ISME

# بررسی تاثیر زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن بر میزان آلاینده های موتور دوسوخته در بارهای مختلف

**عیوض اکبریان**[۱]
دانشجوی دکترا

**بهمن نجفی**[۲]
دانشیار

**محسن جعفری قاسم قشلاقی**[۳]
کارشناسی ارشد

*در این تحقیق که بر روی موتور تبدیل شده دیزل به موتور دوسوخته با دورثابت انجام شد، ابتدا عملکرد و آلاینده های موتور دیزل مورد تست و بررسی قرار گرفت و بعد از تبدیل به موتور دوسوخته، آزمایش ها و تحقیقات بر روی آلاینده ها در زوایای آوانس ۱۴، ۱۷و ۲۰ درجه و بارهای مختلف٪۱۰۰، ٪۷۵ ، ٪۵۰ ، ٪۲۵ و ٪۱۰ بار کامل انجام گرفت. نتایج نشان داد که در بارها و زوایای مختلف میزان NOx و PM در موتور دوسوخته نسبت به موتور دیزل کاهش یافته و تفاوت معنی داری دارد. میزان $CO_2$ در موتور دوسوخته، هرچند تفاوت کمی با موتور دیزل داشت، ولی در کل کمتر از حالت دیزل بود. در بارهای کمتر از ٪۷۵ میزان CO در موتور دیزل کمتر از موتور دوسوخته بود ولی در بار کامل این امر برعکس بوده و تفاوت معنی داری دا شت. میزان HC در موتور دو سوخته در بارها و زوایای پاشش مختلف سوخت آتش زن، بیشتر از حالت دیزل بود.*

*واژه‌های راهنما:* موتور دوسوخته، تست عملکردی، آلاینده های موتور، زاویه آوانس، سوخت آتش زن، سوخت گازی، دور ثابت، احتراق

## ۱- مقدمه

تامین انرژی از طریق منابع مختلف با آلایندگی و هزینه کمتر، موضوع مورد مطالعه محققان می باشد. قیمت روز افزون فرآورده های نفتی، در دسترس نبودن و همچنین آلایندگی حاصل از این فرآورده ها باعث می شود تا تحقیقات به سمت منابع انرژی پایدارتر و ارزانتر با آلایندگی کمتر سوق داده شوند [۱].

رویکرد موتور دوسوخته (گاز طبیعی NG با گازوئیل) راه حلی برای کاهش آلایندگی نسبت به موتورهای احتراق داخلی دیزل می باشد[۲]. موتور دوسوخته با پاشش سوخت آتش زن (دیزل) به محفظه احتراق که مخلوطی از سوخت گازی و هوا را دارد کار می کند. موتور دوسوخته گزینه مناسبی برای کاهش آلاینده های موتور به خصوص آلاینده های خطرناک NOx و PM می باشد [۳].

[۱] دانشجوی دکترا مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی a.akbarian@uma.ac.ir
[۲] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی Najafib@uma.ac.ir
[۳] کارشناسی ارشد، شرکت موتورسازان mjgg@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۱

Archive of SID
www.SID.ir

در زمینه موتورهای دوسوخته تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در آن‌ها کاهش آلایندگی و عملکرد موتور در سوخت های گازی و آتش زن مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

Makame و همکاران [۴] به منظور درک احتراق و رفتار موتور مطالعات تجربی و تئوری را بر روی احتراق دوگانه گاز طبیعی (NG) و گازوئیل انجام دادند. مطالعات آنها نشان داد که احتراق گاز طبیعی در شرایط احتراق موتورهای دیزلی با افزایش تعداد سوراخ های نازل و افزایش فشار پاشش سوخت دیزل (که در آزمایشات آنها مبنا MPa ۶۰ بود) بهبود می یابد.

Mansour و همکاران [۵] مدلی را بر اساس واکنش های شیمیایی به منظور پیش بینی عملکرد و آلایندگی موتور دوسوخته DUETZ FL8 413F ارائه دادند و نتایج به دست آمده از مدل را با نتایج تجربی مقایسه کردند. آنها جهت شبیه سازی ریاضی، یک برنامه کامپیوتری ارایه دادند و مشخصه های مهم احتراق از جمله دما، فشار و مقدار گونه های شیمیایی را با مکانیزم واکنش های سینتیکی شیمیایی شبیه سازی کردند.

Abd-alla و همکاران[۶] تحقیقات تجربی و تئوری در مورد تاثیر زمان اشتعال و مقدار سوخت آتش زن را بر روی عملکرد موتورهای دوسوخته با سوخت گازی متان انجام دادند. نتایج نشان داد که در بارهای پایین، عملکرد موتور کاهش یافته و درصد سوخت نسوخته بیشتر می شود. در بارهای زیاد، با افزایش مقدار سوخت آتش زن، عملکرد موتور اصلاح می شد ولی میزان آلاینده های خروجی از موتور افزایش می یافت و همچنن باعث ایجاد کوبش شدید در موتور می شد. آنها دریافتند که افزایش مدت زمان پاشش سوخت آتش زن، باعث افزایش آلاینده های NOx، CO و کاهش میزان هیدروکربن های نسوخته HC می شود. مشاهده شد که افزایش زمان پاشش باعث افزایش عملکرد موتور و کاهش پدیده کوبش می شود.

Yoonو همکاران[۷] آزمایشات تجربی را بر روی احتراق و آلاینده های موتور دوسوخته با سوخت اصلی بیو گاز و سوخت آتش زن بیو دیزل، بر روی یک موتور دیزل با پاشش مستقیم انجام دادند. فشار داخل سیلندر و نرخ آزادسازی حرارت در بارهای مختلف موتور در حالت دیزل خالص و دوسوخته (بیوگاز با بیودیزل و بیوگاز با دیزل) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در مورد مصرف سوخت، دمای گازهای خروجی از اگزوز، بازده موتور و آلاینده های موتور مطالعاتی صورت گرفت.

در این تحقیق گاز توسط انژکتورهایی که به صورت الکترونیکی کنترل می شدند، به درون منیفلد هوا تزریق می شد و در آنجا با هوای ورودی به داخل سیلندر مخلوط می شد. نتایج نشان داد که مشخصات احتراق با بیودیزل و دیزل خالص در بارهای مختلف موتور از یک الگوی مشابهی پیروی می کند. در بارهای کم در حالت دوسوخته، فشار بیشینه داخل سیلندر و نرخ آزادسازی حرارت برای بیوگاز- بیودیزل در مقایسه با حالت بیوگاز-دیزل، کمی پایین تر است. در ۶۰٪ بار کامل، احتراق در حالت بیوگاز- بیودیزل، نرخ آزادسازی حرارت و فشار موثر متوسط اندیکه (IMEP) بیشتری نسبت به حالت دیزل- بیوگاز داشت. همچنین آلاینده NOx در حالت دوسوخته در تمامی بارها برای هر دو حالت بیوگاز- بیودیزل و بیوگاز- دیزل، نسبت به حالت دیزل خالص به طور معنی داری پایین‌تر بود. به خاطر عدم وجود مواد آروماتیک و وجود اکسیژن در بیودیزل، حالت بیودیزل – بیوگاز، مقدار دوده کمتری نسبت به سایر حالت ها داشت.

Papagiannakis و همکاران [۸] به صورت تجربی آزمایشاتی را بر روی تاثیر درصد گاز طبیعی بر روی عملکرد و نشر آلاینده های موتور دیزل دوسوخته شده پاشش مستقیم انجام دادند و نتایج نشان داد که با افزایش

Archive of SID

www.SID.ir

درصد سوخت گازی، حداکثر فشار سیلندر و حرارت آزاد شده، کاهش یافته ولی مصرف سوخت ویژه افزایش می یابد. همچنین میزان آلاینده های NOx و دوده موتور دوسوخته کمتر از حالت دیزل خالص بود ولی میزان CO در موتور دوسوخته افزایش یافته بود. آنها جهت بهینه کردن ترکیب سوخت گازی و هوا در موتورهای پاشش مستقیم، تاثیر شکل اتاقک پیستون، مسیر پاشش انژکتور، سرعت پاشش، زمان پاشش، تعداد سوراخ های انژکتور را روی پارامترهای عملکردی موتور دوسوخته مورد بررسی قرار دادند. Lata و Misra [۹] تحقیقات تئوری و عملی بر روی موتور دوسوخته با سوخت آتش زن هیدروژن و گاز LPG به عنوان سوخت اصلی انجام دادند و عملکرد موتور، احتراق و فشار داخل سیلندر را با مدل ارائه شده پیش بینی کردند. موتور مورد استفاده آنها مجهز به توربوشارژر و اینترکولر بود و برای کاربرد ژنراتور در نظر گرفته شده بود.

