

موتور دوگانه سوز و بررسی اثرات کاربرد آن در کاهش آلودگی هوای تهران و مصرف انرژی

آرمین حسن زاده، جلال الدین شایگان، امیر بدخششان

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی

Email: armin@che. sharif.ac.ir

چکیده

در این بررسی تبدیل موتورهای دیزل به موتورهای دوگانه سوز (گازوئیل و گاز طبیعی) که از جمله کم هزینه ترین راهکار برای حل مشکلات موتورهای دیزل می باشد و تکنولوژی آن، مورد بررسی قرار گرفته است. همچون این روش با دیگر روش های موجود از جمله گاز سوز کردن کامل مقایسه، و مزایا و معایب آن از نقطه نظر زیست محیطی و اقتصادی سنجیده شده است. با بررسی آزمایشات انجام شده در شرایط کاری شهر تهران، با تبدیل موتور دیزل به موتور دوگانه سوز مشکلات زیست محیطی موتورهای دیزل با حذف دوده و کاهش CO و NOx در حد پایین تر از استانداردهای جهانی، به میزان قابل قبولی کاهش می یابد. همچنین مصرف سوخت با ارزش گازوئیل برای مسافت طی شده، در حد ۹۰٪ کاهش نشان داده و گاز طبیعی جایگزین، قادر به تأمین قدرت و توان موتور در حد موتور دیزل و حتی بیشتر می باشد.

مقدمه

گاز طبیعی شامل گاز متان CH_4 با درصد بالای ۸۰ درصد، مقدار کمی هیدروکربن های سنگین تر از قبیل اتان و پروپان، دی اکسیدکربن و آب می باشد. هیدروکربن های سنگین به دلیل دارا بودن باندهای بلندتر کربنی، انرژی حرارتی بیشتری برای واحد حجم گاز نسبت به گاز متان تولید می کنند. گازی که ترکیب آن بنحوی باشد که گرمائی بیشتر از 1100 BTU به ازای واحد حجم 1 SCF تولید کند به نام گاز داغ شناخته می شود. گازهای داغ سوخت بهتری برای استفاده در موتور محسوب می شوند.

میزان مرغوبیت یک سوخت با عدد اکتان یا ستان آن سنجیده می شود که متأسفانه مشخصاتی که باعث مرغوبیت یک سوخت خوب در موتورهای جرقه ای می شوند معمولاً سوخت را برای موتورهای تراکمی نامطلوب می نماید. سوختهای گازی برای اشتعال نیاز به نسبت تراکم بسیار بالا و یا توزیع انرژی حرارتی در سیلندر از یک منبع خارجی مانند شمع دارند (15).

راه حلی که در سیستم سوخت دوگانه ارائه می گردد، استفاده از مقدار کمی گازوئیل (Pilot) بعنوان شروع کننده احتراق و مشتعل کردن مخلوط گاز طبیعی و هوا در نسبت تراکم پایین می باشد. در نزدیکی حد پایین پیستون، گاز طبیعی بعد از مخلوط شدن کامل در مخلوط کن هوا-گاز از طریق شیر سلونوئیدی سرعت بالا² وارد سیلندر شده و در حالیکه پیستون بالا می رود، فشرده گردیده

و در نزدیکی حد بالائی پیستون ، سوخت گازوئیل تزریق می گردد. سوخت گازوئیل با توجه به پایین بودن دمای احتراقی آن ، محترق گردیده و مخلوط گاز و هوا را با خود می سوزاند.

در این تکنولوژی نسبت تراکم بالای موجود در موتورهای دیزل حفظ شده که این نسبت بالا باعث حفظ راندمان موتور در حالت دوگانه سوز می باشد.

موتور دیزل با سوخت دوگانه

موتور دیزل را می توان به نحوی تجهیز کرد که بطور همزمان از سوخت گازوئیل و گاز طبیعی در وضعیت سوخت دوگانه استفاده کند. نکته قابل توجه برابری راندمان سوختی این موتور با موتور دیزل معمولی می باشد. به عبارت دیگر این موتورها علاوه بر مزایای مختص به خود تضمینی برای حفظ مزایای موتورهای دیزل نیز می باشند. به کارگیری موتور با سوخت دوگانه به دلیل جایگزینی بخش عمده گازوئیل توسط گاز طبیعی (بالغ بر ۹۰ درصد)، مصرف سوخت را کاهش می دهد.

