فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

بررسی تجربی تأثیر نوع تلمبهٔ افشانه بر متغیرهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل در بار کامل

رضا حوراسفند[۱]، سید رضا موسوی سیدی[۲*]، وحید شاطریان القلندیس[۳]

[۱] دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، r_hooresfand@yahoo.com
[۲] دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، mousavi22@yahoo.com
[۳] شرکت موتورسازان تبریز، تبریز، ایران، vahid729@gmail.com
[*] نویسندهٔ مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۱۳۵۶۹۷۱۳

چکیده

در این مطالعه، که بر روی موتور چهار استوانهٔ دیزل MN440A-75AD انجام شد، هدف بررسی و ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر تلمبه‌های افشانهٔ دوار DPA و خطی PL بر متغیرهای عملکردی (گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه ترمزی) و آلایندگی (Soot، NOx و HC) با تغییرات دور موتور و در بار کامل است. بنابراین، هر یک از تلمبه‌های افشانهٔ فوق‌الذکر بر روی موتور بسته شد، موتور در یازده حالت مختلف دور موتور به فاصلهٔ ۱۰۰ دور در دقیقه (د.د.د.)، از حداقل دور ۱۰۰۰ د.د.د. تا حداکثر دور ۲۰۰۰ د.د.د.، با ثابت نگه داشتن تمامی شرائط عملکردی موتور و با توجه به پایداری لگام ترمز برای ثابت نگهداشتن دور موتور در سرعت معینی، آزمایش شد. تحلیل آماری این تحقیق با نرم‌افزار MINITAB و با آزمایش بر پایه طرح کامل تصادفی با دو عامل نوع تلمبه (ردیفی و دوار) و عامل دور موتور با سه تکرار انجام گردید. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش، عامل نوع تلمبهٔ افشانه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار گشتاور و مصرف سوخت ویژه ترمزی دارد. در حالی که بر مقدار توان ترمزی تأثیر معنی‌دار ندارد. همچنین، نوع تلمبهٔ افشانه بر مقدار آلاینده‌های منتشر شده از موتور (Soot، NOx و HC) تأثیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد دارد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:
دریافت: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۷ شهریور ۱۳۹۳

کلیدواژه‌ها:
آلاینده
متغیرهای عملکردی
سامانهٔ سوخت‌رسانی
فشار پاشش سوخت
موتور دیزل

۱) مقدمه

سامانهٔ سوخت‌رسانی موتور دیزل یکی از تأثیرگذارترین شاخص‌ها بر نحوه عملکرد موتورهای دیزل و ساز و کار احتراق در استوانه موتور و در نهایت آلاینده‌های آن است. با توجه به نحوه کارکرد موتور دیزلی، تغییر در سامانهٔ پاشش سوخت نقش تعیین کننده روی متغیرهای اصلی موتور از جمله آلایندگی دارد و در بحث کاهش آلایندگی موتور دیزلی، حساس ترین بخش همانا سامانهٔ پاشش سوخت می باشد. در موتورهای دیزل امروزی سامانهٔ تزریق به گونه‌ای طراحی می‌شود که فشار تزریق بزرگتری را ایجاد کند، زیرا این عامل باعث کاهش تولید آلاینده‌ها و نیز عاملی جهت دستیابی به عملکرد بهتر موتور در راستای توان است. وقتی سوخت با فشار پایین تزریق می‌شود، ذرات درشت‌تری از سوخت ایجاد می‌کند و باعث افزایش تأخیر در اشتعال می‌شود. با افزایش فشار تزریق ذرات ریزتری از سوخت حاصل می‌شود. برای بهبود احتراق باید سطح تماس سوخت با هوا باید افزایش یابد و این مورد با ریزتر شدن ذرات سوخت حاصل می‌شود. اما اگر فشار از حد خاصی تجاوز کند زمان تأخیر در اشتعال بسیار کوتاه شده و این عامل باعث می‌شود که زمان کافی برای ایجاد مخلوط همگن از سوخت و هوا وجود نداشته باشد و نهایتاً این فرایند منجر به کاهش بازده احتراق و به تبع آن افزایش آلاینده‌های خروجی از موتور می‌شود. با مطالعات دقیق و تصویربرداری نوری از شرائط ذرات پاششی در فشارهای بزرگ این مطلب ثابت شده است [۱].

اگر در شرائط مساوی برای دو نوع تلمبهٔ افشانه، فقط فشار پاشش تلمبه‌ها متفاوت باشند روی متغیرهای عملکردی موتور (توان، گشتاور و مصرف سوخت ویژه)، روی متغیرهای احتراق (تأخیر در اشتعال، مدت زمان احتراق، کسر جرم سوخته شده) و آلایندگی موتور مسلماً تأثیرگذار خواهد بود هرچه فشار تلمبه زیاد باشد فشار تزریق سوخت در حین پاشش زیادتر بوده و در نتیجه نفوذ سوخت به داخل هوای محفظهٔ احتراق بیشتر، اتمیزه کردن بهتر و به تبع آن تأخیر در اشتعال[1] کمتر می‌گردد. مدت زمان تأخیر در اشتعال مهمترین متغیر تأثیرگذار روی فرایند احتراق (مخصوصاً احتراق پیش آمیخته[2]) است و احتراق هم تأثیرگذار بر روی عملکرد و آلایندگی موتور دیزل.

برای بهینه‌سازی عملکرد موتور، سامانه‌های پاشش سوخت متنوعی به وجود آمده و تحقیقات زیادی توسط محققین جهت شبیه‌سازی این سامانه‌ها صورت پذیرفته است. ال اریان[3] [۲]، گویال[4] [۳] و کومار[5] و همکاران [۴] از جمله محققینی بودند که در زمینه سامانه‌های پاشش سوخت فشار پایین تحقیق کرده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی ساخت و پی بردن به مزایای فشارهای پاششِ بزرگ، طراحان و تولید کنندگان سامانه‌های پاشش سوخت به سمت تولیدِ سامانه‌های تأمین کنندهٔ فشارهای پاشش بزرگ سوق پیدا کرده‌اند. فیکارلا[6] [۵]، گبرت[7] و همکاران [۶] و کتانالو[8] [۷] از جمله کسانی هستند که بر روی سامانه‌های پاشش فشار بزرگ تحقیق کرده‌اند.