Maghbouli و همکاران [۱۰] با استفاده از ترکیب مدل های 3D-CFD و سینماتیک شیمیایی، فرآیند احتراق و آلاینده های موتور دوسوخته را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از نتایج مدل سازی انجام شده و نتایج تجربی، معلوم شد که با افزایش مقدار سوخت آتش زن میزان NOx وCO افزایش می یابد. همچنین با افزایش سوخت آتش زن دیزل، تاخیر در اشتعال کمتر شده و فشار بیشینه سیلندر افزایش می یابد. نتایج مدل سازی در این تحقیق با نتایج تجربی مطابقت داشت و آن را تایید می کرد.

Stewart و همکاران [۱۱] از یک موتور دیزل کوچک با پاشش مستقیم (DI) و سوخت های متان، پروپان و بوتان در $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{3}{4}$ بار کامل و بارکامل در حالت دوسوخته برای آزمایشات خود استفاده کردند. دور موتور ۱۵۰۰ rpm ثابت نگاه داشته شده بود و توان نامی موتور ۱۸/۷kW بود. نتایج نشان داد که گاز متان قابل استفاده به صورت سوخت اصلی را در موتور دوسوخته دارد و در مقایسه با سوخت دیزل میزان $CO_2$ کمتری تولید می کند. گازهای پروپان و بوتان نیز در مقایسه با سوخت دیزل میزان $CO_2$ کمتری داشتند ولی با توجه به فرآیند احتراق آنها، برای استفاده در موتورهای دوسوخته دور پایین مناسب نبودند.

Duc و همکاران [۱۲] رفتار موتور دوسوخته بیوگاز و دیزل (گازوئیل) را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تجربی آنها از یک موتور دیزل با پاشش غیر مستقیم (IDI) استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان داد که احتراق دوگانه سوخت بیوگاز با دیزل در توان موتور تغییراتی حاصل نمی کند.

Kumar و Raj [۱۳] تاثیر زوایای مختلف پاشش سوخت آتش زن و همچنین دماهای مختلف هوای ورودی به منیفلد هوا بر میزان آلاینده ها و فشار داخل سیلندر را در یک موتور دوسوخته بیودیزل و گاز طبیعی با توان ۲kW مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که افزایش زاویه آوانس فشار داخل سیلندر، دما و نرخ آزاد سازی حرارت و میزان آلاینده NOx افزایش می یابد و میزان CO و HC با افزایش زاویه آوانس و دمای هوای ورودی کاهش می یابد. دانشمندان و محققان دیگری نیز بر روی موتورهای دوسوخته مطالعاتی انجام داده اند که تحقیقات آنها بیانگر این مطلب است که توان ترمزی و گشتاور موتور دیزل به طور عمومی بالاتر از موتور دوسوخته شده (همان موتور) است. به دلیل تفاوت ارزش حرارتی سوخت گازوئیل و گاز طبیعی، توان ترمزی نسبت به کل مقدار سوخت پاشیده شده برابر بوده و نسبت استوکیومتری حالت دوسوخته در تمام سرعت های موتور (دور موتور) کمتر از دیزل خالص است. حداکثر فشار داخل سیلندر با افزایش سوخت گازی افزایش می یابد. میزان آلاینده های NOx و CO در موتور دیزل همواره بیشتر از موتور دوسوخته می باشد ولی با افزایش دور موتور برای هر دو حالت دیزل خالص و دوسوخته، این مقادیر کاهش می یابند.

Archive of SID

www.SID.ir

افزایش دور موتور یا بار موتور، باعث افزایش عملکرد حرارتی موتور دوسوخته می شود. افزایش مقدار سوخت آتش زن باعث افزایش گشتاور خروجی از موتور می شود و صدای موتور را کاهش می دهد. برای کارکرد بدون کوبش موتور دوسوخته، استفاده از نسبت تراکم پایین مناسب به نظر می رسد [۵, ۱۴-۱۸] هدف از این تحقیق بررسی امکان دوسوخته کردن موتور دیزل (گازوئیل-گاز شهری) به منظور کاهش آلاینده های موتور در شرایط کاری مختلف می باشد. در این مقاله عمکرد و آلاینده های موتور دوسوخته شده گاز طبیعی NG با سوخت آتش زن گازوئیل بر روی یک موتور دورثابت با پاشش مستقیم در زوایای آوانس و بارهای مختلف مورد تست و بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از موتور دیزل MN 440A دور ثابت ساخت شرکت موتورسازان تراکتورسازی ایران برای کاربرد ژنراتور مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات موتور استفاده در جدول (۱) آمده است. تست ها در سلول تست امور تحقیقات مهندسی شرکت موتورسازن انجام گرفت.

موتور در دو حالت دیزل و دوسوخته مورد تست واقع شد. تست موتور براساس استاندارد ECE-R96 (سیکل Steady-state برای موتورهای دورثابت) صورت گرفت (جدول۲). در همه حالت ها دور موتور ثابت و ۱۵۰۰ دور در دقیقه بود. بعد از وصل کردن موتور به دینامومتر (از نوع مغناطیسی ساخت شرکت SCHENCK، مدل W700، با دقت ۰/۱N.m در اندازه گیری گشتاور و ۱ rpm در اندازه گیری دور موتور) ابتدا موتور در حالت دیزل در بارهای مختلف ٪۱۰، ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵، ٪۱۰۰ مورد تست واقع شد و میزان آلاینده ها با استفاده از دستگاه آلاینده سنج AVL (مدل DICOM 4000 ) اندازه گیری شد و میزان مصرف سوخت و گشتاور موتور ثبت شدند. بعد از تست در حالت دیزل، موتور به حالت دوسوخته (گازوئیل با گاز شهر) تبدیل شد. گاز شهر توسط یک میکسچر با هوای ورودی به منیفلد هوا مخلوط می شد و سپس به داخل سیلندر وارد می شد. شکل (۱) طرحواره موتور دوسوخته را نشان می دهد.

**جدول ۱** – مشخصات موتور مورد استفاده

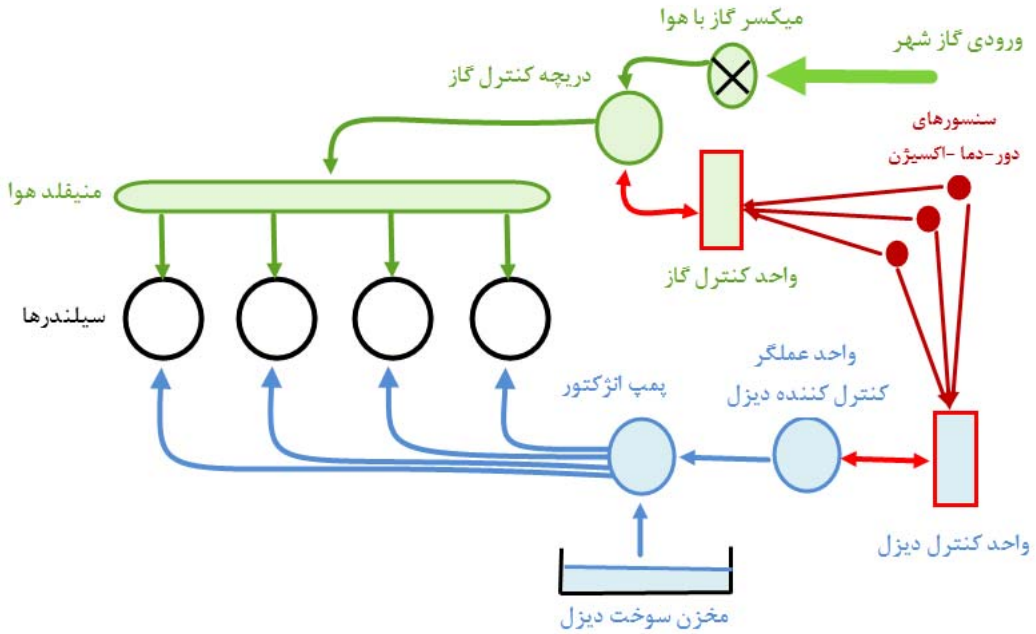
| | |
|---|---|
| تعداد سیلندر | ۴ |
| سیکل | چهار زمانه |
| سیستم هوای ورودی | تنفس طبیعی |
| حجم موتور | ۴ لیتر |
| قطر سیلندر | ۱۰۰ میلیمتر |
| کورس پیستون | ۱۲۷ میلیمتر |
| نسبت تراکم | ۱۶:۱ |
| سیستم احتراق | پاشش مستقیم |
| توان نامی | ۴۴ kW@۱۵۰۰ rpm |

