

بررسی تأثیر تزریق چند مرحله ای سوخت بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل پاشش مستقیم

سیامک حسین پور^۱، هومن راه حق^۲

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند
HOSSAINPOUR@SUT.AC.IR

چکیده

هدف از این مقاله ارائه و بررسی تستهای عملکرد و آلایندگی انجام شده بر روی موتور PR4-236V و شبیه‌سازی فرآیند پاشش سوخت و احتراق در این موتور، جهت مطالعه اثر تزریق چند مرحله‌ای سوخت بر روی فرآیند احتراق و آلایندگی‌های خروجی به کمک کد کامپیوتری KIVA میباشد. تستهای انجام شده بمنظور رساندن سطح آلایندگی موتور به محدوده تعیین شده در استانداردهای آلایندگی اروپا انجام شده است که در این تحقیق با توجه به محدودیتهای آزمایش از شبیه سازی برای تکمیل این موضوع استفاده گردیده است. آزمایش های انجام شده بر روی پارامترهای تزریق سوخت بوده و شامل بررسی تأثیر تغییر در زمان پاشش و فشار پاشش سوخت در موتور مورد نظر می باشد. آزمایشات توسط کد کامپیوتری شبیه سازی شده و نتایج ارایه شده، نشانگر دقت و پایداری کد در شبیه‌سازی عملکرد و آلایندگی موتور مورد مطالعه می باشد. علاوه بر آن، پاشش چند مرحله ای سوخت مدلسازی شده و نتایج حاصله بیانگر کاهش آلایندگی های تولیدی با استفاده از تزریق چند مرحله ای مناسب می باشد.

واژه های کلیدی: تست آلایندگی موتور - شبیه سازی عملکرد و آلایندگی موتور - تزریق چند مرحله ای سوخت.

۱- مقدمه

در کنار کاربری روزافزون موتورهای دیزلی، استانداردهای آلایندگی نیز به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی سخت‌گیرانه‌تر می‌شود و همین عامل تحقیق در مورد موتورهای دیزل و کنترل آلایندگی‌های خروجی آنها را الزامی کرده است. موتورهای دیزلی وسایل نقلیه از جمله موتور دیزل Pr4-236v تولیدی شرکت موتورسازان در زمانی طراحی شده‌اند که آلودگی هوا امر مهمی نبوده و تنها عملکرد موتور مطرح بوده است. در یک سیستم سوخت‌رسانی پارامترهای تزریق سوخت بر ساختار و مشخصات اسپری از جمله توزیع اندازه قطرات، نفوذ اسپری، زاویه اسپری و فرآیند احتراق تأثیر می‌گذارند. تولید ذرات معلق، NO_x و سر و صدای احتراق، شدیداً بستگی به فرآیند احتراق دارد. بنابراین کنترل دقیق تزریق سوخت و تشکیل اسپری به منظور بهبود فرآیند احتراق ضروری است. برای مثال افزایش فشار و کاهش قطر سوراخ نازل، آلایندگی ذرات معلق را کاهش می‌دهد، زیرا تمیزاسیون سوخت و مخلوط شدن سوخت و هوا را بهبود می‌دهد. اما از طرف دیگر روش‌های مذکور تولید NO_x را افزایش می‌دهد زیرا با این عمل دماهای موضعی و اکسیژن در نواحی غنی در نزدیکی شروع فرآیند احتراق، افزایش می‌یابد. نرخ تشکیل NO_x را می‌توان با ریتارد کردن تایمینگ تزریق که باعث کاهش ماکزیمم دما و فشار سیلندر می‌شود کاهش داد. اما این روش نیز کارآمد نیست و مصرف سوخت را افزایش می‌دهد. به منظور بهینه کردن NO_x بدون قربانی کردن مصرف سوخت،

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مکانیک- سیستم محرکه خودرو

درک ارتباط بین پارامترهای تزریق سوخت و اینکه چگونه آنها بر فرآیند احتراق تأثیر می‌گذارند بسیار مهم است و این موضوع اهمیت این تحقیق را بیان می‌کند.

هزینه زیاد و طولانی بودن زمان انجام آزمایشها نیز بر کسی پوشیده نیست. از اینرو استفاده از کدهای کامپیوتری علاوه بر کمک به درک جزئیات دقیق جریان پیچیده احتراق در داخل سیلندر و کمک به بهینه کردن طرح اولیه می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش زمان و هزینه‌های انجام آزمون‌های لازم داشته باشد. در همین راستا در این مقاله از کد KIVA که یک کد دینامیک سیالات محاسباتی معتبر می‌باشد استفاده شده است.

افزایش فشار تزریق با وجود اینکه منجر به اتمیزاسیون بهتر و مخلوط شدن بهتر سوخت و هوا میگردد ولی از طرف دیگر میتواند باعث برخورد اسپری با دیواره شود. اما محدودیت‌هایی نیز برای افزایش فشار به علت مقاومت مواد و هزینه سیستم سوخت‌رسانی وجود دارد [۱ و ۲].

تزریق دو مرحله‌ای سوخت نیز مقدار آلاینده‌های SOOT و NO_x را تحت تأثیر قرار میدهد. با تغییر مقدار سوخت تزریق شده در پالس اول از ۱۰ الی ۷۵ درصد کل سوخت تزریقی مقدار NO_x و ذرات معلق تغییر مینماید. بطور کلی تغییر زمان‌بندی تزریق دو مرحله‌ای، NO_x را کاهش و SOOT را بسیار اندک افزایش میدهد ولی طول احتراق افزایش پیدا نمیکند [۳ و ۴].

