بررسی تاثیر سرعت و بارگذاری موتور بر انتشار اکسیدهای نیتروژن از یک موتور دیزل با استفاده از امولسیون آب گازوئیل

محمد رضا سیفی* [۱]، زهرا قربانی [۲]، سید رضا حسن بیگی [۳]، برات قبادیان [۴]

[۱] استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک m-r-seifi@araku.ac.ir

[۲] فارغ التحصیل مقطع دکتری تخصصی، دانشگاه تهران z.ghorbani90@ut.ac.ir

[۳] استاد گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران rhbeigi@ut.ac.ir

[۴] استاد گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس ghobadib@modares.ac.ir

چکیده

در این مطالعه نتایج بررسی انتشار اکسیدهای نیتروژن منتشره از موتور دیزل با استفاده از ترکیبات مختلف امولسیون آب گازوئیل (۲، ۵، ۸ و ۱۰ درصد) و گازوئیل خالص (به عنوان سوخت شاهد) ارائه شده است. چهار حالت بارگذاری ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و شش سرعت ۱۵۰۰ تا ۲۷۵۰ دور بر دقیقه با نرخ افزایشی ۲۵۰ دور بر دقیقه برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شد. هیچ گونه تغییری در ساختار موتور اعمال نشد. برای تعیین میزان تاثیر سرعت، بارگذاری و نوع سوخت بر مقادیر انتشار اکسیدهای نیتروژن از رگرسیون چند متغیره گام به گام استفاده شد. همچنین برای ارزیابی وجود تفاوت معنی دار بین نتایج بدست آمده از از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. نتایج نشان داد حضور آب در سوخت دیزل با کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن، که خطرناکترین آلاینده موتور دیزل است، همراه می باشد. کمترین میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن مربوط به امولسیون حاوی ۵ درصد آب است. همچنین با افزایش بارگذاری انتشار اکسیدهای نیتروژن افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان داد که افزایش سرعت موتور با کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن همراه است. با توجه به بازده حجمی قابل قبول موتورهای دیزل و تمایل فراوان به استفاده از این موتورها در عملیات مختلف کشاورزی، استفاده از امولسیون آب گازوییل با کاهش آلاینده‌های خطرناکی مانند اکسیدهای نیتروژن می‌تواند به حفظ سلامت افرادی که در کنار موتورهای دیزل کار می‌کنند کمک کند.

کلمات کلیدی: موتور دیزل، امولسیون آب گازوییل، اکسیدهای نیتروژن، سرعت، بارگذاری موتور

Investigating the effect of engine speed and loading condition using water-diesel emulsion on the engine NO_x emission

Mohammad Reza seifi [1*], Zahra Ghorbani [2], Seyed Reza Hassan-Beygi [3], Barat Ghobadian [4]

[1] Department of Biosystem Mechanics, Arak University, Email: m-r-seifi@araku.ac.ir.

[2] PhD graduate, University of Tehran. *Email: z.ghorbani90@ut.ac.ir.

[3] Department of Agro-Technology, College of Abouraihan, University of Tehran, Email:rhbeigi@ut.ac.ir.

[4] Tarbiat Modares University (TMU). Email: ghobadib@modares.ac.ir.

ABSTRACT

In the present study, the results of an investigation on a diesel engine NOx emission using water–diesel emulsions (2%, 5%, 8% and 10% water by volume) are reported. The engine was run at different engine speeds ranging from 1500 to 2750 rpm, with steps of 250 rpm, and four engine loading conditions (25%, 50%, 75% and 100%). No change in engine components and fuel injection systems was made. The effect of engine speed, loading condition and fuel type was evaluated with multivariate stepwise regression. Further, the Duncan's multiple range tests was used to evaluate the significant difference between the mean values of measured engine NO_x emission with respect to change in the independent variables. The results showed that

*محمدرضا سیفی، دانشگاه اراک،mrseifi83@gmail.com

the water presence in neat diesel reduced the engine NO_x emission. Lowest NO_x emission was obtained for emulsion containing 5% water. NO_x emission increment was obtained with the increase in engine loading condition. However, higher engine speed yielded lower NO_x emission. Regarding to better volumetric efficiency of diesel engine and running it at full load condition, water-emulsion usage with decreasing NO_x emission could be beneficial for human health.

Keywords: Diesel engine, water-diesel emulsion, engine speed, loading condition, NO_x emission.

