The Journal of Engine Research

Summer 2024, Vol. 71, No. 2, pp. 18-29

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Original Research

Reduction of emissions and fuel consumption of diesel engines by ECU program recalibration and after-treatment system

Ebrahim Akbarpouran Khayati, Behrooz Najjari, Arash Aravand, Hadi Rahbari Asiabi*, Mostafa Zare, Milad Khorasani

IDEM Company, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:
OM457 Diesel Engine
Emission
Fuel Consumption
ECU Calibration
After-treatment

ABSTRACT

In this study, the ECU program of the OM 457 diesel engine manufactured by IDEM Co. has been recalibrated and SCR after-treatment has been installed in the exhaust gas path of the engine, which finally, by maintaining the engine performance, its emission standard has been upgraded to Euro 5EEV and the fuel consumption of the engine has also been reduced. With this upgrade, the engine's CO2 emissions have also been reduced, which is effective in reducing greenhouse gases that cause global warming. Also, this upgrade was done without changing the engine design and only by recalibrating the ECU program, which also reduced the cost of the project. The basic OM 457 engine has the Euro 3 emission standard, which is installed on vehicles with DPF after-treatment, which DPF has a high price, and also DPF is very sensitive to the sulfur in fuel, and the gasoil used in the country has high sulfur, causing early DPF failure. Now, with this upgrade of the engine emission standard to Euro 5 EEV without using DPF, the problem of price and sensitivity of DPF to sulfur has also been solved, and SCR after-treatment is not sensitive to fuel sulfur.

© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* Corresponding author
E-mail address: hadihra@yahoo.com (H. Rahbari Asiabi)

Received 28 March 2024; Accepted 28 April 2024
E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Akbarpouran Khayati E, Najjari B, Aravand A, Rahbari Asiabi H, Zare M, Khorasani M. Reduction of emissions and fuel consumption of diesel engines by ECU program recalibration and after-treatment system. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):18-29. doi: 10.22034/ER.2024.2025043.1038

نشریه علمی تحقیقات موتور
تابستان ۱۴۰۳، جلد ۷۱، شماره ۲، صفحه ۱۸-۲۹
تارنمای نشریه: www.engineresearch.ir

مقاله پژوهشی

کاهش آلایندگی و مصرف سوخت موتور دیزلی با زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور و پس‌پالایش

ابراهیم اکبرپوران خیاطی، بهروز نجاری، آرش آراوند، هادی رهبری آسیابی*، مصطفی زارع، میلاد خراسانی

شرکت ایدم، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:
موتور دیزلی OM457
آلایندگی
مصرف سوخت
زینه‌بندی رایانه موتور
پس‌پالایش

چکیده

در این مطالعه، برنامه رایانه موتور دیزل OM 457 تولیدی شرکت ایدم زینه‌بندی مجدد شده و همچنین پس‌پالایش SCR در مسیر گازهای خروجی موتور نصب شده است که در نهایت با حفظ عملکرد موتور، استاندارد آلایندگی آن به اروپا ۵ EEV ارتقا یافته و مصرف سوخت موتور نیز کاهش یافته است. با این ارتقای صورت گرفته، آلاینده CO_2 موتور نیز کاهش یافته که در کاهش گازهای گلخانه‌ای که باعث گرم شدن زمین می‌گردند، مؤثر است. همچنین این ارتقا بدون تغییر در طرح موتور و فقط با زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور صورت گرفته که باعث کاهش هزینه طرح نیز شده است. موتور پایه OM 457 دارای استاندارد آلایندگی اروپا ۳ است که با پس‌پالایش DPF بر روی خودروها نصب می‌شود که DPF گران است و همچنین DPF به گوگرد موجود در گازوئیل بسیار حساس است و گازوئیل‌های مورد استفاده در کشور، گوگرد شدیدی دارند و باعث خرابی زودهنگام DPF می‌شوند. حال با این ارتقای استاندارد آلایندگی موتور به اروپا ۵ EEV بدون استفاده از DPF مشکل قیمت و حساسیت به گوگرد DPF نیز حل شده و پس‌پالایش SCR حساسیتی نسبت به گوگرد سوخت ندارد.

© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* نویسنده مسئول
پست الکترونیکی: hadihra@yahoo.com (هادی رهبری آسیابی)

دریافت ۹ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۹ اردیبهشت ۱۴۰۳
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Akbarpouran Khayati E, Najjari B, Aravand A, Rahbari Asiabi H, Zare M, Khorasani M. Reduction of emissions and fuel consumption of diesel engines by ECU program recalibration and after-treatment system. The Journal of Engine Research. 2024 Jun 21;71(2):18-29. doi: 10.22034/ER.2024.2025043.1038

