


Numerical Investigation of the Effects of Geometric Parameters, Spark Timing, and Catalytic Converter on the Performance of the Developed EF7 Gasoline Engine

Jafar langari¹, Karim Aliakbari^{2*} , Mohammad Sheykhi³, Hamid Khoshbakht Farokhad², Amir Hossein Zahmatkash Khoob²

¹ Mechanical Engineering Department, Bojnord University, Bojnord, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

³ Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: January 18, 2026

Revised: February 24, 2026

Accepted: March 04, 2026

ePublished: April 23, 2026

ABSTRACT

Improving the performance of internal combustion engines requires a thorough understanding of the interactions among various engine parameters under dynamic operating conditions. This study investigates the effects of manifold roughness, geometric parameters (compression ratio and bore-to-stroke ratio), spark timing, and catalytic converter characteristics on the performance of a gasoline engine. Simulations were conducted over a speed range of 1000 to 6000 rpm using a parametric analysis framework. The novelty of this research lies in the comprehensive assessment of engine parameters and their combined impact on key performance indicators — torque, power, and brake specific fuel consumption (BSFC). A comprehensive engine model was employed to evaluate parameter variations, and optimal combinations for each performance objective were identified. The results demonstrated that simultaneous optimization of geometric parameters, ignition timing, and exhaust system characteristics enhances gasoline engine performance, such that at zero-degree spark advance, maximum torque and power were achieved at 4000 and 6000 rpm with a 5–8% reduction in BSFC, and in the optimal exhaust configuration with a volume of 40,000 cm³ and catalyst density of 100 CPI, the minimum BSFC of 0.258 kg/kWh was obtained at 3000 rpm.

Keywords: Engine Optimization; Spark Timing; Compression Ratio; Bore-to-Stroke Ratio; Brake Specific Fuel Consumption (BSFC); Manifold and Catalyst.

How to cite this article

Langari J, Aliakbari K, Sheykhi M, Khoshbakht Farokhad H, Zahmatkash Khoob A.H, Numerical Investigation of the Effects of Geometric Parameters, Spark Timing, and Catalytic Converter on the Performance of the Developed EF7 Gasoline Engine. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(06):437-450.

*Corresponding author's email: karim-aliakbari@tvu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-0821-6610



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی، زمان بندی جرقه و مبدل کاتالیستی بر عملکرد موتور بنزینی EF7 توسعه یافته

جعفر لنگری^۱، کریم علی اکبری^{۲*}، محمد شیخی^۳، حمید خوشبخت فرخند^۲، امیرحسین زحمتکش خوب^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران
^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
^۳ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی مستلزم درک دقیق تعامل پارامترهای مختلف موتور تحت شرایط کاری دینامیکی است. در این مطالعه، اثر پارامترهای زبری منیفلود، پارامترهای هندسی (نسبت تراکم و نسبت قطر به کورس)، زمان بندی جرقه و مبدل کاتالیست بر عملکرد یک موتور بنزینی بررسی شده است. شبیه سازی ها در بازه سرعت ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از چارچوب تحلیل پارامتری انجام گرفت. نوآوری این پژوهش در ارزیابی جامع پارامترهای موتور و تأثیر ترکیبی آنها بر شاخص های کلیدی عملکرد شامل گشتاور، توان و مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) نهفته است. از یک مدل جامع موتور برای ارزیابی تغییرات پارامترها استفاده شد و ترکیب های بهینه برای هر هدف عملکردی شناسایی گردید. نتایج نشان داد که بهینه سازی هم زمان پارامترهای هندسی، زمان بندی احتراق و مشخصات سامانه آگزوز عملکرد موتور بنزینی را بهبود می بخشد، به طوری که در تاخیر جرقه صفر درجه بیشینه گشتاور و توان در ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ دور در دقیقه حاصل شد و BSFC از ۵ تا ۸ درصد کاهش یافت، و در پیکربندی بهینه حجم آگزوز ۴۰۰۰ سانتی متر مکعب و چگالی کاتالیزور CPI ۱۰۰، کمترین مصرف سوخت ویژه برابر ۰/۲۵۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت در ۳۰۰۰ دور در دقیقه به دست آمد.

کلیدواژه ها: بهینه سازی موتور؛ زمان بندی جرقه؛ نسبت تراکم؛ نسبت قطر به کورس؛ مصرف سوخت ویژه ترمزی؛ منیفلود و کاتالیزور.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

نحوه ارجاع به این مقاله

لنگری جعفر، علی اکبری کریم، شیخی محمد، خوشبخت فرخند حمید، زحمتکش خوب امیرحسین، بررسی عددی تأثیر پارامترهای هندسی، زمان بندی جرقه و مبدل کاتالیستی بر عملکرد موتور بنزینی EF7 توسعه یافته، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۵۰-۴۳۷(۰۶):۲۶(۰۵) ۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: karim-aliakbari@tvu.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0002-0821-6610



۱- مقدمه

زمان توقف در نقطه مرگ بالا تأثیر می‌گذارد و در نتیجه فرآیند احتراق را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴].

به‌طور موازی، زمان‌بندی احتراق — شامل زمان جرقه‌زنی، فشار تزریق و نرخ پاشش — به‌طور گسترده برای اثرات عمیق آن بر بازده حرارتی، مصرف سوخت و آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌انداختن زمان جرقه‌زنی می‌تواند توان موتور را افزایش دهد، اما ممکن است منجر به احتراق پیش‌رس یا کوبش شود. به همین ترتیب، بهینه‌سازی نرخ و زمان‌بندی پاشش سوخت می‌تواند موجب اختلاط بهتر هوا و سوخت و توسعه سریع‌تر شعله شود، به‌ویژه در سرعت‌های بالای موتور. مطالعات تجربی و CFD تأیید کرده‌اند که استراتژی‌های دقیق زمان‌بندی برای دستیابی به احتراق رقیق و کاهش آلاینده‌های NOx و هیدروکربن‌های نسوخته ضروری‌اند [۵].

علاوه بر این، سامانه آگزوز و کاتالیست نقش حیاتی در عملکرد موتور و کنترل آلاینده‌ها دارد. پارامترهایی مانند حجم مجاری آگزوز، چگالی سلولی مبدل کاتالیستی (CPSI) و موقعیت آن بر فشار برگشتی و دینامیک حرارتی گازهای خروجی تأثیر می‌گذارد. فشار برگشتی بالا می‌تواند فرآیند تخلیه را سرکوب کرده و توان خروجی را کاهش دهد، در حالی که فعالیت ناکافی کاتالیست ممکن است عملکرد کنترل آلاینده‌ها را مختل کند. پیشرفت‌های اخیر در طراحی مبدل‌های سواره و مواد زیرلایه‌ای موجب دستیابی به بازده تبدیل بالا حتی در شرایط گذرا شده است [۶].

در این پژوهش، یک بررسی پارامتری جامع بر روی موتور بنزینی از طریق تحلیل اثرات ترکیبی جریان هوا، هندسه، احتراق و پارامترهای آگزوز-کاتالیست با استفاده از چارچوب مدل‌سازی GT-Power انجام شده است، به‌طوری‌که کل مدل موتور در GT-Power شبیه‌سازی گردید. پارامترهایی مانند زبری منیفولد، نسبت تراکم، زمان بندی جرقه و چگالی کاتالیست به‌صورت نظام‌مند در بازه‌های مختلف سرعت موتور تغییر داده شدند. نوآوری این تحقیق در ارزیابی جامع و یکپارچه زیرسامانه‌های موتور نهفته است که مجموعه پارامترهای بهینه را برای بهینه‌سازی گشتاور و توان و کمینه‌سازی BSFC ارائه می‌دهد و بینش‌های ارزشمندی برای بهبود طراحی و کنترل موتور بنزینی در شرایط واقعی کاری فراهم می‌کند.

۲- روند شبیه‌سازی عددی

۲-۱- طرح مدل عددی

GT-Power یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی استاندارد صنعتی توسعه‌یافته توسط شرکت Gamma Technologies است که به‌طور گسترده برای مدل‌سازی و تحلیل موتورهای احتراق داخلی و سامانه‌های انتقال قدرت استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به مهندسان امکان می‌دهد تا عملکرد موتور را تحت شرایط کاری مختلف شبیه‌سازی کرده و دیدگاه‌هایی درباره بازده سوخت، آلاینده‌ها، رفتار

موتورهای احتراق داخلی (ICE) علی‌رغم حرکت جهانی به‌سوی برقی‌سازی، همچنان به‌عنوان ستون فقرات حمل‌ونقل و تولید توان شناخته می‌شوند. حدود ۲۵ درصد از تقاضای انرژی جهانی هنوز توسط موتورهای احتراق داخلی تأمین می‌شود، به‌ویژه در مناطقی که زیرساخت برق توسعه‌نیافته یا از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. از این رو، بهینه‌سازی عملکرد و صرفه‌جویی سوخت موتور همچنان از اولویت‌های اصلی پژوهشگران و تولیدکنندگان است. یکی از راهبردهای کلیدی برای افزایش بازده موتور، درک تأثیر دینامیک جریان هوا، زمان‌بندی احتراق، پیکربندی هندسی و سامانه پس‌پردازش آگزوز بر شاخص‌های عملکردی موتور مانند گشتاور، توان و مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) است [۱].