با تغییر زاویه سکون بین پالس‌های تزریق در زمان‌بندی تزریق دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای، ذرات معلق سه برابر کاهش و NO_x تقریباً بدون افزایش باقی می‌ماند. همچنین با اینکار مصرف مخصوص سوخت ترمزی در مقایسه با تزریق منفرد افزایش مییابد. در صورتیکه تزریق دو مرحله‌ای با زاویه سکون نسبتاً طولانی انجام پذیرد. همچنین تزریق سه مرحله‌ای می‌تواند هر دو آلاینده NO_x و SOOT را هم در بارهای سبک و هم در بارهای سنگین کاهش دهد. زاویه سکون بهینه برای تزریق دو مرحله‌ای در موتور مورد بررسی در مرجع [۵] آنها حدود ۱۰ درجه زاویه میل‌لنگ در بار ۷۵٪ و دور ۱۶۰۰ rpm است [۵ و ۶]. با ثابت نگه داشتن مقدار NO_x ، مقدار سوخت تزریق شده در پالس اول تأثیر قابل توجهی روی مقدار آلاینده ذرات معلق دارد. از طرف دیگر بهترین زمان‌بندی تزریق دو مرحله‌ای بستگی به زاویه اسپری نازل دارد. برای انژکتورهای ساخته شده با زاویه ۱۲۵ درجه، بهترین زاویه تزریق دو مرحله‌ای وقتی است که ۵۰ الی ۶۰ درصد کل سوخت در پالس اول تزریق شود. در این تحقیق همچنین نشان داده شده است که با استفاده از ۶ درصد EGR و زمان‌بندی بهینه تزریق سه مرحله‌ای، ذرات معلق NO_x به طور همزمان، به ترتیب به مقدار پایین ۰/۷ و ۲/۲ gr/bhp.hr کاهش می‌یابد [۷، ۸ و ۹].

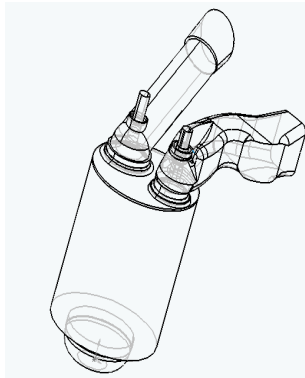
۲- مشخصات موتور مورد مطالعه

موتور مورد مطالعه در این پروژه Pr 4-236v و مدل پورتهای ورودی و خروجی و هندسه محفظه احتراق آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات هندسی و شرایط عملکرد این موتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳- بررسی آزمایشات انجام شده بر روی موتور

آزمایشات انجام شده بر روی موتور بمنظور کاهش نشر آلاینده‌های خروجی تا حد مجاز استانداردهای EURO I و EURO II صورت گرفته و شامل تست عملکرد (اندازه گیری گشتاور، توان، دمای روغن و زمان مصرف سوخت در دوره‌های مختلف و تصحیح گشتاور و توان موتور با توجه به استاندارد ISO1585) و تست آلاینده‌گی بر اساس استاندارد ECER49 (اندازه گیری زمان مصرف سوخت و مقادیر آلاینده‌های CO ، HC ، NO_x ، SOOT در گشتاورهای مختلف و در سه دور خلاصی، دور نامی و دور میانی می‌باشد.

با توجه به اعداد خام بدست آمده از سلول تست برای توان موتور در حالت تنفس طبیعی و محدوده خطای اندازه گیری در آزمایشات، سرعت نامی برابر ۲۴۰۰ rpm و سرعت میانی با توجه به تعریف آن در استاندارد برابر با ۶۰٪ سرعت نامی موتور یعنی ۱۴۰۰ rpm در نظر گرفته می‌شود.



جدول ۱ - مشخصات موتور

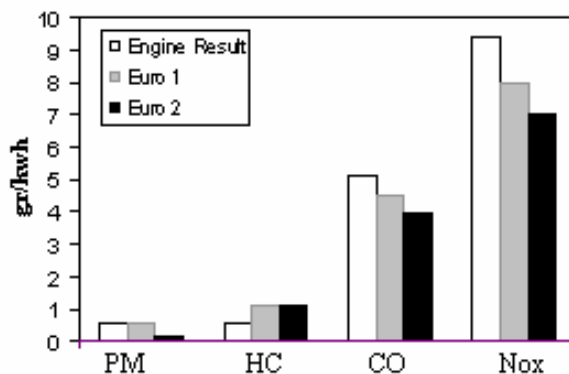
تعداد سیلندر	۴
قطر سیلندر	۹۹/۸mm
کورس پیستون	۱۲۸mm
نسبت تراکم	۱۶
فشار تزریق	۲۳۵bar
تعداد نازل‌های انژکتور	۴
زاویه مخروط انژکتور	۱۵۰

شکل ۱- پورت‌های ورودی و خروجی و هندسه محفظه احتراق

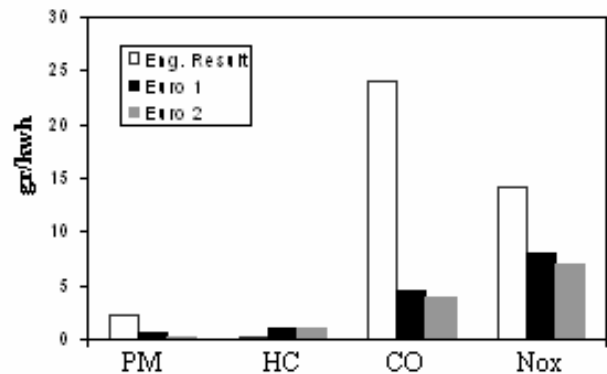
زمان مصرف ۳۰۰ cc سوخت گازوییل با دمای ۴۰ درجه در دور ۱۴۰۰ rpm برابر ۹۹/۶ S است. از احتراق این مقدار سوخت مصرف شده گشتاور ترمزی ۲۳۰ N.m و توان ترمزی ۳۳/۵۷ Kw اندازه گیری شده است. طبق مدارک فنی در دور ۱۴۰۰ rpm برای تولید ۲۳۲-۲۲۸ N.m گشتاور ترمزی بین ۶۲-۶۸ mm³/stoke سوخت مصرف می شود که نشان دهنده مصرف سوختی در حدود ۳ cc/s و درستی نتایج آزمایش و صحت عملکرد تجهیزات است. همچنین برای ارزیابی آلاینده‌های خروجی، از مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آلاینده سنج AVL4000 استفاده شده است.

