مجموعه مقالات نهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱۹ تا ۲۱ بهمن ۱۴۰۰، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز
FCCI-2022-0070

بررسی عددی تاثیر پاشش و قطر ذرات آب بر NOx خروجی از یک موتور دیزل با کاربرد مخلوط‌های دیزل- بیودیزل

مازیار معینی منش[۱]، علیرضا شیرنشان[۲*]، سبحان امامی کوپائی[۳]
۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. maziyarm1987@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. arshirneshan@yahoo.com
۳- استادیار ، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. sobhan@pmc.iaun.ac.ir
* نویسنده مخاطب

چکیده
با توجه به این‌که کاهش آلاینده‌ی اکسیدهای نیتروژن یکی از چالش‌های اساسی طراحان و سازندگان موتورهای دیزلی است، استفاده از پاشش آب روشی مهم در جهت کاهش اکسیدهای نیتروژن خروجی از موتور می‌باشد. در این مقاله تاثیر استفاده از درصدهای مختلف پاشش (صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰) آب همراه با کاربرد مخلوط‌های مختلف دیزل-بیودیزل به وسیله‌ی شبیه‌سازی عددی در نرم افزار AVL Fire برای یک موتور دیزل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر قطر قطرات پاشیده شده به داخل محفظه احتراق بر انتشار آلاینده NOx نیز مورد بررسی قرار گرفت. تغییر قطر قطرات آب، بر میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور تاثیر گذار بوده که در این مطالعه اندازهٔ بهینه برای قطر ذرات آب ۰٫۱۸ میلی‌متر به‌دست آمد. نتایج نشان داد پاشش آب ۶۰ درصد، می‌تواند مقدار اکسیدهای نیتروژن را تا ۳۴ درصدکاهش دهد. همچنین با افزایش مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت برای همه حالت‌های پاشش آب، مقدار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد.
کلمات کلیدی: پاشش آب، بیودیزل، اکسیدهای نیتروژن، قطر ذرات

مقدمه
کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق اصلی‌ترین اهمیت را در بین آلاینده‌های خروجی از موتورهای دیزلی دارد. تحقیقات گسترده‌ای به منظور یافتن روش های مهار و کنترل NOx از جمله پاشش آب، باز چرخش گاز خروجی و تغییر پارامترهای موتور انجام شده است [۱-۳]. استفاده از بازچرخشِ بخشی از گازهای خروجی احتراق به ورودی موتور، جهت رقیق کردن هوا و کاهش اکسیژن و در نتیجه کاهش اکسیدهای نیتروژن (NOx) خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که پاشش آب در موتور نیز به عنوان یک افزودنی می‌تواند نقش موثری در کاهش آلایندگی NOx دا شته با شد [۵]. از طرف دیگر استفاده از زیست سوخت‌هایی مانند بیودیزل، اثرات بیشتری در کاهش آلاینده‌های مونوکسید کربن و هیدروکربن به همراه خواهند دا شت [۶]. از جمله مطالعات انجام شده‌ی مرتبط با پژوهش حال حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
تسفا[۱] و همکاران [۷] با بررسی تجربی یک موتور دیزل چهار سیلندر، پاشش مستقیم و استفاده از سوخت بیودیزل، تاثیر پاشش آب بر روی عملکرد و انتشار آلاینده های موتور را بررسی کردند. پاشش آب در منیفولد ورودی، اختلاف معنا داری در نقطه اوج فشار درون سیلندر و نرخ حرارت آزاد شده در شرایط کار موتور با سوخت بیودیزل را ن شان نداد. نتایج این تحقیق نشان داد، پاشش آب به منیفولد ورودی تا ۵۰ در صد NOx را کاهش می‌دهد هر چند میزان انتشار CO حدوداً تا ۴۰ در صد افزایش می‌یابد [۷].

