

## مطالعه عددی تاثیر ایجاد سلول هوا و عایقکاری پیستون بر روی فرایند احتراق و تولید آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی پاشش مستقیم

صمد جعفرمدار<sup>\*۱</sup>، رامین برزگر<sup>\*\*۲</sup>، مستانه حسین زاده<sup>\*\*\*۱</sup> و شهرام خلیل آریا<sup>\*\*\*\*۱</sup>

۱- دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد پارس آباد مغان، گروه مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۸۹/۹/۱۳)

در کار حاضر به منظور بررسی تاثیرات تزریق فواره (Jet) هوا به داخل محفظه احتراق و همچنین استفاده از پیستون عایق بر روی فرایند احتراق، تولید آلاینده‌ها و متغیرهای عملکردی در یک موتور دیزلی پاشش مستقیم، طرحی ارائه شده است که در آن در داخل یک پیستون عایق محفظه‌ای فرعی ایجاد شده که از طریق گلوگاه‌هایی به محفظه احتراق اصلی متصل می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از سلول هوا می‌تواند روش موثری برای کاهش ذرات دوده خروجی از یک موتور دیزلی پاشش مستقیم بوده و همچنین باعث کاهش در مقدار آلاینده  $NO_x$  خروجی شود. استفاده از پیستون عایق سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت ویژه و افزایش قابل توجهی در فشار موثر متوسط داخل سیلندر می‌شود، در حالی که تاثیر قابل توجهی بر روی ذرات دوده خروجی ندارد. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از پیستون عایق به دلیل کاهش انتقال گرما و بالا رفتن دمای داخل سیلندر منجر به افزایش  $NO_x$  به میزان قابل توجهی نسبت به موتور پایه می‌شود. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه شده و رفتار قابل قبولی را نشان می‌دهد.

**کلیدواژه:** موتورهای دیزلی، کاهش آلاینده‌ها، سلول هوا، فواره هوا، پیستون عایق

### مقدمه

موتورهای دیزلی به انواع گسترده‌ای از موتورهای گفته می‌شود که بدون نیاز به یک جرقه الکتریکی می‌تواند ماده سوختنی را شعله‌ور سازد. این موتورها در مقایسه با موتورهای بنزینی دارای بازده سوخت بالاتر و دوام بیشتری هستند. آلاینده‌های اصلی منتشر شده از این موتورها دوده و اکسیدهای ازت ( $NO_x$ ) بوده، در حالی که هیدروکربن‌های نسوخته و منوکسیدکربن تولیدی کم و قابل چشمپوشی است.

امروزه در بیشتر کشورهای جهان قوانین بسیار سختی برای آلاینده‌های خروجی از موتورهای دیزلی اعمال می‌شود. به منظور کاهش این آلاینده‌ها و افزایش کارایی و بازده موتورهای دیزلی، تحقیقات زیادی به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام می‌شود. شبیه‌سازی عددی سیستم‌های احتراق توسط مدل‌های پیشرفته رایانه‌ای، امکان مطالعه انواع شرایط احتراقی را که به صورت تجربی هزینه‌بر یا مشکل است، میسر می‌سازد. شبیه‌سازی عددی به دو قسمت عمده مدل‌های ترمودینامیکی و مدل‌های میدان جریان تقسیم‌بندی می‌شود. برخلاف مدل‌های ترمودینامیکی، با استفاده از مدل‌های میدان جریان می‌توان نحوه پخش قطرات، توزیع موضعی دما و فشار داخل سیلندر را در هر نقطه و زمان مطالعه کرد.

\* استادیار (ایمیل: s.jafarmadar@urmia.ac.ir)

\*\* کارشناس ارشد، مربی (ایمیل: barzegar@iaupmogan.ac.ir)

\*\*\* دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک- نویسنده مخاطب (ایمیل: mastaneh\_h62@yahoo.com)

\*\*\*\* دانشیار (ایمیل: sh.khalilarya@urmia.ac.ir)

هیوود [۱] احتراق موتور دیزلی را به چهار قسمت اصلی تاخیر در اشتعال، احتراق پیش آمیخته یا سریع، احتراق نفوذی و دنباله احتراق یا احتراق کند تقسیم‌بندی کرد. چوی ووک و همکاران [۲] به مطالعه میدان چرخشی جریان موتور تک سیلندر دیزلی پرداختند و نشان دادند که مدل  $k-\varepsilon$  رینولدز بالا، برای این جریان‌ها مناسب است. هو و آبراهام [۳] نیز با استفاده از مدل‌های عددی، علاوه بر تراکم، احتراق و انبساط، مراحل مکش و تخلیه را نیز مدلسازی کردند.

کاهش مقدار انرژی اتلافی از موتور احتراق داخلی، بازده گرمایی موتور را افزایش داده و متغیرهای عملکردی موتور نظیر توان، مصرف سوخت ویژه و فشار موثر متوسط را بهبود می‌بخشد.

در موتورهای احتراق داخلی متداول، تقریباً یک سوم انرژی ورودی ناشی از سوخت به کار مفید تبدیل می‌شود. در عمل بخش مهمی از انرژی از طریق گازهای خروجی و بخش مهم دیگری به صورت گرما توسط خنک‌کننده از دست می‌رود. در صورت تبدیل این انرژی اتلافی به کار مفید میل‌لنگ، بهبود قابل توجهی را در اقتصاد سوخت شاهد خواهیم بود.

مهم‌ترین تحقیقات در زمینه موتورهای عایق (LHR- Low Heat Rejection)، توسط بریزیک و کامو انجام شده‌اند [۴-۸]. کاومورا و همکاران [۹] از طریق اتصال یک محفظه پیش احتراق به قسمت میانی سر سیلندر موتور دیزلی LHR، توسط گلوگاهی که مجراهای آن به سمت سطح داخلی سیلندر است در حدود ۱۰ درصد بهبود در مصرف سوخت نسبت به موتور دیزلی معمولی به دست آوردند. چنگ و همکاران [۱۰] خصوصیات انتقال گرما در موتورهای دیزلی عایق شده و عایق نشده را در سرعت و بارگذاری و نرخ جریان هوای مشابه با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند، موتور عایق شده در مقایسه با موتور فلزی، مصرف ویژه ترمزی (BSFC- Brake Specific Fuel Consumption) بالاتری داشته که دلیل آن را به فرایند احتراق کندتر در این موتور نسبت داده‌اند.

تحقیقات زیادی نیز جهت کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و  $\text{NO}_x$  خروجی از موتورهای دیزلی انجام شده است. کاوازو و همکاران [۱۱] با استفاده از تزریق هوا به داخل محفظه احتراق موتور دیزلی توسط یک پمپ پیستونی، آلاینده دوده خروجی را به میزان قابل توجهی کاهش دادند ولی این عمل منجر به افت توان شدیدی در موتور شد. ناگانو و همکاران [۱۲] با ایجاد فواره (Jet) هوا توسط یک ژنراتور انبساط هوا در یک موتور دیزلی پاشش مستقیم، آلاینده‌های دوده و  $\text{NO}_x$  را به میزان موثری کاهش دادند. چوی و همکاران [۱۳] در یک کار تجربی با تزریق فواره دی‌اکسیدکربن و نیتروژن گازی با فشار زیاد به داخل محفظه احتراق در موتور دیزلی پاشش مستقیم، اثر افزایش اختلاط را بر روی آلاینده‌ها بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که پاشش نیتروژن به محفظه باعث بهینه شدن اختلاط و افزایش اکسیداسیون دوده می‌شود. همچنین با تاخیر در پاشش سوخت و تزریق گاز، میزان دوده کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. تزریق دی‌اکسیدکربن نیز باعث کاهش ذرات آلاینده خروجی می‌شود.

