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

آرمین حسن زاده ، جلال الدین شایگان، امیر بدخشان

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 گازطبیعی) که از جمله کم هزینه ترین راهکار برای حل مشکلات موتورهای دیزل می‌باشد و تکنولوژی آن ، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنن این روش با دیگر روش های موجود از جمله گاز سوزکردن 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 گازطبیعی جایگزین ، قادر به تأمین قدرت و توان موتور در حد موتور دیزل و حتی بیشتر می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

مقدمه

گازطبیعی 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 BTU ۱۱۰۰ به ازای واحد حجم SCF[1] تولید کند به نام گاز داغ شناخته می شود. گازهای داغ سوخت بهتری برای استفاده در موتور محسوب می شوند.

میزان مرغوبیت یک سوخت باعدد 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 مشتعل‌کردن مخلوط گاز طبیعی و هوا در نسبت تراکم پایین می باشد. در نزدیکی حد پایین پیستون، گاز طبیعی بعد از مخلوط شدن کامل درمخلوط کن هوا- گاز از طریق شیر سلونوئیدی سرعت بالا[2] وارد سیلندر شده و در حالیکه پیستون بالا می‌رود، 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 می‌سوزاند.

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 گازطبیعی 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)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

(نمودار ۱).

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 [1] 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[2] نام دارد که به کمک داده های آزمایشی موتور، پمپ انژکتور و انژکتور طراحی شده است.

سیستم ECU شامل سیستم کنترل ADEM[3] 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 گازطبیعی ، 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 می شود که بدون ایجاد کوچکترین اختلاف در شرایط عملیاتی موتور از نظر محدوده های فشاری - دمایی ، سیستم با حداکثر نسبت ممکن در مصرف گازطبیعی به گازوئیل کار کند.

عنصر کلیدی این مجموعه شیر سلونوئیدی سرعت بالا بوده که گازطبیعی را در محل دریچه هوای ورودی به سیلندر تزریق می‌کند. 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 می‌شود. گازطبیعی (NG) از منبع گازطبیعی [4] (۲۵) با فشار حدود ۲۰psi از شیر سلونوئیدی قطع کن گازطبیعی [5] (۲۶)، رگلاتور گاز (۲۸) ، شیر اندازه گیر گاز [6] (۳۰) و مخلوط کن هوا-

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

گاز [1] (۳۲) عبور کرده تا به سیلندرها وارد می‌شود، به عبارت دیگر گازطبیعی 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 برنامه‌ریزی می گردد.

یک گاورنر گازطبیعی محرک دورانی [2](۳۸) را کنترل می کند که به این وسیله شیر اندازه‌گیر کنترل می شود. گاورنر (۳۶) سیگنال سرعت موتور را از پیکاپ سرعت موتور [3] (۳۷) دریافت می کند. این نوع گاورنر شامل پتانسیومتر تنظیم سرعت میانی [4] 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 [5] (۴۰) کنترل می شود.

کنترل کننده رابط بر عملکرد ECU و کنترل کننده گازطبیعی نظارت کرده و امکان کنترل دستی از طریق برد کنترلی (۴۲) را ایجاد می‌کند. 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 با دریافت سیگنال هایی از کنترل کننده رابط که نشان دهنده سرعت مطلوب (مثلاً ۱۸۰۰RPM) 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 گازطبیعی 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، سوخت‌بیشتری مصرف می‌نماید، که با یک محاسبه سرانگشتی می توان به این نتیجه رسید که صرفه جویی کلی در قیمت سوخت برای یک موتور گازسوز، توسط راندمان پایین‌تر آن، خنثی می‌شود وبدین

1- NG/Air Mixer
2- Rotary Actuator
3- Engines Speed Pick-up
4- Internal Speed Adjust Potentiometer
5- Link Controler

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

ترتیب انگیزه ضعیفی از نظر اقتصادی برای تبدیل 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 می شود و طول مدت بازگشت هزینه های تبدیل ، بدون احتساب رایانه و کمکهای اهدایی، قابل قبول می گردد. که در جداول ۲، ۳ و ۴ مشخص می باشد (اطلاعات این جداول براساس آخرین اطلاعات موجود در شهرداری واتوبوسرانی شهر تهران بدست آمده است (15,16)).