۱– مقدمه

در صنایع حمل و نقل و جابجایی امروزی موتورهای احتراق داخلی سمبه‌ای نقش مهمی دارند و در خودروها، قطارها، کشتی‌ها و حتی هواپیماهای ملخی بسیار استفاده می‌گردند. شرکت‌های سازنده موتور در جهان همواره برای فروش بالاتر و همچنین پیاده سازی قوانین و استانداردهای آلایندگی و ملاحظات زیست محیطی به دنبال ارتقا و بهبود کیفیت محصولات خود از لحاظ توان، آلایندگی و مصرف سوخت هستند. البته در دهه‌های گذشته توجه اصلی سازندگان عمدتاً به متغیرهای عملکردی به‌خصوص توان موتور بود اما امروزه با سخت‌تر شدن قوانین و استانداردهای آلایندگی و ملاحظات زیست محیطی، مسئله آلایندگی و مصرف سوخت نیز اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده و فصل نوینی در برابر مهندسی موتور گشوده شده است و بهبود عملکرد موتور و کاهش آلایندگی و مصرف به طور همزمان به چالشی برای مهندسین موتور تبدیل شده است و هر روزه مهندسین در تلاش برای یافتن فناوری‌های جدید برای کاهش آلایندگی هستند. در موتورهای احتراق داخلی دیزلی احتراق موتور و به تبع آن عملکرد، آلایندگی و مصرف سوخت موتور به نحوه ترکیب شدن سوخت و هوا و متغیرهای تزریق سوخت ارتباط زیادی دارد [۱].

در موتورهای احتراق داخلی عمده آلاینده‌های خروجی عبارتند از HC، CO، PM و NO_x که در موتورهای دیزلی به دلیل بزرگتر بودن نسبت هوا به سوخت در مقایسه با موتور بنزینی آلاینده‌های CO وHC زیاد مطرح نبوده و PM و NO_x بیشتر اهمیت دارند و در واقع PM و NO_x اصلی‌ترین آلاینده در موتورهای دیزلی هستند. فرآیند تشکیل هر کدام از آلاینده‌ها در ادبیات اهل فن موجود می‌باشند. در موتورهای دیزلی آلاینده‌های PM و NO_x با هم تقابل دارند و کاهش یکی باعث افزایش دیگری می‌گردد [۱، ۲].

بطور کلی برای کاهش آلاینده‌های خروجی موتور دو رویکرد اصلی پیش روی مهندسین موتور وجود دارد: ۱– ارتقای فناوری موتور (وکیفیت سوخت). ۲– پس‌پالایش[1] گازهای خروجی مانند استفاده از DOC[2]، SCR[3]، LNT[4] وDPF[5].

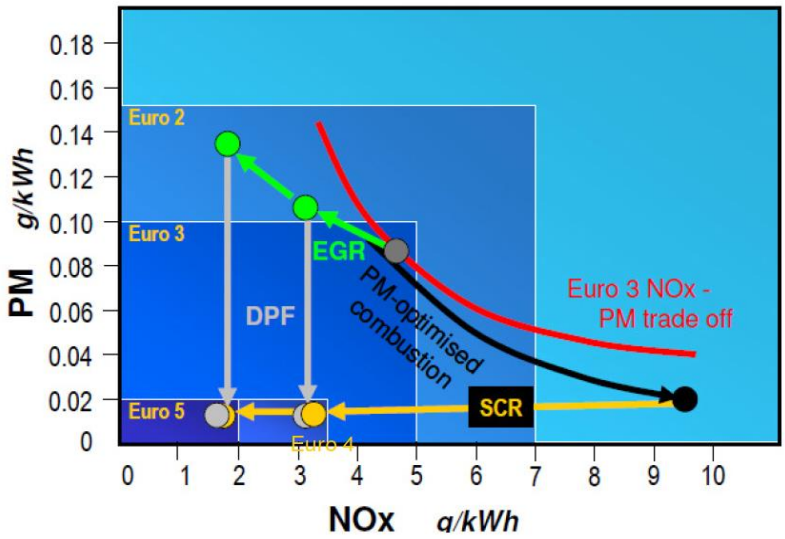
در رویکرد اول هدف اصلی این است که با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و یا با ایجاد تغییراتی در متغیرهای طراحی و داخل موتور بتوان آلایندگی موتور را کم کرد. فناوری‌ها و روش‌های مختلفی به این شیوه برای کاهش آلایندگی‌ها وجود دارند که عبارتند از: استفاده از سامانه سوخت‌رسانی لوله‌مشترک، استفاده از بازخوران[6] گازهای خروجی به صورت سرد و گرم، استفاده از خنک‌کن میانی، پاشش آب به‌خصوص در مورد دیزل کشتی‌ها، زود بستن دریچه ورودی (چرخه میلر)، مهار برقی موتور، تغییراتی در سامانه پاشش سوخت و متغیرهای تزریق یا هندسه محفظه احتراق و غیره.

در رویکرد دوم با استفاده از صافی و یا واکنشگرها آلایندگی گازهای خروجی کاهش می‌یابند. معمولاً از DPF برای کاهش آلاینده PM و از SCR برای کاهش NO_x در موتورهای دیزل سنگین و LNT برای کاهش NO_x در موتورهای دیزل سبک استفاده می‌شود [۳، ۴].