جهت بررسی عملکرد و نشر آلاینده های موتور دیزل Pr4-236 در حالت دیزل خالص آزمایشات بسیاری برای حالت بار کامل در سرعت‌های مختلف (از سرعت ۱۰۰۰ rpm تا ۲۸۰۰ rpm با فواصل ۲۰۰ rpm) انجام گرفت. جهت اطمینان از نتایج حاصله، آزمایشات در ساعات مختلف روز تکرار و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان نتایج نهایی استفاده شده است. در این آزمایشات برای اندازه گیری دوده بجای اندازه گیری ذرات (Particulate meter) از اندازه گیری نوری (Opacity meter) استفاده شده که در مقایسه با تجهیزات تونل رقیق سازی و اندازه گیری مستقیم ذرات معلق دارای خطای بیشتری است.

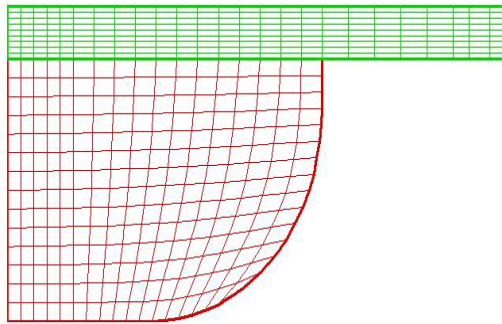
نتایج تست‌های اولیه اندازه گیری مقدار آلاینده های HC, NO_x, CO, PM برحسب gr/Kw.hr در شکل ۲ و ۳ آورده شده است. همانگونه که دیده میشود مقدار آلاینده های خروجی موتور مورد آزمایش از حد مجاز ذکر شده در استاندارد EURO I زیادتر می باشد که با تغییر در فشار و زمان پاشش آلاینده‌گی موتور مطابق شکل ۴ به زیر محدوده تعیین شده در استاندارد EURO I کاهش می یابد. یکی از روشهای کاهش NO_x، کاهش دمای هوای ورودی است. کاهش دمای هوای ورودی، کاهش دمای پیک و در نتیجه کاهش NO_x را در پی دارد و بعلاوه افزایش کار انجام شده در سیکل احتراق، توان موتور افزایش و نسبت gr/Kwh آلاینده ها کاهش می یابد. بنابراین استفاده از توربو شارژر با خنک کن میانی مناسب با توجه به دما و دبی هوای خروجی روش مناسبی برای کاهش آلاینده‌گی خواهد بود.



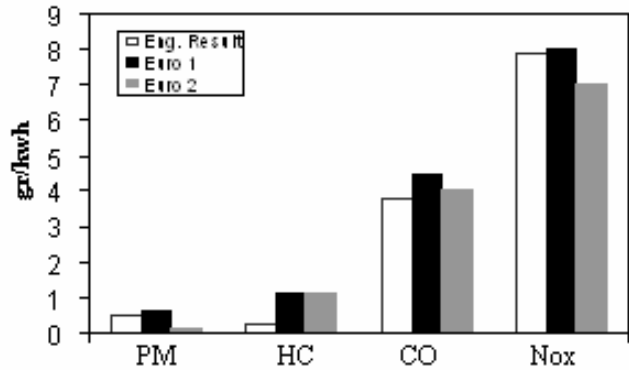
شکل ۳: مقایسه آلاینده های موتور با توربوشارژر با استاندارد



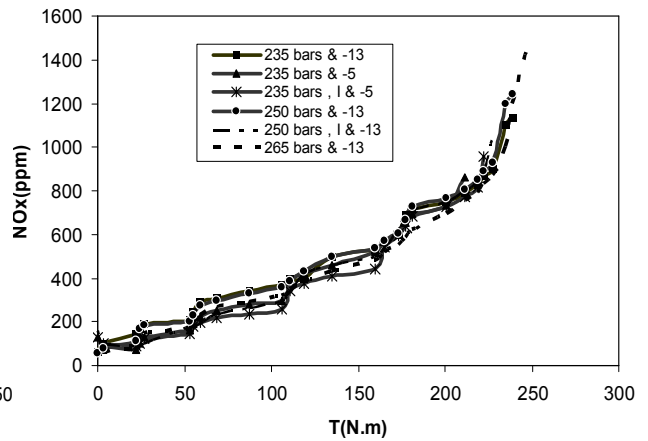
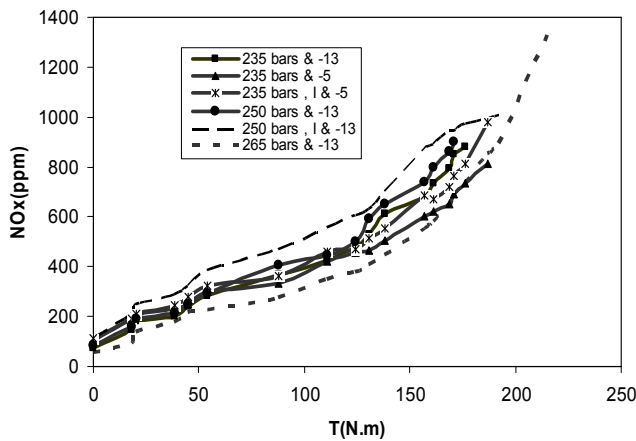
شکل ۲: مقایسه آلاینده های موتور پایه با استاندارد



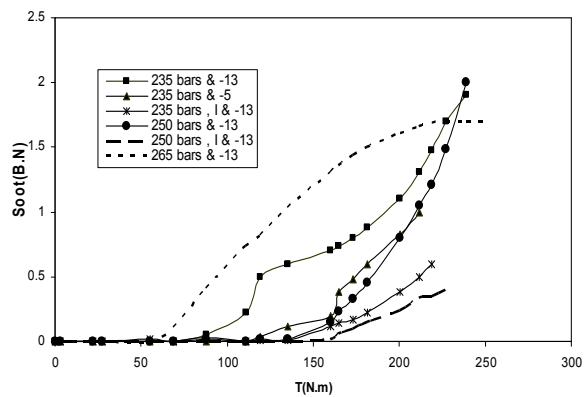
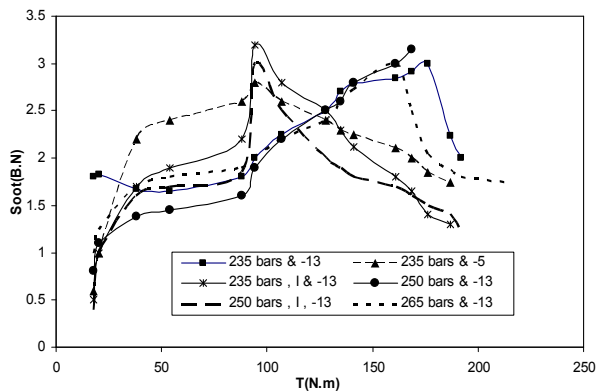
شکل ۵: محفظه احتراق شبکه بندی شده در کد KIVA II