نسبت پایین کربن به هیدروژن در گاز طبیعی نسبت به گازوئیل امکان کاهش حدود ۱۵٪ دی اکسید کربن خروجی نسبت به سیستم دیزل معمولی را فراهم می کند که نتیجه آن کاهش گازهای گلخانه ای از قبیل CO_2 می باشد

1- Standard Cubic Feed

2- High speed Valve(HSV)

(نمودار ۱).

می شود که بدون ایجاد کوچکترین اختلاف در شرایط عملیاتی موتور از نظر محدوده های فشاری - دمایی ، سیستم با حداکثر نسبت ممکن در مصرف گاز طبیعی به گازوئیل کار کند.

عنصر کلیدی این مجموعه شیر سلونوئیدی سرعت بالا بوده که گاز طبیعی را در محل دریچه هوای ورودی به سیلندر تزریق می کند. سایر اجزاء سیستم شامل حساسه های استاندارد و مخصوصی می باشد که اطلاعات کارکرد موتور را در هر لحظه به ریز پردازنده منتقل می کند.

شرح جزئیات سیستم موتور سوخت دوگانه همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می شود موتور سوخت دوگانه (۱۰) همان موتور دیزل (۱۲) بوده ، که توسط سوخت دیزل از یک پمپ تزریق استاندارد سوخت دیزل (۱۴) تغذیه می شود. گاز طبیعی (NG) از منبع گاز طبیعی^۴ (۲۵) با فشار حدود ۲۰ psi از شیر سلونوئیدی قطع کن گاز طبیعی^۵ (۲۶)، رگلاتور گاز (۲۸) ، شیر اندازه گیر گاز^۶ (۳۰) و مخلوط کن هوا-

پاکیزگی بیشتر در احتراق سوخت دوگانه سبب آلودگی کمتر روغن روان کننده، بنابراین فواصل طولانی تر تعویض روغن و تعمیرات اساسی نیز می گردد (3). همچنین موتور سوخت دوگانه ، دوده و اکسیدهای نیتروژن را که در موتورهای دیزل به میزان قابل توجهی تولید می گردند به حداقل می رساند.

شرح تکنولوژی و سیستم کنترل الکترونیکی موتورهای سوخت دوگانه از یک سیستم تزریق چند نقطه ای^۱ بهره می برند. سیستم این نوع موتور در یک بسته قابل اعتماد مهندسی (Kit) خلاصه شده است که قلب مجموعه یک ریز پردازنده به نام ECU^۲ نام دارد که به کمک داده های آزمایشی موتور، پمپ انژکتور و انژکتور طراحی شده است.

سیستم ECU شامل سیستم کنترل ADEM^۳ بوده که ارتباط بین این دو بخش توسط نرم افزارهای مخصوص امکان پذیر می باشد. با همکاری و هماهنگی این دو بخش و ارتباط الکترونیکی بین آنها زمان دقیق و مقدار سوخت برای تزریق گازوئیل به عنوان سوخت Pilot در سیلندر محاسبه و تنظیم می گردد. ECU با توجه به فشار داخل منیفلد ، دمای هوای ورودی، فشار گاز، دمای گاز و ویژگی سوخت ، با فرستادن سیگنال های الکترونیکی به سوپاپ تزریق گاز طبیعی ، بازوبسته شدن و به عبارت دیگر زمان تزریق گاز را تنظیم کرده تا به این وسیله بهترین بازده و کمترین آلودگی حاصل گردد. این سیستم الکترونیکی طوری تعریف

- 1- Multipoint Diesel Dual Fuel(MDDF)
- 2- Electronical Control Unit
- 3- Advanced Diesel Engine Management
- 4- Natural Gas(NG) Supply
- 5- NG Shut-off Valve
- 6- NG Metering Valve

با دریافت سیگنال هایی از کنترل کننده رابط که نشان دهنده سرعت مطلوب (مثلاً ۱۸۰۰ RPM) بوده و با باز و بسته کردن شیر کنترل، سعی در ثابت نگه داشتن دور موتور خواهد داشت.