در مطالعه‌ای دیگر هوکمن[۲] و رابینز[۳] [۸] اثرات سوخت بیودیزل را بر اکسیدهای نیتروژن خروجی موتورهای دیزل مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق بیان شد که سوخت بیودیزل به‌طور کلی مقدار اکسیدهای نیتروژن را افزایش می‌دهد و مخلوط سوخت و شرایط کاری موتور از عوامل تاثیر گذار بر میزان انتشار آلاینده NOx می‌باشند.
جیاکومیس[۴] و همکاران [۹] تاثیر زیست سوخت‌ها را بر آلاینده‌های خروجی موتورهای دیزل در شرایط گذرا برر سی کردند. این مطالعه ن شان داد که استفاده از زیست سوخت‌ها، علیرغم کاهش هیدروکربن و مونوکسید کربن در خروجی، اکسیدهای نیتروژن را به دلیل داشتن اکسیژن در ترکیب سوختی، افزایش می‌دهند.
چینتالا[۵] و سابرامانیان[۶] [۱۰] تاثیر پاشش آب را برای به‌دست آوردن حداکثر انرژی حاصل از سوخت هیدروژن در یک موتور اشتعال تراکمی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان انرژی حاصل از هیدروژن با کاهش نسبت تراکم و افزودن آب تا حدود ۸۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن آب و کاهش نسب تراکم کاهش قابل توجهی در مقدار دمای داخل سیلندر مشاهده می‌شود.
سونی[۷] و گوپتا[۸] [۱۱] تاثیر استفاده از مخلوط سوخت دیزل- متانول و کاربرد سه روش افزودن آب، تغییر نسبت چرخش[۹] هوای ورودی و درصدهای مختلف EGR را بر روی میزان آلاینده NOx در یک موتور دیزلی بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از روش افزودن آب در مرحله احتراق می‌تواند تا ۹۵ درصد سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن شود.
تقوی‌فر و همکاران [۱۲] اثر درصد های حجمی مختلف تزریق آب در زوایای میل لنگ ۷۱۱، ۷۱۷ و ۷۲۳ درجه در یک موتور دیزلی را با کاربرد سوخت‌های دیزل و هیدروژن بر اکسیدهای نیتروژن و بازده موتور برر سی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین توان، گشتاور و بازده حرارتی اندیکاتوری برای پا شش آب با در صد حجمی ۱۵ در صد هیدروژن اتفاق می‌افتد.
ساندیپ[۱۰] و همکاران [۱۳] به برر سی تاثیر پا شش آب در منیفولد بر روی کاهش اکسیدهای نیتروژن در یک موتور دیزل سه سیلندر پرداختند. در این تحقیق، نسبت آب به سوخت ۳ تا ۱۶ در صد در نظر گرفته شده بود. نتایج تحقیق نشان داد که پاشش آب ۱۶ درصد سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن تا میزان ۱۳ درصد می‌شود.
زنگ[۱۱] و همکاران [۱۴] در یک مطالعه عددی، تاثیر استفاده از سوخت بیودیزل خالص و امولسیون بیودیزل و آب (۲، ۴ و ۶ درصد جرم سوخت پاشش شده به داخل سیلندر) را بر پارامترهای احتراقی و آلایندگی یک

[1] Tesfa
[2] Hoekman
[3] Robbins
[4] Giakoumis
[5] Chintala
[6] Subramanian
[7] Soni
[8] Gupta
[9] Swirl ratio
[10] Sandeep
[11] Zhang

موتور دیزل بررسی کردند. در این تحقیق یک مدل سه بعدی همراه با یک مکانیزم سینتیک شیمیایی (شامل ۴۷۵ واکنش و ۱۳۴ گونه) برای شبیه‌سازی فرآیند پاشش سوخت به وسیله نرم افزار AVL Fire توسعه داده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزودن آب به سوخت نقش مهمی در اختلاط بهتر سوخت و هوا و فرآیند پاشش سوخت دارد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که افزودن مقادیر کم آب به سوخت بیودیزل می‌تواند انتشار NOx، CO و CO_2 را کاهش دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده محلول امولسین حاوی ۴ درصد آب، بهترین شرایط از نظر انتشار آلاینده‌ها و پارامترهای عملکرد موتور را دارا بود.