به دلیل رفتار متضاد تولید آلاینده‌های دوده و  $\text{NO}_x$  در موتورهای احتراقی، برای کاهش همزمان این دو باید به مطالعه دقیق میدان جریان سیال در داخل محفظه احتراق، مطالعه دقیق اسپری و اثرات متقابل آن‌ها پرداختیم. یکی از موثرترین روش‌ها استفاده از مدلسازی‌های سه‌بعدی است. اولودوغان و همکاران [۱۴] با استفاده از کد عددی KIVA II به بررسی تاثیر تعداد افشانه (Injector) و پاشش چند مرحله‌ای در یک موتور دیزلی پاشش مستقیم پرداختند. افزایش تعداد افشانه باعث کاهش همزمان آلاینده‌های دوده و  $\text{NO}_x$  و در عین حال افزایش چگالی توان موتور می‌شود.

ریتز و همکاران [۱۵] نشان دادند که استفاده از بازخورانی گازهای خروجی (EGR- Exhaust Gas Recirculation) به همراه پاشش چند افشانه‌ای باعث کاهش شدید دوده و  $\text{NO}_x$  بدون تاثیر منفی روی مصرف سوخت ویژه می‌شود. ماتر و ریتز [۱۶] طرحی ارائه کردند که در آن یک محفظه فرعی در داخل پیستون ایجاد شده و توسط گلوگاهی به محفظه احتراق اصلی متصل می‌شود. نتایج عددی به دست آمده نشان داد که با استفاده از این روش، مقدار دوده خروجی در حدود دو برابر نسبت به حالت پایه محفظه احتراق کمتر شده است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از سلول هوا باعث کاهش در مقدار آلاینده  $\text{NO}_x$  خروجی نیز می‌شود.

در کار حاضر با استفاده از نرم افزار Fire.V8.3 و حل همزمان معادلات پیوستگی، متوسط زمانی تکانه (مغشوش)، انرژی، مدل احتراق و مدل دقیق تر اسپری برای پاشش فواره سوخت و پخش قطرات [۱۷] به مطالعه و بررسی فرایند احتراق و تولید آلاینده‌ها در یک موتور دیزلی نمونه پرداخته می‌شود. ابتدا فرایند احتراق در موتور دیزلی پایه Caterpillar-3401 پرخوران شده مورد بررسی قرار گرفته و سپس با تغییر در هندسه پیستون و ایجاد یک سلول فرعی در داخل بدنه پیستون و تشکیل فواره هوا از طریق این سلول به بررسی نحوه تغییر متغیرهای عملکردی موتور و آلاینده‌های دوده و  $\text{NO}_x$  تولیدی پرداخته می‌شود. در نهایت با عایق کردن پیستون و سلول هوا و گلوگاه‌های رابط، تاثیر همزمان کاهش اتلاف گرمایی و تزریق فواره هوا به داخل محفظه احتراق بر روی فرایند احتراق و تولید آلاینده‌ها و متغیرهای عملکردی موتور بررسی می‌شود.

## تشریح مدل

برای بررسی تاثیر تزریق فواره هوا به داخل محفظه احتراق همزمان با کاهش مقدار انرژی گرمایی اتلافی از موتور بر روی متغیرهای موتور، مدلسازی برای هر سه حالت موتور پایه و موتور اصلاح شده توسط ایجاد سلول هوا و سپس موتور عایق انجام شده است. برای ایجاد سلول هوا، داخل پیستون پایه محفظه‌ای ایجاد می‌شود که توسط گلوگاه‌هایی به کاسه پیستون مرتبط شده است. روش کار سلول هوا به این طریق است که در مرحله تراکم مقداری هوا از طریق گلوگاه به آن وارد شده و با فشار زیاد داخل آن ذخیره می‌شود، سپس در مرحله انبساط با کاهش فشار محفظه احتراق اصلی به آن وارد شده و باعث احتراق بهتر و کامل تر سوخت در مراحل نهایی احتراق می‌شود.

حجم اولیه محفظه احتراق در هر سه حالت یکسان بوده و حجم سلول هوا ۱۶ درصد حجم محفظه در نقطه مرگ بالاست. حجم در نظر گرفته شده برای سلول هوا نظیر حجم یک محفظه پیش پاشش (Pre-Injection Chamber) در موتور دیزل پاشش غیر مستقیم (In-Direct Injection) بوده و بر مبنای بیشترین تکانه فواره هوا انتخاب شده است. بر این اساس طول ضلع بزرگ تر سلول هوا ۳۴ میلی‌متر و طول ضلع کوچک تر ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین قطر دهانه گلوگاه‌های رابط از بالا که به پیستون متصل می‌شود، ۳/۵ میلی‌متر و از پائین که به سلول هوا متصل می‌شود، ۵ میلی‌متر بوده که این اعداد برای داشتن تکانه بیشینه برای حجم سلول هوای خاص به کار رفته، تا حد ممکن به قطرهای بهینه نزدیک است [۱۶]. سایر مشخصات موتور اصلاح شده مشابه با مشخصات موتور پایه است. مشخصات هندسی و عملکردی موتور مدلسازی شده در جدول (۱) و دماهای تجربی موتور در جدول (۲) آمده است. دماهای مرزی ثابت بوده و در حالت عایق دیواره‌های پیستون، گلوگاه رابط و سلول هوا با استفاده از لایه‌های سرامیکی ساخته شده از موادی مانند  $\text{CaZrO}_3$  و  $\text{MgZrO}_3$  پوشانده شده و به این طریق بی‌دررو می‌شود. جهت توضیحات بیشتر در مورد نحوه بی‌دررو کردن به کارهای تجربی انجام شده در منابع [۱۸] تا [۲۰] می‌توان مراجعه کرد.

شکل (۱) نمایی از شبکه محاسباتی متقارن تولید شده برای حالت افشانه شش سوراخه با قطاع ۶۰ درجه و با شبکه بیشینه شامل ۲۱۵۰۰ سلول در زاویه  $147^\circ \text{CA}$  را برای موتور دیزلی پاشش مستقیم Caterpillar-3401 نشان می‌دهد. مطالعات انجام شده توسط لیو و همکاران [۲۱] نشان می‌دهد که خطای استفاده از شبکه متقارن در مطالعه رفتار متغیرهای موتور واقعی (تاج پیستون و افشانه خارج از مرکز)، قابل چشمپوشی است. در شکل (۲) نیز هندسه اصلاح شده موتور نمونه دیده می‌شود.

