی و ۶ سلول در نقطه مرگ بالا برای ناحیه فشرده‌گی نیز در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات و شرایط اولیه موتور

۱/۸۵ kbar	فشار اولیه داخل سیلندر	MT_4.244	مدل موتور
۴۵۰ K	دمای اولیه داخل سیلندر	۱۰۰ mm	قطر پیستون
۲۵۰ bar	فشار پاشش سوخت	۱۲۷ mm	کورس پیستون
۱۴۸ BTDC ²	لحظه بسته شدن سوپاپ هوای ورودی	۱۷/۵:۱	نسبت تراکم
۱۵۰ ATDC ¹	لحظه باز شدن سوپاپ دود	۲۰۰۰ rpm	دور موتور
۱۷ CA	مدت زمان پاشش سوخت	۲ ATDC ¹	زمان تزریق سوخت (SOI)
۱۴/۵ °	زاویه مخروط افشانه	۵ عدد	تعداد نازل‌ها
ω	شکل کاسه پیستون	صفر	چرخش (Swirl)

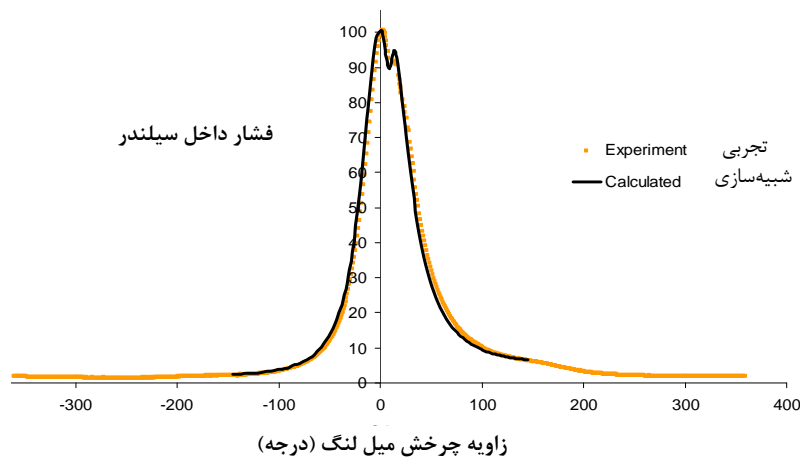
^۲ قبل از نقطه مرگ بالا

^۱ بعد از نقطه مرگ بالا



شکل ۲- شبکه‌بندی محفظه احتراق در حالت ۳۶۰ درجه (شکل سمت راست دید از بالای محفظه است)

تعداد تقسیمات شبکه بر اساس قاعده استقلال نتایج از شبکه و در عین حال مدت زمان کارکرد رایانه انتخاب شده است. مقدار تجربی بیشینه فشار داخل سیلندر حاصل از احتراق (پیک دوم در شکل (۳)) برابر ۹۴/۶ بار است (جدول ۳). با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) تعداد شبکه ۸۲۲۰۸ به دلیل نزدیکی فشار داخل سیلندر محاسبه شده به نتیجه تجربی و مدت زمان محاسبه پایین جهت انجام تحقیقات مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳- مقایسه تغییرات فشار داخل سیلندر حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی

شکل (۳) منحنی تغییر فشار داخل سیلندر حاصل از شبیه‌سازی موتور را در مقایسه با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. دیده می‌شود که منحنی فشار حاصل از نتایج عددی و تجربی مطابقت خوبی با هم دارند. برای بررسی دقت مدل‌های مورد استفاده برای پیشگویی آلاینده‌ها مقادیر حاصل از شبیه‌سازی در جدول (۴) با نتایج تجربی مقایسه شده است. با توجه به مقادیر جدول، نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی دارند.

جدول ۳- استقلال نتایج از شبکه

تعداد تقسیمات ایجاد شده	بیشینه فشار داخل سیلندر حاصل از احتراق (bar)	زمان محاسبات (ساعت)
۸۵۵۶۲	۹۹/۳	۸/۴
۸۲۲۰۸	۹۵/۸	۷/۵
۷۷۲۶۸	۸۳/۵	۶/۶

جدول ۴- مقدار آلاینده‌های موتور دیزل در حالت پایه

آلاینده	مقدار تجربی (gr/kW.h)	مقدار حاصل از شبیه‌سازی (gr/kW.h)
اکسید نیتروژن NO	۶/۸۴	۷/۶۸
دوده	۰/۸۷	۱/۰۲