استانداردهای آلایندگی مختلفی در دنیا تدوین شده است که در کشور ایران بیشتر استاندارد اروپایی تحت عنوان اروپا مورد استناد قرار می‌گیرد. در استاندارد اروپا برای موتورهای دیزلی سنگین تا استاندارد اروپا ۳ رسیدن به مقادیر استاندارد تنها با رویکرد اول و یافتن یک نقطه بهینه و رعایت مصالحه برای دو آلاینده PM و NO_x که با هم تقابل دارند، امکان پذیر بود و در واقع اروپا ۳ آخرین استاندارد اروپایی است که می‌توان تنها با رویکرد اول به آن رسید و در استانداردهای اروپا ۴ و بعد از آن، رسیدن به مقادیر کمتر از حد استاندارد آلایندگی سازندگان را مجبور به استفاده از هر دو رویکرد کرده است و باید از پس‌پالایش‌ها نیز استفاده شود. با این وجود دیگر لزومی به رعایت مصالحه بین NO_x و بقیه آلاینده‌ها و

[1] Aftertreatment
[2] Diesel Oxidant Catalyst
[3] Selective Catalist Reduction
[4] Lean NO_x Traps
[5] Diesel Particle Filter
[6] Exhaust Gas Recirculation(EGR)

انتخاب شرایط بهینه نیست و می‌توان بدون در نظر گرفتن یکی از PM یا NO_x دیگری را بهبود داده و آن یکی را با پس پالایش کم کرد. بنابراین بعد از استاندارد اروپا ۳ که باید از هر دو رویکرد برای کاهش آلایندگی استفاده کرد، می‌توان دو راهبرد را برای کاهش آلایندگی موتور به کار برد که یک راهبرد کاهش NO_x با طراحی موتور و کاهش PM با پس پالایش و راهبرد بعدی کاهش PM با طراحی موتور و کاهش NO_x با پس‌پالایش است. در شکل ۱ دو راهبرد کاهش آلایندگی در موتورهای دیزل سنگین بعد از اروپا ۳ نشان داده شده است. راهبردی که امروزه توسط بیشتر خودروسازان دیزلی سنگین در جهان دنبال می‌شود راهبرد دوم است زیرا قیمت DPF زیاد بوده و برای همین خودروسازان سعی می‌کنند تا طراحی موتور را طوری انجام دهند که با ایجاد شرایط احتراق مناسب، PM و بقیه آلاینده‌ها به‌غیر از NO_x را با طراحی موتور و بدون نیاز به DPF کاهش داده و NO_x نیز توسط SCR کاهش دهند.



شکل ۱ دو راهبرد کاهش آلایندگی در موتورهای دیزل سنگین پس از استاندارد اروپا ۳

در رویکرد ارتقای فناوری موتور برای کاهش آلایندگی به دلیل سخت‌تر شدن استانداردهای جدید آلایندگی، دیگر با استفاده از تجهیزات مهار مکانیکی، رسیدن به استانداردهای جدید تقریباً غیر ممکن است و ضروری است تا مهار برقی در موتور استفاده گردد. برای مهار برقی موتور باید خروجی‌های موتور پایش شده و بر حسب آن‌ها ورودی‌های موتور مدیریت و تنظیم شوند تا عملکرد موتور بهینه گردد. بدین منظور برای مدیریت موتور نیاز به سه دسته از قطعات در مهار برقی است که عبارتند از: حسگرها برای پایش عملکرد موتور، عملگرها برای اجرای فرامین صادر شده و یک واحد مهار برقی[1] که به آن رایانه موتور نیز گفته می‌شود و فرمان‌های لازم را به منظور عملکرد صحیح موتور، صادر کند [۳، ۴].

واحد مهار برقی از مدار پردازنده درگاه‌های ورودی برای دریافت داده از حسگرها و درگاه‌های خروجی برای ارسال فرمان به عملگرها تشکیل شده که مهار موتور را بر عهده دارد. در داخل رایانه موتور برنامه مدیریت و مهار موتور نصب می‌شود و اجرای آن نیازمند استفاده از تعداد زیادی مقادیر عددی و محاسبات متغیرهای مختلف است. در مهار موتورهای دیزلی توسط رایانه موتور متغیرهای مختلفی باید مهار و تعیین شوند که عبارتند از: مقدار پاشش سوخت، زمان‌بندی پاشش سوخت، فشار پاشش سوخت، آهنگ و چندگانگی پاشش سوخت، مهار پرخوران، مهار پس‌پالایش و ... [۴–۷].

[1] Electronic Control Unit (ECU)

در برنامه رایانه موتور، روش‌ها، توابع و جداول مختلفی برای این متغیرها برای شرایط کاری مختلف موتور وجود دارند و بر حسب شرایط کاری و اطلاعات دریافتی از حسگرها، رایانه موتور مقدار این متغیرها را تعیین و مهار می‌کند و فرمان لازم را به عملگرها صادر می‌کند. رایانه موتور باید بتواند در همه شرایط کارکرد موتور، حالت بهینه برای متغیرها را انتخاب کند. برنامه رایانه موتور و تنظیمات آن نقش کلیدی در عملکرد بهینه موتور دارد و به مجموعه فعالیت‌هایی که برای تنظیم برنامه رایانه موتور برای کلیه حالات کارکرد موتور و خودرو از جمله راه‌اندازی، کارکردن درجا، گرم کردن، سرعت آرام، حرکت سریع، شتابگیری، ترمزگیری و ... برای دستیابی به بهترین شرایط از نظر عملکرد، آلایندگی و مصرف سوخت موتور انجام می‌گیرد، زینه‌بندی رایانه موتور گفته می‌شود و هر چقدر زینه‌بندی خوب انجام گیرد، کارکرد موتور بهینه خواهد بود و آلایندگی موتور هم بستگی به این دارد که چطور زینه‌بندی متغیرهای مهار برقی انجام شده است [۴، ۸-۱۰].