Archive of SID

www.SID.ir

**جدول۲** – استاندارد **ECE-R96** برای تست موتور

| ردیف | گشتاور (درصد) | دور موتور | ضریب تاثیر |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۰۰ | توان نامی | ۰/۰۵ |
| ۲ | ۷۵ | توان نامی | ۰/۲۵ |
| ۳ | ۵۰ | توان نامی | ۰/۳ |
| ۴ | ۲۵ | توان نامی | ۰/۳ |
| ۵ | ۱۰ | توان نامی | ۰/۱ |




**شکل۱** - طرحواره موتور دوسوخته

احتراق مخلوط آماده گاز طبیعی با گازوئیل در بارهای مختلف بر روی ٪۵۰ مصرف گازوئیل در حالت دیزل خالص تنظیم شد. ابتدا مصرف گازوئیل توسط اهرم کنترل مقدار سوخت بر روی پمپ انژکتور به حالت ٪۵۰ دیزل تنظیم می شد و سپس با وارد کردن گاز شهری توسط میکسچر به داخل منیفلد هوا، توان موتور تا حالت دیزل خالص بالا برده می شود. میزان سوخت گازی (گاز شهر) که توسط میکسچر به داخل موتور هدایت می شد، تا حدی بالا برده می شد که توان ترمزی موتور برابر توان موتور در حالت دیزل خالص باشد. سپس میزان مصرف گاز توسط یک کنتور گاز (ساخت شرکت Gas Souzan، مدل AG 75.10 ، دقت در اندازه گیری $m^3/hr$ ۰/۱) قرائت می شد و مصرف سوخت دیزل و آلاینده ها ثبت می شدند. مشخصات گاز طبیعی و گازوئیل و همچنین ماتریس آزمون در جدول های (۳) و (۴) و (۵) آمده است.

www.SID.ir

**جدول۳**– مشخصات سوخت های مورد استفاده (پژوهشگاه صنعت نفت)

| مشخصات | گازوئیل | گاز طبیعی (NG) |
|---|---|---|
| ارزش حرارتی (MJ/kg) | ۴۲/۱ | ۴۸/۶ |
| عدد ستان | ۵۵ | ---- |
| عدد اکتان | ---- | ۱۲۰ |
| دمای خوداشتعالی ( $^{\circ}C$ ) | ۳۱۶ | ۶۵۰ |
| نسبت استکیومتری هوا به سوخت | ۱۴/۶۹ | ۱۷/۲ |
| درصد کربن موجود (٪) | ۸۷ | ۷۵ |

**جدول۴** – ترکیبات گاز طبیعی (پژوهشگاه صنعت نفت)

| ترکیبات | درصد حجمی (٪) |
|---|---|
| متان | ۹۶/۱۶ |
| اتان | ۱/۰۹۶ |
| بوتان | ۰/۱۳۶ |
| ایزوبوتان، ان بوتان | ۰/۰۲۱ |
| ایزوپنتان، ان پنتان | ۰/۰۰۶ |
| N2 | ۰/۰۰۱ |
| H2S | ۰/۰۰۰۲ |
| H2O | ۰/۰۰۶ |

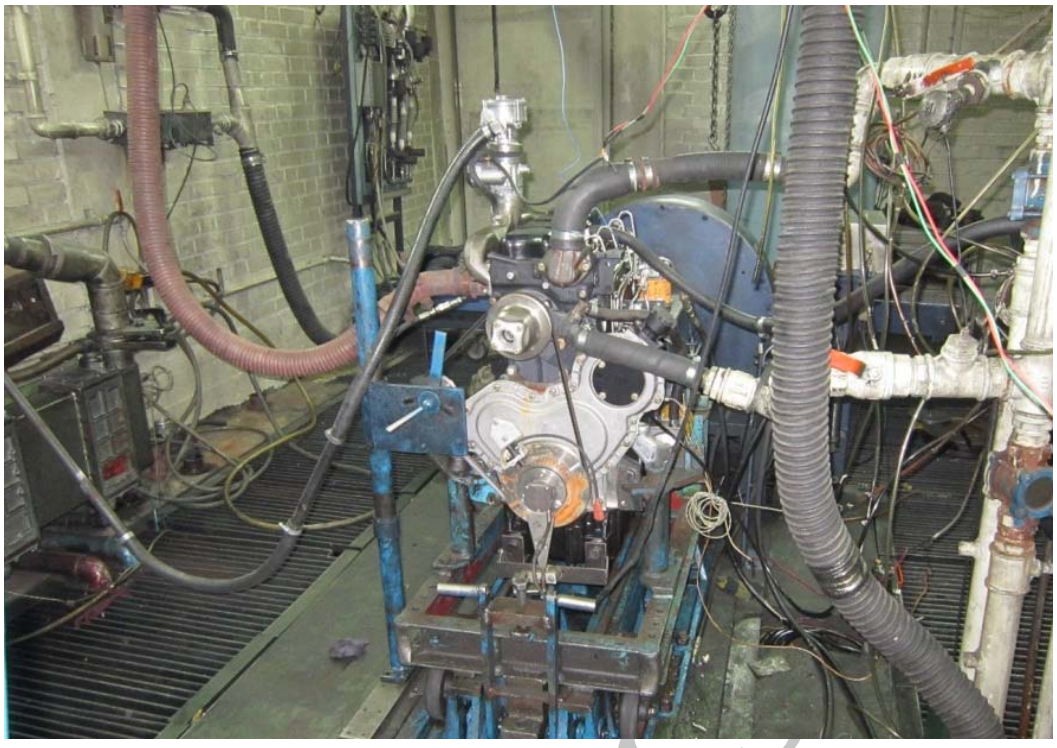
**جدول ۵** – ماتریس آزمون موتور

| زاویه آوانس | میزان بار(٪ بار کامل) | آلاینده ها | میزان سوخت آتش زن (٪ حالت‌دیزل) | ثبت پارامترهای مربوط موتور |
|---|---|---|---|---|
| ۱۴ | ۱۰۰ | CO | ۱۰۰ | گشتاور |
| ۱۷ | ۷۵ | $CO_2$ | ۵۰ | دور موتور |
| ۲۰ | ۵۰ | PM | | مصرف سوخت دیزل |
| | ۲۵ | Nox | | مصرف سوخت گاز شهری |
| | ۱۰ | HC | | |