۱- مقدمه

امروزه موتورهای دیزل در انجام کارهای سخت و سنگین و عملیات کشاورزی در مدت زمان‌های بسیار طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر بدلیل بازده مکانیکی زیاد، در انجام کارهای سبک نیز این موتورها استفاده گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. بازده مکانیکی زیاد موتورهای دیزل بدلیل نسبت‌های تراکم بالاتر و غلظت بیشتر اکسیژن در محفظه احتراق است. اما موتورهای دیزل آلاینده‌های نامطلوبی حین فرایند احتراق تولید می‌کنند که عمده این آلاینده‌ها اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، هیدروکربن‌های نسوخته، اکسیدهای کربن و اکسیدهای گوگرد و دیگر ذرات کربنی و دوده می‌باشند. این آلاینده‌ها بر وضعیت جوی تاثیر گذاشته و باعث بروز مشکلاتی مانند بیماری های مزمن، گرم شدن کره زمین، آلودگی هوا، باران‌های اسیدی، مشکلات تنفسی وغیره می‌گردند. لذا قوانین سخت گیرانه‌ای برای کاهش مقدار آلایندگی این موتورها در سراسر دنیا وضع گردیده است. یکی از راه‌های کاهش آلایندگی این موتورها بهینه سازی فرایند احتراق سوخت در موتور از طریق انجام اصلاحات سخت افزاری در بخشهای مختلف موتور و محفظه احتراق است. این امر در کنار نیاز به طراحی نوین و تحقیق و توسعه فراوان، نیاز به وقت و هزینه زیاد برای ایجاد تغییر در موتورهای موجود را دارد که عملا مقرون به صرفه نمی باشد. روش دیگر استفاده از سوخت‌ها با بازده احتراقی مناسب می‌باشد. امولسیون آب گازوئیل به عنوان یکی از بهترین جایگزین‌های سوخت دیزل در سرتاسر دنیا مطرح شده است (موسولوس و همکاران، ۲۰۰۳) که برای استفاده در موتور دیزل نیاز به هیچ گونه اصلاحاتی در بخشهای مختلف آن ندارد (فهد و همکاران، ۲۰۱۳). این امولسیون، با کاهش دمای اشتعال می‌تواند تولید اکسیدهای نیتروژن حاصل از احتراق را کاهش داده و همچنین با قابلیت اتمیزاسیون بسیار بهتر از دیزل بازده احتراق بیشتری را در پی داشته باشد. با توجه به بزرگی مشکل آلودگی در کشور و به خصوص کلان شهرها، استفاده از امولسیون می تواند به عنوان بهترین راه حل کاهش آلودگی باشد. لذا در این مطالعه انتشار اکسیدهای نیتروژن به عنوان مهمترین آلاینده موتور دیزل که خطر ابتلا به سرطان را به شدت افزایش می دهد با استفاده از امولسیون اندازه‌گیری شده و با مقادیر بدست آمده برای گازوئیل خالص مقایسه می‌شود تا بتوان میزان خطرآفرینی آن را ارزیابی کرد.

۲- مواد و روشها

گازوئیل مورد استفاده در این آزمایش دارای استاندارد یورو ۴ می‌باشد. برای تهیه امولسیون، گازوئیل و آب مقطر به نسبت حجمی مورد نظر (۲، ۵، ۸ و ۱۰ درصد) با هم مخلوط می‌شوند. با استفاده از یک همزن، عمل اختلاط آب و گازوئیل انجام می‌گیرد. با توجه به عدم تمایل دو مایع برای اختلاط با یکدیگر، در صورت تلاش برای مخلوط کردن این دو مایع با روش عادی (هم زدن ترکیب) مخلوط پایداری تولید نمی‌شود و در مدت زمان کوتاهی پس از پایان عملیات هم زدن، دو مایع از یکدیگر جدا می‌شوند. به‌منظور تامین پایداری امولسیون‌ها، فعال کننده سطحی Span 80 به‌میزان دو درصد حجمی به محلول استفاده گردید که بر نیروهای چسبندگی مولکول‌های دو مایع غلبه کرده و دو فاز شدن مخلوط را تا مدت زمان معینی به تعویق می انداخت. مشخصات موتور مورد استفاده در جدول (۱) آورده داده شده است.

جدول ۱- مشخصات موتور دیزل.