ارتباط مناسب بین اپراتور و موتور توسط صفحه نمایشگر موتور (۴۴) ایجاد می شود که دارای شاخص های معمول موتور دیزل از قبیل سرعت سنج، اندازه گیر سوخت، دما و فشار روغن و غیره می باشد. ECU، گاورنر گاز طبیعی و کنترل کننده رابط در یک محفظه قرار گرفته و صفحه کنترل بر روی آن نصب می گردد.

بحث و نتیجه گیری

با در نظر گرفتن طول چرخه کاری برای یک اتوبوس در خدمات شهری در شهر تهران، متوسط بار عملیات به شدت به توقف و رانندگی آهسته متمایل بوده و زیر سطح ۵۰ درصد بارگذاری می باشد. در این حالت موتور گازسوز، ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به موتور دیزل یادوگانه، سوخت بیشتری مصرف می نماید، که با یک محاسبه سرانگشتی می توان به این نتیجه رسید که صرفه جویی کلی در قیمت سوخت برای یک موتور گازسوز، توسط راندمان پایین تر آن، خنثی می شود و بدین

گاز^۱ (۳۲) عبور کرده تا به سیلندرها وارد می شود، به عبارت دیگر گاز طبیعی به مخلوط کن هوا - گاز، بین ورودی کمپرسور توربوشارژر و فیلتر هوا، وارد می شود (8).

واحد کنترل الکترونیکی (۳۴)، ECU، پمپ تزریق سوخت دیزل (۱۴) را کنترل می کند. مقدار سوخت دیزل لازم بعنوان Pilot برای وضعیت سوخت دوگانه بصورت منحنی های گشتاور اسمی موتور در حافظه ECU برنامه ریزی می گردد.

یک گاورنر گاز طبیعی محرک دورانی^۲ (۳۸) را کنترل می کند که به این وسیله شیر اندازه گیر کنترل می شود. گاورنر (۳۶) سیگنال سرعت موتور را از پیکاپ سرعت موتور^۳ (۳۷) دریافت می کند. این نوع گاورنر شامل پتانسیومتر تنظیم سرعت میانی^۴ بوده که حد پایین سرعت را برای وضعیت سوخت دوگانه تعیین می کند که بسته به نوع موتور حداقل دور موتور را در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۳۰۰ دور در دقیقه نگه می دارد که این عمل با ولتاژ ارسالی از کنترل کننده رابط^۵ (۴۰) کنترل می شود.

کنترل کننده رابط بر عملکرد ECU و کنترل کننده گاز طبیعی نظارت کرده و امکان کنترل دستی از طریق برد کنترلی (۴۲) را ایجاد می کند. همچنین، کنترل کننده رابط بطور خودکار بین وضعیت سوخت دیزل و یا سوخت دوگانه با توجه به شرایط کاری و نیز دستورات رسیده از طرف اپراتور، بهترین حالت را برمی گزیند. گاورنر که خود یک کنترل کننده سرعت می باشد، سعی در ثابت نگه داشتن سرعت موتور خواهد داشت. این گاورنر

1- NQ/Air Mixer 2- Rotary Actuator

3- Engines Speed Pick-up

4- Internal Speed Adjust Potentiometer

5- Link Controler

ترتیب‌انگیزه‌ضعیفی‌از‌نظر‌اقتصادی‌برای‌تبدیل
موتور دیزل به موتور گازسوز باقی می‌ماند.

از سوی دیگر با توجه به نتایج قبلی، با
تبدیل موتور دیزل به موتور سوخت دوگانه،
دود مرئی حذف شده، اقتصاد سوخت در حد
مطلوبی حفظ می‌شود و طول مدت بازگشت
هزینه‌های تبدیل، بدون احتساب رایانه و
کمک‌های اهدایی، قابل قبول می‌گردد. که در
جدول ۲، ۳ و ۴ مشخص می‌باشد (اطلاعات این
جدول براساس آخرین اطلاعات موجود در
شهرداری و اتوبوسرانی شهر تهران بدست
آمده است (15, 16)).

