



بهینه‌سازی عملکرد موتور برای گرمایش سریع کاتالیست و کاهش آلایندگی در راه‌اندازی سرد خودروی هیبرید

سینا حسینی ماجولان^{۱*}، میثم صالحی^۲، امیرحسین پریور^۳، محمد مومنی موحد^۴، علی باغانی^۵، امیرحسین حمدا^۶، نیما
عجمی کاشانی^۷

s_hassani@ip-co.com
me_salehi@ip-co.com
a_parivar@ip-co.com
m_momeni@ip-co.com
a_baghani@ip-co.com
a_hamad@ip-co.com
n_ajami@ip-co.com

^{۱*} کارشناس اداره توسعه نگاشت موتور
^۲ رئیس اداره آلایندگی و EOBD
^۳ رئیس اداره کل سوخت و توسعه احتراق
^۴ رئیس اداره کل نگاشت سامانه مدیریت موتور
^۵ کارشناس اداره توسعه نگاشت موتور
^۶ رئیس اداره صحنه‌گذاری توسعه احتراق و تحویل‌گیری نگاشت
^۷ رئیس اداره توسعه دانش و طراحی مفهومی احتراق

چکیده

گرمایش سریع کاتالیست کانون‌تر سه‌راهه در مرحله استارت سرد از مهم‌ترین چالش‌ها در کاهش آلایندگی خودروهای بنزینی و هیبریدی محسوب می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از موتور EC5 در اتاق تست مجهز به دینامومتر و سامانه ای وی ال پوما، اثر چهار پارامتر کلیدی شامل دور موتور، فشار موثر متوسط ترمزی موتور، زمان بندی جرقه و نسبت هوا به سوخت بر دمای گازهای خروجی، آلایندگی هیدروکربن و مصرف سوخت مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌ها در شرایط پایدار و پس از رسیدن موتور به دمای کاری انجام شدند و داده‌ها در ۴۸ حالت کاری شامل تغییرات دور و فشار موثر متوسط ترمزی ثبت و تحلیل گردیدند.

نتایج نشان داد افزایش دور موتور موجب رشد پیوسته دمای گازهای خروجی و کاهش محسوس آلایندگی هیدروکربن شد. در حالی که فقیر کردن مخلوط (لامبدا بالاتر از یک) باعث افزایش ملایم دما گردید، تأخیر در زمان جرقه تأثیر چشمگیری بر افزایش دمای ورودی کاتالیست داشت. هرچند این استراتژی اندکی موجب افزایش مصرف سوخت شد، اما بهبود قابل ملاحظه‌ای در گرمایش گازهای خروجی و کاهش آلایندگی‌ها ایجاد کرد.

بررسی اثر فشار موثر متوسط ترمزی موتور نیز بیانگر افزایش غیرخطی دمای گازهای خروجی و مصرف سوخت با افزایش فشار موثر متوسط ترمزی بود. بیشترین تأثیر گرمایی در فشار موثر متوسط ترمزیهای پایین مشاهده شد، که برای گرمایش سریع کاتالیست اهمیت ویژه دارد. در مجموع، ترکیب بهینه شامل تأخیر محدود جرقه و مخلوط کمی فقیر، شرایطی فراهم می‌کند که ضمن افزایش چشمگیر دمای ورودی کاتالیست، کاهش قابل توجهی در انتشار هیدروکربن و افزایش کنترل‌شده در مصرف سوخت حاصل شود. این نتایج می‌تواند به تدوین راهبردهای کنترلی کارآمد برای کاهش آلایندگی در استارت سرد خودروهای هیبریدی کمک کند.

کلیدواژه‌ها: آلایندگی استارت سرد، گرمایش کاتالیست، خودروی هیبرید، بهینه‌سازی زاویه جرقه و لامبدا.



Engine Optimization for Fast Catalyst Heating and Emission Reduction in Hybrid Cold Start

Sina Hassani majulan^{1*}, Meysam Salehi ², Amir Hossein Parivar³, Mohamad momeni movahed⁴, Ali Baghani⁵, Amir Hossein Hamad⁶, Nima Ajami Kashani⁷

^{1*}Engine Calibration Development Department Expert

²Head of Emissions and EOBD Department

³Head of the Fuel and Combustion Development Department

⁴Head of the Engine Management System Mapping Department

⁵Engine Calibration Development Department Expert

⁶Head of the Department of Combustion Development Verification and Map Acceptance

⁷Head of the Department of Knowledge Development and Combustion Conceptual Design

s_hassani@ip-co.com

me_salehi@ip-co.com

a_parivar@ip-co.com

m_momeni@ip-co.com

a_baghani@ip-co.com

a_hamad@ip-co.com

n_ajami@ip-co.com

Abstract

Rapid heating of the three-way catalyst during cold start is one of the main challenges in reducing emissions from gasoline and hybrid vehicles. In this study, using an EC5 engine installed in a test cell equipped with a dynamometer and AVL PUMA system, the effects of four key parameters — engine speed, load, ignition timing, and air-fuel ratio — on exhaust gas temperature, hydrocarbon (HC) emissions, and fuel consumption were experimentally investigated. The tests were conducted under steady-state conditions after the engine reached its normal operating temperature, and data were collected in 48 operating points covering various speed and load conditions.

The results showed that increasing engine speed led to a continuous rise in exhaust gas temperature and a noticeable reduction in HC emissions. While slightly leaner mixtures ($\lambda > 1$) caused a moderate temperature increase, ignition retard had a more significant effect on raising the catalyst inlet temperature. Although this strategy slightly increased fuel consumption, it considerably enhanced exhaust heating and pollutant reduction efficiency.

The analysis of engine load indicated a nonlinear relationship between load, exhaust temperature, and fuel consumption. The most effective temperature rise occurred at low load conditions, which are crucial for rapid catalyst warm-up. Overall, the optimal combination of limited ignition retard and slightly lean mixtures provided conditions that achieved a substantial increase in catalyst inlet temperature, a remarkable reduction in HC emissions, and only a moderate rise in fuel consumption. These findings provide valuable insight for developing control strategies to reduce cold-start emissions in hybrid vehicles.