۲- موتور تحت آزمون

در این مطالعه ارتقای استاندارد آلایندگی موتور OM 457 تولیدی شرکت ایدم که مشخصات فنی این موتور در حالت پایه در جدول ۱ و همچنین نتایج آزمون عملکرد آن در جدول ۲ آورده شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. این موتور در سه رده توان تولید می‌گردد که شامل ۲۲۰ کیلووات، ۲۶۰ کیلووات و ۳۱۵ کیلووات هستند. در این مطالعه موتور ۲۲۰ کیلوواتی بررسی می‌گردد. سامانه سوخت‌رسانی این موتور از نوع تلمبه واحد است که برای پاشش سوخت به هر استوانه تلمبه جداگانه‌ای وجود دارد و مهار سامانه سوخت‌رسانی آن با واحد مهار الکتریکی انجام می‌شود. این موتور در حالت پایه دارای استاندارد آلایندگی اروپا ۳ است و با نصب صافی ذرات در مسیر گازهای خروجی استاندارد آن به اروپا ۴ ارتقا می‌یابد و در این مطالعه با زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور و استفاده از SCR آلایندگی آن به اروپا 5 EEV[1] ارتقا پیدا می‌کند.

جدول ۱ مشخصات فنی موتور OM 457 در حالت پایه

تعداد استوانه/ تعداد دریچه/ آرایش استوانه‌ها	۶ استوانه/ ۲۴ دریچه/ خطی
قطر استوانه (میلی‌متر)	۱۲۸
پیمایش سمبه (میلی‌متر)	۱۵۵
نسبت تراکم	۱ : ۱۷,۲۵
حجم موتور (لیتر)	۱۲
حداکثر توان (کیلو وات)	۲۲۰ کیلووات در دور ۲۰۰۰ د.د.د.
حداکثر گشتاور (نیوتن متر)	۱۲۵۰ نیوتن‌متر در دور ۱۱۰۰ د.د.د.
استاندارد آلایندگی	اروپا ۳
سامانه سوخت‌رسانی	تلمبه واحد با مهار برقی

پس از انجام زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور، باید موتور تحت آزمون‌های عملکرد و آلایندگی قرار گیرد تا متغیرهای عملکردی و آلایندگی برای موتور به دست آیند. برای موتورهای دیزل سنگین استاندارد مربوط به آزمون عملکرد ECE R85 است و برای آزمون آلایندگی در استاندارد اروپا 5EEV باید موتور طبق چرخه‌های ELR، ESC و ETC تحت آزمون قرار گیرد که دستورالعمل‌های هر کدام از این آزمون‌ها در ادبیات اهل فن موجود است.

[1] Enhanced Environmentally Vehicle

جدول ۲ نتایج آزمون عملکرد موتور OM 457 در حالت پایه

مصرف سوخت ویژه ترمزی (g/kwh)	گشتاور تصحیح شده (N.m)	توان تصحیح شده (kw)	سرعت (د.د.د.)
۲۲۲٫۶	۱۰۵۰٫۱	۲۲۰٫۰۱	۲۰۰۰
۲۰۸٫۱۱	۱۰۶۸٫۱۹	۲۱۹٫۹	۱۹۰۰
۱۹۹٫۵۸	۱۱۵۹٫۶	۲۱۲٫۳	۱۷۰۰
۱۹۶٫۲	۱۲۲۰٫۴	۱۹۱٫۴	۱۵۰۰
۱۹۶٫۴	۱۲۵۰٫۲	۱۷۰٫۸	۱۳۰۰
۱۹۵٫۲	۱۲۵۵٫۳	۱۵۹٫۲۰	۱۲۰۰
۱۹۵٫۴۵	۱۲۶۴	۱۴۸٫۱	۱۱۰۰
۱۹۷٫۵	۱۲۶۰	۱۳۲٫۶۷	۱۰۰۰

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه به دلیل گرانی DPF و حساسیت زیاد آن به گوگرد سوخت سعی شده که با ایجاد شرایط احتراق مناسب، PM و بقیه آلاینده‌ها به‌غیر از NO_x بدون نیاز به DPF کاهش یابند و NO_x نیز توسط SCR کاهش پیدا کند. در واقع DPF در پس پالایش وجود ندارد که باعث کاهش قیمت سامانه پس‌پالایش می‌شود. با توجه به اینکه در این مطالعه در قطعات و طراحی موتور تغییری داده نمی‌شود و مهار این موتور با واحد مهار برقی است پس برای ایجاد شرایط احتراق مناسب برای کاهش PM باید زینه‌بندی رایانه موتور مجددا انجام گرفته و برنامه آن و متغیرهای تزریق سوخت برای حالت کم PM تنظیم گردد و همچنین برای کاهش آلاینده NO_x از گازهای خروجی از پس‌پالایش SCR استفاده می‌شود. در زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور باید متغیرهای مهار موتور که توسط رایانه موتور مهار می‌شوند را تغییر داد و برای حالت مورد نظر تنظیم نمود.