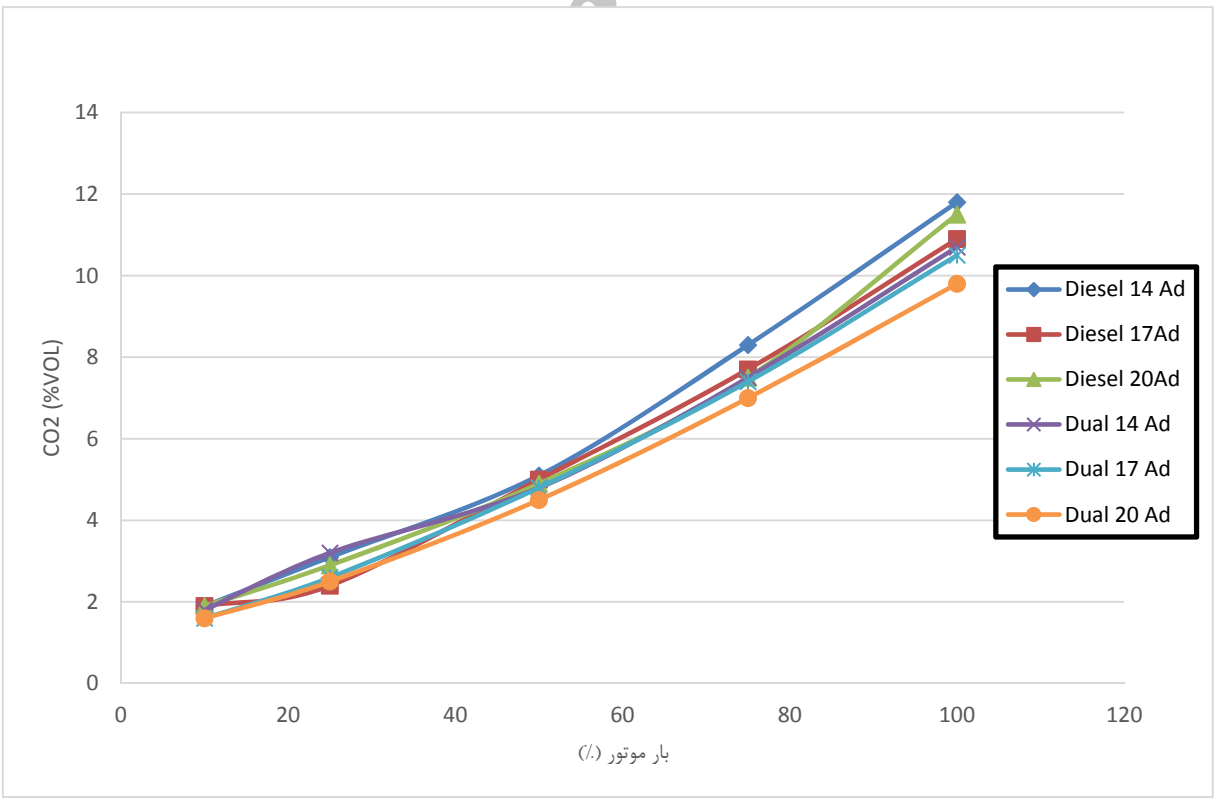
زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن (گازوئیل) در ۳ حالت ۱۴ ، ۱۷ و ۲۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا با تغییر موقعیت دنده پمپ انژکتور حاصل شد و توسط دستگاه AVL (مدل DiTest GMBH) زاویه آوانس به دقت اندازه گیری شد. عملکرد و آلاینده های موتور و همچنین میزان مصرف سوخت آتش زن و گاز شهر در حالت های مختلف بار و زوایای آوانس ثبت گردید.

Archive of SID

www.SID.ir



**شکل ۲** – نمایی از موتور MN440A دوسوخته شده داخل سلول تست

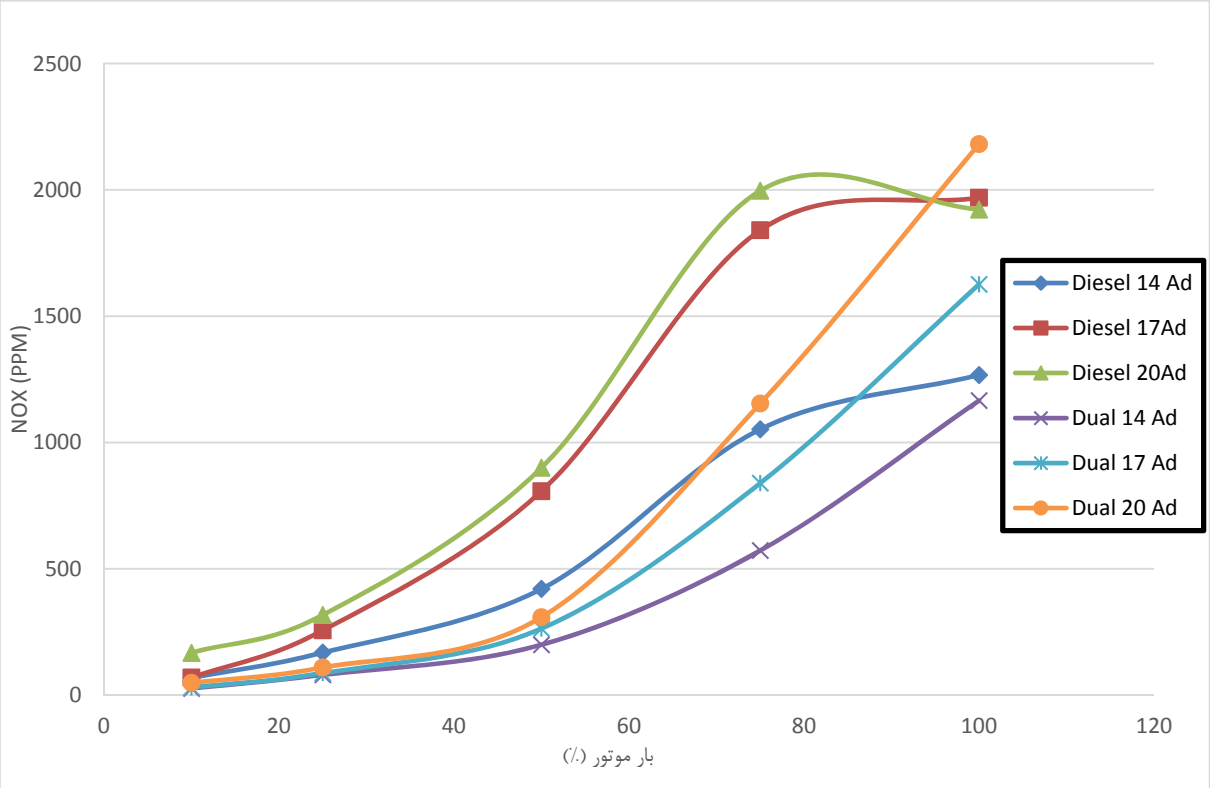



**شکل ۳** - نمودار مربوط آلاینده $CO_2$ در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

www.SID.ir

## ۳-بحث و بررسی نتایج

بعد از استحصال نتایج آزمایشات، داده ها در نرم افزار Microsoft Excel تحلیل شدند. نمودار مربوط به میزان $CO_2$ در شکل (۳) نشان می دهد که در همه حالت های بار و زوایای آوانس پاشش سوخت آتش زن، مقدار این آلاینده در حالت دوسوخته نسبت به حالت دیزل خالص پایین تر می باشد. شکل (۳) نشان می دهد که با افزایش بار، مقدار $CO_2$ نیز افزایش می یابد و با افزایش زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن این مقدار کاهش می یابد. به دلیل اینکه $CO_2$ جزء محصولات احتراق کامل است بنابراین راه کاهش آن، کاهش مصرف سوخت (با استفاده از زمان بندی مناسب احتراق و ...) می باشد. نتایج حاصله در مورد میزان انتشار آلاینده NOx نشان می دهد که در بارهای مختلف و زوایای مختلف آوانس پاشش سوخت آتش زن، میزان آن در حالت دوسوخته نسبت به حالت دیزل خالص کمتر است (شکل ۴) همچنین با افزایش زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن میزان NOx روند صعودی به خود می گیرد و با افزایش بار، این میزان افزایش پیدا می‌کند. تولید NOx رابطه مستقیم با گرادیان دمای موضعی در داخل محفظه احتراق دارد. در موتورهای دیزل زمان تاخیر در اشتعال نقش مهمی در تولید این آلاینده دارد زیرا سوختی که در زمان تاخیر اشتعال به داخل محفظه احتراق پاشیده می شود در یک لحظه افروخته می شود و در نتیجه گرادیان دمایی موضعی زیادی تولید می کند. برعکس در موتورهای اشتعال جرقه ای چون مخلوط سوخت و هوای آماده داخل سیلندر وجود دارد، احتراق با پیشروی شعله آتش، صورت می گیرد و در نتیجه با وجود دمای بالاتر نسبت به موتور دیزل، گرادیان دمایی کمتری دارد[۱۹]. موتور دوسوخته بصورت حد وسط این دو حالت می باشد به عبارتی وجود گاز طبیعی و احتراق آن باعث کاهش گرادیان های دمایی می شود و آلاینده NOx را کاهش می دهد.