محققان در تحقیقی به بررسی تأثیر فشار پاشش سوخت بر روی متغیرهای احتراق از نظر تأخیر در اشتعال، مدت زمان احتراق و مدت زمان تزریق سوخت یک موتور دیزل تزریق مستقیم با نازل تک سوراخه پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش فشار پاشش تأخیر در اشتعال کاهش یافته و باعث بهبود احتراق و در نتیجه بهبود متغیرهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل می‌شود. همچنین با افزایش تأخیر در اشتعال، به دلیل اینکه مدت زمان بیشتری برای مخلوط سوخت و هوا برای احتراق کامل نیاز است، طول زمان احتراق افزایش یافته است [۸].

در مطالعه‌ای دیگر بر روی افشانه با پاشش چندگانه این نتیجه حاصل شد که افزایش فشار در پشت افشانهٔ منجر به افزایش سرعت جت و زاویه مخروط پاشش، و در نتیجه باعث بهبود اتمیزاسیون و تولید قطراتی با اندازه ریزتر می‌شود. همچنین در یک شرائط ثابت بار و زمان پاشش سوخت، افزایش دور موتور باعث کاهش تاخیر اشتعال استاتیکی و دینامیکی شد [۹].

در تحقیقی اثر متغیرهای تزریق سوخت نظیر هندسه نازل، زاویه پاشش و فشار تزریق سوخت، بر روی سامانهٔ سوخت‌رسانی موتور OM355 اعمال شد. نتایج نشان داد با افزایش فشار تزریق از ۱۹۵ بار به ۳۶۰ بار، آلاینده Soot به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته اما از طرف دیگر آلاینده NOx افزایش می‌یابد [۱۰].

در مطالعه‌ای به دو صورت تئوری و تجربی تأثیر قطر لوله‌های فشار بزرگ سامانهٔ سوخت رسانی بر عملکرد و آلایندگی موتورهای دیزلی مورد بررسی قرار گرفت. در شبیه‌سازی انجام گرفته برای سامانهٔ پاشش سوخت مشخص شد که با افزایش قطر داخلی لوله‌های فشار بزرگ، فشار محفظهٔ پاشش، آهنگ پاشش سوخت و فشار لوله شدیداً افت پیدا می‌کند و در مقابل، کاهش قطر لوله سبب پیدایش پیک‌های فشار می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش قطر لوله‌ها، مقدار آلاینده NOx کاهش ولی مقدار UHC و CO افزایش می‌یابد. هم چنین با توجه به نتایج تجربی مشخص شد که با کاهش فشار پاشش به علت اختلاط نامناسب مخلوط سوخت و هوا، NOx کاهش و مقدار آلاینده‌های CO وUHC افزایش می‌یابد، با افزایش مقدار ذرات معلق و اکسیدهای کربن، مقدار دوده نیز افزایش می‌یابد همچنین با کاهش فشار پاشش محفظهٔ اشتعال در اثر افزایش قطر لوله‌ها، اختلاط مخلوط سوخت و هوا به صورت مناسب انجام نگرفته و اشتعال کاملی

[1] Ignition delay
[2] Premixed combustion
[3] EL-Erian
[4] Goyal
[5] Kumar
[6] Ficarella
[7] Gebert
[8] Catanalo

ایجاد نمی‌شود و سوخت تأمین شده برای اشتعال به هدر رفته و توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد [۱۱].

در تحقیقی تأثیر عددی زمان پاشش و زاویه پاشش بر نرخ تبخیر سوخت و آلاینده های یک موتور بنزینی پاشش چند نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که نرخ تبخیر سوخت با پاشش دیر هنگام سوخت کاهش یافته و با تغییر جهت پاشش به سمت نقاط داغ‌تر نظیر سطح بالایی دریچه افزایش می‌یابد و با افزایش نرخ تبخیر سوخت کیفیت مخلوط و احتراق بهبود می‌یابد که نتیجه آن کاهش آلاینده‌های CO و HC و افزایش نسبتا کم آلاینده NOx است [۱۲].

در تحقیقی به منظور بررسی اثرات فشار پاشش سوخت بر آلایندگی و عملکرد یک موتور دیزل، با ثابت نگهداشتن مقدار مصرف سوخت، فشار پاشش را از ۲۷۵ تا ۱۰۰۰ bar تغییر دادند. نتایج نشان دادند با افزایش فشار پاشش قطر قطرات سوخت کوچکتر شده و این باعث سریعتر شدن اتمیزه‌کردن سوخت، تبخیر سریعتر سوخت و در نهایت موجب بهبود تشکیل مخلوط سوخت و هوا می‌شود. همچنین با افزایش فشار پاشش (از ۲۷۵ بار به ۱۰۰۰ بار)، بیشینه فشار داخل استوانه افزایش می یابد و چون سطح زیر نمودار فشار بر حسب زاویه میل‌لنگ بیان کننده کار خروجی در هر چرخه می باشد، با ثابت نگه-داشتن مقدار کل سوخت پاشش در هر چرخه، توان اندیکه موتور ۱۲٪ و آلاینده دوده حدود ۵۸٪ افزایش و مقدار آلاینده NOx افزایش ۱/۸ برابری را نشان می‌دهد [۱۳].

تلمبه افشانه‌هائی که بر روی موتور تراکتور ITM285 نصب می‌شدند، دارای سامانه‌ای کاملاً مکانیکی هستند و طراحی آنها مربوط به دهه ۷۰ میلادی است. در زمانی که این نوع تلمبه افشانه‌ها طراحی شده و به تولید انبوه رسیدند هنوز قوانین و استانداردهای جامعی در مورد آلایندگی، عملکرد، مصرف سوخت و ... تدوین نشده بود، از این رو در طراحی این تلمبه افشانه‌ها، متغیرهای فوق الذکر چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند به عبارتی تلمبه افشانه‌های قدیمی عملکرد مطلوبی را از نقطه نظر آلایندگی و کارائی ندارند و به ویژه، امروزه با تدوین و تکمیل قوانین آلایندگی در سطح بین‌الملل و از جمله ایران، امکان استفاده از شبیه‌سازی‌های قدیمی تلمبه افشانه با دشواری مواجه خواهد شد، بنابراین به منظور حل این مشکل و نیز در راستای توسعه و بهبود کیفیت موتورهای تولیدی، موضوع جایگیزینی شبیه‌سازی‌های مورد استفاده تلمبه افشانه با شبیه‌سازی‌های جدیدتر مطرح شد.