Table 1. Diesel engine specifications

Model	Lombardini 9LD 625-2
No. of cylinders	2
Stroke	88 mm
Bore	95 mm
Engine Volume	1.27 L
Maximum power at 3000 rpm	(19 kW)
Maximum torque at 3000 rpm	67 N.m

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران

برای بارگذاری موتور و رسیدن به سرعت‌های ۱۵۰۰ تا ۲۷۵۰ دور بر دقیقه با نرخ افزایشی ۲۵۰ دور بر دقیقه از دینامومتر مدل Borghi e Saveri استفاده شد (شکل۱). دقت اندازه‌گیری توان و گشتاور این دینامومتر به‌ترتیب ۰/۱ کیلووات و یک نیوتن‌متر و دقت اندازه‌گیری سرعت دورانی یک دور بر دقیقه بود. اعمال بار به موتور به صورت دستی و به کمک کنترل از راه دور دینامومتر انجام شد. سرعت دورانی موتور و مقادیر توان و گشتاور در هر سرعت از روی نمایشگر کنترل از راه دور قابل رؤیت بود. میزان گشتاور مورد نیاز برای بارگذاری‌ها از پیش تعیین شده و با اندازه‌گیری گشتاور بیشینه موتور بدست آمد.

Figure 1. Borghi e Saveri Dynamometer

شکل ۱- دینامومتر Borghi e Saveri

اندازه گیری اکسیدهای نیتروژن با استفاده از آلاینده سنج مدل AVL DiTEST MDS 650 (شکل ۲) استفاده شد. دستگاه دارای حسگری است که درون اگزوز قرار می‌گیرد. دقت اندازه گیری اکسیدهای نیتروژن ۱ ppm و بازه اندازه گیری تا ۵۰۰۰ ppm است.

Figure 2. Emission measuring unit.

شکل ۲- دستگاه آلاینده سنج

پس از انجام اندازه‌گیری‌ها و بررسی اولیه نتایج، میزان تاثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای اندازه‌گیری شده توسط تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی ارزیابی شد. منظور از مدل خطی معادله‌ای است که نسبت به ضرایب خطی باشد. براساس این تعریف چندجمله‌ای‌ها در گروه معادلات خطی قرار می‌گیرند. مدل رگرسیون چند متغیره دارای شکل عمومی زیر است:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (۱)$$

در این رابطه y بردار n*1 مشاهدات، X ماتریس n*p متغیرهای مستقل مدل، β بردار p*1 ضرایب و ε بردار n*1 خطاها است. برای حل معادله فوق می‌توان از روش حداقل مربعات استفاده کرد. میزان خطای ri به‌صورت اختلاف بین مقدار مشاهده yi و مقدار تخمین زده شده $\bar{y}i$ تعریف می‌شود. مجموع مربعات باقیمانده‌ها S به‌شکل زیر نعریف می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i^2 - \hat{y}_i^2)^2 \quad (۲)$$

که n تعداد مشاهدات در نظر گرفته شده برای برازش است. با استفاده از بردار حل حداقل مربعات معادله (۱) می‌توان بردار ضرایب ناشناخته b را تخمین زد.

$$(X^T X)b = X^T y \Longrightarrow b = \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (۳)$$

قرار دادن b برای تعیین متغیر پاسخ تخمینی ȳi در مدل (۱) نتیجه می‌دهد:

$$y = Xb = Hy \quad (۴)$$

در این معادله بردار تخمین H با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$H = X(X^T X)^{-1} X^T \quad (۵)$$

باقیمانده‌ها را می‌توان توسط معادله ماتریسی ذیل محاسبه کرد:

$$r = y - \hat{y} = (1 - H)y \quad (۶)$$

به‌منظور انجام تحلیل رگرسیون چند متغیره در این تحقیق از نرم افزار SAS استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۳) تغییرات مقادیر انتشار اکسید نیتروژن برحسب سرعت موتور برای سوخت‌های مختلف را در بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به‌شکل، انتشار اکسیدهای نیتروژن برای سوخت‌های مختلف در سرعت‌ها و بارگذاری مختلف موتور برای سوخت دیزل و امولسیون‌های حاوی ۲، ۵، ۸ و ۱۰ درصد آب به‌ترتیب در محدوده‌های ppm ۵۶۵-۳۰۵۰، ppm ۳۰۰-۲۹۰۰، ppm ۳۱۰-۱۷۰۰، ppm ۳۹۰-۱۷۴۰ و ppm ۱۹۸۰-۲۸۰ قرار دارند. بیشترین مقادیر انتشار NO_x برای سوخت دیزل و امولسیون ۲ درصد، که کمترین مقدار آب را داراست، بدست آمد و افزایش آب باعث کاهش انتشار NO_x شد. آلاهمر[1] و همکاران (۲۰۱۰) نتایج مشابهی ارائه نمودند. در مطالعه دیگر، اثر امولسیون آب گازوئیل ۱۳ درصد در اتوبوس‌های شرکت واحد آتن بررسی شده که با کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن همراه بوده است (Tzirakis et al., 2006). دلیل عمده کاهش NO_x برای امولسیون‌ها کاهش دمای اشتعال سوخت حین فرایند احتراق می‌باشد (Farfletti et al., 2005). این کاهش دما ناشی از گرمای نهان زیاد آب می‌باشد که در حین تبخیر قطرات کوچک آب در امولسیون، حرارت موجود در سیلندر را جذب می‌کند (Maiboom et al., 2011).