همچنین کاهش مصرف سوخت گازوئیل و جایگزینی آن با گازطبیعی علاوه بر کاهش هزینه های جاری سوخت، باعث جلوگیری از واردات گازوئیل و خروج ارز می گردد و گازطبیعی فراوان موجود در مخازن نفتی کشور در راه بهینه ای مصرف خواهد شد.

در ذخیره سازی گازطبیعی بر روی یک وسیله نقلیه، استفاده از مخازن سنگین فولادی، ظرفیت حمل و پایداری وسیله نقلیه را کاهش می دهد. بنابراین پیشنهاد می شود که از مخازنی از جنس الیاف مصنوعی (کامپوزیت) استفاده شود. هر چند که این روش هزینه بالاتری را شامل می گردد ولی در دراز مدت نه تنها این هزینه اضافی جبران می شود بلکه بعد از آن سوددهی نیز خواهد داشت. جدول ۱ نمونه ای از آخرین قیمتهای این نوع مخازن در ایران و وزن هر یک را نشان می دهد.

با توجه به اینکه فشار مخزن نگهداری گازطبیعی فشرده [1] حدود ۲۰۰bar می باشد حجم اشغال شده توسط گاز بسیار کم خواهد بود. البته وزن مخصوص گازفشرده در حد ۲۰ درصد گازوئیل می باشد و این به آن مفهوم بوده که حجم ذخیره ای 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).

ازدیدگاه زیست‌محیطی، باتبدیل موتوردیزل به موتور دوگانه سوز مشکلات زیست محیطی موتورهای دیزل از جمله تولید آلاینده های هوا به میزان قابل قبولی کاهش می یابد. با استفاده از سیستم کنترل رایانه ای در موتورهای دوگانه سوز و تنظیم نسبت دو سوخت در بارگذاری های مختلف ایجاد HC , CO و مخصوصاً Nox , PM به شدت کاهش یافته و مشکلات آلودگی هوای شهرهای بزرگ کشور مخصوصاً تهران تا حد زیای کم می شود که در نتایج به دست آمده در نمودار ۲ کاملاً مشهود است.

همانطورکه در نمودار ۲ مشخص می باشد، تولید هیدروکربن های نسوخته در این تکنولوژی بالاتراز سیستم گازسوز کامل می‌باشد که می توان از جمله معایب این روش

1- Compressed Natural Gas(CNG)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

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 بسیارکمتری 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 می‌توان مزایای موتور دیزلی دوگانه سوز را در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- اقتصادی بودن تبدیل موتور از نظر هزینه‌های ثابت.

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

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

۴- ثابت ماندن توان و قدرت موتورهمانند 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 گازطبیعی نسبت به دیگر انواع سیستم‌ها.

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

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

۱۴- احتیاج به تعمیرات کمتر موتور و کاهش خوردگی در موتور(6) (چرا که سوخت گازوئیل موجود در کشور دارای درصد بسیار بالائی 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.)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

منابع

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 Exihibition, 19-22 November, Orlando, Florida, 1996.

4- Badakhshan, A. and Mirosh, E., Processing of the 15th World petrolium 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,Agust 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

جدول ۱ـ مقایسه مخزن ذخیره در موتورهای آزمایشی

		واحد	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	موتور دیزل با سوخت دوگانه
	ظرفیت	Le	۲۵۰	۸۳
فولادی با جدار کامپوزیت	وزن	کیلوگرم	۴۱۰	۱۶۰
	قیمت	US$	۶۰۰۰	۲۵۰۰

جدول ۲ـ مقایسه ایستگاه های گازطبیعی فشرده برای ۴۰۰۰ دستگاه اتوبوس

	واحد	موتور رقیق سوز با سوخت دوگانه	موتور دیزل با
ظرفیت هر ایستگاه (تعداد ایستگاه)	وسیله نقلیه	۵۰۰ (۸ ایستگاه)	۱۰۰۰ (۴ ایستگاه)
قیمت به ازای هر وسیله نقلیه	US$	۲۰۰۰	۱۰۰۰

