

# شبیه سازی تأثیر عدد ستان، چگالی و گرانیوی سوخت بیودیزل بر مهلت اشتعال موتور دیزل

بهمن نجفی\*  
استادیار دانشگاه محقق اردبیلی  
Najafib@uma.ac.ir

\* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۸۹/۱/۲۱

## چکیده

در این تحقیق عدد ستان مخلوط‌های مختلفی از سوخت بیودیزل حاصل از روغن پسماند رستوران و گازوئیل با استفاده از یک موتور CFR اندازگیبری شد و برای بررسی تأثیر سوخت بیودیزل بر مهلت اشتعال، از یک موتور دیزل یک استوانه لیستر M۸/۱ از نوع پاشش غیر مستقیم (IDI) استفاده شد. تغییرات فشار داخل استوانه (سیلندر) نسبت به زاویه میل‌لنگ به کمک حسگر فشار از نوع پیزوالکتریک Kistler-6123 اندازه‌گیری شد. در همه نمونه‌های سوخت، زمان پاشش سوخت ۲۱ درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مکث بالا بوده و لحظه شروع احتراق، زاویه‌ای از میل‌لنگ بود که آهنگ تغییر فشار حالت جهشی یافت. آزمون‌ها در شرایط یکسان دور موتور (۷۵۰ rpm) و تمام بار انجام گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که با افزودن سوخت بیودیزل به گازوئیل، عدد ستان از ۵۷ برای گازوئیل تنها تا ۶۲ برای بیودیزل تنها، افزایش می‌یابد و مهلت اشتعال از ۱۳،۸ درجه میل‌لنگ برای گازوئیل تنها به ۸،۸۳ درجه میل‌لنگ برای بیودیزل تنها، کاهش می‌یابد. برای پیش‌بینی مهلت اشتعال از شبیه‌سازی نیمه تجربی بر حسب تابعی از عدد ستان، چگالی و گرانیوی استفاده گردید. عدد ستان تنها بر مهلت اشتعال شیمیایی اثر دارد و چگالی و گرانیوی سوخت در تاخیر اشتعال فیزیکی مؤثر هستند، لذا الگوی قهقرایی (رگرسیون) غیر خطی به کمک نرم افزار SPSS 14 ارائه گردید. الگوی ارائه شده با  $R^2 = 0/998$ ، توانایی پیش‌بینی مهلت اشتعال را با خطای کمتر از  $\pm 0/5$  درجه میل‌لنگ دارد.

می‌باشد که باعث کاهش چگالی انرژی و کاهش انتشار ذرات معلق می‌گردد و سوختی پاک به حساب می‌آید. سوخت بیودیزل چگالی، گرانیوی، نقطه اشتعال و عدد ستان بزرگتری نسبت به گازوئیل دارد ولی ارزش حرارتی آن کمتر است [۳۰۴]. تحقیقات علمی در مورد بیودیزل از اواخر دهه ۷۰ میلادی در آمریکا و اروپا، با هدف تولید و عرضه به بازار شروع شد. در سال ۱۹۸۸ میلادی اولین محصول مستند تجاری بیودیزل از دانه کلزا ارائه گردید و نام بیودیزل اولین بار در آمریکا در سال ۱۹۹۲ میلادی به وسیله مؤسسه تحقیقات ملی بیودیزل به این محصول نهاده شد [۵]. تحقیقات نشان می‌دهد، سوخت بیودیزل دارای عددستان بزرگی است و در نتیجه مدت زمان مهلت اشتعال را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر ارزش حرارتی آن کمتر از گازوئیل تنها است که این عامل باعث افت توان در موتور می‌شود. استفاده از سوخت بیودیزل تنها در موتور تحت بار کامل باعث کاهش CO و HC ولی موجب افزایش NOx می‌شود [۶-۱۰].

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی به منظور تولید و استفاده از سوخت بیودیزل در داخل کشور شروع شده است [۶ و ۱]. ولی در مورد اندازه‌گیری عددستان مخلوط‌های مختلف سوخت بیودیزل و گازوئیل و تأثیر آن بر مهلت اشتعال موتور دیزل، در داخل کشور کاری انجام نشده یا هنوز وارد ادبیات فن، نشده است.

**کلیدواژه‌ها:** سوخت‌های جایگزین، بیودیزل، عدد ستان، مهلت اشتعال و موتور دیزل

## ۱- مقدمه

نوسانات قیمت جهانی سوخت‌های سنگواره‌ای (فسیلی) موجب ایجاد بحران انرژی در سطح جهان شده است به نحوی که اکثر کشورهای وابسته به آن را بیش از پیش ترغیب به یافتن منابع جایگزین کرده است. از جمله منابع ارزان قیمت، در دسترس (عدم وابستگی به منطقه جغرافیایی) و دوست‌دار محیط زیست می‌توان به سوخت بیودیزل اشاره کرد. بیودیزل عبارت است از استرهای منوالکیل اسیدهای چرب با زنجیر طولی، که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود و تشابه زیادی با گازوئیل دارد که آنرا به عنوان سوخت جایگزین جدی مطرح می‌کند. همچنین، بیودیزل سازگار با سوخت متداول گازوئیل است و می‌تواند با هر نسبتی با آن مخلوط شود و دارای فرمول شیمیایی کلی  $3C_{19}H_{35}COOCH_3$  می‌باشد [۱۰۲].