همچنین کاهش مصرف سوخت گازوئیل و
جایگزینی آن با گاز طبیعی علاوه بر کاهش
هزینه‌های جاری سوخت، باعث جلوگیری از
واردات گازوئیل و خروج ارز می‌گردد و
گاز طبیعی فراوان موجود در مخازن نفتی
کشور در راه بهینه‌ای مصرف خواهد شد.

در ذخیره‌سازی گاز طبیعی بر روی یک
وسیله نقلیه، استفاده از مخازن سنگین فولادی،
ظرفیت حمل و پایداری وسیله نقلیه را کاهش
می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که از
مخازنی از جنس الیاف مصنوعی (کامپوزیت)
استفاده شود. هر چند که این روش هزینه
بالتری را شامل می‌گردد ولی در دراز مدت نه
تنها این هزینه اضافی جبران می‌شود بلکه بعد
از آن سوددهی نیز خواهد داشت. جدول ۱
نمونه‌ای از آخرین قیمت‌های این نوع مخازن در
ایران و وزن هر یک را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه فشار مخزن نگهداری
گاز طبیعی فشرده^۱ حدود ۲۰۰ bar می‌باشد

حجم اشغال شده توسط گاز بسیار کم خواهد
بود. البته وزن مخصوص گاز فشرده در حد ۲۰
درصد گازوئیل می‌باشد و این به آن مفهوم
بوده که حجم ذخیره‌ای در حدود ۵ برابر
گازوئیل برای انجام کاریکسان احتیاج می‌باشد.
ولی این مشکل در صورتی که فقط از گاز به
عنوان سوخت جایگزین استفاده شود، رخ
خواهد داد. در سیستم موتور سوخت دوگانه به
دلیل استفاده از تکنولوژی "سیستم کنترل
الکترونیکی" میزان مصرف گاز و حجم مورد
نیاز برای ذخیره تفاوت چندانی با موتور دیزل
نخواهد داشت (جدول ۱).

از دیدگاه زیست‌محیطی، با تبدیل موتور دیزل
به موتور دوگانه سوز مشکلات زیست‌محیطی
موتورهای دیزل از جمله تولید آلاینده‌های هوا
به میزان قابل قبولی کاهش می‌یابد. با استفاده
از سیستم کنترل رایانه‌ای در موتورهای
دوگانه سوز و تنظیم نسبت دو سوخت در
بارگذاری‌های مختلف ایجاد CO، HC و
مخصوصاً PM، NOx به شدت کاهش یافته و
مشکلات آلودگی هوای شهرهای بزرگ کشور
مخصوصاً تهران تا حد زیادی کم می‌شود که در
نتایج به دست آمده در نمودار ۲ کاملاً مشهود
است.

همانطور که در نمودار ۲ مشخص می‌باشد،
تولید هیدروکربن‌های نسوخته در این
تکنولوژی بالاتر از سیستم گازسوز کامل
می‌باشد که می‌توان از جمله معایب این روش

1- Compressed Natural Gas (CNG)

دانست. این مشکل همانطور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، به کمک تجهیزات جانبی از جمله کانورترهای کاتالیستی مخصوص این نوع موتورها (1) قابل کاهش می باشد.

نمودار ۴ نشان دهنده مقایسه عملکرد هر یک از موتورهای آزمایشی در بارگزاریهای مختلف می باشد. همانطور که ملاحظه می شود در بارگزاریهای پایین موتور دیزل دوگانه سوز شده مصرف سوخت معادل بسیار کمتری نسبت به موتور تمام گازسوز شده دارد و دلیل آن حفظ نسبت تراکم بالا در موتور دوگانه سوز می باشد. همچنین در بارگزاریهای بالاتر از ۷۰ درصد کارکرد این موتور از موتور دیزل اولیه نیز بهتر می نماید که دلیل آن استفاده از سیستم کنترل الکترونیکی هوشمند در تنظیم مصرف هر یک از دو سوخت می باشد.

با توجه به نتایج گرفته شده، بطور کلی می توان مزایای موتور دیزلی دوگانه سوز را در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- اقتصادی بودن تبدیل موتور از نظر هزینه های ثابت.

۲- کاهش هزینه های جاری سوخت با توجه به مصرف گاز طبیعی که در مخازن گازی کشور به فراوانی یافت می شود.