با توجه با اینکه تلمبهٔ افشانه مورد استفاده در سامانهٔ سوخت رسانی موتور MN440A-75AD تلمبه آسیابی از نوع DPA که دارای فشار پاشش پایین (در حدود ۵۰۰ بار) است به همین علت در این تحقیق تلمبه فشار بزرگ خطی PL که دارای سازوکارهای پیشرفته‌تری (فشار تزریق بزرگ و زمانبندی پاشش سوخت (پیش‌رسی دینامیکی)) و استاندارد آلایندگی Euro 2 است، جایگزین تلمبه DPA شده است تا بتوان از طریق این طرح تحقیقی، موضوع جایگزینی تلمبهٔ افشانه ردیفی به جای تلمبهٔ افشانه آسیابی بر روی یک موتور دیزل MN440A-75AD به عنوان یکی از تأثیرگذارترین بخش روی متغیرهای اصلی موتور از جمله متغیرهای عملکردی و آلایندگی، مورد بررسی قرار داد.

۲) مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در واحد تحقیقات مهندسی شرکت موتورسازان، از شرکت‌های وابسته به مجموعه شرکت‌های تراکتورسازی تبریز انجام شد. در انتخاب موتور مورد بررسی سعی شد پرکاربردترین نوع موتور در بخش کشاورزی انتخاب شود. با بررسی به عمل آمده پرکاربردترین وسیله کشاورزی در ایران، تراکتور 285 ITM است. این تراکتور دارای موتوری با نام علمی G4.248 است که جایگزین کردن تدریجی موتور MN440A-75AD به جای موتور G4.248 از برنامه‌های محوری و اساسی شرکت موتورسازان تراکتورسازی محسوب می‌شود. لذا این تحقیق بر روی موتور دیزل جدید MN440A-75AD با سوخت دیزل (گازوئیل) انجام شد (جدول ۱). تلمبه‌های افشانه‌ای که در این تحقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند تلمبهٔ افشانه دوار DPA ساخت شرکت WSK کشور لهستان و تلمبهٔ افشانه ردیفی PL ساخت شرکت F-design کشور چین است. مشخصه‌های اصلی موتور و تلمبه‌های افشانه در جداول زیر آمده است (جدول ۲ و ۳).

جدول ۱: مشخصه‌های موتور MN440A-75AD

قطر استوانه	۱۰۰ mm
کورس پیستون	۱۲۷ mm
تعداد استوانه/حجم موتور	۴/ ۳,۹۹ liter
نسبت تراکم	۱۶:۱
بیشینه گشتاور خروجی	۲۵۰ Nm در دور ۱۵۰۰ rpm
بیشینه توان خروجی	۵۶ kW در دور ۲۰۰۰ rpm
نوع پاشش	مستقیم
فشار پاشش سوخت	۲۲۵/۵ bar
تعداد سوراخ‌های افشانه/قطر	۴/ ۰,۲۸ mm
فشار تولیدی تلمبهٔ افشانه	۷۰۰ bar
حالت دور آرام تند	۲۱۶۰ rpm
حالت دور آرام کند	۷۵۰ rpm
سوخت	گازوئیل
نوع کاربرد	کشاورزی

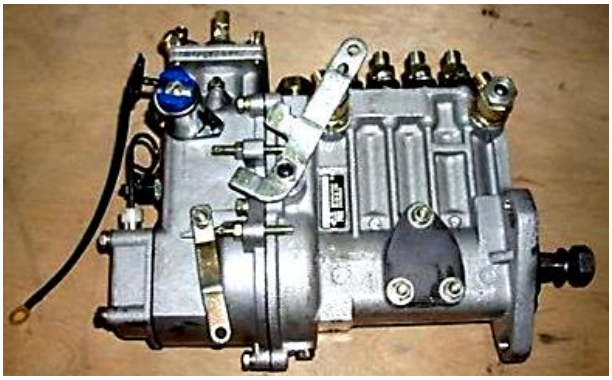
جدول ۲: مشخصه‌های تلمبهٔ افشانه دوار WSK-DPA

بیشینهٔ فشار تولیدی	۵۰۰ بار
بیشینهٔ توان	۱۴ kW/cyl در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د.
زمان‌بندی پاشش	۲۰° BTDC
خنک کاری	سوخت موتور (گازوئیل)

جدول ۳: مشخصه‌های تلمبهٔ افشانه ردیفی F design- PL

بیشینهٔ فشار تولیدی	۷۰۰ بار
بیشینهٔ توان	۱۴ kW/cyl در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د.
زمان‌بندی پاشش	۱۷° BTDC
خنک کاری	روغن (فشار روغن ۱/۵ bar)
استاندارد آلایندگی	Euro 2

شکل ۱: تلمبهٔ افشانه دوار WSK-DPA



شکل ۲: تلمبهٔ افشانه خطی F design- PL

۲-۱) تجهیزات اتاق آزمون و نحوهٔ کارکرد

نحوهٔ آزمون به این صورت بود که بعد از نصب تلمبهٔ افشانه و بستن موتور در اتاق آزمون، در ابتدا موتور در دور ۱۵۰۰ تحت بار ۵۰٪ به مدت ۳۰ دقیقه روشن شد تا از نظر دمای آب ورودی و خروجی و دمای روغن به حالت پایا برسد. همچنین دور، گشتاور و دسته گاز موتور مدیریت شد و متغیرهای مختلف موتور را در هر لحظه نمایش و ثبت شد که برای پایش سرعت و بار اعمالی بر موتور از لگام‌ترمز مغناطیسی استفاده شد. وظیفهٔ اصلی لگام‌ترمز ایجاد نیروی ترمزی قابل تنظیم در برابر چرخش محور خروجی موتور است. برای اندازه‌گیری گشتاور از یک بارگذار با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم استفاده شد. برای اندازه‌گیری دور از یک دورسنج مغناطیسی و برای اندازه‌گیری شار هوا از یک شار سنج نوع سیم داغ استفاده شد. مقدار مصرف سوخت نیز توسط شار سنج جرمی اندازه‌گیری شد. موتور در یازده حالت مختلف دور موتور آزمایش شد و با توجه به پایداری لگام ترمز برای ثابت نگهداشتن دور موتور در سرعت معینی، مقادیر گشتاور، توان، مصرف سوخت ویژه و همچنین آلاینده‌های NOx، HC و Soot اندازه‌گیری شدند.