تحلیل نتایج

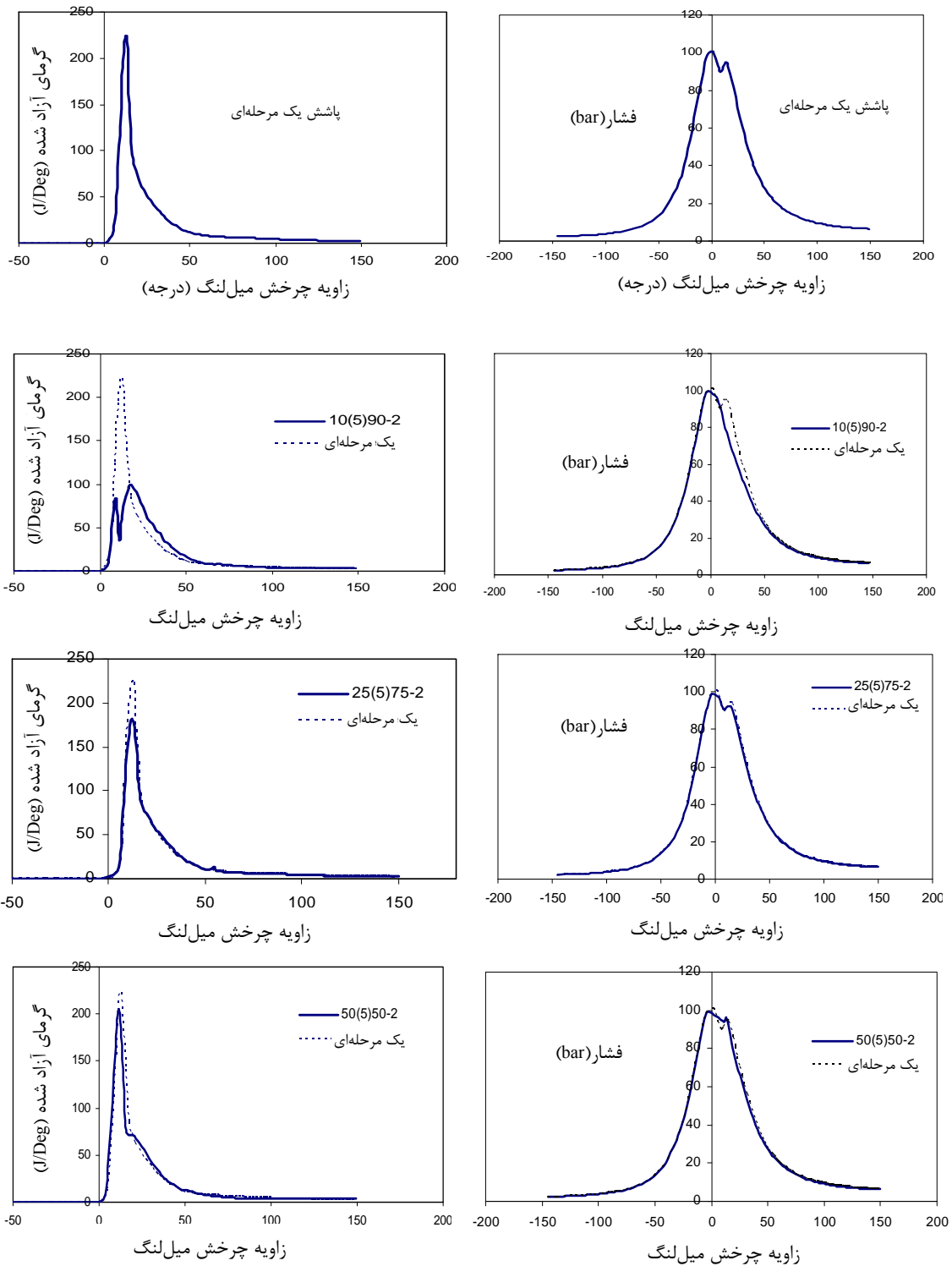
مهم‌ترین متغیرهای پاشش چندمرحله‌ای عبارت‌اند از: تعداد پاشش سوخت، زمان پاشش سوخت، فشار پاشش سوخت، مقدار سوخت در هر مرحله از پاشش و فاصله زمانی بین پاشش‌ها. با انتخاب بهینه متغیرهای مذکور می‌توان به یک مصالحه در کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و NO موتور دیزل دست یافت. برای سهولت بیان مقدار پاشش سوخت در هر مرحله و فاصله بین دو پالس پاشش قرارداد زیر در نظر گرفته شده است:

"شروع پاشش - % سوخت در مرحله دوم (فاصله بین دو پاشش) / سوخت در مرحله اول"