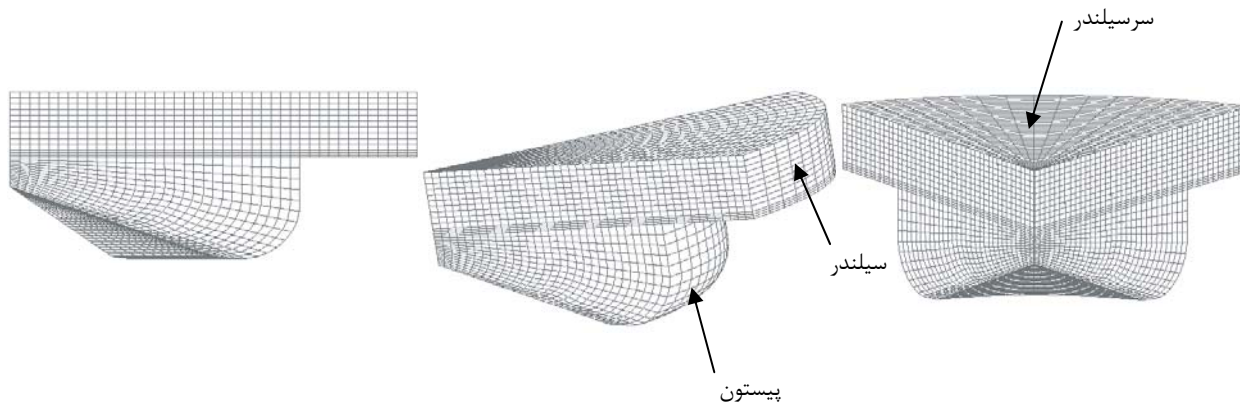
مدل استفاده شده یک مدل سه بعدی است که به صورت یک سیستم ترمودینامیکی، از زاویه  $147^\circ$  - درجه میل‌لنگ (نقطه بسته شدن سوپاپ ورودی) شروع شده و تا زاویه ۱۰۰ درجه میل‌لنگ (نقطه باز شدن سوپاپ خروجی) ادامه پیدا می‌کند. دور موتور در نظر گرفته شده ۱۶۰۰ دور بر دقیقه بوده و دما و فشار ورودی به ترتیب ۳۴۴ کلوین و ۲۰۰ کیلو پاسکال است. شدت چرخش هوای داخل سیلندر برای حالت موتور پایه مورد بررسی و برای موتور اصلاح شده، یکنواخت در نظر گرفته شده و درصد گازهای برگشتی صفر فرض شده است. همچنین حجم‌های اولیه و جابه‌جایی و نیز نسبت تراکم در هر سه حالت یکسان است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و عملکردی موتور پرخوران Caterpillar-3401

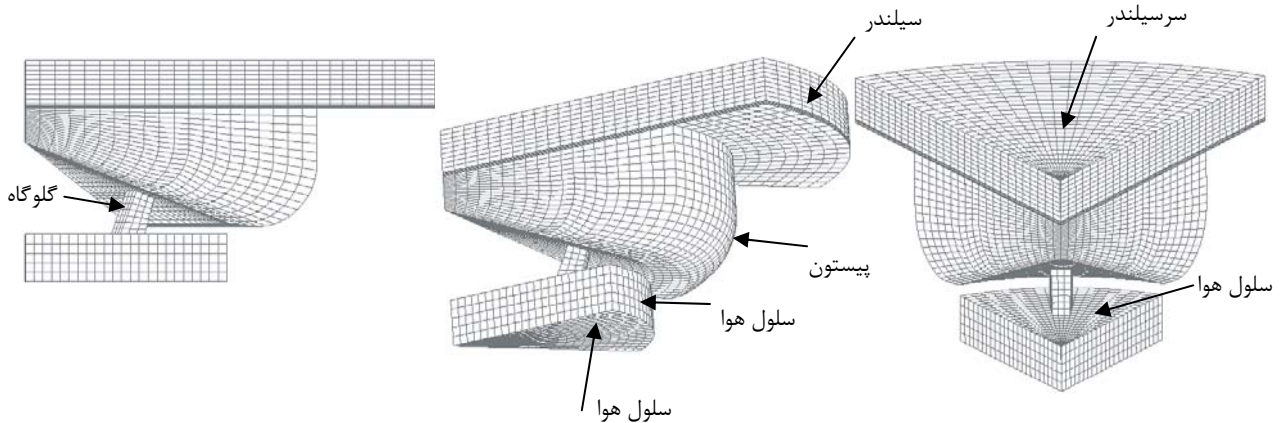
نوع چرخه	چهار زمانه
تعداد سیلندر	۶
نوع پاشش	پاشش مستقیم
قطر سیلندر	۱۳۷/۶ mm
کورس پیستون	۱۶۵/۱ mm
طول شاتون	۲۶۱/۶۲ mm
حجم جابه‌جایی	۲/۴۴ lit
نسبت تراکم	۱۵/۱:۱
دور موتور	۱۶۰۰ rpm
مقدار سوخت در حالت بار کامل	۰/۱۶۲۲ gr/cycle
مقدار سوخت در حالت ۷۵ درصد بار کامل	۰/۱۲۱۶۵ gr/cycle
فشار پاشش	۹۰ MPa
زمانبندی شروع پاشش	۸/۵ CA BTDC
قطر سوراخ افشانه در مرکز سوراخ	۳ mm
تعداد سوراخ افشانه	۶
قطر خارجی نازل	۰/۲۵۹ mm
زاویه مخروط پاشش	۱۰°
طول بازه پاشش	۲۱/۵°
نسبت هم ارزی کلی	۰/۴۸
سیستم پاشش	ریل مشترک (Common Rail)

جدول ۲- دماهای تجربی موتور Caterpillar-3401

سیلندر	۴۳۳ K
پیستون	۵۵۳ K
سرسیلندر، سلول هوا و گلوگاه	۵۲۳ K
هوای ورودی	۳۶۱±۱۵ K
سوخت	۳۴۱ K



شکل ۱- شبکه محاسباتی برای حالت پایه در زاویه ۲۰ BTDC



شکل ۲- شبکه محاسباتی برای حالت سلول هوا در زاویه BTDC ۲۰

## معادلات حاکم

مدل اغتشاشی به کار رفته  $k - \epsilon$  است که برای جریان‌های با چگالی متغییر اصلاح شده است. مدل خود اشتعالی شل (Shell) برای مدلسازی خود اشتعالی به کار گرفته می‌شود [۲۲-۲۳]. فرایند احتراق نیز با استفاده از مدل ادی برکاپ (Eddy Breakup) مدل می‌شود [۲۴]. در این مدل نرخ مصرف سوخت به عنوان تابعی از ویژگی‌های محلی جریان معرفی شده و کمترین نرخ توزیع سوخت، اکسیژن و محصولات به عنوان نرخ واکنش سوخت در نظر گرفته شده است و معادله انتقال برای جزء جرمی سوخت به صورت زیر است:

$$S_{fu} = -\rho \epsilon / \kappa \min \left[ C_R m_{fu}, C_R \frac{m_{ox}}{s}, C_R' \frac{m_{pr}}{1+s} \right] \quad (1)$$

در معادله بالا  $\kappa$  نرخ تولید و یا انرژی جنبشی اغتشاشی و  $\epsilon$  نرخ از بین رفتن اغتشاش و یا توزیع  $\kappa$  است.  $m_{ox}$  و  $m_{fu}$  به ترتیب جزء جرمی سوخت، اکسیژن و محصولات بوده و  $C_R$  و  $C_R'$  به عنوان ثابت‌های مدل در نظر گرفته می‌شود.

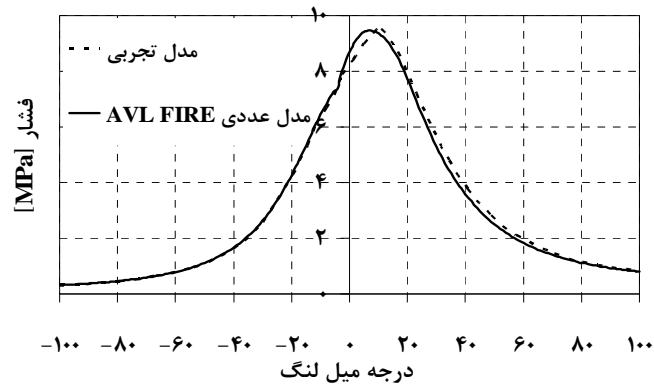
برای شرح ناپایداری فواره سوخت و جدایش اولیه و ثانویه به دلیل سیستم پاشش فشار بالا، مدل استاندارد ویو (Wave) به کار رفته است [۲۵]. در این مدل قطر قطرات خروجی از نوک نازل برابر در نظر گرفته می‌شود. مدل تبخیر دوکوییکز با فرض توزیع یکنواخت دما به منظور بررسی انتقال گرما و تبخیر شدن قطرات استفاده شده است [۲۶]. در این مدلسازی مدل زلدویچ برای سازوکار تشکیل  $NO_x$  به کار رفته است [۲۷]. تولید  $NO_x$  به تغییرات دمایی داخل سیلندر بسیار حساس بوده و در این مدل تشکیل اکسید نیتروژن یک واکنش وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود. مدل کندی-هیرویاسو-مگنوسن (Kennedy-Hiroyasu-Magnussen) برای مدلسازی تشکیل و اکسیداسیون دوده به کار می‌رود [۲۸]. برای پیشگویی برخورد فواره سوخت با دیواره و انتقال گرما از مدل استاندارد توابع دیواره استفاده شده است.

