

مدل سازی سینتیکی مونوکسید نیتروژن برای موتور دیزلی اسکانیا DC9 در شرایط پایدار

بهزاد بیداریان

دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشگاه بیرجند
behzadbdrn71@birjand.ac.ir

بهزاد امید کاشانی

استادیار - دانشگاه بیرجند
b.kashani@birjand.ac.ir

امیرحسین حیدری زاد

دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشگاه بیرجند
amirhdr@birjand.ac.ir

چکیده

طریق محاسبات را با داده‌های آزمون موتور مقایسه کرده و پس از تایید، می‌توان داده‌های استخراجی از مدل را به تعداد نامحدودی از شرایط عملکردی تعمیم داد. بطور کلی روش‌های مدل‌سازی موتورهای احتراق داخلی به دو دسته مدل‌های ترمودینامیکی و مدل‌های ابعادی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های ترمودینامیکی که براساس معادله انرژی و بقای آن استوار است و به دو زیر گروه تک ناحیه ای و چند ناحیه ای تقسیم‌بندی می‌شوند و مدل‌های ابعادی که براساس وابستگی زمانی معادلات سه بعدی جرم، مومنتوم و انرژی بیان می‌شوند و به آنالیز میدان جریان سیال داخل سیلندر می‌پردازند [۲]. در این مقاله از نرم افزار GT-POWER به عنوان شبیه ساز ترمودینامیکی موتور پایه استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مطالعه در کارهای مختلفی استفاده شده است. انداوه و همکاران [۳] با شبیه‌سازی یک موتور پایه اثر پدیده تطابق پرخورانی را بررسی کردند ریفارس و همکاران [۴] با شبیه‌سازی در این نرم‌افزار نقاط قوت و ضعف سیستم EGR را بررسی کردند. سوخت دیزل به عنوان منبع نشر موادی مانند ذرات معلق^۷، هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی، فلزات سنگین و اکسیدهای نیتروژن شناخته می‌شود. که در این میان دوده (به عنوان اصلی‌ترین گونه در میان ذرات معلق) و اکسیدهای نیتروژن از جمله مضرترین آلاینده‌ها برای سلامت انسان‌ها می‌باشند [۵]. درک بیشتر نسبت به تشکیل آلاینده‌ها این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان مدل‌های ریاضی برای پیش بینی مقدار تولیدی آنها ارائه داد. مدل‌های انتشار آلاینده‌ها در موتورهای دیزل شامل دو گروه هستند: (۱) مدل‌های تجربی که پارامترهای عملکردی موتور را به انتشار آلاینده‌ها مرتبط می‌کنند (۲) مدل‌های پدیده ای چند مرحله ای که تمامی مراحل تشکیل و اکسیداسیون آن‌ها را مدل می‌کنند [۶]. ذرات معلق که معمولاً با نام دوده شناخته می‌شوند در موتورهای دیزل مخصوصاً مدل‌های قدیمی آن تولید می‌گردند؛ این دود قابل رویت، عموم مردم را از آلودگی طبیعت توسط موتورهای دیزل آگاه ساخته است. مشکلات تنفسی ناشی از این ذرات ریز جامد است که وارد ریه‌های انسان‌ها می‌شود [۷]. علاوه بر این دوده باعث بروز مشکلات بینایی و تیرگی هوا در محیط‌های شهری می‌گردد [۸]. در مورد اکسیدهای نیتروژن نگرانی اصلی واکنش میان این آلاینده با هیدروکربن‌های نسوخته در حضور نور خورشید است که با عنوان مه‌دود فتوشیمیایی شناخته می‌شود و منجر به تولید اوزون می‌گردد [۹]. اکسیدهای نیتروژن در موتورهای دیزل عموماً شامل مونوکسید نیتروژن و دی اکسید نیتروژن است که سهم مونوکسید نیتروژن بسیار بیشتر است [۱۰]. مونوکسید نیتروژن گازی بدون رنگ و بدون بو است که از اکسیداسیون موجود در اتمسفر تحت فشار و

موتورهای دیزل به عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم حمل و نقل دنیا، تولید کننده ی آلاینده های خطرناکی همچون دوده و اکسیدهای نیتروژن در شهرها می‌باشند که این امر موجب سخت گیرانه‌تر شدن روز افزون استانداردهای آلاینده‌ها به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی شده است. در این مقاله شبیه‌سازی موتور دیزلی اسکانیا DC9 که بطور وسیعی در سیستم حمل و نقل اکثر شهرهای ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد با استفاده از نرم افزار GT-POWER انجام شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. سپس با استخراج دما و فشار داخل سیلندر و کسر سوخت سوخته‌شده برای هر زاویه میل لنگ که به عنوان ورودی زیر مدل سینتیکی برای محاسبه مقدار مونوکسید نیتروژن حرارتی استفاده می‌گردد، مدلی بر پایه‌ی مکانیسم شش مرحله‌ای ارائه شده توسط ملر و همکاران به منظور محاسبه پیش‌بینی آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن موتور دیزلی نوشته شده است و نتایج آن با مکانیسم زلدویچ توسعه یافته مقایسه شده است. با افزایش دور موتور میزان مونوکسید نیتروژن تولید شده در هر دو مکانیسم کاهش یافته است که این امر به علت کاهش بیشینه‌ی دمای داخل سیلندر و جرم سوخت سوخته شده در دوره‌های بالاتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: مونوکسید نیتروژن، موتور دیزلی، شرایط پایدار، GT-Power

