

## بررسی اثر ترکیب غنی‌سازی هوا با اکسیژن و بازگردانی گازهای خروجی بر پارامترهای عملکردی و آلاینده‌های موتور دیزل

جواد خادم<sup>۱\*</sup>، مسلم ایوبی راد<sup>۲</sup>، علی اسدی<sup>۳</sup>، سید ایمان پورموسوی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قانات، قان، ایران.  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.  
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

### چکیده

در این پژوهش، اثر ترکیبی غنی‌سازی اکسیژن و بازگردانی گازهای خروجی بر عملکرد احتراق و تولید آلاینده‌ها در یک موتور دیزل پاشش مستقیم بررسی شده است. هدف اصلی، تحلیل نقش هم‌زمان افزایش غلظت اکسیژن و اعمال بازگردانی گازهای خروجی در بهبود فرایند احتراق و کاهش آلاینده‌های خروجی است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار AVL-FIRE بر روی یک موتور AVL 5402 تک‌سیلندر، چهارزمانه و با پاشش مستقیم انجام شد. مدل احتراق شیل و مدل آلاینده‌ی زلدوویچ برای پیش‌بینی دما، فشار، دوده و ناکس به کار گرفته شد و نتایج با داده‌های تجربی فشار سیلندر اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داد که خروجی NO مطلوب در دور موتور rpm ۱۴۰۰ با استفاده از ۲۱/۵ تا ۲۲/۵٪ غنی‌سازی اکسیژن و ۵ تا ۱۰٪ EGR و در دور موتور rpm ۱۸۰۰ با استفاده از ۲۱ تا ۲۲٪ غنی‌سازی اکسیژن و ۱۰ تا ۱۵٪ EGR به دست می‌آید؛ همچنین در شرایط به‌کارگیری EGR سرد خروجی، NO مطلوب تحت شرایط rpm ۱۴۰۰ با استفاده از ۲۱/۵ تا ۲۲/۵٪ غنی‌سازی اکسیژن و ۱۰ تا ۱۵٪ EGR و در دور موتور rpm ۱۸۰۰ با استفاده از ۲۱ تا ۲۲٪ غنی‌سازی اکسیژن و ۱۵ تا ۲۰٪ EGR قابل دستیابی است.

**کلمات کلیدی:** موتور دیزل، غنی‌سازی با اکسیژن، بازگردانی گازهای خروجی، انتشار آلاینده‌ها.

## Effect of Oxygen Enriched Air Combined With EGR on Performance Parameters and Diesel Engine Emissions

Javad Khadem<sup>1\*</sup>, Moslem Ayubi Rad<sup>2</sup>, Ali Asadi<sup>3</sup>, Seyed iman Poormusavi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> MSc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

<sup>3</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran.

<sup>4</sup> PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

In this study, the combined effect of oxygen enrichment and exhaust gas recirculation (EGR) on combustion performance and pollutant formation in a direct-injection diesel engine was investigated. The main objective was to analyze the simultaneous influence of increased oxygen concentration and EGR application on improving the combustion process and reducing exhaust emissions. Numerical simulations were conducted using AVL-FIRE software on an AVL 5402 single-cylinder, four-stroke, direct-injection diesel engine. The Shell ignition model and the Zeldovich NOx model were employed to predict temperature, pressure, soot, and NOx emissions, and the results were validated against experimental in-cylinder pressure data. The results show that the desired NO output is achieved at 1400 rpm using 21.5 to 22.5% oxygen enrichment and 5 to 10 percent EGR, and at 1800 rpm using 21 to 22% oxygen enrichment and 10 to 15% EGR. Also, in the case of using cold exhaust EGR, the desired NO can be achieved under 1400 rpm conditions using 21.5 to 22.5% oxygen enrichment and 10 to 15% EGR, and at 1800 rpm engine speed using 21 to 22% oxygen enrichment and 15 to 20% EGR.

**Keywords:** Diesel Engine, Oxygen Enrichment, Exhaust Gas Recirculation, Pollutant Emissions.

## ۱- مقدمه

پارامترهای بسیاری بر فرایند احتراق و گازهای خروجی از یک موتور دیزل تاثیر دارد. در سال‌های اخیر توسعه‌ی زیادی در تکنولوژی موتور دیزل صورت گرفته است. معرفی موتورهای تزریق مستقیم توربوشارژ با فشار بالا و پاشش پیوسته، توان ویژه و مصرف سوخت را بهبود بخشیده و تقاضای مصرف کنندگان را افزایش داده است. توسعه، به طور کلی یک توازن بین بهبود شاخص‌های مورد نظر و کاهش عوارض جانبی ناخواسته است. در رابطه با موتور دیزل، توسعه‌ی فناوری در سال‌های اخیر در درجه‌ی اول تقاضای مصرف‌کنندگان برای عملکرد بالاتر و توان بهتر همراه با رعایت الزامات قانونی انتشار پایین‌تر آلاینده‌ها بوده است.

وارتین‌بی [۱] غنی‌سازی با اکسیژن را برای بررسی تاثیر آن بر گازهای خروجی اگزوز مورد مطالعه قرار داد. نتایج آزمایش‌ها با مخلوط هوا و سوخت رقیق نشان داد که HC به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت ولی میزان NO به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. اکتان مورد نیاز و مصرف سوخت با غنی‌سازی با اکسیژن بیشتر شد. دمای احتراق با غلظت اکسیژن بیشتر از ۲۱ درصد که به طور معمول در هوا یافت می‌شود، حداکثر شده و این موضوع افزایش آلاینده‌ها و در عین حال بهبود عملکرد موتور را در پی داشت.

پاشش سوخت یک موتور دیزل که شامل غنی‌سازی هوای ورودی احتراق با اکسیژن است توسط واتسون و همکاران [۲] مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از غشای تولید اکسیژن به عنوان ابزار تولید اکسیژن استفاده شد. غنی‌سازی با اکسیژن، احتراق سوخت‌هایی که به سختی محترق می‌شوند، مانند روغن و الکل مخلوط، روغن دانه و مخلوط روغن گازی سبک و روغن‌های سوخت باقی‌مانده و حتی سنگین را امکان‌پذیر کرد. در نهایت نتایج بهتری برای آلاینده‌های خروجی اگزوز از آزمایش‌ها به دست آمد.

دوناهو و فاستر [۳]، غنی‌سازی با اکسیژن در موتور پاشش مستقیم دیزل را برای درک راه‌های کاهش ذرات آلاینده و NO مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها درصد‌های غنی‌سازی هوا و سوخت را به منظور کنترل این آلاینده‌ها ارزیابی کردند و برای

هر دو مورد بیشترین کاهش ذرات جامد<sup>۱</sup> (PM) با غنی‌سازی از ۲۱ تا ۲۲ درصد به دست آمد.

شبهه سازی احتراق و عملکرد موتور دیزل توربوشارژ با سوخت دیزل اکسیژنه توسط لوگاناتان و همکاران [۴] انجام شد. در این تحقیق تحلیل جامع احتراق، حرارت آزاد شده، انتقال حرارت و عملکرد موتور دیزل توربوشارژ با دی‌اتیل گلیکول دی‌متیل اتر ترکیب شده با دیزل انجام شد و کاهش مصرف سوخت، بهبود احتراق و بازده حرارتی بالاتر در طی فرایند احتراق از جمله دستاوردهای آن بود.

ونگ و لیو [۵] با استفاده از نرم‌افزار AVL-FIRE به شبهه سازی احتراق موتور دیزل با هوای غنی‌سازی شده با اکسیژن بالاتر از ۲۴ درصد پرداختند و نتیجه گرفتند در غنی‌سازی ۲۴٪، مشخصه‌های احتراق در بهترین حالت هستند و در درصد‌های بالاتر، کاهش Soot در مقابل افزایش NO به صرفه نیست.

در پژوهشی با هدف کاهش آلاینده‌های خروجی موتور، تأثیر غنی‌سازی هوای ورودی با اکسیژن و رطوبت‌زنی توسط کاپوسوز و همکاران [۶] بررسی شد. غلظت اکسیژن هوای ورودی از ۲۱ به ۲۵ درصد با گام ۲ افزایش یافت که موجب بهبود احتراق، افزایش راندمان حرارتی و کاهش انتشار HC و CO شد، اما افزایش دمای سیلندر باعث افزایش قابل توجه NO گردید. برای کاهش این اثر، رطوبت نسبی هوای ورودی از ۳۵ به ۶۵ درصد و سپس ۸۵ درصد افزایش داده شد که موجب کاهش ۴ درجه‌ای دمای آن از طریق سرمایش تبخیری شد.

ونگ و همکاران [۷] به بررسی تأثیر نسبت‌های مختلف بازگردانی گازهای خروجی<sup>۲</sup> (EGR) بر ویژگی‌های دوده در احتراق دوگانه‌سوز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش نسبت EGR، واکنش‌پذیری اکسیداسیون دوده را کاهش داده و دمای باز تولید فیلترهای ذرات دیزل را افزایش می‌دهد. همچنین، قطر متوسط ذرات اولیه دوده با افزایش EGR افزایش یافته و ساختار آن به سمت گرافیتی‌تر شدن میل می‌کند. تأثیر EGR بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل تک‌سیلندر که با مخلوطی از استر متیلی پونگامیا و نانو ذرات آلومینیوم اکسید کار می‌کند، توسط شانموگام و همکاران [۸] بررسی شد. در این تحقیق، استر متیلی پونگامیا با ۲۵ درصد حجمی با دیزل معدنی ترکیب شده و نانو ذرات آلومینیوم اکسید با غلظت

<sup>2</sup> Exhaust Gas Recirculation

<sup>1</sup> Particulate Matter

ترمزی<sup>۲</sup> (BTE) موتور ۲۳/۸٪ بود. در غلظت اکسیژن بهینه، تزریق آب به میزان ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ انجام شد. مقدار مطلوب تزریق آب به میزان ۲٪ بدست آمد. برای تعیین غلظت اکسیژن بهینه و شرایط تزریق آب بهینه یک مطالعه مقایسه‌ای انجام گرفت؛ همچنین انتشار HC و CO به طور قابل توجهی با غنی سازی با اکسیژن کاهش یافت.