مهمترین تفاوت اساسی بیودیزل و گازوئیل، محتوای اکسیژن آن است. میزان اکسیژن موجود در گازوئیل صفر است در حالیکه بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزنی اکسیژن

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۱- سوخت بیودیزل

در این تحقیق از روغن پسماند رستوران، برای تولید سوخت بیودیزل استفاده گردید زیرا روغن پسماند حاصل از پخت و پز که به عنوان ماده‌ای زاید به حساب می‌آید، منبعی ارزان قیمت برای تولید سوخت بیودیزل است. برای تولید سوخت بیودیزل، از روش ترانس‌استریفیکاسیون به دلیل سادگی کاربرد آن استفاده گردید، در این روش مولکول‌های ترکیبات روغن یا چربی با یک الکل مانند متانول و یا اتانول در حضور واکشنر اسیدی یا قلیایی شرکت می‌کند و OH الکل مورد استفاده جایگزین زنجیره هیدروکربنی موجود در روغن می‌شود. در نتیجه استرهایی با ساختمان مولکولی جدید به نام استرهای متیل و یا اتیل اسید چرب بوجود می‌آید که تشابه زیادی با گازوئیل دارند [۱۱]. میزان واکشنر مصرفی در حدود ۰٫۵ تا ۱ درصد وزنی روغن است و نسبت الکل به روغن در عمل ۱ به ۶ می‌باشد که به دلیل اطمینان از پیشرفت سریع و کامل واکنش می‌باشد. یکی از محصولات با ارزش در این فرآیند گلسیرین است [۱۲].

سوخت بیودیزل مورد نیاز در این تحقیق، از روغن پسماند رستوران و به روش ترانس‌استریفیکاسیون در آزمایشگاه سوخت دانشگاه محقق اردبیلی تولید گردید و سوخت گازوئیل متداول در ایران (گازوئیل شماره ۲) نیز به عنوان سوخت مرجع استفاده شده است [۱۳]. خواص سوخت بیودیزل استحصالی از روغن پسماند رستوران با معیار استاندارد ASTM در جدول ۱ مقایسه شده است. نتایج حاکی از این واقعیت است که سوخت بیودیزل تولید شده تمامی شرایط استاندارد را دارد. همچنین خواص این سوخت در مقایسه با گازوئیل متداول در ایران نشان می‌دهند که: چگالی سوخت بیودیزل تنها به دلیل داشتن اکسیژن در مخلوط شیمیایی خود بیشتر از گازوئیل است و گرانشی سینماتیکی آن به دلیل جرم مولکولی زنجیره‌های طولانی، بیشتر است. مقدار اکسیژن موجود در بیودیزل که در حدود ۱۰٪ جرم کل است که موجب کاهش ارزش حرارتی مخلوط سوخت می‌شود. عدد ستان سوخت بیودیزل در حدود ۶۲٫۱ می‌باشد که در مقایسه با سوخت گازوئیل بیشتر است. دمای نقطه اشتعال بیودیزل نسبت به گازوئیل گرمتر می‌باشد و در صد گوگرد موجود در بیودیزل بسیار کمتر از سوخت گازوئیل کنونی است که طبیعتاً میزان انتشار اکسیدهای گوگرد را کاهش می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات بیودیزل حاصل از روغن پسماند [۱۴].

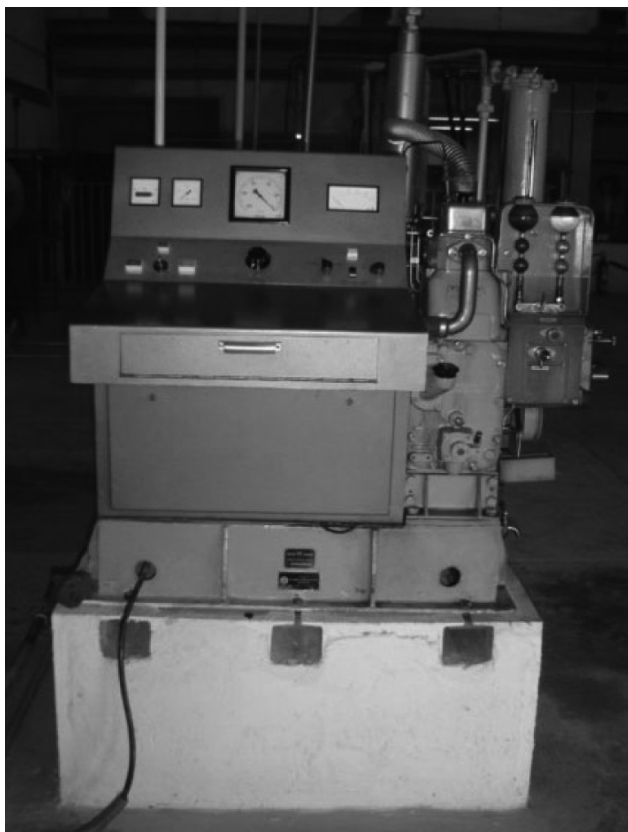
خصوصیت	واحد	استاندارد ASTM	محدوده استاندارد سوخت بیودیزل	
			max	min
چگالی	g/cm <sup>۳</sup>	D۴۰۵۲	۰٫۹	۰٫۸۶
گرانشی سینماتیکی در ۴۰ °C	Mm <sup>۲</sup> /s	D۴۴۵	۳٫۵	۵
ارزش حرارتی پایین	MJ/Kg	D۲۴۰	-	۴۱٫۹۷
عدد ستان	-	D۶۱۳	۵۱	۶۲٫۱
دمای نقطه اشتعال	°C	D۹۲	۱۲۰	۱۳۹
دمای نقطه ابری شدن	°C	D۲۵۰۰	۱۲۰	۵-

### ۲-۲- مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل

به منظور اندازه‌گیری تأثیر سهم بیودیزل بر عددستان، ترکیب‌های مختلفی از سوخت بیودیزل و گازوئیل (نسبت‌های مختلفی از بیودیزل با گازوئیل به صورت حجمی) مخلوط شدند. این مخلوط‌های سوخت، حاوی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ بیودیزل بر مبنای حجمی است که به ترتیب با علامت‌های B10۰، B20۰، B30۰، B40۰ نشان داده شده است. همچنین، از گازوئیل تنها B00 و بیودیزل تنها B100 به عنوان دو حد نهایی سوخت (سوخت شاهد) استفاده گردیده است.