Keywords: "Cold-start emissions", " Catalyst light-off", " Hybrid vehicle", " Ignition timing and lambda optimization".



مقدمه

با رشد فزاینده مصرف سوخت‌های فسیلی و تشدید مقررات زیست‌محیطی، کاهش آلایندگی‌های خروجی از موتورهای احتراق داخلی به چالشی محوری در مهندسی خودرو تبدیل شده است. مبدل‌های کاتالیستی سه‌راهه^۱ عنوان سدی نهایی در برابر انتشار هیدروکربن‌های نسوخته، منواکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن شناخته می‌شوند؛ اما در فاز راه اندازی سرد^۲ زمانی که دمای مبدل به آستانه عملیاتی^۳ نرسیده است، اثربخشی آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد و بخش عمده‌ای از آلایندگی‌ها (تا ۸۰٪ هیدروکربن و منواکسیدکربن) پیش از فعال شدن کاتالیست منتشر می‌گردد [1].

برای تسریع فرآیند گرمایش کاتالیست و کاهش آلایندگی در این دوره بحرانی، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده‌اند. یکی از نخستین رویکردها استفاده از کاتالیست‌های قابل فعالیت در دمای محیط بود که با افزایش غنای منواکسیدکربن در جریان اگزوز و واکنش بسیار گرمازا، دمای مبدل را ظرف چند ثانیه به محدوده عملیاتی می‌رساند [1]. در مطالعات تجربی متصل به موتور دیزل، تغییر گشتاور در دور ثابت توانست دمای ورودی مبدل را از ۱۴۶ تا ۲۸۵ °C تنظیم کند و آستانه عملیاتی کاتالیست را آشکار سازد [2].

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای با سوخت ال پی جی، کوتاه‌سازی مسیر جریان گاز و تنظیم زمان جرقه و دور آرام نشان دادند که می‌توان زمان آستانه عملیاتی هیدروکربن را تا ۲۲ ثانیه و منواکسیدکربن را تا ۸ ثانیه کاهش داد [3]. مشابه آن، در موتورهای اشتعال تراکمی با مخلوط دیزل/متانول، افزایش سهم متانول نرخ آزادسازی حرارت را در فاز پیش‌آمیخته افزایش داده و مدت احتراق فاز دیفیوژیونی را کوتاه می‌کند [4].

برای کنترل دقیق‌تر نسبت هوا به سوخت روش‌های تخمین لامبدا از دمای گاز خروجی با استفاده از شبکه‌های عصبی توسعه یافت که خطای تخمین را به حداقل رساند و امکان بهینه‌سازی تزریق سوخت برای کاهش هیدروکربن را فراهم ساخت [5]. در موتورهای متانول-هیدروژن نیز نشان داده شد که افزودن هیدروژن تحت شرایط فقیر سوزی می‌تواند ضریب تغییرات فشار موثر متوسط اندیکه را تا ۳۶.۸٪ کاهش دهد و در دوره‌های پایین انتشار هیدروکربن را کاهش اما اکسیدهای نیتروژن را در دوره‌های بالا افزایش دهد [6].

از منظر سینتیکی، تحلیل منحنی دمای عملیاتی و نمودار آرنیوس^۴ امکان تشخیص ترتیب واکنش و محدودیت‌های انتقال جرم را فراهم آورد؛ به‌گونه‌ای که واکنش‌های مرتبه منفی با شکل تیز و ناگهانی منحنی متمایز می‌شوند [7]. افزون بر این، مرور سیستماتیک روش‌های مدیریت حرارتی اعم از گرمایش الکتریکی، مواد ذخیره‌ساز

حرارت و پوشش‌های عایق نشان داد که می‌توان زمان آستانه عملیاتی را تا ۹۰٪ کاهش داد، هرچند اغلب با افزایش مصرف سوخت همراه است [8]. مطالعات حساسیت دمای آستانه عملیاتی به لامبدا بر روی کاتالیست‌های مبتنی بر رودیموم ثابت کرد که در بازه ۰.۹۷۷ < λ < ۰.۹۹۵ دماهای ۹۰ °C برای منواکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن ثابت ولی برای هیدروکربن‌ها تا بیش از ۱۰۰ °C کاهش می‌یابد و سپس تا ۱۸۰ °C افزایش می‌یابد، تأکیدی بر نیاز به کنترل بسیار دقیق لامبدا در زمان استارت سرد [9]. همچنین توسعه توابع نسبت گرمای ویژه برای مخلوط‌های سوخته و نسوخته امکان کاهش خطاهای محاسبات آزادسازی حرارت را در شرایط فقیرسوزی فراهم نمود [10]. یکی از راهبردهای نوین، ریتارد جرقه^۵ است که بدون نیاز به گرمایش خارجی، با تأخیر جرقه تا ۲۶ درجه دمای اگزوز را ۵۰ °C افزایش داده و زمان آستانه عملیاتی هیدروکربن را از ۲۰۰ به ۵۰ ثانیه کاهش می‌دهد و هیدروکربن/ منواکسیدکربن را تا ۸۰٪ تقلیل می‌دهد [12]، [11]. در کنار آن، مواد دوکاره جذب دی اکسید کربن و متان‌زایی حرارتی (DFM) نشان دادند که می‌توان از شرایط محیطی برای جذب دی اکسید کربن و تولید متان استفاده کرده و بازده سیکل حرارتی را بهبود داد [13].

برای تحلیل دقیق‌تر طراحی کاتالیست، شبیه‌سازی‌های عددی امکان جدا کردن اثرات جرم حرارتی، انتقال حرارت و جرم و پارامترهای مهندسی را فراهم آورد و نشان داد که پس از رسیدن به دمای اولیه، انتقال جرم عامل اصلی عملکرد باقی می‌ماند [14]. افزون بر این، بررسی تأثیر نوسانات ترکیب گاز خروجی بر آستانه عملیاتی حاکی از بهبود عملکرد در شرایط فقیرسوزی بود و فرکانس یا دامنه نوسانات را عاملی ثانویه شناخت [15].