آیهان[1] و همکاران [۱۵] در یک مطالعه تجربی به بررسی تأثیر پاشش مستقیم آب در داخل سیلندر بر عملکرد، انتشارآلاینده‌ها و پارامترهای احتراق یک موتور دیزلی سبک پرداختند. در این مطالعه مقادیر مختلف پاشش آب (۱۰ تا ۱۰۰ درصد جرم سوخت پاشیده شده به داخل سیلندر) در شرایط بار کامل و با کاربرد سوخت دیزل خالص به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که با پاشش آب به داخل محفظه احتراق انتشار آلاینده NOx تا ۶۱٪ کاهش و پارامترهای عملکردی موتور (توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی) نیز بهبود می‌یابد؛ هر چند در انتشار آلاینده CO تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.

با توجه به این‌که تاثیر پاشش آب از طریق یک نازل جداگانه در محفظه احتراق موتور و همچنین قطر نازل بر میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن در مطالعات پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین در این تحقیق به بررسی تاثیر پاشش آب (صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد مقدار جرم پاشش سوخت) از یک نازل جداگانه و اثر قطر قطرات آب پاشش شده در محفظه احتراق بر میزان انتشار آلاینده NOx با کاربرد مخلوط‌های دیزل خالص، B10 (۱۰ درصد بیودیزل و ۹۰ درصد دیزل)، B20 و B50 به وسیله نرم افزار AVL Fire پرداخته شده است.

مدل‌سازی عددی

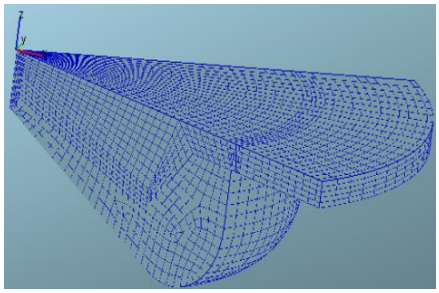
معرفی موتور مورد بررسی و تولید شبکه

در این تحقیق با در نظر گرفتن هندسه سر پیستون یک موتور دیزل کاترپیلار از نوع CAT3406 و مطابق با مشخصات موتور (جدول۱)، موتور مورد نظر در ماژول ESE Diesel در نرم افزار AVL Fire مدل‌سازی شد.

جدول ۱: مشخصات موتور دیزل مورد بررسی

مدل	کاترپیلار ۳۴۰۶
نوع موتور	موتور دیزلی پاشش مستقیم
حجم موتور	۲٫۴۴ لیتر
نسبت تراکم	۱۵:۱
طول دسته شاتون	۲۶ سانتی متر
سرعت موتور	۱۶۰۰ دور بر دقیقه
شروع پاشش سوخت	۱۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا
شروع پاشش آب	۷۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا
جرم سوخت پاشیده شده در هر سیکل	۰٫۱۶۲ گرم

اگرچه در مطالعه حاضر هندسه محفظه احتراق به‌صورت سه بعدی در نظر گرفته شده، اما با توجه به تقارن این هندسه و به‌منظور کاهش زمان محاسبات تنها یک قطاع ۶۰ درجه‌ای از هندسه مطابق شکل ۱ شبکه‌بندی شده است. شبکه تولید شده از نوع شبکه با سازمان و قابل تطبیق با تغییر موقعیت پیستون است.