مقدمه

موتور دیزل توسط رادلف دیزل^۱ در سال ۱۸۹۳ اختراع شد؛ امروزه دامنه‌ی کاربری این موتور بسیار زیاد شده است و به دلیل مصرف سوخت کمتر و به‌صرفه تر بودن سوخت آن‌ها، تولید آلاینده‌ی دی اکسید کربن کمتر، تولید توان بیشتر و بروزسانی‌های مداوم تعداد خودروهای دیزلی جهان روز به روز در حال افزایش است. از طرف دیگر آلاینده‌های خروجی از اگزوز این موتورها باعث شده است تا استانداردهای آلاینده‌ها به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی روز به روز سخت گیرانه تر شود و موجب ایجاد پژوهش‌های زیادی در راستای موتورهای دیزل و کاهش ورود آلاینده‌ها به جو زمین گردیده است که این شبیه‌سازی‌ها و کنترل میزان آلاینده‌ها برای مدیریت کیفیت هوا کاربرد دارند [۱]. برای درک فرایند احتراق و مشاهده تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد و آلاینده‌های آن می‌بایست آزمون‌هایی را روی موتور انجام داد. برای غلبه بر مشکلات آزمایشات تجربی می‌توان از شبیه سازی و الگوهای ترمودینامیکی استفاده کرد. داده های استخراج شده از

¹ Rudolph Diesel

⁷ Particulate matter

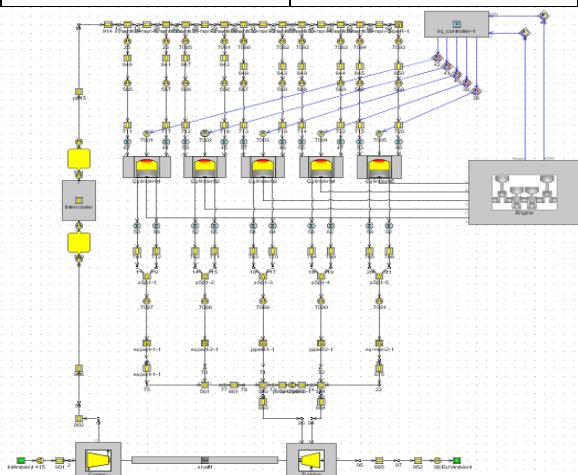
شبیه سازی موتور مورد بررسی

همواره برای طراحی یک موتور در یک نرم افزار شبیه ساز نیاز به تعدادی اطلاعات وجود دارد. در کار حاضر این اطلاعات تا حد امکان بصورت تجربی در موتور اندازه گیری شده و تعدادی نیز از شرکت عقاب افشان دریافت شده است. در این مقاله از موتور دیزلی اسکانیا DC9 جهت شبیه سازی و بررسی اثر زمان پاشش بر عملکرد و آلاینده های آن استفاده شده است. اسکانیا DC9 یک موتور دیزل ۵ سیلندر خطی مجهز به توربو شارژ بوده که بطور وسیعی در خطوط اتوبوسرانی شهری مورد استفاده قرار می گیرد. مشخصات اصلی این موتور در جدول ۱ آمده است.

شبیه سازی موتور پایه، در نرم افزار GT-SUITE انجام شده است. نرم افزار GT-SUITE یک نرم افزار توسعه یافته شبیه ساز، ساخت شرکت گاما تکنولوژی^۱ در زمینه خودرو است که شامل زیر شاخه هایی می باشد. یکی از این زیر شاخه ها GT-POWER است که برای شبیه سازی موتورهای احتراق داخلی استفاده می شود. GT-POWER یک حل کننده جریان یک بعدی به خصوص برای شبیه سازی جریان های موتور احتراق داخلی، محاسبه حرکت سیلندر، احتراق و درجه حرارت است. این نرم افزار حرکت جریان در زمان را با استفاده از مدل های مختلف بسیاری برای تمامی قطعات موتور محاسبه می کند. این مدل ها بطور عمده بر اساس تجربه آزمایشگاهی و برازش منحنی از جدول داده ها است. شکل مدل کامل موتور DC9 در شکل ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات موتور اسکانیا DC9

پارامتر	مقدار
قطر سیلندر	mm ۱۲۷
کورس حرکت	mm ۱۴۰
طول شاتون	mm ۲۵۵
حجم سیلندر	Lit ۸/۸۷
نسبت تراکم	۱۸:۱
حداکثر توان	kW ۲۲۸
استاندارد آلاینده	EURO III



شکل ۱: مدل کامل موتور DC9 در نرم افزار GT-POWER

دمای بالا تولید می شود و دی اکسید نیتروژن گازی سمی با رنگ قرمز-قهوه ای است که با بوی نامطبوعی همراه است و به شدت فعال می باشد [۱۱].