در میان این عوامل، مدیریت جریان هوا نقش محوری در تنظیم بازده حجمی (η_v) موتورهای احتراق جرقه‌ای دارد. بازده حجمی مستقیماً با جرم هوایی که سیلندر در مرحله مکش دریافت می‌کند در ارتباط است و عواملی چون موقعیت دریچه گاز، فشار و دمای منیفولد و زبری سیستم ورودی بر آن تأثیرگذارند. جریان‌های ناپایدار ناشی از باز و بسته شدن سوپاپ‌ها و نوسانات سرعت موتور، امواج فشاری ایجاد می‌کنند که با هندسه سیستم ورودی برهم‌کنش دارند. در صورت زمان‌بندی مناسب، این امواج فشاری می‌توانند برای افزایش شارژ سیلندر استفاده شوند و بدین ترتیب خروجی موتور را بهبود بخشند. سیستم‌های منیفولد ورودی متغیر در پاسخ به این پدیده توسعه یافته‌اند و امکان تطبیق هندسی با شرایط بار و سرعت موتور را فراهم می‌کنند [۲].

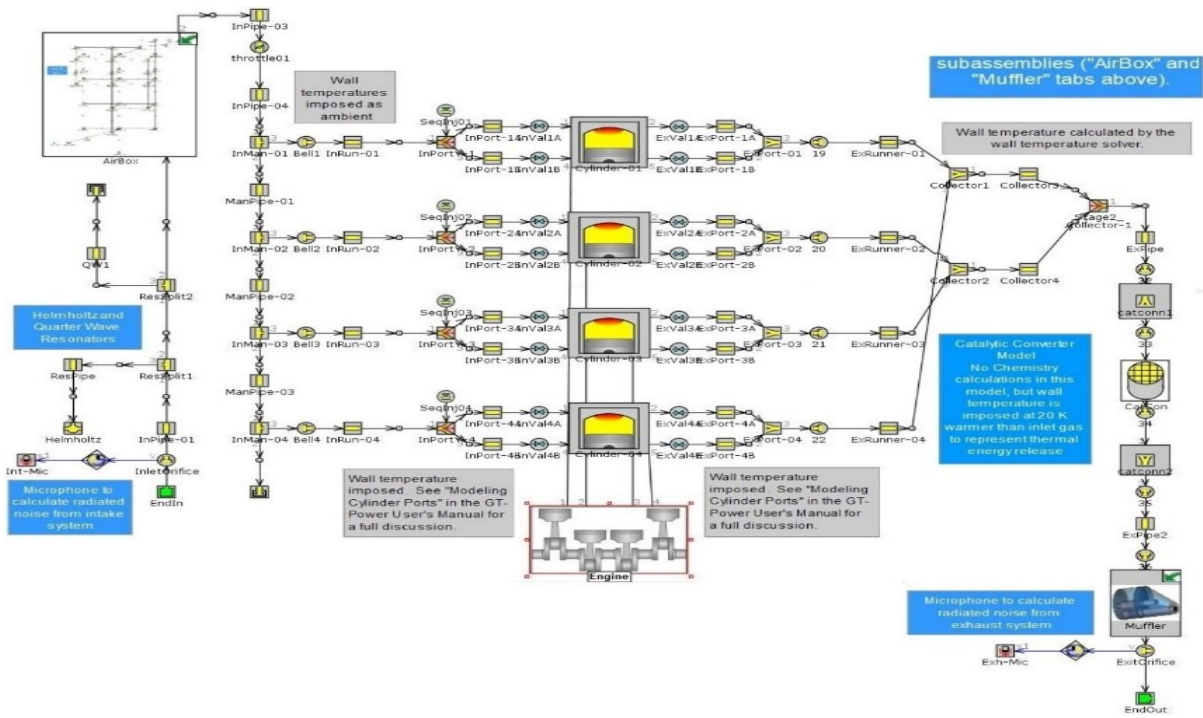
پژوهش‌ها نشان می‌دهد که طول و قطر منیفولد مستقیماً بر زمان‌بندی و دامنه امواج فشاری تأثیر دارند. مجاری کوتاه‌تر برای عملکرد در دوره‌های بالا مناسب‌اند، در حالی که مجاری بلندتر گشتاور در دوره‌های پایین را افزایش می‌دهند. همچنین قطر منیفولد سرعت جریان هوا را تعیین می‌کند؛ قطرهای بزرگ‌تر برای عملکرد در دوره‌های بالا مطلوب‌تر هستند. مطالعات تجربی و محاسباتی نشان داده‌اند که تغییر این متغیرها می‌تواند بازده حجمی را بیش از ۸ درصد افزایش دهد که بهبود گشتاور و کاهش مصرف سوخت را در پی دارد [۳].

به همین ترتیب، پارامترهای هندسی خود موتور مانند نسبت تراکم، نسبت قطر به کورس و طول شاتون نیز اهمیت بالایی دارند. این پارامترها بازده ترمودینامیکی و مزیت مکانیکی را تعیین کرده و بر تحویل توان و پایداری احتراق اثر می‌گذارد. افزایش نسبت تراکم، بازده حرارتی را بالا می‌برد، اما خطر کوبش را به‌ویژه در بارهای بالا افزایش می‌دهد. ترکیب‌های بهینه قطر و کورس می‌توانند بر انتشار شعله و شدت آشفته‌گی در طول احتراق اثر بگذارند. همچنین طول شاتون، حرکت پیستون را تغییر داده و بر

قابل توجهی کاهش داده و دقت طراحی و کالیبراسیون موتور را افزایش می دهد.

در شکل ۱ مدل شبیه سازی شده را نشان می دهد و مشخصات موتور در جدول ۱ لیست بندی شده است. موتور در حالت پایدار و شرایط بار کامل بررسی شده است و برای ارائه نتایج، دور موتور در محدوده [۱۰۰۰-۱۶۰۰] با فاصله ۱۰۰۰ دور در دقیقه تغییر داده شده است.

احتراق و مدیریت حرارتی به دست آورند. در مطالعه حاضر، از GT-Power برای ایجاد یک مدل یک بعدی دقیق از موتور بنزینی استفاده شد که امکان تغییر پارامتری جریان هوا، هندسه، زمان بندی احتراق و پارامترهای کاتالیست-اگزوز را فراهم می کند. حل گره های پیشرفته و ابزارهای تحلیل بلادرنگ این نرم افزار، آن را برای بهینه سازی گشتاور، توان و مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) ایده آل کرده است. استفاده از آن زمان و هزینه توسعه را به میزان



شکل ۱ مدل شبیه سازی در محیط GT-Power.

Fig.1 Simulation model in GT-Power environment

جدول ۱ مشخصات و شرایط عملکردی موتور تقویت شده EF7.

Table 1 Details of the developed EF7 engine characteristics.

Number	Characteristic	EF7 CNG engine [7]	Current work
1	Cubic capacity [cm ³]	1645	1619
2	Compression ratio [-]	11.2:1	11.2:1
3	Bore × Stroke length [mm]	78.6×85	77.4×86
4	Effective torque [N.m]	184/4000	141/4000
5	Effective power [kW]	87/6000	86/6000
6	Fuel [-]	gasoline	gasoline

ناحیه نسوخته به ناحیه سوخته منتقل می شود. مقدار مخلوط منتقل شده در این گام توسط نرخ سوختن کنترل می شود. نرخ سوختن بر اساس انتخاب مدل احتراق محاسبه می گردد. پس از انتقال مخلوط از ناحیه سوخته به ناحیه سوخته، موازنه شیمیایی برای کل ناحیه سوخته انجام می شود که تمام اتم های موجود در این ناحیه را در نظر می گیرد. در نهایت، پس از محاسبه ترکیب جدید ناحیه سوخته، انرژی داخلی محاسبه می شود [۸].

۲-۲- معادلات حاکم

در این مطالعه، مدل سازی موتور در محیط نرم افزار تجاری GT Power انجام شده است. در نرم افزار GT Power، احتراق به صورت دو ناحیه ای انجام می شود. بدین ترتیب، محتویات داخل سیلندر در ابتدای احتراق به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می شوند. در شروع احتراق فرض می شود که تمام محتویات سیلندر در ناحیه نسوخته قرار دارند. در هر گام زمانی، مخلوطی از سوخت و هوا از

$$T_b = \frac{9550 P_b}{N_r} \quad (۸)$$

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a dt}{\rho_{ref} V_d} \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، ρ_{ref} و \dot{m}_a به ترتیب نرخ جرمی لحظه‌ای هوای ورودی به موتور و چگالی هوا در حالت مرجع را نشان می‌دهند.

همچنین، مصرف ویژه سوخت ترمزی در رابطه (۱۰) ارائه شده است [۱۴].

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، \dot{m}_f نرخ جرمی سوخت است.

۲-۳- روش حل

روش حل عددی مبتنی بر الگوریتم رانگ-کوتا در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشخص است، برای محاسبه انتقال حرارت به دیواره سیلندر از مدل حرارتی ووشنی و برای مدل‌سازی فرآیند احتراق از تابع ویبه استفاده شده است. گام زاویه‌ای حل عددی برابر با ۱ درجه میل‌لنگ در نظر گرفته شده و شرط همگرایی نیز بر اساس فشار داخل سیلندر به صورت یک معیار نسبی تعریف شده است؛ به گونه‌ای که زمانی همگرایی حاصل شده تلقی می‌شود که تغییرات فشار بین دو تکرار متوالی کمتر از ۱ درصد مقدار فشار ($\Delta p/p < 0.01$) باشد، و نه مقدار مطلق ۱ پاسکال در نظر گرفته شود. این تعریف موجب افزایش دقت و پایداری حل عددی در کل محدوده عملکرد موتور می‌شود. همچنین، طول گسسته‌سازی لوله‌های ورودی و خروجی موتور به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۵۵ قطر سیلندر در نظر گرفته شده است.