### ۳-۲- موتور CFR

در این تحقیق آزمون‌های اندازه‌گیری عدد ستان سوخت، با استفاده از موتور CFR موجود در آزمایشگاه ماشین‌های حرارتی گروه مکانیک دانشگاه تبریز، مطابق با استاندارد آزمون ASTM-D613 برای اندازه‌گیری عدد ستان سوخت بیودیزل و نسبت‌های مختلف مخلوط آن با گازوئیل استفاده گردید.



شکل ۱ نمایی از موتور CFR

موتور CFR تک استوانه، با محفظه احتراق پاشش غیرمستقیم IDI، چهار زمانه، قطر استوانه ۹۵mm، طول مسیر سمبه ۱۲۰ mm، حجم استوانه ۸۵۰ cc، نسبت تراکم حجمی ۱۷، سمبه با سه حلقه فشار و دو حلقه روغن، میل‌لنگ دارای دو یاتاقان اصلی به‌همراه وزنه‌های تعادل، محور سمبه شناور، سوپاپ‌های OHC، سامانه روانکاری به صورت تحت فشار، خنک‌کاری تبخیری با شرایط کاری دور موتور در ۹۰۰ rpm، دمای خنک‌کاری ۱۰۰ °C، دمای ورودی ۵۰±5 °C، زمان پاشش ۲۰۰ BTC و فشار پاشش ۱۰٫۳ MPa می‌باشد.

## ۴-۲- موتور تحت آزمون برای اندازه گیری مهلت اشتعال

برای اندازه گیری مهلت اشتعال مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل از موتور دیزل یک استوانه لیستر M8/1 که مجهز به حسگر فشار از نوع پیزوالکتریک Kistler-6123 برای اندازه گیری فشار داخل استوانه بود، استفاده گردید. موتور لیستر از نوع پاشش غیر مستقیم (IDI)، چهار زمانه و تنفس طبیعی است و حداکثر توان ۸ اسب بخار (۶ کیلووات) در سرعت ۸۵۰ دور بر دقیقه تولید می کند. همچنین، برای اندازه گیری توان ترمزی موتور از یک لگام ایستاده برقی Plint TE9 و برای اندازه گیری تغییرات زاویه میل لنگ از یک زاویه سنج Gaebridge نوع 45HD استفاده گردید.

جدول ۲ مشخصات فنی موتور، برای اندازه گیری مهلت اشتعال

مشخصات	مقدار	واحد
تعداد استوانه	۱	-
قطر سمیه	۱۱۴.۳	mm
کورس سمیه	۱۳۹.۷	mm
طول دسته سمیه	۳۷۹.۴	mm
نسبت تراکم حجمی	۱۷.۵:۱	-
ظرفیت استوانه	۱.۵۰۶۶	لیتر
مصرف ویژه سوخت در بیشینه توان	۲۲۷	g/kW.h
بیشینه توان ترمزی در ۱۸۵۰ rpm	۶	kW
زاویه شروع پاشش	-۲۱	درجه میل لنگ
زاویه خاتمه پاشش	+۹	درجه میل لنگ

## ۵-۲- روش اندازه گیری عدد ستان

عدد ستان با مهلت اشتعال سوخت نسبت عکس دارد و از طرفی زمان مهلت اشتعال برای یک موتور دیزل با شرایط کاری ثابت، متناسب با رقت (نسبت هوا به سوخت) AFR یا آهنگ مصرف سوخت  $\dot{m}_f$  و مصرف هوا  $\dot{m}_a$  می باشد. از این معادله برای محاسبه عدد ستان در این آزمایش استفاده شده است. به طور کلی در تمامی موتورهای اشتعال تراکمی، آهنگ مصرف هوا ثابت، و آهنگ مصرف سوخت متغیر می باشد ولی در موتور CFR مقدار آهنگ مصرف سوخت ثابت می باشد. حال با اندازه گیری آهنگ مصرف هوا به راحتی می توان از طریق نمودار استاندارد (ستان-آهنگ مصرف هوا) ارائه شده از طرف کارخانه سازنده، مقدار عدد ستان را تعیین کرد. برای آزمایش باید موتور در شرایط استاندارد قرارداد شود یعنی ابتدا موتور با سوخت مینا ستان نرمال تنظیم می گردد بدین ترتیب که به هنگام کار موتور با سوخت ستان نرمال، با تغییر حسگر مقدار مهلت اشتعال را در حد استاندارد موتور یعنی ۲۰- درجه تنظیم کرده (شروع پاشش سوخت در ۲۰- درجه بوده و اشتعال سوخت دقیقاً در نقطه مکث بالا اتفاق می افتاد)، سپس مدت زمان مصرف سوخت  $CC_{25}$  سوخت با تغییر وضعیت شیر ورودی به مقدار استاندارد یعنی  $(15.0 \pm 0.3)$  ثانیه رسانده می شود. پس از تنظیم موتور با سوخت استاندارد، وضعیت مصرف سوخت تغییر می کند و سوخت مجهول وارد موتور می شود در اینجا نیز شار مصرف سوخت مجهول به روش سعی و خطا، با تغییر وضعیت شیر ورودی در همان حد استاندارد قبلی نگه داشته شد. در نتیجه با یک آهنگ مصرف سوخت ثابت، برای حصول به زمان مهلت اشتعال ثابت، الزاماً تنها متغیر آهنگ مصرف هوا خواهد بود که با تغییر آن مهلت اشتعال در همان حد استاندارد قبلی باقی می ماند  $(AFR = \dot{m}_a / \dot{m}_f = \dot{m}_a / cte)$ . در چنین شرایطی دکمه تنظیم روشن می شود و حسگر مصرف سوخت عدد  $CC_{25}$  را نشان داد که

نشان می دهد شرایط استاندارد موتور می باشد در این حالت از روی حسگر اندازه گیری هوا<sup>۱</sup> و نمودار ارائه شده از طرف کارخانه سازنده که نسبت بین این متغیر را با عدد ستان سوخت مجهول نشان می دهد، مقدار عدد ستان سوخت تعیین می گردد. دقت اندازه گیری عدد ستان در این روش  $\pm 0.5$  می باشد. آزمایش ها بر اساس استاندارد (-ASTM D 6133 T)، برای هر ۶ نسبت مخلوط سوختی، در ۳ مرحله نوبت و در شرایط ثابت محیطی انجام گرفت.