تاکنون روش های مختلفی برای تعیین چگونگی تشکیل و تجزیه ی اکسیدهای نیتروژن ارائه شده است. مکانیسم زلدویچ دو مرحله ای که توسط زلدویچ ارائه شد [۱۲]، سپس توسط لایوه و همکاران [۱۳] با افزودن واکنش تجزیه هیدروکسید توسعه داده شد که امروزه با نام مکانیسم سه مرحله ای زلدویچ توسعه یافته^۱ مشهور است و اکثر شبیه سازی های انجام شده بر پایه ی این روش است. ملر و همکاران [۱۴] نیز مکانیسمی شش مرحله ای شامل واکنش های زلدویچ توسعه یافته و مسیری برای واکنش گونه ی اکسید نیتروس^۲، معرفی کردند. بلامبرگ و کامر [۱۵] از مکانیسم یاد شده برای موتوری بنزینی استفاده کردند و گلدورسی [۱۶] و آیتال [۱۷] آن را در مدلی ترمودینامیکی برای موتور دیزل بکار گرفتند. راثو و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۳ با مقایسه ی نتایج دو مکانیسم یاد شده و نتایج تجربی دریافتند که مکانیسم ارائه شده توسط ملر نسبت به مکانیسم زلدویچ توسعه یافته از تطابق بیشتری با نتایج تجربی برخوردار است. در زمینه بررسی آلاینده های دیگر موتور دیزل نیز کارهایی انجام شده است بطور نمونه متین [۱۹] با نوشتن یک زیر مدل سینتیکی برای آلاینده مونوکسید کربن میزان انتشار این آلاینده را در یک موتور نمونه بررسی کرد. هدف از این مقاله شبیه سازی موتور دیزلی اسکانیا DC9 که جزء جدایی ناپذیر حمل و نقل درون شهری در اکثر شهرهای ایران است، در نرم افزار GT-POWER می باشد که جهت اطمینان از صحت نتایج، منحنی های قدرت و گشتاور به ازای دوره های مختلف موتور با نتایج تجربی که از شرکت عقاب افشان استعمال شده است اعتبار سنجی شده است سپس دما و فشار داخل سیلندر و کسر سوخت سوخته شده برای هر زاویه میل لنگ که از نتایج شبیه سازی موتور در نرم افزار استخراج می گردد به عنوان ورودی زیر مدل سینتیکی برای محاسبه ی مقدار مونوکسید نیتروژن حرارتی استفاده می گردد. این زیر مدل بر پایه ی مکانیسم شش مرحله ای ارائه شده توسط ملر و همکاران به منظور محاسبه پیش بینی آلاینده ی اکسیدهای نیتروژن موتور دیزلی در حالت پایدار نوشته شده است و نتایج آن با مکانیسم زلدویچ توسعه یافته مقایسه شده است که برای اطمینان از صحت نتایج، روند مقدار آلاینده ی پیش بینی شده با نتایج دیگر محققان مقایسه شده است.

شبیه سازی و الگوهای محاسباتی

پیش بینی جزئیات میدان جریان در موتورهای درون سوز و فرایندهای انتقال حرارت و احتراق با حل عددی معادلات بقا امکان پذیر خواهد بود. این روش های عددی را در دهه های اخیر محققان بسیاری بررسی کرده اند و در این مدت بطور پیوسته توانایی تحلیل میدان جریان در هندسه های واقعی موتور افزایش یافته است [۲۰]. در ادامه به معرفی مدل ها و معادلات حاکم جهت حل میدان جریان در سیلندر و تشکیل آلاینده ها پرداخته می شود.

¹ Extended Zeldovich

² N₂O

معادلات حاکم

مدل جریانی مورد استفاده در معادلات حل، شامل معادلات ناویر-استوکس^۱ می‌باشد که شامل معادلات پایستاری انرژی، پیوستگی و مومنتوم است. این معادلات در یک بعد حل می‌شوند به این معنی که همه مقادیر بطور میانگین در مسیر حرکتشان در نظر گرفته می‌شوند. معادلات حاکم در نرم افزار GT-POWER شامل پیوستگی (۱)، مومنتوم (۲) و انرژی (۳) است [۲۱].

$$\frac{d[NO]_{Zeldovich}}{dt} = 2k_{1f}[O][N_2] \frac{1 - \frac{[NO]^2}{K[O_2][N_2]}}{1 + \frac{k_{1r}[NO]}{k_{2f}[O_2] + k_{3f}[OH]}} \quad (4)$$

که از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود.

$$K = \left(\frac{k_{1f}}{k_{1r}}\right) \left(\frac{k_{2f}}{k_{2r}}\right) \quad (5)$$

مونوکسید نیتروژن خالص از روش شش مرحله‌ای ملر از رابطه‌ی (۶) حاصل می‌گردد [۲۵].