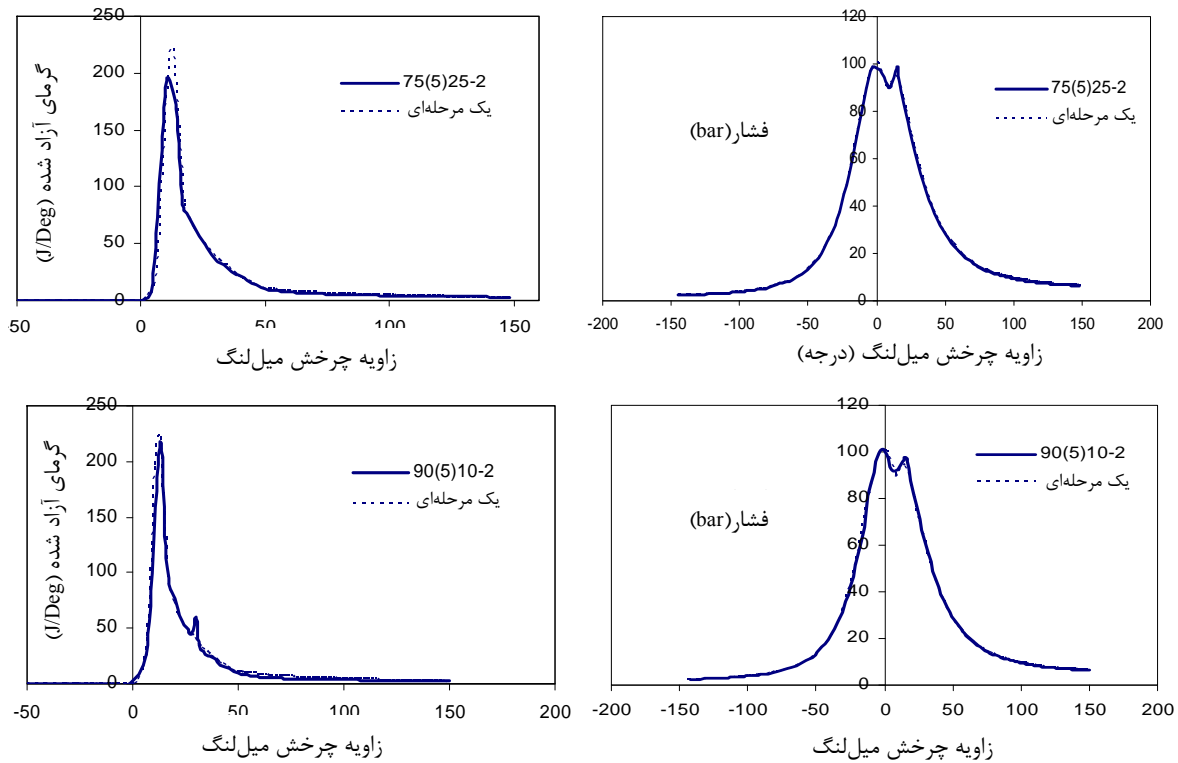
برای مثال ۲-۱۰(۸)۹۰ بدین معنی است که شروع پاشش سوخت از ۲ درجه پس از نقطه مرگ بالا با ۹۰ درصد سوخت در پالس اول پاشش انجام شده و پس از ۸ درجه چرخش میل‌لنگ فاصله از اتمام پالس اول ۱۰ درصد سوخت باقی‌مانده نیز پاشش می‌شود. در ادامه حالت‌های مختلف تزریق دومرحله‌ای در نظر گرفته شده است که شامل حالت‌های "پیش‌پاشش + پاشش اصلی" و "پاشش اصلی + پس‌پاشش" با مقادیر مختلف سوخت در هر مرحله و فاصله‌های زمانی مختلف توقف پاشش است. شکل (۴) منحنی فشار داخل سیلندر و نرخ آزاد شدن گرما را برای شش حالت نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های فشار و نرخ گرمای آزاد شده در شکل (۳)، دیده می‌شود که برای حالت‌های پاشش سوخت که مقدار بیشتر سوخت در پالس دوم پاشش می‌شود بیشینه نرخ آزادسازی گرما کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش احتراق پیش‌آمیخته است و رفتار احتراق مانند حالت تاخیر در جرقه (Retard) است. با توجه به افت فشار داخل سیلندر در برخی از حالت‌های پاشش، حالت بهینه وقتی است که قسمت اعظم سوخت در مرحله اول تزریق شود تا توان موتور کاهش نیابد.