معادلات بالا به طور همزمان برای مدلسازی پخش و احتراق قطرات سوخت در میدان جریان مغشوش، بررسی امکان برخورد فواره سوخت با دیواره و نرخ احتراق سوخت دیزل توسط الگوریتم فشار دو مرحله‌ای به طور عددی حل می‌شود. نتایج مدل بالا در بخش زیر آمده است.

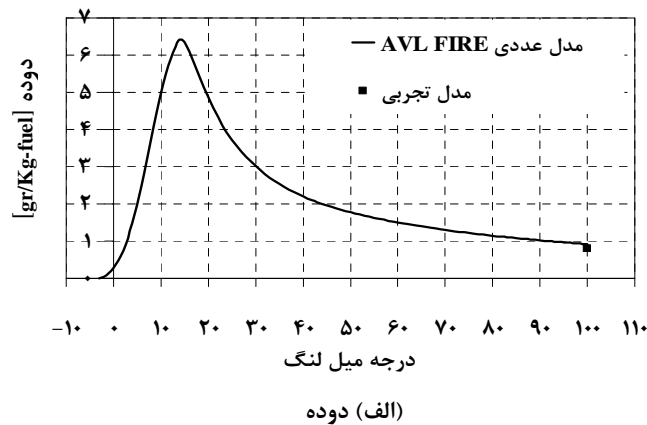
## نتایج عددی

محاسبات برای موتور دیزلی پاشش مستقیم کاتر پیلا ۳۴۰۱ پرخوران در ۷۵ درصد بارگذاری و با سرعت ثابت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. شکل (۳) مقایسه منحنی فشار متوسط داخل سیلندر را برای حالت موتور پایه با نتایج تجربی مرجع [۱۴] و شکل (۴) نیز مقایسه میزان آلاینده‌های دوده و  $NO_x$  موتور پایه را (در ۱۰۰ درصد بارگذاری) با نتایج تجربی مرجع [۲۹] نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نتایج به دست آمده از مدل و نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد. همچنین با توجه به

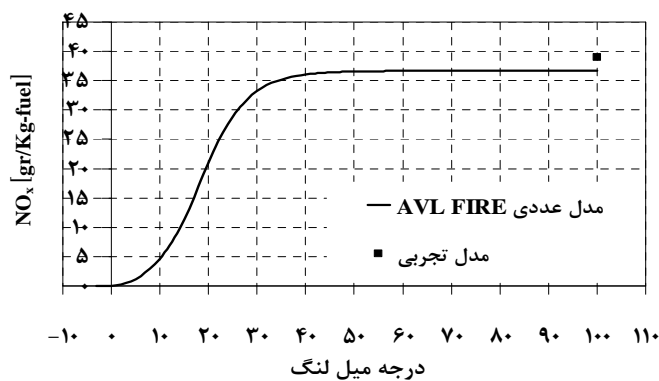
نمودار ملاحظه می‌شود، اختلاف فشار بیشینه بین مدل تجربی و مدل محاسبه شده کمتر از ۱ درصد بوده و تفاوت بین زمان شروع احتراق و نیز مدت زمان تاخیر در اشتعال کمتر از ۲ درجه میل‌لنگ است. در شکل (۵) به منظور اطمینان از هندسه موتور اصلاح شده توسط افزودن سلول هوا، مقایسه‌ای بین منحنی فشار متوسط داخل سیلندر با نتایج به دست آمده از کد عددی KIVA II [۱۶] در شرایط اولیه و مرزی مشابه صورت گرفته است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج به دست آمده وجود دارد.



شکل ۳- مقایسه منحنی فشار متوسط داخل سیلندر با نتایج تجربی برای حالت موتور پایه بر حسب درجه میل‌لنگ

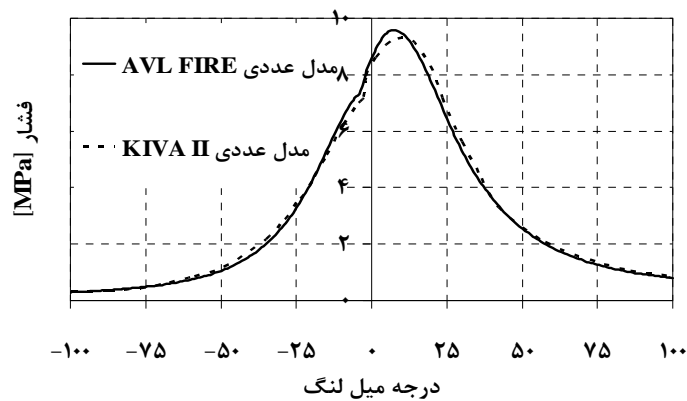


دوده (الف)



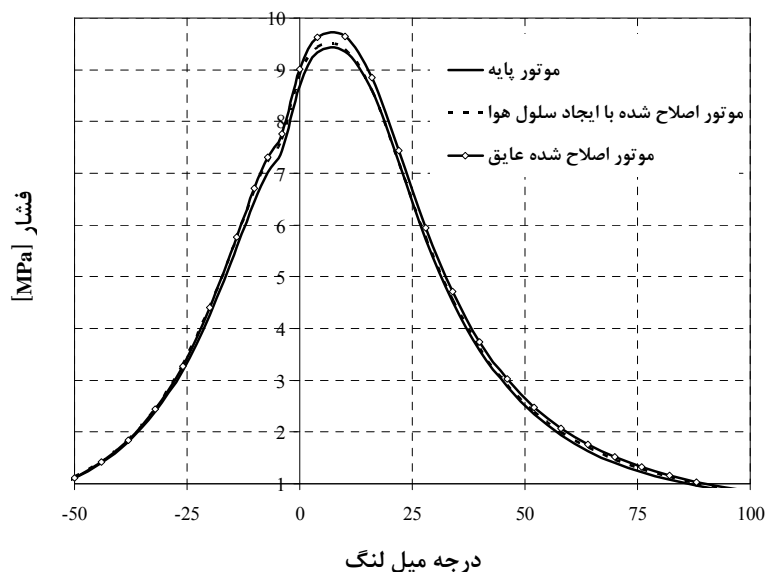
NO<sub>x</sub> (ب)

شکل ۴- مقایسه منحنی تولید دوده و NO<sub>x</sub> با نتایج تجربی برای حالت موتور پایه بر حسب درجه میل‌لنگ در ۱۰۰ درصد بارگذاری



شکل ۵- مقایسه منحنی فشار متوسط داخل سیلندر با نتایج عددی برای حالت موتور اصلاح شده بر حسب درجه میل لنگ