## ۶-۲- روش اندازه گیری مهلت اشتعال

آزمایش ها در قالب آزمونی کوتاه مدت با هدف تعیین تأثیر سهم بیودیزل بر مقدار مهلت اشتعال مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل انجام گرفت. متغیر تحت بررسی، نوع سوخت (مخلوط های مختلف بیودیزل و گازوئیل) بوده است. بار لگام به صورت دستی در بار کاری موتور برابر با ۸۲.۹٪ بار نهایی لگام (بیشینه بار قابل تنظیم لگام قبل از رسیدن موتور به حد دود) به موتور اعمال می شود و از طریق نمایشگر رقمی به صورت دستی پایش می گردد. فشار داخل استوانه به کمک حسگر پیزوالکتریک Kistler-6123 در گامهای زمانی یکسان با زاویه سنج Gaebridge نوع 45HD دریافت شده و سپس با اسیلوسکوپ تنظیم و تقویت شده و در صفحه نمایش رایانه نمایش داده و ذخیره شده است. ثبت تغییرات فشار داخل محفظه احتراق بر حسب تغییرات زاویه میل لنگ، به ازای مخلوط های مختلف سوخت نیز انجام گرفت.

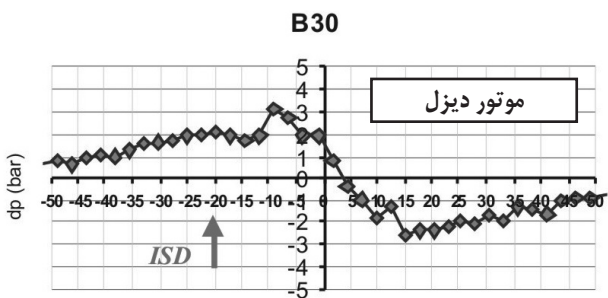
در هر مرحله آزمون، هر نوع سوخت به مدت ۶۰ ثانیه تحت بار کاری موتور قرار می گرفت تا دور موتور به حالت پایدار برسد و سپس تمام داده ها ثبت می شد. مرحله گرم کردن موتور، شامل ۱۰ دقیقه کارکردن موتور با هر یک از سوخت های مورد آزمایش بود. برای بررسی تکرارپذیری، آزمایش ها در سه نوبت (غیر متوالی) انجام پذیرفت بدین صورت که پس از آزمون سوخت گازوئیل تنها، هر یک از مخلوط های سوخت به ترتیب B10، B20، B30، B40 و بیودیزل تنها (در بار ۸۲.۹٪) آزمایش شد و در انتها به صورت معکوس، مخلوط های سوخت به ترتیب از بیودیزل تنها، B20، B30، B40، B10، و گازوئیل آزمایش شد. این روش در سه نوبت انجام پذیرفت. نتایج حاصل از آزمون های رفت و برگشت در سه نوبت تا حد قابل قبولی منطبق بر هم بودند که نشان از نوبت پذیری آزمون است. کلیه آزمایش ها در شرایط تمام بار انجام گرفت و شانه سوخت تلمبه تزریق در حالت کاملاً باز قرار داشت و در طول مدت آزمایش تغییری در موتور اعمال نگردید و هیچ مشکلی از قبیل اختلال در جریان سوخت و گرفتگی افشانه مشاهده نشد.

## ۷-۲- روش تعیین تجربی مهلت اشتعال

طبق تعریف، در دوره تأخیر اشتعال عملاً احتراقی صورت نمی گیرد و در نتیجه، سوخت پاشیده شده در پایان این دوره انباشته شده با شدت بیشتری محترق می شود و فشار محفظه احتراق به سرعت افزایش می یابد. نمودار موتورگردانی نشان می دهد مقدار فشار در ابتدای مرحله پاشش سوخت (زاویه شروع پاشش سوخت ۲۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا) برابر ۱۷.۲ bar می باشد، بنابراین در همه حالت ها، منحنی های  $(P-\theta)$  به نحوی تنظیم شدند که در این نقطه دارای فشار یکسانی (۱۷.۲ bar) باشند، زیرا فشار محفظه احتراق برای تمامی مخلوط های سوخت در ابتدای مرحله پاشش سوخت (۲۱- درجه) باید مساوی ۱۷.۲ bar باشد، سپس منحنی تغییرات فشار دو گام متوالی  $\Delta P = P_n - P_{n-1}$  در هر زاویه میل لنگ رسم گردید، در نقطه ای که بیشترین مقدار را دارد به عنوان انتهای زمان مهلت در نظر گرفته شد.