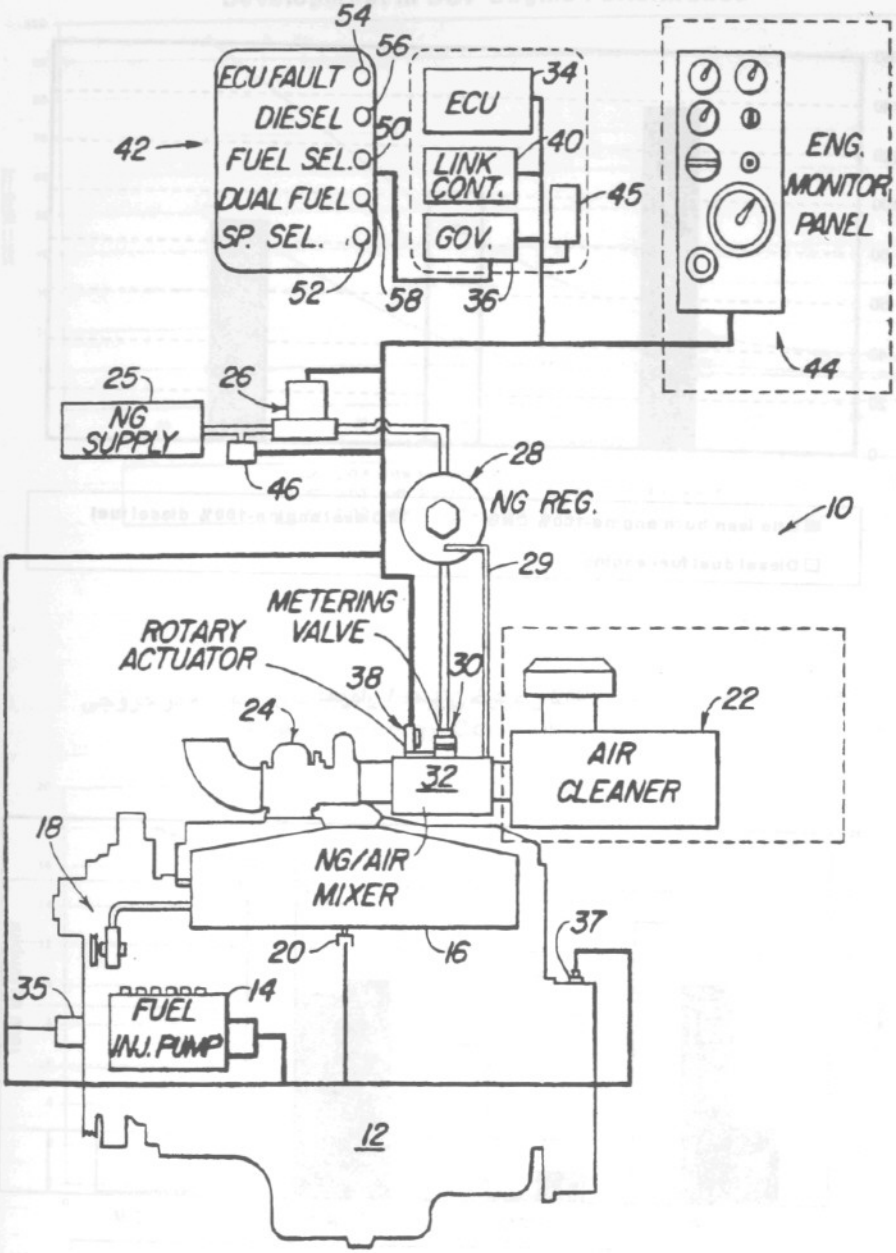
جدول ۳ـ مقایسه هزینه های سوخت برای هر وسیله نقلیه

	واحد	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	موتور دیزل با سوخت دوگانه	موتور دیزل معمولی
سوخت مصرفی سالانه	Le	۶۶۰۰۰	۴۰۰۰ (۳۰۰۰ CNG و ۱۰۰۰ Diesel)	۳۹۰۰۰
قیمت سوخت	US$	۴۰۰۰	۳۱۰۰	۵۱۰۰