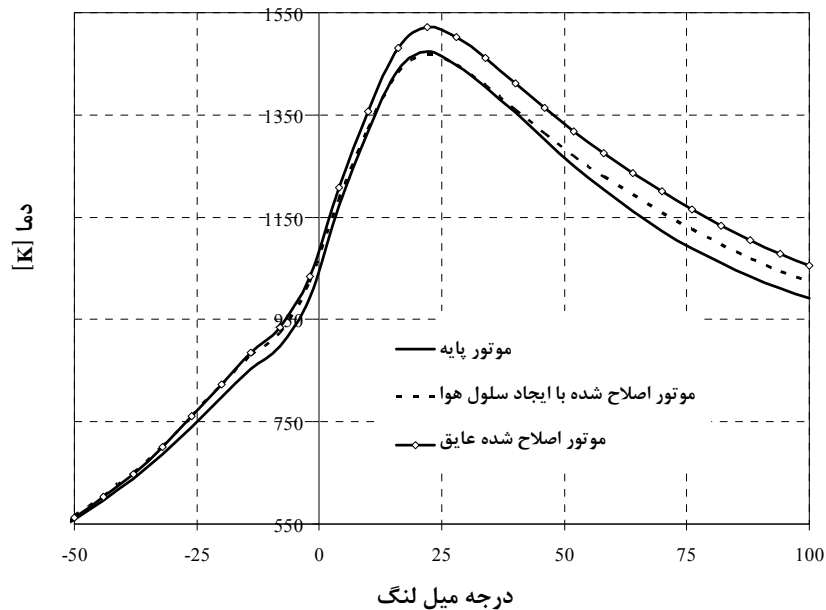
شکل (۶) مقایسه منحنی فشار متوسط داخل سیلندر را برای هر سه حالت موتور پایه، موتور اصلاح شده و موتور اصلاح شده عایق نشان می‌دهد. فشار بیشینه در هر سه حالت در ۷ CA ATDC اتفاق می‌افتد. افزودن سلول هوا به موتور پایه به دلیل تغییر در هندسه موتور و همچنین تغییر در الگوی میدان جریان منجر به افزایش فشار جزئی در موتور اصلاح شده نسبت به موتور پایه در قبل از شروع احتراق می‌شود. این امر فشار بیشینه را در موتور اصلاح شده به مقدار بسیار جزئی (تقریباً ۱ درصد) افزایش می‌دهد. در حالت عایق به دلیل کاهش اتلافات گرمایی، گرمای بیشتری در داخل سیلندر باقی مانده و باعث افزایش دما و متعاقب آن افزایش فشار داخل سیلندر می‌شود.



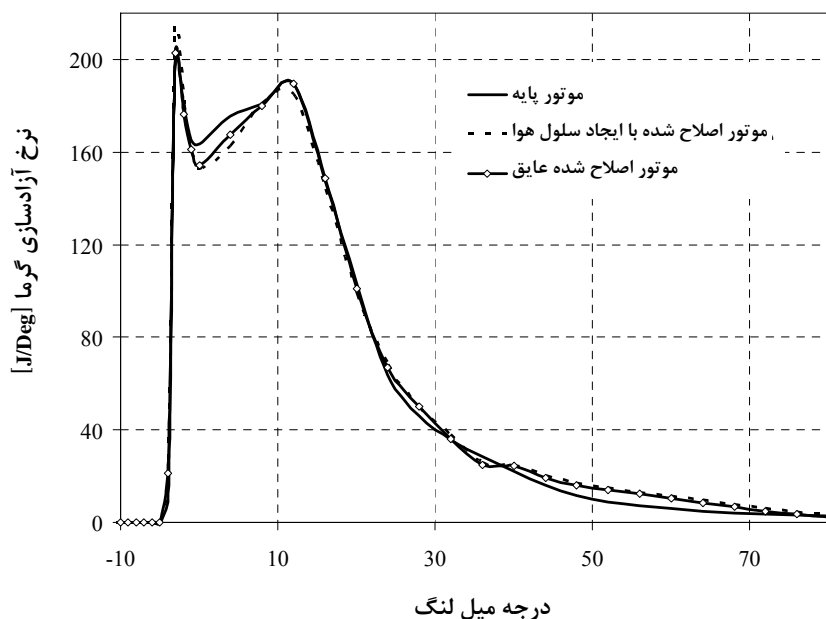
شکل ۶- مقایسه منحنی فشار متوسط داخل سیلندر برای هر سه حالت مورد مطالعه بر حسب درجه میل لنگ

شکل (۷) منحنی دمای متوسط محفظه احتراق را بر حسب درجه میل لنگ نشان می‌دهد. دما بیشینه در هر سه حالت در حدود ۲۲ CA ATDC روی می‌دهد. با پایین آمدن فشار در داخل محفظه اصلی در مرحله انبساط، هوای ذخیره شده در سلول هوا به محفظه اصلی تزریق شده و باعث احتراق باقی مانده سوخت می‌شود. با ایجاد سلول هوا به دلیل ادامه یافتن احتراق در مرحله نفوذی، بیشینه دمای خروجی نیز افزایش می‌یابد. عایق کردن به دلیل کاهش اتلافات گرمایی، بیشینه دمای داخل سیلندر را در حدود ۵۴ کلوین افزایش می‌دهد.

با توجه به منحنی شدت آزادسازی گرما (Rate of Heat Release)، شکل (۸)، مدت زمان تاخیر در اشتعال در هر سه حالت مورد مطالعه یکسان است. بنابراین میزان مخلوط سوخت و هوای تولیدی برای فاز پیش آمیخته در هر سه مورد یکسان بوده و مرحله پیش آمیخته تقریباً یکسانی را داراست. در موتور اصلاح شده به علت کمبود هوا در مرحله تراکم، فاز نفوذی اولیه آهسته‌تر از حالت پایه است. اما در دنباله احتراق (بعد از CA 20 ATDC) به علت ورود اکسیژن از سلول هوا به محفظه احتراق در طی مرحله انبساط، میزان اکسیژن موجود در مرحله نفوذی افزایش یافته، بنابراین فاز نفوذی در موتور اصلاح شده نسبت به موتور پایه بیشتر است. در حالت عایق نیز تغییر قابل توجهی در مرحله نفوذی نسبت به موتور اصلاح شده به وجود نمی‌آید.



شکل ۷- مقایسه منحنی دمای متوسط محفظه احتراق برای هر سه حالت مورد مطالعه بر حسب درجه میل لنگ



شکل ۸- مقایسه منحنی شدت گرمای آزاد شده برای هر سه حالت مورد مطالعه بر حسب درجه میل لنگ



## متغیرهای عملکردی

جدول (۳) تغییرات متغیرهای عملکردی شامل کار، توان، فشار موثر متوسط اندیکه (IMEP-Indicated Mean Effective Pressure) و همچنین مصرف سوخت ویژه اندیکه (ISFC- Indicated Specific Fuel Consumption) موتور را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه متغیرهای عملکردی موتور شش سیلندر Caterpillar-3401

موتور اصلاح شده عایق	موتور اصلاح شده با ایجاد سلول هوا	موتور پایه	
۱۳/۰۶	۱۲/۱۰	۱۲/۰۰	کار [KJ/cycle]
۱۷۴/۰۹	۱۶۱/۲۹	۱۵۹/۹۶	توان اندیکه [KW]
۲۰۱/۱۰	۲۱۶/۹۶	۲۱۸/۷۶	مصرف سوخت ویژه اندیکه (ISFC) [gr/kw-hr]
۸/۸۶	۸/۲۱	۸/۱۵	فشار موثر متوسط اندیکه (IMEP) [bar]

کار هر چرخه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} PdV \quad (2)$$

وقتی که  $\theta_1$  و  $\theta_2$  به ترتیب شروع و پایان مرحله بستن سوپاپ‌هاست (i.e. IVC=147 CA BTDC and EVO=100 CA ATDC) توان هر سیلندر و فشار موثر متوسط هر چرخه توسط رابطه‌های زیر به کار مربوط می‌شود:

$$P(KW) = \frac{W(N.m)N(rpm)}{60000n} \quad (3)$$

$$IMEP = \frac{W}{V_d} \quad (4)$$

وقتی که  $n = 2$  سرعت دورانی میل‌لنگ برای هر مرحله قدرت سیلندر است،  $N$  سرعت موتور بر حسب دور بر دقیقه و  $V_d$  حجم جابه‌جایی پیستون است. مصرف سوخت ویژه اندیکاتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ISFC = \frac{\dot{m}_f}{P_i} \quad (5)$$