۳- کاهش شدید آلاینده های خروجی موتور (نسبت به موتورهای دیزل).

۴- ثابت ماندن توان و قدرت موتور همانند موتور دیزل.

۵- قابلیت کار موتور تنها با سوخت گازوئیل

در مواقع ضروری و ناگهانی.

۶- کارکرد عالی و قابل اطمینان در طی زمان طولانی.

۷- انتقال حرارت و راندمان حرارتی همانند موتور دیزل (راندمان حرارتی بالا).

۸- سازگاری با سیستم های ترمز فشاری.

۹- سازگاری با تسهیلات رایانه ای برای کنترل و تنظیم موتور.

۱۰- سازگاری با تسهیلات سیستم الکترونیکی موتور.

۱۱- اشغال حجم بسیار کمتری برای ذخیره سوخت گاز طبیعی نسبت به دیگر انواع سیستم ها.

۱۲- بالا رفتن عمر مفید موتور نسبت به موتور دیزل.

۱۳- کاهش دفعات تعویض روغن موتور به دلیل استفاده از سوخت تمیزتر گاز طبیعی (7).

۱۴- احتیاج به تعمیرات کمتر موتور و کاهش خوردگی در موتور (6) (چرا که سوخت

گازوئیل موجود در کشور دارای درصد بسیار بالایی از گوگرد (حدود ۱٪) بوده که نسبت به

حالت استاندارد آن (حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد)، مقدار قابل توجهی است و این خود ایجاد

خوردگی شدید در اجزاء موتور بخصوص سوزن تزریق و پمپ تزریق گازوئیل می نماید

که با جایگزینی سیستم سوخت دوگانه و کاهش زیاد در مصرف گازوئیل در موتور این

مشکلات تا حد زیادی کاهش می یابد.)

- 1- Sallami, N., Badakhshan, A., Kazemeini, M., Checkel, M.D. and Zheng, M., Proceeding of the Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Feb. 1998
- 2- Badakhshan, A., "Air Pollution and its Impact on Energy Development", Vol 2, 1st Edition, 1998.
- 3- Bakakhshan, A. and Mirosh, E., The Second North American Conference and Exhibition, 19-22 November, Orlando, Florida, 1996.
- 4- Badakhshan, A. and Mirosh, E., Processing of the 15th World petroleum Congress, Published by John Willey & Sons, 1997.
- 5- Lilly, L.C.R., "Diesel Engine Reference Book", 1st Edition, Butterworth and Co, 1984.
- 6- Khain, Magdi K., "Future Diesel Engines", SAE Technical Paper Series 972687, 1997.
- 7- "The ECI Dual Fuel Sourcebook", Energy Conversion Co. Ltd, 1998.
- 8- Hedrick, J.C. and Bourn, G., United States patent No. 5890459, April 6, 1999.
- 9- Graf, B.R., United States Patent No. 5450832, September 19, 1995.
- 10- Arsenault, J., Goetz, W. and Larocque, J., United States Patent No.5224457, July 6, 1993.
- 11- Caterpillar Co., Dual-Fuel Engines, <http://www.dualfuelengines.com/engines.html>.
- 12- J.&H. Diesel Service, Inc., <http://www.jhdiesel.com/index.html>.
- 13- South Coast Air Quality, <http://www.aqmd.gov/950807.html>, August 11, 1995.
- ۱۴- امیر بدخشان، ناصر سلامی، چهارمین کنگره مهندسی شیمی، ۱۸-۲۰ اسفند، ۱۳۷۷، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۱۵- آمار شهرداری تهران در سال ۱۳۷۶.
- ۱۶- آمار موجود در شرکت واحد اتوبوسرانی شهر تهران، ۱۳۷۷.