در انتخاب دورهای مختلف موتور هدف بر این بود که بررسی شود تغییر دور موتور چه تأثیری بر متغیرهای عملکردی و آلایندگی موتور دارد. از آنجا که این نوع موتور در دو نوع کاربرد خود در تراکتور و ژنراتور، در دورهای ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ استفاده می‌شود از این‌رو دورهای موتور به فاصله ۱۰۰ د.د.د. از حداقل دور ۱۰۰۰ د.د.د. تا حداکثر دور ۲۰۰۰ د.د.د. انتخاب شدند. در هر یک از این دورها، متغیرهای عملکردی موتور و همچنین مقدار انتشار آلاینده‌ها اندازه‌گیری شدند.

در این تحقیق، کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار MINITAB و با آزمایش تغییرات بر پایه طرح کامل تصادفی با دو عامل نوع تلمبه (ردیفی و دوار) و عامل دور موتور و با ۲۲ تیمار (دو سطح برای نوع تلمبهٔ افشانه و یازده سطح برای دور موتور) و ۶ متغیر وابسته (گشتاور خروجی، توان ترمزی، مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده‌های NOx، HC و Soot) و در سه تکرار انجام پذیرفت. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای tukky در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برای رسم نمودارهای موجود نیز از صفحه گستردهٔ اکسل استفاده گردید.

۲-۱-۱) دستگاه لگام‌ترمز ۴۰۰ کیلووات

دستگاه لگام‌ترمز مورد استفاده در اتاق آزمون مرکز تحقیقات موتورسازان از نوع هیدرولیکی[1] ۴۰۰ (kW) ساخت شرکت فورد انگلستان با دقت اندازه‌گیری ۲± (Nm) و ثابت نگهداشتن دور با دقت ۲± د.د.د. است. لگام ترمزهای ادی کارنت مجهز به سامانهٔ داده برداری عددی اند که با جریان آب خنک‌کاری می‌گردند.

۲-۱-۲) اندازه‌گیری گشتاور

برای اندازه‌گیری گشتاور از یک حسگر بار ۵۰۰ گرمی استفاده شده است. در حالی که هیچ باری بر روی موتور اعمال نمی‌شود، لگام‌ترمز به صورت آزادانه بر روی بلبرینگ‌ها چرخش می‌کند اما به محض اعمال بار، مقاومت ایجاد شده در اثر میدان مغناطیسی بر روی نیروسنج وارد شده و عدد نشان داده شده توسط نیروسنج به عنوان گشتاور وارد بر موتور شناخته می‌شود.

[1] Eddy current dynamometer

۲-۱-۳) دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت

دستگاه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری مصرف سوخت یک شارسنج عددیی بود که با دقت صدم کیلوگرم بر ساعت اندازه‌گیری می‌کرد.

۱۲-۱-٤) دستگاه‌های سنجش آلاینده

دستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها اولین ابزار مورد نیاز در راستای کار بر روی طرح‌های بهبود گاز و آلاینده‌های مضر منتشره از موتورهای احتراق داخلی هستند. بر این اساس در سنجش آلاینده‌ها در کلیهٔ مراحل آزمون موتور از دستگاه AVL Dicom 4000 با دقت اندازه‌گیری $\pm 10 ppm$ ساخت کشور اتریش استفاده شده است و با استانداردهای مرسوم اروپا سازگاری دارد. این دستگاه دارای یک صفحه نمایش است که اطلاعات حاصل از سنجش آلاینده را نشان می‌دهد این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری گازهای مضر مونوکسیدکربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_X)، هیدروکربن‌های نسوخته (UHC) را دارا است. به علاوه این دستگاه قادر است که متغیرهای CO_2، O_2، کدری[1] و متغیرهای دیگر از قبیل دور، دمای روغن، زاویهٔ پاشش، مقدار پیش‌رسی و تأخیر را نشان داده و نتایج حاصل را به رایانه منتقل نماید (شکل ۳). همچنین برای اندازه‌گیری آلاینده دوده از دستگاه 415S V1.13 AVL Smoke meter (AVL) با دقت اندازه‌گیری $\pm 10 mg/m^3$ استفاده شده است. اندازه‌گیری آلاینده‌ها با نمونه برداری مستقیم از دود و فرستادن این نمونه بدون رقیق سازی به دستگاه‌های آلاینده سنج انجام گرفت.

همچنین لازم به یادآوری است که دستگاه‌های اندازه‌گیری آلاینده‌ها قبل از بکارگیری در آزمون‌ها، باید به طور دقیق تنظیم شوند تا از دقت اندازه‌گیری‌ها اطمینان حاصل شود. دستگاه مورد استفاده در مرکز تحقیقات موتورسازان در حدود دو ماه پیش از شروع آزمون‌ها تنظیم شده بود.

۳) نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیهٔ تغییرات اثرات اصلی و متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

نتایج حاصل از جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور تأثیر معنی‌دار بر گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده‌ها در سطح احتمال یک درصد دارد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور در محدوده مورد آزمایش بر گشتاور و مصرف سوخت ویژه ترمزی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است در صورتی‌که برای توان ترمزی موتور معنی‌دار نیست. همچنین اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر آلاینده‌های NO_X و HC در سطح احتمال یک درصد و برای آلاینده Soot در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است. در این مقاله فقط به بررسی اثر متقابل دور موتور و نوع تلمبهٔ افشانه پرداخته شده است.