پاچیانان و همکاران [۱۳] تأثیر غنی‌سازی هیدروژن به میزان ۴ lit/min بر عملکرد، آلایندگی و ویژگی‌های احتراق موتور دیزلی با استفاده از مخلوط‌های دیزل و n-پنتانول را بررسی کردند تا عملکرد موتور را بهبود بخشیده، انتشار کربن را کاهش داده و مصرف سوخت دیزل فسیلی را در کاربردهای موتور احتراق داخلی به حداقل برسانند. نتایج نشان داد که افزودن هیدروژن به طور قابل توجهی عملکرد موتور را با افزایش کارایی حرارتی ۴ درصد و کاهش مصرف سوخت ۱۰ درصد بهبود بخشید. با این حال، محتوای بالاتر H<sub>2</sub> منجر به افزایش انتشار NO شد.

با توجه به مرور پژوهش‌های پیشین، اغلب مطالعات پیشین به بررسی جداگانه‌ی اثر غنی‌سازی با اکسیژن یا استفاده از EGR پرداخته‌اند و کمتر به تحلیل ترکیبی این دو روش، به ویژه در شرایط کاری مختلف موتور توجه شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر شبیه‌سازی دقیق ترکیب همزمان غنی‌سازی هوای ورودی با اکسیژن و بازگردانی گازهای خروجی، در دو دور موتور متفاوت، به بررسی پارامترهای کلیدی عملکرد، آلاینده‌ها، توان و مصرف سوخت پرداخته است. از سوی دیگر، مقایسه‌ی سیستماتیک بین دو روش EGR گرم و سرد در کنار غنی‌سازی با اکسیژن و تحلیل دقیق اثرات آن‌ها بر کاهش یا افزایش آلاینده‌ها و توان خروجی، از نوآوری‌های اصلی این مطالعه به شمار می‌رود؛ همچنین، با توجه به استفاده از مدل دقیق AVL-FIRE و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی، این مطالعه قابلیت تعمیم به شرایط واقعی موتورهای دیزلی را دارد.

## ۲- معادلات حاکم

شکل کلی معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و بقای گونه‌ها به ترتیب به صورت زیر است (معادلات ۱ تا ۴).

۱۰۰ ppm به آن افزوده شد. آزمایش‌ها با سوخت دیزل، B25 و B25A100 در نرخ‌های مختلف EGR (۱۰ تا ۳۰ درصد) انجام شد. نتایج نشان داد که ترکیب نانو ذرات با B25 و ۲۰ درصد EGR باعث کاهش ۴/۹۵ درصدی NO در مقایسه با B25 شد. با این حال، میزان هیدروکربن‌های نسوخته، مونوکسید کربن و دود افزایش یافت.

پیتارچ [۹] به مطالعه‌ی تأثیر سیستم‌های مختلف EGR در موتورهای احتراقی با تزریق مستقیم، سوپرشارژ و توزیع متغیر پرداخت. این موتور، که فاقد EGR است در کاربردهای حمل و نقل خودروبی استفاده می‌شود. در این تحقیق کارایی موتور با استفاده از سیستم EGR و شرایط سوخت استوکیومتری، افزایش یافت.

استفاده از روش EGR همراه با توربوشارژ دو مرحله‌ای در موتورهای دیزلی دریایی توسط ژنگ و همکاران [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفت. هدف اصلی این روش‌ها کاهش انتشار NO و بهبود مصرف سوخت است. برای این منظور، مدل یک بعدی از موتور دیزلی با سیستم ترکیبی EGR و توربو شارژ دو مرحله‌ای با استفاده از نرم‌افزار GT-Power ایجاد شد. نتایج نشان داد که ترکیب این سیستم‌ها می‌تواند عملکرد بهینه‌ای در کاهش مصرف سوخت و NO ایجاد کند. در نهایت استفاده از مدل شبکه عصبی و الگوریتم NSGAI برای بهینه‌سازی چند هدفه و چند پارامتری، نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشت که در آن مصرف سوخت به میزان ۳/۵۷ و NO به میزان ۷۵/۲۸ درصد نسبت به نتایج تجربی موتور اصلی کاهش یافت. ونگ و همکاران [۱۱] در پژوهشی به بررسی احتراق پاشش دیزل تحت شرایط غنی شده از اکسیژن با رقیق‌سازی آرگون در یک محفظه احتراق حجم ثابت پرداختند. نتایج نشان داد که جایگزینی نیتروژن در هوا با آرگون باعث کاهش ۵۰ درصدی طول شعله، افزایش دمای شعله به میزان ۳۰۰ K و افزایش غلظت دوده گردید.

کومار و همکاران [۱۲] تحقیقاتی در مورد اثر ترکیبی فن آوری‌های غنی‌سازی با اکسیژن و تزریق آب بر عملکرد موتور، انتشار آلاینده‌ها و احتراق موتور دیزل با سوخت روغن گیاهی انجام دادند. آزمایش‌ها با سوخت روغن ماهوا<sup>۱</sup> و با غلظت‌های مختلف اکسیژن: ۲۱/۸٪، ۲۲/۴٪، ۲۳/۸٪ و ۲۴/۷٪ حجمی انجام شد. غلظت اکسیژن بهینه بر اساس بازده حرارتی

<sup>2</sup> Brake Thermal Efficiency

<sup>1</sup> Mahua Oil

که در این روابط  $u_{id}$  سرعت ذره،  $u_{ig}$  سرعت گاز،  $D_p$  تابع درگ،  $g_i$  شتاب گرانشی و  $C_D$  ضریب درگ است.

مدل ترکیبی کلوین هلمهولتز-رایلی تیلور که از بروزترین و کاملترین مدل‌های ارائه شده به منظور شرح جدایش و تمیزاسیون قطرات است، استفاده گردید [۱۵]. در طی فرایند جدایش، نرخ تغییر شعاع قطرات یک دسته بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r - r_c}{\tau_{KH}} \quad (9)$$

که در آن  $\tau_{KH}$  مدت زمان جدایش،  $r$  شعاع فعلی قطره و  $r_c$  شعاع هدف یا شعاع تعادلی است که قطره پس از شکست به آن میل می‌کند.

برای مدل‌سازی انتقال حرارت و تبخیر قطرات از مدل داکوویتز استفاده شد [۱۶]. در این مدل شار حرارتی منتقل شده از گاز به قطره و عدد ناسلت بر اساس روابط زیر به دست می‌آید:

$$Q = D_a \pi \lambda N u (T_\infty - T_s) \quad (10)$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (11)$$

دمای مرجع برای بدست آوردن خواصی مانند لزجت بخار، گرمای ویژه و... دمای متوسط بین دمای سیال و دمای سطح قطره است.

برای محاسبات مربوط به اثر متقابل بین اسپری و دیواره از مدل نابر و ریتز [۱۷] استفاده شد. در این مدل اگر عدد وبر قطره‌ی برخورد کننده از عدد وبر بحرانی کمتر باشد، قطره حالت برگشت‌پذیری دارد و جهت مولفه‌ی مماسی سرعت قطره بعد از برخورد تغییر نخواهد کرد، اما جهت مولفه‌ی نرمال سرعت، معکوس خواهد شد و مقدار مولفه‌ی نرمال سرعت برگشتی، تابعی از عدد وبر قبل و بعد از برخورد است. مقدار عدد وبر به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$We = \frac{\rho_D D_a U_n^2}{\sigma} \quad (12)$$

پدیده‌ی خوداشتعالی به کمک مدل شل [۱۸] پیاده‌سازی گردید. اشتعال خود به خودی هیدروکربن یک فرایند زنجیره‌ای است که شامل چهار دسته واکنش زنجیری به نام واکنش های آغازین، زنجیری انتشار، زنجیره‌ی شاخه دار شدن و

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) = -\nabla \cdot (p \mathbf{u}) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \rho \sum_{k=1}^N I_k h_k + \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \dot{E}_{ex} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_k) = -\nabla \cdot I_k + \dot{\omega}_k \quad (4)$$

که در آن  $t$  زمان،  $\mathbf{u}$  بردار سرعت،  $\rho$  چگالی،  $\boldsymbol{\tau}$  تانسور تنش،  $E$  انرژی داخلی مخلوط،  $T$  دما،  $P$  فشار،  $I_k$  شار نفوذی آشفته گونه  $k$  ام،  $h_k$  آنتالپی مخصوص گونه  $k$  ام،  $\dot{E}_{ex}$  انرژی ورودی سیستم،  $Y_k$  کسر جرمی گونه  $k$  ام و  $\dot{\omega}_k$  نرخ تولید گونه  $k$  ام است. معادلات توربولانس به کمک مدل  $k - \varepsilon$  پیاده‌سازی شده که در آن  $k$  انرژی جنبشی آشفستگی و  $\varepsilon$  نرخ نابودی آشفستگی است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + \tau^t : \nabla \mathbf{u} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} \tau^t : \nabla \mathbf{u} - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

به منظور شبیه‌سازی اسپری سوخت باید پدیده‌ی جریان دو فازی مدل گردد که نیاز به حل عددی معادلات حاکم برای فاز گازی و فاز مایع به طور همزمان دارد. رابطه‌ی قراردادی زیر برای شتاب ذره مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\frac{du_{id}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{1}{D_p} |u_{ig} - u_{id}| (u_{ig} - u_{id}) + \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_d} \right) g_i \quad (7)$$

با انتگرال گیری از معادله‌ی فوق می‌توان سرعت ذره را به دست آورد و با انتگرال‌گیری از معادله سرعت بردار موقعیت لحظه‌ای به شکل زیر در می‌آید [۱۴]:

$$\frac{dx_{id}}{dt} = u_{id} \quad (8)$$

### ۳- شبیه‌سازی

در مقاله حاضر موتور دیزل پاشش مستقیم توربوشارژر به همراه غنی‌سازی با اکسیژن و تعبیه سیستم EGR به منظور کاهش آلاینده‌ها نسبت به یک موتور معمولی در شرایط مشابه با نرخ سوخت و مقدار سوخت یکسان شبیه‌سازی مسئله‌ی با استفاده از نرم‌افزار AVL-FIRE مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

در تمام شبیه‌سازی‌ها، نرخ تزریق سوخت و پارامترهای جرمی جریان ورودی ثابت در نظر گرفته شده‌اند تا نسبت هم‌ارزی ثابت باقی بماند؛ بنابراین تغییر درصد اکسیژن تنها به معنی افزایش غلظت اکسیژن در هوای ورودی با حفظ فشار کل ورودی است و اثر آن به صورت مستقیم بر مشخصات احتراق و آلاینده‌ها بررسی شده است.

