

روش های بکارگیری افزودنی آب و اثرگذاری آن بر عملکرد و آلاینده های سوخت های دیزل و B5

اسماعیل خلیفه حمزه قاسم

دکتری-دانشگاه محقق اردبیلی
esmailkhalife@gmail.com

بهمن نجفی

دانشیار-دانشگاه محقق اردبیلی
najafib@uma.ac.ir

میثم طباطبایی

استادیار- پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران
meisam_tab@yahoo.com

سید مصطفی میرسلیم

استادیار-دانشگاه امیرکبیر

چکیده

افزایش گازهای گلخانه‌ای و مضر، بدلیل افزایش مصرف روزافزون سوخت، شدت بیشتری یافته است. مقررات سختگیرانه در مورد آلاینده‌های خروجی از موتور خودرو، محققین را بسمت بهبود کیفیت احتراق سوق داده است. استفاده از افزودنی آب یکی از روش‌های منحصر بفردی است که می‌تواند آلاینده‌های خروجی از موتور بویژه NOx را کاهش دهد. آب می‌تواند هم بصورت مستقیم بداخل سیلندر و یا منیفلد ورودی هوا تزریق شود و هم اینکه بصورت امولسیون همراه با سوخت دیزل بداخل سیلندر پاشیده شود. بدلیل خاصیت خنک کنندگی آب، هرکدام از این روش‌ها مقدار آلاینده NOx را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. اما استفاده از روش امولسیون دیزل-آب، می‌تواند آلاینده‌های دیگر را نیز کاهش دهد و همچنین عملکرد موتور را نیز بهبود بخشد. در این مطالعه سوخت امولسیون آب-دیزل مقادیر آلاینده HC و NOx را کاهش داد و همچنین توانست مقدار BTE بالاتر و BSFC کمتری نسبت به سوخت دیزل خالص را منجر شود.

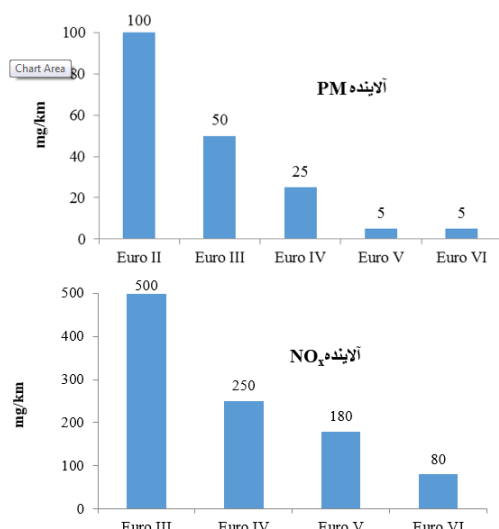
کلمات کلیدی: افزودنی، موتور دیزل، عملکرد، آلاینده ها، پدیده ریز انفجار

مقدمه

منابع انرژی فسیلی و افزایش آلاینده‌گی‌های زیست محیطی یکی از نگرانی‌های جامعه بشری است. افزایش روزافزون مقررات مربوط به تولید آلاینده های منتشره شده خودروها، محققین حوزه‌های سوخت و تحقیقات موتور شرکت‌های سازنده خودرو را برای یافتن راه حل مناسب سوق داده است (شکل ۱). به دلیل این مقررات سختگیرانه، مراکز تولید موتور برای کاستن آلاینده‌های خروجی از موتور، تکنولوژی‌های مختلفی را به طراحی موتور اضافه کرده‌اند.

از جمله این تغییرات می‌توان به استفاده از سیستم پاشش سوخت متغیر، سیستم زمان‌بندی باز و بسته شدن متغیر سوپاپ‌ها، استفاده از کاتالیست‌ها و غیره اشاره کرد. در این میان، موتورهای دیزلی بدلیل بازده حرارتی بالاتر، گشتاور بیشتر، آلاینده‌های کمتر، بیشتر از موتورهای اشتعال جرقه‌ای در کانون توجه قرار گرفته‌اند و استفاده از این نوع موتورها نیز بیشتر شده است [۱]. اگرچه این پیشرفت‌ها توانسته‌اند مقدار توان بالاتر و مصرف سوخت پایین‌تر و آلاینده‌گی کمتری را تولید کنند اما نگرانی‌های مربوط به سوخت-های فسیلی و گازهای گلخانه‌ای را برطرف نکرده است. در واقع آلودگی هوا یکی از مهمترین مشکلات امروزه کلانشهرها در سراسر جهان می‌باشد. این مشکل در ایران نیز بسیار قابل لمس می‌باشد. به عنوان مثال، مقدار آلاینده-ها در شهر تهران در سال ۱۳۹۳ در یک سوم روزهای سال در شرایط