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O]_{eq}[N_2]_{eq} - 2k_{1r}[NO]_i[N]_{eq} + 2k_{5f}[O]_{eq}[N_2]_{ss} - 2k_{5r}[N_2O]_{ss} \quad (6)$$

در عمل، اندازه‌گیری غلظت گونه‌های میانی یا رادیکال‌ها دشوار می‌باشد و باید برحسب مقادیر معلوم و قابل اندازه‌گیری بیان شوند، با فرض حالت دائم به محض اینکه این گونه‌ها تشکیل می‌شوند سریعاً واکنش داده و مصرف می‌شوند، لذا غلظت آن‌ها افزایش نمی‌یابد و نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته می‌شود که اینجا گونه‌های N_2 و N_2O گونه‌های میانی هستند و غلظت آن‌ها طبق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند؛ برای سایر گونه‌ها غلظت تعادلی آن‌ها در هر زاویه میل لنگ^۶ قرار داده می‌شود.

$$[N]_{ss} = \frac{k_{1f}[O]_{eq}[N_2]_{eq} + k_{2r}[NO]_i[O]_{eq} + k_{3r}[NO]_i[H]_{eq}}{k_{2f}[O_2]_{eq} + k_{3f}[OH]_{eq} + k_{1r}[NO]_i} \quad (7)$$

جدول ۱: مکانیسم ملر و ثابت‌های نرخ واکنش آن [۱۴]

شماره واکنش	واکنش	$k_f [cm^3/gmole.s]$	$k_r [cm^3/gmole.s]$
1	$O + N_2 \rightleftharpoons NO + N$	$1.58E14 \exp(-38031/T)$	$3.5E13 \exp(-330/T)$
2	$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$	$2.65E12 \exp(-6400/T)$	$5.6E11 \exp(-19317/T)$
3	$N + OH \rightleftharpoons NO + H$	$7.33E13 \exp(-1120/T)$	$2.02E14 \exp(-24725/T)$
4	$N_2O + O \rightleftharpoons 2NO$	$2.9E13 \exp(-23150/T)$	$7.76E14 \exp(-30808/T)$
5	$O + N_2 + M \rightleftharpoons N_2O + M$	$1.41E13 \exp(-9505/T)$	$6.2E14 \exp(-28247/T)$
6	$O_2 + M \rightleftharpoons 2O + M$	$8.36E6 \exp(-61162/T)$	-

⁵ Gamma technology
¹ Navier-Stokes
² Woschni
³ Reaction Rate Constants
⁶ Crank Angle Degree (CAD)

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{boundaries} \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum(\dot{m}u) - 4C_f \frac{\rho u |u| dx A}{2D} - C_p \left(\frac{\rho u |u|}{2}\right) A}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{d(me)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \sum_{boundaries} \dot{m}H - hA_s(T_{fluid} - T_{wall}) \quad (3)$$

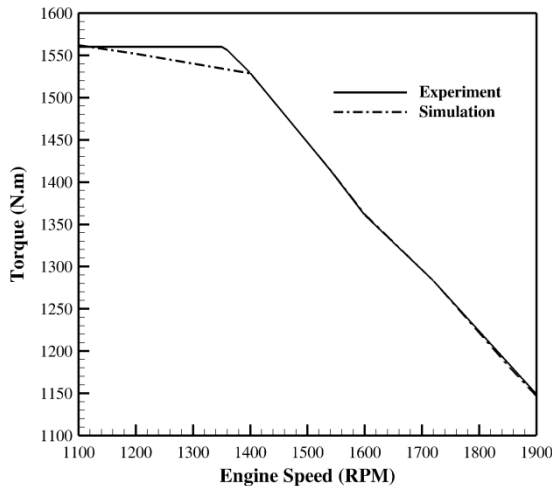
برای شبیه‌سازی فرایند انتقال حرارت نیز، از مدل اصلی موجود در نرم افزار یعنی مدل انتقال حرارت وشنی^۲ [۲۲] استفاده شده است.

مکانیسم واکنش مونوکسید نیتروژن

کارهای بسیاری به منظور تعیین واکنش‌های مهم تشکیل و تجزیه مونوکسید نیتروژن موتورهای دیزل انجام شده است از جمله مکانیسم زلدویچ توسعه یافته که در جدول ۲ آورده شده است که در آن واکنش‌های ۱ و ۲ در ابتدا توسط زلدویچ [۱۲] ارائه شد و سپس واکنش ۳ توسط لایوه و همکاران [۱۳] به آن اضافه گردید.

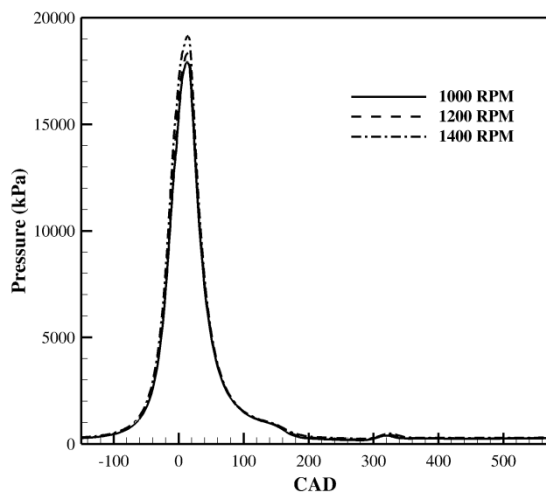
مدل بعدی مکانیسم پیشنهادی توسط ملر و همکاران [۱۴] است که شامل واکنش‌های زلدویچ توسعه یافته و واکنش‌های اکسید نیتروس (واکنش‌های ۴ و ۵) می‌باشد و واکنش ۶ که برای تعادل واکنش‌ها اضافه شده است. لیست کامل واکنش‌ها به همراه ثابت‌های نرخ واکنش^۳ آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

از دیگر روش‌های محاسبه‌ی مونوکسید نیتروژن می‌توان به روش پرامپت [۲۳] و مونوکسید نیتروژن حاصل از نتروژن سوخت اشاره کرد که برای موتورهای دیزل نسبت به روش‌های قبلی قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند [۲۴].