براساس مطالعه جزیر[2] و همکاران (۲۰۱۱) کاهش NO_x به‌دلیل تغییر فاز آب از مایع به بخار می‌باشد که یک واکنش گرماگیر بوده و باعث کاهش دما در سیلندر می‌شود. بطور کلی مشاهده می‌شود که افزایش بارگذاری موتور باعث افزایش انتشار NO_x می‌شود و از ppm ۱۳۰۰ در بار ۲۵ درصد به ppm ۲۹۰۰ در بار کامل موتور می‌رسد. این امر می‌تواند به‌دلیل افزایش میزان پاشش سوخت به محفظه احتراق باشد که احتراق قوی‌تر و با دمای بیشتری را به همراه دارد. بیشتر شدن دما در سیلندر حین فرایند احتراق باعث افزایش NO_x می‌شود. ایتنین[3] و همکاران (۲۰۱۵) و آتیا[4] و کلاچیتسکی[5] (۲۰۱۴) نتایج مشابهی را برای بارگذاری‌های مختلف موتور ارائه کرده‌اند.

[1] Alahmer
[2] Jazair
[3] Ithnin
[4] Attia
[5] Kulchitskiy

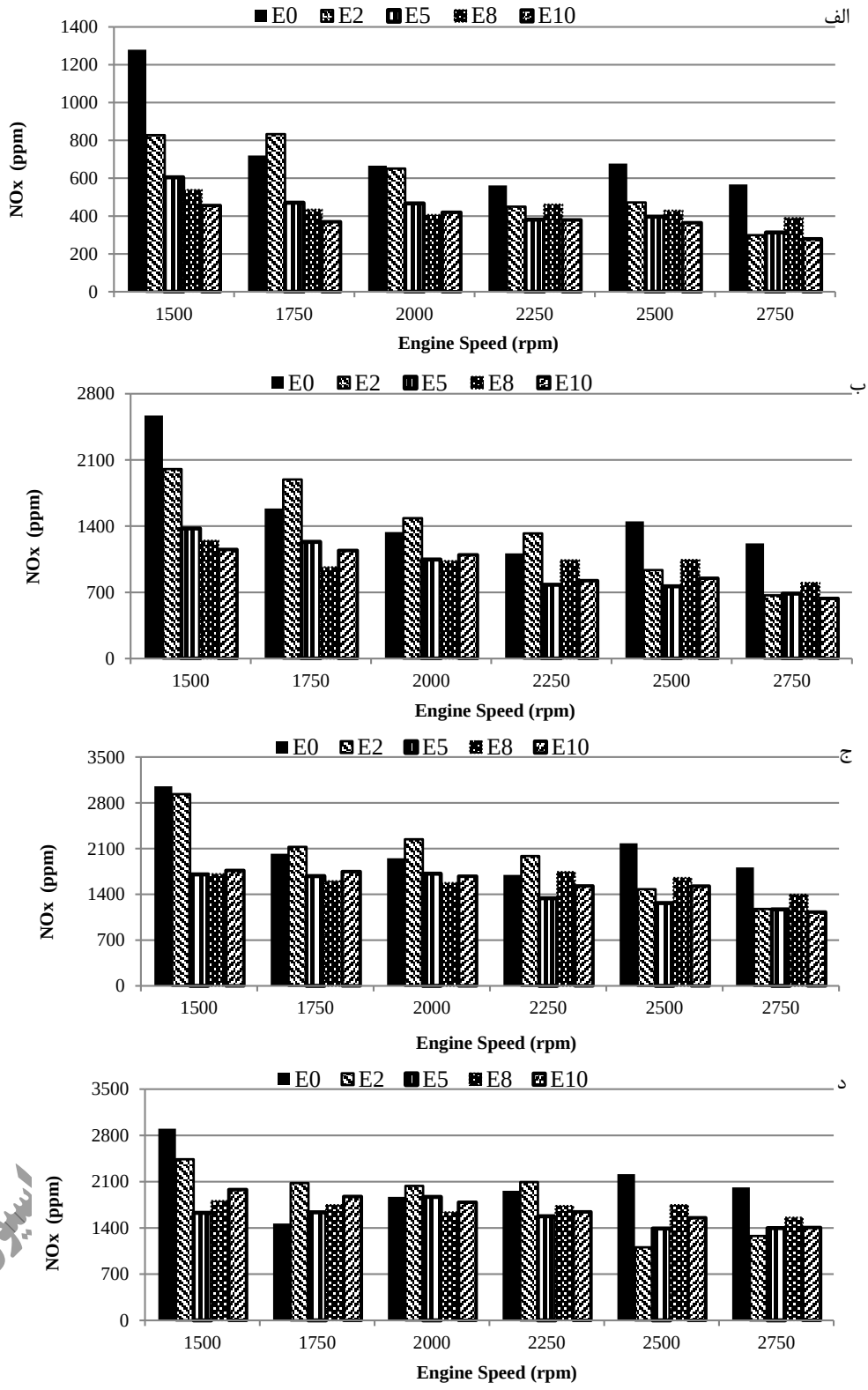


Figure 3. Engine NOx emission versus its speed for different fuel blends at a) 25%, b) 50%, c) 75%, and d) 100%

شکل ۳- میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن برحسب سرعت موتور با استفاده از سوخت‌های مختلف در بارگذاری‌های: الف- ٪۲۵، ب- ٪۵۰، ج- ٪۷۵ و د-٪۱۰۰