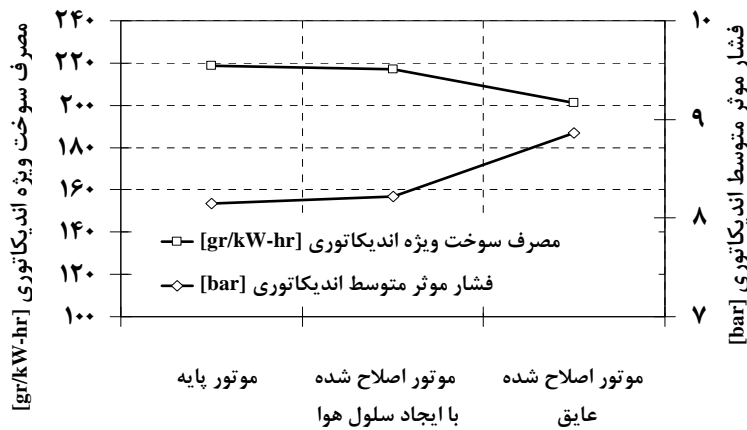
در معادله (۲) کار فقط در مراحل تراکم و انبساط انتگرال‌گیری شده و کار پمپاژ محاسبه نشده است. بنابراین توان و ISFC می‌تواند مقداری بیشتر از مقادیر محاسبه شده در این مطالعه را داشته باشد.

نمودار (۹) نتایج به دست آمده برای سه حالت مورد مطالعه را در مورد میزان مصرف سوخت ویژه و نیز میزان فشار موثر متوسط موتور و نمودار (۱۰) مقایسه مقادیر کار سه حالت مورد مطالعه در یک سیلندر را نشان می‌دهد. دیده می‌شود مقادیر IMEP و ISFC موتور اصلاح شده نسبت به موتور پایه تغییر چندانی نداشته و تقریباً ثابت است. افزایش توان قابل ملاحظه‌ای نیز در موتور اصلاح شده نسبت به موتور پایه دیده نشده و توان در هر دو حالت تقریباً یکسان است. اما در حالت عایق به دلیل افزایش دمای داخل سیلندر، میزان فشار موثر متوسط داخل سیلندر نیز افزایش یافته و این افزایش فشار باعث افزایش توان موتور نیز می‌شود (تقریباً ۸/۸ درصد). ISFC با توان موتور رابطه عکس دارد بنابراین میزان ISFC نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد (تقریباً ۸/۱ درصد).

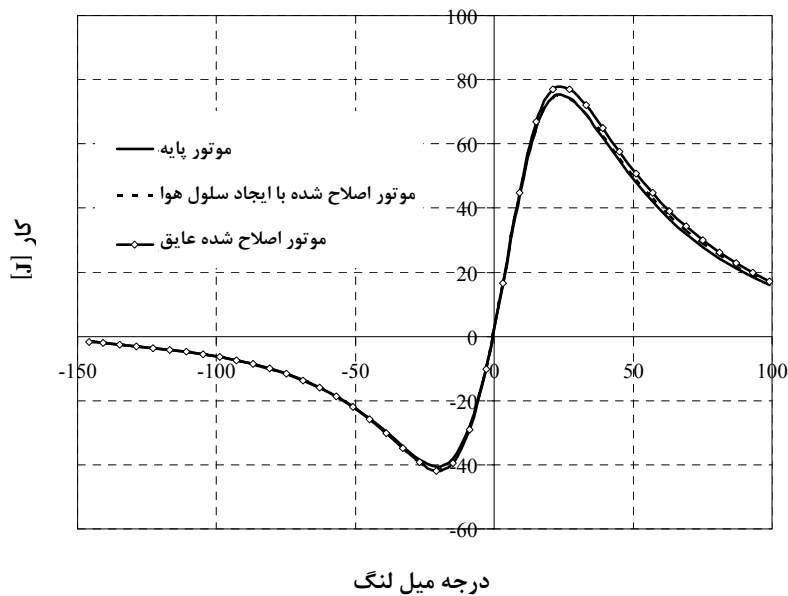
آلاینده‌های  $NO_x$  و دوده به عنوان آلاینده‌های اصلی در موتورهای دیزلی شناخته می‌شود. دو عامل اصلی تولید  $NO_x$ ، حضور اکسیژن و وجود نواحی دمای بالاست. با توجه به شکل (۱۱) تشکیل  $NO_x$  در ۱۵ درجه پس از شروع پاشش سوخت آغاز شده و افزایش اولیه در میزان  $NO_x$  نیز با توجه به افزایش دمای داخل سیلندر است. در موتور اصلاح شده ایجاد سلول هوا

در داخل پیستون باعث انباشت هوا در درون سلول در مرحله تراکم می‌شود. در نتیجه به علت کمبود اکسیژن و نیز به دلیل اینکه بیشینه دمای داخل سیلندر در بسیاری از نواحی داخل سیلندر کمتر از دمای لازم جهت تجزیه نیتروژن است، مقدار آلاینده  $NO_x$  تولیدی در موتور اصلاح شده کمتر از موتور پایه می‌شود. در حالت عایق نیز به علت کاهش انتقال گرما و در نتیجه افزایش دمای داخل سیلندر، میزان تجزیه نیتروژن حتی از حالت پایه نیز بیشتر می‌شود.

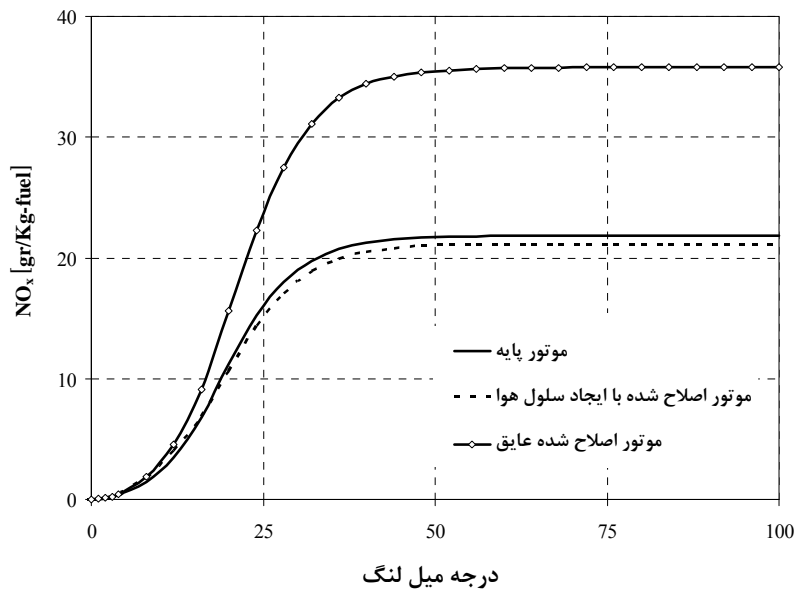
شکل (۱۲) مقایسه نمودار دوده را برای هر سه حالت مورد مطالعه نشان می‌دهد. نرخ تشکیل دوده از شروع احتراق آغاز شده و تا بیشینه فاز نفوذی به دلیل وجود مناطق غنی سوخت از نرخ اکسیداسیون آن بیشتر است و پس از آن به دلیل کمبود سوخت در محفظه احتراق نرخ اکسیداسیون آن سریع‌تر است. به علت افزایش اختلاط سوخت و هوا و نیز افزایش نرخ اکسیداسیون در مرحله آخر احتراق (فاز نفوذی) در موتور اصلاح شده که ناشی از تزریق فواره هوا به داخل محفظه احتراق توسط سلول هوا در مرحله انبساط است، میزان دوده خروجی از موتور اصلاح شده نسبت به موتور پایه در حدود دو برابر کمتر می‌شود. در حالت عایق در میزان دوده خروجی نسبت به حالت موتور اصلاح شده تفاوت قابل توجهی پدید نمی‌آید.