در نهایت، مروری بر فناوری‌های نوین نظیر پلاسماونیک طلا روی MgO نشان داد که تابش نور می‌تواند با حذف کربنات‌های سطحی، هم فعالیت و هم طول عمر کاتالیست را به‌طور چشمگیری افزایش دهد [16]، و مطالعه نظام‌مند نشانگر اهمیت ساختار هندسی، مواد غیرفنی و مدل‌های تخمینی سریع در طراحی مبدل‌های آینده بود [18]، [17].

تفاوت و نوآوری مطالعه حاضر بر خلاف بسیاری از پژوهش‌های قبلی که بر اساس شبیه‌سازی یا شرایط آزمایشگاهی محدود انجام شده‌اند، در این تحقیق آزمایشگاهی میدانی بر روی موتور چهارزمانه EC5 با سوخت بنزین انجام شده است. آزمون‌ها در اتاق تست دینامومتری و با ثبت همزمان دمای منفولد قبل از کاتالیست، واحد آنالیز هیدروکربن و داده‌های ایسیو صورت پذیرفت. چهار پارامتر کلیدی زمان جرقه‌زنی، نسبت هوا به سوخت، دور و فشار موثر متوسط ترمزی^۶ در ترکیب‌های

⁴ Arrhenius

⁵ High Value Ignition Retard

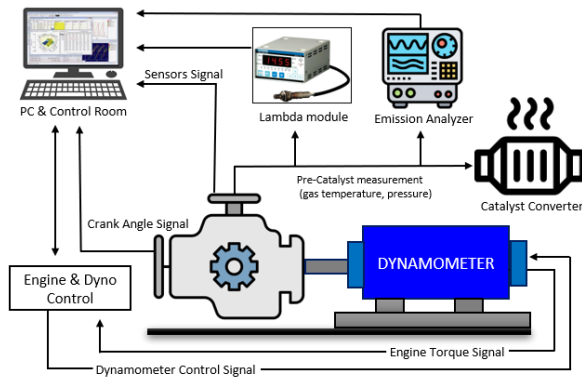
⁶ Mean effective brake pressure (BMEP)

¹ Three Way Catalyst

² Cold Start

³ Light-Off Temperature

انتخاب شدند. داده‌های ثبت شده شامل پارامترهای احتراق، آلایندگی خروجی و تغییرات عملکردی موتور بوده است. انتخاب این چهار متغیر به دلیل نقش تعیین کننده آن‌ها در فرآیند تشکیل مخلوط، احتراق و بازده کلی موتور صورت گرفت. شکل (۱) شماتیک کلی اتاق آزمون و نحوه اتصال تجهیزات اصلی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک تجهیزات اتاق آزمون

روش و آزمایش

برای دستیابی به اهداف این پژوهش و بررسی اثر پارامترهای کلیدی عملکرد موتور بر فرآیند احتراق و آلایندگی، ابتدا روش تحقیق شامل معرفی موتور پایه، تجهیزات آزمایشگاهی، و چارچوب محاسباتی مورد استفاده توضیح داده می‌شود. در ادامه، فرآیند انجام آزمایش‌ها، شرایط مرزی حاکم بر تست‌ها، نحوه اعمال تغییرات در متغیرهای کنترلی، و شیوه برداشت و ثبت داده‌ها تشریح خواهد شد. این ساختار به گونه‌ای تدوین شده است که ابتدا بستر فنی تحقیق مشخص گردد و سپس روند عملیاتی و داده‌برداری به صورت نظام‌مند بیان شود.

۱- روش

در بخش روش، ابتدا مشخصات فنی موتور مورد آزمون معرفی می‌شود. موتور مورد استفاده، موتور EC5 است که جدول مشخصه عملکرد آن در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها در یک اتاق تست استاندارد مجهز به سامانه ای وی ال پوما^۱، دینامومتر، آنالیزور گازهای خروجی، سامانه کنترل لامبدا، فیلتر باکس و واحد مدیریت موتور انجام گرفت. تمامی تجهیزات تحت کنترل نرم‌افزار اینکا^۲ کالیبره و همگام‌سازی شدند تا صحت و تکرارپذیری داده‌ها تضمین شود.

جدول ۱: مشخصه عملکرد موتور EC5

ردیف	مشخصات موتور	مقدار
۱	تعداد سیلندر	۴
۲	تعداد سوپاپ	۱۶
۲	قطر و کورس پیستون	۸۲ × ۷۸.۵ میلی متر
۳	حجم جابجایی	۱۵۸۷ سی سی
۴	حداکثر گشتاور	۱۵۰ نیوتن متر در دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه
۵	حداکثر توان	۸۵ کیلووات در دور ۵۸۰۰ دور در دقیقه
۶	نسبت تراکم	۱۱:۱

چهار متغیر کلیدی شامل زاویه جرقه^۳، نسبت هوا به سوخت، دور موتور و فشار موثر متوسط ترمزی موتور به عنوان عوامل مستقل

۲- آزمایش

آزمون‌ها در شرایط پایدار و پس از گرم شدن موتور تا رسیدن به دمای کاری نهایی انجام گرفت تا اثر شرایط گذرای حرارتی به حداقل برسد. در هر حالت کاری، موتور به مدت چند دقیقه در شرایط پایدار نگه داشته شد و داده‌ها به صورت پیوسته و هم‌زمان توسط سیستم ای وی ال پوما و نرم‌افزار اینکا ثبت گردید. به منظور افزایش اطمینان از دقت نتایج، هر آزمون حداقل سه بار تکرار شد و میانگین داده‌ها به عنوان منبای تحلیل در نظر گرفته شد.

پارامترهای کلیدی مورد بررسی شامل زمان جرقه‌زنی، نسبت لامبدا، دور موتور و فشار موثر متوسط ترمزی موتور بودند که به طور سیستماتیک تغییر داده شدند. سایر شرایط مانند دمای محیط، فشار اتمسفر و کیفیت سوخت در تمام آزمون‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر متغیرهای ناخواسته بر نتایج کاهش یابد.

به منظور بررسی جامع اثر متغیرها بر رفتار موتور و عملکرد کاتالیست، آزمون‌ها در دو دسته اصلی طراحی شدند:

- آزمون‌های مبتنی بر تغییر دور موتور: در این بخش، فشار موثر متوسط ترمزی موتور ثابت نگه داشته شد و پارامترهای دیگر شامل دور موتور، زمان جرقه و نسبت لامبدا در سطوح مختلف تنظیم گردید. هدف از این دسته آزمون‌ها بررسی نقش تغییرات سرعت چرخشی موتور بر شرایط احتراق، دمای گازهای خروجی و بازده کاتالیست بود.
- آزمون‌های مبتنی بر تغییر فشار موثر متوسط ترمزی موتور: در این بخش، دور موتور بر روی مقدار بهینه ثابت شد و

³ Spark Timing

¹ AVL PUMA Open

² INCA



جدول ۳: آزمون‌های انجام شده در دور ۱۵۰۰

ردیف	فشار موثر متوسط ترمزی (بار)	زاویه جرکه	لامبدا
۱	۰	-۵	۱
۲	۰	-۵	۱.۰۵
۳	۰	-۵	۱.۱
۴	۰	-۱۰	۱
۵	۰	-۱۰	۱.۰۵
۶	۰	-۱۰	۱.۱
۷	۰.۵	-۵	۱
۸	۰.۵	-۵	۱.۰۵
۹	۰.۵	-۵	۱.۱
۱۰	۰.۵	-۱۰	۱
۱۱	۰.۵	-۱۰	۱.۰۵
۱۲	۰.۵	-۱۰	۱.۱
۱۳	۱	-۵	۱
۱۴	۱	-۵	۱.۰۵
۱۵	۱	-۵	۱.۱
۱۶	۱	-۱۰	۱
۱۷	۱	-۱۰	۱.۰۵
۱۸	۱	-۱۰	۱.۱
۱۹	۱.۵	-۵	۱
۲۰	۱.۵	-۵	۱.۰۵
۲۱	۱.۵	-۵	۱.۱
۲۲	۱.۵	-۱۰	۱
۲۳	۱.۵	-۱۰	۱.۰۵
۲۴	۱.۵	-۱۰	۱.۱

تغییرات فشار موثر متوسط ترمزی موتور به همراه تغییرات زمان جرکه و نسبت لامبدا اعمال گردید. این دسته از آزمون‌ها به منظور تحلیل اثر فشار موثر متوسط ترمزیگذاری موتور بر انتشار آلاینده‌ها و فرآیند گرم‌شدن کاتالیست طراحی شدند.

در مجموع، ۴۸ حالت آزمایشی حاصل از ترکیب شرایط مختلف فشار موثر متوسط ترمزی و دور موتور به همراه تغییرات جرکه و لامبدا مورد مطالعه قرار گرفت. که در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

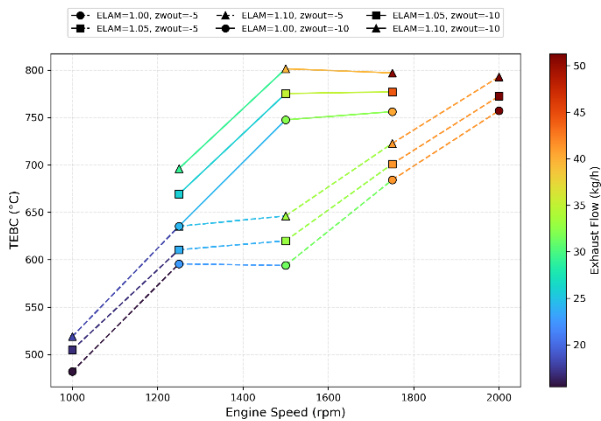
جدول ۲: آزمون‌های انجام شده در فشار موثر متوسط ترمزی ثابت و دورهای مختلف

ردیف	دور موتور	زاویه جرکه	لامبدا
۱	۱۰۰۰	-۵	۱
۲	۱۰۰۰	-۵	۱.۰۵
۳	۱۰۰۰	-۵	۱.۱
۴	۱۲۵۰	-۵	۱
۵	۱۲۵۰	-۵	۱.۰۵
۶	۱۲۵۰	-۵	۱.۱
۷	۱۲۵۰	-۱۰	۱
۸	۱۲۵۰	-۱۰	۱.۰۵
۹	۱۲۵۰	-۱۰	۱.۱
۱۰	۱۵۰۰	-۵	۱
۱۱	۱۵۰۰	-۵	۱.۰۵
۱۲	۱۵۰۰	-۵	۱.۱
۱۳	۱۵۰۰	-۱۰	۱
۱۴	۱۵۰۰	-۱۰	۱.۰۵
۱۵	۱۵۰۰	-۱۰	۱.۱
۱۶	۱۷۵۰	-۵	۱
۱۷	۱۷۵۰	-۵	۱.۰۵
۱۸	۱۷۵۰	-۵	۱.۱
۱۹	۱۷۵۰	-۱۰	۱
۲۰	۱۷۵۰	-۱۰	۱.۰۵
۲۱	۱۷۵۰	-۱۰	۱.۱
۲۲	۲۰۰۰	-۵	۱
۲۳	۲۰۰۰	-۵	۱.۰۵
۲۴	۲۰۰۰	-۵	۱.۱

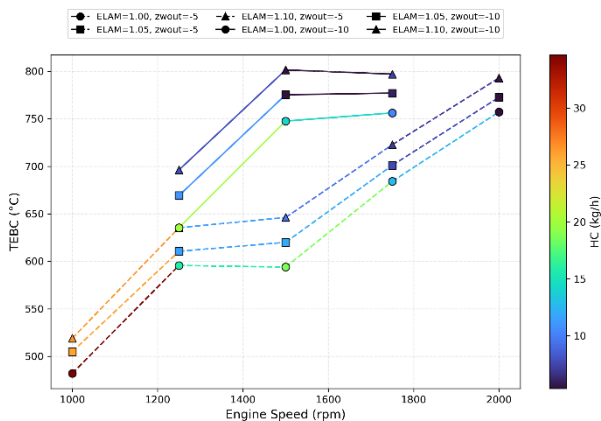
بحث بر روی نتایج

۱- تأثیر دور موتور بر دمای گازهای خروجی، آلاینده‌ها و مصرف سوخت

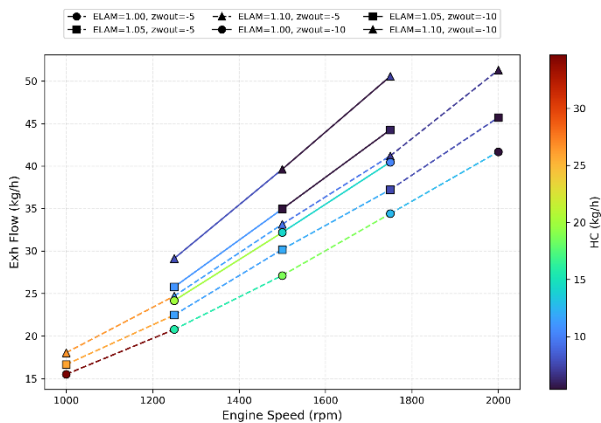
نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزایش دور موتور منجر به افزایش دمای گازهای خروجی و نیز دبی جرمی دود می‌شود (شکل ۲). به‌طور عددی، میانگین دمای پیش از کاتالیست در داده‌های مجموعه ما از 50.2°C در ۱۰۰۰ دور در دقیقه به 77.4°C در ۲۰۰۰ دور در دقیقه افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش 27.2°C در بازه ۱۰۰۰-۲۰۰۰ دور در دقیقه است. این رشد دمایی معادل شیبی در حدود 61.9°C (به ازای هر ۲۵۰ دور در دقیقه) است (شیب خطی محاسبه شده روی کل داده‌ها). افزایش دما با افزایش نرخ احتراق و دبی هوای ورودی سازگار بوده و نشانگر افزایش انرژی حرارتی قبل انتقال به کاتالیست است [18], [2].



شکل ۲: نمودار دمای دما و دبی دود خروجی بر حسب دور موتور



شکل ۳: نمودار دما دود خروجی و هیدروکربن بر حسب دور موتور



شکل ۴: نمودار دبی دود خروجی و هیدروکربن بر حسب دور موتور

تأثیر تغییر نسبت هوا-سوخت نیز کمی قابل توجه است: میانگین افزایش دمای پیش از کاتالیست به ازای هر گام ۰.۰۵ از لامبدا با 22.5°C است. بنابراین فقیر کردن مخلوط از لامبدا ۱.۰۰ تا ۱.۱۰ در مجموع 45°C دمای خروجی را افزایش می‌دهد. این افزایش ملایم اما پایدار در دما با مشاهدات ادبیات که اشاره به مزایای مخلوط‌های کمی فقیر برای افزایش دمای ورودی کاتالیست دارد، همخوانی دارد [5], [7].

اما اثر ریتارد جرقه (انتقال زاویه از -5 به -10 درجه قبل از نقطه مرگ بالا) بسیار برجسته‌تر است. داده‌ها نشان می‌دهد که به‌طور میانگین این تغییر موجب افزایش 94°C در دمای پیش از کاتالیست می‌شود. بنابراین، در مقایسه با اثر لامبدا، تأخیر جرقه تقریباً دو تا چهار برابر اثر فقیر کردن مخلوط را بر دما دارد که نشان می‌دهد استراتژی‌های HVIR می‌توانند سریع‌تر و مؤثرتر دمای ورودی کاتالیست را بالا ببرند؛ اما باید هزینه افزایش مصرف سوخت و پیامدهای NVH در نظر گرفته شود [8], [10], [12].

از منظر آلاینده‌ها، هیدروکربن به‌طور معناداری با افزایش دور موتور کاهش می‌یابد (شکل ۳ و ۴). برای مثال در گروه داده‌ای با لامبدا ۱.۰۵، میانگین هیدروکربن از 26.18 کیلوگرم بر ساعت در 1000 دور بر دقیقه به 6.09 کیلوگرم بر ساعت در 2000 دور بر دقیقه کاهش یافته است که نشانگر کاهش حدود 78% است. این کاهش شدید هیدروکربن عمدتاً ناشی از دو مکانیسم توأم است: (۱) افزایش دمای قبل از کاتالیست که راندمان اکسیداسیون و عملکرد کاتالیست را بهبود می‌بخشد، و (۲) بهبود شرایط احتراق در موتور در دورهای بالاتر. این رفتار با مشاهدات تجربی پیشین در ادبیات همسو است که افزایش دما و شرایط اشتعال بهتر را عامل کاهش هیدروکربن می‌دانند [3], [6].

مصرف سوخت نیز روند افزایشی معناداری دارد (شکل ۵ و ۶)؛ تحلیل رگرسیونی گروهی نشان می‌دهد که مصرف سوخت به‌طور میانگین حدود 0.515 کیلوگرم بر ساعت به ازای هر افزایش 250 دور در دقیقه افزایش می‌یابد. اگرچه فقیر کردن لامبدا به‌تنهایی تأثیر مستقیم بزرگی روی مصرف نشان نداد، مکانیزم غیرمستقیم آن از طریق تغییر در فشار موثر متوسط ترمزی^۱ و افزایش دبی هوای ورودی موجب افزایش نسبی دبی سوخت می‌شود. همچنین ریتارد جرقه در حالت‌های ثابت باعث افزایش مصرف سوخت در حدود $0.2-0.3$ کیلوگرم بر ساعت به طور میانگین حدود 17% افزایش شده است؛ این افزایش بخشی از هزینه گرمایش سریع کاتالیست به شمار می‌آید و باید در تحلیل ترید آف آورده شود [11], [14].

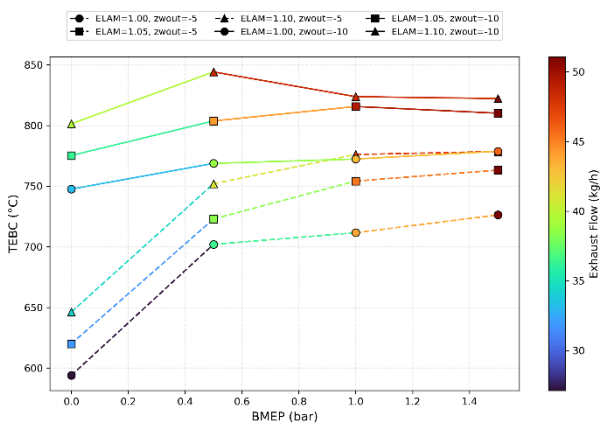
^۱ BMEP



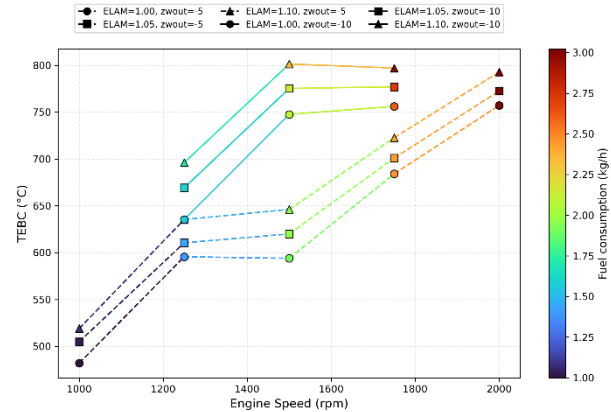
بپهنه‌اند، زیرا دما بالا می‌رود در حالی که بار جرمی (و به تبع آن مصرف سوخت و آلایندگی) نسبتاً پایین می‌ماند.

در ارتباط با هیدروکربن، افزایش دبی در شرایط لامبدا ۱.۰۰ منجر به افزایش هیدروکربن شد (ناشی از نسبی غنی شدن و ناقص‌سوزی)، در حالی که در حالت‌های فقیرتر ۱.۰۰ با افزایش دبی، هیدروکربن یا ثابت ماند یا کاهش یافت (شکل ۸). جدول و نمودارهای ارتباط هیدروکربن با دبی دود خروجی (شکل ۹) این تمایز را نشان می‌دهد؛ بنابراین تنظیم لامبدا به میزان کمی بالاتر از استوکیومتری می‌تواند اثر افزایش دبی بر هیدروکربن را خنثی یا معکوس کند. نتیجه‌ای که با مشاهدات گتسون و همکاران در حساسیت کاتالیت کانورتر سه راهه به لامبدا و مطالعه گونگ و همکاران بر تطبیق لامبدا و زمان جرعه سازگار است [3], [9].

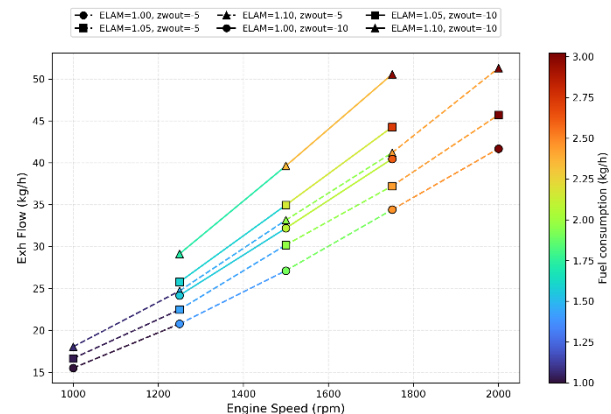
مصرف سوخت نیز با افزایش فشار موثر متوسط ترمزی به‌طور طبیعی افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، به‌طور میانگین از فشار موثر متوسط ترمزی ۰ فشار موثر متوسط ترمزی تا ۱.۵ فشار موثر متوسط ترمزی، مصرف سوخت ۳۶٪ افزایش داشته است. با این حال، تحلیل هزینه-فایده نشان می‌دهد که با استفاده از ریتارد محدود جرعه و کمی فقیر کردن لامبدا می‌توان افزایش دمای قبل از کاتالیست را تحقق بخشید در حالی که مصرف سوخت تنها افزایش محدودی (نسبت به حالت بالا بردن فشار موثر متوسط ترمزی به‌تنهایی) دارد؛ این راهبرد در عمل برای بهبود زمان گرمایش سریع کاتالیست با افزایش سوخت قابل قبول می‌تواند مفید باشد.



شکل ۷: نمودار دمای دما و دبی دود خروجی بر حسب فشار موثر متوسط ترمزی موتور



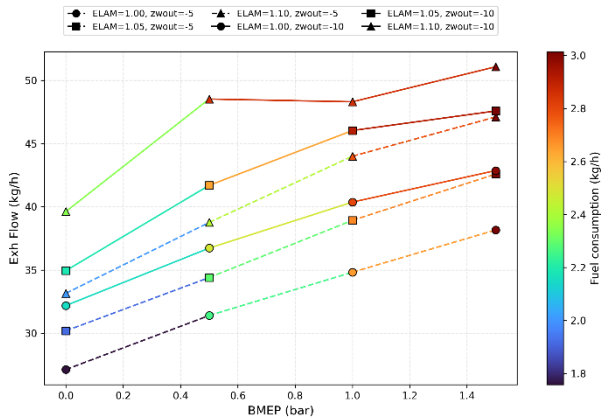
شکل ۵: نمودار دمای دود خروجی و مصرف سوخت بر حسب دور موتور



شکل ۶: نمودار دبی دود خروجی و مصرف سوخت بر حسب دور موتور

۲- تأثیر فشار موثر متوسط ترمزی موتور بر دمای گازهای خروجی، آلاینده‌ها و مصرف سوخت

افزایش فشار موثر متوسط ترمزی موتور همانند افزایش دور موتور موجب افزایش دمای قبل از کاتالیست و دبی جریان خروجی می‌شود (شکل ۷)؛ اما رفتار وابستگی نسبت به فشار موثر متوسط ترمزی غیرخطی است. در داده‌های ما افزایش فشار موثر متوسط ترمزی از ۰ تا ۰.۵ فشار موثر متوسط ترمزی با جهش قابل‌ملاحظه‌ای در دمای قبل از کاتالیست همراه بود (افزایش میانگین 70°C در این بازه)، در حالی که از ۰.۵ تا ۱.۵ فشار موثر متوسط ترمزی نرخ افزایش دما کاهش یافت؛ این موضوع نشان می‌دهد که در فشار موثر متوسط ترمزیهای پایین هر واحد افزایش فشار موثر متوسط ترمزی اثر حرارتی بیشتری بر دمای ورودی کاتالیست دارد و در فشار موثر متوسط ترمزیهای بالاتر بخش بیشتری از انرژی به کار خروجی و تلفات تبدیل می‌شود [18]. به‌طور دقیق‌تر، در شرایط فشار موثر متوسط ترمزی ثابت مشاهده شد که فقیرتر شدن لامبدا و ریتارد جرعه هر دو باعث افزایش دمای قبل از کاتالیست می‌شوند؛ نکته عملی این است که برخی نقاط کاری در فشار موثر متوسط ترمزی ثابت وجود دارند که هم‌زمان دمای بالاتر و دبی دود کمتر را تولید می‌کنند، این نقاط از منظر گرم‌کردن موثر کاتالیست



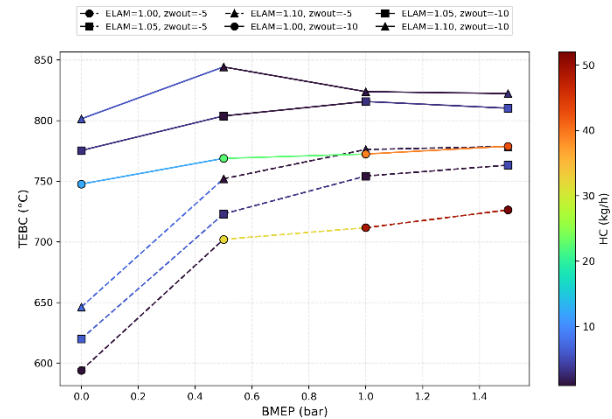
شکل ۱۱: نمودار دبی دود خروجی و مصرف سوخت بر حسب دور موتور

نتیجه‌گیری

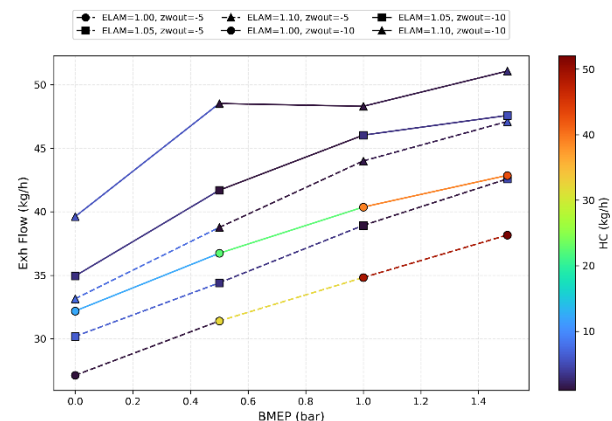
نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات دور موتور، فشار موثر متوسط ترمزی، زمان‌بندی جرعه و نسبت هوا-سوخت اثر قابل‌توجهی بر رفتار حرارتی و آلایندگی موتور EC5 دارند. افزایش دور موتور از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ دور در دقیقه موجب افزایش میانگین دمای گازهای خروجی پیش از کاتالیست به میزان 272°C (معادل 61.9°C به ازای هر 250°C دور در دقیقه) شد و در همین بازه، غلظت هیدروکربن تا حدود ۷۸ درصد کاهش یافت. همچنین مشخص گردید که فقیر کردن مخلوط از لامبدا ۱.۰۰ به ۱.۱۰ دمای دود خروجی را به‌طور متوسط 45°C افزایش داده و به کاهش آلاینده‌ها کمک کرده است. در مقابل، ریتارد جرعه از ۵- به ۱۰- درجه افزایش دمایی در حدود 94°C ایجاد کرده که حدود دو تا چهار برابر اثر فقیر کردن مخلوط است؛ هرچند این راهبرد با افزایش متوسط ۱۷ درصدی مصرف سوخت همراه بوده است.

بررسی اثر فشار موثر متوسط ترمزی موتور نیز نشان داد که افزایش فشار موثر متوسط ترمزی از ۰ تا ۱.۵ فشار موثر متوسط ترمزی موجب افزایش ۳۶ درصدی مصرف سوخت و افزایش غیرخطی دمای گازهای خروجی گردید. بیشترین نرخ افزایش دما در محدوده ۰ تا ۰.۵ فشار موثر متوسط ترمزی مشاهده شد (70°C افزایش میانگین). علاوه‌براین، در شرایط فشار موثر متوسط ترمزی ثابت مشخص شد که ترکیب مخلوط کمی فقیر با ریتارد ملایم جرعه می‌تواند نقاط کاری بهینه‌ای ایجاد کند که ضمن افزایش دمای گازهای خروجی، دبی جرمی و مصرف سوخت پایین‌تری دارند. این نقاط از نظر گرمایش سریع کاتالیست و کاهش آلاینده‌های هیدروکربن اهمیت ویژه‌ای دارند و می‌توانند راهکار مناسبی برای کاهش زمان گرمایش کاتالیست باشند.

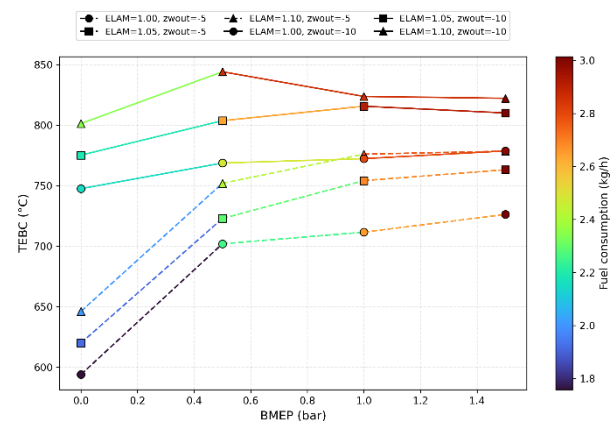
به‌طور کلی، این مطالعه که در شرایط پایدار اتاق آزمون و با استفاده از دینامومتر و سیستم‌ای وی‌ال پوما انجام شد، نشان داد که استراتژی‌های ترکیبی شامل ریتارد محدود جرعه (۵- تا ۱۰- درجه)



شکل ۸: نمودار دما دود خروجی و هیدروکربن بر حسب فشار موثر متوسط ترمزی موتور



شکل ۹: نمودار دبی دود خروجی و هیدروکربن بر حسب فشار موثر متوسط ترمزی موتور



شکل ۱۰: نمودار دمای دود خروجی و مصرف سوخت بر حسب فشار موثر متوسط ترمزی موتور



- 147, no. June 2018, pp. 177–187, 2019.
- [9] A. B. Getsoian, J. R. Theis, and C. K. Lambert, "Sensitivity of Three-Way Catalyst Light-Off Temperature to Air-Fuel Ratio," 2018.
- [10] M. A. Ceviz, "Temperature and air – fuel ratio dependent specific heat ratio functions for lean burned and unburned mixture," vol. 46, pp. 2387–2404, 2005, doi: 10.1016/j.enconman.2004.12.009.
- [11] S. H. Chan and J. Zhu, "The Significance of High Value of Ignition Retard Control on the Catalyst Lightoff," no. 412, 2018.
- [12] E. Kritsanaviparkporn, F. M. Baena-Moreno, and T. R. Reina, "Catalytic Converters for Vehicle Exhaust: Fundamental Aspects and Technology Overview for Newcomers to the Field," *Chem.*, vol. 3, no. 2, pp. 630–646, 2021, doi: 10.3390/chemistry3020044.
- [13] C. Jeong-potter, M. Abdallah, C. Sanderson, M. Goldman, R. Gupta, and R. Farrauto, "Applied Catalysis B: Environmental Dual function materials ($Ru + Na_2O / Al_2O_3$) for direct air capture of CO_2 and in situ catalytic methanation : The impact of realistic ambient conditions," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 307, no. December 2021, p. 120990, 2022, doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120990.
- [14] T. C. Watling *et al.*, "Linked references are available on JSTOR for this article: Factors Affecting Three-Way Catalyst Light-Off: A Simulation Study," vol. 7, no. 3, pp. 1311–1325, 2014, doi: 10.4271/2014-01-1564.
- [15] D. N. Tsinoglou and G. C. Koltsakis, "Effect of perturbations in the exhaust gas composition on three-way catalyst light off," vol. 58, pp. 179–192, 2003.
- [16] P. Novello, C. V. Varanasi, and J. Liu, "Effects of Light on catalytic activities and lifetime of plasmonic Au catalysts in the CO oxidation reaction 2 Army Research Office , Research Triangle Park , NC . 27709 . USA . Correspondence should be addressed to J. L. (email: j.liu@duke.edu)," 2018, doi: 10.1021/acscatal.8b03166.
- [17] L. Robles-lorite, R. Dorado-vicente, E. Torres-jiménez, G. Bombek, and L. Lešnik, "Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters : A Systematic Review," pp. 1–24, 2023.
- [18] B. Carberry, G. Grasi, S. Guerin, F. Jayat, and R. Konieczny, "Pre-turbocharger catalyst - Fast catalyst light-off evaluation," *SAE Tech. Pap.*, 2005, doi: 10.4271/2005-01-2142.

همراه با تنظیم لامبدا در محدوده ۱۰۰۵ تا ۱۰۱۰ می‌توانند دمای ورودی کاتالیست را بیش از $100^\circ C$ افزایش داده و غلظت هیدروکربن را تا ۷۰–۸۰ درصد کاهش دهند، در حالی که افزایش مصرف سوخت در سطح قابل قبول ۱۰ تا ۲۰ درصد باقی می‌ماند. هرچند آزمون‌ها تنها در شرایط پایدار انجام شدند، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده این رویکرد در سیکل‌های گذرای واقعی رانندگی و همراه با بررسی اثر طراحی منیپولر و هندسه کاتالیست مورد ارزیابی قرار گیرد تا راهکارهای پایدارتر و عملی‌تری برای کاهش آلایندگی در استارت سرد ارائه شود.

مراجع و منابع

- [1] D. S. Lafyatis *et al.*, "Ambient temperature light-off for automobile emission control," vol. 18, pp. 123–135, 1998.
- [2] S. Ye, Y. H. Yap, S. T. Kolaczowski, K. Robinson, and D. Lukyanov, "Chemical Engineering Research and Design Catalyst ' light-off ' experiments on a diesel oxidation catalyst connected to a diesel engine — Methodology and techniques," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 90, no. 6, pp. 834–845, 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2011.10.003.
- [3] C. Gong, K. Huang, B. Deng, and X. Liu, "Catalyst light-off behavior of a spark-ignition LPG (liquefied petroleum gas) engine during cold start," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 53–59, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.11.026.
- [4] Z. Huang *et al.*, "Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel / methanol blends under various fuel delivery advance angles," vol. 95, pp. 331–341, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.018.
- [5] T. Lee, "SAE TECHNICAL Estimation of Air Fuel Ratio of a SI Engine from Exhaust Gas Temperature at Cold Start Condition," no. 724, 2018.
- [6] C. Gong, Z. Li, Y. Chen, J. Liu, F. Liu, and Y. Han, "Influence of ignition timing on combustion and emissions of a spark-ignition methanol engine with added hydrogen under lean-burn conditions," *Fuel*, vol. 235, no. June 2018, pp. 227–238, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.07.097.
- [7] F. Duprat, "Light-off curve of catalytic reaction and kinetics," vol. 57, pp. 901–911, 2002.
- [8] J. Gao, G. Tian, A. Sornioti, A. E. Karci, and R. Di Palo, "Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up," vol.