جدول (۵) مقدار تولید آلاینده‌های دوده و NO را برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت ارائه می‌دهد. دیده می‌شود که هر چه مقدار سوخت در پاشش ثانویه بیشتر باشد مقدار NO کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش بیشینه نرخ آزادسازی گرما و احتراق پیش‌آمیخته و در نتیجه کاهش دمای سیلندر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هر چه مقدار سوخت در پالس دوم پاشش بیشتر شود دوده تولیدی زمان کافی برای اکسیدشدن را پیدا نمی‌کند، لذا مقدار نهایی آن افزایش می‌یابد. بنابراین در جستجوی حالت بهینه‌ای که همزمان بیشینه نرخ آزادسازی گرما کم باشد تا NO کاهش یابد و همچنین دمای احتراق حاصل از پالس اول پاشش و زمان اکسیداسیون (فاصله بین دو پاشش) کافی باشد تا از ایجاد دوده در پیشانی اسپری پاشش ثانویه

جلوگیری شود، حالت‌های ۲-۲۵(۵)۷۵ و ۲-۱۰(۵)۹۰ برای بررسی بیشتر مورد توجه هستند. مدت زمان پاشش سوخت در حالت پاشش دومرحله‌ای به صورت ۲۵(۵)۷۵ برابر ۱۲/۷۵ درجه چرخش میل‌لنگ برای پالس اول پاشش و ۴/۲۵ درجه چرخش میل‌لنگ برای پالس دوم است. همچنین برای حالت ۱۰(۵)۹۰ مدت زمان پاشش سوخت در هر مرحله به ترتیب برابر ۱۵/۳ و ۱/۷ درجه چرخش میل‌لنگ است.



شکل ۴- منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر و آزادسازی گرما برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت



ادامه شکل ۴- منحنی تغییرات فشار داخل سیلندر و آزادسازی گرما برای حالت‌های مختلف پاشش سوخت

جدول ۵-آلاینده‌های تولید شده در حالت‌های مختلف پاشش

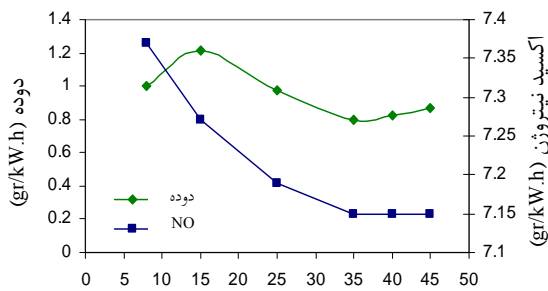
دوده (g/kW.h)	اکسیدهای نیتروژن (g/kW.h)	حالت‌های پاشش
۱/۰۲	۷/۶۸	حالت پایه
۳/۵۱	۳/۵۸	۱۰ (۵) ۹۰-۲
۲/۷۶	۶/۵۰	۲۵ (۵) ۷۵-۲
۲/۵۹	۶/۸	۵۰ (۵) ۵۰-۲
۱/۲۶	۷/۳۲	۷۵ (۵) ۲۵-۲
۱/۱۲	۷/۵۶	۹۰ (۵) ۱۰-۲

جدول ۶- درصد کاهش آلاینده‌ها برای دو حالت بهینه پاشش

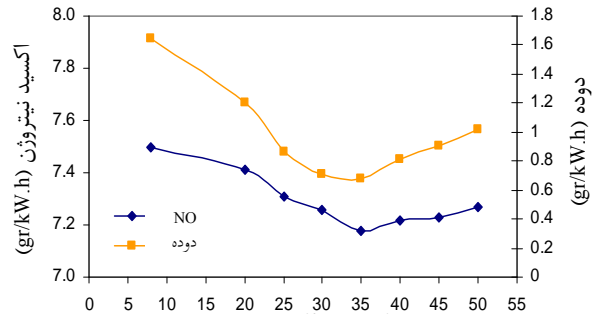
دوده (%)	اکسید نیتروژن NO (%)	حالت پاشش
۳۳/۸۵	۱۰/۸۷	۷۵(۳۵)۲۵-۲
۲۱/۵۶	۷/۶۸	۹۰(۳۵)۱۰-۲

شکل (۵) مقدار آلاینده‌های NO و دوده را برای حالت ۷۵(۵)۲۵-۲ بر حسب فاصله زمانی مختلف بین دو پالس پاشش نشان می‌دهد. دیده می‌شود که برای حالت پاشش ۷۵(۳۵)۲۵-۲ دوده کمترین مقدار خود را دارند. نتایج نشان می‌دهند که در این فاصله زمانی بین دو پاشش هر دو آلاینده NO و دوده کمینه هستند، زیرا از یک طرف با کاهش سهم احتراق پیش‌آمیخته تولید NO کاهش می‌یابد و از طرف دیگر در این فاصله زمانی دمای محفظه برای سوختن دوده تولیدی حاصل از پالس اول پاشش مناسب است. دلیل افزایش NO در فاصله‌های زمانی بیشتر از ۳۵ درجه چرخش میل‌لنگ این است که

بخشی از کاهش دمای محفظه که در اثر جذب گرمای محفظه در تبخیر سوخت پاششی است، حذف شده است. در اثر افت دمای محفظه با افزایش فاصله زمانی بین پالس‌های پاشش، اکسیداسیون دوده نیز به خوبی انجام نشده و دوده افزایش می‌یابد. در شکل (۶) نتایج بالا برای حالت پاشش ۲-۱۰(۳۵)۹۰ نیز ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت پاشش بهینه، حالت ۲-۱۰(۳۵)۹۰ است.