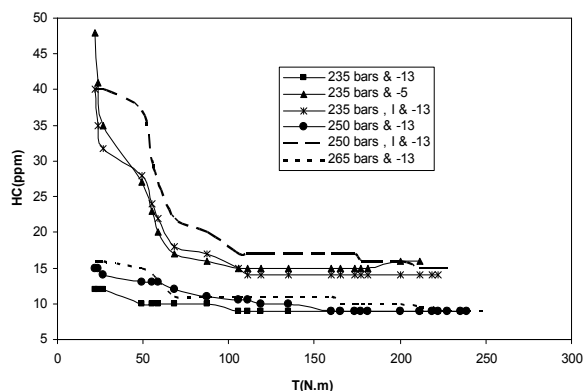
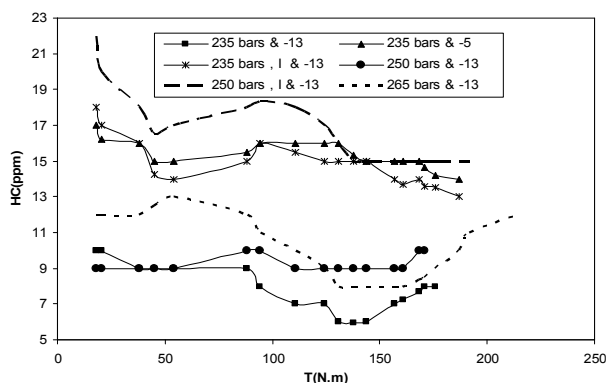
شکل ۴: مقایسه آلاینده های موتور با توربوشارژ و خنک کن



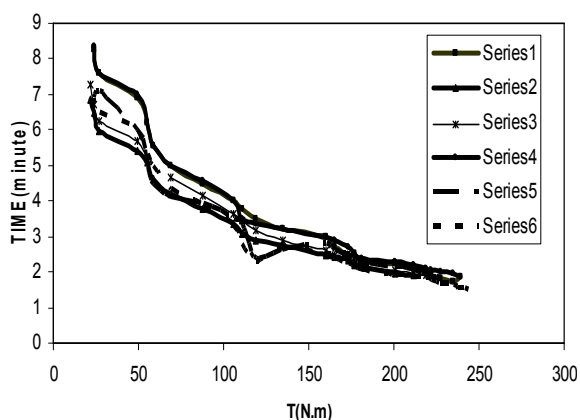
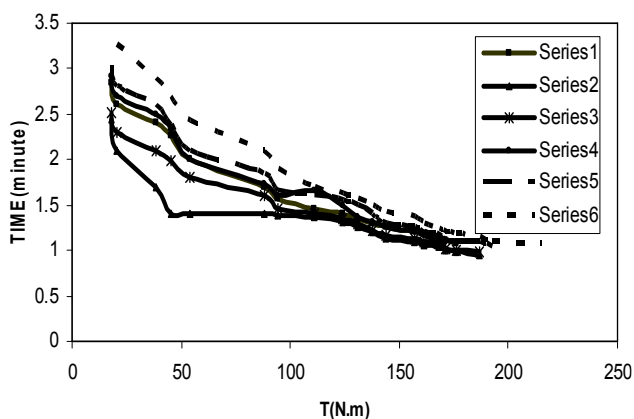
شکل ۶: تغییرات آلاینده NOx بر حسب گشتاور در دور ۲۴۰۰ و ۱۴۰۰ rpm با تغییر در فشار و زمان پاشش و استفاده از خنک کن میانی



شکل ۷: تغییرات آلاینده دوده بر حسب گشتاور در دور ۲۴۰۰ و ۱۴۰۰ rpm با تغییر در فشار و زمان پاشش و استفاده از خنک کن میانی



شکل ۸: تغییرات آلاینده HC بر حسب گشتاور در دور ۲۴۰۰ و ۱۴۰۰ rpm با تغییر در فشار و زمان پاشش و استفاده از خنک کن میانی



شکل ۶: تغییرات زمان مصرف سوخت بر حسب گشتاور در دور ۲۴۰۰ و ۱۴۰۰ rpm با تغییر در فشار و زمان پاشش و استفاده از خنک کن میانی

از شکلهای ۶، ۷، ۸ و ۹ مشاهده می شود که با ریتارد زاویه پاشش عملکرد موتور از نظر نشر آلاینده ها بهبود داشته و آلاینده از NOx ppm ۱۵۴۳ در زاویه پاشش ۲۰ BTDC در دور بیشینه گشتاور به ۱۱۳۵ و ۸۶۱ ppm با ۷ و ۱۵ درجه ریتارد می رسد. با افزایش فشار پاشش به ۲۵۰ و ۲۶۵ bars تغییرات قابل توجهی در تولید آلاینده ها رخ می دهد که نتایج حاصل از آزمایش در شکل های ۶، ۷، ۸ و ۹ آمده است.

۴- روشهای عددی

کد KIVA II معادلات جریان غیر دایمی، قابل تراکم، متلاطم و در حال واکنش شیمیائی را با استفاده از روش حجم محدود حل می کند. برای مدل سازی آشفستگی جریان داخل کاسه پیستون از مدل K-ε استفاده شده است. مدل KH-RT (Kelvin-Helmholtz, Rayleigh-Taylor) جهت مدل کردن افشانه های سوخت استفاده شده است. اشتعال موتور دیزل در این کد با مدل سینتیکی چند مرحله ای (Shell model) انجام شده است [۱۰]. هندسه محفظه احتراق در نرم افزار Solid Works ترسیم شده و پروفیل محفظه با مشخص کردن ناحیه ها و اندازه شبکه مورد نیاز در پیش پردازنده کد KIVA مطابق شکل ۵ شبکه بندی گردیده است.