روش حل عددی، روش رانگ-کوتا است. همان‌گونه که مشخص است، مدل حرارتی ووشنی برای محاسبه انتقال حرارت به دیواره سیلندر و مدل احتراق ویبه برای مدل‌سازی احتراق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گام زاویه‌ای برای حل عددی برابر با ۱ درجه در نظر گرفته شده و شرط همگرایی بر اساس فشار موتور تعریف شده است. شایان ذکر است که طول گسسته‌سازی برای لوله‌های ورودی و خروجی موتور به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۵۵ قطر سیلندر در نظر گرفته شده است.

۲-۴- شرایط عملیاتی و مرزی

شرایط مرزی نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت و قابلیت بازتولید نتایج شبیه‌سازی عددی موتور دارند، زیرا این شرایط وضعیت ترمودینامیکی سیال ورودی، مشخصات احتراق و فرضیات کنترلی را تعریف می‌کنند. این پارامترها شامل نوع سوخت، نسبت هوا به سوخت، شرایط محیطی، وضعیت بار موتور و فرضیات کنترلی سیستم ECU هستند که مستقیماً بر فشار سیلندر، نرخ آزادسازی حرارت و عملکرد کلی موتور تأثیر می‌گذارند. در این مطالعه، شرایط مرزی به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که امکان بررسی ایزوله اثر پارامترهای هندسی و کنترلی فراهم گردد و از مداخله متغیرهای

بنابراین، معادله انرژی برای هر گام زمانی برای نواحی نسوخته و سوخته به ترتیب مطابق با روابط (۱) و (۲) ارائه می‌شود [۸].

$$\frac{d(m_u e_u)}{dt} = -p \frac{dV_u}{dt} - Q_u + \left(\frac{dm_f}{dt} H_f + \frac{dm_a}{dt} H_a \right) + \frac{dm_{f,i}}{dt} h_{f,i} \quad (۱)$$

$$\frac{d(m_b e_b)}{dt} = -p \frac{dV_b}{dt} - Q_b + \left(\frac{dm_f}{dt} H_f + \frac{dm_a}{dt} H_a \right) \quad (۲)$$

در اینجا، اندیس‌های u و b به ترتیب نشان‌دهنده نواحی نسوخته و سوخته هستند و اندیس‌های f و i بیانگر سوخت پاشیده شده می‌باشند. همچنین e ، m و V به ترتیب انرژی داخلی ویژه، جرم و حجم هستند. شایان ذکر است که Q نرخ انتقال حرارت بوده و نرخ سوختن توسط $\frac{dm_f}{dt}$ مشخص می‌شود.

در این مطالعه، از تابع ویبه برای توصیف فرآیند احتراق استفاده می‌شود. کسر جرم سوخته به عنوان تابعی از زاویه میل‌لنگ از صفر شروع شده و به صورت نمایی به سمت یک میل می‌کند که نشان‌دهنده پایان احتراق است [۹]. بدین ترتیب، تابع ویبه مطابق رابطه (۳) ارائه می‌شود [۱۰].

$$x = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_a} \right)^n \right] \quad (۳)$$

در این رابطه، x کسر انرژی آزاد شده از سوخت ورودی است و θ_s ، θ و θ_a به ترتیب زاویه میل‌لنگ، زاویه شروع احتراق و مدت زمان زاویه‌ای احتراق هستند. همچنین در رابطه (۳)، n ، a ثابت‌های تابع ویبه بوده و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۳ و ۵ در نظر گرفته شده‌اند [۱۰].

در این شبیه‌سازی، به منظور مدل‌سازی انتقال حرارت بین گازهای احتراق و دیواره سیلندر، از مدل ووشنی استفاده شده است و ضریب انتقال حرارت این مدل توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$h_g = 3.26 B^{-0.2} p_{ref}^{0.8} T_{ref}^{0.53} V_c^{0.8} \quad (۴)$$

در این رابطه، B ، p_{ref} ، T_{ref} و V_c به ترتیب قطر سیلندر، فشار در حالت مرجع (۱۰۱۳۲۵ پاسکال)، دما در حالت مرجع (۲۹۸ کلوین) و نرخ جریان گاز در محفظه احتراق هستند [۱۱].

توان خروجی ترمزی موتور بر اساس رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۲].

$$P_b = BMEP \frac{n_{cyl} V_d N_r}{2 \times 60} \quad (۵)$$

$$BMEP = IMEP - FMEP \quad (۶)$$

$$IMEP = \frac{\oint p dV}{V_d} \quad (۷)$$

در این روابط، $BMEP$ ، n_{cyl} ، V_d ، N_r و $IMEP$ به ترتیب بیانگر فشار متوسط مؤثر ترمزی، تعداد سیلندرها، حجم جابجایی سیلندر، سرعت موتور (rpm)، فشار متوسط مؤثر اندیکه شده و فشار متوسط مؤثر اصطکاکی هستند.

همچنین، گشتاور ترمزی و راندمان حجمی موتور بر اساس روابط (۸) و (۹) قابل محاسبه هستند [۱۳].

کنترلی تطبیقی جلوگیری شود. کلیه شرایط مرزی مطابق داده‌های مرجع موتور پایه و تنظیمات استاندارد مدل اعمال شده‌اند.

جدول ۲ شرایط مرزی و عملیاتی اعمال شده در شبیه‌سازی.

Table 1 Boundary and Operating Conditions Used in the Simulation.

Category	Parameter	Value / Description
Fuel Properties		
	Fuel type	Gasoline
	Fuel model	Default gasoline (GT-Power)
	Research Octane Number	95
	Lower Heating Value (LHV)	Based on GT-Power fuel database
Air-Fuel Ratio		
	AFR	14.7:1
	Equivalence ratio	$\lambda \approx 1$ (Stoichiometric)
	Control assumption	Constant for all cases
Ambient and Intake Conditions		
	Ambient pressure	1 bar
	Intake air temperature	298 K
	Reference pressure	101325 Pa
	Humidity	Neglected (dry air assumed)
Engine Load Conditions		
	Engine load	Full load
	Throttle position	Wide Open Throttle (100%)
ECU Control Assumptions		
	ECU model	Simplified control model
	Spark timing	Parametric (user-defined)
	AFR control	Constant
	Knock sensor	Disabled
	Closed-loop control	Not activated
Physical Sub-models		
	Combustion model	Wiebe two-zone model
	Heat transfer model	Woschni model
	Friction model	Default semi-empirical GT-Power model

۲-۵- اعتبارسنجی

برای نشان دادن دقت مدل توسعه‌یافته، سه مطالعه مرجع معتبر در نظر گرفته شده و نتایج کار حاضر در سرعت‌های مختلف موتور با آن‌ها مقایسه شده است.

در شکل ۲، توان و گشتاور مدل حاضر با داده‌های تجربی شرکت نیرو محرکه ایران خودرو [۱۵] و مدل شیخی و همکاران [۱۰] مقایسه و صحت‌گذاری شده است. بر اساس شکل ۲، بیشترین و کمترین درصد انحراف نسبی توان به ترتیب ۳۱/۵۵٪ و ۵/۶۹٪ است که در سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۶۰۰۰ دور بر دقیقه رخ داده‌اند. علاوه بر این، میانگین انحراف نسبی در کل بازه سرعت موتور از ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برابر با ۱۴/۸۲٪ است که صحت مدل توسعه‌یافته در این مطالعه را نشان می‌دهد. بعلاوه، بیشترین و کمترین درصد انحراف نسبی گشتاور به ترتیب ۳/۵۲٪ و ۰/۲٪ است که در سرعت‌های ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ دور بر دقیقه رخ داده‌اند. همچنین میانگین انحراف نسبی در کل بازه سرعت موتور از ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برابر با ۱/۴۸٪ است که صحت مدل توسعه‌یافته در این پژوهش را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که تفاوت بازه سرعت در مقایسه توان و گشتاور ناشی از محدودیت داده‌های تجربی مرجع بوده است، به طوری که مقدار گشتاور در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در داده‌های مرجع گزارش نشده و اولین نقطه معتبر از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در دسترس بوده است، در حالی که داده توان در این سرعت موجود بوده است. از این رو، اعتبارسنجی توان در بازه کامل ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و

اعتبارسنجی گشتاور در بازه ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است.

لازم به ذکر است که بیشترین اختلاف توان در دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه عمدتاً ناشی از تفاوت‌های ساختاری و عملکردی بین موتور توسعه‌یافته و موتور مرجع ولید شده، مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۱، و نیز محدودیت‌های مدل‌سازی در دوره‌های پایین است. اختلاف در پارامترهایی نظیر حجم دقیق، قطر و کورس سیلندر و مقادیر گشتاور نامی می‌تواند منجر به تغییر در راندمان حجمی و فشار متوسط مؤثر شده و در نتیجه اختلاف در توان خروجی ایجاد نماید. علاوه بر این، در دوره‌های پایین مقدار مطلق توان تولیدی کوچک است، بنابراین اختلاف عددی محدود می‌تواند به صورت درصدی مقدار بزرگی نشان داده شود. از سوی دیگر، استفاده از مدل احتراق ویبه و مدل نیمه‌تجربی اصطکاک بدون کالیبراسیون کامل با داده‌های تجربی همان موتور، می‌تواند موجب بیش‌برآورد توان در این ناحیه گردد، زیرا سهم تلفات اصطکاک و پمپاژ در سرعت‌های پایین بیشتر است. با این وجود، با افزایش سرعت موتور، میزان انحراف به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و تطابق مناسبی بین نتایج عددی و داده‌های تجربی مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده قابلیت اتکای مدل توسعه‌یافته برای تحلیل‌های عملکردی و مطالعات پارامتری، به‌ویژه در محدوده دوره‌های میانی و بالا است [۱۶]، [۱۷].