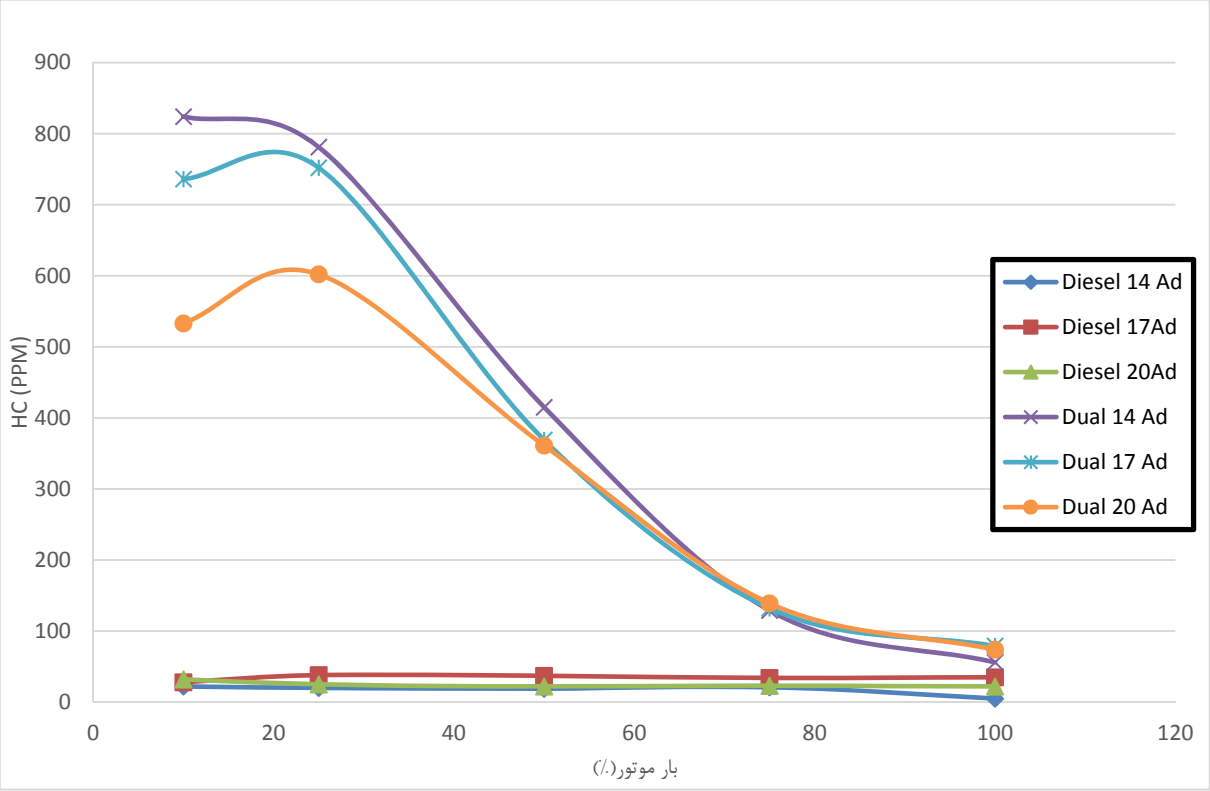

**شکل ۴** - نمودار مربوط آلاینده NOx در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

www.SID.ir

آلاینده HC نماینده مجموع هیدروکربن های نسوخته می باشد و تولید آن حاصل احتراق ناقص می باشد. در حالت دیزل به دلیل وجود هوای اضافی احتراق ناقص به کمترین مقدار خود می رسد. در حالت دوسوخته و در بارهای کم دمای محفظه احتراق بسیار کمتر از حالت بار کامل می باشد و حتی در دیواره های محفظه احتراق شاید دما کمتر از مقدار لازم برای احتراق گاز طبیعی باشد[۲۰]. در نتیجه انتظار می رود که در بارهای کم میزان آلاینده HC به طور قابل توجهی افزایش یابد.

شکل (۵) میزان تولید آلاینده HC را در همه حالت های بار و زوایای آوانس پاشش سوخت آتش زن نشان می دهد. با توجه به شکل (۵) مشخص می شود که میزان آلاینده HC در حالت دوسوخته به ویژه در بارهای کم کاملا به زمان بندی پاشش سوخت آتش زن وابسته است. با آوانس کردن پاشش سوخت آتش زن، مدت زمان بیشتری در اختیار جت سوخت پاشیده شده قرار می گیرد تا با اختلاط بهتر، احتراق موثرتری داشته باشد و در بارهای کم، دمای متوسط و موضعی در محفظه احتراق بیشتر شده و در نقاط بیشتری از محفظه احتراق دمای لازم برای احتراق گاز طبیعی فرآهم می شود و انتظار می رود مقدار این آلاینده کمتر شود.

تغییرات لامبدا (نسبت سوخت به هوا) با توجه به رابطه ۱ محاسبه شد [۲۱] و شکل (۶) نتایج آن را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در حالت دوسوخته میزان لامبدا افزایش می یابد و همچنین در بارهای کم و زوایای کم آوانس پاشش سوخت آتش زن، این مقدار بیشتر از سایر حالت ها می باشد.



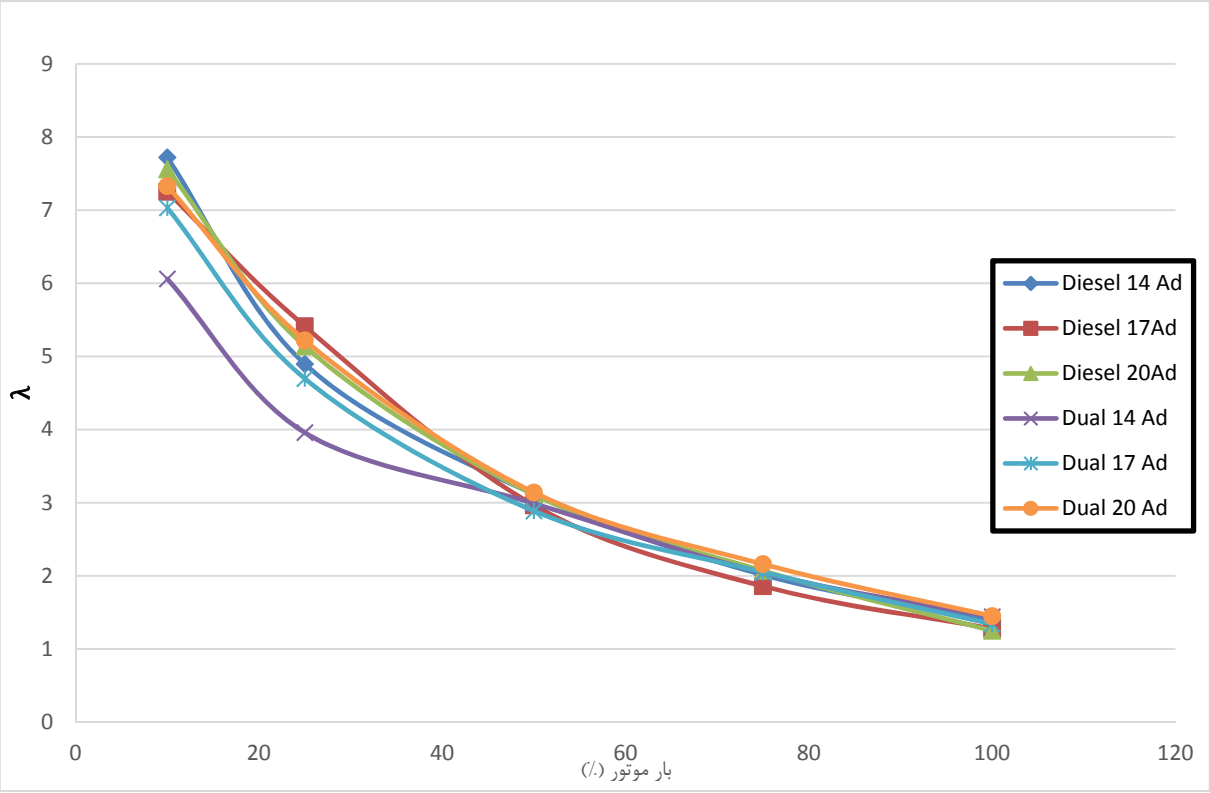

**شکل ۵** - نمودار مربوط آلاینده HC در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

www.SID.ir

در رابطه (۱)، $(AFR_{NG})_{Stoic}$ و $(AFR_{PF})_{Stoic}$ به ترتیب نسبت های هوا به سوخت استکیومتری برای گاز طبیعی و سوخت آتش زن (گازوئیل) می باشد. $\dot{m}_{air}$ و $\dot{m}_{NG}$ و $\dot{m}_{PF}$ به ترتیب نرخ جرمی هوا، گاز طبیعی و سوخت آتش زن می باشد. به دلیل اینکه موتور تنفس طبیعی بوده و دور ثابت است لذا در حالت دوسوخته