شکل ۳: نمودار گشتاور بر حسب دور موتور

دور موتور ۱۰۰۰ RPM ، ۱۲۰۰ RPM و ۱۴۰۰ RPM در حالت پایدار می‌باشند که با توجه به شکل ۲ بیشترین گشتاور تولیدی توسط موتور در این بازه رخ می‌دهد؛ همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود مقادیر دما و فشار در دورهای مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند اما مقدار بیشینه دما با دور موتور رابطه‌ی عکس دارد، مقدار دما در دور موتور ۱۰۰۰RPM برابر با ۱۹۷۷/۷K می‌باشد و دور موتور ۱۴۰۰RPM به میزان ۳٪ کاهش داشته است که به دلیل کمتر شدن زمان ماندگاری محصولات و مقدار سوخت سوخته شده^۱ در دور موتورهای بالاتر می‌باشد. در این مرحله از کار تاثیر دور موتور بر مقدار سوخت سوخته شده و مقدار مونوکسید نیتروژن تولید شده در زمان باز شدن سوپاپ خروج^۲ که مقدار بیشینه آن می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای مقایسه ی بهتر مقادیر بیشینه‌ی دمای داخل سیلندر بر حسب دور موتورهای مختلف رسم شده‌اند، همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش دور موتور، مقدار سوخت سوخته شده از مقدار ۲/۱۳۶ گرم در دور موتور ۱۰۰۰RPM به میزان ۵۱٪ کاهش می‌یابد که همین امر موجب کاهش دمای بیشینه‌ی داخل سیلندر از ۱۹۷۷/۷K به ۱۹۱۸/۳K می‌گردد، با کاهش بیشینه دمای دخل سیلندر و



شکل ۴: نمودار فشار بر حسب درجه زاویه میل لنگ

$$[N_2O]_{ss} = \frac{k_{5f} [O]_{eq} [N_2]_{eq} + (k_{4r} + k_{7r}) [NO]_i^2}{k_{4f} [O]_{eq} + k_{7f} [H]_{eq} + k_{5r}} \quad (8)$$

در کد شبیه‌سازی حاضر محاسبه‌ی مقدار مونوکسید نیتروژن موجود برای تجزیه، یعنی $[NO]_i$ موجود در روابط (۷) و (۸) ممکن نیست زیرا راهی نداریم که تخمین بزنیم مونوکسید نیتروژن با چه سرعتی ناحیه‌ی استکیومتریک را ترک می‌کند؛ لذا این مقدار را طبق رابطه-ی (۹) فرض می‌کنیم و برای محاسبه‌ی تغییرات جرم مونوکسید نیتروژن همانند رابطه‌ی (۱۰) عمل می‌کنیم [۲۵].

$$[NO]_i = \frac{m_{NO,i-1} - m_{NO,i-x}}{V_i} \frac{1}{M_{NO}} \quad (9)$$

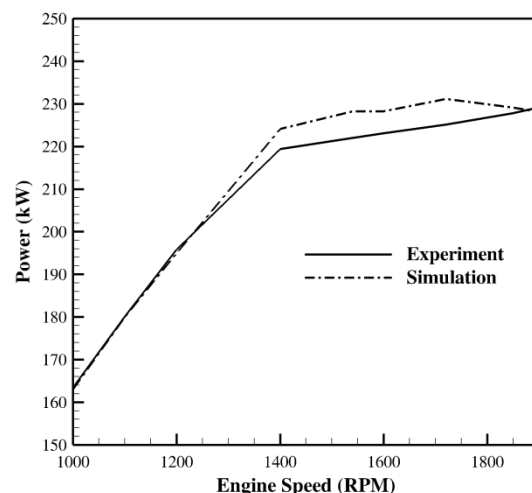
$$\frac{dm_{NO}}{dt} = M_{NO} V_i \frac{d[NO]}{dt} \quad (10)$$

مقدار $m_{NO,i-x}$ موجود در رابطه‌ی (۹)، مونوکسید نیتروژن تولید شده در پایان X زاویه میل لنگ قبلی است که طبق نتایج کار پستو تا و همکاران [۲۵] بهترین مقدار برای X که بیشترین تطابق با نتایج تجربی را داراست ۴ می‌باشد که در این مقاله از همین مقدار استفاده شده است.

بحث بر روی نتایج

به منظور اطمینان از شبیه‌سازی فرایند احتراق در موتور، نتایج حاصل با نتایج تجربی که از شرکت عقاب افشان استعمال شده، مقایسه شده است. برای این منظور دو منحنی قدرت و گشتاور به ازای دورهای مختلف موتور با نتایج تجربی اعتبار سنجی شده است. همانطور که در شکل ۲ و شکل ۳ دیده می‌شود، بیشینه قدرت ۲۲۸kW می‌باشد همچنین حداکثر گشتاور نیز ۱۵۵۰Nm می‌باشد که در ۱۲۰۰-۱۰۰۰ RPM اتفاق می‌افتد که این نتایج نشان دهنده تطابق بسیار خوب نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی است.