برای بررسی صحت محاسبات کد، مشخصه فشار داخل سیلندر و منحنی توان موتور پایه و موتور همراه با توربو شارژر در زوایای مختلف میل لنگ در شکلهای ۱۰ و ۱۲ ارائه و مقایسه شده است. وجود تلفات، توانهای مصرفی قسمتهای مختلف موتور و عدم محاسبه کار پمپاژ در سیکل بسته، سبب ایجاد اختلاف جزئی بین آزمایش و حل عددی شده است و بر این اساس

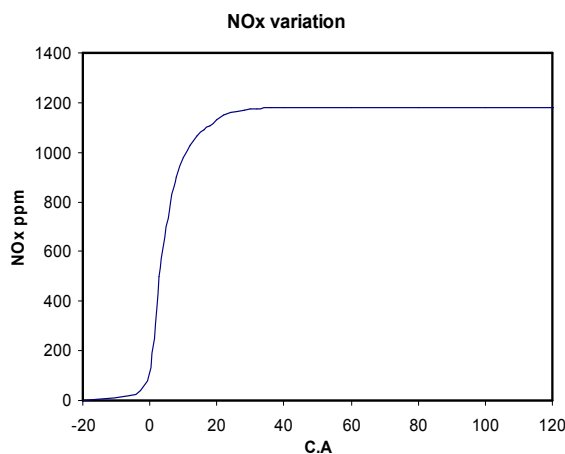
بعضی از ثابتهای مورد استفاده در کد کالیبره شده است. پس از این کالیبراسیون محل بیشینه فشار در نتایج تجربی و عددی یکی بوده و منحنی های توان رفتار یکسانی پیدا نمودند.

۵- مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی

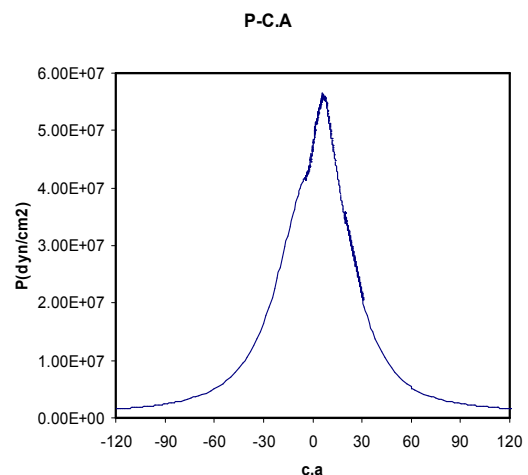
شبیه سازی در دور 1400 rpm و در گشتاور بیشینه برای فشارهای پاشش 250 و 265 bars و همچنین در زوایای مختلف پاشش با 7 و 15 درجه ریتارد انجام شده و در نهایت پاشش دو و سه مرحله ای سوخت مدل سازی گردید. حالت پایه موتور بدون توربو شارژ و با زاویه پاشش 20 BTDC و فشار پاشش 235 bars می باشد.

بیشینه فشار حاصل از حل عددی برای موتور پایه با طول مدت پاشش 25 درجه زاویه میل لنگ مطابق شکل ۱۰ معادل $55/92$ بار بوده که در زاویه 11 درجه بعد از TDC رخ می دهد. منحنی توان تجربی و محاسباتی در شکل ۱۲ تطابق بسیار خوبی را نشان میدهند. شکل ۱۱ تغییرات آلاینده NOx را برحسب زاویه میل لنگ نشان می دهد، با افزایش زاویه میل لنگ، NOx افزایش می یابد، زیرا تغییرات NOx بشدت به دمای داخل محفظه احتراق بستگی دارد. با شروع احتراق دمای پیش مخلوط افزایش یافته و همین عامل باعث افزایش تولید NOx می گردد. NOx پس از چند درجه تقریباً به حالت ثابت می رسد، زیرا NO بعد از تشکیل شدن به مقدار خیلی اندک تجزیه می شود. نقطه انتهای منحنی بیانگر کل آلاینده تشکیل شده در داخل سیلندر است. با توجه به مقدار NOx در جدول ۲ ملاحظه می شود نتایج حاصل از حل عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. با ریتارد زمان پاشش جهت کاهش NOx ، مقدار آلاینده های CO ، Soot و HC افزایش می یابد.

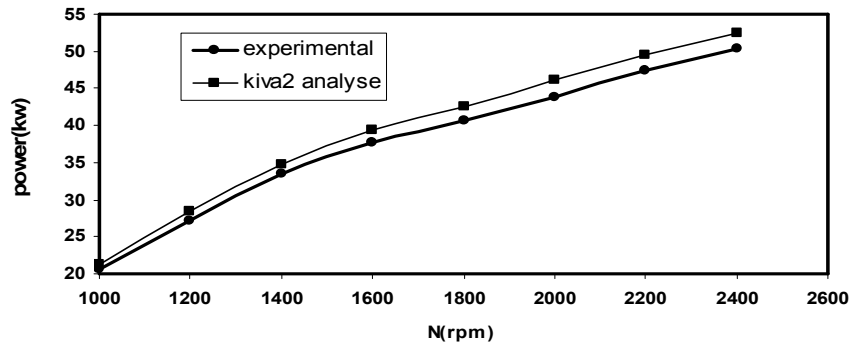
فشار پاشش بالاتر سبب بهبود احتراق می شود. اگر سوخت با فشار زیاد به درون محفظه احتراق تزریق شود شدت اختلاط به صورت قابل توجهی افزایش یافته و باعث افزایش نرخ آزاد شدن انرژی و افزایش دما می شود و در نتیجه تولید NOx افزایش می یابد که این بدلیل اختلاط بهتر سوخت و هوا و افزایش دمای احتراق می باشد. در فشار تزریق 265 bars مقدار آلاینده HC افزایش می یابد که دلیل آن افزایش طول جت سوخت تزریق شده و برخورد قطرات سوخت با دیواره کاسه پیستون می باشد.