نتایج رگرسیون چند متغیره گام به گام برای تعیین میزان تاثیر متغیرهای مستقل بر مقادیر انتشار اکسیدهای نیتروژن در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که تغییرات هر سه متغیر مستقل با تغییرات انتشار اکسیدهای نیتروژن رابطه معنی‌دار دارد. در این حالت، بارگذاری بیشترین تاثیر و نوع سوخت کمترین تاثیر را بر مقادیر اکسیدهای نیتروژن نشان داد.

جدول ۱- نتایج رگرسیون چند متغیره انتشار اکسیدهای نیتروژن از موتور برحسب نوع سوخت، سرعت و بارگذاری موتور.

Table 1. Multivariate stepwise regression results of the engine NO_x emission versus its speed, fuel type and loading condition

Eq. Model	b_3	b_2	b_1	Interception	Parameter	Step
NO_x = 436.251(L)+216.71			436.251***	216.71**	Load(L)	1
NO_x = 436.251(L)-119.513(S)+636.007		-119.513***	436.251***	635.007***	Speed(S)	2
NO_x = 436.251(L)-119.513(S)-119.611(F)+ 993.84	-119.611***	-119.513***	436.251***	993.84***	Fuel(F)	3

***معنی دار در سطح ۰/۰۰۱ و ** معنی دار در سطح ۰/۰۱ است.

شکل (۴) مقایسه مقادیر اکسیدهای نیتروژن اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ورود مرحله به مرحله متغیرهای مستقل به مدل دقت پیش‌بینی آن زیاد شده و نقاط به آرایش روی یک خط نزدیک‌تر می‌شوند.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