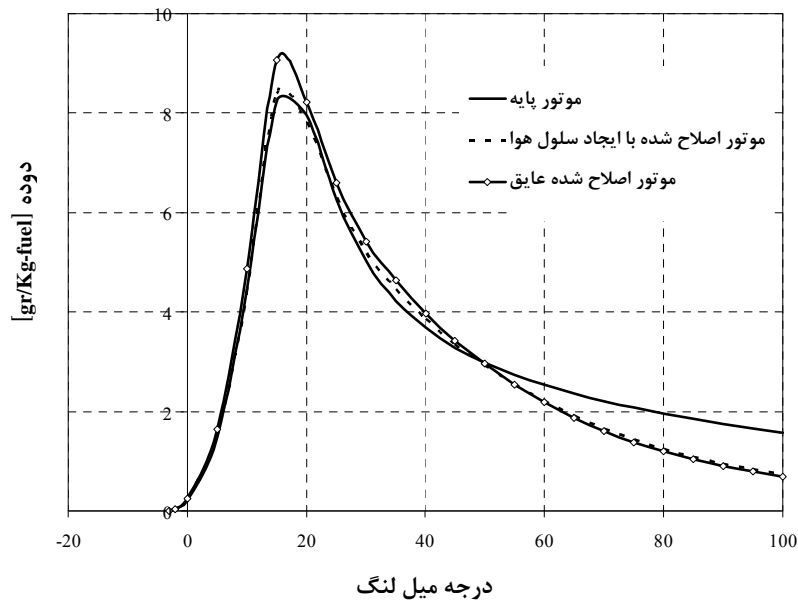
شکل ۹- منحنی مصرف سوخت ویژه و فشار موثر متوسط موتور



شکل ۱۰- منحنی مقایسه مقادیر کار هر سه حالت مورد مطالعه در یک سیلندر

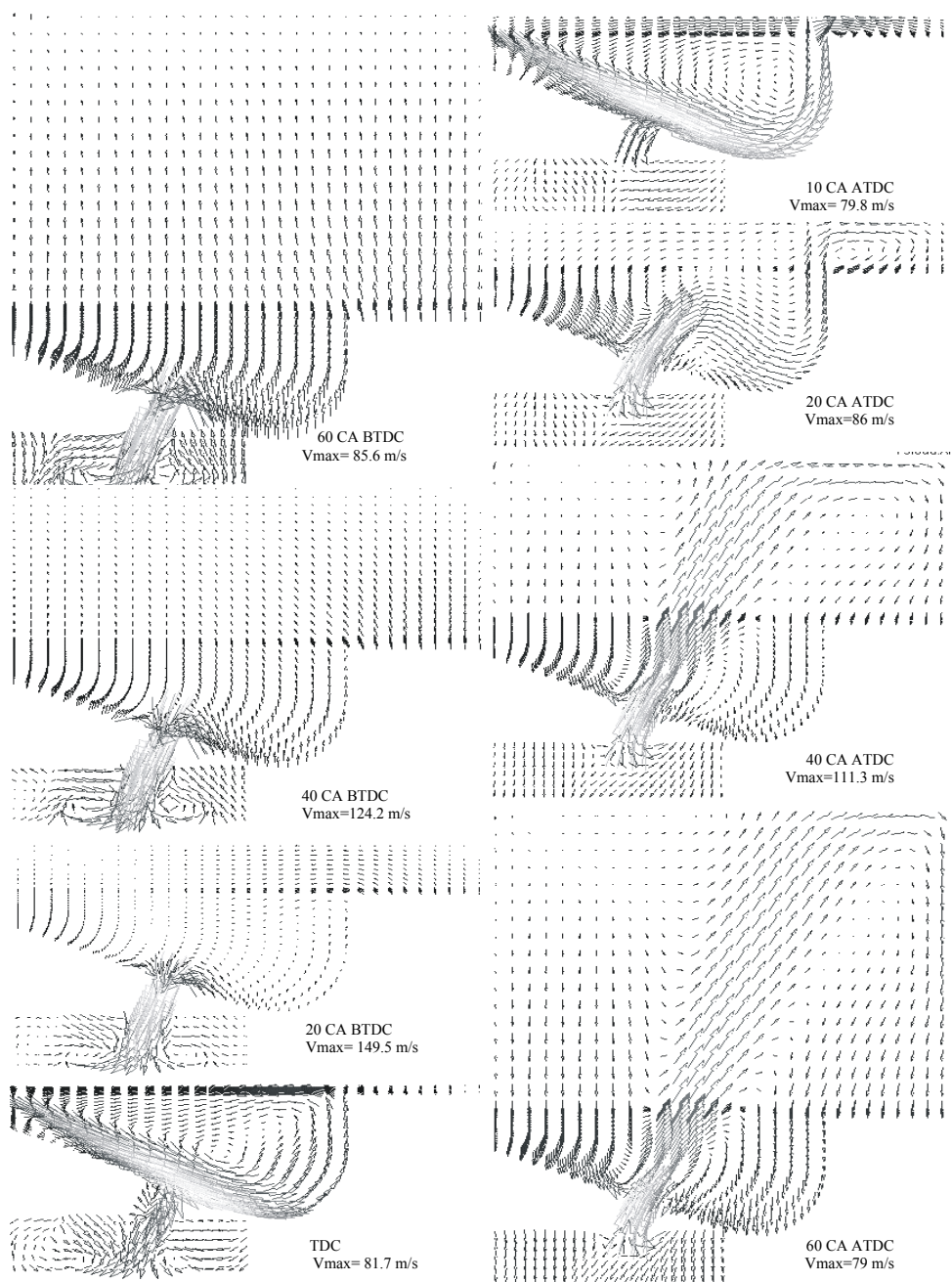


شکل ۱۱- منحنی تولید آلاینده NO<sub>x</sub> برای هر سه حالت مورد مطالعه بر حسب درجه میل لنگ



شکل ۱۲- منحنی تولید آلاینده دوده برای هر سه حالت مورد مطالعه بر حسب درجه میل لنگ

در شکل (۱۳) بردارهای سرعت برای موتور اصلاح شده در زاویه‌های مختلف میل لنگ آورده شده است. دیده می‌شود که در مرحله تراکم جهت جریان در گلوگاه اتصال سلول هوا به محفظه اصلی به سمت سلول هواست. در این مرحله هوا با فشار زیاد در داخل سلول هوا ذخیره می‌شود. بیشینه سرعت به دست آمده در زاویه ۲۰ درجه میل لنگ قبل از نقطه مرگ بالا به میزان ۱۴۹/۵ m/s، به طرف سلول هواست. با پاشش سوخت و شروع احتراق بعد از نقطه مرگ بالا، سرعت در گلوگاه کم شده و در زاویه حدود ۱۰ درجه میل لنگ بعد از نقطه مرگ بالا به صفر کاهش می‌یابد، سپس جهت جریان به سمت محفظه اصلی تغییر پیدا می‌کند. جریان هوای وارد شده به محفظه احتراق از طریق سلول هوا باعث احتراق کامل‌تر باقی‌مانده سوخت در مرحله نهایی احتراق و اکسیداسیون بهتر دوده تولید شده در مرحله انبساط می‌شود.