فاصله زمانی بین پالس‌های پاشش (درجه)

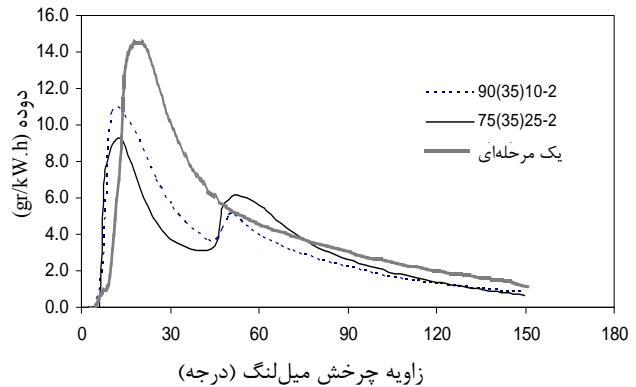
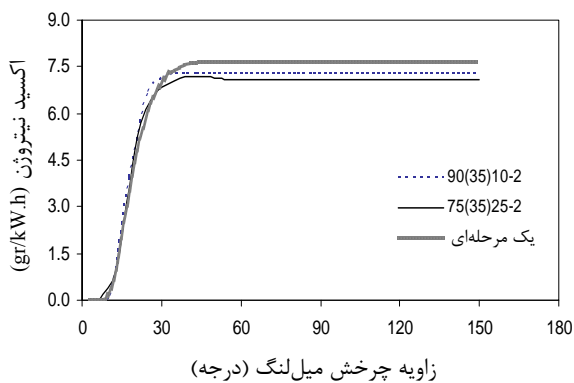


فاصله زمانی بین پالس‌های پاشش (درجه)

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

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

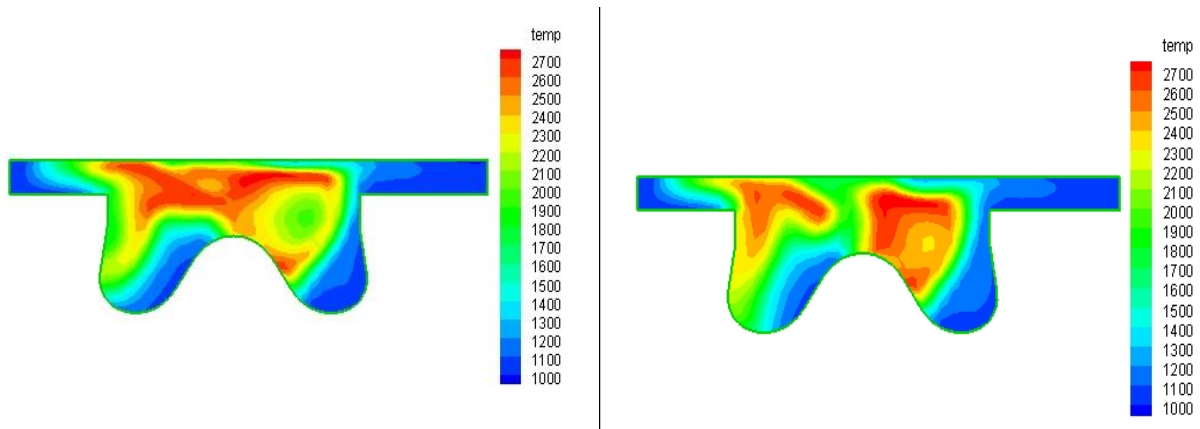
در شکل (۷) مقایسه‌ای بین تشکیل آلاینده‌های NO و دوده برای دو حالت پاشش بهینه انجام شده است. دیده می‌شود که در تمامی نتایج حالت پاشش ۲-۲۵(۳۵)۷۵ دارای نتایج بهتری است. درصد کاهش آلاینده‌ها برای هر دو حالت بهینه پاشش در جدول (۶) ارائه شده است. با توجه به داده‌ها دیده می‌شود که از بین حالت‌های بهینه پاشش مورد نظر حالت پاشش ۲-۲۵(۳۵)۷۵ دارای مشخصه‌های بهتری است.