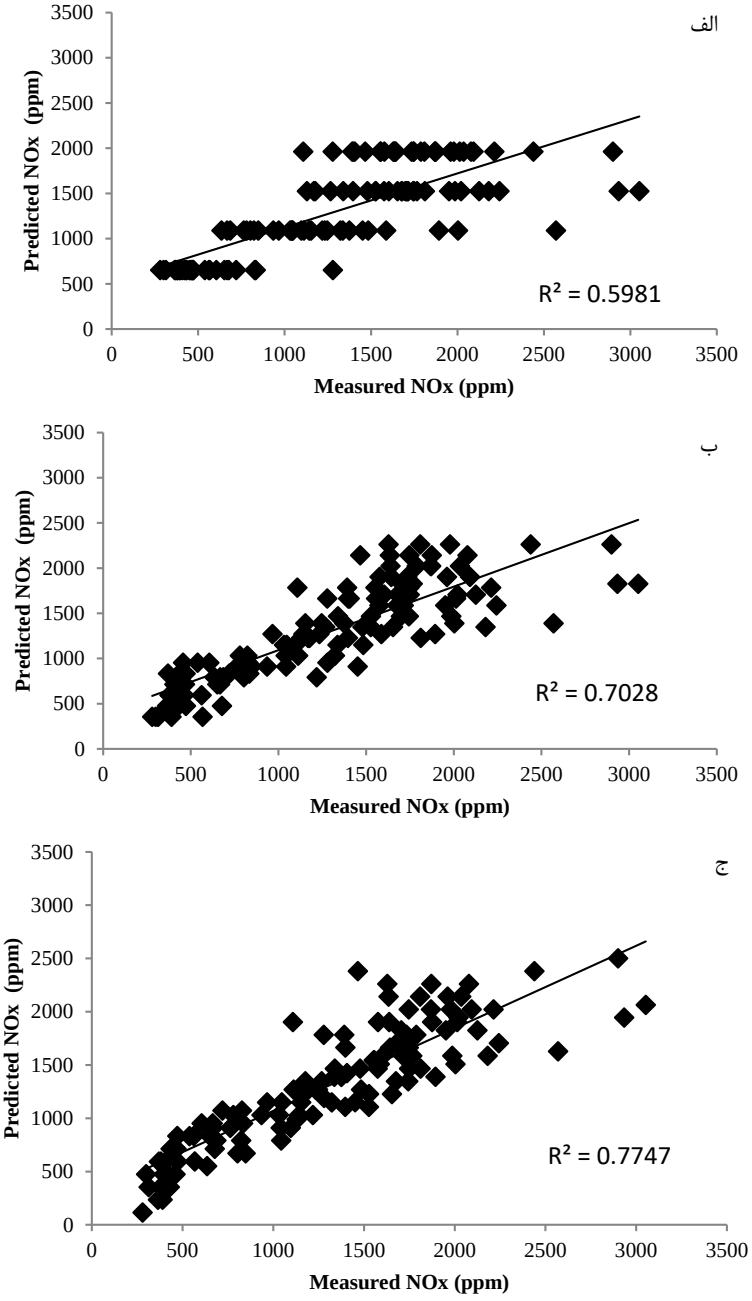
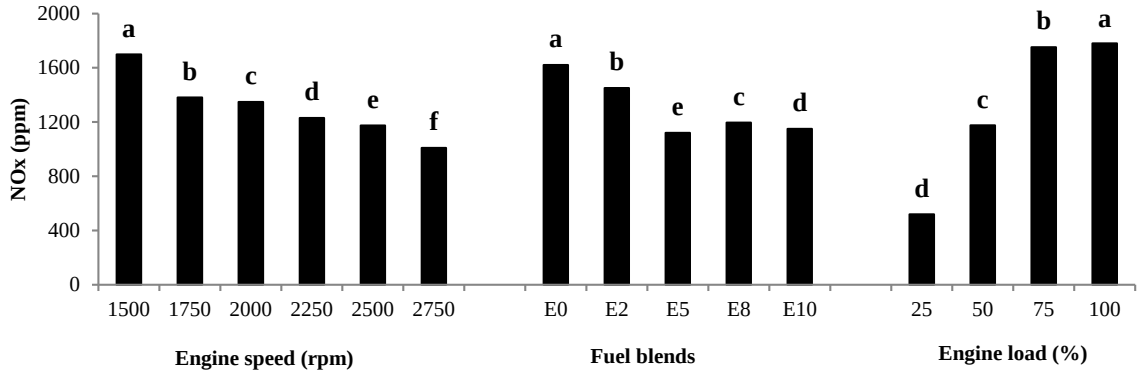


Figure 4. The comparison of measured and predicted engine NO_x in the a) first, b) second and c) third step

شکل ۴- مقایسه مقادیر اکسیدهای نیتروژن اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها در مرحله الف) اول، ب) دوم و ج) سوم