ویژگی‌های اصلی موتور و مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

برای شبیه‌سازی احتراق دیزل و به منظور کاهش زمان محاسبات، مرحله مکش و تخلیه لحاظ نشده است و محاسبات از لحظه بسته شدن دریچه ورودی<sup>۴</sup> (IVC) تا لحظه باز شدن سوپاپ خروجی<sup>۵</sup> (EVO) انجام شده است؛ همچنین برای کاهش زمان جهت تولید مش از هندسه ساده شده استفاده شده و جزئیاتی مانند دریچه‌ها نیز در نظر گرفته نشده است. برای محفظه احتراق، محور متقارن و چرخشی در نظر گرفته شده و چون دبی جرم سوخت برای تمام سوراخ‌های انژکتور مشابه است، تنها  $\frac{1}{7}$  محفظه احتراق شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱- پارامترهای اصلی موتور دیزل مورد مطالعه در پژوهش حاضر

| پارامترهای موتور             | شرح                                |
|------------------------------|------------------------------------|
| نوع موتور                    | دیزل پاشش مستقیم، خطی <sup>۴</sup> |
| مدل موتور                    | سیلندر ۴ زمانه آب خنک              |
| قطر × طول کورس               | AVL 5402                           |
| طول شاتون                    | ۱۲۰ × ۱۰۵ میلی‌متر                 |
| حجم جایجایی                  | ۲۰۰ میلی‌متر                       |
| تعداد سوراخ‌های نازل انژکتور | ۴/۲ لیتر                           |
| نسبت تراکم                   | ۷ عدد                              |
|                              | ۱۶:۱                               |

زنجیره‌ی پایانی است. واکنش‌های زنجیری آغازین، رادیکال‌های اولیه را از مولکول‌های پایدار سوخت تولید می‌کنند:



این واکنش به دلیل این که مولکول‌های پایدار در آن نقش دارند، به آرامی پیش می‌رود. سپس اگر غلظت مشخص برای رادیکال‌ها بدست آید، واکنش‌های زنجیری انتشار و شاخه دار شدن، رادیکال‌های اضافی را تشکیل می‌دهد. این واکنش‌ها تعداد رادیکال‌ها را افزایش داده و شتاب قابل ملاحظه‌ای در واکنش‌ها ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به انفجار می‌شود. در این واکنش  $RH$  سوخت هیدروکربنی و  $R$  رادیکال سوخت است.

در پژوهش حاضر از مدل گسترش منسجم شعله<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی احتراق استفاده شده است [۱۹]. این مدل برای احتراق پیش مخلوط غیرهمگن مناسب است و از روش متوسط شرطی<sup>۲</sup> بهره می‌برد. در این مدل فرآیند احتراق، به دو بخش تجزیه می‌شود. بخش اول، احتراق پیش‌آمیخته که در آن معادله چگالی سطح شعله حل می‌شود و بخش دوم که در آن مدل تجزیه گردابی<sup>۳</sup> اتخاذ شده است.

برای بررسی سینتیک تشکیل  $NO_x$  از مدل زلدویچ استفاده شد [۲۰]. در این مدل تغییر غلظت اکسید نیتروژن بر حسب زمان توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d[NO]}{d[t]} = 2k_f[O_2]^u[N_2]^b \quad (۱۴)$$

نرخ واکنش معادله به صورت زیر است:

$$k_f = AT^{1/2} \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (۱۵)$$

در پژوهش حاضر از مدل هیروپاسیو برای مدل‌سازی تشکیل و از مدل کندی و مگنسون به منظور مدل‌سازی اکسایش دوده استفاده شده است. بر این اساس نرخ تغییر در جرم دوده برابر با اختلاف نرخ تشکیل دوده و نرخ اکسایش آن است [۲۱]:

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt} \quad (۱۶)$$

که در آن  $M_{sf}$  جرم دوده‌ی تشکیل شده،  $M_{so}$  جرم دوده‌ی اکسید شده و  $M_s$  جرم خالص دوده است.

<sup>۴</sup> Inlet Valve Closing

<sup>۵</sup> Exhaust Valve Opening

<sup>۱</sup> Extended Coherent Flame Model (ECFM)

<sup>۲</sup> Conditional Average Technique

<sup>۳</sup> Eddy Break-up

جدول ۳- شرایط مرزی دیواره‌ها

| شرایط مرزی |            | FIRE        | مرز      |
|------------|------------|-------------|----------|
| شرح        | نوع        |             |          |
| مش         | دیواره     | BND_Piston  | پیستون   |
| سرعت       | دیواره     | BND_Liner   | بوش      |
| -          | مقارن      | BND_Axis    | محورها   |
| دوره‌ای    | ورودی/خروج | BND_Segment | قطعاتها  |
| مش         | دیواره     | BND_Comp_V  | بدنه     |
| سرعت       | دیواره     | BND_Head    | سرسیلندر |

جدول ۳- دمای اولیه‌ی دیواره‌های مرزی

| مرز        | FIRE       | دما (K) |
|------------|------------|---------|
| پیستون     | BND_Piston | ۵۷۰     |
| بوش سیلندر | BND_Liner  | ۴۷۰     |
| سرسیلندر   | BND_Head   | ۵۷۰     |

#### ۴- نتایج

استقلال از شبکه: در این مقاله، شبیه‌سازی با استفاده از قسمت ESE-DIESEL نرم افزار AVL-FIRE انجام گرفته و استقلال از شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ به این صورت که مطابق شکل ۲ سه شبکه ۴۰۶۳۶، ۵۲۰۲۴ و ۶۶۶۷۶ سلولی در نظر گرفته شده است؛ نتایج اختلاف ناچیز بین دو شبکه ۵۲۰۲۴ و ۶۶۶۷۶ سلولی را نشان می‌دهد، لذا جهت کاهش زمان محاسبات کلیه نتایج با شبکه ۵۲۰۲۴ سلولی اجرا شده است.

اعتبارسنجی: برای بررسی صحت نتایج، تغییرات فشار متوسط سیلندر (شکل ۳)، مقادیر متوسط کسر جرمی NO (شکل ۴) و دوده (شکل ۵) حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳] مقایسه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با دقت نسبتاً خوبی بر هم مطابقت دارد.

|                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| زمان بسته شدن سوپاپ ورودی | ۵۶۰ CA                     |
| زمان باز شدن سوپاپ خروجی  | ۸۵۰ CA                     |
| نوع ورودی هوا             | توربوشارژ- سرد شونده داخلی |
| حداکثر توان               | ۶۰ kW- ۲۲۰۰ rpm            |
| فشار ورودی                | ۲،۵۶ bar                   |
| دمای ورودی                | ۳۸۶ K                      |
| نوع سوخت مصرفی            | DEISEL1 (C13H23)           |

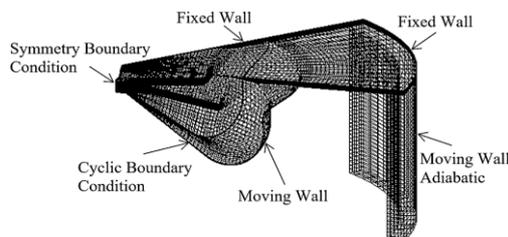
جدول ۲- مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

| نوع پدیده            | مدل مورد استفاده          |
|----------------------|---------------------------|
| مدل شکست             | کلوین-رایلی [۱۵]          |
| مدل تبخیر            | دوکوویتز [۱۶]             |
| مدل برخورد با دیواره | وال جت نابر و ریتز [۱۷]   |
| مدل اشتعال           | شل [۱۸]                   |
| مدل احتراق           | مدل گسترش منسجم شعله [۱۹] |
| مدل تولید NO         | زلدوویچ [۲۰]              |
| مدل تولید دوده       | هیروواسو [۲۱]             |
| مدل آشفتنگی          | $k - \epsilon$ [۲۲]       |

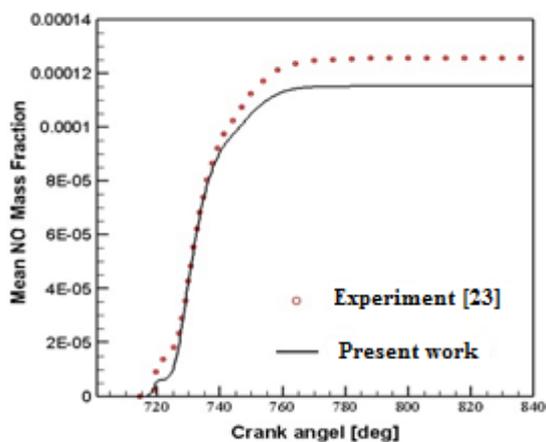
#### شرایط مرزی و اولیه:

در شبیه‌سازی باید مجموعه‌ای از شرایط مرزی مطابق شکل ۱ برای بستن دستگاه معادلات اعمال شوند. جزئیات این شرایط در جدول ۳ و جدول ۴ آمده است.

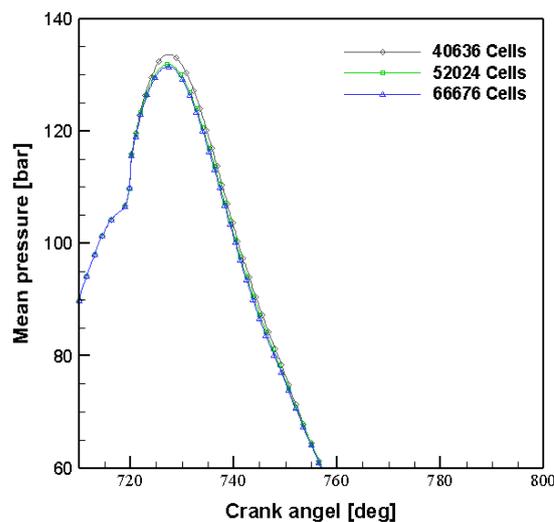
از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های شبیه‌سازی می‌توان به ساده‌سازی هندسه به صورت تک سیلندر با فرض تقارن محوری، مدل‌سازی دیواره‌های سیلندر به صورت آدیاباتیک، استفاده از مدل احتراق نیمه‌تجربی Shell که دقت متوسطی در پیش‌بینی نرخ آزادسازی انرژی دارد و همچنین عدم اعتبارسنجی مستقیم آلاینده‌ها به دلیل نبود داده تجربی مناسب اشاره کرد. علاوه بر این، در تمام حالات شبیه‌سازی، نسبت هم‌ارزی ثابت فرض شده است تا اثرات مجزای اکسیژن و EGR بررسی شوند که این موضوع ممکن است با شرایط عملیاتی برخی موتورها متفاوت باشد.



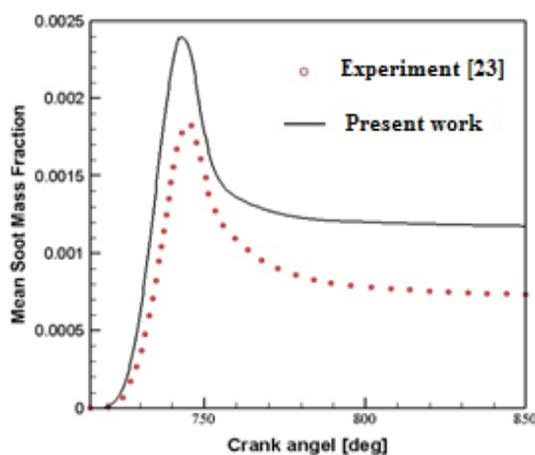
شکل ۱- مش‌بندی و شرایط مرزی  $\frac{1}{7}$  محفظه احتراق.



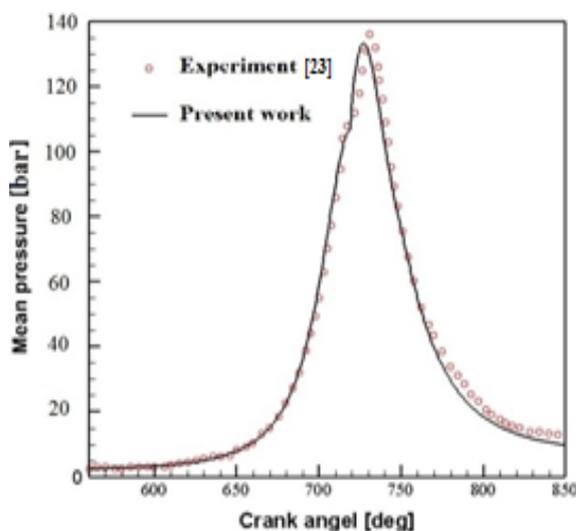
شکل ۴- مقایسه مقادیر متوسط کسر جرمی NO کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۲۳]



شکل ۲- تغییرات فشار متوسط بر حسب زاویه میل لنگ برای مش بندی های مختلف



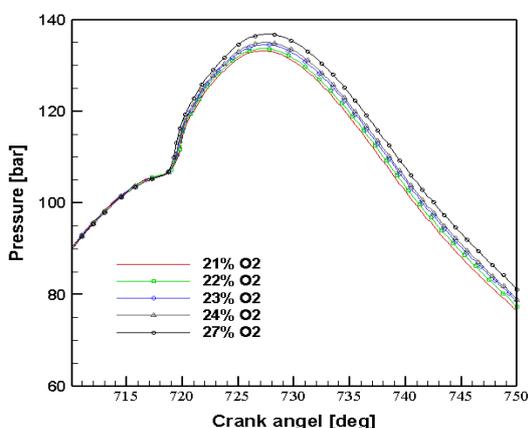
شکل ۵- مقایسه مقادیر متوسط کسر جرمی دوده کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۲۳].



شکل ۳- مقایسه مقادیر فشار متوسط سیلندر در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۲۳].

نتایج غنی سازی هوا با اکسیژن: شکل ۶ تغییرات دما بر حسب زاویه میل لنگ برای درصدهای مختلف غنی سازی اکسیژن نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مقدار ماکزیمم دما با افزایش درصد غنی سازی افزایش می یابد. با افزایش درصد اکسیژن، مقدار اکسیژن موجود برای احتراق بیشتر می شود که موجب احتراق کامل تر می گردد، زیرا سوخت به طور کامل تر مصرف شده و انرژی بیشتری تولید می شود. همچنین با افزایش اکسیژن، فشار داخل سیلندر نیز به دلیل احتراق شدیدتر، افزایش یافته که خود موجب بالا رفتن دما می شود. در این شرایط، انرژی بیشتری در دما و فشار بالا آزاد

فشار که در نزدیکی نقطه‌ی مرگ بالا اتفاق می‌افتد، بارده ترمودینامیکی را افزایش می‌دهد و تغییر موقعیت آن بر حسب زاویه میل‌لنگ، تأثیر مستقیم بر توان تولیدی دارد.

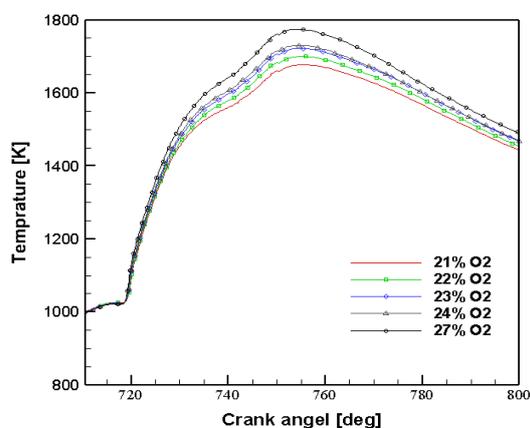


شکل ۷- تغییرات فشار بر حسب زاویه‌ی میل‌لنگ با درصد‌های مختلف غنی‌سازی

انتشار دوده که یکی از آلاینده‌های مهم زیست محیطی است در شکل ۸ مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییرات دوده بر حسب زاویه‌ی میل‌لنگ با افزایش درصد غنی‌سازی کاهش یافته است. افزایش اکسیژن در مخلوط باعث بهبود احتراق و تکمیل شدن فرایند سوختن می‌شود. در شرایط غنی‌سازی اکسیژن، سوخت به طور کامل‌تری می‌سوزد؛ زیرا اکسیژن کافی برای واکنش کامل با سوخت وجود دارد. این احتراق کامل‌تر باعث کاهش تشکیل ذرات دوده می‌شود؛ زیرا دوده زمانی تشکیل می‌شود که سوخت به صورت ناقص بسوزد و گازهای حاصل از احتراق نتوانند به طور کامل به محصولات نهایی تبدیل شوند. با افزایش درصد غنی‌سازی، به جای انتشار دوده، بیشتر دی‌اکسید کربن و بخار آب تولید می‌شود. علاوه بر این، غنی‌سازی باعث بهبود سرعت شعله و توزیع یکنواخت‌تر دمای احتراق شده که موجب کاهش نقاط سرد و کاهش تشکیل دوده می‌گردد؛ بنابراین با افزایش درصد غنی‌سازی، شرایط احتراق بهبود یافته و این منجر به کاهش انتشار دوده می‌شود. دوده در زوایای پس از نقطه‌ی مرگ بالا (معمولاً بین ۱۰ تا ۴۰ درجه) تشکیل می‌شود. با افزایش درصد اکسیژن دامنه‌ی زمانی تشکیل دوده کوتاه‌تر شده و مقدار پیک کاهش یافته که نشانه‌ی بهبود اکسیداسیون دوده در انتهای سیکل است.

می‌شود، زیرا واکنش‌های احتراقی در دماهای بالاتر سریع‌تر و با نرخ بالاتری اتفاق می‌افتد.

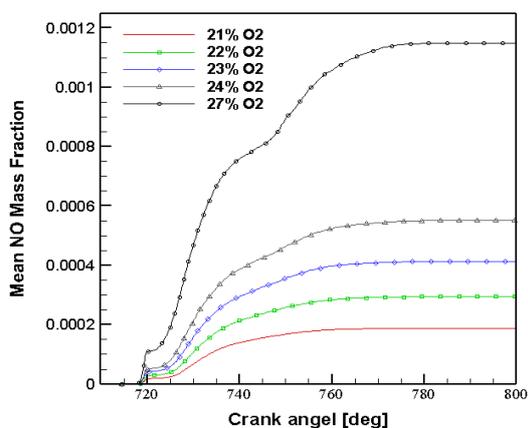
با افزایش درصد اکسیژن، نقطه‌ی وقوع دمای ماکزیمم به سمت زوایای پایین‌تر میل‌لنگ (قبل‌تر از نقطه مرگ بالا) جابجا شده است. این تغییر نشان دهنده‌ی کاهش تأخیر احتراق و پیش‌افتادگی فاز سوختن سریع است. همچنین دامنه‌ی دمای بالا (فاصله زاویه‌ای که دما از آستانه‌ی بالا عبور می‌کند) افزایش یافته که بیانگر تداوم بیشتر احتراق در ناحیه پرنرژی است.



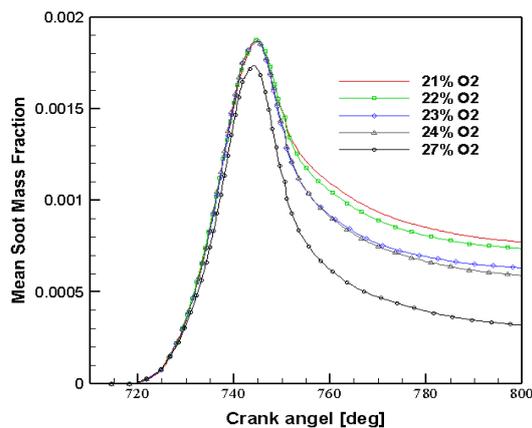
شکل ۶- تغییرات دما بر حسب زاویه‌ی میل‌لنگ با درصد‌های مختلف غنی‌سازی

تغییرات فشار بر حسب زاویه‌ی میل‌لنگ با درصد‌های مختلف غنی‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ماکزیمم فشار در نتیجه‌ی افزایش درصد غنی‌سازی اکسیژن اتفاق می‌افتد. علت این افزایش آن است که با افزایش اکسیژن در مخلوط، احتراق سریع‌تر و کامل‌تری رخ داده، سرعت انتشار شعله در سیلندر افزایش یافته، انرژی بیشتری در مدت زمان کوتاه‌تری آزاد شده و در نتیجه‌ی این افزایش سریع انرژی، فشار در سیلندر افزایش می‌یابد. در این شرایط گازهای حاصل از احتراق با سرعت بالاتری گسترش یافته، به دیواره‌های سیلندر فشار وارد می‌کند و در لحظات اولیه احتراق، سوخت به طور کامل‌تر و سریع‌تر می‌سوزد.

پیش‌روی نقطه‌ی ماکزیمم فشار با افزایش درصد اکسیژن در شکل ۷ دیده می‌شود که مشابه منحنی دما (شکل ۶) است. اما شیب نمودار فشار نیز بیشتر شده، که بیانگر احتراق سریع‌تر و آزادسازی ناگهانی انرژی است. در این حالت نقطه‌ی ماکزیمم



شکل ۹- تغییرات انتشار NO بر حسب زاویه‌ی میل لنگ با درصد‌های مختلف غنی‌سازی



شکل ۸- تغییرات انتشار دوده بر حسب زاویه‌ی میل لنگ با درصد‌های مختلف غنی‌سازی

توجه به این نکته نیز اهمیت دارد که نمودار NO روند افزایشی دارد و با افزایش درصد اکسیژن نقطه‌ی آغاز رشد NO زودتر شروع می‌شود؛ همچنین شیب رشد و مقدار نهایی NO به وضوح افزایش یافته است. به عبارتی سرعت رشد NO عمدتاً پس از پیک دما (در حدود ۱۰ تا ۲۵ درجه بعد از نقطه‌ی مرگ بالا) افزایش می‌یابد.

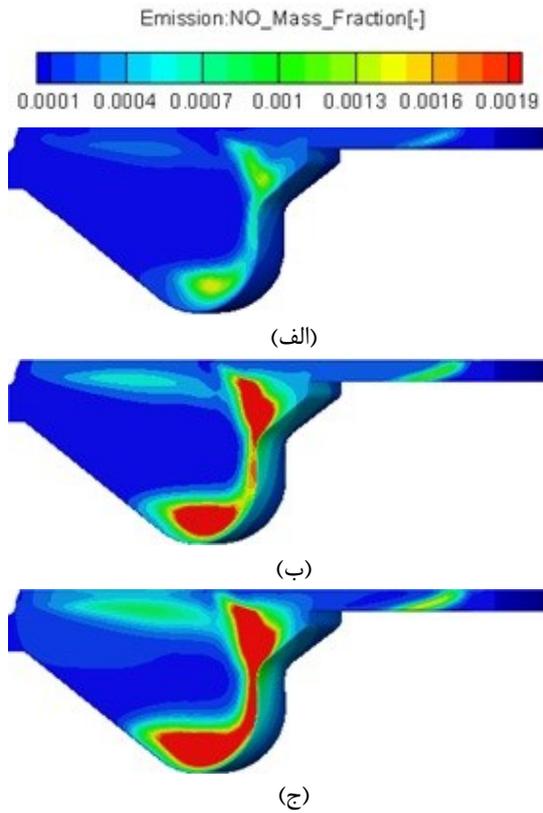
شکل ۱۰، کانتور دمایی محفظه احتراق در لحظه ۱۶ درجه بعد از نقطه مرگ بالا را برای درصد‌های مختلف غنی‌سازی نشان می‌دهد. با افزایش مقدار اکسیژن ورودی حداکثر دمای داخل سیلندر افزایش یافته و ناحیه با دمای بالا گسترش می‌یابد؛ همچنین مشاهده می‌شود که مقدار اکسیژن ۲۷٪ بیشترین اثر را روی افزایش دما دارد. مطابق شکل ۱۱، توزیع غلظت NO در سیلندر تحت تاثیر افزایش مقدار اکسیژن هوای ورودی است. در غنی‌سازی اکسیژن، نرخ تولید NO در ناحیه دما بالا به سرعت افزایش می‌یابد.

در خصوص شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بایستی دقت داشت که در درصد‌های بالاتر اکسیژن (۲۴٪ و ۲۷٪)، ناحیه‌ی دمای بالا وسیع‌تر شده است. توزیع NO نیز در همان نواحی متمرکز است و با دما هم‌پوشانی دارد. با افزایش درصد اکسیژن، نقاط داغ محلی گسترده‌تر و شدیدتر شده‌اند که این موضوع با افزایش پیک NO هم‌خوانی دارد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مستقیماً از خروجی گرافیکی نرم‌افزار AVL-FIRE استخراج شده‌اند. این کانتورها به کمک ماژول Post-Processor در همین نرم‌افزار و با فعال‌سازی گزینه‌های ثبت متغیرهای لحظه‌ای در شبکه محاسباتی تهیه شده‌اند.

شکل ۹ میزان انتشار NO بر حسب زاویه‌ی میل لنگ برای درصد‌های مختلف غنی‌سازی هوا با اکسیژن را نشان می‌دهد. با افزایش درصد غنی‌سازی، مقدار انتشار NO به دلیل چند عامل اصلی افزایش می‌یابد. ابتدا غنی‌سازی هوا با اکسیژن باعث افزایش دمای احتراق می‌شود که پیش‌تر اشاره شد. وقتی غلظت اکسیژن بیشتر شود، سوخت و اکسیژن بهتر و سریع‌تر مخلوط شده و این امر منجر به افزایش دمای احتراق می‌شود. تولید NO به شدت به دمای احتراق وابسته است و در دماهای بالاتر، واکنش‌های شیمیایی که منجر به تشکیل NO می‌شود، سرعت بیشتری پیدا می‌کند. دومین عامل، افزایش نسبت اکسیژن به سوخت است. با غنی‌سازی اکسیژن، نسبت اکسیژن به سوخت افزایش می‌یابد که باعث احتراق کامل‌تر و سریع‌تر سوخت می‌شود. این احتراق سریع‌تر باعث می‌شود که دمای کانونی (نقطه داغ) بیشتر شود و واکنش‌های نیتروژن با اکسیژن در نواحی داغ تقویت گردد که منجر به تولید بیشتر NO می‌شود. علاوه بر این، در دماهای بالاتر، واکنش‌های شیمیایی مختلفی برای تشکیل NO رخ می‌دهند. عامل دیگر، سرعت بالاتر احتراق است که به واسطه‌ی غنی‌سازی اکسیژن حاصل می‌شود. این افزایش سرعت احتراق باعث می‌شود که سوخت سریع‌تر بسوزد و در فرآیند احتراق، زمان بیشتری برای انجام واکنش‌های تولید NO فراهم شود. در نهایت، غنی‌سازی اکسیژن می‌تواند بر سایر فرایندهای جانبی احتراق نیز تأثیر بگذارد، مانند پاشش سوخت یا تولید رادیکال‌های آزاد، که این تغییرات نیز به طور غیر مستقیم بر افزایش تولید NO تأثیر دارد.

اکسیژن است که علت آن پیش‌تر توضیح داده شد. لازم به ذکر است که کلیه نتایج این قسمت در دور ۱۴۰۰ rpm استخراج شده‌است.



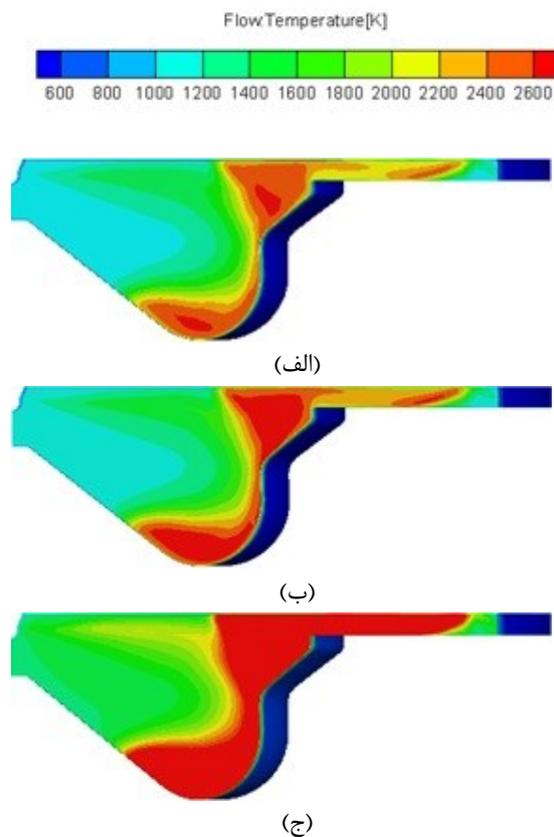
شکل ۱۱- کانتور NO منتشر شده در محفظه احتراق در  $16^\circ CA$  بعد از نقطه مرگ بالا و درصد اکسیژن (الف) ۲۱٪، (ب) ۲۴٪، (ج) ۲۷٪

جدول ۴ بیشترین تغییرات دما، فشار، انتشار دوده و NO بر حسب افزایش درصد غنی‌سازی

| ردیف | غنی‌سازی (%) | تغییر در بیشترین مقدار (%) |        |               |       |
|------|--------------|----------------------------|--------|---------------|-------|
|      |              | (افزایش/کاهش)              |        | (افزایش/کاهش) |       |
|      |              | دما ↑                      | فشار ↑ | دوده ↓        | NO ↑  |
| ۱    | ۲۱           | ۰٫۹                        | ۰٫۴    | ۳٫۳           | ۴۶٫۴  |
| ۲    | ۲۲           | ۲٫۲                        | ۰٫۸    | ۸٫۰           | ۱۳۲٫۱ |
| ۳    | ۲۳           | ۳٫۵                        | ۱٫۵    | ۲۱٫۱          | ۲۲۵٫۰ |
| ۴    | ۲۴           | ۴٫۰                        | ۱٫۹    | ۲۶٫۳          | ۳۳۳٫۹ |
| ۵    | ۲۷           | ۶٫۶                        | ۳٫۱    | ۶۰٫۱          | ۸۰۵٫۴ |

نتایج ترکیب غنی‌سازی هوا با اکسیژن و EGR: استفاده و افزایش درصد EGR باعث کاهش دما و فشار در

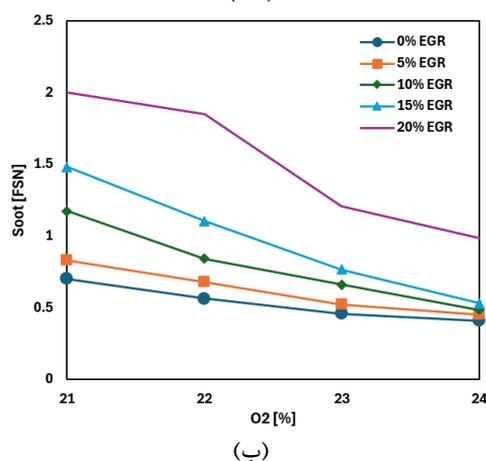
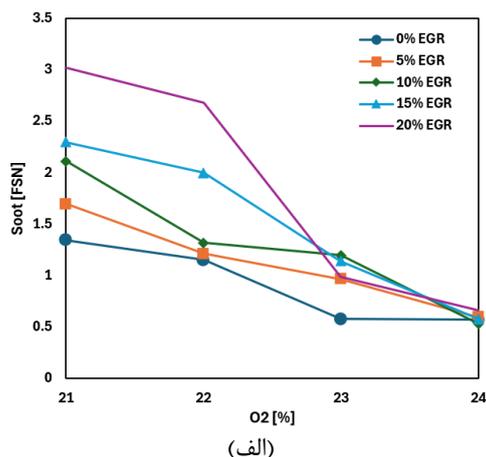
کانتورها در یک مقطع محوری-قطبی از دامنه‌ی احتراق (از مرکز نازل تا دیواره سیلندر) رسم شده‌اند. این صفحه دقیقاً از صفحه تقارن هندسی مدل (r-z plane) انتخاب شده‌است تا توزیع شعاعی-محوری دما و آلاینده‌ها به صورت واضح نمایش یابد. مقدار کانتورها در زاویه میل‌لنگ ۱۶ درجه بعد از نقطه مرگ بالا که نزدیک به زمان وقوع بیشینه دما و اوج واکنش‌ها است، ثبت شده‌اند. محدوده‌ی رنگی (color scale) به صورت خودکار بر اساس مینی‌م و ماکزیمم داده در آن لحظه نرمال‌سازی شده‌است.



شکل ۱۰- کانتور دما داخل محفظه احتراق در  $16^\circ CA$  بعد از نقطه مرگ بالا و درصد اکسیژن (الف) ۲۱٪، (ب) ۲۴٪، (ج) ۲۷٪

جدول ۴، بیشترین میزان افزایش یا کاهش پارامترهای مختلف بررسی شده در این قسمت را نسبت به حالت بدون غنی‌سازی نشان می‌دهد. نکات مهم و قابل توجه در نتایج این جدول، کاهش مطلوب حدود ۶۰ درصد دوده و همچنین افزایش نامطلوب حدود ۸۰۰ درصد NO با غنی‌سازی ۲۷ درصدی

زمان در دسترس برای تشکیل و رشد دوده را کاهش می‌دهد، بنابراین ذرات دوده فرصت کافی برای تجمع و گسترش پیدا نمی‌کنند. علاوه بر این، افزایش دور موتور معمولاً دمای محفظه‌ی احتراق را بالا می‌برد که به بهبود اکسیداسیون دوده و کاهش مقدار آن در گازهای خروجی کمک می‌کند.



شکل ۱۲- انتشار دوده بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف EGR گرم (الف) دور ۱۴۰۰rpm و (ب) دور ۱۸۰۰rpm

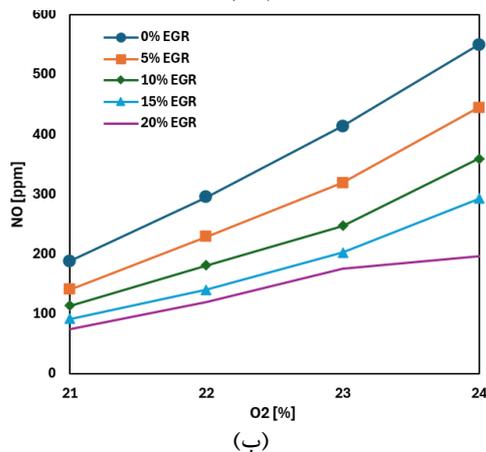
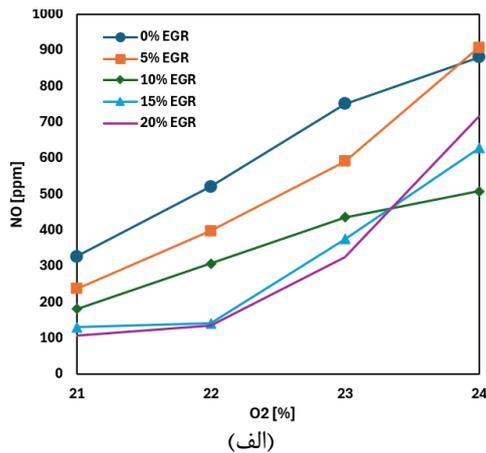
میزان انتشار دوده بر حسب درصد غنی‌سازی و مقادیر مختلف EGR سرد در شکل ۱۳ نشان داده شده است. روند کلی تغییرات انتشار دوده با EGR سرد مشابه تغییرات آن با EGR گرم است؛ اما یک نکته‌ی مهم در این جا آن است که مقادیر انتشار دوده با EGR سرد به مراتب کمتر از انتشار این آلاینده با EGR گرم است.

موتور دیزل می‌شود، زیرا با جایگزینی بخشی از هوای تازه با گازهای خروجی، میزان اکسیژن ورودی کاهش می‌یابد و احتراق ملایم‌تر صورت می‌گیرد. علاوه بر این، گازهای بازگردانی شده مانند  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  ظرفیت گرمایی بالاتری دارند و بخشی از انرژی احتراق را جذب می‌کنند که منجر به کاهش دمای احتراق می‌شود؛ همچنین، کاهش اکسیژن باعث کاهش نرخ آزادسازی حرارت و تأخیر در اشتعال شده و در نتیجه فشار ماکزیمم داخل سیلندر کاهش می‌یابد. با توجه به واضح بودن این موضوع، منحنی‌های فشار و دما در این بخش ارائه نمی‌شود و به طور خاص به بررسی تأثیر ترکیب روش‌های غنی‌سازی اکسیژن هوا و EGR بر انتشار آلاینده‌ها و همچنین توان و مصرف سوخت موتور در دوره‌های مختلف موتور پرداخته شده‌است.

شکل ۱۲ میزان انتشار دوده بر حسب درصد غنی‌سازی اکسیژن در دو دور موتور ۱۴۰۰rpm و ۱۸۰۰rpm را نشان می‌دهد. نتایج این شکل در ترکیب با روش EGR گرم ارائه شده و اثر آن در منحنی‌های انتشار دوده لحاظ شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی با افزایش درصد غنی‌سازی میزان انتشار دوده کاهش می‌یابد. این موضوع برای دوره‌های مختلف موتور و درصدهای مختلف EGR صادق است. خط چین مربوط به انتشار دوده در یک موتور دیزل بدون غنی‌سازی و EGR است. با افزایش محتوای اکسیژن هوای ورودی در ۱۴۰۰rpm، روند تولید دوده به شدت کاهش می‌یابد. در حالتی که نرخ EGR بالاست، ۲۰ درصد، این روند واضح‌تر است (شکل ۱۲-الف). وقتی غنی‌سازی اکسیژن به ۲۴ درصد افزایش می‌یابد، دوده‌ی خروجی بسیار پایین‌تر از موتور معمولی تحت هر درصد تزریق EGR است.

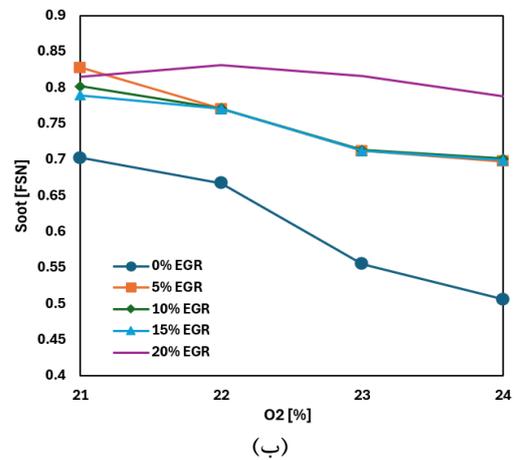
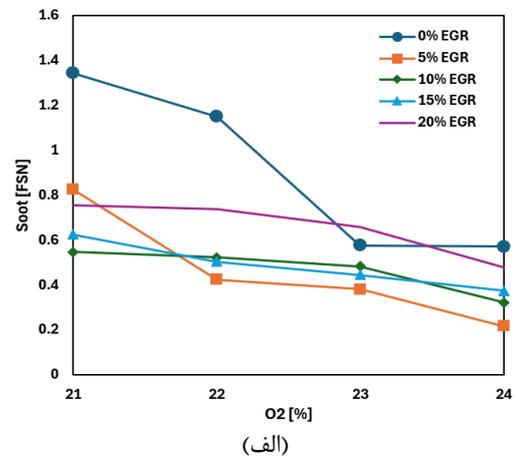
روند تغییر تولید دوده با تزریق EGR در دور ۱۸۰۰rpm نیز مشابه دور ۱۴۰۰rpm است (شکل ۱۲-ب). در این حالت احتراق در دمای پایین‌تر با محتوای اکسیژن بالا صورت گرفته و افزایش آلاینده‌ی دوده ناشی از به کارگیری EGR با ترکیب غنی‌سازی و EGR خنثی شده و به طور کلی در نهایت مقادیر انتشار دوده در دور ۱۸۰۰rpm (شکل ۱۲-ب) از مقادیر انتشار دوده در دور ۱۴۰۰rpm (شکل ۱۲-الف) کمتر است. با افزایش دور موتور نرخ توربولانس و آشفته‌گی در محفظه‌ی احتراق افزایش می‌یابد که موجب اختلاط بهتر سوخت و هوا و در نتیجه احتراق کامل‌تر می‌شود؛ همچنین، افزایش دور موتور

سرد با کاهش دوده، عملکرد بهتری نسبت به EGR گرم دارد. توجه به این نکته نیز اهمیت دارد که در دور ۱۴۰۰ rpm همگی منحنی‌های مربوط به تزریق EGR سرد زیر مقدار انتشار دوده در موتور معمولی بدون تزریق اکسیژن و EGR است در شکل ۱۴ به بررسی میزان انتشار اکسید نیتروژن پرداخته شده‌است.



شکل ۱۴- انتشار NO بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف EGR گرم (الف) دور ۱۴۰۰ rpm و (ب) دور ۱۸۰۰ rpm

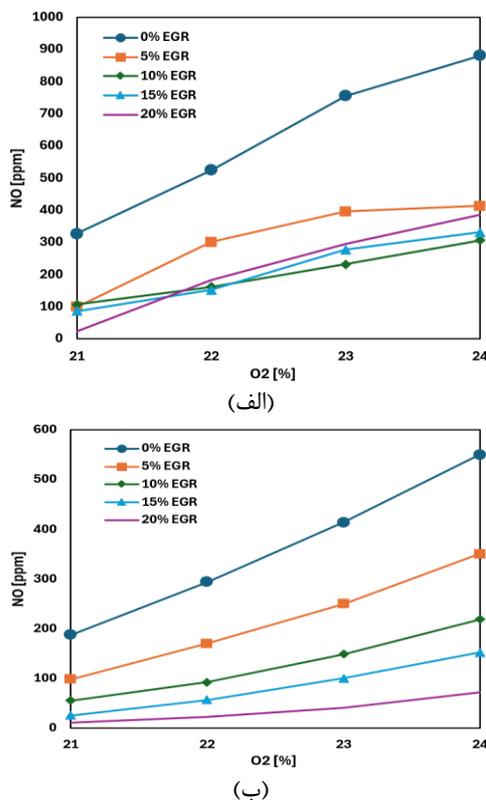
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اثر افزایش انتشار NO در هر دو دور (۱۴۰۰ rpm و ۱۸۰۰ rpm) با تزریق EGR گرم جبران شده و با افزایش درصد EGR میزان انتشار NO کاهش یافته است. در حالت غنی‌سازی ۲۱ درصد اکسیژن انتشار NO در تمام مقادیر تزریق EGR کمتر از موتور بدون تزریق است؛ اما افزایش درصد غنی‌سازی باعث افزایش NO به



شکل ۱۳- انتشار دوده بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف EGR سرد (الف) دور ۱۴۰۰ rpm و (ب) دور ۱۸۰۰ rpm

در یک موتور دیزلی، استفاده از EGR سرد نسبت به EGR گرم باعث کاهش انتشار دوده می‌شود، زیرا هوای ورودی را خنک‌تر کرده و چگالی آن را افزایش می‌دهد که منجر به ورود اکسیژن بیشتر به محفظه احتراق و بهبود فرایند احتراق می‌شود. در مقابل، EGR گرم با افزایش دمای هوای ورودی، چگالی آن را کاهش داده و احتمال تشکیل مناطق غنی از سوخت را افزایش می‌دهد که شرایط مساعدی برای تولید دوده فراهم می‌کند. علاوه بر این، در حضور EGR سرد، دمای کلی محفظه احتراق متعادل‌تر باقی مانده و فرآیند اکسیداسیون دوده در فاز پایانی احتراق بهتر انجام می‌شود، در حالی که در حالت تزریق EGR گرم، دوده‌ی بیشتری تشکیل شده و فرصت کافی برای اکسیداسیون کامل آن وجود ندارد؛ بنابراین EGR

درصد غنی‌سازی باعث افزایش توان موتور می‌گردد. از آن جا که اکسیژن نقش اساسی در واکنش احتراق دارد، افزایش غلظت آن موجب احتراق کامل‌تر سوخت، افزایش دمای شعله و بهبود نرخ آزادسازی انرژی می‌شود. این موضوع باعث افزایش فشار موثر متوسط اندیکاتوری و در نتیجه تولید توان بیشتر در موتور می‌گردد. علاوه بر این، در حضور اکسیژن بیشتر، تشکیل دوده کاهش یافته و میزان انرژی مفید حاصل از احتراق افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵- انتشار NO بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف EGR سرد (الف) دور ۱۴۰۰ rpm و (ب) دور ۱۸۰۰ rpm

بالتر از مقدار آن در موتور بدون تزریق شده است. بنابراین بایستی دقت کافی در انتخاب میزان غنی‌سازی با اکسیژن داشت تا انتشار NO زیاد نشود.

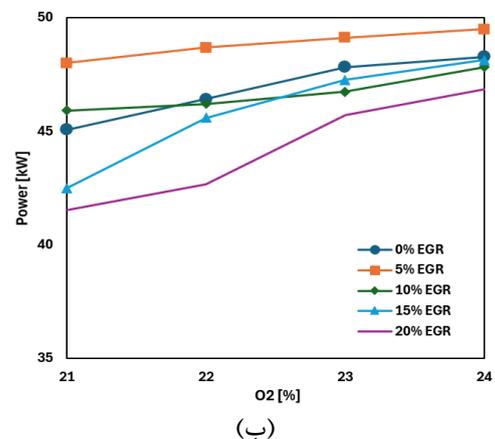
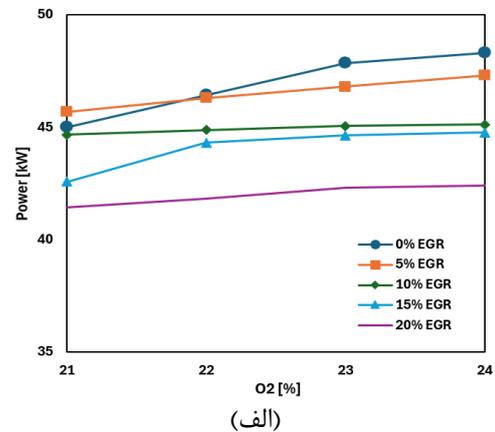
در این جا نیز مشابه آلاینده‌ی دوده، افزایش دور موتور از ۱۴۰۰ rpm (۱۴-الف) به ۱۸۰۰ rpm (۱۴-ب) باعث کاهش کلی انتشار NO شده است. افزایش دور موتور، زمان در دسترس برای احتراق و تشکیل NO را کاهش می‌دهد. در دوره‌های بالاتر زمان اقامت مخلوط هوا و سوخت در دمای بالا کوتاه‌تر شده و فرصت کافی برای واکنش‌های گرمایی تولید NO (مکانیزم زلدوویچ) فراهم نمی‌شود. علاوه بر این، در بسیاری از موتورهای دیزلی، افزایش دور موتور باعث بهبود اختلاط سوخت و هوا و یکنواخت‌تر شدن دما در محفظه‌ی احتراق می‌شود که از تشکیل مناطق داغ محلی که محل اصلی تولید NO هستند، جلوگیری می‌کند.

اثر EGR سرد بر موتور دیزلی همراه با غنی‌سازی اکسیژن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات انتشار NO بر حسب درصد غنی‌سازی مشابه EGR گرم است؛ اما نکته‌ی قابل توجه در این جا آن است که به طور کلی EGR سرد نسبت به EGR گرم کاهش بیشتری در انتشار NO ایجاد می‌کند، زیرا EGR سرد دمای احتراق را بیشتر کاهش می‌دهد. EGR سرد دمای شعله را پایین آورده که این کاهش دما تأثیر مستقیمی بر کاهش سرعت واکنش‌های گرمایی مکانیزم زلدوویچ دارد که مسیر اصلی تولید NO در موتورهای دیزلی است. در مقابل، EGR گرم، اگر چه هم چنان میزان اکسیژن را کاهش می‌دهد، اما به دلیل دمای بالاتر گازهای بازگردانی شده، اثر کاهشی کمتری بر دمای احتراق دارد و در نتیجه مقدار NO تولید شده بیشتر از حالتی است که از EGR سرد استفاده شود.

شکل ۱۶ توان موتور بر حسب درصد غنی‌سازی با اکسیژن در درصدهای مختلف EGR را نشان می‌دهد. با توجه به روند مشابه نتایج در دوره‌های ۱۴۰۰ rpm و ۱۸۰۰ rpm، نتایج دور موتور ۱۸۰۰ rpm ارائه شده است. اما باید در نظر داشت که به طور کلی توان موتور در دور ۱۸۰۰ rpm بیشتر از توان موتور در دور ۱۴۰۰ rpm است زیرا افزایش سرعت زاویه‌ای بر اساس رابطه‌ی  $P = T \times \omega$ ، باعث افزایش توان می‌گردد. به علاوه در دور بالا، احتراق و تنفس بهتر انجام شده و توان افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشخص است، افزایش

با دقت در شکل ۱۶ همچنین می‌توان دریافت که به طور کلی توان موتور در حالت استفاده از EGR سرد نسبت به حالت استفاده از EGR گرم، بیشتر است؛ زیرا EGR سرد دمای کلی مخلوط ورودی به محفظه‌ی احتراق را کاهش می‌دهد. این کاهش دما باعث افزایش چگالی هوای ورودی می‌شود که به ورود مقدار بیشتری از اکسیژن به محفظه کمک می‌کند و احتراق را بهبود می‌بخشد. در مقابل، EGR گرم دمای مخلوط ورودی را افزایش داده و چگالی آن را کاهش می‌دهد که باعث افت جرم هوای ورودی و کاهش توان خروجی موتور می‌شود. همچنین دمای پایین‌تر در EGR سرد به کاهش تشکیل دوده کمک کرده و باعث افزایش کارایی احتراق نسبت به EGR گرم می‌شود.

تأثیر EGR به همراه غنی‌سازی هوا با اکسیژن در موتور بر مصرف سوخت ویژه‌ی ترمزی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این جا نیز به دلیل روند مشابه نتایج در دورهای ۱۸۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm، تنها نتایج مربوط به دور ۱۸۰۰ rpm ارائه شده است؛ اما باید دقت داشت که به طور کلی مصرف سوخت در دور ۱۸۰۰ نسبت به مصرف سوخت در دور ۱۴۰۰ بیشتر است؛ زیرا با افزایش دور موتور، تلفات اصطکاکی و مکانیکی افزایش یافته و باعث کاهش بازده کلی موتور می‌شود. همچنین در دورهای بالاتر، زمان در دسترس برای تکمیل احتراق کاهش می‌یابد که ممکن است منجر به احتراق ناقص و افزایش مصرف سوخت شود. علاوه بر این، در دورهای بالاتر، پمپاژ بیشتر هوا و سوخت به انرژی بیشتری نیاز دارد که باعث افزایش مصرف سوخت ویژه‌ی ترمزی می‌شود. همان طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در هر یک از درصدهای غنی‌سازی، در هر دو حالت EGR گرم و EGR سرد، تا ۵ درصد تزریق EGR، مصرف سوخت کاهش یافته است اما با افزایش درصد تزریق EGR مصرف سوخت افزایش می‌یابد. افزایش درصد غنی‌سازی تأثیر چشمگیری بر مصرف سوخت نداشت. به عنوان مثال تغییر مصرف سوخت در شکل ۱۷-الف برای ۲۰ درصد تزریق EGR را مشاهده کنید. علت این موضوع آن است که نرخ احتراق به حدی سریع است که افزایش اکسیژن اضافی تأثیر زیادی بر کارایی سوخت نخواهد گذاشت؛ همچنین به دلیل طبیعت موتورهای دیزل که به طور خودکار نسبت هوا به سوخت را تنظیم می‌کنند، ممکن است افزایش اکسیژن به طور مستقیم باعث کاهش مصرف سوخت نشود و علی‌رغم این که



شکل ۱۶- توان بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف الف) EGR گرم و ب) EGR سرد

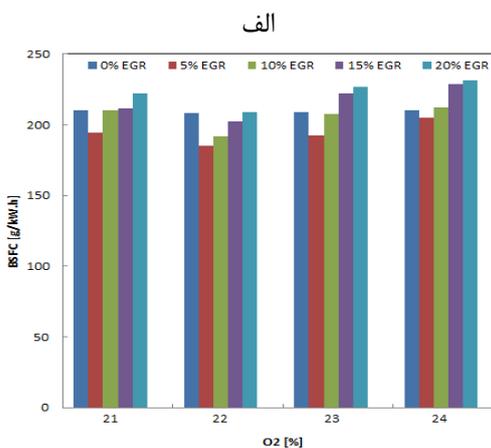
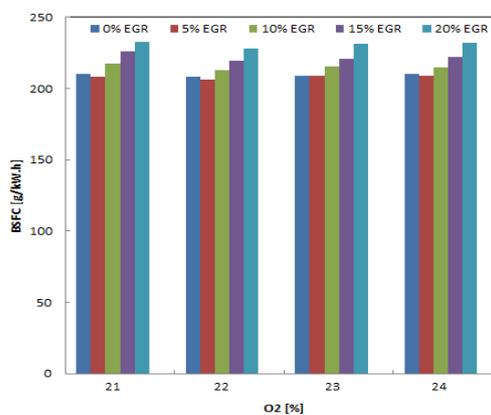
نکته‌ی دیگری که در شکل ۱۶ به چشم می‌خورد آن است که افزایش درصد EGR منجر به کاهش توان موتور شده‌است. در فرایند EGR، گازهای بازگردانی شده جایگزین بخشی از هوای تازه‌ی ورودی شده و غلظت اکسیژن در محفظه‌ی احتراق را کاهش می‌دهد. این کاهش اکسیژن منجر به احتراق ناقص، کاهش نرخ آزادسازی انرژی و افت فشار موثر متوسط اندیکاتوری می‌شود که مستقیماً توان خروجی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، EGR باعث افزایش ظرفیت گرمایی مخلوط ورودی می‌شود که دمای احتراق را کاهش داده و سرعت واکنش‌های شیمیایی را کم می‌کند؛ در نتیجه تولید توان کمتر می‌شود؛ همچنین، تجمع محصولات احتراق در سیلندر می‌تواند باعث افزایش تأخیر احتراق و کاهش بازده کلی موتور شود.

### ۵- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان غنی‌سازی هوای ورودی با اکسیژن و بازگردانی گازهای خروجی در عملکرد یک موتور دیزل پاشش مستقیم توربوشارژ، با استفاده از نرم‌افزار AVL-FIRE انجام شده است. ترکیب دو فناوری مهم غنی‌سازی هوای ورودی با اکسیژن و بازگردانی گازهای خروجی در شرایط کاری مختلف، همراه با تحلیل تطبیقی EGR گرم و سرد و ارزیابی اثرات آن‌ها بر توان، مصرف سوخت و آلاینده‌ها، از جمله نوآوری‌های اصلی این مطالعه به شمار می‌روند. برخی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده در شرایط مختلف موتور که می‌تواند به طراحی سیستم‌های کنترل آلایندگی مؤثر و انتخاب راهبرد بهینه در صنایع خودروسازی و دیزل کمک کند، به شرح زیر است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر به شرح زیر است.

- مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران نشان داد که نتایج با دقت خوبی بر هم مطابقت دارد و با اطمینان می‌توان از نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر در تحقیقات بعدی استفاده نمود.
- افزایش غلظت اکسیژن از ۲۱٪ به ۲۷٪ منجر به افزایش فشار ماکزیمم از ۸۵٫۲ به ۹۴٫۸ بار شد (افزایش ۱۱٫۲٪) که دلیل آن احتراق سریع‌تر و انرژی آزاد شده‌ی بیشتر است.
- با همین تغییر در درصد اکسیژن، دمای ماکزیمم نیز از ۲۲۵۰ به حدود ۲۳۸۵ کلوین افزایش یافت.
- در نبود EGR، مقدار دوده با افزایش اکسیژن از ۰٫۴۵ به ۰٫۱۶ (کاهش ۶۴٫۴٪) رسید که به علت بهبود اکسیداسیون هیدروکربن‌های سنگین است.
- در مقابل، غلظت NO با افزایش اکسیژن افزایش یافته و در غلظت ۲۷٪ به بیش از ۱۶۸۰ ppm رسید که به دلیل افزایش دما و اقامت بیشتر در نواحی داغ است.
- استفاده از EGR تا حدود ۲۰٪ باعث کاهش بیش از ۳۸٪ در تولید NO گردید، بدون آن که اثر منفی قابل توجهی بر فشار و دما داشته باشد.
- ترکیب بهینه‌ی ۲۵٪ اکسیژن و ۱۰٪ EGR بهترین تعادل را میان کاهش دوده و کنترل NO فراهم کرد، به طوری که NO حدود ۱۱۴۰ ppm و دوده حدود ۰٫۱۹ بود.

باعث افزایش بازده انرژی می‌شود، اما در سطح مصرف سوخت ویژه تأثیر قابل توجهی مشاهده نشود.



شکل ۱۷- مصرف سوخت ویژه و ویژه‌ی ترمزی بر حسب درصد غنی‌سازی در درصدهای مختلف الف) EGR گرم و ب) EGR سرد

نکته‌ی مهم دیگری که در شکل ۱۷ باید به آن توجه داشت این است که مصرف سوخت ویژه و ویژه‌ی ترمزی در حالت استفاده از EGR سرد نسبت به حالت استفاده از EGR گرم کمتر است. علت این موضوع آن است که در حالت استفاده از EGR سرد دمای کلی مخلوط ورودی به محفظه‌ی احتراق کمتر شده و باعث افزایش چگالی هوای ورودی و در نتیجه افزایش میزان اکسیژن می‌شود؛ بنابراین احتراق کامل‌تر با مصرف سوخت کمتر رخ می‌دهد.

## ۶- پیشنهادات

برای تحقیقات آتی، استفاده از مدل‌های واکنشی دقیق‌تر، اعمال دیواره‌های با انتقال حرارت، اعتبارسنجی تجربی هم‌زمان آلاینده‌ها و بررسی شرایط بار متغیر پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

- [1] Wartinbee WJ (1971) Emissions study of oxygen enriched air. SAE Technical Paper, 1 Feb.
- [2] Watson HC, Milkins EE, Rigby GR (1992) Oxygen enrichment of fuels. United States patent US 5,117,800, 2 Jun.
- [3] Donahue RJ, Foster DE (2000) Effects of oxygen enhancement on the emissions from a DI diesel via manipulation of fuels and combustion chamber gas composition. SAE Transactions, 1 Jan: 334-350.
- [4] Loganathan S, Tamilporai P, Vijayan K, Sujithradevi B (2007) Simulation and analysis of effect of oxygenate blended diesel on combustion and performance in turbocharged diesel engine. SAE Technical Paper, 23 Jul.
- [5] Wang H, Liu W (2015) Simulation studies of diesel engine combustion characteristics with oxygen enriched air. J Power Energy Eng 3(8): 15-23.
- [6] Kapusuz M, Çakmak A, Özcan H (2021) Application of oxygen enrichment and adiabatic humidification to suction air for reducing exhaust emissions in a gasoline engine. Energy Sources Part A Recover Util Environ Eff 45(1):194-211.
- [7] Wang X, Wang Y, Duan Q, Bai Y (2023) Understanding the role of exhaust gas recirculation in gasoline/diesel dual-fuel combustion soot features. Int J Engine Res 24(5):2013-2024.
- [8] Shanmugam SKM, Muthusamy S, Ramasamy RK, Alagumalai A. (2022). Towards improved performance and lower exhaust emissions using exhaust gas recirculation coupled compression ignition engine fuelled with nanofuel blends. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46(1), 1542-1558.
- [9] Pitarch BR. (2023) Study of different Exhaust Gas Recirculation configurations and their impact on turbocharged spark ignition engines. [Doctoral thesis]. Universitat Politècnica de València.
- [10] Zhang Y, Zhang F, Leng L, Ren Z, Shi L, Deng K (2025) Matching and optimization to minimize fuel consumption and NOx emission for a marine diesel engine with turbo-assisted exhaust gas recirculation. Proc. Inst. Mech. Eng. D J. Automob. Eng. 239(2-3): 651-664.
- [11] Wang Y, Liu H, Feng L, Maes N, Fang T, Cui Y, Yi W, Somers B, Yao M (2024) Effects of oxygen enrichment on diesel spray flame soot formation in O<sub>2</sub>/Ar atmosphere. Combust. Flame 260:113244.
- [12] Kumar S, Ganesan N, Pasupathiraju S and Mohanraj T (2018) Investigations on the Combined Effect of Oxygen Enrichment and Water Injection Techniques on Engine's Performance, Emission and Combustion of a Mahua Oil Based Compression Ignition Engine. SAE paper 0929.
- [13] Pachiannan T, Zhong W, Balasubramanian D, Alshehri MA, Pugazhendhi A, He Z (2025) Enhancing engine performance, combustion, and emission characteristics through hydrogen enrichment in n-pentanol/diesel blends: A study on advanced combustion strategies for reduced emissions. Int. J. Hydrogen Energy, 98: 741-750.
- [14] Djavareshkian MH and Ghasemi A (2009) Investigation of jet break-up process in diesel engine spray modelling. J. Appl. Sci., 9(11), 2078-2087.
- [15] Beale JC and Reitz RD (1999) Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model. At. Sprays, 9(6).
- [16] Dukowicz JK (1979) Quasi-steady droplet phase change in the presence of convection (No. LA-7997-MS). Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- [17] Naber JD and Reitz RD (1988) Modeling engine spray/wall impingement. SAE transactions, 118-140.
- [18] Sazhin SS, Sazhina EM, Heikal MR, Marooney C and Mikhailovsky SV(1999) The Shell autoignition model: a new mathematical formulation. Combust. flame, 117(3), 529-540.
- [19] Magnussen BF and Hjertager BH (1977) On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In Sym. (Int.) on Combustion, 16(1), 719-729.
- [20] Zeldovich YB, Sadovnikov PY and Frank Kamenetskii DA (1947) Oxidation of Nitrogen in Combustion. Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.
- [21] Heywood JB (1979) Pollutant formation and control in spark-ignition engines. Prog. in Energy and Combust. Sci., 229-258.
- [22] AVL FIRE user manual V. 8.3; 2004.
- [23] Huang HZ (2014) Effect of inlet state on PAHs generation of low temperature combustion of butanol-diesel. J. Int. Combust. Engine 32: 401-406.