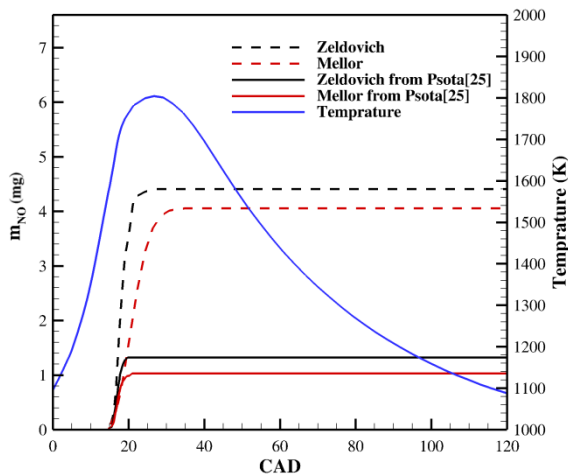
از جمله پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه غلظت گونه‌های تعادلی، دما و فشار داخل سیلندر در هر زاویه میل لنگ به ازای دور موتورهای مختلف در حالت تمام بار می‌باشد که از نتایج نرم‌افزار GT-Power می‌باشند. شکل های ۴ و ۵ بیانگر مقادیر دما و فشار بر حسب زاویه میل لنگ به ازای سه



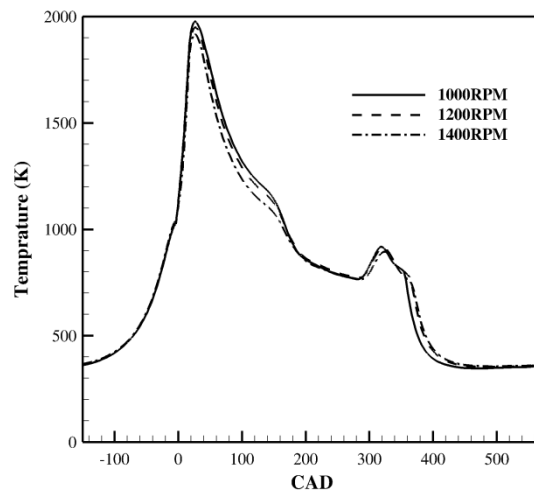
شکل ۵: نمودار قدرت بر حسب دور موتور

¹ Fuel Burned

² Exhaust Valve Open (EVO)

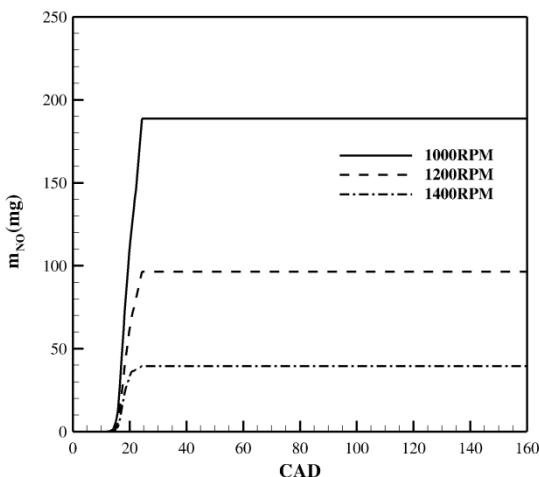


شکل ۷: اعتبار سنجی مکانیسم‌های زلدویچ توسعه یافته و ملر با نتایج پسوتا و همکاران [۲۵] در دور ۱۷۰۰ RPM



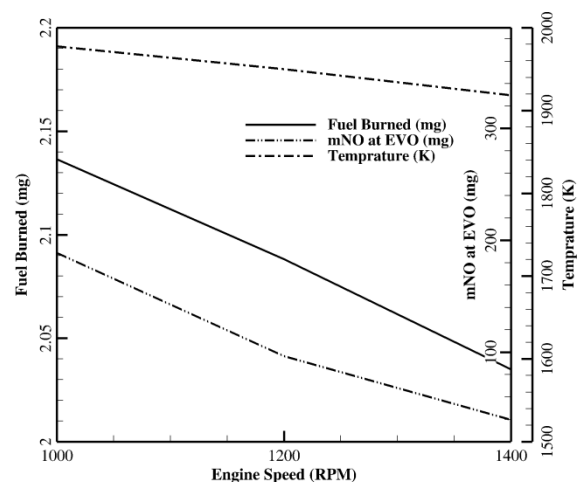
شکل ۵: نمودار دما بر حسب درجه زاویه میل لنگ

شکل ۸ و ۹ بیانگر تغییرات جرم تولیدی مونوکسید نیتروژن برای سه دور موتور ۱۰۰۰ RPM، ۱۲۰۰ RPM و ۱۴۰۰ RPM می باشد که شکل ۸ بر اساس مکانیسم زلدویچ توسعه یافته و شکل ۹ بر اساس مکانیسم ملر است. همانطور که در این دو شکل دیده می شود، با افزایش دور موتور میزان مونوکسید نیتروژن تولید شده در هر دو مکانیسم کاهش یافته است. با توجه به شکل ۶ این کاهش مونوکسید نیتروژن به علت کاهش بیشینه دمای داخل سیلندر و جرم سوخت سوخته شده در دورهای بالاتر می باشد.