شکل (۵) مقایسه مقادیر انتشار اکسید نیتروژن برای سوخت‌ها، سرعت‌ها و بارگذاری‌های مختلف با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن را نشان می‌دهد. افزایش سرعت موتور کاهش معنی‌دار انتشار اکسید نیتروژن را در سطح ۱ درصد به‌دنبال دارد که مشابه با یافته آلاهمر و همکاران (۲۰۱۰) می‌باشد. بیشترین و کمترین مقدار انتشار اکسیدهای نیتروژن در دورهای ۱۵۰۰ و ۲۷۵۰ دور بر دقیقه و به‌ترتیب به‌میزان ppm ۱۷۰۰ و ppm ۱۰۱۰ می‌باشند. اگرچه با افزایش سرعت موتور افزایش دما و فشار گاز در سیلندر اتفاق می‌افتد، اما مدت زمان در دسترس برای احتراق کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش زمان حضور گاز در دمای بیشینه در سیلندر شده که با کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن همراه است (Lin and Li, 2009). همچنین، براساس نتایج بدست آمده، استفاده از امولسیون آب گازوییل حاوی ۵ درصد آب باعث کاهش ۳۱ درصدی انتشار اکسیدهای نیتروژن نسبت به سوخت دیزل خالص شد.



وجود حروف متفاوت برای هر متغیر نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد.

Figure 9. The effect of the engine speed, load and fuel type on the engine NOx.

شکل ۵- اثر متغیرهای سرعت موتور، نوع امولسیون و بار بر انتشار اکسیدهای نیتروژن.

با توجه به این‌که انتشار اکسیدهای نیتروژن برای این امولسیون کمترین مقدار بدست آمده در بین سوخت‌های مختلف به مقدار ppm ۱۱۲۰ است، این کاهش می‌تواند دو دلیل عمده داشته باشد. دلیل اول می‌تواند حضور آب در محفظه احتراق باشد که با کاهش دمای اشتعال، انتشار اکسیدهای نیتروژن کمتر را نسبت به سوخت دیزل به‌دنبال دارد. دلیل دوم می‌تواند انجام بهینه پدیده میکروانفجار در سیلندر باشد (شکل ۶). پدیده میکرو انفجار به‌دلیل اختلاف در فراریت آب و سوخت پایه اتفاق می‌افتد. وقتی امولسیون در یک محیط داغ مانند محفظه احتراق پاشیده می‌شود، گرما به سطح قطره امولسیون می‌رسد. به‌دلیل محدود بودن سرعت پخش آب، گازوییل سطح قطره را پوشانده و قطرات پراکنده شده آب را در بر می‌گیرد. آب یا سوخت پایه درون افشانه، به‌دلیل گرم شدن قطره امولسیون توسط انتقال گرمای همرفت و تابشی از گاز محیط احتراق و شعله، حین احتراق فوق داغ[1]می‌شود. قطرات فوق داغ مایع که از نظر ترمودینامیکی بی‌ثبات هستند، تا زمانی که تغییر فاز در قطره اتفاق نیفتد، وجود خواهند داشت. به‌محض رسیدن دما به آستانه فوق داغ، حباب‌ها تشکیل می‌شوند که تبخیر سریع و از هم پاشیدگی مایع فوق داغ شده را به‌دنبال دارد. پس از میکرو انفجار قطره اولیه، پدیده اتمیزه شدن ثانویه رخ می‌دهد. در این فرایند قطرات ثانویه کوچک تولید شده و خیلی سریع تبخیر می‌شوند. این پدیده، زمان در دسترس برای انجام واکنش‌های پیرولیز[2] را در فاز مایع را کاهش می‌دهد و از این طریق از تولید باقیمانده‌های کربنی جلوگیری می‌کند. تجزیه نیرومند، با ایجاد اندازه حرکت قوی، قطرات ثانویه کوچک را در حجم زیاد پراکنده کرده و از این طریق اختلاط سوخت و هوا را در محیط احتراق بهبود می‌بخشد (Kadota and Yamasaki, 2002).

این پدیده با بهبود فرایند احتراق به تولید کمتر اکسیدهای نیتروژن کمک می‌کند. افزایش بارگذاری نیز با افزایش دمای احتراق میزان انتشار اکسید نیتروژن بیشتر را به‌طور معنی‌دار سطح ۱ درصد به همراه دارد؛ به گونه‌ای که انتشار آن از ppm ۵۱۹ در بارگذاری ۲۵ درصد به ppm ۱۷۸۰ در بارگذاری ۱۰۰ درصد می‌رسد.