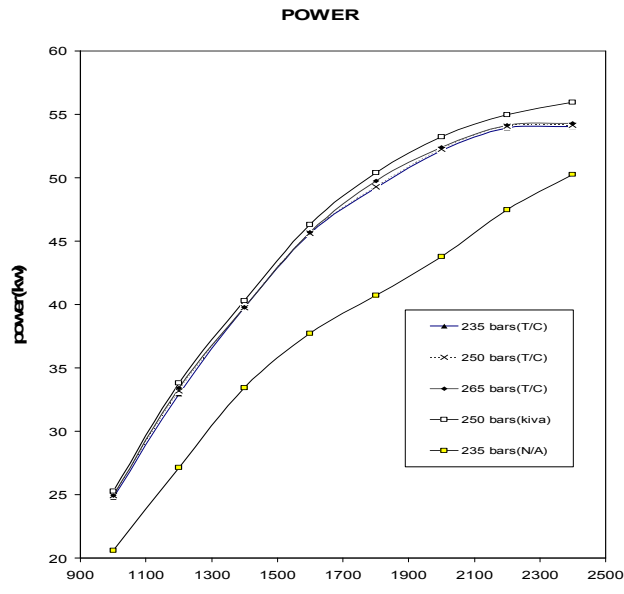
شکل ۱۱: تغییرات آلاینده NOx بر حسب زاویه میل لنگ



شکل ۱۰: منحنی فشار حاصل از حل عددی



شکل ۱۲: منحنی توان تجربی و محاسباتی موتور پایه



شکل ۱۳: منحنی توان تجربی و شبیه سازی شده موتور با فشار پاشش ۲۶۵، ۲۵۰، ۲۳۵ bars

جدول ۲ - مقدار آلاینده‌ها در بار کامل و دور ۱۴۰۰ rpm

آلاینده	نتایج تجربی	نتایج KIVA II
CO ppm	0.02	0.02
HC ppm	7	-
NOx ppm	1100	1180
Soot (B.N)	2	-

برای مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی لازم است منحنی توان تجربی موتور با فشارهای پاشش ۲۳۵، ۲۵۰، ۲۶۵ bars و منحنی توان شبیه سازی با فشار پاشش انتخابی نمونه ۲۵۰ bars جهت کالیبره کردن مدل احتراق ارزیابی گردد. در شکل ۱۳ روند منحنی توان شبیه سازی شده با منحنی تجربی در کنار هم نشان داده شده و سازگاری مناسبی را نشان می‌دهند. از دو شکل ۱۳ و ۱۴ نتیجه می‌گیریم که با افزایش فشار پاشش، ضمن افزودن نرخ پاشش به ویژه در دورهای بالا، نرخ تغییرات مصرف سوخت کاسته شده و مصرف مخصوص سوخت بهبود می‌یابد. افزایش فشار پاشش باعث ورود هوای بیشتر به داخل افشانه و اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌شود و این در حالی است که بدون تاثیر بر زمان تاخیر در اشتعال، زمان احتراق کاهش و وضعیت احتراق بهتر می‌شود. با توجه به شکل ۱۳ و ۱۴ بیشترین توان در حالت فشار پاشش ۲۶۵ bars بدست می‌آید و کمترین مصرف سوخت ویژه در حالت کارکرد موتور با فشار پاشش ۲۵۰ bars اتفاق می‌افتد.

شکل ۱۵ تغییرات NOx شبیه سازی شده برای سه فشار پاشش متفاوت ۲۵۰، ۲۶۵ و ۲۳۵ را بر حسب زاویه لنگ در یک پریود احتراق برای همان دور نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش فشار تزریق NOx افزایش می یابد و این به علت افزایش کسر احتراق پیش مخلوط با افزایش فشار پاشش است. بیشترین NOx در گشتاور ماکزیمم تولید می شود و این همان نقطه ای است که ضریب لامبدا به کمترین حد خود می رسد و شرایط احتراق به استکیومتریکی نزدیکتر است. همراه با ریتارد زاویه پاشش به ۱۵-۱۰ و ۵-۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا، گشتاور افت می کند و مقدار آلاینده NOx به طور قابل توجهی کاهش می یابد. از شکل ۱۶ ملاحظه می شود که با ریتارد پاشش سوخت، NOx کاهش می یابد زیرا دما و فشار داخل محفظه احتراق کاهش می یابد. در شکلهای ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۶ اثر استفاده خنک کن میانی بر گشتاور و آلاینده ها نشان داده شده است. اینترکولر سبب کاهش NOx می شود که شبیه سازی تولید NOx توسط کد نیز همین واقعیت را نشان می دهد.

با بررسی شکل ۷ مشاهده میشود که با افزایش فشار پاشش شاهد کاهش Soot در بارهای پایین برای موتور بدون خنک کن میانی و در بار بالا و پایین برای موتور همراه با خنک کن میانی می باشیم که ناشی از ورود هوای بیشتر به همراه افشانه سوخت به داخل محفظه احتراق و اختلاط بهتر سوخت و هوا و در نتیجه بهبود احتراق می باشد. ولی با بیشتر کردن فشار پاشش بعلت افزایش طول افشانه سوخت و برخورد با دیواره تولید Soot و HC افزایش می یابد هر چند که در دور و بار بالا بعلت افزایش دمای محفظه هر دو کاهش می یابند.

ریتارد پاشش سوخت بعلت کاهش دوره تأخیر اشتعال و دمای احتراق، سبب افزایش Soot و HC می شود هر چند که در دور های بالا بعلت افزایش دمای محفظه احتراق و کم شدن اثر تزریق، ثانویه تولید Soot کاهش می یابد. با توجه به آزمایشات انجام شده بهترین حالت عملکرد موتور در حالت موتور با توربوشارژر و با فشار پاشش ۲۵۰ bars و حدود ۷ درجه ریتارد بدست می آید که سطح آلاینده های آن در مقایسه با استاندارد های اروپا در شکل ۴ نشان داده شده است.

۶- بررسی تزریق چند مرحله ای

در این بخش اثر تزریق چند مرحله ای بر روی آلاینده NOx بررسی می شود. تزریق یک مرحله ای با طول دوره پاشش ۲۰ درجه و تزریق دو مرحله ای با زمان بندی (۱۵-۵۰) - ۸-۵۰ و سه مرحله ای با زمان بندی (۱۵-۳۴) - ۵-۳۳-۵-۳۳ با طول پاشش ۲۸ درجه برای هر دو حالت، شبیه سازی شده است. با استفاده از تزریق سوخت دو و سه مرحله ای، احتراق دومین و سومین پالس سوخت تزریق شده در اثر توقف تزریق با تأخیر مواجه است و نرخ تشکیل NOx بطور قابل ملاحظه ای در مقایسه با تزریق منفرد کاهش می یابد که اثر آن معادل ریتارد پاشش بدون افزایش درمقدار Soot و دیگر آلاینده هاست. بنابراین همانگونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، تزریق چند مرحله ای سوخت سبب کاهش NOx می شود. در شبیه سازی پاشش دو مرحله ای موتور با توربو شارژر و فشار پاشش ۲۳۵ bars آلاینده NOx با کاهش ۶ درصدی از ۱۲۲۱ ppm به ۱۱۴۷ ppm می رسد.

شبیه سازی پاشش سه مرحله ای موتور با توربوشارژر، خنک کن میانی، زاویه پاشش BTDC ۱۳ و فشار پاشش ۲۵۰ bars نشان می دهد با توان تولیدی Kw ۳۸/۱۳ آلاینده NOx با کاهش ۱۰ درصدی از ۱۱۵۱ ppm به ۱۰۳۴ ppm می رسد. توان بدست آمده از آزمایش موتور با مشخصات ذکر شده Kw ۳۵ است که در این حالت مقدار آلاینده ppm ۱۰۶۳ است.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

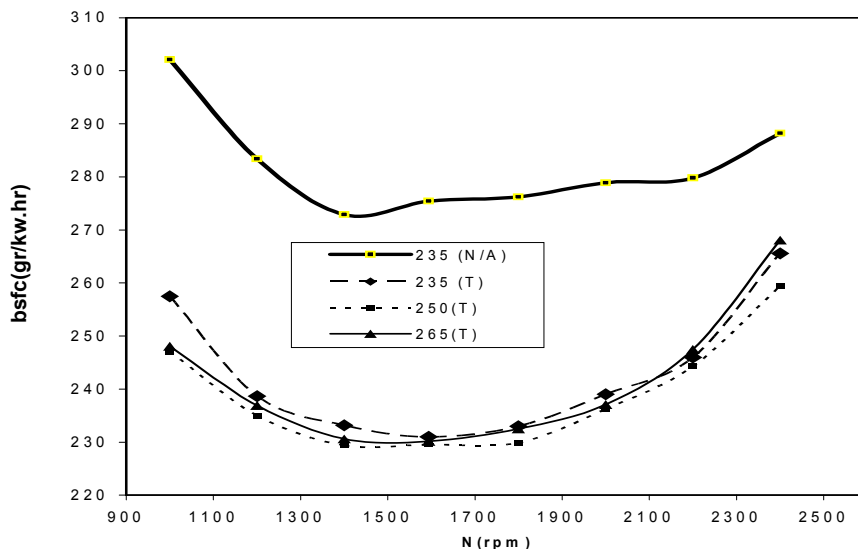
- ۱- ریتارد زمان تزریق سوخت سبب کاهش قدرت خروجی می شود و کاهش قابل توجه آلاینده NOx را نیز به همراه دارد. آوانس زمان تزریق نیز سبب کاهش توان و افزایش آلاینده NOx می شود.
- ۲- بررسی اثر فشار تزریق بر روی قدرت خروجی و آلاینده NOx نشان داد که با افزایش فشار تزریق از ۲۳۵ bars به ۲۶۵ bars قدرت خروجی و آلاینده NOx افزایش و Soot کاهش می یابد. در حالت تزریق با فشار ۲۵۰ bars کمترین مصرف

سوخت ویژه بدست می آید. در حالت تزریق با فشار ۲۶۵ bars مقدار آلاینده HC افزایش می یابد و تغییرات قدرت خروجی نسبت به تزریق با فشار ۲۵۰ bars قابل توجه نیست و مصرف ویژه سوخت نیز بیشتر است که دلیل آن افزایش طول پاشش و پدیده برخورد جت با دیواره و پیامدهای آن می باشد.

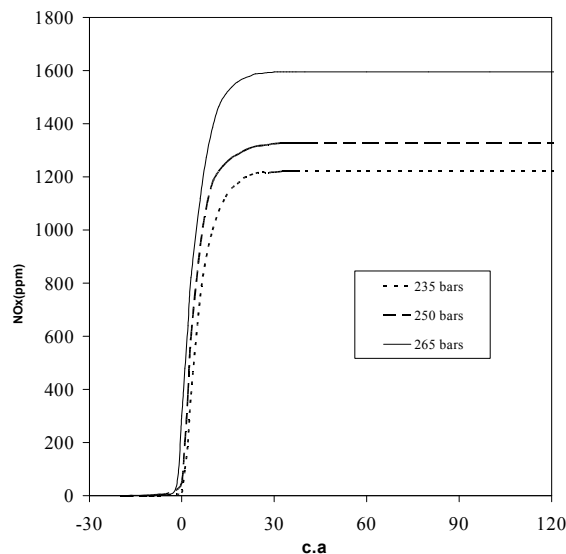
۳- با توجه به نتایج آزمایشگاهی، استفاده از توربوشارژر به همراه خنک کن میانی مناسب سبب کاهش شدید تولید Soot میگردد که دلیل عمده آن را میتوان به بهبود احتراق و افزایش طول دوره احتراق کنترل شده نسبت داد.