۳- نتایج و بحث

عملکرد موتور در بازه سرعتی ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برای ارزیابی اثرات ترکیبی عوامل جریان هوا، پارامترهای هندسی، زمان بندی احتراق و ویژگی‌های سامانه اگزوز مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات در پارامترهای جریان هوا مانند زاویه دریچه گاز، فشار هوای ورودی، دما و زبری منی فولد به‌طور قابل توجهی بر راندمان حجمی تأثیر گذاشتند که مستقیماً بر گشتاور و توان خروجی اثر دارد. پارامترهای هندسی شامل نسبت تراکم، نسبت قطر به کورس و طول شاتون نیز نقش کلیدی داشتند، به‌گونه‌ای که افزایش نسبت تراکم و ابعاد هندسی بهینه باعث بهبود بازده احتراق و تولید توان بیشتر شدند. تنظیمات زمان بندی احتراق، به‌ویژه نرخ تزریق سوخت، زمان تزریق و زمان جرقه، موجب بهینه‌سازی افزایش فشار درون سیلندرها گردید که در نتیجه گشتاور را به حداکثر و مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) را به حداقل رساند. علاوه بر این، حجم اگزوز و چگالی سلولی کاتالیست بر فشار برگشتی و کنترل آلاینده‌ها تأثیر گذاشته و در نتیجه بر تنفس موتور و صرفه‌جویی سوخت اثر گذاشتند. در کل بازه سرعت بررسی شده، گشتاور بیشینه معمولاً در سرعت‌های میانی (۴۰۰۰~ دور بر دقیقه) رخ داد، در حالی که حداکثر توان در نزدیکی ۶۰۰۰ دور بر دقیقه ثبت شد.

بهترین بازده سوخت، که با کمترین مقدار BSFC مشخص می‌شود، معمولاً در سرعت‌های پایین تا متوسط موتور با تنظیم هماهنگ

در سرعت‌های بالا، سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد و منیفولد باید ورود سریع و بدون مانع هوا به داخل سیلندرها را برای حفظ راندمان حجمی امکان‌پذیر کند. راندهای بلندتر و باریک‌تر به دلیل چرخش بیشتر، گشتاور دور پایین را افزایش می‌دهند، در حالی که راندهای کوتاه‌تر و پهن‌تر برای عملکرد در دورهای بالا مناسب‌تر هستند و جریان هوای بیشتری را در زمان کمتری فراهم می‌کنند [۱۸].

یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر راندمان جریان هوا، زبری سطح منیفولد است. زبری کمتر، ضخامت لایه مرزی و تلفات اصطکاک را کاهش می‌دهد و راندمان حجمی را بهبود می‌بخشد، در حالی که زبری بیش از حد می‌تواند باعث ایجاد تلاطم و افت فشار ناخواسته شود. در این مطالعه، مقادیر زبری منیفولد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۳/۲ میلی‌متر با استفاده از منیفولدهای آلومینیومی به دلیل وزن سبک، هزینه کم و رسانایی حرارتی خوب آنها آزمایش شد. برای شفافیت مدل‌سازی عددی، این مقادیر زبری در نرم‌افزار GT-Power از طریق پارامتر Hydraulic Roughness Height اعمال شدند که مستقیماً بر ضریب اصطکاک داخلی جریان و افت فشار هوا تأثیر می‌گذارد. تغییر زبری باعث تغییر در توزیع جریان هوا و تراکم مخلوط هوا-سوخت در سیلندرها می‌شود و اثر آن بر توان، گشتاور و مصرف سوخت به‌طور خودکار در شبیه‌سازی لحاظ گردیده است.

در حالی که آلومینیوم مزایایی مانند عملکرد بهتر در شروع سرد و نسبت استحکام به وزن مطلوب را ارائه می‌دهد، چالش‌هایی مانند مقاومت کمتر در دمای بالا و حساسیت بیشتر به خوردگی را نیز به همراه دارد. نتایج تجربی نشان داد که بالاترین گشتاور در ۴۰۰۰ دور در دقیقه با منیفولد آلومینیومی رخ می‌دهد. به‌طور مشابه، حداکثر توان در ۶۰۰۰ دور در دقیقه با استفاده از همان پیکربندی آلومینیومی مشاهده شد. علاوه بر این، بهترین راندمان سوخت (کمترین BSFC) زمانی ثبت شد که منیفولد از جنس آلومینیوم با سطح صاف بود که مزیت زبری کمتر را در به حداقل رساندن مقاومت جریان و بهبود احتراق تأیید می‌کند. این یافته‌ها با اصول آیرودینامیکی و ترمودینامیکی تثبیت شده در طراحی موتور احتراق داخلی همسو هستند و بر اهمیت انتخاب مواد و بافت سطح در بهینه‌سازی عملکرد در طیف وسیعی از دور موتور تأکید می‌کنند. ترکیب ساختار آلومینیومی و زبری سطح به حداقل رسیده، پایداری جریان هوا را افزایش می‌دهد، از اختلاط بهتر سوخت و هوا پشتیبانی می‌کند و تلفات پمپاژ را کاهش می‌دهد و به بهبود توان خروجی، گشتاور و مصرف سوخت کمک می‌کند (شکل ۳).

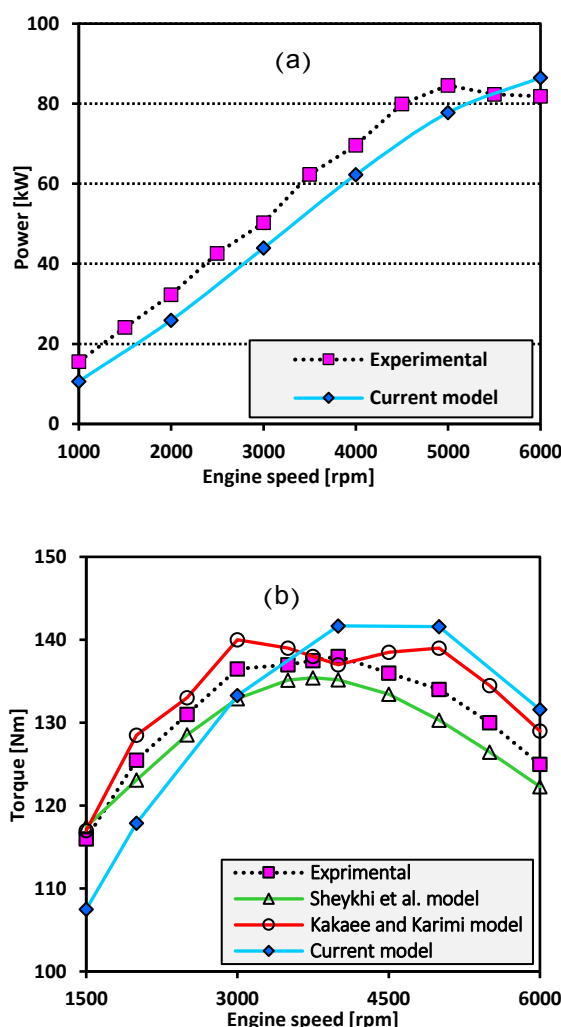
۳-۲- نسبت تراکم

نسبت تراکم (CR) یکی از بحرانی‌ترین پارامترهای طراحی در موتورهای احتراق داخلی است. این نسبت به‌صورت نسبت حجم کل سیلندر هنگامی که پیستون در پایین‌ترین نقطه خود (BDC) قرار دارد به حجم آن در بالاترین نقطه (TDC) تعریف می‌شود. این

پارامترها حاصل شد. این یافته‌ها بر ماهیت وابسته به هم متغیرهای موتور و ضرورت بهینه‌سازی هم‌زمان آن‌ها برای دستیابی به بهبود متعادل در توان، گشتاور و مصرف سوخت تأکید دارند.

۳-۱- زبری منیفولد ورودی

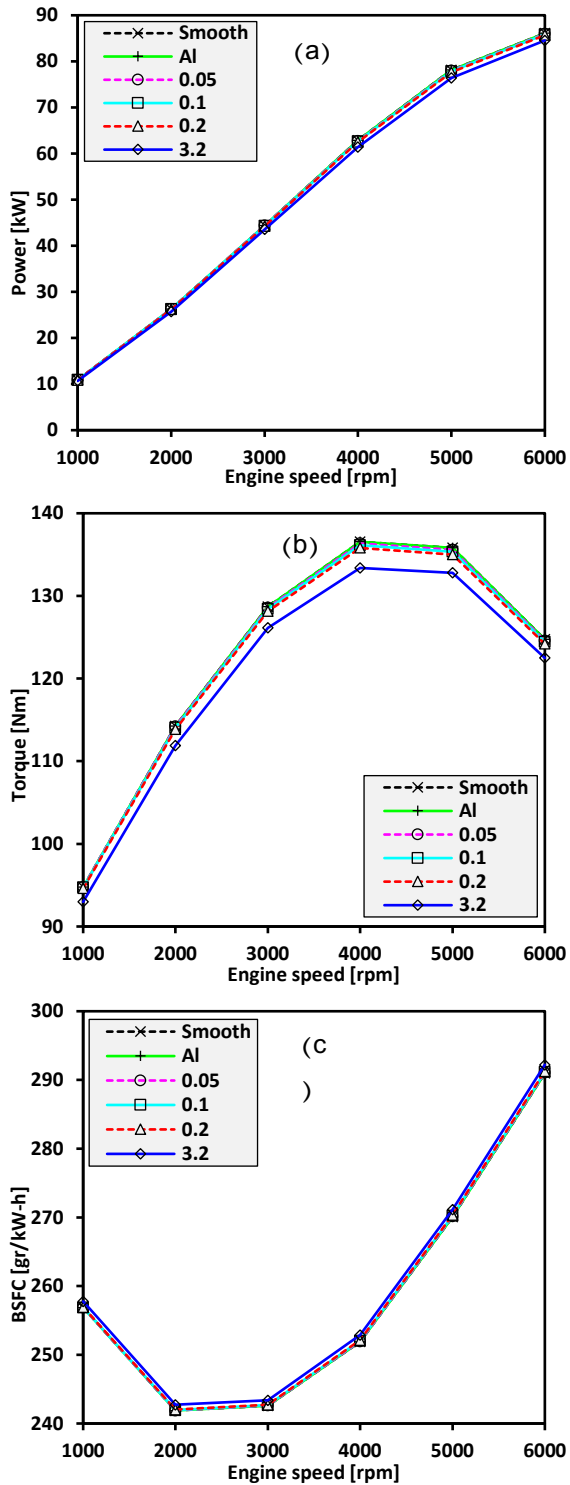
منیفولد ورودی نقش مهمی در توزیع هوا از بدنه دریچه گاز به سیلندرها، موتور ایفا می‌کند. هوا پس از عبور از دریچه گاز، وارد منیفولد می‌شود که معمولاً به دو بخش تقسیم می‌شود: روزناتور (برای کاهش نوسانات فشار) و راندها که هوا را به داخل محفظه احتراق هدایت می‌کنند. رفتار جریان هوا در داخل منیفولد، به ویژه پس از دریچه گاز، برای احتراق کارآمد حیاتی می‌شود.



شکل ۲ مقایسه مدل فعلی، داده‌های تجربی [۱۵] و شیخی و همکاران [۱۰] در دوره‌های مختلف؛ (الف) ارزیابی توان، و (ب) ارزیابی گشتاور.

Fig.2 compares the present model with the experimental data [15] and the results of Sheykhi et al. [10] at different engine speeds: (a) power evaluation and (b) torque evaluation.

در سرعت‌های پایین موتور، طراحی رانر باید چرخش و تلاطم هوا را ارتقا دهد تا اختلاط کامل سوخت و هوا تضمین شود. برعکس،



شکل ۳ تأثیر زبری منیفولد ورودی و سرعت موتور بر: (الف) توان، (ب) گشتاور و (ج) BSFC.

Fig.3 The effect of intake manifold roughness and engine speed on: (a) power, (b) torque, and (c) BSFC.

پارامتر تعیین می‌کند که مخلوط هوا و سوخت تا چه اندازه پیش از احتراق فشرده می‌شود. در موتورهای بنزینی، نسبت تراکم معمولاً بین ۸:۱ تا ۱۲:۱ است، در حالی که موتورهای پرفشار یا مسابقه‌ای ممکن است نسبت‌هایی تا ۱۳:۱ یا بیشتر را بسته به نوع سوخت و استراتژی‌های کنترل احتراق به کار گیرند. افزایش نسبت تراکم معمولاً منجر به افزایش بازده حرارتی می‌شود، زیرا انرژی بیشتری از فرآیند احتراق به دلیل فشار و دمای بالاتر پیش از اشتعال استخراج می‌گردد [۱۹].

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، پنج نسبت تراکم متفاوت — ۸/۵، ۹/۵، ۱۰/۵، ۱۱ و ۱۱/۵ — برای ارزیابی تأثیر آن‌ها بر رفتار موتور تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که بیشترین گشتاور در ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و نسبت تراکم ۱۱/۵ به دست آمد، که بیانگر آن است فشرده‌سازی بیشتر پیش از احتراق منجر به احتراق مؤثرتر و تولید نیروی بیشتر شده است. همچنین بیشترین توان در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و همان نسبت تراکم حاصل شد، و کمترین BSFC نیز در نسبت تراکم ۱۱/۵ ثبت گردید که نشان‌دهنده بهبود مصرف سوخت است. با این حال، افزایش نسبت تراکم خطر وقوع کوبش موتور (احتراق خودبه‌خودی) را افزایش می‌دهد که برای جلوگیری از اشتعال زودرس و آسیب موتور، نیاز به استفاده از سوخت با عدد اکتان بالا دارد.

3-3- نسبت قطر به کورس (B/S)

نسبت قطر به کورس (B/S) یکی از پارامترهای هندسی بنیادی در طراحی موتورهای احتراق داخلی است که به شدت بر بازده احتراق، قابلیت کارکرد در دورهای بالا و ویژگی‌های کلی عملکرد تأثیر می‌گذارد. قطر سیلندر (Bore) به قطر داخلی سیلندر اشاره دارد، در حالی که کورس (Stroke) فاصله‌ای است که پیستون بین بالاترین نقطه (TDC) و پایین‌ترین نقطه (BDC) طی می‌کند. هنگامی که قطر و کورس برابر باشند ($B/S \approx 1$)، موتور «مربع» نامیده می‌شود که عملکرد متعادلی از نظر گشتاور و قابلیت دور بالا ارائه می‌دهد. موتوری که نسبت $B/S < 1$ دارد، کورس بلندتری نسبت به قطر دارد و معمولاً برای گشتاور در دورهای پایین بهینه می‌شود، زیرا کورس بلندتر موجب افزایش گشتاور بر روی میل‌لنگ می‌شود. با این حال، این موتورها در دورهای بالا با محدودیت‌هایی نظیر سرعت بیشتر پیستون و اصطکاک افزوده مواجه‌اند. در مقابل، موتورهای با نسبت $B/S > 1$ که دارای قطر بزرگ‌تر و کورس کوتاه‌تر هستند، امکان استفاده از سوپاپ‌های بزرگ‌تر، تنفس بهتر و کارکرد در دورهای بالاتر را فراهم می‌کنند، که آن‌ها را برای کاربردهای عملکردی و مسابقه‌ای مناسب‌تر می‌سازد [۲۰].

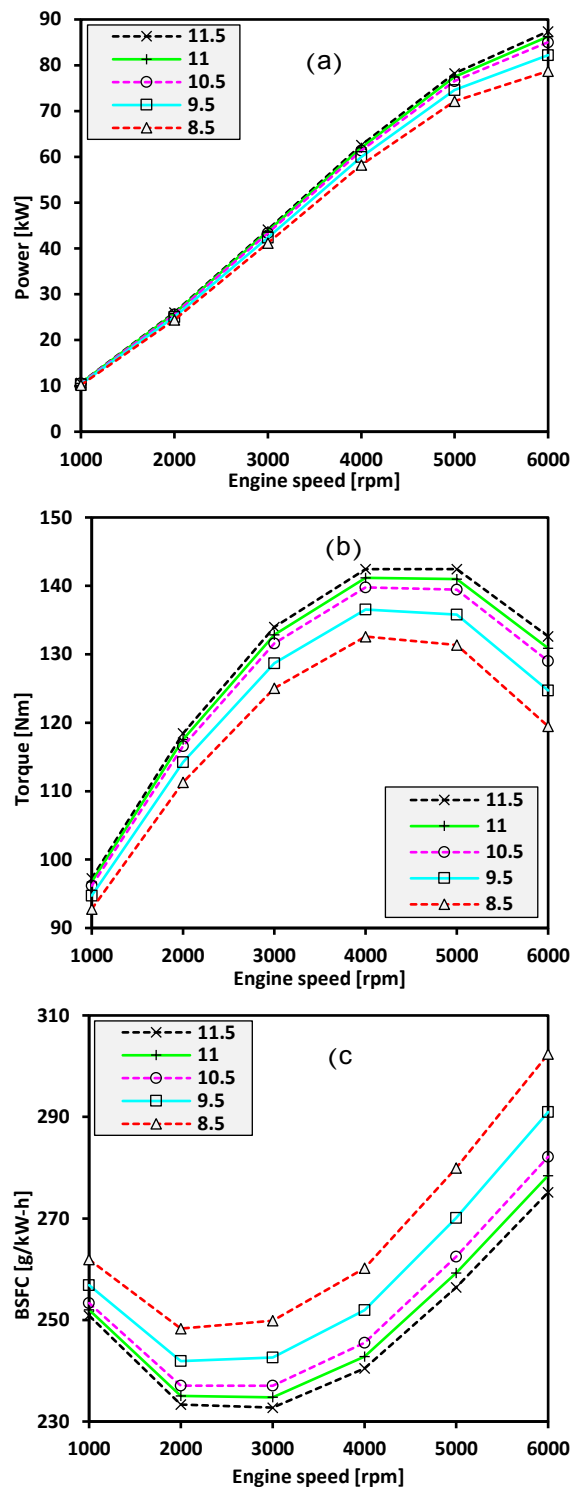
نشان داد که بیشترین گشتاور در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه با پیکربندی ۸۶-۹۰ میلی‌متر حاصل شد، که حدود ۵/۲٪ بیشتر از پیکربندی مربع (۸۶-۸۶ میلی‌متر) بود و برتری نسبی موتورهای با کورس بلندتر را در بازه دور پایین تا متوسط تأیید می‌کند. همچنین بیشترین توان در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه برای همین پیکربندی حاصل شد که نسبت به حالت مربع حدود ۳/۸٪ افزایش نشان داد، که این موضوع نشان‌دهنده بهبود تبدیل انرژی احتراق به کار مکانیکی در این هندسه است. در مقابل، کمترین BSFC با پیکربندی ۸۶-۹۰ میلی‌متر به دست آمد که نسبت به پیکربندی مربع حدود ۴/۵٪ کاهش داشت و بیانگر بهبود راندمان مصرف سوخت در آرایش اورسکوئر، به ویژه در دورهای بالا است. ارائه این مقایسه کمی نشان می‌دهد که تغییر نسبت هندسی B/S می‌تواند تأثیر قابل توجه و قابل اندازه‌گیری بر شاخص‌های عملکردی موتور داشته باشد.

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب نسبت قطر به کورس باید با محدوده عملکرد مورد نظر موتور سازگار باشد—چه هدف افزایش بازده سوخت، افزایش گشتاور در دورهای پایین، یا بهبود عملکرد در دورهای بالا باشد. درک و بهینه‌سازی نسبت قطر به کورس در توسعه موتور اهمیت زیادی دارد، به ویژه در طراحی سامانه‌های محرکه‌ای که برای کاربردهای خاص خودرو تنظیم می‌شوند. در حالی که موتورهای اورسکوئر در خودروهای پرفشار غالب‌اند، طراحی‌های آندسکوئر همچنان در کاربردهایی که نیازمند گشتاور قوی در دورهای پایین و بازده مناسب در شرایط کاری واقعی هستند، ارزشمند باقی مانده‌اند.

۳-۴- زمان بندی جرعه

زمان بندی جرعه در موتور بنزینی احتراق داخلی به زاویه میل‌لنگی اشاره دارد که در آن شمع، مخلوط هوا و سوخت را در داخل محفظه احتراق مشتعل می‌کند. این رویداد احتراق باید در نقطه‌ای بهینه پیش از رسیدن پیستون به نقطه مرگ بالا (TDC) رخ دهد تا فشار حاصل از احتراق بتواند بیشترین نیرو را در زمان ضربه توان بر پیستون وارد کند. اگر جرعه خیلی زود زده شود، ممکن است موجب کوبش موتور یا افزایش بیش از حد فشار پیش از TDC شود که بازده را کاهش داده و خطر آسیب ایجاد می‌کند. در مقابل، جرعه دیرهنگام (پس از TDC) باعث احتراق ناقص، کاهش توان و افزایش مصرف سوخت می‌گردد. در موتورهای مدرن، واحدهای کنترل الکترونیکی (ECU) به‌طور مداوم زمان جرعه را بر اساس بار موتور، دور، موقعیت دریچه گاز و دما تنظیم می‌کنند تا عملکرد بهینه حفظ شود [۲۱].

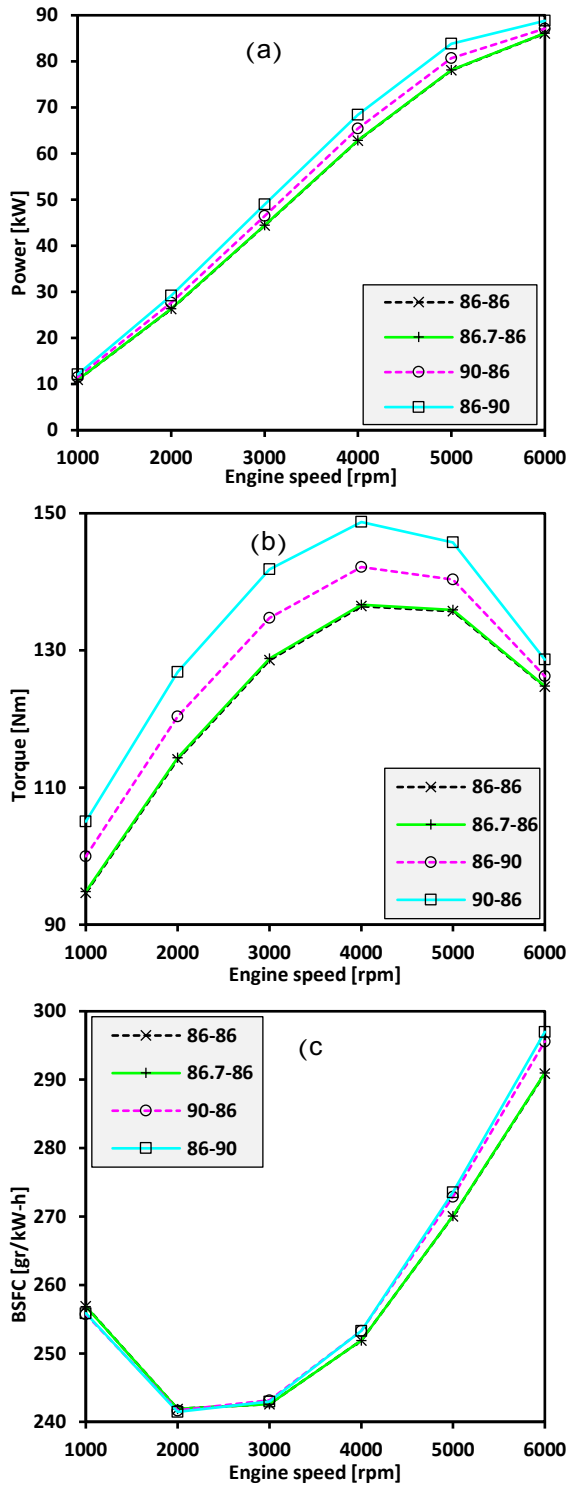
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، مقادیر تأخیر زمان جرعه از ۶۰° تا ۰° میل‌لنگ مورد بررسی قرار گرفتند. شبیه‌سازی نشان داد که بیشترین گشتاور در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه با تأخیر ۰° و همچنین بیشترین توان در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه در همین مقدار به دست آمد،



شکل ۴ تأثیر نسبت تراکم و سرعت موتور بر؛ (الف) توان، (ب) گشتاور و (ج) BSFC.

Fig.4 The effect of compression ratio and engine speed on: (a) power, (b) torque, and (c) BSFC.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، چندین پیکربندی قطر-کورس شامل ۸۶-۸۶ میلی‌متر (مربع)، ۸۶-۹۰ میلی‌متر، ۸۶-۸۶ میلی‌متر و ۸۶/۷ میلی‌متر و ۸۶-۸۶ میلی‌متر بررسی شدند. نتایج شبیه‌سازی



شکل ۵ تأثیر نسبت قطر به کورس و سرعت موتور بر: (الف) توان، (ب) گشتاور و (ج) BSFC.

Fig.5 The effect of bore-to-stroke ratio and engine speed on: (a) power, (b) torque, and (c) BSFC.

که نشان می‌دهد در شرایط مدل حاضر، هم‌زمانی آزادسازی حرارت با موقعیت پیستون در این زاویه مناسب‌تر پیش‌بینی شده است. با این حال، لازم به ذکر است که این مقدار لزوماً معادل نقطه MBT واقعی موتور نیست. علت این موضوع به محدودیت‌های مدل احتراق ویبه و ساده‌سازی‌های اعمال شده در مدل عددی بازمی‌گردد، زیرا در این مدل اثرات کامل انتشار شعله، اغتشاش جریان، و تنظیم تطبیقی زمان جرقه توسط ECU لحاظ نشده‌اند. علاوه بر این، ثابت فرض شدن پارامترهایی مانند نسبت هوا به سوخت و عدم استفاده از استراتژی کنترل تطبیقی جرقه می‌تواند موجب جابه‌جایی نقطه بهینه محاسباتی نسبت به مقدار واقعی شود. بنابراین، زاویه 0° به‌عنوان نقطه بهینه در چارچوب مدل عددی و شرایط شبیه‌سازی حاضر تفسیر می‌شود و تعیین دقیق MBT واقعی نیازمند داده‌های تجربی و کالیبراسیون پیشرفته‌تر مدل است. علاوه بر این، بهترین بازده سوخت (کمترین BSFC) نیز در 0° مشاهده شد، که در چارچوب مدل حاضر نشان‌دهنده تبدیل مؤثرتر انرژی حرارتی به کار مکانیکی است، هرچند این نتیجه به‌صورت عمومی برای همه موتورهای بنزینی قابل تعمیم نیست. تنظیم دقیق زمان جرقه مستلزم برقراری تعادل میان مقاومت در برابر کوپش، مدت‌زمان احتراق و تنش‌های مکانیکی است. سوخت‌های با عدد اکتان بالا اجازه زمان‌بندی جرقه پیشرفته‌تر را بدون کوپش می‌دهند، در حالی‌که سوخت‌های با اکتان پایین نیازمند تنظیمات محافظه‌کارانه‌تر هستند. علاوه بر این، زمان پیش‌جرقه باید طراحی محفظه احتراق، زمان‌بندی سوپاپ‌ها و نسبت هوا به سوخت را در نظر بگیرد. نوآوری‌هایی مانند حسگرهای کوپش و کنترل تطبیقی جرقه به موتورهای مدرن اجازه می‌دهد زمان‌بندی جرقه را به‌صورت لحظه‌ای در شرایط گوناگون بهینه کنند و عملکرد و آلایندگی را بهبود بخشند.

3-5- مبدل کاتالیستی

مبدل کاتالیستی یکی از اجزای حیاتی سیستم آگزوز خودرو است که برای کاهش آلاینده‌های مضر تولیدشده در فرآیند احتراق طراحی شده است. عملکرد آن بر اساس تبدیل گازهای سمی مانند مونوکسید کربن (CO)، هیدروکربن‌ها (HC) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) به مواد کم‌ضررتری مانند دی‌اکسید کربن (CO_2)، بخار آب (H_2O) و نیتروژن (N_2) از طریق واکنش‌های شیمیایی کاتالیستی است. کارایی این تبدیل تا حد زیادی به ساختار و چگالی سلولی بستر کاتالیستی بستگی دارد. چگالی سلولی بالاتر موجب افزایش سطح مؤثر برای واکنش‌های کاتالیستی و بهبود بازده تبدیل آلاینده‌ها می‌شود. با این حال، افزایش چگالی سلولی می‌تواند فشار معکوس گازهای خروجی را افزایش دهد که ممکن است بر پارامترهایی مانند گشتاور، توان و مصرف سوخت موتور تأثیر منفی بگذارد [۲۲].

سلولی CPI ۱۰۰ حاصل شد، در حالی که بیشترین توان نیز در ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و با همان چگالی سلولی ثبت گردید. علاوه بر این، کمترین مقدار مصرف ویژه سوخت ترمزی (BSFC) نیز با همین چگالی پایین کاتالیست مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که هرچند چگالی سلولی بالاتر ممکن است بازده تبدیل آلاینده‌ها را بهبود دهد، اما موجب افزایش مقاومت جریان گاز در سیستم اگزوز می‌شود که می‌تواند به صورت منفی بر خروجی و بازده سوخت موتور تأثیر بگذارد. در نتیجه، کاتالیستی با چگالی سلولی پایین‌تر ممکن است تعادل بهتری میان کنترل آلاینده‌گی و عملکرد موتور، به ویژه در سرعت‌های بالاتر، فراهم آورد.

این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی طراحی کاتالیست از نظر چگالی سلولی را برای دستیابی همزمان به سازگاری زیست‌محیطی و بازده موتور برجسته می‌سازد. همچنین حفظ سلامت مبدل کاتالیستی بسیار حیاتی است، زیرا افت کیفیت آن در طول زمان باعث کاهش کارایی و افزایش مصرف سوخت و آلاینده‌ها می‌شود. خودروهای مدرن از سامانه‌های پایش بلادرنگ برای ارزیابی وضعیت کاتالیست استفاده می‌کنند که اهمیت بازرسی و نگهداری منظم را دوچندان می‌کند.

۴- نتیجه و جمع بندی

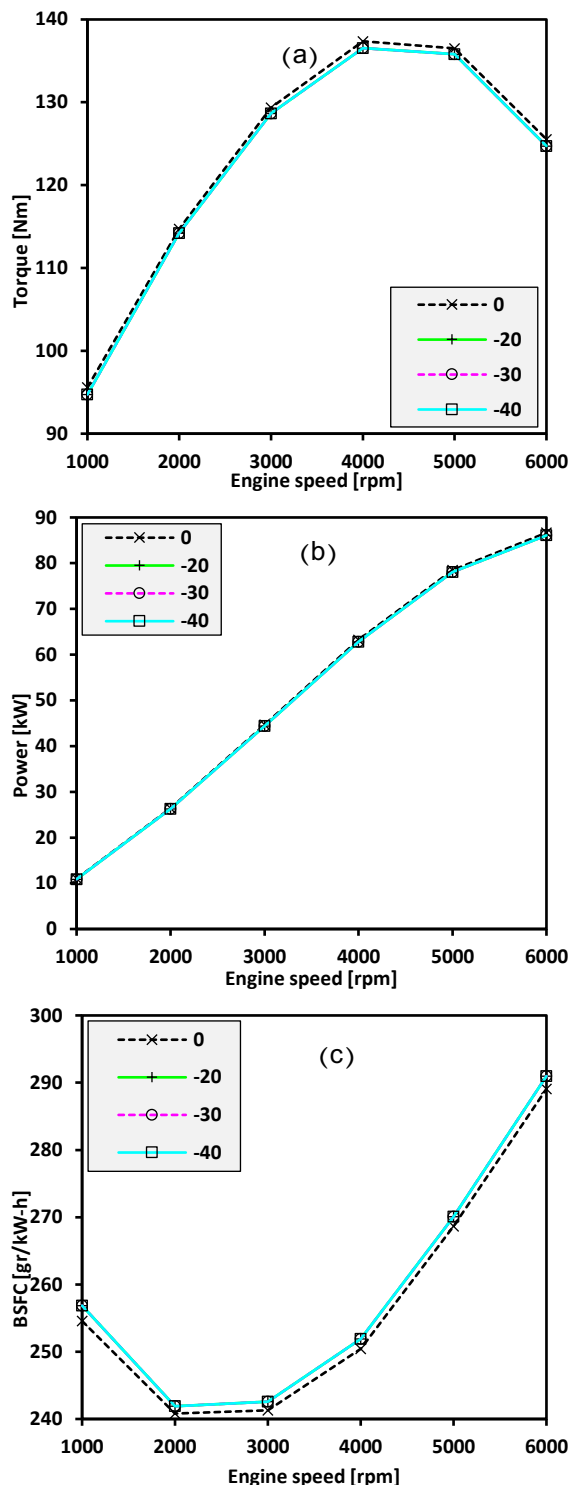
این مطالعه به طور جامع تأثیر پارامترهای جریان هوا، هندسه، زمان بندی احتراق و پارامترهای مرتبط با اگزوز را بر عملکرد موتور بنزینی در سرعت‌های موتور از ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه ارزیابی کرد. تجزیه و تحلیل نشان داد که معیارهای عملکردی مانند گشتاور، توان و مصرف سوخت ویژه ترمز (BSFC) به طور قابل توجهی تحت تأثیر تنظیم ترکیبی این پارامترها قرار می‌گیرند. هر عامل بسته به سرعت موتور، تأثیر متمایزی را نشان داد و اهمیت استراتژی‌های بهینه‌سازی یکپارچه را در طراحی و کنترل موتور برجسته کرد.

۱- در تأخیر جرقه ۰ درجه، گشتاور و قدرت به ترتیب در دوره‌های ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ دور در دقیقه به اوج خود رسیدند. این تنظیم، راندمان حرارتی را به خصوص در شرایط بار زیاد و سرعت بالا بهبود بخشیده و BSFC را ۵ تا ۸ درصد کاهش داده است.

۲- حجم اگزوز ۴۰۰۰ سانتی‌متر مکعب و چگالی کاتالیزور CPI ۱۰۰ بهترین راندمان سوخت را ارائه داد، با BSFC به میزان ۰/۲۵۸ کیلوگرم بر کیلووات ساعت در ۳۰۰۰ دور در دقیقه، که مزیت فشار برگشتی کمتر و جریان بهبود یافته را تأیید می‌کند.

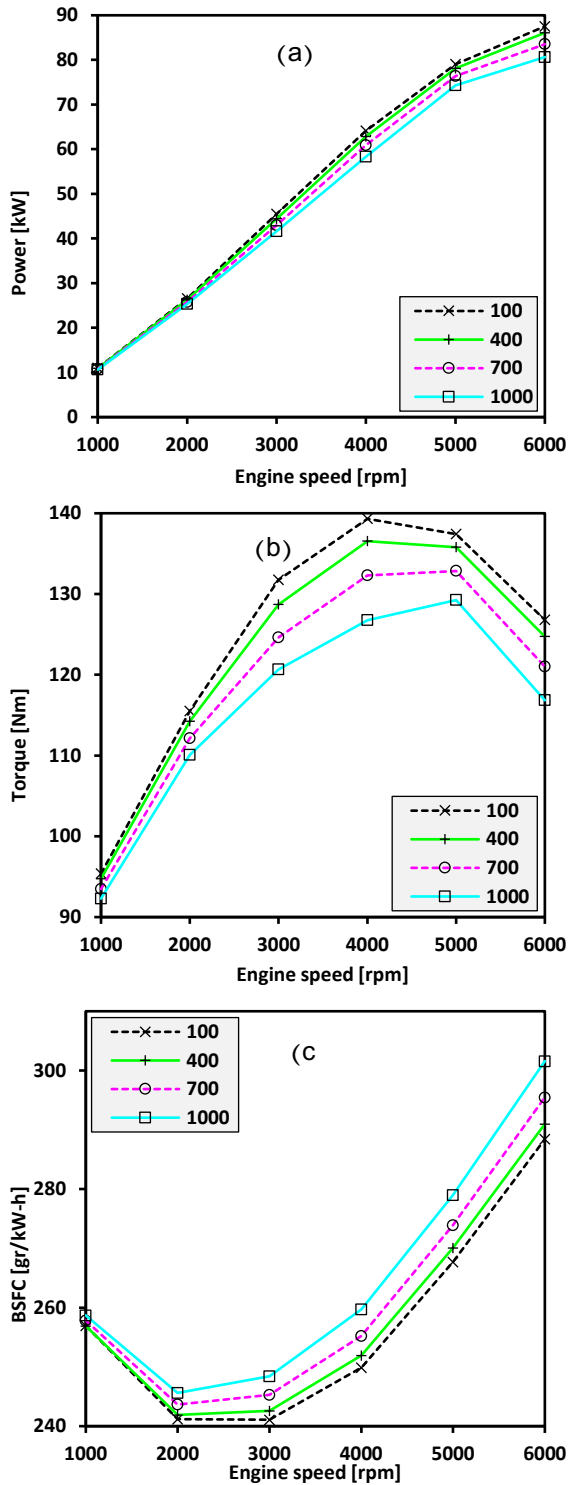
۳- نسبت تراکم ۱۱/۵ بالاترین قدرت و کمترین BSFC را در ۶۰۰۰ دور در دقیقه به دست آورد، که تقریباً ۱۰٪ قدرت را بهبود بخشید و مصرف سوخت را ۶٪ در مقایسه با CR پایه ۸/۵ کاهش داد، که مزیت ترمودینامیکی فشار پیش احتراق بالاتر را تأیید می‌کند.

۴- استفاده از منی فولد ورودی آلومینیومی با زبری سطح ۰/۰۵ میلی‌متر، حداکثر قدرت را در ۶۰۰۰ دور در دقیقه تولید کرد و در مقایسه با سطوح ناهموارتر، ۴/۲٪ کاهش در BSFC را به همراه



شکل ۶ تأثیر زمان جرقه و سرعت موتور بر: (الف) توان، (ب) گشتاور و (ج) BSFC.

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده، اثر چگالی‌های مختلف سلولی کاتالیست به ویژه ۱۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ سلول در هر اینچ مربع (CPI) بررسی شد و مقدار پیش‌فرض CPI ۴۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین گشتاور در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه با چگالی



شکل ۷ تأثیر مبدل کاتالیزوری و سرعت موتور بر؛ (الف) توان، (ب) گشتاور و (ج) BSFC.

Fig.7 The effect of the catalytic converter and engine speed on: (a) power, (b) torque, and (c) BSFC.

داشت. سطح صافتر، تلفات آشفتنگی را کاهش داد و اختلاط هوا و سوخت را بهبود بخشید.

مشخص شد که بیشترین گشتاور در پیکربندی ۸۶-۹۰ میلی متر در دور در دقیقه مطابق شکل ۵(b)، بیشترین توان در ۶۰۰۰ rpm دور در دقیقه مطابق شکل ۵(a)، و کمترین BSFC در بازه ۵۰۰۰ دور در دقیقه مطابق شکل ۵(c) حاصل شده است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافع برای اظهار وجود ندارد.

فهرست علائم

B	قطر سیلندر (m)
$BMEP$	فشار متوسط مؤثر ترمزی (Pa)
$BSFC$	مصرف ویژه سوخت ترمزی (kg/kW.s)
$\frac{dm_f}{dt}$	نرخ سوختن (kg/s)
e	انرژی داخلی ویژه (J)
$FMEP$	فشار متوسط مؤثر اصطکاکی (Pa)
$IMEP$	فشار متوسط مؤثر اندیکه شده (Pa)
m	جرم (kg)
\dot{m}_a	نرخ جرمی لحظه‌ای هوای ورودی به موتور (kg/s)
\dot{m}_f	نرخ جرمی سوخت (kg/s)
n_{cyl}	تعداد سیلندرها (-)
N_r	سرعت موتور (rpm)
P_b	توان خروجی ترمزی (kW)
p_{ref}	فشار در حالت مرجع (Pa)
Q	نرخ انتقال حرارت (K)
T_b	گشتاور ترمزی (Nm)
T_{ref}	دما در حالت مرجع (K)
V_c	نرخ جریان گاز در محفظه احتراق (m^3/s)
V_d	حجم جابجایی سیلندر (m)
V_i	حجم (m^3)
x	کسر انرژی آزاد شده (-)
θ	زاویه میل‌لنگ ($^\circ$)
θ_d	زاویه مدت‌زمان احتراق (($^\circ$))
θ_s	زاویه شروع احتراق ($^\circ$)
η_v	راندمان حجمی (-)
ρ_{ref}	چگالی هوا در حالت مرجع (kg/m^3)

- vol. 211, p. 119041, 2020.
- [10] M. Sheykhi, M. Mehregan, A. Emamian, S. Ghorbani, K. Aliakbari, and A. A. Delouei, "Multi-objective optimization of combined cooling, heating, and power (CCHP) system based on CNG engine," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 61, p. 105020, 2024.
- [11] H. Hosseini, A. Hajjalimohammadi, I. J. Gavzan, and M. A. Hajimousa, "Numerical and experimental investigation on the effect of using blended gasoline-ethanol fuel on the performance and the emissions of the bi-fuel Iranian national engine," *Fuel*, vol. 337, p. 127252, 2023.
- [12] M. M. Balakheli, M. Chahartaghi, M. Sheykhi, S. M. Hashemian, and N. Rafiee, "Analysis of different arrangements of combined cooling, heating and power systems with internal combustion engine from energy, economic and environmental viewpoints," *Energy Convers. Manag.*, vol. 203, p. 112253, 2020.
- [13] *GT-Power v2016 user's manual*.
- [14] M. Sheykhi and M. Mehregan, "Technical and economic modeling of a trigeneration system with EF7 engine as a prime mover," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 52, p. 103743, 2023.
- [15] A. Barjaneh and H. Sayyaadi, "A new closed-form thermodynamic model for thermal simulation of spark ignition internal combustion engines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 607–616, 2015.
- [16] J. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals," 2018.
- [17] C. R. Ferguson and A. T. Kirkpatrick, *Internal combustion engines: applied thermosciences*. John Wiley & Sons, 2015.
- [18] J. B. Taylor, A. L. Carrano, and S. G. Kandlikar, "Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow—past, present, and future," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 45, no. 10, pp. 962–968, 2006.
- [19] R. C. Costa and J. R. Sodré, "Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 278–283, 2011, doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007.
- [20] J. Li, W. M. Yang, and D. Z. Zhou, "Modeling study on the effect of piston bowl geometries in a gasoline/biodiesel fueled RCCI engine at high speed," *Energy Convers. Manag.*, vol. 112, pp. 359–368, 2016, doi:10.1016/j.enconman.2016.01.041.
- [21] L. Qian, J. Wan, Y. Qian, Y. Sun, and Y. Zhuang, "Experimental investigation of water injection and spark timing effects on combustion and emissions of a hybrid
- [1] I. Veza, M. Z. Asy'ari, M. Idris, V. Epin, I. M. Rizwanul Fattah, and M. Spraggon, "Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV," *Alexandria Eng. J.*, vol. 82, pp. 459–467, 2023, doi:10.1016/j.aej.2023.10.020.
- [2] B. Dogru, R. Lot, and K. K. J. Ranga Dinesh, "Valve timing optimisation of a spark ignition engine with skip cycle strategy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, pp. 95–112, 2018, doi:10.1016/j.enconman.2018.07.064.
- [3] H. Talati, A. Ebrahimi-Moghadam, and K. Aliakbari, "Design and evaluation of an innovative variable-length manifold with variable runner connection on a 4-cylinder spark ignition engine," *Appl. Therm. Eng.*, p. 123796, 2024.
- [4] B. Sun, Y. Wang, C. Shi, F. Nie, and X. Yan, "Combined effect of chamber geometry and compression ratio on the combustion process in a methanol-enriched rotary engine," *Energy*, vol. 318, p. 134772, 2025, doi:10.1016/j.energy.2025.134772.
- [5] J. Lee, C. Park, J. Bae, Y. Kim, Y. Choi, and B. Lim, "Effect of different excess air ratio values and spark advance timing on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled spark ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 45, pp. 25021–25030, 2019, doi:10.1016/j.ijhydene.2019.07.181.
- [6] B. Deng *et al.*, "Key design and layout factors influencing performance of three-way catalytic converters: Experimental and semidecoupled numerical study under real-life driving conditions," *J. Clean. Prod.*, vol. 425, p. 138993, 2023, doi:10.1016/j.jclepro.2023.138993.
- [7] A. Kakaee and M. Karimi, "A comparative study on influence of natural gas composition on the performance of a CNG engine," *Mapta J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 9–18, 2018.
- [8] A.-H. Kakaee and M. Keshavarz, "Simultaneous dynamic optimization of valves timing and waste gate to improve the load step transient response of a turbocharged spark ignition engine," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 39, pp. 2383–2394, 2017.
- [9] M. Sheykhi, M. Chahartaghi, A. A. S. Pirooz, and R. G. J. Flay, "Investigation of the effects of operating parameters of an internal combustion engine on the performance and fuel consumption of a CCHP system," *Energy*,

catalysts under real driving conditions,”
Energy Convers. Manag., vol. 233, p. 113888,
2021,
[doi:10.1016/j.enconman.2021.113888](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113888).

hydrogen-gasoline engine,” *Fuel*, vol. 322, p.
124051, 2022.

[22] P. Piqueras, M. J. Ruiz, J. M. Herreros, and A.
Tsolakis, “Influence of the cell geometry on
the conversion efficiency of oxidation