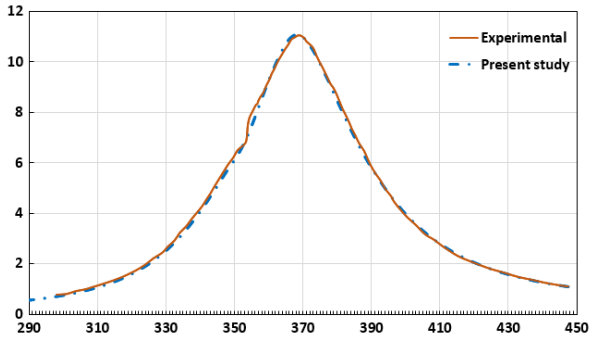
شکل ۱: شبکه سه بعدی تولید شده

مدل جریان آشفته، مدل احتراقی و مدل تشکیل NOx

در این تحقیق برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل (k-zeta-f) که به طور خاص برای پیش‌بینی اثر جریان سیال نزدیک به دیواره در جریان‌های آشفته کاربرد دارد و از مدل شعله‌ی منسجم توسعه‌یافته-سه ناحیه‌ای[2] (ECFM3Z) برای شبیه‌سازی احتراق استفاده شد. این مدل احتراقی بر اساس معادله انتقال چگالی سطح شعله و یک مدل ترکیبی که قادر است احتراق نفوذی و پیش‌آمیخته آشفته ناهمگن را توصیف کند، می‌باشد. برای مدل‌سازی شکست قطرات از مدل موج استفاده شده است. این مدل استاندارد قادر است که زمان شکست قطره، طول مایع و نفوذ اسپری را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند و از این‌رو کاربرد گسترده‌ای در شبیه‌سازی موتورهای دیزل دارد. همچنین از مکانیزم زلدویچ که تشکیل NO را طی دو مرحله نمایش می‌دهد و مکانیزم زلدویچ گسترش یافته جهت مدل تشکیل NOx استفاده شد.

اعتبار سنجی مدل

برای اعتبار سنجی مدل مورد نظر، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر برای فشار داخل محفظه احتراق با نتایج تجربی تحقیق نهمر[3] و ریتز[4] [۱۶] برای حالت سوخت دیزل خالص بررسی شد. شکل ۲ فشار درون موتور را بر حسب زاویه‌ی لنگ نشان می‌دهد.. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد که اعتبار مدل مورد نظر را تایید می‌کند.



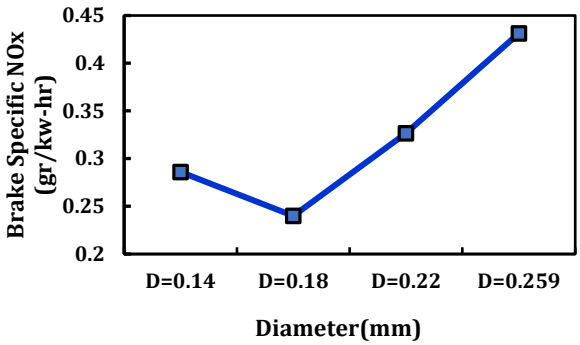
شکل ۲: مقایسه فشار داخل سیلندر برای حالت‌های مدل‌سازی و تجربی [۱۶]

[1] Ayhan
[2] Extended Coherent Flame Model-3Z
[3] Nehmer
[4] Reitz

بحث بر روی نتایج

تاثیر تغییرات قطر نازل پاشش آب بر انتشار اکسیدهای نیتروژن

شکل ۳ میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای واحد توان ترمزی تولیدی موتور را برای قطرهای مختلف نازل پاشش آب برای پاشش آب ۶۰ درصد و سوخت دیزل خالص نشان می‌دهد.

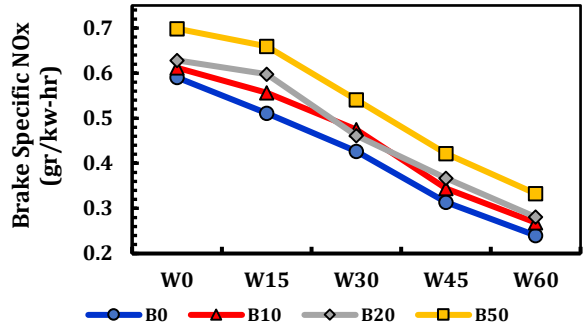


شکل ۳: تغییرات میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور برای قطرهای مختلف ذرات آب پاشیده شده در داخل سیلندر

شکل ۳ نشان می‌دهد که با تغییر قطر قطرات آب پاشیده شده توسط نازل پاشش آب، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور تغییر می‌کند. با توجه به نمودار مورد نظر مقدار NOx با افزایش قطر نازل پاشش آب از ۰٫۱۴ به ۰٫۱۸ میلی‌متر کاهش یافته ولی از قطر ۰٫۱۸ تا ۰٫۲۶ میلی‌متر مقدار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد. بنابراین بهترین قطر نازل در بین موارد مورد بررسی، قطر نازل ۰٫۱۸ میلی‌متر می‌باشد که در شبیه‌سازی‌های بعدی از این قطر استفاده شد.