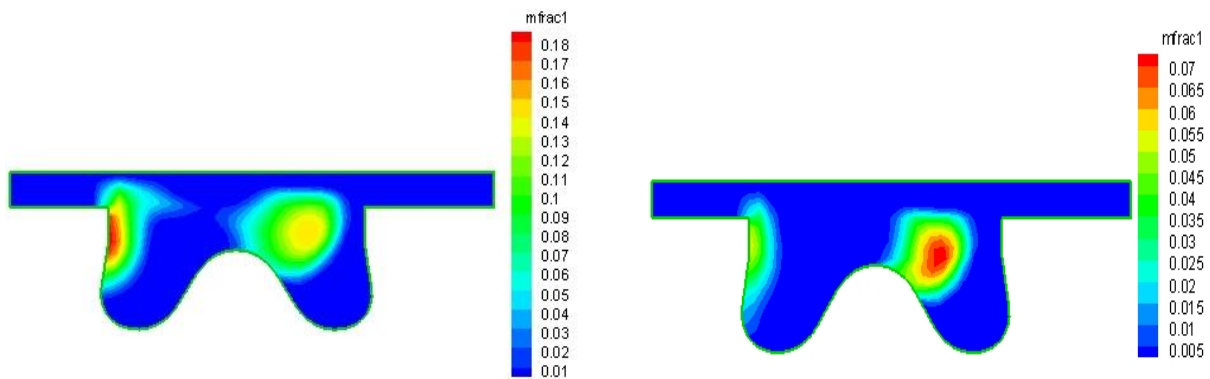
شکل ۷- منحنی تشکیل آلاینده‌های دوده و NO برای حالت پاشش تک مرحله‌ای و دو حالت پاشش بهینه

شکل (۸) توزیع دما و کسر مولی سوخت داخل سیلندر را برای دو پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در ۱۹ و ۴۵ درجه چرخش میل لنگ بعد از نقطه مرگ بالا نشان می‌دهد. با توجه به تعداد نازل‌ها و عدم تقارن هندسه محفظه نشان دادن همزمان پاشش دو نازل ممکن نیست. لذا عدم تقارن احتراق به این دلیل است. همان‌طور که دیده می‌شود در شرایط ATDC ۱۹ در مناطق با دمای بیشینه در حالت پاشش دو مرحله‌ای به مراتب دما کمتر از حالت پایه است که این عامل کمتر شدن تولید NO 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، لذا مقدار دوده کاهش می‌یابد. در ۴۵ و ۵۳ درجه چرخش میل لنگ پس از نقطه مرگ بالا دیده می‌شود که در احتراق با پاشش یک مرحله‌ای، سوخت تزریق شده با تکانه (Momentum)

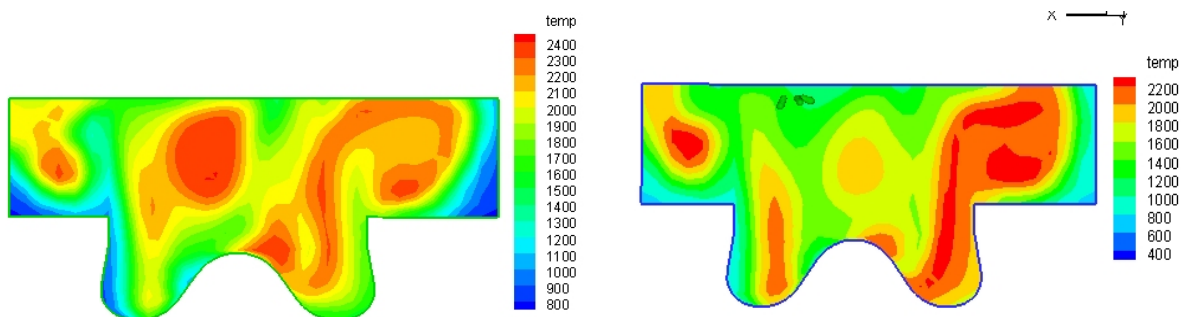
بالا به منطقه غنی از سوخت و دمای نسبتاً پایین در نوک فواره (Jet) نفوذ کرده و به طور پیوسته وارد منطقه غنی از سوخت شده و تولید دوده می‌کند. ولی در پاشش دو مرحله‌ای، سوخت پاششی در مرحله دوم وارد یک منطقه دما بالا و رقیق از سوخت می‌شود که از احتراق حاصل از پالس اول پاشش سوخت باقی مانده است، در نتیجه از تشکیل و انباشتگی سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی و تولید دوده جلوگیری می‌شود.