جدول ۴ـ مقایسه کامل بین دو موتور

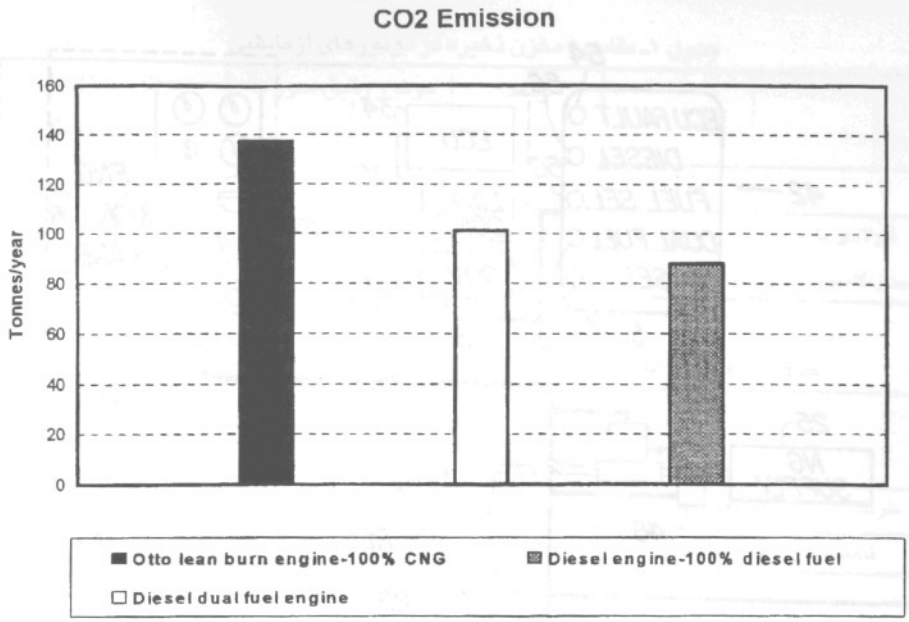
	واحد	موتور رقیق سوز با گاز طبیعی	موتور دیزل با سوخت دوگانه
سوخت مصرفی	Le/100Km	۶۰	۴۰
مسافت طی شده در یک سال	Km	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
هزینه جاری سوخت	US$/L	۰/۰۶	۰/۱۳
هزینه تبدیل موتور	US$	۱۵۰۰۰	۶۰۰۰
جایگزینی گازوئیل	%	۱۰۰	۷۰
جایگزینی در یک سال	Le & L	۲۰۰۰۰ & ۴۰۰۰۰	۲۸۰۰۰
صرفه جوئی سالانه	US$	۲۴۰۰	۲۵۰۰
مدت بازگشت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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

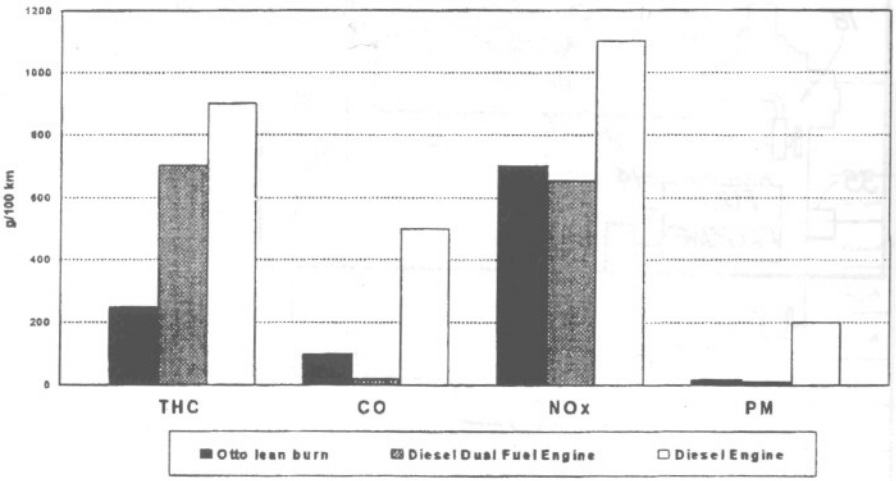


شکل ۱- شمای کلی از سیستم موتور سوخت دوگانه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]