جدول ۱- مقایسه مخزن ذخیره در موتورهای آزمایشی

موتور دیزل با سوخت دوگانه	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	واحد		
۸۴	۲۵۰	Le	ظرفیت	
۱۶۰	۴۱۰	کیلوگرم	وزن	فولادی با جدار کامپوزیت
۲۵۰۰	۶۰۰۰	US\$	قیمت	

جدول ۲- مقایسه ایستگاه های گاز طبیعی فشرده برای ۴۰۰۰ دستگاه اتوبوس

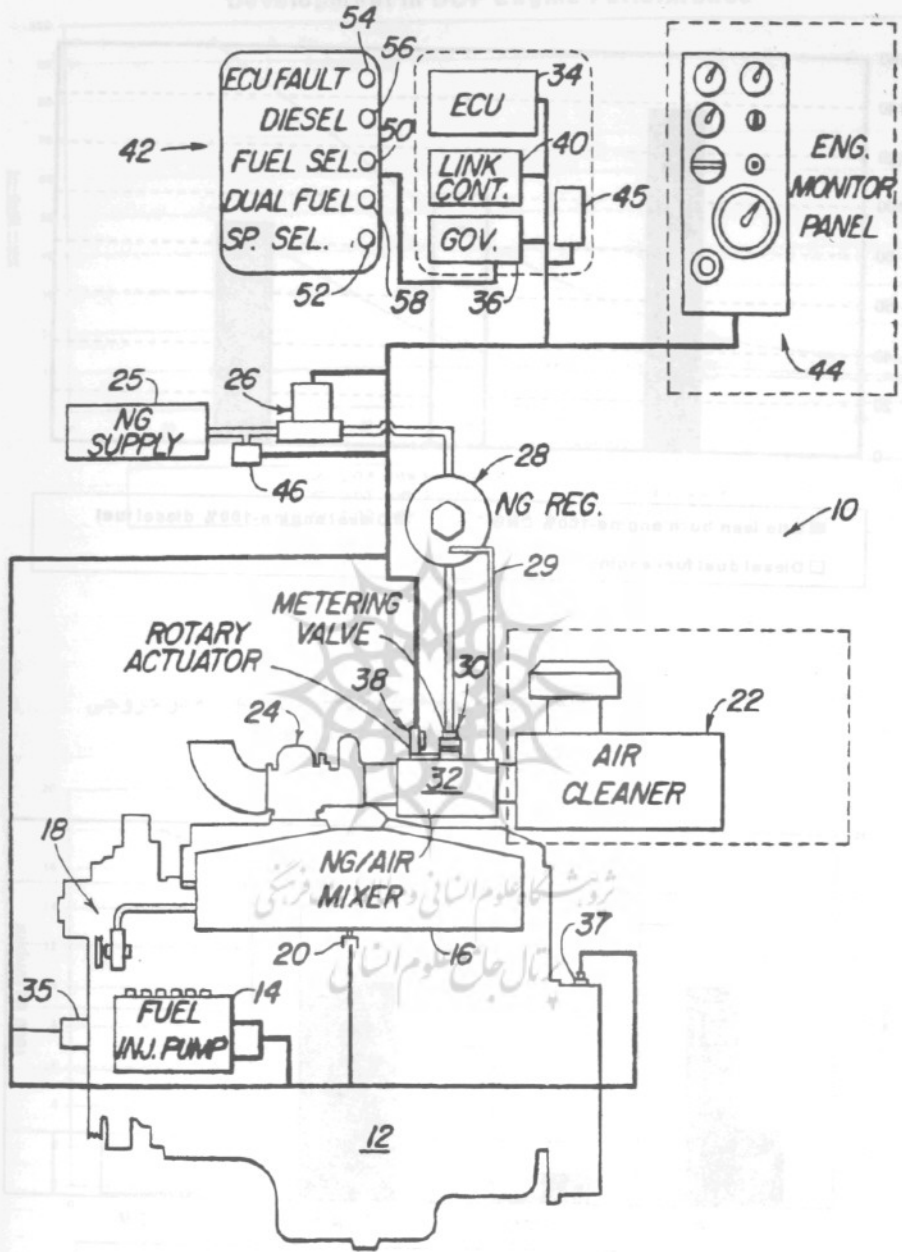
موتور دیزل با سوخت دوگانه	موتور رقیق سوز با سوخت دوگانه	واحد		
۱۰۰۰ (۲ ایستگاه)	۵۰۰ (۸ ایستگاه)	وسيله نقلیه	ظرفیت هر ایستگاه (تعداد ایستگاه)	
۱۰۰۰	۲۰۰۰	US\$	قیمت به ازای هر وسیله نقلیه	