توزیع دما در داخل سیلندر در ۱۹ ATDC

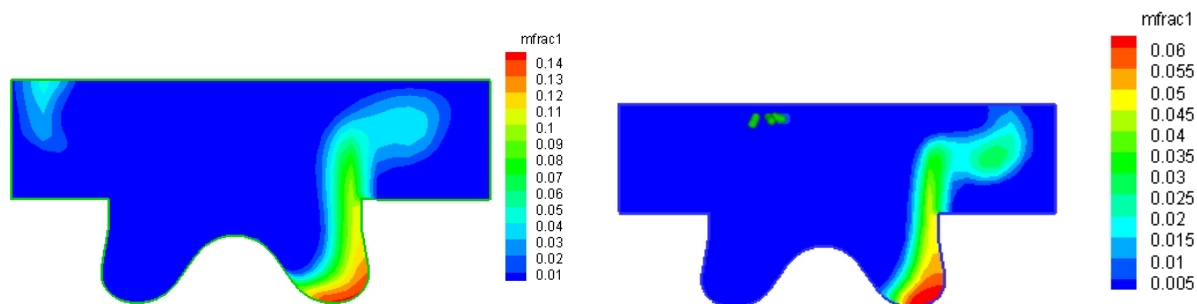


توزیع کسر مولی سوخت ۱۹ ATDC

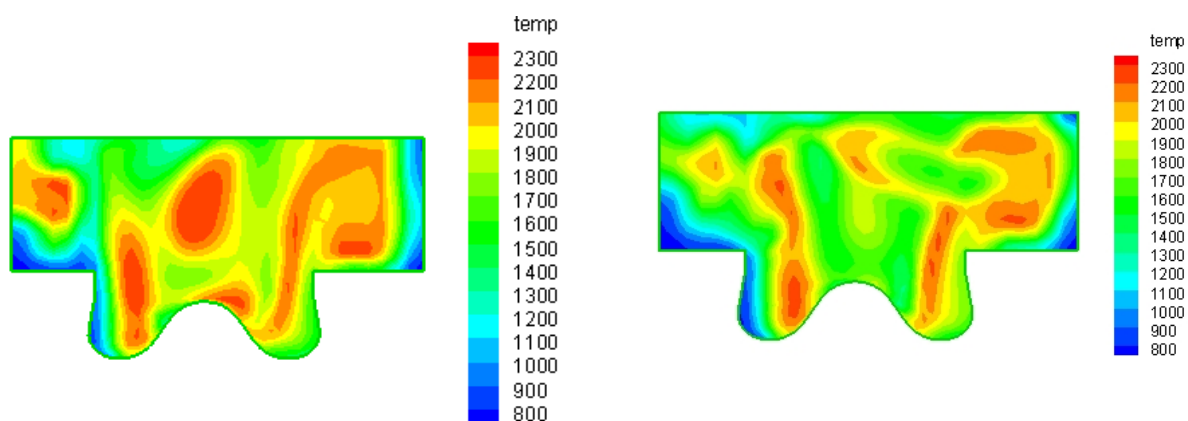


توزیع دمای داخل سیلندر در ۴۵ ATDC

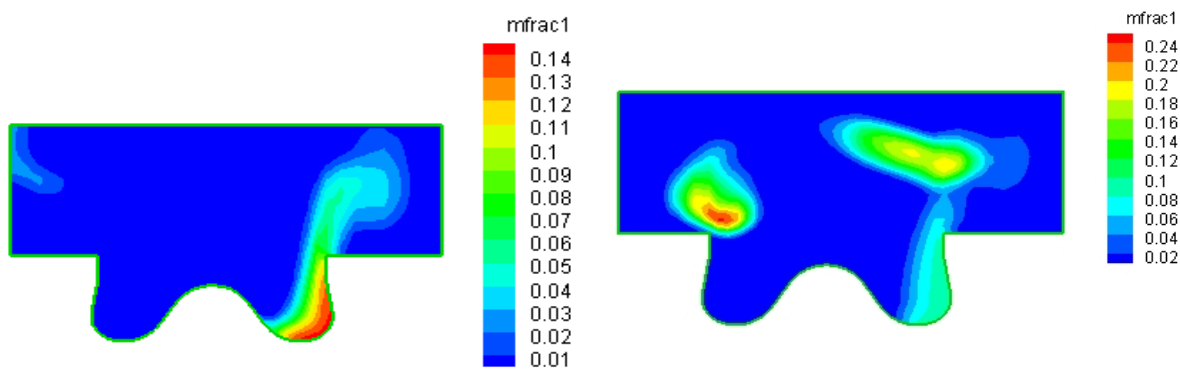
شکل ۸- توزیع دما و کسر مولی سوخت داخل سیلندر برای دو پاشش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای بهینه در زاویه های ۱۹ و ۴۵ و ۵۳ درجه بعد از نقطه مرگ بالا (سمت چپ پاشش یک مرحله‌ای و سمت راست پاشش دو مرحله‌ای ۲۵ (۳۵) ۷۵)