شکل ۱۳- بردارهای سرعت برای موتور اصلاح شده در زاویه‌های مختلف میل‌لنگ

### نتیجه‌گیری کلی

با بررسی نتایج به دست آمده از مدل ملاحظه می‌شود:

۱- استفاده از سلول هوا می‌تواند روش موثری برای کاهش آلاینده دوده خروجی از یک موتور دیزلی پاشش مستقیم از طریق افزایش اختلاط و همچنین در دسترس بودن هوای کافی در دوره احتراق نفوذی از طریق تزریق فواره هوا در داخل محفظه احتراق باشد. با استفاده از این روش دیده می‌شود که مقدار دوده خروجی در حدود دو برابر نسبت به حالت پایه کمتر شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سلول هوا باعث کاهش اندکی در مقدار آلاینده  $\text{NO}_x$  خروجی نیز می‌شود. استفاده از سلول هوا تاثیر قابل توجهی در میزان مصرف سوخت ویژه و توان موتور ندارد.

۲- عایق کردن پیستون، گلوگاه‌های رابط و سلول هوا با افزایش دمای داخل سیلندر به دلیل کاهش انتقال گرما، باعث افزایش میزان  $\text{NO}_x$  خروجی نسبت به موتور پایه می‌شود اما تاثیر چندانی در میزان دوده خروجی نسبت به موتور اصلاح شده ندارد. در حالت عایق به دلیل افزایش فشار ناشی از افزایش دمای داخل سیلندر، میزان مصرف سوخت ویژه کاهش یافته و توان خروجی نیز افزایش خوبی خواهد داشت.

## منابع

- Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamental*, McGraw Hill, New York, 1988.
- Wook, Ch., Choi, B. C., Park, H. K., Joo, K. J., and Lee, J. H., "In-Cylinder Flow Field Analysis of a Single Cylinder DI Diesel Engine, using PIV and CFD," SAE Paper 2003-01-1846, 2003.
- Hou, Z. X., and Abraham, J., "Three-Dimensional Modeling of Soot and NO in a Direct-injection Diesel Engine," SAE paper 950608, 1995.
- Kamo, R., and Bryzik, W., "Cummins-Taradcom Adiabatic Turbocompound Engine Program," SAE Paper 810070, 1981.
- Kamo, R., and Bryzik, W., "Cummins/Tacom Advanced Adiabatic Engine," SAE Paper 840428, 1984.
- Bryzik, W., Bryzik, W., and Kamo, R., "Tacom/Cummins Adiabatic Engine Program," SAE Paper 830314, 1983.
- Kamo, R., and Bryzik, W., "Ceramics in Heat Engines," SAE Paper 790645, 1979.
- Sekar, R. R., Kamo, R., and Wood, J. C., "Advanced Adiabatic Diesel Engine for Passenger Cars," SAE Paper 840434, 1984.
- Kawamura, H., Higashino, A., and Sekiyama, Sh., "Combustion and Combustion Chamber for a Low Heat Rejection Engine," SAE Paper 960506, 1996.
- Cheng, W. K., Wong, V. W., Gao, F., "Heat Transfer Measurement Comparisons in Insulated and Non- Insulated Diesel Engines," SAE paper 890570, 1989.
- Kawazoe, H., Nagano, S., and Ohsawa, K., "Reduction of Soot Emission by Air-Jet turbulence Generator with Cam in a Diesel Engine," JSAE Review, 12, No. 3, 1991.
- Nagano, S., Kawazoe, H., and Ohsawa, K., "Reduction of Soot Emission by Air-Jet Turbulence in a DI Diesel Engine," SAE Paper 912353, 1991.
- Choi, C. Y., and Foster, D. E., "In Cylinder Augmented Mixing through Controlled Gaseous Jet Injection," SAE Paper 952358, 1995.
- Uludogan, A., Xin, J., and Reitz, R. D., "Exploring the use of Multiple Injectors and Split Injection to Reduce DI Diesel Engine Emissions," SAE Paper 962058, 1996.
- Reitz, R. D., and Montgomery, D. T., "Six-Mode Cycle Evaluation of the Effect of EGR and Multiple Injections on Particulate and NOx Emissions from a D.I. Diesel Engine," SAE Paper 960316, 1996.
- Mather, D. K., and Reitz, R. D., "Modeling the Use of Air-Injection for Emissions Reduction in a Direct-Injected Diesel Engine," SAE Paper 952359, 1995.
- Wakisaka, T., and Ibaraki, K., "An Improvement Droplet Breakup Model for Three Dimensional Diesel Spray Simulation," 3<sup>rd</sup> KSME, JSME, Thermal Engineering Conference, 11-167-162, 1996.
- Taymaz, I., "An Experimental Study of Energy Balance in Low Heat Rejection Diesel Engine," *Energy*, 31, pp. 364-371, 2006.
- Jaichandar, S., and Tamilporai, P., "Low Heat Rejection Engines-An Overview," SAE Paper 2003-01-0405, 2003.
- Parlak, A., Yasar, H., Hasimoglu, C., and Kolip, A., "The Effects of Injection Timing on NOx Emissions of a Low Heat Rejection Indirect Diesel Injection Engine," *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 3042-3052, 2005.
- Liu, Z., and Gui, X., "Investigation of Effects of Piston Bowl and Fuel Injector Offsets on Combustion and Emissions in D.I. Diesel Engines," SAE paper 2002-01-1748, 2002.
- AVL FIRE user Manual, V. 8.3, 2004.
- Halstead, M., Krisch, L., and Quinn, C., "The Auto Ignition of Hydrocarbon Fueled at High Temperature and Pressure-Fitting of a Mathematical Model," *Combustion Flame*, 30, pp. 45-60, 1997.
- Malalasekera, V., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Mc Grow-Hill, 1995.
- Liu, A. B., and Reitz, R. D., "Modeling the Effects of Drop Drag and Break-up on Fuel Sprays," SAE Paper, No 030072, 1993.
- Dukowicz, J. K., "Quasi-Steady Droplet Change in the Presence of Convection," Informal Report Los Alamos Scientific Laboratory, LA7997-MS.
- Zeldowich, Y. B., Sadovnikov, P. Y., and Frank-Kamenetskii, D. A., "Oxidation of Nitrogen in Combustion," Translation by M. Shelef, Academy of Science of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.
- Heywood, J. B., "Pollutant Formation and Control in Spark-Ignition Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, 1, pp. 135-164, 1976.
- Binesh, A. R., and Hossainpour, S., "Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a Direct Injection Heavy-Duty Diesel Engine," *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering*, 2, No. 4, pp. 207-212, 2008

## English Abstract

# A Numerical Investigation of the Effects of Creating an Air-Cell and Insulating the Piston on Combustion Process and Emission Formation in DI Diesel Engines

S. Jafarmadar<sup>1</sup>, R. Barzegar<sup>2</sup>, M. Hoseinzadeh<sup>1</sup> and Sh. Khalilarya<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Parsabad-e-Moghan branch

*In the present article, the effects of air injection into the combustion chamber and utilization of an insulated piston have been investigated on combustion process, emission formation and performance characteristics in a direct injection diesel engine. In the proposed method, the secondary chamber is created inside the piston which is connected to the main combustion chamber via throats. The obtained results indicate that fabrication of the air-cell inside the piston could be very effective on reduction of the exhaust soot emission and has a slight effect on  $NO_x$  reduction in a diesel engine. Utilizing an insulated piston causes a sizeable decrease in specific fuel consumption and increases mean effective pressure. Also, the results show that use of an insulated piston increases  $NO_x$  due to causing high temperature inside the combustion chamber as a result of reducing the heat loss from the piston walls. The obtained results are compared with the corresponding results in the literature and show a good agreement.*

**Keywords:** Diesel engines, Emission reduction, Air-cell, Air jet, Insulated piston