جدول ۳- مقایسه هزینه های سوخت برای هر وسیله نقلیه

موتور دیزل معمولی	موتور دیزل با سوخت دوگانه	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	واحد	
۲۹۰۰۰	۳۰۰۰ (CNG) و ۱۰۰۰ (Diesel)	۶۶۰۰۰	Le	سوخت مصرفی سالانه
۵۱۰۰	۳۱۰۰	۴۰۰۰	US\$	قیمت سوخت

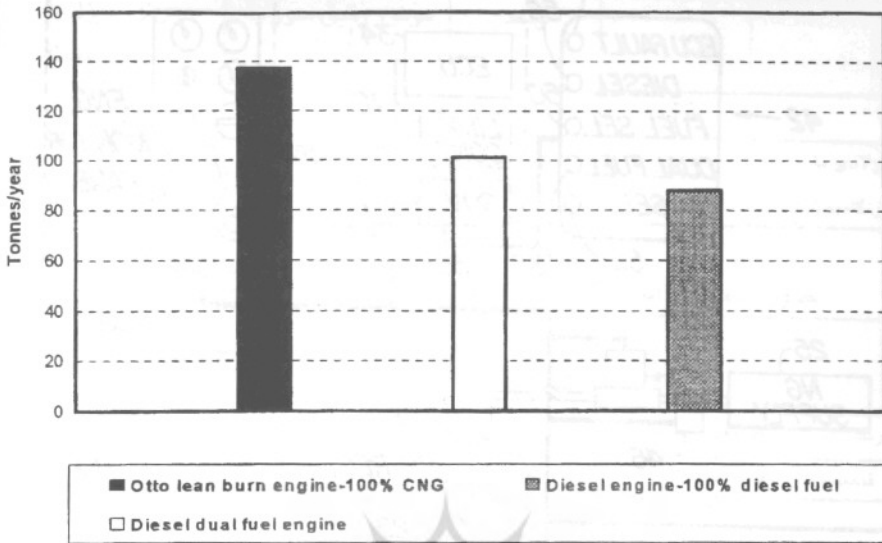
جدول ۴- مقایسه کامل بین دو موتور

موتور دیزل با سوخت دوگانه	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	واحد		
۴۰	۶۰	Le/100Km	سوخت مصرفی	
۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	Km	مسافت طی شده در یک سال	
۰/۱۳	۰/۰۶	US\$/L	هزینه جاری سوخت	
۶۰۰۰	۱۵۰۰۰	US\$	هزینه تبدیل موتور	
۷۰	۱۰۰	%	جایگزینی گازوئیل	
۲۸۰۰۰	۲۰۰۰۰ & ۴۰۰۰۰	Le & L	جایگزینی در یک سال	
۲۵۰۰	۲۴۰۰	US\$	صرفه جوئی سالانه	
۲/۴	۶/۲	سال	مدت بازگشت سرمایه	