توزیع کسر مولی سوخت در ۴۵ ATDC



توزیع دمای داخل سیلندر در ۴۵ ATDC



توزیع کسر مولی سوخت در ۵۳ ATDC

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

نتیجه گیری

در مقاله حاضر با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی به کمک کد KIVA-3V و صحت‌گذاری آن با نتایج تجربی حاصل از آزمون حالت پایه موتور، سازوکار کاهش آلاینده‌های دوده و NO در پاشش دو مرحله‌ای سوخت مطالعه شد و در نهایت راهکار پاشش دو مرحله‌ای سوخت برای کاهش همزمان این آلاینده‌ها برای موتورهای دیزل پاشش مستقیم MT-4.244 ارائه شد. خلاصه نتایج به صورت زیر است:

- ۱- در پاشش دومرحله‌ای به دلیل افت بیشینه نرخ آزادسازی گرما و تاخیر در پاشش دوم مقدار آلاینده NO کاهش می‌یابد. سازوکار کاهش NO در راهکار پاشش چندمرحله‌ای همانند پاشش یک مرحله‌ای یا تاخیر در زمان پاشش سوخت است.
- ۲- فاصله بین دو پاشش سوخت باید به حد کافی کوتاه باشد تا دمای مورد نیاز برای اکسید شدن دوده حاصل از پالس اول فراهم 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- حالت بهینه پاشش چندمرحله‌ای برای موتور MT-4.244، حالت ۲-۲۵(۳۵)۷۵ است که با این راهبرد NO، ۱۱ درصد و دوده ۳۳ درصد کاهش می‌یابد.
- ۴- با توجه به کانتورهای ارائه شده، در پاشش دو مرحله‌ای سوخت پاششی در پالس دوم پاشش وارد یک منطقه دما بالا و رقیق از سوخت می‌شود، در نتیجه از انباشتگی سوخت در نوک اسپری و ایجاد منطقه غنی از سوخت جلوگیری می‌شود، بنابراین مقدار دوده تولیدی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آزمایشگاه موتور و پیشرانس دانشگاه تربیت مدرس و شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز برای حمایت از این کار تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

1. Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.
2. Pierpont, D. A., and Reitz, R. D., "Effect of Injection Pressure and Nozzle Geometry on Emissions and Performance in a DI Diesel," SAE Paper 950604, 1995.
3. 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.
4. Lee, T., "An Experimental Study of Emission Reduction Mechanisms in a High Speed Direct Injection Diesel Engine With Multiple Injection and EGR," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2002.
5. Ricaud, J. C., and Lavoisier, F., "Optimizing the Multiple Injection Settings on an HSDI Diesel Engine," THESEL 2002 Conference, 2002.
6. 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 Technical Paper 2005-01-0924, 2005.
7. Ghafarpour, M. R., and Noorpoor, A. R., "A Numerical Study of Pilot or Split Rate Injection to Reduce Diesel Engine Noise," Proc. IMechE, 221, pp. 457-464, 2007.
8. Liu, Y., "Diesel Engine Modeling and Optimization for Emission Reduction," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2005.
9. 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.
10. Amsden, A. A., "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report, LA-11560-MS, 1989.
۱۱. امی، ف؛ پورقاسمی، ک؛ اصفهانیان، و؛ و میرمحمدی، ع؛ "بررسی تاثیر پاشش چند مرحله‌ای سوخت و مشخصه‌های افشانه بر کاهش آلاینده‌های موتور دیزل پاشش مستقیم،" دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.
12. Bowman, C. T., "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," Prog. Energy Combustion Sci., 33, 1975.
13. Nagle, J., and Strickland-Constable, R. F., "Oxidation of Carbon between 1000-2000C," Proceedings of the Fifth Conference on Carbon, New York, Pergamon, 1962.
14. Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., and Reitz, R. D., "Mechanism of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-injection in a Diesel Engine," SAE Paper 960633, 1996.

English Abstract

Investigation of the Soot and NO Emission Reduction Mechanism in DI Diesel Engines by Means of Split Injection Strategy

K. Poorghasemi¹, F. Ommi², V. Esfahanian³ and H. Tanabi¹

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Shabestar Branch

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

3- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran

The aim of this paper is to investigate the mechanism of soot and NO emission reduction using split injection in a DI Diesel engine. In this research, split injection strategy was introduced as a useful way to reduce both emissions simultaneously. Investigations have been conducted on a DI Diesel engine manufactured by Motorsazan Tabriz Company. To evaluate the benefits of split injection strategy and to reveal the combustion mechanism, modified three-dimensional CFD code KIVA-3V was used. Results showed that use of split injection with appropriate dwell between injection pulses can be effective in simultaneous emissions reduction. Based on computation results, NO reduction mechanism is as single injection with retarded injection timing. Also it is shown that reduced soot formation is because of the fact that the soot-producing rich regions at the fuel spray head are not replenished by new fuel when the injection is stopped and then restarted. The results showed that by using split injection strategy the amount of soot and NO can be reduced by 33% and 11%, respectively.

Keywords: DI Diesel engine, Split injection, KIVA-3V, Soot, NO_x