شکل ۸: نتایج مکانیسم سه مرحله ای زلدویچ توسعه یافته در دور موتورهای مختلف

کاهش مقدار سوخت سوخته شده بدیهی است که باید میزان مونوکسید نیتروژن تولید شده کاهش یابد که شکل ۶ با نشان دادن کاهش ۷۹ درصدی مونوکسید نیتروژن به ازای افزایش دور موتور، بیانگر این مدعا است. به منظور بررسی اثر دورهای مختلف موتور بر تشکیل مونوکسید نیتروژن در دو مکانیسم زلدویچ توسعه یافته و ملر، ابتدا باید از صحت مدل سازی در این زمینه نیز اطمینان حاصل شود. با توجه به موجود بودن اطلاعات تشکیل و تجزیه ی مونوکسید نیتروژن برای دو مکانیسم زلدویچ توسعه یافته و ملر برای دور موتور ۱۷۰۰ RPM در کار پسوتا و همکاران [۲۵] نتایج زیرممدل حاضر نیز در همان دور موتور با این نتایج صحت گذاری شده است. همانطور که در شکل ۷ دیده می شود، مقدار مونوکسید نیتروژن تشکیل شده در هر دو مکانیسم در حدود ۲۰ درجه میل لنگ به بیشینه ی مقدار خود می رسد که علت این افزایش تولید مونوکسید نیتروژن افزایش دمای داخل سیلندر می باشد. همچنین مقایسه ی نتایج کار حاضر با نتایج کار پسوتا و همکاران [۲۵] نشان می دهد که میزان مونوکسید نیتروژن تولیدی در مکانیسم ملر کمتر از مکانیسم زلدویچ توسعه یافته می باشد.



شکل ۶: تاثیر مقدار سوخت سوخته شده، جرم مونوکسید نیتروژن و دمای بیشینه بر حسب دور موتور

e	انرژی درونی مخصوص
H	آنتالپی مخصوص کل
h	ضریب انتقال حرارت
C_f	ضریب اصطکاک فاینینگ
T_{fluid}	دمای سیال
T_{wall}	دمای دیواره
D	قطر معادل
u	سرعت در مرز
k_f	ثابت نرخ واکنش رفت
k_r	ثابت نرخ واکنش برگشت
CAD	درجه زاویه میل لنگ
m	جرم
M	جرم ملکولی
NO	مونوکسید نیتروژن
NO_2	دی اکسید نیتروژن
N_2O	اکسید نیتروس
T	دما
t	زمان
V	حجم
	زیر نویس ها
ss	حالت تقریب دائم
eq	حالت تعادلی
i	گام

مراجع

1- T. V Johnson, "Diesel emission control in review," *SAE Int. J. fuels Lubr.*, vol. 1, no. 2008-01-0069, pp. 68-81, 2006.

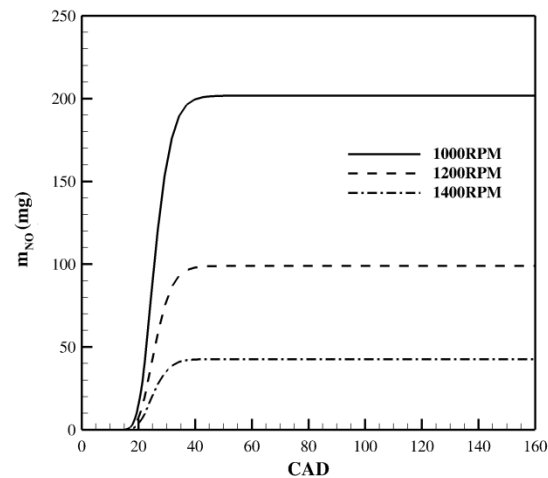
۲- ا. فرهادی باغسیاهی، س. رستمی کندری and ش. بشارتی، "کاربرد انواع مدل های ترمودینامیکی در موتورهای احتراق داخلی،" *دومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار*, ۱۳۹۳.

۳- م. ا. بهزاد ام-یدی کاشانی امید جهانیان، "بررسی پدیده تطابق پرخورانی در موتور دیزلی اسکانیا DC9 با توجه به اینرسی قطعات متحرک پرخوران،" *نهمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز و نفت* - 1, pp. 11, 1394.

4- S. Reifarth and H.-E. Angstrom, "Transient EGR in a High-Speed DI Diesel Engine for a set of different EGR-routings," *SAE Int. J. Engines*, vol. 3, no. 1, pp. 1071-1078, 2010.

5- H. Omidvarborna, A. Kumar, and D.-S. Kim, "Recent studies on soot modeling for diesel combustion," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 635-647, 2015.

6- V. Rao and D. Honnery, "Application of a multi-step soot model in a thermodynamic diesel engine model," *Fuel*, vol. 135, pp. 269-278, 2014.