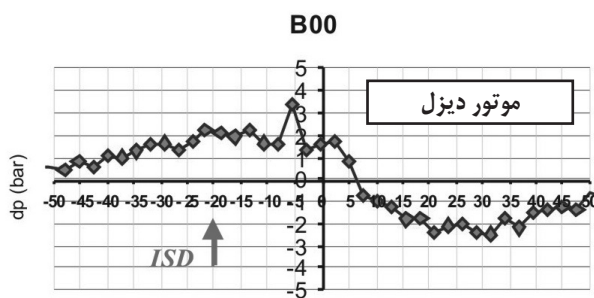
1- CN-Air Meter Reading

2- Air Meter Reading



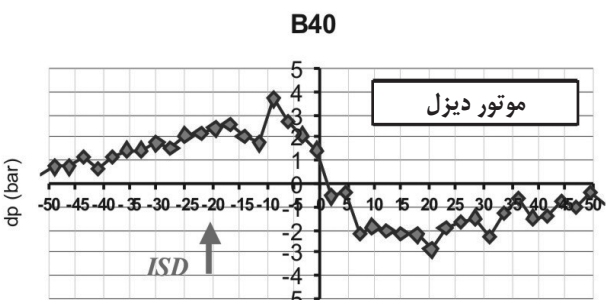
$\theta(CA)$

نمودار ۴ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، مخلوط بیودیزل ۳۰ درصد



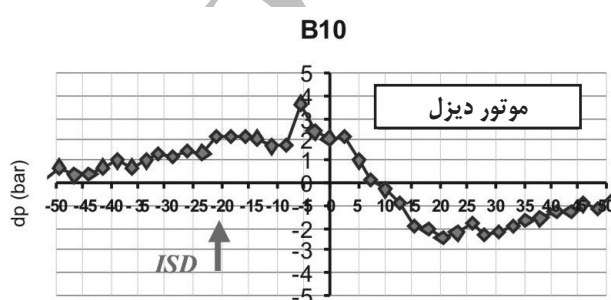
$\theta(CA)$

نمودار ۱ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، گازوئیل تنها



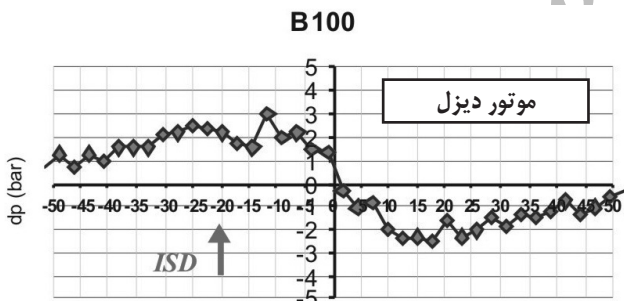
$\theta(CA)$

نمودار ۵ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، مخلوط بیودیزل ۴۰ درصد



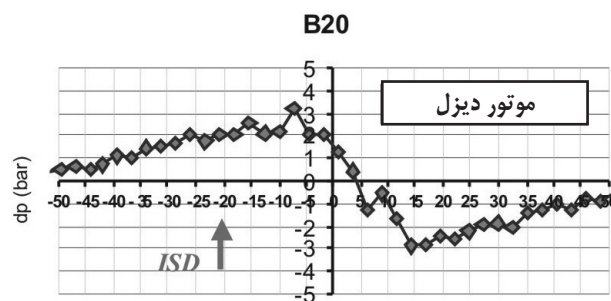
$\theta(CA)$

نمودار ۲ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، مخلوط بیودیزل ۱۰ درصد



$\theta(CA)$

نمودار ۶ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، بیودیزل تنها



$\theta(CA)$

نمودار ۳ تغییرات فشار در هر زاویه میل لنگ، مخلوط بیودیزل ۲۰ درصد

## ۸-۲- محاسبه نظری مهلت اشتعال

طول مدت زمان مهلت اشتعال، در موتورهای اشتعال تراکمی متغیر مهم عملکردی می باشد که بر فرآیند احتراق، و در نتیجه بر کارکرد موتور و میزان آلاینده های خروجی از آن، تأثیر گذار است و به صورت فاصله زمانی بین تزریق سوخت به درون استوانه و وقوع اولین افزایش فشار قابل مشاهده درون استوانه بر اثر آزادسازی انرژی مخلوط تعریف می شود و معمولاً در محدوده ۰.۴ تا ۳ میلی ثانیه می باشد. پس از پاشش سوخت به داخل محفظه احتراق، ابتدا فواره مایع به افشان هایی از قطرات ریز با اندازه های مختلف تبدیل می گردد که نتیجه آن، افزایش نسبت سطح به حجم قطرات می باشد. افزایش سطح قطرات و وجود هوای داغ داخل محفظه احتراق، موجب گرم شدن و تبخیر سوخت می شود، تا زمانی که مخلوط بخار سوخت و هوا (در لایه بخار سوخت)، در حد نسبت

درست (استوکیومتریک) برسد. دمای مخلوط برای احتراق و شروع واکنش های شیمیایی باید حداقل برابر با دمای خود اشتعالی سوخت باشد. مدت زمانی که طول می کشد تا سوخت مایع پاشیده شده، متمیزه و تبخیر شود و دمای آن به حد دمای اشتعال برسد، دوره تاخیر فیزیکی نامیده می شود و از معادله ۱ به دست می آید:

$$t_{Physical\_id} = \frac{\alpha_{id} \cdot d_{droplet} \cdot \rho_F}{C_{Physical\_id} \cdot \sqrt{2\rho_{air} (P_{inj} - P)}} \quad (1)$$

که در آن:  $\rho_F$  و  $\rho_{air}$  چگالی سوخت و چگالی هوا برحسب  $(kg/m^3)$  و  $P_{inj}$  و  $P$  فشار پاشش سوخت و فشار داخل محفظه احتراق برحسب bar،  $P_{inj}$  قطر قطره سوختی است که در محدوده ۰.۱ تا ۰.۰۱ mm و کوچکتر قرار دارد،  $\alpha_{id}$  و  $C_{Physical\_id}$  ضرایب

### ۳- بحث بر روی نتایج

نتایج اندازه گیری تجربی عدد ستان مخلوط سوخت، حاکی از این واقعیت است که با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، عدد ستان افزایش می یابد. به عبارت دیگر با افزودن سوخت بیودیزل به گازوئیل معمولی زمان مهلت اشتعال کوتاه تر و سوخت سریع تر در محیط محفظه احتراق دچار خود اشتعالی می شود. عدد ستان سوخت گازوئیل تنها تقریباً برابر ۵۷ و عدد ستان سوخت بیودیزل تنها تقریباً برابر ۶۲ می باشد. همچنین نتایج آزمون موتور نشان داد که با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت، زمان مهلت اشتعال کوتاه تر می شود. تحقیقات قبلی نشان می دهد که شرایط بهینه استفاده از سوخت بیودیزل تنها در محدوده B20 می باشد [۱] و لذا در این تحقیق پیش بینی مهلت اشتعال در محدوده سوخت B20 بررسی شد، بنابراین برای شبیه سازی تنها از داده های سوخت های B30، B00، B10، B20 و B40 استفاده گردید و اطلاعات سوخت بیودیزل تنها، تنها برای مقایسه با سوخت گازوئیل تنها آورده شده است.