شکل ۳: صفحهٔ نمایش از حسگرهای اندازه‌گیری

جدول ۴: تجزیهٔ تغییرات و اثرات اصلی و متقابل عوامل موثر بر متغیرهای عملکردی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		گشتاور (T)	توان ترمزی (P)	مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC)
تلمبه	۱	**۸۲۹٫۸۵	**۲۷٫۴۲	**۱۰۸۰۱٫۱۶
دور موتور	۱۰	**۴۴۶٫۶۵	**۳۵۴٫۲۳	**۲۴۰٫۳۸
تلمبه × دورموتور	۱۰	**۷۸٫۸۷	ns۲٫۳۵	**۲۲۸٫۷۸
خطای آزمایش	۴۴	۷٫۸۶	۱٫۴۲	۱۲٫۴۹
ضریب تغییرات	–	۱٫۱۶	۳٫۱۶	۱٫۳۸

ns برای معنادار نشدن و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

جدول ۵: تجزیه تغییرات و اثرات اصلی و متقابل عوامل موثر بر آلاینده‌های منتشر شده

منابع تغییر	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات		
		NO_X	(fsn) Soot	HC
تلمبه	۱	**۸۴۹۳۲۱	**۵۷٫۵۹	**۶۰٫۱۴
دور موتور	۱۰	**۲۲۳۳۸	**۱٫۰۸	**۹۳٫۰۳
تلمبه × دورموتور	۱۰	**۲۵۷۴۵۶	*۰٫۷۶	**۱۵٫۱۴
خطای آزمایش	۴۴	۳۰	۰٫۳۴	۴٫۷۴
ضریب تغییرات	–	۰٫۳۶	۱۲٫۰۹	۱۵٫۳۹

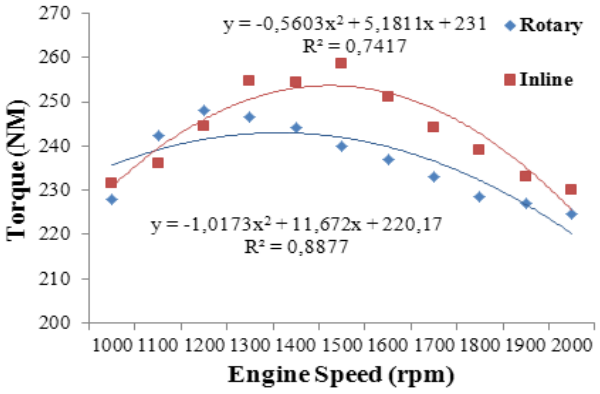
** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد است.

[1] Opacity

۳-۱) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر متغیرهای عملکردی موتور

۳-۱-۱) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر گشتاور خروجی موتور

شکل ۴ اثر متقابل دور موتور و نوع تلمبهٔ افشانه را بر تغییرات میانگین گشتاور تولید شده نشان می‌دهد. معادلهٔ رگرسیونی حاصل از برازش بر روند پاسخ صفات در سطوح مختلف دور موتور، حاکی از تبعیت گشتاور خروجی موتور هر دو نوع تلمبهٔ افشانه از تغییرات دور موتور به صورت درجه دوم بوده که ابتدا روند افزایشی داشته به طوری که تلمبه‌های افشانهٔ ردیفی و دوار به ترتیب در دورهای موتور ۱۴۷۳ و ۱۳۶۲ د.د.د. بیشترین مقدار خود را داشته (به ترتیب۲۵۳/۶۴ و۲۴۲/۹۷ نیوتن–متر) و بعد از این دور موتور روند نزولی داشته است. با توجه به شکل ۴ نوع تلمبهٔ افشانه و در نتیجه مقدار فشار سوخت ارسالی به افشانه‌ها تأثیر زیادی بر فشار پاشش سوخت به محفظهٔ احتراق و به تبع آن احتراق کاملتر و افزایش مقدار گشتاور تولیدی دارد. به بیانی دیگر اشتعال ناقص، باعث کاهش قدرت تولیدی موتور و هدر رفتن سوخت می‌شود. همچنین مقدار سوخت تحویلی در تلمبه جدید بیشتر از تلمبه DPA است و سوختن سوخت بیشتر، باعث افزایش توان و گشتاور می‌شود ولی در دورهای کندتر از rpm ۱۲۰۰ با وجود اینکه مقدار سوخت مصرفی بیشتر از مقدار مربوط به تلمبه DPA است به علت کاهش بیش از حد نسبت هوا به سوخت (مخلوط غنی)، احتراق به صورت کامل انجام نگرفته و باعث افت توان (شکل ۵) و گشتاور گردیده است. دود سیاه حاصل از احتراق ناقص در این دورها از موتور به وضوح در نمودارهای مربوط به آلاینده‌ها قابل مشاهده است. طبق بررسی‌های انجام شده فشار پاشش بر مصرف سوخت ویژه ترمزی BSFC تأثیر دارد و با کاهش فشار پاشش سوخت، به دلیل کاهش اختلاط سوخت و هوا مقدار گشتاور ترمزی نیز کاهش می‌یابد [۱۳]. بر اساس مرجع [۱۴] با افزایش فشار تزریق سوخت مقدار گشتاور خروجی موتور و توان ترمزی به ترتیب ۵٪ و ۴٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۴: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر گشتاور خروجی موتور

۳-۱-۲) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر توان ترمزی موتور

معادلهٔ رگرسیونی حاصل از برازش بر روند پاسخ صفات در سطوح مختلف دور موتور، حاکی از صعودی بودن توان ترمزی با هر دو نوع تلمبهٔ افشانه با تغییرات دور موتور به صورت درجه دوم بوده که در دور موتور ۲۰۰۰ دور در دقیقه به ماکزیمم مقدار میرسند. بیشینهٔ توان بدست آمده در دور موتور ۲۰۰۰rpm برای تلمبهٔ افشانه ردیفی و دوار به ترتیب برابر۵۱/۰۲ و ۴۹ کیلووات است. آنچه که در نمودار ۵ مشهود است این است که مقدار توان ترمزی با تلمبهٔ افشانه ردیفی در دورهای ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ به مقدار ناچیزی -که در تحلیل نرم‌افزاری اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد با توان ترمزی حاصل از تلمبهٔ افشانه دوار ندارد- بیشتر است. در کل با توجه به نمودار می‌توان گفت با افزایش فشار پاشش محفظه اشتعال در اثر افزایش فشار سوخت ارسالی از تلمبهٔ افشانه، مخلوط هوا و سوخت بـه صـورت خـوب انجـام گرفتـه و اشتعال کاملی ایجاد می‌شود و سوخت تأمین شده برای اشتعال به هدر نرفته و توان تولیدی موتور افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه موتور در دورهای تندتر کار کند می‌توان به توان بزرگتری دست یافت نتایج تجربی نشان داد که در حالت استفاده از تلمبهٔ افشانه با فشار تولیدی بیشتر، تـوان تولیـدی حـدودا ۳٫۴٪ افزایش می‌یابد. بر اساس مرجع [۱۳] و [۱۴] با افزایش فشار پاشش و در نتیجه افزایش فشار داخلی، توان داخلی و ترمزی موتور افزایش می‌یابد.