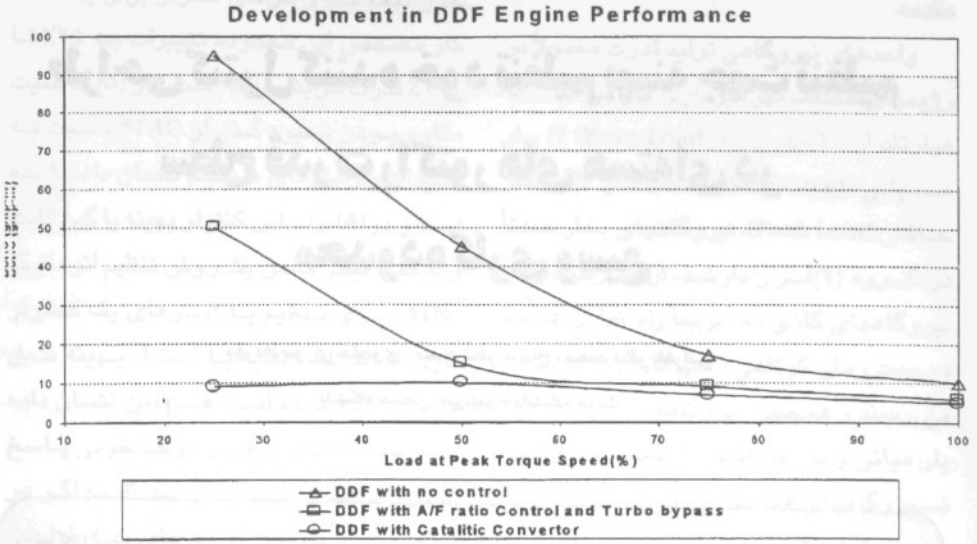


نمودار ۱- میزان خروجی CO2

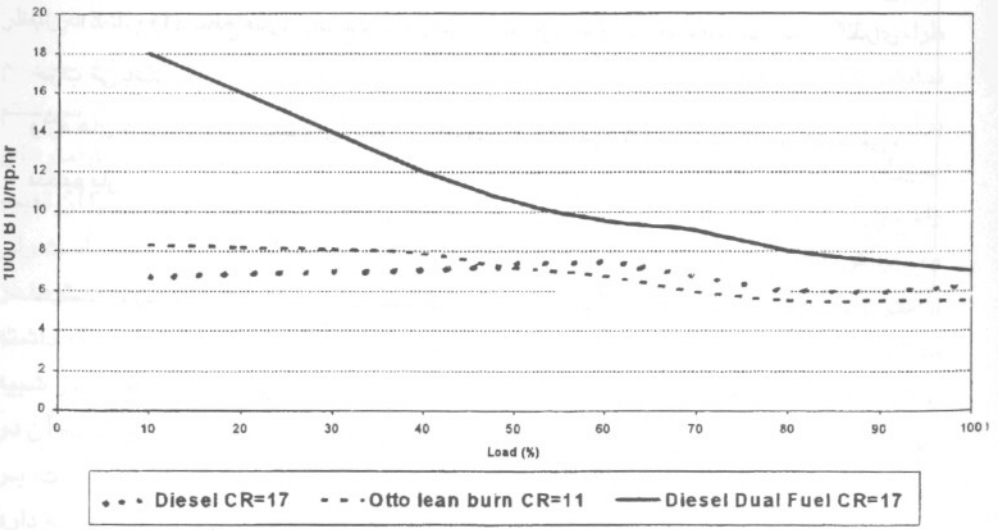


نمودار ۲- مقایسه نتایج آلاینده های خروجی از هر یک از موتورها

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]



نمودار ۳- تأثیر تجهیزات جانبی بر روی میزان هیدروکربن های نسوخته در خروجی



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-15]