۴- تزریق چند مرحله ای آلاینده NOx را کاهش داده و اثر آن شبیه ریتارد پاشش است. در حالت پاشش تک مرحله ای موتور با توربوشارژر و فشار پاشش ۲۳۵ bars آلاینده NOx معادل ۱۱۳۵ ppm تولید می کند و حل عددی مقدار ۱۲۲۱ ppm برای آلاینده NOx را نشان می دهد. با مشابه سازی پاشش دو مرحله ای آلاینده NOx با کاهش ۶ درصدی به ۱۱۴۷ ppm میرسد. مشابه سازی پاشش سه مرحله ای موتور با توربوشارژر، خنک کن میانی، فشار پاشش ۲۵۰ bars و زاویه پاشش BTDC ۱۳ نشان داد آلاینده NOx با کاهش ۱۰ درصدی از ۱۱۵۱ ppm به ۱۰۳۴ ppm می رسد که در این حالت موتور قابلیت برآورد محدودیت موجود برای آلاینده NOx در استاندارد EURO II را دارد.

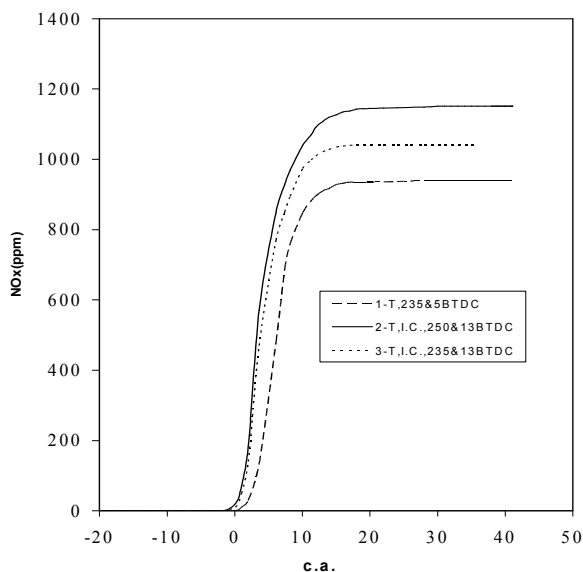
B S F C



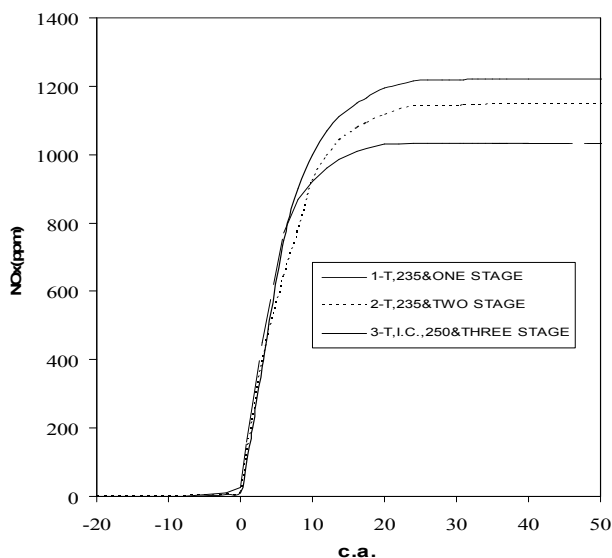
شکل ۱۴: منحنی مصرف مخصوص سوخت با فشار پاشش ۲۶۵ و ۲۵۰، ۲۳۵ bars



شکل ۱۵: تغییرات آلاینده NOx در دور ۱۴۰۰ برحسب زاویه لنگ (توربو شارژر، فشار پاشش ۲۳۵، ۲۵۰ و ۲۶۵ بار و ریتارد تا ۱۳ درجه)



شکل ۱۶: تغییرات آلاینده های NO در دور ثابت ۱۴۰۰ بر زاویه لنگ
 (۱- توربوشارژ، فشار پاشش ۲۳۵ بار، ریتارد تا ۵ درجه)
 (۲- توربوشارژ، خنک کن میانی، فشار پاشش ۲۵۰ بار، ریتارد تا ۱۳ درجه)
 (۳- توربوشارژ، خنک کن میانی، فشار پاشش ۲۳۵ بار، ریتارد تا ۱۳ درجه)



شکل ۱۷: تغییرات NOx بر حسب زاویه لنگ
 (۱- پاشش یک مرحله ای با فشار و طول دوره پاشش ۲۳۵ بار و ۲۰ درجه با، ریتارد ۱۳ درجه)
 (۲- پاشش دو مرحله ای با فشار و طول دوره پاشش ۲۳۵ بار و ۲۸ درجه با، ریتارد ۱۳ درجه)
 (۳- پاشش سه مرحله ای با فشار و طول دوره پاشش ۲۵۰ بار و ۲۸ درجه با، ریتارد ۱۳ درجه)

مراجع

1. Shimada T., Shoji T. and Takeda., Y "The Effect of Fuel Injection Pressure on Diesel Engine Performance", SAE Paper 90194, 1999.
2. Shundoh, S., Kakegawa, I., Tsujimura, K., "The Effect of Injection Parameters and Swirl on Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper 910489, 1991.
3. Manfred Dürnholz, Helmut Endres, and Peter Fnsse , " Pre-injection, A Measure to Optimize the Emission Behavior of DI-Diesel Engine", SAE Paper 940674, 1994
4. 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.
5. Tow, T., Pierpont, A. and Reitz, R. D., "Reducing Particulates and NOx Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine", SAE Paper 940897, 1994.
6. D. A. Pierpont and R. D. Reitz, "Effects of Injection Pressure and Nozzle Geometry on Diesel Emissions and Performance", SAE Paper 950604, 1995.
7. Pierpont, D. A., Montgomery, D. T. and Reitz, R. D., Reducing Particulate and NOx Using Multiple Injections and EGR in a D. I. Diesel", SAE Paper 950217, 1995.
8. Montgomery, D. T., and Reitz, R. D., "Six-mode Cycle Evaluation of the Effect of EGR and Multiple Injections on Particulate and Nox Emission from a D. I. Diesel Engine", SAE Paper 960316, 1996.
9. Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., and Reitz, R. D., "Method of Soot and NOx Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine", SAE Paper 960633, 1996.
10. Amsden, P. J. O'Rourke, and T. D. Butler, "KIVA-II A computer program for chemically reactive flows with sprays", Tech. Rep. -11560 - MS, Los Alamos National Laboratory, 1989.