ناسالم بوده است و مهمتر اینکه بر اساس آمار شرکت کنترل کیفیت هوای تهران، ۸۵٪ این آلاینده‌ها مربوط به گازهای منتشر شده از وسایل حمل و نقل است [۲]. یکی از راه‌حل‌ها برای حل مشکل بزرگ استفاده از افزودنی‌ها می‌باشد. افزودنی‌های مختلفی در موتور دیزل بکار گرفته می‌شوند. بیودیزل یکی از معمول‌ترین افزودنی‌هاست که کشورهای زیادی آنرا در سیستم پخش سوخت بکار گرفته‌اند.



شکل ۴: حداکثر مقدار آلاینده های منتشره توسط موتور دیزل در قوانین استاندارد اروپا

بیودیزل به دلیل تجدیدپذیر بودن و کاهش آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته (HC)، مونو اکسید کربن (CO)، ذرات معلق (PM) می‌شود اما آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx) را افزایش می‌دهد. از دیگر افزودنی‌های می‌توان الکل‌ها، نانو فلزات و آب را برشمرد. در این میان استفاده از آب در موتور دیزل راهکار جالب توجه‌ای در کاهش آلاینده‌ها، بویژه آلاینده NOx و همچنین در برخی مطالعات نشان داده است که می‌تواند بهبود دهنده عملکرد موتور نیز باشد. در واقع، از آنجا که یکی از عوامل اصلی اثرگذار در افزایش مقدار NOx بالا بودن دمای داخل سیلندر در زمان احتراق می‌باشد استفاده از افزودنی آب می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش آلاینده‌ها بویژه NOx باشد.

مطالعه و بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تکنیک‌های افزودن آب به موتور دیزل با سه روش امکان‌پذیر است.

- تزریق مستقیم آب به داخل سیلندر (DWI)¹

¹ Direct water injection

مقدار و زمان پاشش آب را با استفاده از یک سیستم الکترونیکی کنترل نمود [۵].



شکل ۵: پاشش آب بداخل منیفلد ورودی هوا.

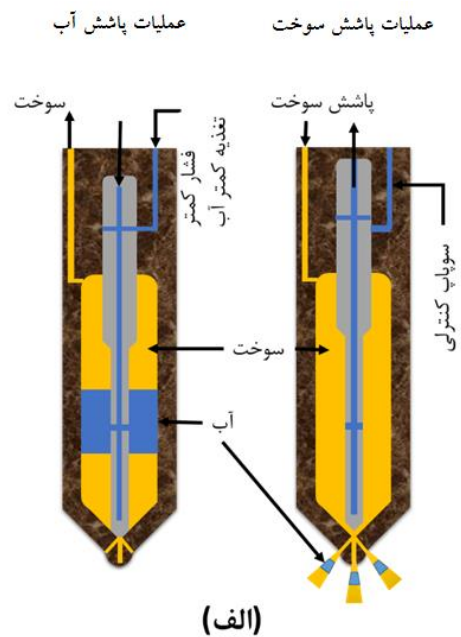
استراتژی‌های مختلفی برای پاشش آب بداخل محفظه در مطالعات یافت می‌شود: پاشش چند نقطه‌ای نزدیک سوپاپ هوا، پاشش تک نقطه‌ای بالادست کمپرسور و یا پایین دست کمپرسور (شکل ۳). در تمامی این استراتژی‌ها نسبت آب به سوخت تا ۵۰٪ می‌تواند تنظیم شود. برخی از مزایای این روش‌ها شامل تغییرات برخط یکنواختی از مقدار آب، افزایش بازدهی بخاطر خاصیت خنک‌کنندگی، پخش تقریباً یکنواخت آب در داخل سیلندر. یکی از معایب بزرگ این روش این است که مقدار آب خیلی زیادی (۶۰-۶۵٪) مورد نیاز است تا آلایندگی NOx ۵۰٪ کاهش یابد و این مقدار بسیار زیادی است (تقریباً ۴ برابر مقدار سوخت) تا بتوان به مقدار قابل قبولی از کاهش NOx دست یافت [۶ و ۷].

محققین زیادی تکنیک WF را مورد بررسی قرار داده‌اند [۵-۷]. تاوژیا و همکاران در سال ۲۰۱۰ اثر پاشش آب بر روی تاخیر در احتراق، نرخ حرارت آزاد شده، و آلایندگی در موتور دارای پاشش سرعت بالای common-rail انجام دادند. موتور مورد استفاده یک موتور دیزل توربوشارژر ۲ لیتری مجهز به سیستم بازخورانی گازهای خروجی کم فشار بود. در ایت مطالعه، سیستم پاشش بعد از اینترکولر و درست قبل از ورودی هوا نصب شده بود. آنها عنوان کردند که نرخ بالای پاشش آب منجر به تاخیر در اشتعال بیشتر، پیک حرارت آزاد شده بالاتر و آلایندگی NOx کمتر شد اما مقدار آلایندگی CO و HC را افزایش داد [۷].

• امولسیون آب-دیزل (WDE^۵)

از روش‌های مناسب افزودن آب به داخل موتور دیزل، ترکیب آن با سوخت دیزل بوده که بیشتر تحقیقات انجام شده نیز بر کارایی بهتر این روش تاکید دارند. به دلیل خواص روغن و آب این دو ماده به سادگی قابل مخلوط کردن با همدیگر نمی‌باشند و با سرعت تبدیل به دوفاز جداگانه خواهند شد. برای اینکه آب را بتوان در دیزل و یا مخلوط بیودیزل-دیزل حل نمود، بایستی از یک ماده جاذب سطحی (Surfactant) به عنوان ماده واسط بهره گرفت. به عنوان مثال، مواد جاذب span و tween جزو مواد شناخته شده در این راستا می‌باشند [۸]. هر کدام از مواد جاذب بسته به اینکه هدف تهیه امولسیون حل نمودن آب در روغن و یا روغن در آب باشد کاربرد متفاوتی

با استفاده از این روش پاشش آب به داخل سیلندر با کنترل دقیقی انجام گرفته و هر زمان که نیاز شد آب به داخل محفظه احتراق پاشیده می‌شود. این نکته باعث می‌شود که DWI در مقایسه با دیگر روشها برتری نسبی داشته باشد. بدلیل کنترل بر روی مقدار آب پاشیده شده، در این روش می‌توان کنترل زیادی بر روی تاخیر داشت [۳]. برای استفاده از این روش، موتور بایستی به تجهیزاتی اضافی مجهز شود. در روش DWI، پاشش آب با استفاده از یک نازل جداگانه انجام می‌گیرد و یا اینکه پاشش آب با استفاده از همان نازل پاشش سوخت انجام می‌شود و مقدار و زمان پاشش آب با استفاده از یک سیستم الکترونیکی کنترل می‌گردد. این روش هزینه‌های زیادی را به قیمت تمام شده موتور اضافه می‌کند و به همین دلیل نتوانسته توفیق چندانی را پیدا کند. یکی از تحقیقات خوب انجام گرفته در این زمینه، توسط بدفور و همکاران در سال ۲۰۰۰ انجام گرفت [۴]. مطالعه مورد نظر نتیجه یک کار محاسباتی توسط دینامیک سیالات عددی (CFD^۱) با استفاده از نرم افزار Kiva-3v code را با نتایج کار تجربی مقایسه نمود. نتایج کار آنها نشان داد که در نصف بارگذاری‌ها مصرف سوخت، PM و NOx کاهش یافتند ولی کاهش آلایندگی NOx در بیشتر حالات بارگذاری ثبت شد.



شکل ۱: روش پاشش مستقیم سوخت بداخل محفظه احتراق.

• افزودن آب به داخل ورودی هوا (WF^۲)

استفاده از روش DWI به دلیل تجهیزات پیشرفته روند تحقیقات را بسط اضافه نمودن آب به داخل ورودی هوا و اصطلاحاً روش WF سوق داد. در روش WF، پاشش آب توسط یک نازل، کاربراتور و یا با استفاده از یک سیستم بخاردهی بداخل منیفلد ورودی هوا انجام می‌شود. کاربرد این روش نیز همانند روش DWI نیازمند مجهز کردن موتور به تجهیزاتی اضافی است با اینحال هزینه اضافه شده کمتر می‌باشد و به نظر می‌رسد آسانترین روش برای اضافه کردن آب بداخل موتور می‌باشد. در این روش نیز می‌توان

¹ Computational Fluid Dynamics

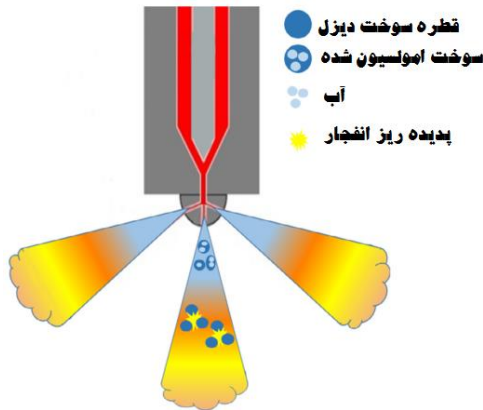
² Water Fumigation

⁵ Water-Diesel Emulsion

خواهد داشت. امولسیون‌های مختلف قابل استفاده در موتور را می‌توان به روش‌های زیر تقسیم کرد:

- امولسیون روغن در آب (oil in water)
- امولسیون آب در روغن (water in oil)
- امولسیون مخلوط روغن و آب، در روغن (oil-water in oil)

امولسیون سازی آب در روغن در موتور بیشتر از موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۴ شماتیکی از امولسیون دو فاز و سه فاز را نشان می‌دهد [۹]. مخلوط آب و روغن بدلیل خواص متفاوت آنها براحتی با همدیگر تشکیل امولسیون نمی‌دهند و محققین از تکنیک التراسونیک برای تهیه امولسیون پایدار استفاده می‌کنند.

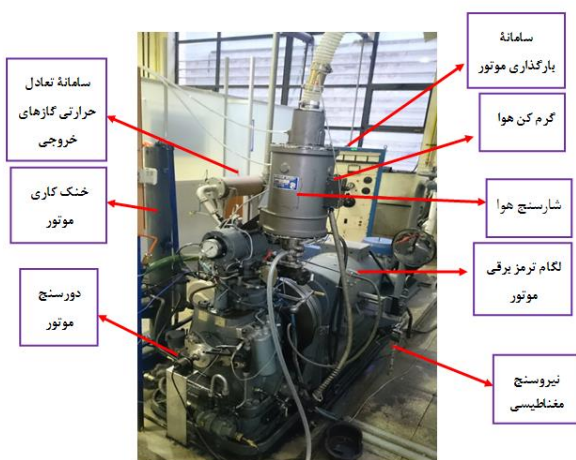


شکل ۶ تصویری شماتیک از پدیده ریز انفجار

بدلیل اینکه پیش از این در کنفرانس‌های داخلی موضوع استفاده از آب در موتور دیزل بصورت کلی مورد بررسی قرار نگرفته است هدف این مقاله معرفی این روش و همچنین بررسی اثر افزودن آب به سوخت دیزل خالص و سوخت B5 و بررسی نتایج آنها با یکدیگر می‌باشد. آزمون‌ها بر روی یک موتور تک سیلندر ریکاردو E6 با حجم موتور ۵۰VCC انجام گرفت.

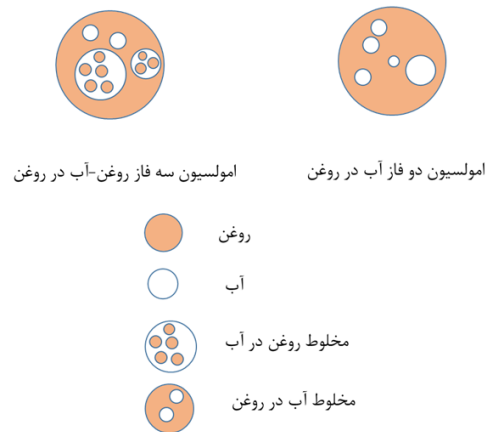
مواد و روش

سوخت بیودیزل در آزمایشگاه و با استفاده از روغن پسماند آشپزخانه تولید شد. روش مورد استفاده برای تولید ترانس استریفیکاسیون متانول با هیدروکسید پتاسیم بود. افزودنی مورد استفاده آب و به مقدار ۳٪ وزنی بود که به سوخت‌های دیزل خالص و B5 اضافه شد. برای انجام آزمون‌های تست موتور، از یک موتور تک سیلندر چهار زمانه پاشش مستقیم مدل Ricardo E6 استفاده گردید (شکل ۶). دستگاه آلانیده سنج مورد استفاده، ۵ گاز و ساخت شرکت AVL بود که آلانیده‌های HC، CO₂، CO و NOx را سنجش می‌نمود. آزمون‌های تست موتور در شرایط آزمایشگاهی دور موتور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و بارگذاری هاب ۲۵ و ۵۰ و ۷۵ و ۱۰۰٪ انجام شدند.



مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده

شکل ۷: موتور تک سیلندر ریکاردو [۱۲].



شکل ۲: امولسیون‌های مختلف آب-روغن

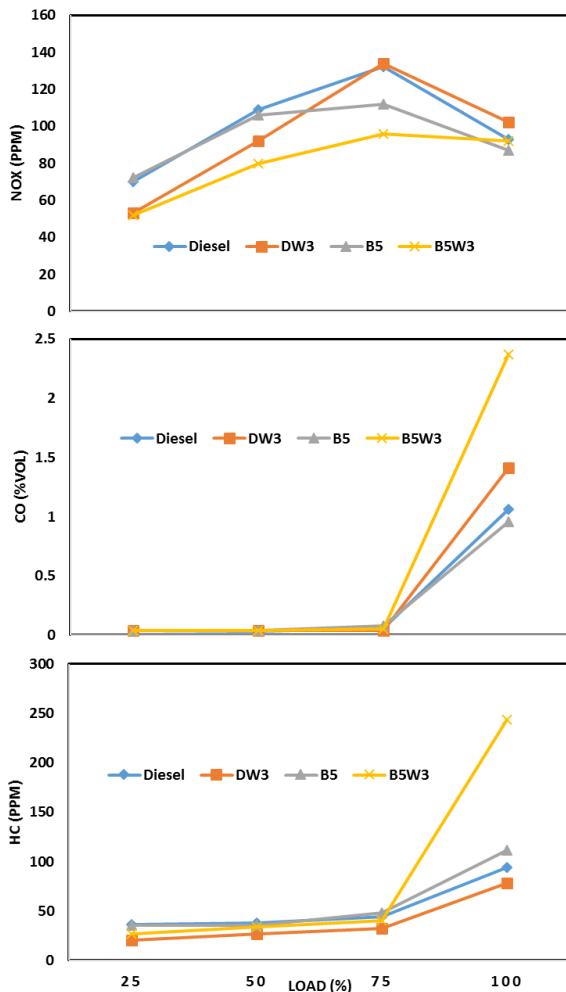
گرچه تهیه امولسیون آب-دیزل نیازمند استفاده از سورفکتنت و همچنین دستگاه التراسونیک می‌باشد. اما استفاده از آب در سوخت دیزل و بصورت امولسیون مزایای جالبی دارد که استفاده از آن را در قیاس با سایر روش‌ها متمایز می‌نماید. یکی از اثرات امولسیون WDE این است که در کنار اثر خنک‌کنندگی آب، این امولسیون موجب بروز پدیده ریز انفجار مربوط در حین احتراق می‌شود. پدیده ریز انفجار موجب تبخیر شدن سریعتر ذرات آب محاط شده توسط ذرات سوخت می‌باشد، که موجب انفجار ثانویه در قطرات پاشیده شده داخل سیلندر گشته و موجبات مخلوط شدن بهتر سوخت با هوا را فراهم می‌آورد [۱۰]. تصویری شماتیک از پدیده ریز انفجار که موجب از هم گسسته شدن قطرات سوخت می‌شود را در شکل ۵ مشاهده می‌کنید.

در سال ۲۰۱۳، کوک و عبدالله مطالعه‌ای را بر روی امولسیون آب-دیزل-بیودیزل و بر روی یک موتور دیزلی ۴ سیلندر انجام دادند [۱۱]. نسبت آب مورد استفاده در امولسیون ۵، ۱۰ و ۱۵٪ انتخاب شده بود. یافته‌های ایشان نشان داد امولسیون آب-دیزل-بیودیزل، موجب انتشار آلانیده NOx و دوده ی کمتری در قیاس با B5 و B20 شد. افزایش مقدار غلظت آب نانو امولسیون موجب افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC^۱) و آلانیده CO می‌شود. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش مقدار آب موجود در امولسیون کاهش NOx و CO بیشتری بدست آمد.

¹ Brake Specific Fuel Consumption

نتایج و بحث

نتایج عملکردی موتور در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷ پیداست که بیودیزل تا اندازه ای اثر منفی بر عملکرد موتور داشته است و موجب کاهش بازده حرارتی و افزایش مصرف سوخت ترمزی شد که بدلیل ارزش حرارتی پایین سوخت بیودیزل می باشد. اثر افزودن آب به سوخت دیزل خالص موجب شد که مقدار مصرف سوخت ترمزی کمتر و بازده حرارتی بالاتر را بوجود بیاورد. بهترین عملکرد در لود ۱۰۰٪ بدست آمد. مقدار افزایش عملکرد موتور بترتیب برای DW3 و دیزل خالص برابر بود با ۳۶ و ۳۳٪. نتایج نشان داد که افزودن آب به سوخت دیزل نتایج بهتری را نسبت به افزودن آن به سوخت B5 دارد.

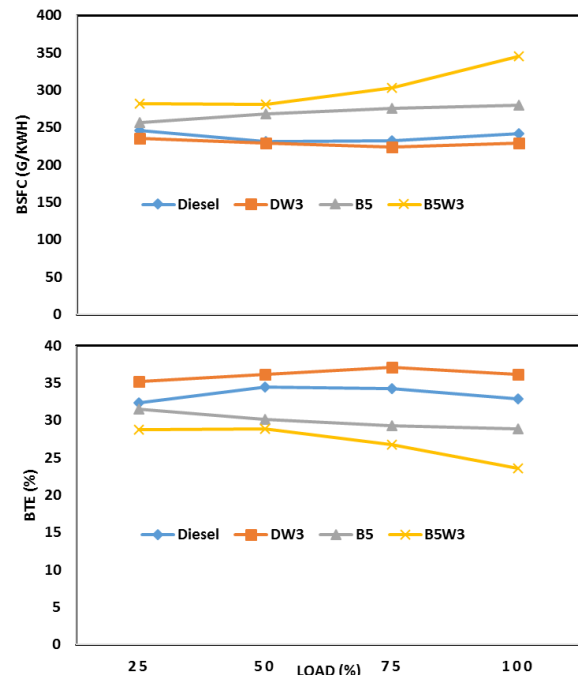


شکل ۸: نتایج آلاینده‌های خروجی از موتور در بارگذاری‌های مختلف.

نتایج مربوط به اثر آب بر روی احتراق سوخت‌های B5 و DW3 در شکل ۸ نشان می‌دهد که این افزودنی موجب کاهش مقدار آلاینده HC در تمامی بارگذاری‌ها (بجز بارگذاری ۱۰۰٪ مربوط به سوخت B5W3) شده است. کمترین مقادیر آلاینده HC برای سوخت امولسیون DW3 بدست آمد. بیشترین مقدار کاهش در بارگذاری ۲۵٪ رخ داد و در حالت کلی مقدار کاهش آلاینده HC برای سوخت DW3 نسبت به دیزل خالص بطور میانگین برابر با ۳۰٪ بود. بهبود احتراق در اثر اختلاط بهتر هوا و سوخت ناشی از پدیده ریز انفجار یکی از دلایل مهم در کاهش آلاینده HC می‌باشد [۱۶].

مراجع

- Şahin Z, Tuti M, Durgun O. Experimental investigation of the effects of water , adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine. Fuel 2012.
- بی نام. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران. گزارش سالیانه کیفیت هوا. <http://air.tehran.ir/>. ۱۳۹۴.
- Subramanian KA. A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions. Energy Convers Manage 2011;52:849–57.



شکل ۹: نتایج عملکردی مصرف سوخت ترمزی و بازدهی موتور در بارگذاری‌های مختلف.

نتایج آلاینده هروچی از موتور در شرایط مختلف بارگذاری و مربوط به سوخت‌های مورد آزمون در شکل ۸ نمایش داده شده است. در نمودار مربوط به آلاینده NOx نشان داده شده است که افزودن آب اثری کاهشی هم بر روی سوخت دیزل و هم سوخت B5 داشته است. مقدار آلاینده NOx در بارگذاری ۱۰۰٪ مربوط به DW3 و B5W3 بیشتر از مقدار بترتیب دیزل خالص و B5 بود. این می‌تواند بدلیل افرگذاری پدیده ریز انفجار بر روی بالا بردن دمای داخل سیلندر در حداکثر فشار کاری موتور و در نتیجه افزایش مقدار NOx باشد [۱۳]. بیشترین مقدار کاهش آلاینده NOx در بارگذاری ۷۵٪ و برای سوخت B5W3 رخ داد. مقادیر آلاینده NOx برای سوخت‌های B5, B5W3 و دیزل خالص بترتیب برابر با ۹۶، ۱۱۲ و ۱۳۴ بود.

نتایج مربوط به آلاینده CO در بارگذاری‌های ۲۵-۷۵٪ نتایج نزدیکی را برای همه سوخت‌ها نشان داد. اما نتایج آلاینده CO در بارگذاری ۱۰۰٪، افزودن بیودیزل به سوخت دیزل موجب کاهش آلاینده CO شد. اثر کاهشی بیودیزل بر روی آلاینده CO توسط محققین دیگر نیز ذکر شده است [۱۴-۱۵]. در بارگذاری ۱۰۰٪، افزودنی آب مقدار آلاینده CO را در سوخت‌های B5 و دیزل خالص بالا برد. مقدار افزایش در امولسیون B5W3 بسیار بیشتر از مقدار آن در سوخت DW3 بود.

- 4- Bedford F, Rutland C, Dittrich P, Raab A, Wirbeleit F. Effects of direct water injection on DI diesel engine combustion. SAE paper 2000-01-2938; 2000.
- 5- Şahin, Z., Tuti, M., & Durgun, O. (2014). Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine. *Fuel*, 115, 884-895.
- 6- Tesfa B, Mishra R, Gu F, Ball AD. Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel. *Renew Energy* 2012;37:333-44.
- 7- Tazua X, Maiboom A, Rahman Shah S. Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emission of an automotive direct injection diesel engine. *Energy* 2010;35:3628-39.
- ۸- خلیفه، ا. بررسی اثر افزودنی‌ها به سوخت بیودیزل بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل. رساله دکتری. دانشگاه محقق اردبیلی. ۱۳۹۵.
- 9- Lin, C. Y., & Chen, L. W. (2006). Emulsification characteristics of three-and two-phase emulsions prepared by the ultrasonic emulsification method. *Fuel Processing Technology*, 87(4), 309-317.
- 10- Yang, W. M., H. An, S. K. Chou, K. J. Chua, B. Mohan, V. Sivasankaralingam, V. Raman, A. Maghbouli, and J. Li. "Impact of emulsion fuel with nano-organic additives on the performance of diesel engine." *Applied energy* 112 (2013): 1206-1212.
- 11- 67. Koc, A. B., & Abdullah, M. (2013). Performance and NOx emissions of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel-water nanoemulsions. *Fuel processing technology*, 109, 70-77.
- ۱۲- قره قانی، آ. (۱۳۹۴). شبیه سازی احتراق مخلوط همگن اشتعال تراکمی برای سوخت‌های زیستی به منظور تعیین زمان شروع احتراق. رساله دکتری. دانشگاه امیرکبیر. تهران، ایران.
- 13- Al-Sabagh, A., Emar, M. M., El-Din, M. N., & Aly, W. (2012). Water-in-diesel fuel nanoemulsions prepared by high energy: emulsion drop size and stability, and emission characteristics. *Journal of Surfactants and Detergents*, 15(2), 139-145.
- ۱۴- نجفی، ب. ۱۳۸۵، فرآیند احتراق و آلایندگی موتور دوگانه سوز با استفاده از سوخت گاز طبیعی و بیودیزل، رساله دکتر، دانشگاه تربیت مدرس. تهران، ایران.
- 15- Lee, S. W., Herage, T., and Young, B. (2004). Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel blended with petroleum distillate fuel. *Journal of Fuel*, 83: 1607-1613.
- 16- Khalife, E., Tabatabaei, M., Demirbas, A., & Aghbashlo, M. (2017). Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 59, 32-78.