تاثیر تغییرات درصد پاشش آب به داخل محفظه احتراق بر انتشار اکسیدهای نیتروژن

شکل ۴ میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور را برای درصدهای مختلف پاشش آب، از ۰ تا ۶۰ درصد و همچنین مخلوط‌های مختلف بیودیزل-دیزل، B0 تا B50 نشان می‌دهد.



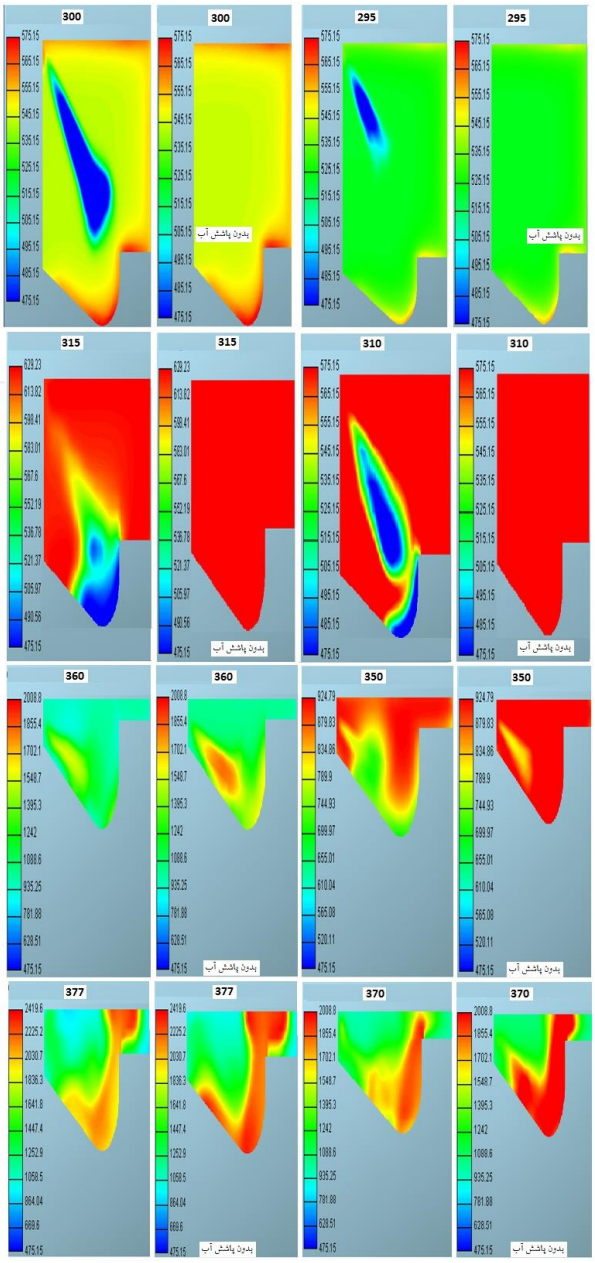
شکل ۴: میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور برای درصدهای‌مختلف پاشش‌آب و مخلوط‌های مختلف بیودیزل-دیزل

با توجه به شکل ۴ با افزایش درصد پاشش آب از صفر تا ۶۰ درصد مقدار اکسیدهای نیتروژن به‌طور متوسط تا ۳۴ درصد کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار NOx مربوط به حالت بدون پاشش آب و مخلوط سوخت حاوی ۵۰ درصد بیودیزل است. همچنین کمترین مقدار NOx مربوط به حالت پاشش آب ۶۰ درصد و سوخت دیزل خالص می‌باشد. با توجه به شکل مورد نظر با افزایش مقدار بیودیزل برای همه حالت‌های پاشش آب، مقدار اکسیدهای نیتروژن افزایش یافته که دلیل آن وجود مولکول‌های اکسیژن در ساختار سوخت بیودیزل است که سبب تولید اکسیدهای نیتروژن بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش میزان حجم پاشش آب مقدار NOx کاهش یافته که به دلیل کاهش قله‌های دمایی در محفظه احتراق است. این موضوع در بخش آتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تاثیر پاشش آب بر توزیع دمای داخل محفظه احتراق

شکل ۵ توزیع دمای داخل محفظه احتراق را برای حالت‌های بدون پاشش آب و پاشش آب ۶۰ درصد و برای سوخت دیزل خالص در زوایای مختلف میل لنگ نشان می‌دهد.

با توجه به شکل مورد نظر، برای حالت پاشش آب دمای محفظه احتراق در زمان شروع پاشش آب کاهش یافته به‌طوری که در نواحی اطراف نازل آب این کاهش دما بیشتر قابل مشاهده است. با ادامه پاشش آب (زاویه ۳۱۰ درجه)، ناحیه بیشتری از فضای داخل محفظهٔ احتراق تحت تاثیرکاهش دما قرار می‌گیرد. در زاویه ۳۱۵ درجه میل‌لنگ (یعنی ۵ درجه پس از پایان پاشش آب) در نقاط نزدیک به نازل پاشش آب، جرم آب کمتری وجود دارد؛ ولی در ناحیه نزدیک به کف کاسه پیستون، آب تجمیع شده قابل مشاهده است. با مقایسه دو حالت پاشش آب و بدون پاشش آب در زاویهٔ ۳۵۰ درجه میل‌لنگ (۵ درجه بعد از شروع پاشش سوخت و ۴۰ درجه پس از پایان پاشش آب) نتایج نشان می‌دهد که برای حالت پاشش آب نواحی زیادی از محفظهٔ احتراق به علت جذب گرما توسط آب کاهش دما داشته است. در زاویهٔ ۳۶۰ درجه میل‌لنگ که همچنان پاشش سوخت ادامه دارد، اختلاف دمای محفظه برای دو حالت پاشش آب و بدون پاشش‌آب کاملا قابل روئیت است. با توجه به این‌که پاشش سوخت در زاویهٔ ۳۶۶٫۵ درجه خاتمه می‌یابد، در زاویهٔ ۳۷۰ درجه میل‌لنگ در حالت پاشش آب، اختلاف دما در نواحی مختلف محفظه احتراق همچنان محسوس می‌باشد؛ ولی در زاویهٔ ۳۷۷ درجه میل‌لنگ مشاهده می‌شود که برای دو حالت پاشش آب و بدون پاشش آب اختلاف دما به حداقل رسیده و نواحی متناظر محفظه برای دو حالت، تقریبا دمای یکسانی دارند و تاثیرگذاری پاشش آب در این مرحله از سیکل کمتر از مرحله قبلی است.



شکل ۵: توزیع دمای داخل محفظه احتراق را برای حالت‌های بدون پاشش آب و پاشش آب ۶۰ درصد و برای سوخت دیزل خالص در زوایای مختلف میل لنگ

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تاثیر پاشش آب بر انتشار اکسیدهای نیتروژن از یک موتور دیزلی با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار AVL Fire پرداخته شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که:

- تغییر قطر قطرات آب پاشیده شده توسط نازل پاشش آب، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به ازای توان ترمزی تولیدی موتور تاثیر گذار می‌باشد که در این مطالعه اندازهٔ بهینه برای قطرات آب ۰٫۱۸ میلی‌متر به‌دست آمد.
- با افزایش درصد پاشش آب مقدار اکسیدهای نیتروژن روند کاهشی داشته به‌طوری که کمترین مقدار NOx مربوط به حالت پاشش آب ۶۰ درصد (با کاهش ۳۴ درصدی نسبت به حالت بدون پاشش آب) است.
- با افزایش مقدار بیودیزل در مخلوط سوخت برای همه حالت‌های پاشش آب، مقدار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد.
- در زمان شروع پاشش آب دمای محفظه احتراق کاهش یافته به‌طوری که در نواحی اطراف نازل آب این کاهش دما بیشتر قابل مشاهده است.
- در زاویهٔ ۳۵۰ درجه میل‌لنگ (۵ درجه بعد از شروع پاشش سوخت و ۴۰ درجه پس از پایان پاشش آب) نواحی زیادی از محفظهٔ احتراق به علت جذب گرما توسط آب کاهش دما داشته است.
- در زاویهٔ ۳۷۰ درجه میل‌لنگ که پاشش سوخت پایان یافته است همچنان اختلاف دما در نواحی مختلف محفظه احتراق برای دو حالت پاشش آب و بدون پاشش آب محسوس می‌باشد؛ ولی در زاویهٔ ۳۷۷ درجه میل‌لنگ برای دو حالت پاشش آب و بدون پاشش آب اختلاف دما به حداقل رسیده و نواحی متناظر محفظه برای دو حالت، تقریبا دمای یکسانی دارند.