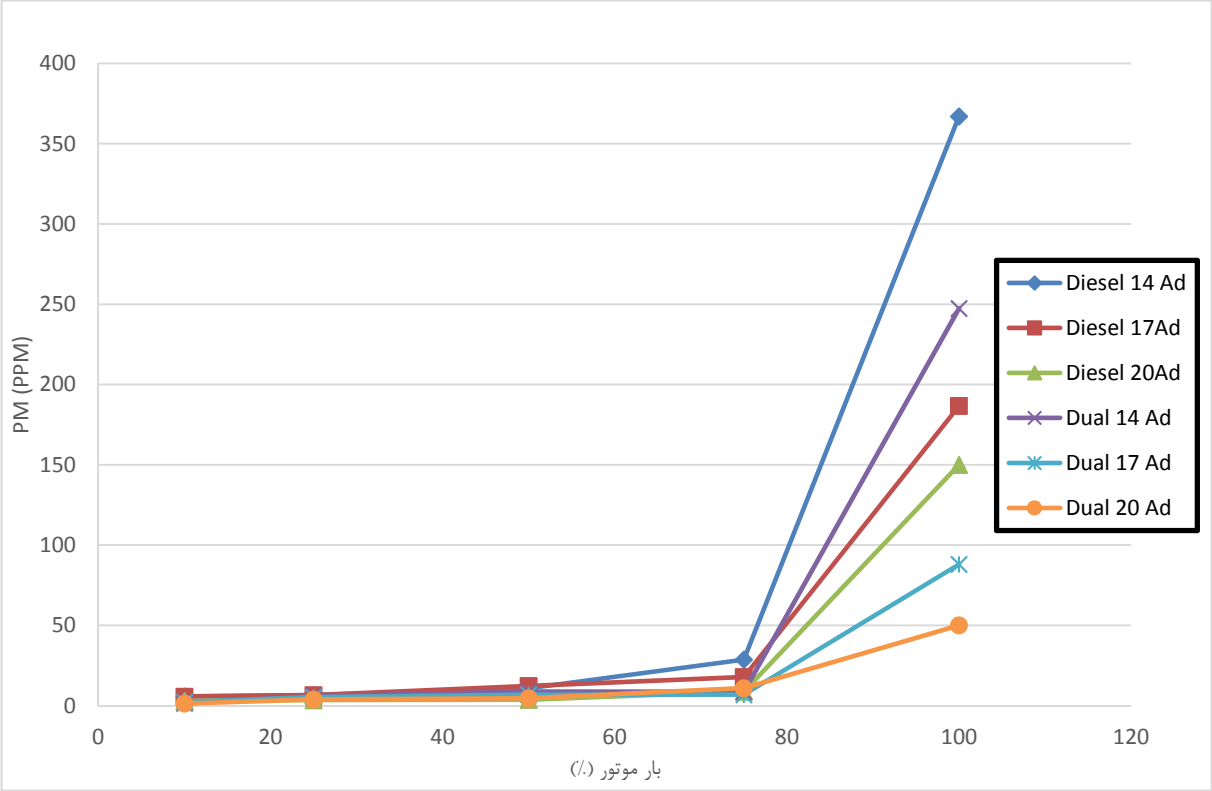
$$\lambda_{total} = \frac{\dot{m}_{air}}{(AFR_{NG})_{Stoic}.\dot{m}_{NG} + (AFR_{PF})_{Stoic}.\dot{m}_{PF}} \qquad (۱)$$

مقدار لامبدای محاسبه شده در رابطه (۱) به مقدار $\dot{m}_{NG}$ (به دلیل ثابت بودن سایر مقادیر) بستگی خواهد داشت. نمودار مربوط به میزان PM نشان می دهد که با افزایش زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن، مقدار این آلاینده کاهش می یابد (شکل۷) که این امر را می توان با احتراق کامل‌تر سوخت و هیدروکربن ها توجیه کرد. همانطور که مشاهده می شود تا ۸۰٪ بار کامل مقدار دوده تولید شده درحالتهای مختلف به هم نزدیک است زیرا که در که در این حالت ها مقدار هوای موجود در محفظه احتراق به اندازه کافی زیاد بوده ( با توجه به مقدار لامبدا در شکل ۶) و هوای کافی در اختیار شعله قرار دارد تا مولکولهای بزرگ سوخت دیزل بشکنند و احتراق کامل تری را ایجاد کنند. در حالت بار کامل مقدار لامبدا به عدد ۱ نزدیک تر می شود و باتوجه به اینکه لامبدای حد دود موتور دیزلی مورد مطالعه در حدود ۱/۴ است [۱۹] لذا دوده بیشتری در موتور دیزل مشاهده می شود.




**شکل۶** – مربوط میزان لاندا در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

www.SID.ir



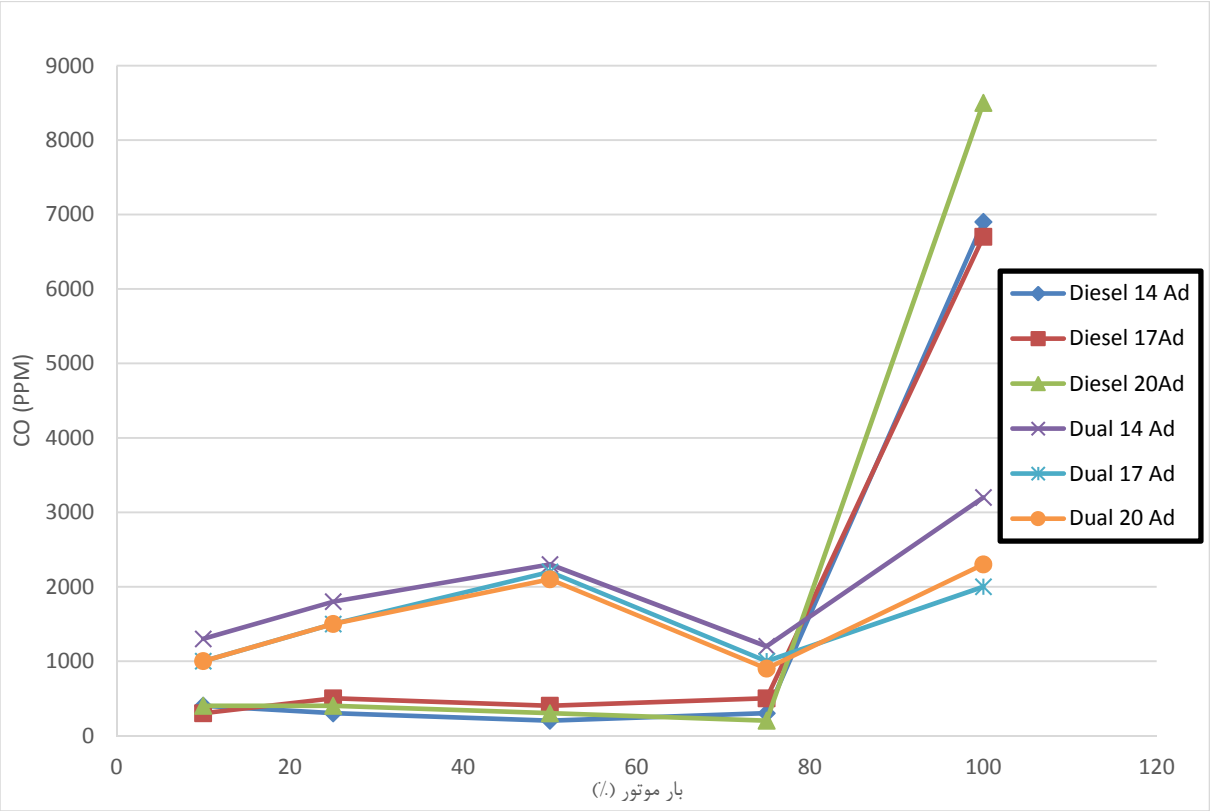

**شکل ۷** – نمودار مربوط آلاینده PM در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

در حالت دوسوخته مقدار مصرف سوخت دیزل نصف شده و جای آن را مولکول های سبکتر متان پر می کنند و باعث می شود در همه حالت ها مقدار دوده تولید شده کمتر از حالت دیزل باشد. با افزایش زاویه آوانس، سوخت دیزل فرصت بیشتری برای احتراق پیدا می کند و در نتیجه با افزایش زاویه آوانس مقدار دوده تولید شده نیز کاهش می یابد.