در موتورهای دیزل برای ایجاد شرایط احتراق مناسب و کاهش PM باید اختلاط سوخت و هوا بیشتر گردد. در این مطالعه با توجه به عدم تغییر قطعات موتور و همچنین به دلیل اینکه موتور مورد مطالعه دارای سامانه سوخت‌رسانی تلمبه واحد است و در سامانه تلمبه واحد نیروی لازم برای تلمبه‌ها به منظور افزایش فشار سوخت از بادامک پاشش روی میل بادامک فرمان می‌گیرد. بنابراین فشار پاشش بستگی به مقدار پاشش دارد و از طرفی در سرعت‌های مختلف، طول مدت پاشش باید طوری تنظیم گردد تا مقدار سوخت مورد نیاز پاشیده شود. بنابراین با توجه به محدودیت عدم تغییر سامانه سوخت‌رسانی و قطعات، متغیر کلیدی برای تغییر متغیرهای تزریق و زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور در سامانه تلمبه واحد، شروع پاشش سوخت است و در این مطالعه راهکار افزایش پیشرسی پاشش سوخت برای افزایش اختلاط سوخت و هوا به کار برده شده است تا مدت زمان پاشش سوخت بیشتر در مرحله تراکم چرخه موتور انجام پذیرد و بدین ترتیب اختلاط سوخت و هوا بیشتر شده و PM کاهش و NO_x افزایش یابد. زمان پاشش موتور OM 457 در حالت پایه موتور از ۱۳ درجه قبل از مکث بالا شروع شده و تا حدود ۲۰ درجه بعد از مکث بالا ادامه دارد که در حدود ۳۳ درجه طول پاشش است.

برای تغییر زمان‌بندی پاشش سوخت و افزایش پیشرسی آن باید به این نکته هم توجه شود که در سرعت‌های مختلف موتور طول پاشش به اندازه‌ای باشد تا مقدار سوخت مورد نظر پاشش گردد. در جدول ۳ مقادیر پیشرسی زمان‌بندی سوخت در بعضی سرعت‌های موتور و مقادیر پاشش سوخت آورده شده است. همچنین علاوه بر زمان‌بندی پاشش برنامه رایانه موتور بهینه شده و برای BSFC پایین تنظیم گردیده است تا مصرف سوخت موتور کاهش یابد.

در سامانه SCR استفاده شده در این مطالعه از اوره به عنوان واکنشگر استفاده می‌گردد که مایع آن ۳۲٫۵٪ اوره و

٪۶۷٫۵ آب دارد و واکنشگر مورد استفاده در سامانه SCR از جنس وانادیوم است که برای استاندارد اروپا ۵ مناسب هستند و قطر واکنشگر ۳۰۴٫۸ میلی‌متر است و هوای فشرده مورد استفاده در تلمبه ادبلو ۸ بار است و ولتاژ تأمین تلمبه ۲۴ ولت است و مخزن ادبلو ۳۵ لیتری است. افشانه اوره مورد استفاده دارای زاویه پاشش ۳۰ درجه است. در سامانه SCR ترکیبی از اوره و آب در یک مخزن جداگانه قرار گرفته و بر حسب مقدار NO_x موجود در گازهای خروجی و با فرمان واحد مهار به گازهای خروجی پاشیده می‌شوند و اوره بلافاصله تبدیل به آمونیاک گردیده و بدین ترتیب مخلوطی از آمونیاک و گازهای خروجی وارد واکنشگر می‌شوند و در درون واکنشگر NO_x موجود در گازهای خروجی طبق رابطه زیر در مجاورت واکنشگر توسط ماده احیاگر به گاز N_2 احیا می‌گردند [۳]:

$$4NO + 4NH_3 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (۱)$$

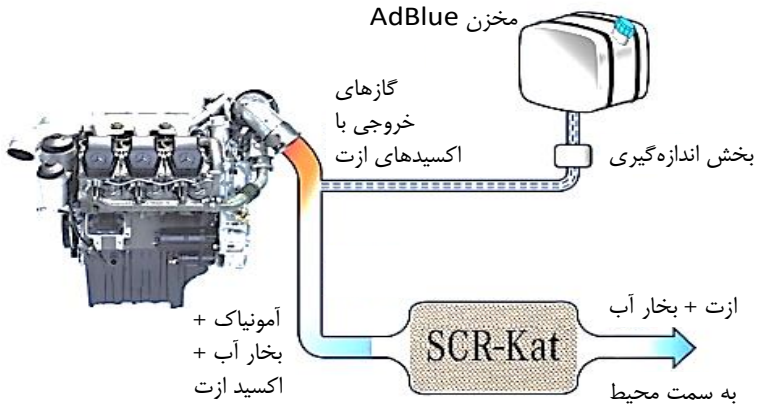
$$6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O \quad (۲)$$

جدول ۳ پیشرسی زمان‌بندی پاشش سوخت در بعضی سرعت‌ها و مقادیر پاشش سوخت

	سرعت (د.د.د.)						
پاشش سوخت (mm^3/stroke)	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰	۱۹۰۰	۲۰۰۰
۰٫۰۰	۴٫۳۱	۴٫۴۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۵٫۰۰	۴٫۳۱	۴٫۴۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۱۰٫۰۰	۳٫۸۱	۳٫۹۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۱۵٫۰۰	۳٫۳۱	۳٫۴۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۲۰٫۰۰	۳٫۳۱	۳٫۴۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۲۵٫۰۰	۳٫۳۱	۳٫۴۴	۳٫۷۵	۴٫۴۱	۵٫۳۴	۶٫۴۴	۷٫۰۰
۳۰٫۰۰	۳٫۱۹	۳٫۳۱	۳٫۵۰	۴٫۰۹	۴٫۹۱	۵٫۹۷	۶٫۵۰
۳۵٫۰۰	۳٫۱۹	۳٫۳۱	۳٫۵۰	۳٫۵۹	۴٫۹۱	۵٫۴۷	۶٫۰۰
۴۰٫۰۰	۳٫۱۹	۳٫۳۱	۳٫۵۰	۳٫۵۹	۴٫۹۱	۵٫۴۷	۶٫۰۰
۴۵٫۰۰	۳٫۱۹	۳٫۳۱	۴٫۵۰	۴٫۵۹	۴٫۹۱	۵٫۴۷	۶٫۰۰
۵۰٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۴٫۲۵	۴٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۵۵٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۶۰٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۶۵٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۷۰٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۷۵٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۸۰٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰
۸۵٫۰۰	۳٫۰۹	۳٫۱۶	۳٫۲۵	۳٫۳۱	۴٫۴۴	۴٫۷۲	۵٫۰۰

سامانه SCR در محدوده دمایی خاصی عمل می‌کند. دو حسگر دما در ورودی و خروجی این سامانه وجود دارند و همچنین یک حسگر NO_x در خروجی واکنشگر وجود دارد و بر حسب مقدار NO_x موجود در خروجی، مایع ادبلوی مورد نیاز با فرمان واحد مهار به روی گازهای وارده به واکنشگر پاشیده می‌شود. شکل کلی از سامانه SCR در شکل۲ نشان داده شده است.

در شکل ۳ موتورOM457 در اتاق آزمون نشان داده شده است. این موتور پس از انجام زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور برای حالت PM کم و نصب پس‌پالایش SCR در مسیر گازهای خروجی موتور، در شرکت ایدم آزمون اولیه شده و برای صحه‌گذاری در یکی از آزمایشگاه‌های مرجع خارج از کشور آزمون شده است که نتایج آن و مقایسه با موتور پایه در جداول ۴–۸ و شکل‌های ۴–۶ آورده شده است.



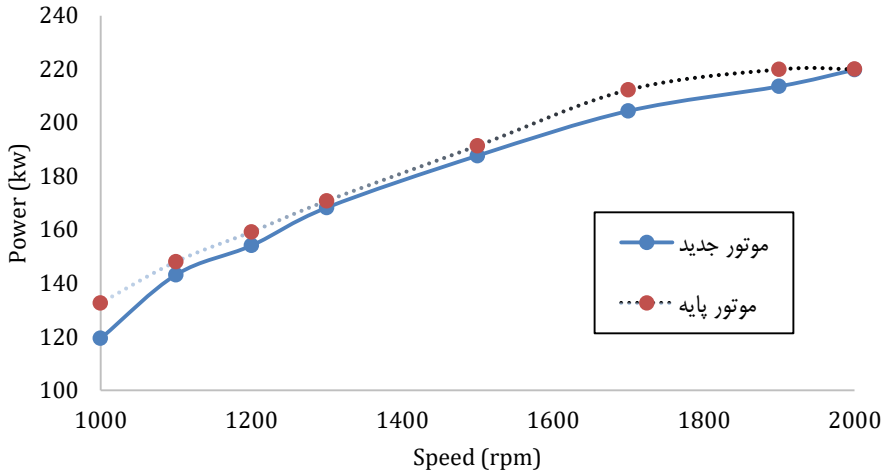
شکل۲ سامانه پس‌پالایش واکنشگر SCR

شکل ۳ موتور OM 457 در آزمون موتور

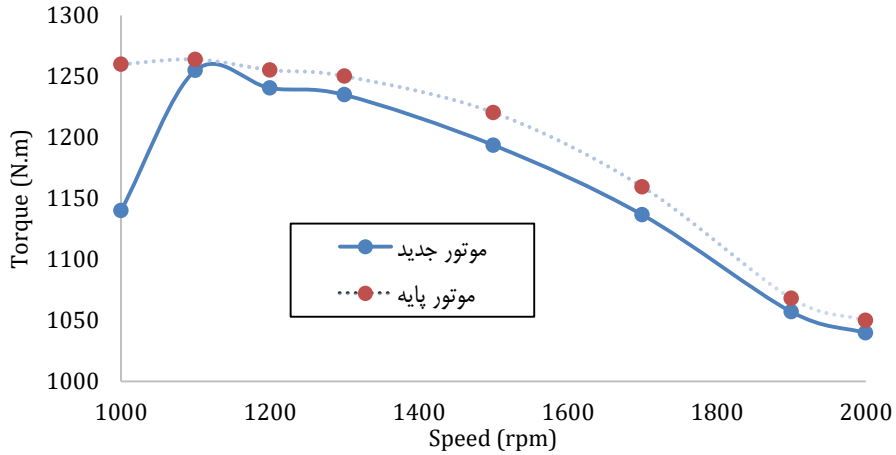
طبق نتایج به دست آمده از آزمون‌ها ملاحظه می‌شود که عملکرد موتور مشابه با موتور پایه است که نشانگر این است که زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار نداده و هیچ تغییر منفی در آن ایجاد نکرده است. طبق جدول ۴ حداکثر توان تولیدی توسط موتور ۲۱۹٫۸ کیلووات در دور ۲۰۰۰ د.د.د. است و همچنین حداکثر گشتاور ۱۲۵۵ نیوتن‌متر در سرعت ۱۱۰۰ د.د.د. به دست آمده است.

عدم قطعیت آزمون ها ۵ ٪ است. در جداول ۵ و ۶ نتیجه آزمون آلایندگی موتور نشان داده شده و با مقدار مجاز آلاینده‌ها در استاندارد اروپا ۵ EEV مقایسه شده است و ملاحظه می‌شود که تمامی آلاینده‌های موتور مذکور کمتر از حد مجاز استاندارد بوده و استاندارد اروپا ۵ EEV را گذرانده است. در جدول ۷ مقایسه نتایج آزمون آلایندگی چرخه ESC و ELR برای موتور پایه همراه با واکنشگر احیاگر و موتور جدید با پس‌پالایش SCR انجام گرفته است. در جدول ۸ مصرف

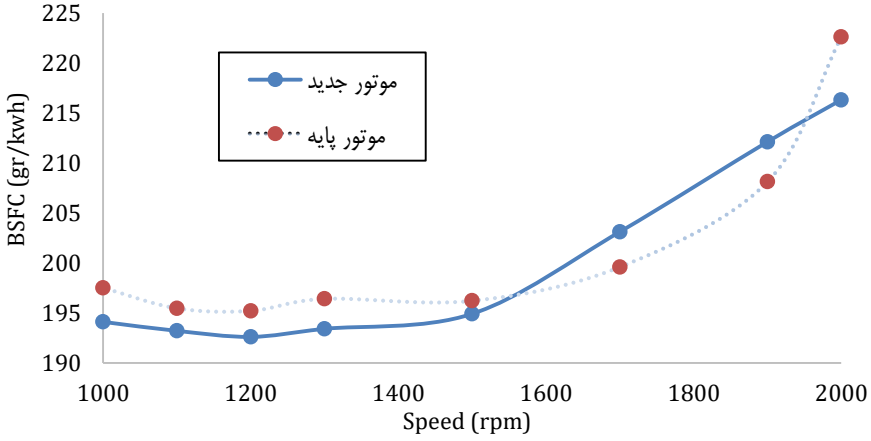
سوخت ویژه دو نقطه‌ای موتور در حالت پایه و همچنین در موتور جدید که برنامه رایانه آن زینه‌بندی مجدد و پس‌پالایش نصب شده، درج گردیده است که موتور جدید حدوداً ۲ درصد مصرف سوخت کمتری دارد.



شکل ٤ مقایسه توان موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR و موتور پایه



شکل ٥ مقایسه گشتاور موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR و موتور پایه



شکل ٦ مقایسه مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR و موتور پایه

جدول ٤ نتایج آزمون عملکرد موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR

مصرف سوخت ویژه ترمزی (g/kwh)	شار جرمی مصرف سوخت (kg/h)	گشتاور تصحیح شده (N.m)	توان تصحیح شده (kw)	سرعت (د.د.د.)
۲۱۶٫۳	۴۷٫۲	۱۰۳۹٫۸	۲۱۹٫۸	۲۰۰۰
۲۱۲٫۱	۴۴٫۵	۱۰۵۷٫۱	۲۱۳٫۶	۱۹۰۰
۲۰۳٫۱	۴۱٫۲	۱۱۳۶٫۶	۲۰۴٫۴	۱۷۰۰
۱۹۴٫۹	۳۶٫۵	۱۱۹۳٫۷	۱۸۷٫۷	۱۵۰۰
۱۹۳٫۴	۳۲٫۷	۱۲۳۴٫۹	۱۶۸٫۳	۱۳۰۰
۱۹۲٫۶	۳۰٫۱	۱۲۴۰٫۵	۱۵۴٫۱	۱۲۰۰
۱۹۳٫۲	۲۸٫۴	۱۲۵۵	۱۴۳٫۲	۱۱۰۰
۱۹۴٫۱	۲۳٫۱	۱۱۴۰	۱۱۹٫۴	۱۰۰۰

جدول ٥ نتیجه آزمون ESC و ELR موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR

متغیر	مقدار اندازه گیری شده	اندازه مجاز در اروپا ۵ EEV	وضعیت (قبول یا مردود)
(g/kw h) CO	۰٫۰۰۰	۱٫۵	قبول
(g/kw h) HC	۰٫۰۰۸	۰٫۲۵	قبول
(g/kw h) Nox	۱٫۷۷	۲٫۰	قبول
(g/kw h) PM	۰٫۰۰۹	۰٫۰۲	قبول
(m^{-1}) Smoke	۰٫۱۴۷	۰٫۱۵	قبول