۳-۱-۳) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور

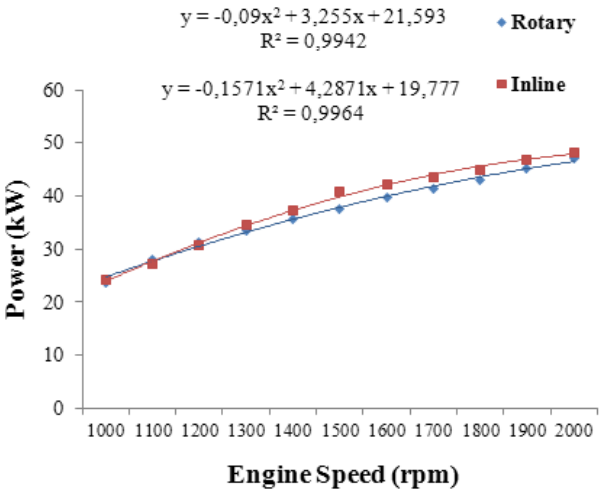
شکل ۶ اثر متقابل دور موتور و نوع تلمبهٔ افشانه را بر تغییرات میانگین مصرف سوخت ویژه ترمزی تولید شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییرات مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی برای هر دو نوع تلمبه از درجهٔ دوم و در تمامی دورهای مورد بررسی در موتور مجهز به سامانهٔ سوخت رسانی با تلمبهٔ افشانه ردیفی کمتر از نوع دوار است. کمترین مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی برای نوع ردیفی و دوار به ترتیب در دورهای موتور ۱۳۹۱ و ۱۶۹۳ rpm است که مقدار آنها برابر است با ۲۳۹٫۶ و ۲۵۹٫۹۴ گرم بر کیلووات ساعت. روند تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی با تلمبهٔ افشانه ردیفی تقریباً صعودی است و با افزایش دور موتور با شیب بسیار ملایمی افزایش یافته است. در توجیه این روند بر اساس مرجع [۱۸] می‌توان گفت با افزایش سرعت موتور، مقدار مصرف سوخت ویژه موتور نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به تعریف مصرف سوخت ویژه ترمزی $BSFC = M_f / P_b$ و با توجه به اینکه با افزایش مقدار فشار پاشش سوخت و اشتعال کامل سوخت و هوا در داخل استوانه، توان ترمزی تولیدی با تلمبهٔ افشانه ردیفی نسبت به نوع دوار

افزایش می‌یابد، در نتیجه طبق رابطه فوق مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی با تلمبهٔ افشانه ردیفی کاهش یافته است.

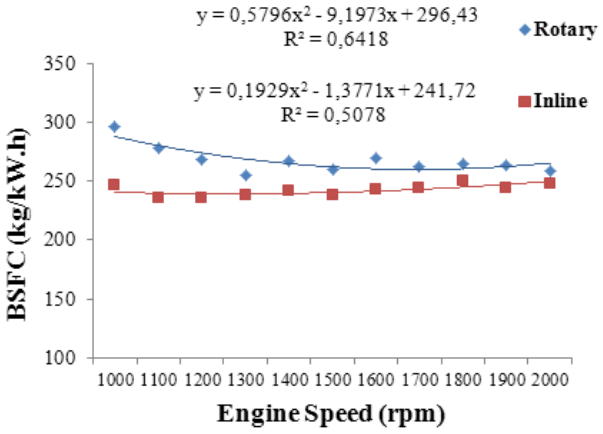
۳-۲) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر مقدار آلایندگی موتور

۳-۲-۱) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر انتشار آلاینده NO_X

با توجه به شکل ۷، همانطور که از نتایج آزمون آلایندگی NO_X در حالت بار کامل مشخص است، با افزایش فشار سوخت ارسالی تلمبه برای جلوگیری از افزایش آلاینده NO_X، آوانس پاشش سوخت در تلمبهٔ افشانه PL، نسبت به تلمبهٔ افشانه DPA، ۳ درجهٔ میل‌لنگ کاهش یافته است. با توجه به نمودار، تغییرات NO_X برای هر دو نوع تلمبه به صورت تابع درجهٔ دوم از دور موتور است که کمترین مقدار انتشار با تلمبهٔ ردیفی در دور موتور ۱۷۳۳ اتفاق افتاده که برابر ۱۴۳۲ ppm است.



شکل ۵: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر توان ترمزی موتور

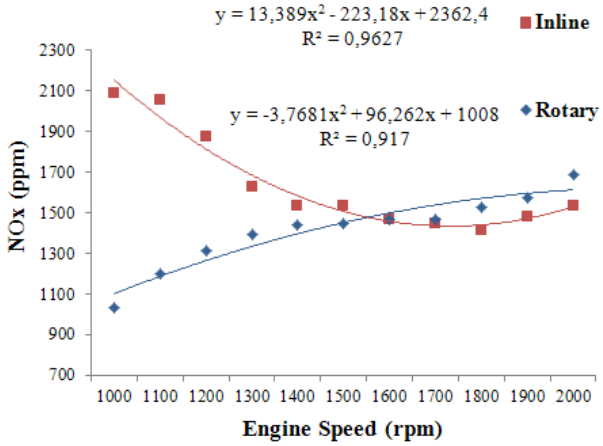


شکل ۶: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور

همچنین به دلیل اینکه افزایش فشار در پشت افشانه منجر به افزایش سرعت جت و زاویه مخروط پاشش، و در نتیجه باعث بهبود اتمیزه شدن و تولید قطراتی با اندازه ریزتر می‌شود، در نتیجه دمای گازهای داخل استوانه (دمای شعله) را بیشتر کرده و در نهایت با توجه به اینکه با افزایش دما تجزیه مولکول‌های O_2 به اتم‌های O افزایش می‌یابد، تولید آلاینده NO_X بیشتر می‌گردد. همچنین در دورهای نزدیک به توان نامی موتور (۱۷۳۳ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه) به دلیل اینکه عوامل دما و نسبت سوخت به هوا اثرگذاری بیشتری نسبت به سرعت احتراق دارند مقدار انتشار آلاینده NO_X در تلمبهٔ افشانه ردیفی رو به افزایش است. لازم بذکر است که این موتور بر روی تراکتور بیشترین کارکرد را بین دورهای ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ د.د.د. دارد که در این دورها مقدار انتشار آلاینده NO_X با تلمبهٔ افشانه ردیفی نسبت به نوع ردیفی بهبود یافته است. محققان [۱۵] و [۱۶] در تحقیقات خود نشان دادند که با افزایش فشار پاشش سوخت، مقدار آلایندهٔ NOx تا حد زیادی افزایش و آلایندهٔ PM در حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