میزان آلاینده CO در حالت دوسوخته تا بارهای کمتر از ٪۷۵ بیشتر از حالت دیزل خالص است ولی در بارهای بیشتر از ٪۷۵ این مقدار در حالت دیزل خالص بیشتر از حالت دوسوخته مشاهده شده است (شکل ۸). این آلاینده حاصل احتراق ناقص است. از نظر شیمی مکانیزم تولید CO، هنگامیکه مولکول های سوخت دیزل می شکنند، ابتدا اتمهای کربن با یک اتم اکسیژن واکنش داده و CO تولید می کنند در ادامه هر مولکول CO که به یک اکسیژن اضافی دسترسی پیدا کرد به $CO_2$ تبدیل می شود[۲۲]. بنابراین مقدار این آلاینده رابطه مستقیم با مقدار هوای موجود در محفظه احتراق خواهد داشت و از نظر رفتاری بسیار به منحنی های مربوط به آلاینده PM شبیه خواهد بود. در بارهای کمتر از ٪۷۵ مقدار این آلاینده در حالت دوسوخته بیشتر از حالت دیزل می باشد. این موضوع را می توان با دمای بالای شعله گاز طبیعی تفسیر کرد که باعث می شود مقداری از گازهای $CO_2$ تولیدی در اثر آن تجزیه شده و به مولکول CO و اتم اکسیژن تبدیل شوند. در بار کامل به دلیل سوختن کامل‌تر گاز طبیعی (شکل ۵، آلاینده HC) مقدار بیشتری نیز CO تولید شده است. همچنین با افزایش زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن میزان CO در حالت دیزل افزایش می یابد ولی در حالت دوسوخته این مقدار روند کاهشی دارد.

Archive of SID

www.SID.ir




**شکل ۸** - نمودار مربوط آلاینده CO در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش زن

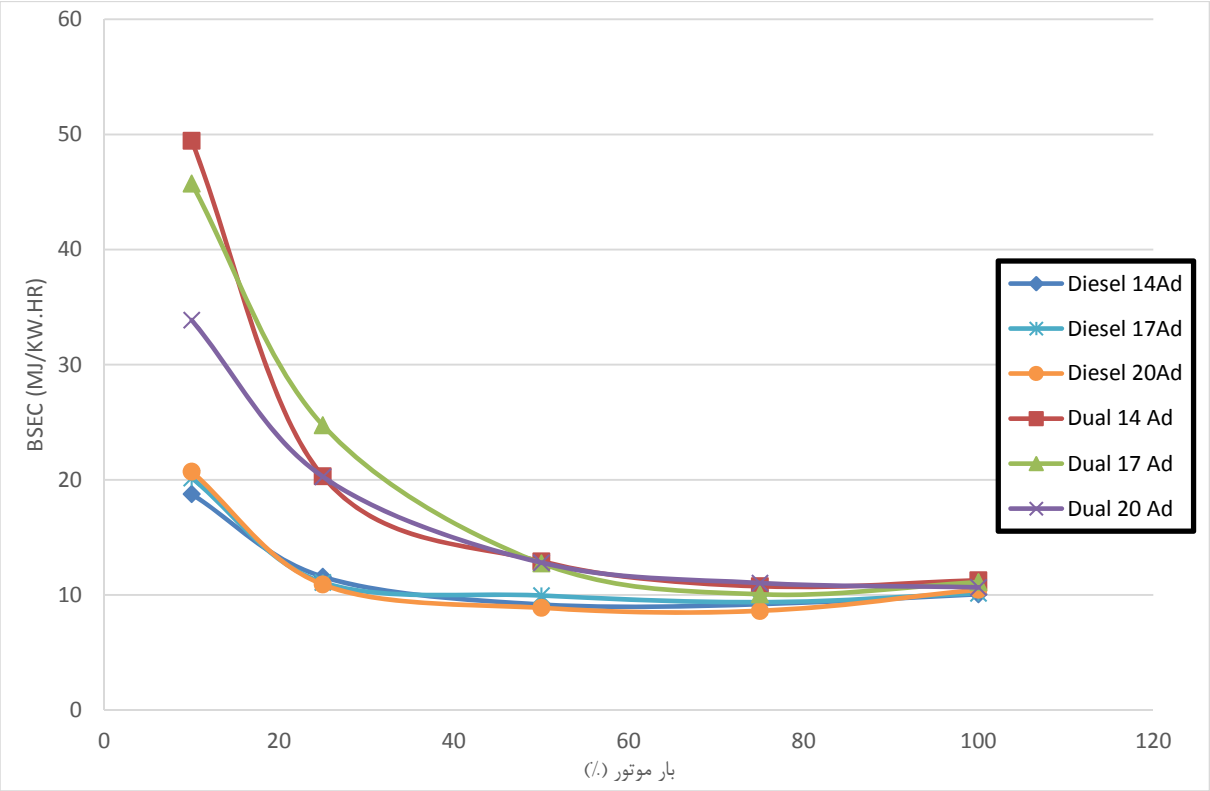
میزان مصرف انرژی مخصوص ویژه ترمزی (BSEC) انرژی حاصله از رابطه ۲ محاسبه شد[۲۱] که نشانگر میزان انرژی دریافتی از سوخت های مختلف می باشد. در موتورهای دوسوخته مصرف انرژی ویژه BSEC گزینه مناسبی برای مقایسه دو نوع سوخت با چگالی و ارزش حرارتی متفاوت است[۲۳]. نتایج این تحلیل در شکل (۹) نشان داده شده است.

$$BSEC = \frac{\dot{H}_{Pilotfuel} + \dot{H}_{NG}}{Power} = \frac{\dot{m}_{Pilotfuel} \times LHV_{Pilotfuel} + \dot{m}_{NG} \times LHV_{NG}}{Power} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\dot{H}_{Pilotfuel}$ و $\dot{H}_{NG}$ به ترتیب نرخ های انرژی حرارتی سوخت آتش زن و سوخت گازی (گاز طبیعی) و $\dot{m}_{Pilotfuel}$ و $\dot{m}_{NG}$ به ترتیب نرخ جریان جرمی سوخت آتش زن و سوخت گازی بر حسب kg/s و $Nm^3/s$ و $LHV_{Pilotfuel}$ و $LHV_{NG}$ به ترتیب ارزش حرارتی سوخت های آتش زن و سوخت گازی بر حسب $MJ/kg$ و $MJ/Nm^3$ می باشد.

Archive of SID

www.SID.ir




**شکل ۶** - مربوط میزان BSEC در بارها و زوایای آوانس مختلف پاشش سوخت آتش

## ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و تحلیل آنها نشان داد که

۱- در موتور دور ثابت با بارهای متغیر، دوسوخته کردن موتور در هر حالت باعث کاهش میزان انتشار آلاینده های $CO_2$، NOx و PM می شود.

۲- چنانچه کارکرد موتور در حالت بار کامل باشد میزن CO نیز کاهش می یابد.