جدول ۳ مقادیر عدد ستان مخلوط سوخت

نوع سوخت	عدد ستان		
	نوبت اول	نوبت دوم	نوبت سوم
B00	۵۷.۶	۵۷.۵	۵۷.۵۳
B10	۵۹	۵۸.۲	۵۸.۴۶
B20	۵۹.۴	۵۹.۷	۵۹.۶
B30	۵۹.۷	۵۹.۹	۵۹.۸
B40	۶۰	۶۰.۲	۶۰.۰۷
بیودیزل تنها	۶۲.۲	۶۲	۶۲.۱

جدول ۴ مقادیر عدد ستان مخلوط سوخت

نوع سوخت	مهلت اشتعال (بر حسب زاویه میل لنگ)		
	نوبت اول	نوبت دوم	نوبت سوم
B00	۱۴	۱۳.۵	۱۳.۸۳
B10	۱۳.۵	۱۳	۱۳.۱۶
B20	۱۲	۱۲.۵	۱۲.۱۶
B30	۱۲	۱۲	۱۲
B40	۱۱	۱۱.۵	۱۱.۳۳
بیودیزل تنها	۸.۵	۹	۸.۸۳

جدول ۵ تأثیر چگالی، گرانروی و عدد ستان بر مهلت اشتعال

نوع سوخت	چگالی	گرانروی	عدد ستان	مهلت اشتعال
B00	۰.۸۳۹	۳.۰۹	۵۷.۵۳	۱۳.۸۳
B10	۰.۸۴۳	۳.۲۸	۵۸.۴۶	۱۳.۱۶
B20	۰.۸۴۶	۳.۲۵	۵۹.۶	۱۲.۱۶
B30	۰.۸۴۸	۳.۶۱	۵۹.۸	۱۲
B40	۰.۸۵۴	۳.۷۵	۶۰.۰۷	۱۱.۳۳
بیودیزل تنها	۰.۸۸۵۳	۴.۳۹۱	۶۲.۱	۸.۸۳

ثابت می باشند و  $t_{Physical\_id}$  زمان مهلت اشتعال فیزیکی بر حسب msec است که برای تبدیل آن بر حسب درجه میل لنگ می توان نوشت:

$$\theta_{Physical\_id} = (360 \cdot N_{RPS}) \cdot (1000 \cdot t_{Physical\_id}) \quad (۲)$$

در ادامه اشتعال سوخت، با واکنش های شیمیایی که غالباً گرمازا هستند، با سرعت و آهنگ کم شروع می شود و به آهستگی پیش می رود تا زمانی که دمای لایه مخلوط سوخت و هوا که واکنش ها در آنجا رخ می دهد، به یک دمای بحرانی برسد، در این مرحله احتراق به صورت آبی اتفاق می افتد. فاصله زمانی بین رسیدن مخلوط از دمای خود اشتعالی به دمای بحرانی، دوره مهلت اشتعال شیمیایی نامیده می شود که از معادله نیمه تجربی زیر قابل محاسبه است [۱۵]:

$$\theta_{chemical\_id} = C_{chemical\_id} \cdot N_{RPS} \cdot P^n \cdot \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) \quad (۳)$$

که:  $C_{chemical\_id}$  ضرایب ثابت هستند و  $T$  دمای محفظه احتراق بر حسب (K) و  $n$  و  $P$  فشار داخل محفظه احتراق بر حسب bar می باشد.  $E_A$  انرژی فعال سازی سوخت بر حسب (J/mol) می باشد، که با عدد ستان سوخت نسبت عکس دارد: [۱۶]

$$E_A = \frac{a}{b + c \cdot CN} \approx a' + \frac{b'}{CN} \quad (۴)$$

که:  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و همچنین  $a'$  و  $b'$  ضرایب ثابتی هستند که با توجه به داده های تجربی تعیین می گردند. در نتیجه  $\theta_{chemical\_id}$  مهلت اشتعال شیمیایی بر حسب زاویه میل لنگ (deg) بدست می آید.

پس مهلت اشتعال برای هر سوخت (مخلوط سوخت بیودیزل و گازوئیل) برابر مجموع مهلت اشتعال فیزیکی و شیمیایی است:

$$\theta_{ID} = (360 \cdot N_{RPS}) \cdot \left( \frac{1000 \times \alpha_{id} \cdot d_{droplet} \cdot \rho_F}{C_{Physical\_id} \cdot \sqrt{2 \rho_{air} \cdot (P_{inj} - P)}} \right) + C_{chemical\_id} \cdot N_{RPS} \cdot P^n \cdot \exp\left(-\frac{a' + \frac{b'}{CN}}{RT}\right) \quad (۵)$$

با توجه به اینکه دما، فشار (bar<sup>۱۰۷</sup>) و چگالی هوای داخل محفظه احتراق در زمان پاشش سوخت همواره یکسان می باشد. همچنین در آزمون موتور، مقدار دور موتور (۷۰۰ rpm) نیز برای هر یک از سوخت ها، ثابت در نظر گرفته شده است (آزمون موتور دور ثابت) و با فرض اینکه فشار پاشش سوخت تحت تأثیر گرانروی آن است لذا معادله (۵) را می توان تنها بر حسب تابعی از چگالی سوخت، گرانروی سوخت و عدد ستان آن نوشت.