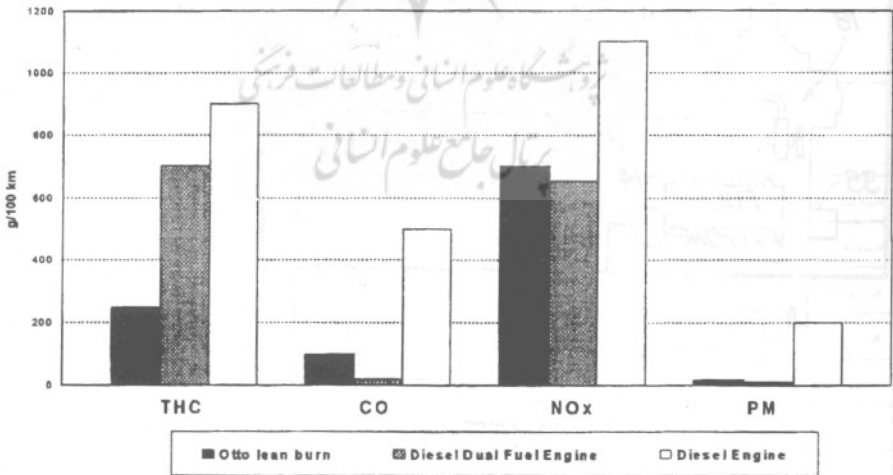


شکل ۱- شمای کلی از سیستم موتور سوخت دوگانه

CO2 Emission

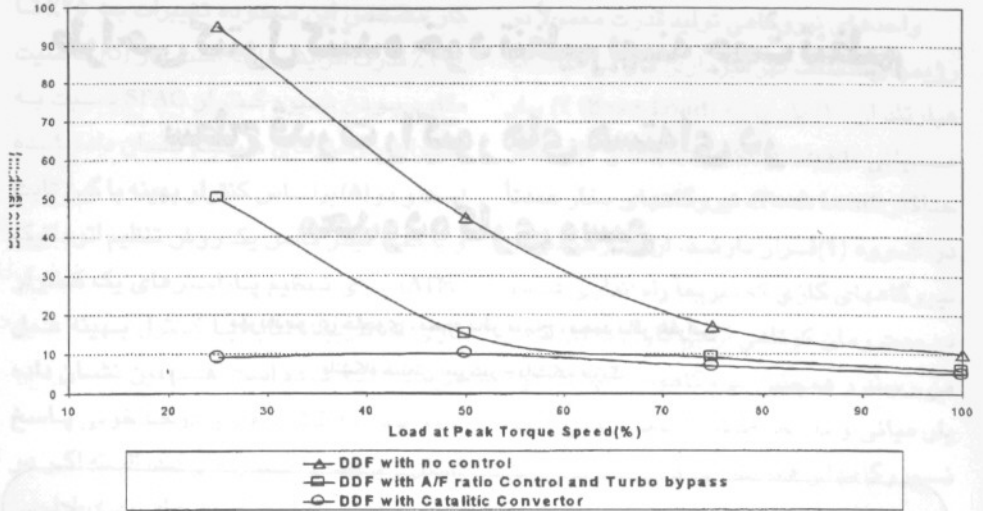


نمودار ۱- میزان خروجی CO2

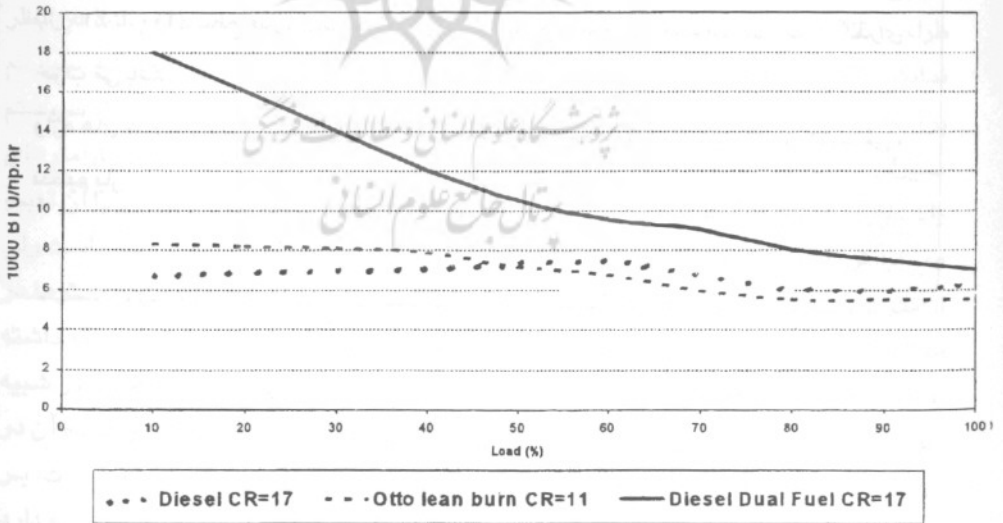


نمودار ۲- مقایسه نتایج آلاینده های خروجی از هر یک از موتورها

Development in DDF Engine Performance



نمودار ۳- تأثیر تجهیزات جانبی بر روی میزان هیدروکربن های نسوخته در خروجی
Specific Energy Consumption vs. Load



نمودار ۴- مقایسه مصرف انرژی سوختی موتورهای تبدیلی با موتور دیزل در بارهای مختلف