۳- میزان هیدروکربن های نسوخته در موتور دوسوخته در همه حالت ها بیشتر از حالت دیزل خالص است و این امر اقتصاد سوخت را کاهش خواهد داد.

۴- BSEC نشان می دهد که در بارهای نزدیک به بار کامل میزان انرژی مصرفی ویژه مشابه موتور دیزل بوده و با دوسوخته کردن موتور می توان عملکردی شبیه به موتور دیزل انتظار داشت.

۵- در کل می توان نتیجه گرفت که دوسوخته کردن موتور دیزل راه حل مناسبی برای کاهش آلایندگی خواهد بود و با تغییر در نحوه احتراق (زاویه آوانس پاشش سوخت آتش زن، هندسه محفظه احتراق و ...) می توان عملکرد موتور را بهبود بخشید.

## سپاسگزاری

نویسندگان بدین وسیله از همکاری مسئولین امور تحقیق و توسعه شرکت موتورسازان (شرکت تراکتورسازی ایران)، آقای مهندس علی اصغر مفید، مهدی لشکرپور، صمد غفارپور و حسین جوادی که در آماده سازی، تهیه ابزار اندازه‌گیری و تست موتور کمک شایانی نمودندکمال تشکر را دارد.

Archive of
www.SID.ir

## مراجع

[1] Kanury, A.M., "*Introduction to Combustion Phenomena*", Prentice Hall, Vol. 1, pp. 25-75 (1997).

[2] Abagnale, C., "Numerical Simulation and Experimental Test of Dual Fuel Operated Diesel Eengines", Applied Thermal Engineering, Vol. 65, pp. 403-417, (2014).

[3] Abagnale, C., "Combined Numerical-experimental Study of Dual Fuel Diesel Engine", Energy Procedia, Vol. 45, pp. 721-730, (2014).

[4] Makame Mbarawa, B.E.M., and Casey, R.T., "Experiments and Modelling of Natural Gas Combustion Ignited by a Pilot Diesel Fuel Spray", International Journal of Thermal Science, Vol. 40, pp. 927-936, (2001).

[5] Mansour, C., "Gas–diesel (dual-fuel) Modeling in Diesel Engine Environment", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 40, pp. 409-424, (2001).

[6] Abd Alla, G.H., "Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance of a Dual Fuel Engine", Energy Conversion and Management, Vol. 41, pp. 559-572, (2000).

[7] Yoon, S.H., and Lee, C.S., "Experimental Investigation on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Biogas–biodiesel Dual-fuel Combustion in a CI Engine", Fuel Processing Technology, Vol. 92, pp. 992-1000, (2011).

[8] Papagiannakis, R.G., and Hountalas, D.T., "Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Dual Fuel Compression Ignition Engine Operated with Pilot Diesel Fuel and Natural Gas", Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 2971-2987, (2004).

[9] Lata, D.B., and Misra, A., "Theoretical and Experimental Investigations on the Performance of Dual Fuel Diesel Engine with Hydrogen and LPG as Secondary Fuels", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 11918-11931, (2010).

[10] Maghbouli, A., "Numerical Study of Combustion and Emission Characteristics of Dual-Fuel Engines using 3D-CFD Models Coupled with Chemical Kinetics", Fuel, Vol. 106, pp. 98-105, ( 2013).

[11] Stewart, J., "An Experimental Study of the Dual-fuel Performance of a Small Compression Ignition Diesel Engine Operating with Three Gaseous Fuels", IMechE, Vol. 221, pp. 943-957, (2007).

[12] Duc, P.M., and Wattanavichien, K., "Study on Biogas Premixed Charge Diesel Dual Fuelled Engine", Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 2286-2308, (2007).

[13] Kumar, K.S., and Raj, R.T.K., "Effect of Fuel Injection Timing and Elevated Intake Air Temperature on the Combustion and Emission Characteristics of Dual Fuel Operated Diesel Engine", Procedia Engineering, Vol. 64, pp. 1191-1198, (2013).

Archive of SID

www.SID.ir

[14] Kusaka, J., "Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of a Diesel Engine Dual- fueled with Natural Gas", JSAE Review, Vol. 21, pp. 489-496, (2000).

[15] Lee, C.S., "Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel", Fuel, Vol. 82, pp. 553-560, (2003).

[16] Selim, M.Y.E., "Sensitivity of Dual Fuel Engine Combustion and Knocking Limits to Gaseous Fuel Composition", Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 411-425, (2004).

[17] Ryu, K., "Effects of Pilot Injection Pressure on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine using Biodiesel–CNG Dual Fuel", Energy Conversion and Management, Vol. 76, pp. 506-516, (2013).

[18] Ogawa, H., "Smokeless and Low NOx Combustionina Dual Fuel Diesel Engine with Induced Natural Gas as the Main Fuel", Engine Res, Vol. 4, pp. 1-9, (2002).

[19] McAllister, S., "*Fundamentals of Combustion Processes*", Springer, London, pp. 74-110, (2011).

[20] W.Boubel, R., "*Fundamentals of Air Pollution*", 3rd , Academic Press, USA, pp. 150-230, (1994).

[21] Ryu, K., "Effects of Pilot Injection Timing on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine using Biodiesel–CNG Dual Fuel. Applied Energy", Vol. 111., pp. 721-730, (2013).

[22] Baumgarten, C., "*Mixture Formation in Internal Combustion Engines*", Springer, Germany, pp. 152-195, (2006).

[23] Hassan S, M.N.F., "Performance and Emission Characteristics of Supercharged Biomass Producer Gas-diesel Dual Fuel Engine", Journal of Applied Sciences, Vol. 11, pp. 1606-1611, (2011).

Archive of SID

## فهرست نمادهای انگلیسی

$(AFR_{NG})_{Stoic}$: نسبت های هوا به سوخت استکیومتری گاز طبیعی

$(AFR_{PF})_{Stoic}$: نسبت های هوا به سوخت استکیومتری سوخت آتش زن

BSEC : مصرف انرژی ویژه ترمزی (Brake Specific Energy Consumption)

CO : مونو اکسید کربن

$CO_2$ : دی اکسید کربن

HC : هیدروکربن (نسوخته)

$LHV_{Pilotfuel}$: ارزش حرارتی سوخت آتش زن

www.SID.ir

$LHV_{NG}$: ارزش حرارتی سوخت گاز طبیعی

NOx: اکسیدهای نیتروژن

PM: دوده قابل رویت

$\dot{H}_{Pilotfuel}$: نرخ انرژی حرارتی سوخت آتش زن

$\dot{H}_{NG}$: نرخ انرژی حرارتی سوخت گاز طبیعی

$\dot{m}_{air}$: نرخ جرمی هوا

$\dot{m}_{NG}$: نرخ جرمی گاز طبیعی

$\dot{m}_{PF}$: نرخ جرمی سوخت آتش زن

Diesel 14 Ad: حالت دیزل با ۱۴ درجه آوانس پاشش سوخت

Diesel 17 Ad: حالت دیزل با ۱۷ درجه آوانس پاشش سوخت

Diesel 20 Ad: حالت دیزل با ۲۰ درجه آوانس پاشش سوخت

Dual 14 Ad: حالت دوسوخته با ۱۴ درجه آوانس پاشش سوخت آتش زن

Dual 17 Ad: حالت دوسوخته با ۱۷ درجه آوانس پاشش سوخت آتش زن

Dual 20 Ad: حالت دوسوخته با ۲۰ درجه آوانس پاشش سوخت آتش زن

Archive of SID

www.SID.ir

**Abstract**

In this paper investigations performed on dual fueled constant speed diesel engine. At first; performance and emission of diesel engine investigated and after converting to dual fuel mode experimental tests performed on performance and emissions in different injection timing (14, 17, 20) and loads (100%, 75%, 50%, 25%, 10%). Results show that in different loads and injections timing, amount of $NO_x$and particle materials (PM) in dual fueled engine are lower than diesel engine. Amount of $CO_2$in dual fuelled mode have a little difference with diesel mode, although, it is lower than diesel engine. In loads lower than 75% load, amount of CO in diesel engine was lower than dual fuelled engine but in full load this term was inverse and have significant difference. Amount of HC in dual fuel mode was higher than diesel mode in all injections timing and loads.

Archive of SID

www.SID.ir