مراجع

1- Plee, S. L., Ahmad, T. and Myers, J. P., 1981, "Flame temperature correlation for the effects of exhaust gas recirculation on diesel particulate and NOx emissions", *SAE Paper*, 811195.

2- Ghaffarpour, M. and Baranescu, R., 1996, "NOx reduction using injection rate shaping and intercooling in diesel engines", *SAE Paper*, 960845.

3- Dodge, L. G., Leone, D. M., Naegeli, D. W., Dickey, D.W. and Swenson, K. R., 1996, "A PC-based model for predicting NOx reductions in diesel engines", *SAE Paper*, 962060.

4- Yasin, M. M., Mamat, R., Yusop, A. F., Paruka, P., Yusaf, T. and Najafi, G., 2015, "Effects of exhaust gas recirculation (EGR) on a diesel engine fuelled with palm-biodiesel", *Energy Procedia*, 75, 30-36.

5- Taghavifar, H., and Anvari, S., 2019, "The effect of temperature and amount of water in co-injection of dieselwater on exergy and irreversibility rate of VGT diesel engine", *Applied Thermal Engineering*, 162:114314.

6- Hoekman, S. K. and Robbins, C., 2012, "Review of the effects of biodiesel on NOx emissions", *Fuel Processing Technology*, 96, 237–249.

7- Tesfa, B., Mishra, R., Gu, F., Ball, A.D., 2012, "Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel", *Renewable Energy*, 37, 333-344.

8- Hoekman, S. K. and Robbins, C., 2012, "Review of the effects of biodiesel on NOx emissions", *Fuel Processing Technology*, 96, 237–249.

9- Giakoumis, E. G., Rakopoulos, C. D., Dimaratos, A. M. and Rakopoulos, D. C., 2012, "Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends", *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(5), 691-715.

10- Chintala, V. and Subramanian, K.A., 2016, "Experimental investigation of hydrogen energy share improvement in compression ignition engine using water injection and compression ratio reduction", *Journal of Energy Conversion and Management*, 108, 106-119.

11- Soni, K. D. and Gupta, R., 2016, "Numerical investigation of emission reduction techniques applied on methanol blended diesel engine", *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1867–1879

12-Taghavifar, H., Anvari, S. and Parvishi, A., 2017, "Benchmarking of water injection in a hydrogen-fueled diesel engine to reduce emissions", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11962-11975.
13- Sandeep, S., Kinkhabwala, B., Sadagopan, K., Raaj, A. et al., 2019, "Assessment of water injection in a heavy duty diesel engine for NOx reduction potential", *SAE Technical Paper*, 2019-26-0145, doi:10.4271/2019-26-0145.
14- Zhanga, Z., Jiaqiang, E., Chena, J., Zhua, H. et al., 2019, "Effects of low-level water addition on spray, combustion and emission characteristics of a medium speed diesel engine fueled with biodiesel fuel", *Fuel,* 239, 245–262.
15- Ayhana, V. and Ece, Y. M., 2020, "New application to reduce NOx emissions of diesel engines: Electronically controlled direct water injection at compression stroke", *Applied Energy*, 260, 114328.
16- Nehmer, D. A. and Reitz, R. D., 1994, "Measurement of the effect of injection rate and split injections on diesel engine soot and NOx emissions", *SAE Technical Paper*, 940668.