۳-۲-۲) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر انتشار آلاینده Soot

شکل ۸ اثر متقابل دور موتور و نوع تلمبهٔ افشانه را بر مقدار انتشار آلاینده Soot در دو نوع تلمبهٔ افشانهٔ ردیفی و دوار نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های رگرسیونی رسم شده مقدار انتشار آلاینده Soot در تمامی دورهای موتور در تلمبهٔ افشانه ردیفی نسبت به تلمبهٔ افشانه آسیابی کمتر است. در واقع با کاهش فشار پاشش محفظهٔ اشتعال مخلوط هـوا و سـوخت به صورت خوب انجام نگرفته و اشتعال کاملی ایجاد نمی‌شود و سوخت پاشیده شده به صورت آلاینده‌های دود موتور مانند هیدروکربن نسوخته و ذرات معلق از محفظه اشتعال خارج می شود. با بهتر شدن اختلاط سوخت و هوا، سوخت پاشیده شده به داخل محفظه اشتعال کاملتر خواهد سوخت در نتیجه آلاینده‌هایی که در اثر اشتعال ناقص بوجود می‌آیند (CO, HC, PM) کاهش خواهند یافت.



شکل ۷: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر مقدار تولید آلاینده NO_X

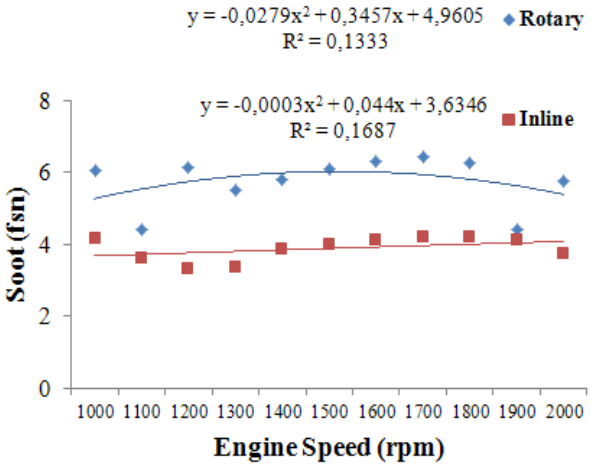
لازم بذکر است با توجه به معادلات بدست آمده بیشترین مقدار تولید آلاینده Soot با تلمبهٔ افشانه ردیفی و دوار به ترتیب در دور موتورهای ۱۶۳۳ و ۱۵۲۰ اتفاق افتاده که برابر با ۵,۲۴ و ۶,۰۳ اند. بر اساس مرجع [۱۷] با کاهش فشار پاشش، به علت افزایش ذرات معلق در دود و آلاینده‌هایی از قبیل ذرات معلق (PM) و اکسیدهای کربن، مقدار دوده و کدری دود افزایش می‌یابد.

۳-۲-۳) اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر انتشار آلاینده HC

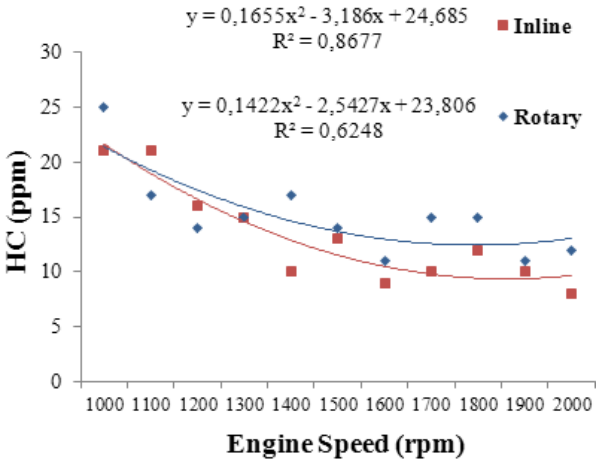
شکل ۹ اثر متقابل دور موتور و نوع تلمبهٔ افشانه را بر مقدار انتشار آلاینده HC در دو نوع تلمبهٔ افشانه ردیفی و دوار نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹ تغییرات هیدروکربن در دورهای مختلف موتور روند مشخصی را طی نمی‌کنند ولی با توجه به منحنی رگرسیونی با افزایش دور موتور مقدار انتشار آلاینده HC در هر دو نوع تلمبهٔ افشانه ردیفی و دوار کاهش می‌یابد.

با توجه به افزایش فشار پاشش سوخت در اثر افزایش فشار تزریق سوخت در تلمبهٔ افشانه ردیفی نسبت به نوع دوار و در نتیجه اتمیزه شدن و اختلاط بهتر سوخت و هوا در داخل استوانه و بهتر شدن کیفیت اشتعال، آلاینده هیدروکربن نسوخته که در اثر اشتعال ناقص بوجود می آید کاهش یافته است.

کمترین مقدار انتشار آلاینده HC با تلمبه دوار در دور موتور ۱۷۹۴ و برابر ۱۲,۴۴ (ppm) و برای نوع ردیفی در دور موتور ۱۸۶۲ و برابر با ۹,۳۵ (ppm) است. محققین نشان دادند افزایش فشار تزریق برای اتمیزه شدن بهتر سوخت در داخل محفظهٔ احتراق بسیار ضروری و منجربه احتراق کامل و کاهش آلاینده‌های CO و HC و افزایش آلاینده NO_X می‌شود [۱۵].