جدول ٦ نتیجه آزمون ETC موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR

متغیر	مقدار اندازه گیری شده	اندازه مجاز در اروپا ۵ EEV	وضعیت (قبول یا مردود)
(g/kw h) CO	۰٫۰۰۰	۳٫۰	قبول
(g/kw h) HC	۰٫۰۰۰	۰٫۴۰	قبول
(g/kw h) Nox	۰٫۸۵۶	۲٫۰	قبول
(g/kw h) PM	۰٫۰۱۴	۰٫۰۲	قبول

جدول ۷ مقایسه مقادیر آلایندگی چرخه ESC و ELR موتور OM 457 در حالت پایه با واکنشگر اکسیدانت و موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR

متغیر	موتور با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR	موتور پایه همراه با واکنشگر احیاگر	درصد کاهش
(g/kw h) CO	۰٫۰۰۰	۰٫۱۳	۱۰۰
(g/kw h) HC	۰٫۰۰۸	۰٫۱۲	۹۳٫۳
(g/kw h) Nox	۱٫۷۷	۴٫۹۱	۶۳٫۹۵
(g/kw h) PM	۰٫۰۰۹	۰٫۰۵۰	۸۲
(m^{-1}) Smoke	۰٫۱۴۷	۰٫۳۹	۶۲٫۳۰

جدول ۸ مقایسه مصرف سوخت ویژه دو نقطه‌ای موتور OM 457 در حالت پایه و موتور OM 457 با برنامه جدید رایانه موتور و پس‌پالایش SCR

	مصرف سوخت ویژه ترمزی در توان بیشینه (g/kwh)	مصرف سوخت ویژه در گشتاور بیشینه (g/kwh)	میانگین (g/kwh)
موتور پایه	۲۲۲٫۶	۱۹۵٫۴۵	۲۰۹٫۰۲۵
موتور جدید	۲۱۶٫۳	۱۹۳٫۲	۲۰۴٫۷۵

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور و همچنین استفاده از پس‌پالایش SCR در مسیر گازهای خروجی موتور دیزلی OM 457 با حفظ متغیرهای عملکردی موتور، استاندارد آلایندگی موتور بهبود یافته و مصرف سوخت آن کاهش یافته است. نتایج آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از این سامانه‌ها باعث کاهش آلایندگی موتور تا استاندارد اروپا ۵ EEV گردیده است. این ارتقای استاندارد آلایندگی موتور بدون تغییر در طراحی موتور و فقط با زینه‌بندی مجدد برنامه رایانه موتور انجام گرفته که باعث کاهش هزینه طرح شده است و همچنین در این ارتقا فقط از پس پالایش SCR در مسیر گازهای خروجی موتور برای کاهش آلایندگی استفاده شده و DPF در سامانه پس‌پالایش گازهای خروجی وجود ندارد که به دلیل گرانی DPF و حساسیت زیاد آن به گوگرد سوخت که باعث خرابی آن می‌شود، صرفه جویی زیادی در هزینه خودروسازان انجام می‌پذیرد زیرا پس‌پالایش SCR ارزان‌تر از DPF است و حساسیتی نسبت به گوگرد سوخت ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از پشتیبانی‌های مدیریت محترم و کارکنان شرکت ایدم در پیشبرد این طرح تشکر و قدردانی می‌نمایند.

فهرست علائم

سرعت موتور، د.د.د.	N
توان موتور، Kw	P
گشتاور، N.m	T
مصرف سوخت ویژه ترمزی، gr/kwh	$BSFC$

References

[1] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. 2nd ed. McGraw-Hill Education; 2018.
[2] Bosch R. Bosch diesel system components for professional repairs on modern and conventional diesel systems. 2018.
[3] Akbarpouran Khayati E, Rahbari Asiabi H, Najjari B, Zare M, Parsa S, Aravand A. Reduction of emissions and fuel consumption of diesel engine by using common rail fuel injection and aftertreatment systems. Engine Research. 2022 Sep 23;68(68):3-11. doi: 10.22034/ER.2022.697921
[4] Akbarpouran khayati E, Rahbari Asiabi H, Najjari B, Aravand A, Zare M, Khorasani M. Reduction of diesel engine cold start emissions by improving cold start calibration. 1th International & 3th National Conference on marine propulsion; 2022 Feb 14-15; Elm & Sanat University, Tehran, Iran. 2022. [In Persian]
[5] Denton T. Automobile electrical and electronic systems. Elsevier; 2004.
[6] Guzzella L, Onder Ch. Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems. Springer; 2010.
[7] Sawatmongkhon B. Modeling of catalytic aftertratement of NOx emission using hydrocarbon as a reductant [dissertation]. England: Birmingham University; 2011.
[8] Xua H, Luo Z, Wang N, Qu Z, Chen J, An L. Experimental study of the selective catalytic reduction after-treatment for the exhaust emission of a diesel engine. Applied Thermal Engineering. 2019;147:198-204. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.067
[9] Guan B, Zhan R, Lin H, Huang Z. Review of state-of-the-art technologies of selective catalytic reduction of NO_X from diesel engine exhaust. Applied Thermal Engineering. 2014;66:395-414. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.021

[10] Balaji M, Wenming Y, Siaw kiang C. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines-A review. Renew Sustain Energy. 2013;28:664–76. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.051

[11] Soltanalizadeh S, Esfahaniyan V, Haeri Yazdi M, Alizadehnia S. Improving identification of combustion engine to use in model-based calibration. The Journal of Engine Research. 2021;63:23-34.