شکل ۹: نتایج مکانیسم شش مرحله ای ملر در دور موتورهای مختلف

نتیجه گیری

این مطالعه به شبیه سازی موتور دیزلی اسکانیا DC9 در نرم افزار GT- Power و محاسبه ی آلاینده ی مونوکسید نیتروژن آن بر اساس دو مکانیسم سه مرحله ای زلدویچ توسعه یافته و شش مرحله ای ملر در حالت پایدار پرداخته است. نتایج کلی در این بررسی را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- با افزایش دور موتور، مقدار بیشینه دما از ۱۹۷۷/۷K در دور موتور ۱۰۰۰RPM به ۱۹۱۸/۳K در دور موتور ۱۴۰۰RPM می رسد و به میزان ۰.۳٪ کاهش می یابد که به دلیل کمتر شدن زمان ماندگاری محصولات و مقدار سوخت سوخته شده در دور موتورهای بالاتر می باشد.
- با افزایش دور موتور، مقدار سوخت سوخته شده از مقدار ۲/۱۳۶ گرم در دور موتور ۱۰۰۰RPM به میزان ۰.۵۱٪ کاهش می یابد، با کاهش بیشینه دمای دخل سیلندر و کاهش مقدار سوخت سوخته شده بدیهی است که باید میزان مونوکسید نیتروژن تولید شده کاهش یابد که کاهش ۷۹ درصدی مونوکسید نیتروژن به ازای افزایش دور موتور، بیانگر این مدعاست.
- مقدار مونوکسید نیتروژن تشکیل شده در هر دو مکانیسم در حدود ۲۰ درجه میل لنگ به طور ناگهانی افزایش یافته و به بیشینه ی مقدار خود می رسد که علت این افزایش ناگهانی افزایش دمای داخل سیلندر می باشد همچنین میزان مونوکسید نیتروژن تولیدی در مکانیسم ملر کمتر از مکانیسم زلدویچ توسعه یافته می باشد.

فهرست علائم

\dot{m}	شار جرمی
V	حجم
P	فشار
A	سطح مقطع عبور جریان
A_s	سطح انتقال حرارت

- 17- S. M. Aithal, "Modeling of NO_x formation in diesel engines using finite-rate chemical kinetics," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2256–2265, 2010.
- 18- V. Rao and D. Honnery, "A comparison of two NO_x prediction schemes for use in diesel engine thermodynamic modelling," *Fuel*, vol. 107, pp. 662–670, 2013.
- ۱۹- م. متین، "بسط یک زیر مدل برای نشر کربن مونوکسید در حالت گذرا برای موتور دیزلی اسکانیا. 1395،" DC9،
- ۲۰- ب. جعفری، م. پورفلاح، س. م. میرسلیم and د. د. گنجی، "تأثیر انواع پیکربندی پاشش سوخت بر احتراق و شکلگیری آلایندهها در موتور دیزل سنگین،" *فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات موتور*، vol. ۱، سال پنجم /، pp. 43–52, 1388.
- 21- G. Technologies, "GT-SUITE Flow Theory Manual." version 2016, 2016.
- 22- G. Woschni, "A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine," SAE Technical paper, 1967.
- 23- P. C. Malte and D. T. Pratt, "The role of energy-releasing kinetics in NO_x formation: fuel-lean, jet-stirred CO-air combustion," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 5–6, pp. 221–231, 1974.
- 24- J. E. Dec, "A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging," SAE Technical paper, 1997.
- 25- M. A. Psota and A. M. Mellor, "Dynamic Application of a Skeletal Mechanism for DI Diesel NO_x Emissions," *SAE Tech. Pap. 2001-01-1984*, no. 724, pp. 7–9, 2001.
- 7- EPA, "Tighter Controls Evaluated for NO_x, HC and PM Emissions from Heavy Duty Engines," no. EPA420-F-95-008a, 1995.
- 8- EPA, "Emissions Control Potential for Heavy Duty Diesel Engines," no. EPA 4200F095-009b, 1996.
- 9- M. P. Walsh, "Global trends in diesel emissions control-A 1999 update," SAE Technical Paper, 1999.
- 10- J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. Mcgraw-hill New York, 1988.
- 11- W. A. Majewski and M. K. Khair, "Diesel emissions and their control," SAE Technical Paper, 2006.
- 12- Y. B. Zeldovich, "The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions," *Acta Phys. Chim.*, vol. 21, pp. 577–628, 1946.
- 13- G. A. Lavoie, J. B. Heywood, and J. C. Keck, "Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 313–326, 1970.
- 14- A. M. Mellor, J. P. Mello, K. P. Duffy, W. L. Easley, and J. C. Faulkner, "Skeletal Mechanism for NO_x Chemistry in Diesel Engines," *SAE Int. J. Engines*. SAE International, p. 18, 1998.
- 15- P. Blumberg and J. T. Kummer, "Prediction of NO formation in spark-ignited engines—an analysis of methods of control," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 73–95, 1971.
- 16- L. Goldsworthy, "Reduced kinetics schemes for oxides of nitrogen emissions from a slow-speed marine diesel engine," *Energy & fuels*, vol. 17, no. 2, pp. 450–456, 2003.