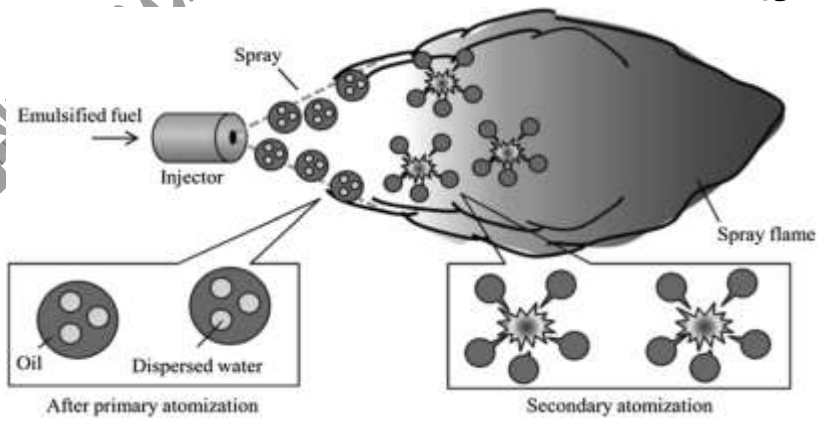


Figure 6. Micro explosion process (Watanabe *et al.*, 2010).

شکل ۶: نمایی از پدیده میکروانفجار (Watanabe *et al.*, 2010).

[1] Superheat
[2] pyrolytic reactions

۴- نتیجه گیری

امولسیون حاوی ۵ درصد آب کمترین میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن را با ۳۰/۸ درصد کاهش نسبت به سوخت دیزل به همراه داشت. با افزایش دور موتور مقدار انتشار اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد. افزایش بارگذاری موتور مقادیر اکسیدهای نیتروژن را افزایش می‌دهد. نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره گام به گام نشان داد که بارگذاری بیشترین تاثیر و نوع سوخت کمترین تاثیر را بر مقادیر اکسیدهای نیتروژن دارد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می شود که استفاده از امولسیون‌های دارای درصد کم آب (۲ و ۵ درصد) با کاهش آلاینده‌ها در بیشینه سرعت و بارگذاری موتور می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت دیزل باشد.

۵- مراجع

Alahmer, A., Yamin, J., Sakhrieh, A., & Hamdan, M. A. (2010). Engine performance using emulsified diesel fuel. *Energy Conversion and Management*, *51*(8), 1708-1713.

Attia, A. M., & Kulchitskiy, A. R. (2014). Influence of the structure of water-in-fuel emulsion on diesel engine performance. *Fuel*, *116*, 703-708.

Fahd, M. E. A., Wenming, Y., Lee, P. S., Chou, S. K., & Yap, C. R. (2013). Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition. *Applied energy*, *102*, 1042-1049.

Farfaletti, A., Astorga, C., Martini, G., Manfredi, U., Mueller, A., Rey, M., & Larsen, B. R. (2005). Effect of water/fuel emulsions and a cerium-based combustion improver additive on HD and LD diesel exhaust emissions. *Environmental science & technology*, *39*(17), 6792-6799.

Ithnin, A. M., Ahmad, M. A., Bakar, M. A. A., Rajoo, S., & Yahya, W. J. (2015). Combustion performance and emission analysis of diesel engine fuelled with water-in-diesel emulsion fuel made from low-grade diesel fuel. *Energy Conversion and Management*, *90*, 375-382.

Kadota, T., & Yamasaki, H. (2002). Recent advances in the combustion of water fuel emulsion. *Progress in energy and combustion science*, *28*(5), 385-404.

Lin, C. Y., & Li, R. J. (2009). Engine performance and emission characteristics of marine fish-oil biodiesel produced from the discarded parts of marine fish. *Fuel Processing Technology*, *90*(7-8), 883-888.

Maiboom, A., & Tauzia, X. (2011). NO_x and PM emissions reduction on an automotive HSDI Diesel engine with water-in-diesel emulsion and EGR: An experimental study. *Fuel*, *90*(11), 3179-3192.

Musculus, M. P., Dec, J. E., Tree, D. R., Daly, D., Langer, D., Ryan, T. W., & Matheaus, A. C. (2002). *Effects of water-fuel emulsions on spray and combustion processes in a heavy-duty DI diesel engine* (No. 2002-01-2892). SAE Technical Paper.

Tzirakis, E., Karavalakis, G., Schinas, P., Korres, D., Karonis, D., Stournas, S., & Zannikos, F. (2006). *Diesel-water emulsion emissions and performance evaluation in public buses in Attica Basin* (No. 2006-01-3398). SAE Technical Paper.

Watanabe, H., Suzuki, Y., Harada, T., Matsushita, Y., Aoki, H., & Miura, T. (2010). An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet. *Energy*, *35*(2), 806-813.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران