



Original Research

Simulation of cylinder deactivation and its effects on emission and fuel consumption

Meysam Mafakheri^{*}, Hossein Rahimi Asiabaraki, Hossein Lori Alikhani, Hani Emami

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Cylinder Deactivation
Emission
Brake Specific Fuel Consumption
GT-Power
XU7 Engine

ABSTRACT

The increase in the temperature of the earth due to the increase in pollutants has caused researchers to provide solutions to control the temperature of the earth and reduce fuel consumption and emissions. Deactivating one or more cylinders is one of the ways to reduce emissions and fuel consumption. In this study, cylinder deactivation and its effect on XU7 engine performance, especially emissions and fuel consumption, were simulated with GT-Power software. The results obtained from the simulation were compared with the existing laboratory results, and after ensuring the validity of the model, the deactivation of a cylinder by cutting off a simulation injector and the obtained results were compared with the results of the normal state. The simulation results indicate a reduction in fuel consumption and emissions in the engine operation mode with three active cylinders compared to the engine operation with four active cylinders, and the comparison of the simulation results of three active cylinders with the normal mode showed that, respectively, the amount of brake specific carbon monoxide, brake specific hydrocarbon and brake specific nitrogen oxide have decreased by an average of 5.15, 1.17 and 11.42 percent, and the average brake-specific carbon dioxide has not changed significantly with cylinder deactivation, and the brake specific fuel consumption has decreased by an average of 2.03 percent.



© 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: mmafakheri@tvu.ac.ir (M. Mafakheri)

Received 26 May 2024; Accepted 13 August 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Mafakheri M, Rahimi Asiabaraki H, Lori Alikhani H, Emami H. Simulation of cylinder deactivation and its effects on emission and fuel consumption. The Journal of Engine Research. 2024 Mar 20;71(1):79-90. doi: 10.22034/ER.2024.2030304.1056

شبیه‌سازی غیرفعال‌سازی استوانه و تأثیرات آن بر آلایندگی و مصرف سوخت

میثم مفاخری*، حسین رحیمی آسیابراکی، حسین لری علیخانی، هانی امامی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

افزایش دمای کره زمین در اثر افزایش آلایندگی‌ها باعث شده است تا محققان جهت تنظیم دمای کره زمین و کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌ها راهکارهایی ارائه دهند. غیرفعال نمودن یک یا چند استوانه یکی از راهکارهای کاهش آلایندگی و مصرف سوخت است. در این مقاله غیرفعال‌سازی استوانه و تأثیر آن بر عملکرد موتور XU7 به‌ویژه آلایندگی و مصرف سوخت، با نرم‌افزار GT-Power شبیه‌سازی و بررسی گردید. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شد و پس از اطمینان از صحت سنجی الگو، غیرفعال‌سازی یک استوانه با قطع یک افشانه شبیه‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حالت عادی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش مصرف سوخت و آلایندگی در حالت عملکرد موتور با سه استوانه فعال نسبت به عملکرد موتور با چهار استوانه فعال است و مقایسه نتایج شبیه‌سازی سه استوانه فعال با حالت عادی نشان داد که به ترتیب مقدار آلایندگی‌های مونوکسیدکربن و ویژه ترمزی، هیدروکربن ویژه ترمزی و اکسید ازت ویژه ترمزی به‌صورت میانگین ۱۵،۵، ۱۷،۱ و ۱۱،۴۲ درصد کاهش یافته است و میانگین دی‌اکسیدکربن ویژه ترمزی با غیرفعال‌سازی استوانه تغییر محسوسی نداشته است و مصرف سوخت ویژه ترمزی، به‌صورت میانگین کاهش ۰،۳ درصدی را به همراه داشته است.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

غیرفعال‌سازی استوانه
آلایندگی
مصرف سوخت ویژه ترمزی
جی‌تی-پاور
موتور XU7



© 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: mmafakheri@tvu.ac.ir (میثم مفاخری)

دریافت ۶ خرداد ۱۴۰۳؛ پذیرش ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Mafakheri M, Rahimi Asiabaraki H, Lori Alikhani H, Emami H. Simulation of cylinder deactivation and its effects on emission and fuel consumption. The Journal of Engine Research. 2024 Mar 20;71(1):79-90. doi: 10.22034/ER.2024.2030304.1056

۱- مقدمه

امروزه در جهان بیش از ۲ میلیارد موتور احتراق داخلی مورد استفاده قرار گرفته که در بسیاری از امور روزمره از آن‌ها استفاده می‌شود و طیف گسترده‌ای از کاربردها را دربر گرفته است. برخی از این کاربردها شامل: حمل نقل، تولید برق، تولید انواع نیروهای مکانیکی در صنعت و ... است. به دلیل استفاده‌ی این موتورها از سوخت‌های سنگواره‌ای و تولید آلاینده‌گی‌ها در اثر واکنش سوختن، بررسی راهکارهای کاهش آلاینده‌گی موتورها احتراق داخلی، یکی از مباحث مورد علاقه محققان است. در حال حاضر به دلیل تغییرات آب و هوایی و دستیابی به هوای پاک، موضوع توسعه موتورهای احتراق داخلی و همچنین استفاده از سوخت‌های مناسب پرنرگ‌تر شده است [۱]. افزایش سرانه استفاده از سوخت‌های سنگواره‌ای و تولید آلاینده‌گی‌ها و گرم شدن کره زمین، باعث نگرانی جوامع بشری گردیده و همین امر باعث شده است تا محققان به دنبال راه‌حلی برای برطرف نمودن این نگرانی‌ها باشند. یکی از عوامل دیگر که باعث شده است محققان به دنبال کاهش آلاینده‌گی و مصرف سوخت باشند، وجود برخی از استانداردها است که از مهم‌ترین این استانداردها می‌توان به استاندارد FTP75 اشاره نمود. این استاندارد توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده ارائه شده است و مربوط به چرخه رانندگی شهری با در نظر گرفتن تعداد دفعات توقف و شتاب‌گیری در مسافت ۱۷/۷۷ کیلومتر، مدت زمان ۱۸۷۴ ثانیه و میانگین سرعت ۳۴٫۱ کیلومتر بر ساعت است [۲]. یکی از مباحث مورد علاقه دنیای خودرو بررسی راه‌حل‌های مناسب برای افزایش راندمان موتور، به همراه کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی‌ها است تا بتوان با کاهش آلاینده‌گی به هوای باکیفیت‌تری دست یافت. همچنین افزایش قیمت جهانی سوخت باعث شده است تا خودروهایی کم‌مصرف در بین مردم محبوب شود [۳]. یکی از چالش‌های موتور XU7 آلاینده‌گی و مصرف سوخت بالای آن است. برای کاهش آلاینده‌گی و مصرف سوخت راهکارهایی ارائه شده است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: ۱- زمان‌بندی متغیر دریچه‌ها، ۲- سامانه پاشش مستقیم سوخت، ۳- کوچک‌سازی موتور و استفاده از پرخوران، ۴- کاهش اصطکاک‌های داخلی موتور، ۵- استفاده از سامانه نسبت تراکم متغیر و ۶- استفاده از سامانه غیرفعال‌سازی استوانه^۱ که هر کدام از موارد شش‌گانه اشاره‌شده به نوبه خود تأثیرات مناسبی داشته است [۴].

سامانه غیرفعال‌سازی استوانه‌ها یکی از روش‌های کاهش آلاینده‌گی و مصرف سوخت است که خود به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شود: (۱) غیرفعال‌سازی استوانه با خاموش شدن افشانه و (۲) غیرفعال‌سازی استوانه با بستن دریچه‌های ورودی و خروجی.

غیرفعال‌سازی استوانه توسط افشانه، سازوکار ساده‌تری نسبت به غیرفعال‌سازی استوانه با بستن دریچه‌های ورودی و خروجی دارد و در شرایطی که نیاز به توان و گشتاور بالا وجود ندارد، با قطع افشانه استوانه مربوطه، غیرفعال‌سازی یک یا چند استوانه امکان‌پذیر است، اما در غیرفعال‌سازی استوانه با بستن دریچه‌ها، نیاز به سازوکارهای متعدد و مجاری روغن در بستار است که بایستی برای موتور طراحی گردد [۵]. در این مقاله پژوهشی از روش غیرفعال‌سازی استوانه با قطع یک افشانه استفاده گردید؛ به این صورت که ابتدا موتور XU7 در نرم‌افزار GT-Power شبیه‌سازی شده و پس از صحت‌سنجی الگو با اطلاعات و نتایج تجربی و اطمینان از صحت شبیه‌سازی انجام شده، افشانه یک استوانه خاموش و آلاینده‌گی‌ها و مصرف سوخت ویژه ترمزی^۲ با حالت عادی مقایسه گردید. در ادامه تاریخچه غیرفعال‌سازی استوانه بررسی شده است.

سال ۱۹۸۱ شرکت کادیلاک با استفاده از سازوکارهای تنظیم‌کننده دریچه، موتوری با نام تجاری 4-6-۷۸ V8 وارد بازار نمود که به چندین حالت استوانه‌ها را غیرفعال می‌نمود [۶]. هو^۳ و همکاران با استفاده از سازوکارهای تنظیم دریچه‌ها یک استوانه را در شرایط خاص فعال و غیرفعال نمودند. نتایج به دست آمده از این پژوهش حاکی از آن است که مصرف

¹ Cylinder Deactivation

² Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

³ Hu

سوخت ۹ الی ۱۴ درصد بهبود یافته است [۷]. برتی^۱ و همکاران یک روش دیگر را برای غیرفعال‌سازی یک استوانه بر روی یک موتور هشت استوانه مطالعه نمودند. در این روش از یک سازوکار کلاچ در میل‌لنگ استفاده شده است که امکان قطع شاتون از میل‌لنگ در شرایط خاص را فراهم می‌سازد و سبب غیرفعال‌شدن یک یا چند استوانه می‌گردد [۸]. یانگ لیو^۲ و همکاران اثر غیرفعال‌سازی استوانه را با استفاده از تنظیم مجراهای ورودی و خروجی بر روی یک موتور ۱۶ استوانه دیزلی با استفاده از نرم‌افزارهای GT-Power و 3D CFD بررسی نموده‌اند. نتایج حاکی از آن است که مصرف سوخت ویژه ترمزی در ۴۵۰ دور در دقیقه (د.د.د.) ۱۱ درصد و در ۵۵۶ د.د.د. ۱۴ درصد کاهش یافته است [۹]. ایظوان^۳ و همکاران نیز توسط نرم‌افزار GT-Power اثر غیرفعال‌سازی استوانه را بر روی یک موتور چهار استوانه ۱٫۶ لیتری در فشار موثر متوسط ترمزی^۴ به مقدار ۳ بار شبیه‌سازی نموده‌اند [۱۰]. مارسل^۵ و همکاران نیز با استفاده از تنظیم دریچه‌های ورودی و خروجی در مواقعی که نیاز به گشتاور بالا وجود ندارد، یک استوانه را غیرفعال نموده‌اند [۱۱]. کارلوس^۶ و همکاران اثر غیرفعال‌سازی استوانه را بر روی یک موتور اشتعال جرقه‌ای مجهز به توربو به صورت تجربی آزمایش کردند. نتایج کار آن‌ها پس از تغییرات در میل‌بادامک و برنامه ریزی مجدد ECU، کاهش ۲۹٫۵ درصدی مصرف سوخت را نشان داد [۱۲]. جوهانس^۷ و همکاران اثر غیرفعال‌سازی استوانه را روی موتورهای درست^۸ شبیه‌سازی نموده‌اند [۱۳]. هیانکی^۹ و همکاران اثر غیرفعال‌سازی استوانه را با استفاده از نرم‌افزار GT-Power شبیه‌سازی نموده و الگوریتم تنظیم‌کننده‌ای را برای کاهش نرخ انحراف گشتاور موتور در حالت غیرفعال‌سازی استوانه ارائه نمودند که در نتیجه نرخ انحراف گشتاور، بهبود یافته است [۱۴]. الکساندر^{۱۰} و همکاران نیز غیرفعال‌سازی استوانه را روی یک موتور سه استوانه یک لیتری شبیه‌سازی نموده و مصرف سوخت ویژه ترمزی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. همچنین ایهلمن^{۱۱} و همکاران اثر موقت غیرفعال‌نمودن یک استوانه را شبیه‌سازی نموده‌اند و نتایج کار آن‌ها نشان داد که با این روش می‌توان مصرف سوخت را کاهش داد، اما استوانه‌های فعال باید فشار متوسط بیشتری در دوره‌های بالاتر تولید نمایند [۱۶]. لی^{۱۲} و همکاران نیز غیرفعال‌سازی استوانه‌ها را به دو روش غیرفعال‌سازی ثابت و غیرفعال‌سازی متغیر در چرخه رانندگی FTP-75 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در روش غیرفعال‌سازی ثابت، مصرف سوخت ویژه ۲٫۲-۱۰ درصد و در روش غیرفعال‌سازی متغیر ۲٫۲-۱۲٫۹ درصد بهبود یافته است [۱۷]. ژائو^{۱۳} و همکاران ترکیبی از اثر غیرفعال‌سازی استوانه و سامانه زمان‌بندی متغیر دریچه‌ها و استفاده از چندراهه‌های مکش دوتایی را ارائه نمودند. نتایج نشان داد که مصرف سوخت در حالتی که تمام استوانه‌ها فعال است به دلیل استفاده از چندراهه‌های مکش دوتایی کاهش ۰٫۶۸-۲٫۹۵ درصدی داشته و در حالت غیرفعال‌سازی استوانه در ۲۰۰۰ د.د.د.، مصرف سوخت ۶٫۵-۱۷٫۵ درصد کاهش یافته است [۱۸]. محمد سعید^{۱۴} و همکاران نیز اثر غیرفعال‌سازی استوانه را بر روی یک موتور ۱٫۶ لیتری چهار استوانه بنزینی شبیه‌سازی نموده و نتایج کار آن‌ها نشان داد که تلفات تلمبه‌ای کاهش یافته و مصرف سوخت نسبت به حالت اولیه بهبود یافته است [۱۹].

¹ Boretta

² Ying Liu

³ Izwan

⁴ Brake Mean Effective Perssure (BMEP)

⁵ Marcel

⁶ Carlos

⁷ Johannes

⁸ Stoichiometric

⁹ Hyunki

¹⁰ Alexander

¹¹ Ihlemann

¹² Lee

¹³ Zhao

¹⁴ Muhamad Said

۲- روش شبیه‌سازی موتور و معادلات

در این مقاله از موتور XU7JP4/L3 برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مشخصات این موتور در جدول ۱ قابل مشاهده است:

جدول ۱ مشخصات موتور XU7JP4/L3 [۲۰]

ردیف	نوع مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	قطر استوانه	۸۳ (mm)
۲	کورس سمبه	۸۱,۴ (mm)
۳	حجم موتور	۱۷۶۱ (cc)
۴	تعداد دریچه	۸
۵	نسبت تراکم	۹,۳:۱
۶	ترتیب احتراق	۱-۳-۴-۲
۷	حداکثر توان	۹۱,۲ (hp)@ ۶۰۰۰ (rpm)
۸	حداکثر گشتاور	۱۴۴ (N.m)@ ۲۵۰۰ (rpm)

نرم‌افزار به کار برده شده برای شبیه‌سازی، GT-Power بوده که شبیه‌سازی را بر پایه معادلات ترمودینامیکی محاسبه می‌نماید. مراحل شبیه‌سازی شامل دو مرحله است: (۱) شبیه‌سازی کل اجزاء موتور و (۲) ورود مقادیر مورد نیاز هر بخش. در ابتدا اجزاء موتور در نرم‌افزار، شبیه‌سازی شد که این اجزاء شامل: استوانه‌ها، دریچه‌ها، مجاری ورودی موتور، مجاری خروجی موتور، دریچه گاز و ... است. سپس مقادیر مورد نیاز هر بخش وارد گردید. برخی از این مقادیر شامل: دما، چگالی، فشار، طول، حجم، قطر و ... است.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی نرخ انتقال حرارت در نرم افزار GT-Power از الگوی WoschniGT استفاده شد. این الگو در واقع الگوی وُشنی کلاسیک^۱ است که توسط شرکت گاما تکنولوژی^۲ توسعه یافته است. از این تابع زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات چرخش سیال در دسترس نباشد و مطابق معادله^۱ است [۷]:

$$h_c = 3.01426B^{-0.2}P^{0.8}T^{-0.50}\omega^{0.8} \quad (1)$$

که h_c ضریب انتقال حرارت، B قطر استوانه، T میانگین دمای استوانه، ω سرعت متوسط گاز در داخل استوانه و p فشار داخل استوانه است. همچنین برای شبیه‌سازی اصطکاک موتور از الگوی Chen-Flynn مطابق معادله ۲ استفاده شد [۵]:

$$FMEP = FMEP_{const} + AP_{cyl.max} + V C_{p.m} + C C_{p.m}^2 \quad (2)$$

که در آن $FMEP_{const}$ مقداری ثابت از اصطکاک مؤثر متوسط، A ضریب حداکثر فشار استوانه، $P_{cyl.max}$ حداکثر فشار استوانه، V ضریب میانگین سرعت سمبه، $C_{p.m}$ میانگین سرعت سمبه و C ضریب میانگین مربع سرعت سمبه است. همچنین از معادلات ۳، ۴ و ۵ به ترتیب برای محاسبه زاویه اشتعال، فشار و دمای گاز باقی‌مانده استفاده شده است [۵]:

$$\frac{dM_e}{dt} = \rho_u A_e (S_T + S_L) \quad (3)$$

$$\frac{dM_b}{dt} = \frac{M_e - M_b}{\tau} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\lambda}{S_L} \quad (5)$$

¹ WoschiniClassic

² Gamma Technologies Inc

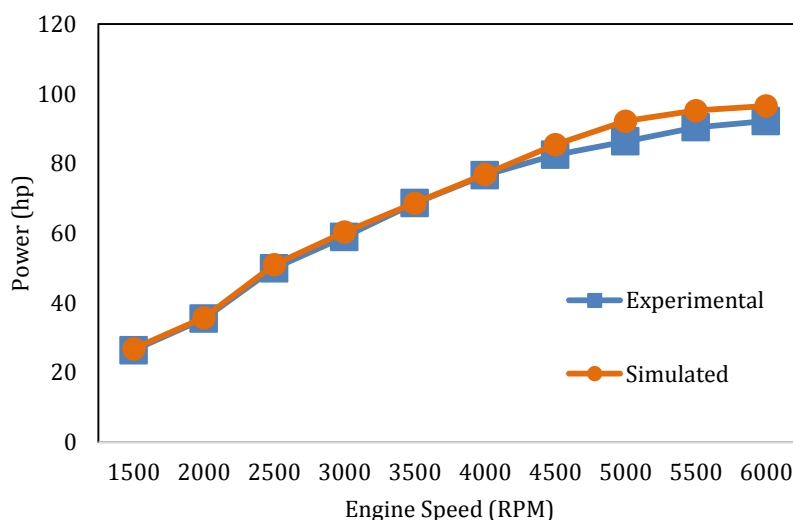
که در این معادلات M_e جرم گاز اشتعال نیافته، M_b جرم گاز اشتعال یافته، ρ_u چگالی مخلوط متراکم شده نسوخته و A_e مساحت ناحیه مشتعل شده در جلو شعله است. همچنین S_L و S_T به ترتیب سرعت اولیه و سرعت ثانویه شعله است. τ بیانگر مقدار ثابت زمانی بوده و از معادله ۶ محاسبه می‌گردد [۵]:

$$\tau = 5.72 \times 10^6 P \left(\frac{ON}{100} \right)^{3.402} p^{-1.7} \times 10^{\frac{3800}{Ac \times T_u}} \quad (6)$$

که در معادله ۶، ON مقدار اکتان سوخت، p فشار لحظه‌ای استوانه، P ضریب زمان القای ضربه، Ac ضریب فعال‌سازی انرژی و T_u گاز نسوخته است. پس از شبیه‌سازی اجزاء و مقادیر موردنیاز موتور در نرم‌افزار، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید تا از صحت شبیه‌سازی، اطمینان حاصل گردد. سپس افشانه یک استوانه قطع گشته و نتایج به دست آمده با حالت عادی مقایسه شده است. پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفته است شامل: دی‌اکسید کربن، مونواکسید کربن، هیدروکربن، اکسید ازت و مصرف سوخت ویژه ترمزی است.

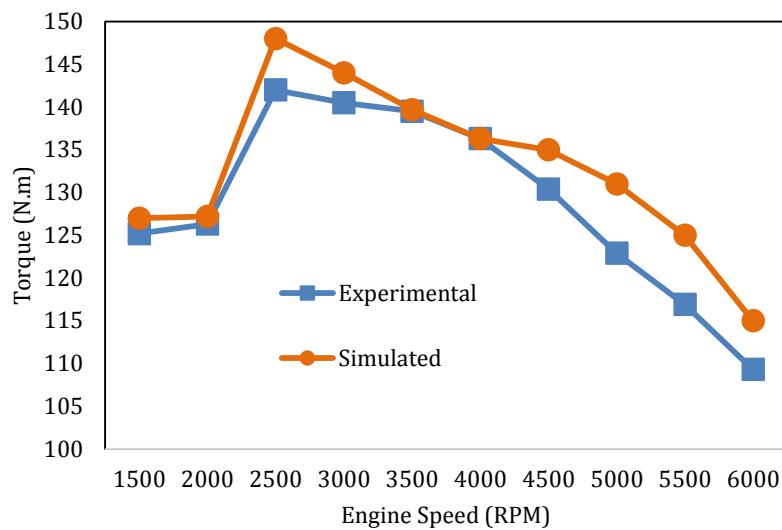
۳- صحت سنجی الگو

حل‌هایی که از روش‌های عددی به دست می‌آیند همواره قابل اعتماد نیستند و نتایج بایستی حتماً با داده‌های تجربی مقایسه شوند تا صحت حل اثبات گردد. به همین دلیل نتایج به دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود مقایسه گردید. پارامترهای در نظر گرفته شده برای صحت‌سنجی الگو با نتایج آزمایشگاهی [۴]، شامل: توان بر حسب اسب بخار، گشتاور بر حسب نیوتن‌متر و مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب گرم بر کیلووات ساعت (g/Kw.h)، است. شبیه‌سازی در بازه دور موتور ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ د.د.د. انجام شد. در ادامه نتایج به دست آمده از الگوی شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ قابل مشاهده است. شکل ۱ مقایسه توان آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی شده را نشان داده است.



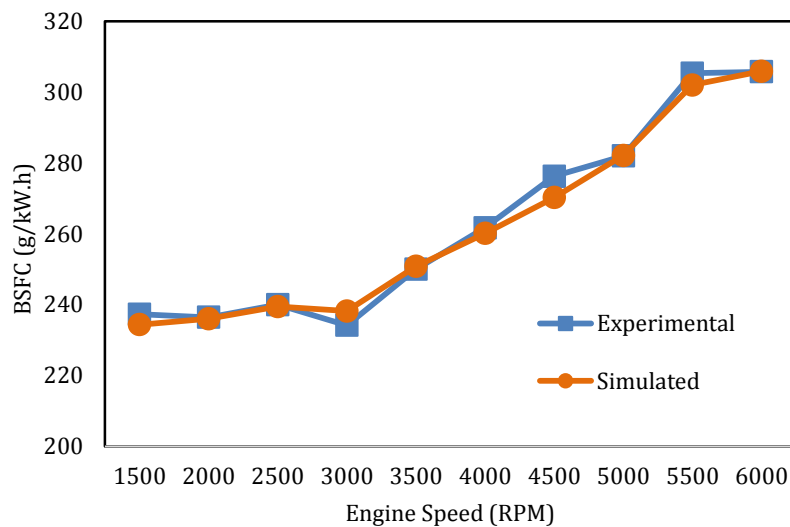
شکل ۱ توان بر حسب دور موتور

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مقدار توان از دور ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ د.د.د. در الگوی شبیه‌سازی شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی تغییرات بسیار اندکی را نشان داده و حداکثر مقدار خطای شبیه‌سازی برای تغییرات توان، در ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د. بوده و حداقل تغییرات خطا در ۴۵۰۰ د.د.د. رخ داده است. حداکثر توان نیز در ۶۰۰۰ د.د.د. برای هر دو نتایج قابل مشاهده است. شکل ۲ مقایسه گشتاور آزمایشگاهی با شبیه‌سازی را نشان داده است.



شکل ۲ گشتاور بر حسب دور موتور

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ د.د.د. خطا ناچیز بوده و حداقل خطا در ۴۵۰۰ د.د.د. و حداکثر خطا در ۵۵۰۰ د.د.د. رخ داده است. بازه حداقل و حداکثر گشتاور از ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ د.د.د. است. شکل ۳ مقایسه مصرف سوخت ویژه ترمزی آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ مصرف سوخت ویژه ترمزی بر حسب دور موتور

مطابق با نمودارهای شکل ۳ در بیشتر نقاط، خطای شبیه‌سازی ناچیز بوده و تغییرات محدود در دوره‌های ۳۰۰۰ و ۴۵۰۰ د.د.د. رخ داده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ مشخص است شبیه‌سازی پژوهش حاضر پارامترهای توان و مصرف سوخت ویژه ترمزی را در تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی پیش‌بینی نموده است، اما با توجه به نتایج، شبیه‌سازی انجام‌شده، گشتاور را کمی بیشتر از واقعیت برآورد نموده است. مقایسه‌های صورت گرفته بین خروجی‌های حاصل از نتایج الگوی شبیه‌سازی‌شده و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار خطای الگوی شبیه‌سازی‌شده ناچیز و قابل قبول بوده و الگوی شبیه‌سازی‌شده مورد اطمینان است.

۴- نتایج و بحث

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی موتور نسبت به نتایج آزمایشگاهی، افشانه یک استوانه قطع گردید و نتایج آن با حالت عادی الگو مقایسه گردید. لازم به ذکر است که مقادیر مصرف سوخت و ویژه ترمزی و آلاینده‌گی‌ها در دور و گشتاور یکسان در دو حالت قبل و بعد از غیرفعال‌سازی استوانه بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه شبیه‌سازی قبل و بعد غیرفعال‌سازی یک افشانه، در جداول ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ قابل مشاهده است. جداول مذکور به ترتیب شامل: دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی، مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی، هیدروکربن و ویژه ترمزی، اکسید ازت و ویژه ترمزی و مصرف سوخت و ویژه ترمزی است. در این مقاله دوره‌های ۱۵۰۰، ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د. برای بررسی نتایج در نظر گرفته شده و در جداول آورده شده است.

جدول ۲ بیانگر مقدار دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی در گشتاور و دور یکسان است که در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه مقایسه گشته است. با غیرفعال‌سازی یک استوانه، تزریق سوخت کاهش یافته و همین امر سبب کاهش تولید دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی می‌گردد اما نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که تولید دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی تا ۴۰۰۰ د.د.د. کاهش و از ۴۵۰۰ د.د.د. افزایش یافته است. در ۱۵۰۰ د.د.د. مقدار کاهش دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی ۳,۰۷ درصد و در ۴۰۰۰ د.د.د. ۰,۵۷ درصد کاهش یافته است و در ۶۰۰۰ د.د.د. می‌توان افزایش ۳,۴۸ درصدی تولید دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی را مشاهده نمود.

جدول ۲ مقایسه دی‌اکسیدکربن و ویژه ترمزی در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه

دور موتور (RPM)	گشتاور (N.m)	CO ₂ تولیدی در حالت عادی (g/kW.h)	CO ₂ تولیدی در حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه غیرفعال (g/kW.h)
۱۵۰۰	۱۰۰,۲	۶۷۲,۶۶۹	۶۵۲,۰۷۴۱
۲۰۰۰	۹۹,۹	۶۷۹,۰۰۳۷	۶۶۲,۹۷۷۲
۲۵۰۰	۱۱۴,۲	۶۳۰,۲۳۰۲	۶۲۴,۸۷۱۸
۳۰۰۰	۱۱۱,۶	۶۲۰,۹۱۳۵	۶۱۲,۱۱۵۴
۳۵۰۰	۱۰۷,۳	۵۷۶,۵۰۶۲	۵۶۸,۹۲۲۹
۴۰۰۰	۱۰۴,۶	۵۵۲,۵۹۰۷	۵۴۹,۴۷۷۱
۴۵۰۰	۱۰۳,۳	۵۲۸,۶۴۵۹	۵۲۸,۸۰۸
۵۰۰۰	۱۰۰,۷	۵۱۶,۴۵۱۴	۵۲۲,۳۳۳۸
۵۵۰۰	۹۷,۲	۴۶۹,۱۷۹۲	۴۸۱,۴۵۸۳
۶۰۰۰	۹۰,۶	۴۷۵,۳۷۸۸	۴۹۱,۹۲۳۷

جدول ۳ بیانگر مقدار مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی در دور و گشتاور یکسان است. در حالت یک استوانه غیرفعال به دلیل کاهش تزریق سوخت و افزایش فشار استوانه‌های فعال، مقدار تولید مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در ۱۵۰۰ د.د.د. تولید مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی ۶,۵۲ درصد کاهش یافته است و در ۴۰۰۰ د.د.د. نیز می‌توان کاهش ۳,۵۶ درصدی تولید مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی را مشاهده نمود. همچنین در ۶۰۰۰ د.د.د. مقدار تولید مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی ۷,۲۹ درصد کاهش یافته است. در جدول ۴ می‌توان مقایسه هیدروکربن و ویژه ترمزی در دو حالت قبل و بعد غیر فعال‌سازی استوانه را مشاهده نمود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار کاهش هیدروکربن و ویژه ترمزی در ۱۵۰۰ د.د.د. ۱,۸۸ درصد بوده و در ۴۰۰۰ د.د.د. تولید هیدروکربن و ویژه ترمزی ۰,۶۶ درصد کاهش یافته است، همچنین در ۶۰۰۰ د.د.د. ۱,۸۲ درصد کاهش تولید هیدروکربن و ویژه ترمزی قابل مشاهده است.

جدول ۳ مقایسه مونواکسیدکربن و ویژه ترمزی در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه

دور موتور (RPM)	گشتاور (N.m)	CO تولیدی در حالت عادی (g/kW.h)	CO تولیدی در حالت یک استوانه غیرفعال (g/kW.h)
۱۵۰۰	۱۰۰,۲	۵۹,۰۳۰۰۹	۵۵,۱۸۷۳۱
۲۰۰۰	۹۹,۹	۵۹,۱۵۴۸۱	۵۵,۸۲۲۶۹
۲۵۰۰	۱۱۴,۲	۸۷,۷۰۲۷۱	۸۲,۹۵۹۹۴
۳۰۰۰	۱۱۱,۶	۹۶,۳۱۷۰۸	۹۲,۱۵۶۶۷
۳۵۰۰	۱۰۷,۳	۱۵۲,۲۱۷۶	۱۴۶,۱۹۵۱
۴۰۰۰	۱۰۴,۶	۱۸۵,۱۹۶۸	۱۷۸,۶۰۶
۴۵۰۰	۱۰۳,۳	۲۲۱,۷۳۸۳	۲۱۳,۳۳۳۳
۵۰۰۰	۱۰۰,۷	۲۵۳,۱۵۲	۲۴۰,۹۶۸۲
۵۵۰۰	۹۷,۲	۳۲۳,۱۱۴۴	۳۰۳,۰۳۵۷
۶۰۰۰	۹۰,۶	۳۲۷,۳۸۴۳	۳۰۳,۵۲۱۲

جدول ۴ مقایسه هیدروکربن ویژه ترمزی در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه

دور موتور (RPM)	گشتاور (N.m)	HC تولیدی در حالت عادی (g/kW.h)	HC تولیدی در حالت یک استوانه غیرفعال (g/kW.h)
۱۵۰۰	۱۰۰,۲	۰,۰۴۴۷۳۳	۰,۰۴۳۸۹۳
۲۰۰۰	۹۹,۹	۰,۰۴۵۲۵۲	۰,۰۴۴۶۲۵
۲۵۰۰	۱۱۴,۲	۰,۰۴۵۵۵۴	۰,۰۴۵۲۶۸
۳۰۰۰	۱۱۱,۶	۰,۰۴۵۶۳۵	۰,۰۴۵۱۴۷
۳۵۰۰	۱۰۷,۳	۰,۰۴۸۲۲۷	۰,۰۴۷۶۸۵
۴۰۰۰	۱۰۴,۶	۰,۰۴۹۹۲۱	۰,۰۴۹۵۹۲
۴۵۰۰	۱۰۳,۳	۰,۰۵۲۰۰۱	۰,۰۵۱۶۵۴
۵۰۰۰	۱۰۰,۷	۰,۰۵۴۲۳۳	۰,۰۵۳۷۸۲
۵۵۰۰	۹۷,۲	۰,۰۵۷۷۹۳	۰,۰۵۶۸۵۲
۶۰۰۰	۹۰,۶	۰,۰۵۸۲۰۱	۰,۰۵۷۱۴۷

در جدول ۵ می‌توان اکسید ازت ویژه ترمزی در دور و گشتاور یکسان، در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه را مشاهده نمود. با توجه به جدول مذکور به دلیل حذف یک استوانه و کاهش استوانه‌های فعال از چهار به سه استوانه فعال و افت دمای موتور نسبت به حالت عادی، اکسید ازت ویژه ترمزی کاهش یافته است. این مقدار کاهش نسبت به حالت عادی برای دور موتورهای ۱۵۰۰، ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ د.د.د. به ترتیب ۸,۱۷، ۱۳,۲۵ و ۱۴,۲۵ درصد است.

در جدول ۶ مصرف سوخت ویژه ترمزی در دور و گشتاور یکسان، قابل مشاهده است. عواملی که باعث کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی در حالت یک استوانه غیرفعال می‌شود شامل ۲ مورد بدین شرح است:

(۱) تزریق کمتر سوخت به دلیل کاهش استوانه فعال (۲) کاهش تلفات تلمبه‌ای به دلیل باز بودن دریچه گاز باز بودن دریچه گاز باعث می‌شود که فشار داخل استوانه‌های فعال افزایش یابد و در نتیجه بازده موتور نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در ۱۵۰۰ د.د.د. مصرف سوخت ویژه ترمزی ۳,۵۶ درصد و در ۴۰۰۰ د.د.د. مصرف سوخت ویژه ترمزی ۱,۴۷ درصد کاهش یافته است و در ۶۰۰۰ د.د.د. ۲,۲۱ درصد کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی قابل مشاهده است.

جدول ۵ اکسیدازت ویژه ترمزی در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه

دور موتور (RPM)	گشتاور (N.m)	NOx در حالت عادی (g/kW.h)	NOx در حالت یک استوانه غیرفعال (g/kW.h)
۱۵۰۰	۱۰۰,۲	۱۳,۷۱	۱۲,۵۹
۲۰۰۰	۹۹,۹	۱۴,۴۱	۱۳,۳۸
۲۵۰۰	۱۱۴,۲	۱۱,۸۸	۱۰,۷۹
۳۰۰۰	۱۱۱,۶	۱۳,۰۵	۱۱,۸۸
۳۵۰۰	۱۰۷,۳	۹,۰۶	۷,۹۹
۴۰۰۰	۱۰۴,۶	۷,۱۷	۶,۲۲
۴۵۰۰	۱۰۳,۳	۵,۳۹	۴,۶۸
۵۰۰۰	۱۰۰,۷	۵,۶۲	۴,۸۲
۵۵۰۰	۹۷,۲	۲,۸۶	۲,۴۶
۶۰۰۰	۹۰,۶	۳,۴۴	۲,۹۵

جدول ۶ مقایسه مصرف سوخت ویژه ترمزی در دو حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه

دور موتور (RPM)	گشتاور (N.m)	BSFC در حالت عادی (g/kW.h)	BSFC در حالت یک استوانه غیرفعال (g/kW.h)
۱۵۰۰	۱۰۰,۲	۲۴۱,۶	۲۳۳
۲۰۰۰	۹۹,۹	۲۴۳,۷	۲۳۷,۱
۲۵۰۰	۱۱۴,۲	۲۴۲,۴	۲۳۸,۲
۳۰۰۰	۱۱۱,۶	۲۴۳,۸	۲۳۸,۹
۳۵۰۰	۱۰۷,۳	۲۵۷,۱	۲۵۲,۷
۴۰۰۰	۱۰۴,۶	۲۶۵,۹	۲۶۲
۴۵۰۰	۱۰۳,۳	۲۷۶,۷	۲۷۲,۶
۵۰۰۰	۱۰۰,۷	۲۸۸,۵	۲۸۴,۳
۵۵۰۰	۹۷,۲	۳۰۸,۳	۳۰۲,۳
۶۰۰۰	۹۰,۶	۳۱۲,۵	۳۰۵,۶

۵- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد، غیر فعال‌سازی استوانه می‌تواند به کاهش تلفات تلمبه‌ای و کاهش تزریق سوخت کمک نماید و با کاهش استوانه‌های فعال، دمای موتور و به دنبال آن اکسیدازت کاهش یابد. همچنین به دلیل باز بودن دریچه گاز، فشار استوانه‌های فعال افزایش می‌یابد و همین امر مانع تولید هیدروکربن گشته است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد که با غیرفعال‌سازی یک استوانه، تولید دی‌اکسیدکربن ویژه ترمزی به‌صورت میانگین تغییرات قابل توجهی نداشته است.
- مقایسه میان مقدار مونواکسیدکربن ویژه ترمزی در حالت عادی با حالت غیرفعال‌سازی یک استوانه نشان داد که به دلیل کاهش تزریق سوخت و افزایش فشار استوانه‌های فعال، مقدار تولید مونواکسیدکربن ویژه ترمزی به‌صورت میانگین ۵,۱۵ درصد نسبت به حالت عادی کاهش یافته است.

- نتایج مقایسه هیدروکربن ویژه ترمزی در حالت عادی و غیرفعال‌سازی یک استوانه نشان داد که به دلیل افزایش فشار استوانه‌های فعال و کاهش تزریق سوخت، مقدار تولید هیدروکربن ویژه ترمزی نسبت به حالت اولیه به‌صورت میانگین ۱,۱۷ درصد کاهش یافته است.
 - مقایسه نتایج اکسیدازت ویژه ترمزی حالت عادی با غیرفعال‌سازی یک استوانه به صورت میانگین در تمامی دورها کاهش ۱۱,۴۲ درصدی را نشان داده است.
 - نتایج مقایسه مصرف سوخت ویژه ترمزی در دو حالت قبل و بعد از غیرفعال‌سازی استوانه نشان داد که مقدار مصرف سوخت ویژه ترمزی به‌صورت میانگین ۲,۰۳ درصد کاهش یافته است.
- مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان داد که غیرفعال‌سازی استوانه نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌گی‌ها و مصرف سوخت ویژه ترمزی دارد. علاوه بر این، نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از غیرفعال‌سازی یک استوانه، می‌توان موتورهای تولید نمود که در مواقعی که به تمام توان موتور نیاز نیست، از اتلاف توان اضافی موتور جلوگیری نموده و مانع افزایش مصرف سوخت و تولید آلاینده‌گی‌ها شود.

فهرست علائم

h_c	ضریب انتقال حرارت
B	قطر استوانه
T	میانگین دمای استوانه
$FMEP$	فشار موثر متوسط اصطکاکی
$FMEP_{Const}$	مقدار ثابت فشار موثر متوسط اصطکاکی
A	ضریب حداکثر فشار استوانه
$P_{cul.max}$	حداکثر فشار استوانه
V	ضریب میانگین سرعت سمبه
$C_{p.m}$	میانگین سرعت سمبه
C	ضریب میانگین مربع سرعت سمبه
$C_{p.m}^2$	میانگین مربع سرعت سمبه
M_b	جرم گاز مشتعل شده
M_e	جرم گاز مشتعل نشده
A_e	مساحت ناحیه مشتعل شده
S_T	سرعت اولیه شعله
S_L	سرعت ثانویه شعله
ON	عدد اکتان
P	ضریب زمان القای ضربه
Ac	ضریب فعال‌سازی انرژی
T_u	مقدار گاز نسوخته
p	فشار لحظه‌ای استوانه

علائم یونانی

ω	سرعت متوسط گاز
ρ_u	چگالی مخلوط متراکم شده نسوخته
τ	مقدار ثابت زمانی

References

- [1] Heywood, J. Internal Combustion Engine Fundamentals 2E. McGraw-Hill Education, 2018.
- [2] KUNT MA. Analysis of engine and powertrain losses of a passenger type 4-stroke gasoline vehicle in 4 different driving cycles with GT-SUITE vehicle simulation program. International Journal of Automotive Science and Technology. 2022 Oct 1;6(4):340-6. doi: [10.30939/ijastech..1152980](https://doi.org/10.30939/ijastech..1152980)
- [3] Mashadi B, Maleki A. Influence of cylinder deactivation technology on fuel consumption and emissions of four-cylinder spark ignition engine. Engine Research. 2022 Nov 27;35(35):41-51. [In Persian]
- [4] Pishgooie M, Kakai AH. The Effect of Using Variable Valve System on XU7/L3 Engine. Engine Research. 2022 Nov 27;21(21):58-72. [In Persian]
- [5] Momennia A, Mohammad Ibrahim A. The Effect of Cylinder Deactivation on the Performance Parameters of a Bi-fuel Engine. Engine research. 2020;57(57):41-9.
- [6] Wilcutts M, Switkes J, Shost M, Tripathi A. Design and benefits of dynamic skip fire strategies for cylinder deactivated engines. SAE International Journal of Engines. 2013 May 1;6(1):278-88. doi: [10.4271/2013-01-0359](https://doi.org/10.4271/2013-01-0359)
- [7] Hu M, Chang S, Xu Y, Liu L. Study on valve strategy of variable cylinder deactivation based on electromagnetic intake valve train. Applied Sciences. 2018 Oct 31;8(11):2096. doi: [10.3390/app8112096](https://doi.org/10.3390/app8112096)
- [8] Boretti A, Scalco J. Piston and valve deactivation for improved part load performances of internal combustion engines. SAE Technical Paper; 2011 Apr 12. doi: [10.4271/2011-01-0368](https://doi.org/10.4271/2011-01-0368)
- [9] Liu Y, Kuznetsov A, Sa B. Simulation and Analysis of the impact of cylinder deactivation on fuel saving and emissions of a medium-speed high-power diesel engine. Applied Sciences. 2021 Aug 19;11(16):7603. doi: [10.3390/app11167603](https://doi.org/10.3390/app11167603)
- [10] Hamid I, Said MF, Soid SN, Nasution H. Effect of cylinder deactivation strategies on engine performances using one-dimensional simulation technique. Jurnal teknologi. 2016 Aug 16;78(8-4). doi: [10.11113/jt.v78.9584](https://doi.org/10.11113/jt.v78.9584)
- [11] Clenci A, Iorga-Siman V, Draghici M. Overview on the Cylinder Deactivation techniques. Scientific Bulletin. 2021;XXVII:1-10. doi: [10.26825/bup.ar.2021.005](https://doi.org/10.26825/bup.ar.2021.005)
- [12] Campos CH, Hanriot SD, Amorim RJ, Mazzaro RS. Cylinder deactivation strategy for fuel consumption reduction. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022 Nov;44(11):547. doi: [10.1007/s40430-022-03847-7](https://doi.org/10.1007/s40430-022-03847-7)
- [13] Ritzmann J, Zsiga N, Peterhans C, Onder C. A control strategy for cylinder deactivation. Control Engineering Practice. 2020 Oct 1;103:104566. doi: [10.1016/j.conengprac.2020.104566](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104566)
- [14] Shin H, Jung D, Han M, Hong S, Han D. Minimization of torque deviation of cylinder deactivation engine through 48V mild-hybrid starter-generator control. Sensors. 2021 Feb 18;21(4):1432. doi: [10.3390/s21041432](https://doi.org/10.3390/s21041432)
- [15] Bech A, Shayler PJ, McGhee M. The effects of cylinder deactivation on the thermal behaviour and performance of a three cylinder spark ignition engine. SAE International Journal of Engines. 2016 Dec 1;9(4):1999-2009. doi: [10.4271/2016-01-2160](https://doi.org/10.4271/2016-01-2160)
- [16] Schaeffler, KG. Solving the Powertrain Puzzle: 10th Schaeffler Symposium April 3/4, 2014. doi: [10.1007/978-3-658-06430-3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-06430-3)
- [17] Lee N, Park J, Lee J, Park K, Choi M, Kim W. Estimation of fuel economy improvement in gasoline vehicle using cylinder deactivation. Energies. 2018 Nov 8;11(11):3084. doi: [10.3390/en11113084](https://doi.org/10.3390/en11113084)
- [18] Zhao J, Xi Q, Wang S, Wang S. Improving the partial-load fuel economy of 4-cylinder SI engines by combining variable valve timing and cylinder-deactivation through double intake manifolds. Applied Thermal Engineering. 2018 Aug 1;141:245-56. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.05.087](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.087)
- [19] Said MF, Aziz AB, Latiff ZA, Andwari AM, Soid SN. Investigation of cylinder deactivation (CDA) strategies on part load conditions. SAE Technical Paper; 2014 Oct 13. doi: [10.4271/2014-01-2549](https://doi.org/10.4271/2014-01-2549)
- [20] Talati H, Aliakbari K, Ebrahimi-Moghadam A, Farokhad HK, Nasrabad AE. Optimal design and analysis of a novel variable-length intake manifold on a four-cylinder gasoline engine. Applied Thermal Engineering. 2022 Jan 5;200:117631. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117631](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117631)