از طرف دیگر برای ساده سازی بیشتر معادلات، تابع نمایی به صورت تقریبی از یک تابع جبری تخمین زده می شود، در نتیجه معادله (۵) به شکل ساده تری تبدیل می گردد:

$$\theta_{ID} = A \cdot \rho_F^B \cdot \mu^C + D \cdot \exp\left(\frac{E}{CN}\right) \quad (۶)$$

که مقادیر A، B، C، D و E ضرایب ثابتی هستند که با استفاده از داده های تجربی تعیین می شوند.

برای اعتبار دهی به الگو، نمونه‌های دیگری از مخلوط سوخت بیودیزل با گازوئیل به نسبت‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد سوخت بیودیزل تهیه گردید. مقادیر عدد ستان و مهلت اشتعال مخلوط دو سوخت بیودیزل و گازوئیل (B25 و B05+B15) دقیقاً مطابق با روش قبل (۲-۵ و ۲-۶) اندازه‌گیری شدند. همچنین مقادیر چگالی و گرانی، نیز بر اساس استاندارد ASTM به صورت تجربی اندازه‌گیری شدند (جدول ۸).

جدول ۸ چگالی، گرانی، عدد ستان و مهلت اشتعال سوخت B05+B15 و B25 برای آزمون الگوی ارائه شده

نوع سوخت	چگالی	گرانی	عدد ستان	مهلت اشتعال
B05	۰.۸۴۰	۳.۱۹	۵۸	۱۳.۴۳
B15	۰.۸۴۴	۳.۳۸	۵۹	۱۲.۶۷
B25	۰.۸۴۷	۳.۵۵	۵۹.۷	۱۲.۰۸

مقایسه مقادیر مهلت اشتعال اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده نشان می‌دهد که الگوی قهقرایی ارائه شده (معادله ۶) می‌تواند با خطای کمتر از ۰.۵ مهلت اشتعال را پیش‌گویی نماید.

جدول ۹ اعتبار الگو برای پیش‌بینی مهلت اشتعال

مهلت اشتعال	B۰۵	B۱۵	B۲۵
اندازه‌گیری شده	۱۳.۱۳	۱۲.۶۳	۱۲.۲۸
محاسبه شده	۱۳.۴۴	۱۲.۱۶	۱۲.۰۴
میزان اختلاف	-۰.۳۱	+۰.۴۲	+۰.۲۴

همانطور که از الگوی قهقرایی غیرخطی چندگانه (معادله ۶) مشخص است که چگالی، گرانی و عدد ستان بزرگ سوخت بیودیزل باعث کاهش مهلت اشتعال می‌شود. عدد ستان و مهلت اشتعال، در موتورهای اشتعال تراکمی متغیر مهم عملکردی می‌باشد که بر فرآیند احتراق و در نتیجه بر کارکرد موتور و میزان آلاینده‌های خروجی از آن، تأثیر می‌گذارد. لذا با افزودن سوخت بیودیزل به گازوئیل معمولی عدد ستان سوخت افزایش می‌یابد و بدون کوچکترین تغییر در ساختار موتور، زمان مهلت اشتعال کوتاه‌تر می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج آزمون‌ها نشان داد که با افزودن سوخت بیودیزل به گازوئیل، عدد ستان از ۵۷ برای گازوئیل تنها تا ۶۲ برای بیودیزل تنها، افزایش یافته و مهلت اشتعال از ۱۳.۸ درجه میل‌لنگ برای گازوئیل تنها به ۸.۸۳ درجه میل‌لنگ برای بیودیزل تنها، کاهش می‌یابد. برای پیش‌بینی مهلت اشتعال از الگوی نیمه‌تجربی بر حسب تابعی از عدد ستان، چگالی و گرانی استفاده گردید. عدد ستان تنها بر مهلت اشتعال شیمیایی اثر می‌گذارد و چگالی و گرانی سوخت در تأخیر اشتعال فیزیکی مؤثر هستند، لذا یک الگوی قهقرایی غیر خطی به کمک نرم افزار SPSS14 ارائه گردید. الگوی ارائه شده با  $R^2=0.998$ ، توانایی پیش‌بینی مهلت اشتعال را با خطای کمتر از  $\pm 0.5$  درجه میل‌لنگ دارد.

با توجه به داده‌های تجربی راجع به چگالی و عدد ستان سوخت و ارتباط آن‌ها با مهلت اشتعال (جدول ۵)، پنج مجهول  $D, C, B, A, E$  از طریق اطلاعات مخلوط سوخت‌های بیودیزل و گازوئیل، محاسبه می‌شوند. اطلاعات تجربی حاکی از این واقعیت است که چگالی، گرانی و عدد ستان بزرگ سوخت بیودیزل باعث کاهش مهلت اشتعال می‌شود، لذا در معادله (۶) لازم است تا مقادیر  $B$  و  $C$  اعداد منفی باشند.