شکل ۸: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دو ر موتور بر مقدار تولید آلاینده Soot



شکل ۹: اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر مقدار تولید آلاینده HC

٤) نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحلیل آماری اثر متقابل نوع تلمبهٔ افشانه و دور موتور بر روی متغیرهای عملکردی و مقدار آلایندگی موتور نشان داد که در تمامی دورهای مورد بررسی استفاده از تلمبهٔ افشانه ردیفی (که دارای فشار تزریق بزرگتری است) به جای تلمبهٔ افشانه دوار باعث بهبود متغیرهای عملکردی موتور می‌شود. همچنین با نصب تلمبهٔ افشانه ردیفی به جای نوع دوار مقدار انتشار آلاینده‌های Soot و HC کاهش و مقدار انتشار آلاینده NO_X (تا دور موتور ۱۵۰۰ د.د.د.) افزایش خواهد یافت. بهترین شرائط کارکرد موتور از لحاظ جمیع شرائط و مقدار کمینه NO_X هنگامی است که تلمبهٔ افشانه ردیفی بر موتور وصل شده و موتور بین دورهای ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ د.د.د. کار می‌کند. همچنین این شرائط برای تولید کمتر سایر آلاینده‌ها نیز صدق می‌کند. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش و با توجه به اینکه بیشتر گزارشات از تأثیر مثبت افزایش فشار تزریق سوخت بر بهبود متغیرهای عملکردی و آلایندگی موتور حکایت دارند لذا افزایش فشار تزریق سوخت از طریق تغییر نوع تلمبهٔ افشانه تراکتور از نوع دوار به نوع ردیفی موجب بهبود عملکرد تراکتور و کسب گواهی Euro 2 آلایندگی خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از بخش مرکز تحقیقات مهندسی شرکت موتورسازان تبریز اعلام می‌دارند.

References

[1] L. Zhu, C.S. Cheung, W.G. Zhang, H. Zhen, Combustion performance and emission characters of a DI diesel engine fuel with ethanol-biodiesel blends, Fuel, Vol. 90, pp. 1743-1750, 2011

[2] M. EL-Erian, E.B. Wylie, J.A. Bolt, Diesel fuel injection system simulation and experimental correlation, SAE International, Paper No. 710569, 1971
[3] M. Goyal, Modular approach to fuel injection system simulation, SAE International, Paper No. 780162, 1978
[4] K. Kumar, R.R. Gaur, R.D. Garg, M.K. Gajendrababu, A finite difference scheme for the simulation of a fuel injection system, SAE International, Paper No. 831337, 1983
[5] A. Ficarella, P. Digesu, D. Laforgia, Diesel electro-injector: A numerical simulation code, SAE International, Paper No. 940193, 1994
[6] K. Gebert, R.L. Barkhimer, N.J. Brck, D.D. Wickman, K.V. Tanin, S. Das, R.D. Reitz, An evaluation of common rail, hydraulically intensified diesel fuel injection system concepts and rate shapes, SAE International, Paper No. 981930, 1998
[7] L.A. Catalano, V.A. Tondolo, A. Dadone, Dynamic rise of pressure in the common rail fuel injection system, SAE International, Paper No. 01-0210, 2002
[8] M. Ahmadi Ghadikolaei, Effect of cylinder air pressure and fuel injection pressure on combustion characteristics of direct injection (DI) diesel engine fueled with diesel and gasoline, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, Vol. 3, No. 1, pp. 234-241, 2014
[9] T.C. Wang, J.S. Han, X.B. Xie, M.C. Lai, N.A. Henein, E. Schwarz, W. Bryzik, Parametric characterization of high-pressure diesel fuel injection systems, Journal of Engines and Gas Turbines Power, Vol. 125, No. 2, pp. 412-426, 2003
[10] M.H. Javarshakian, A. Zarenezhad Ashkzari, S.B. Elmpoor, Investigate the geometry of the nozzle, spray angle and injection pressure on diesel engine performance and emissions of direct injection, 6th Annual Student Conference on Mechanical Engineering, Iran, 2008
[11] S. Ghafarzadeh, M. Fallah, N. Muslim, Experimental and theoretical study of the effect of tube diameter high pressure fuel injector on a diesel engine performance and emissions, 5th Conference of Internal Combustion Engines, Iran, 2006
[12] P. Omy, Numerical study of the effect of fuel evaporation rate and pollutant dispersion and Zayh injection Multi-point injection petrol engine, MSc Thesis, Tarbiat Modarres University, Iran, 2008
[13] S. Emami, B. Samadi Ghushchi, Numerical analysis of diesel engine fuel injection pressure increases, Fuel and Combustion Conference, Iran, 2009
[14] Y.I. Ingur, D. Altiparmak, Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions, Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 389-397, 2003
[15] J.K. Pandya, P.R. Pravin, S. S. Arvind, R. Patel, Effect of compression ratio and injection pressure on the performance and emission of CI engine with multiple injection techniques - A review study, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 405-411, 2013
[16] S. Han, C. Bae, The influence of fuel injection pressure and intake pressure on conventional and low temperature diesel combustion, SAE International, Paper No. 2012-01-1721, 2012
[17] S. Ghafarzadeh, M. Fallah, N. Muslim, Theoretical and experimental study of the effect of high-pressure fuel injection pipe diameter on the performance and emissions of diesel engines, 5th Conference of Internal Combustion Engines, Iran, 2007
[18] R. Abu Bakar, A.R. Ismail, Fuel injection pressure effect on performance of direct injection diesel engines based on experiment, American Journal of Applied Sciences, Vol. 5, No. 3, pp. 197-202, 2008

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Experimental investigation of injector pump type effect on performance parameters and emissions of diesel engine at full load

R. Hooresfand[1], S.R. Mousavi Seyedi[2*], V. Shaterian Alghalandis[3]

[1]*Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, r_hooresfand@yahoo.com*
[2]*Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, mousavi22@yahoo.com*
[3]*Tabriz Motorsazan Company, Tabriz, Iran, vahid729@gmail.com*
[*]*Corresponding Author, Phone Number: +98-911-356-9713*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 27 May 2014
Accepted: 08 September 2014

Keywords:
Pollutants
Performance parameters
Fuel system
Fuel injection pressure
Diesel engine

ABSTRACT

The point of this study is a comparative evaluation of effects of DPA rotary and PL linear injector pumps on performance parameters (torque, power and brake specific fuel consumption) and emissions (Soot, NOx and HC) with variable speeds of the engine at full loads. Thus each of aforementioned pumps were installed and the engine was tested at 11 different engine speeds, from 1000 to 2000 (rpm) with 100 (rpm) intervals. The statistical analysis was conducted by the Minitab software (version 16) based on the factorial test with a completely randomized model considering the pump (linear and rotary) and engine speed factors with 3 replications. Results of the statistical analysis of data showed a significant difference at 1% level of the injector pump on the brake torque and the specific fuel consumption, while there was no significant effect on the amount of the brake power. The type of the injector pump on the amount of emissions (Soot, NOx and HC) emitted from the engine, has a significant effect on the level of 1%.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.