ضرایب  $D, C, B, A, E$  به کمک الگوی قهقرایی غیرخطی چندگانه<sup>۱</sup> با استفاده از نرم افزار SPSS14 محاسبه گردید، متغیرهای الگو و مقادیر اولیه آن‌ها با استفاده از یک روش تقریبی عبارت بودند از:

$$A=11.3, B=-3.9821, C=-0.6417, D=0.00656 \text{ \& } E=350.38$$

نتایج حاصل از الگوی قهقرایی غیرخطی چندگانه نشان می‌دهد که قاعده برآورد متغیرهای الگو، بعد از برآورد ۱۶۴ نوع الگو و ۷۸ بار نوبت به جواب مناسبی رسیده و در آخرین مرحله نوبت، مجموع مربعات مانده‌ها برابر ۰.۰۲۴ شده است و در نتیجه مقادیر متغیرها برابر  $E=268.888, D=0.02, C=-0.6, B=-4.888, A=9.786$  محاسبه شده است. به دلیل طولانی بودن، تنها بخشی از نتایج نوبت قاعده محاسبه در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ الگوریتم برآورد متغیرهای الگوی قهقرایی

تعداد نوبت	مجموع مربعات باقیمانده	برآورد متغیرها				
		E	D	C	B	A
۱	۰.۰۶۲	۱۱/۳۳	۳۵۰/۳۸	-۰/۰۷	-۰/۶۴	-۳/۹۸۳
۱/۱	۳۷۷۰۹۶/۶	-۶۵/۲۷	-۶۵۹۲/۴	-۰/۹۱۴	-۳/۰۶	-۳۰/۱۰
۱/۲	۴۲۶/۴۳۹	۳/۲۱۱	-۳۵۵/۱۰	-۰/۰۹۶	-۰/۸۴	-۷/۱۶۵
۷۸	۰/۰۲۴	۹/۷۸۷	-۲۶۸/۹۴	-۰/۰۲۰	-۰/۶۰	-۴/۸۸۸
۷۸/۱	۰/۰۲۴	۹/۷۸۶	-۲۶۸/۸۸	-۰/۰۲۰	-۰/۶۰	-۴/۸۸

همبستگی الگوی قهقرایی غیرخطی چندگانه به صورت (جمع کل تصحیح شده / مجموع مربعات مانده‌ها) -  $R^2=1$  محاسبه می‌شود، نتایج حاصل از محاسبات تحلیل واریانس برای برآورد متغیرهای الگو، نشان می‌دهد که الگوی ارائه شده دارای همبستگی بسیار مناسبی در حد  $R^2=0.998$  می‌باشد (جدول ۷).

جدول ۷ تحلیل واریانس (ANOVA) الگوی قهقرایی

منبع	کل مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	کل مربعات
قهقرایی	۱۷۲/۵۲۷	۸۶۲/۶۳۴	۵	۱۷۲/۵۲۷
باقیمانده	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۱	۰/۰۲۴
جمع کل تصحیح نشده	-	۸۶۲/۶۵۸	۶	-
جمع کل تصحیح شده	-	۱۵/۱۳۹	۵	-

در نتیجه الگوی قهقرایی غیرخطی چندگانه برای مهلت اشتعال را می‌توان به صورت (۷) نوشت:

$$\theta_{ID} = \frac{9.786}{\rho_F^{4.888} \cdot \mu^{0.6}} + 0.02 \exp\left(\frac{268.888}{CN}\right) \quad (7)$$

**Reference:**

- [1]- بهمن نجفی، وهاب پیروزپناه، برات قبادیان، ۱۳۸۶، بررسی تجربی پارامترهای عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل با استفاده از سوخت جایگزین بیودیزل، مجله فنی مهندسی مدرس، ص ۷۹ تا ۸۶
- [2]- Van Gerpen J., 2005, "Biodiesel Processing and Production". Fuel Processing Technology, 86, 1097-1107.
- [3]- Knothe G., 2005, "Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters. Fuel Processing Technology, 86, 1059-1070.
- [4]- Wang Y., Ou S., Liu P. and Zhang Z., 2007, "Preparation of Biodiesel from Waste Cooking Oil via Two-step Catalyzed Process", Energy Conversion and Management, 48, 184-188.
- [5]- Korbitz W., 1999, "Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect"; Renewable Energy 16, 1078-1083.
- [6]- Cormick M.; Michael S R.; Tersal G.; Andrew A.; Herring M.; "Impact of Biodiesel Source Material and Chemical Structure on Emission of Criteria Pollutants from a Heavy-duty Engine", Environmental Science and Technology, 35, 1742-1747, 2001.
- [7]- Fernando S., Hanna M., 2004, "Development of an Ovel Biofuel Blend Using Ethanol-Biodiesel-Diesel Microemulsions: EB-Diesel", Energy and Fuels, 18, 1695-1703.
- [8]- Malca M., Freire F., 2006, "Renewability and Life-cycle Energy Efficiency of Bioethanol and Bio-Ethyl Tertiary Butyl Ether", Assessing the implications of allocation, 31, 3362-3380.
- [9]- Lapuerta M., Armas O., GarciaContreras R., 2007, "Stability of Diesel-Bioethanol Blends for Use in Diesel Engines", Biomass & Bioenergy, 208-212.
- [10]- Rosenberg A., Kaul H.; Senn T., 2002, Aufhammer w.; "Costs of Ethanol Production from Winter Cereals: the Effect of Growing Conditions and Crop Production Intensity Levels", Mechanical Engineering, 15, 91-102.
- [11]- Weing, Z., 2000, "Production of Sunflower Oil Ethyl Ester for Use as a Biodiesel Fuel", Canada, Toronto university.
- [12]- Van Gerpen, J., Shanks B., Pruszko R., 2004, Biodiesel Analytical Methods, Subcontractor Report, Iowa State University.
- [13]- Antolin, G., 2002, "Optimization of Biodiesel Production by Sunflower Oil Transesterification" Bioresource Technology. 83, 111-114.
- [14]- Najafi B., Piruzpanah V., Ghobadian B., 2007, "Experimental Investigation of Performance and Emission Parameters of a Small Diesel Engine Using CNG Biodiesel", SAE Paper No. 2007-32-0075.
- [15]- Ramos, J.I., 1989, "Internal Combustion Engine Modeling". Printed in USA, Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- [16]- Heywood, J.B. 1988, "Internal Combustion Engine Fundamental, International Edition", Printed in Singapore, McGraw-Hill, USA.

Archive of SID