



Experimental investigation of EF7 engine performance using blended fuels of gasoline, toluene, and bioethanol and emission prediction via artificial neural network

Mohammad Parsa Shahabiniya¹, Shahaboddin Kharazmi^{1*}, Reyhane Saghafi², Maede Majidi Majd³, Hadi Kamalzadeh¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Faculty of Chemical Engineering, Petroleum and Gas, Semnan University, Semnan, Iran

3- Faculty of Mathematics, Statistics, and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Blended Fuels
Artificial Neural Network
Engine Exhaust Emissions
Experimental Engine Analysis
Nonlinear Combustion Modeling

ABSTRACT

In this study, the thermodynamic performance and emission behavior of the EF7 engine were comprehensively evaluated both experimentally and numerically when fueled with blended fuels, including pure gasoline, bioethanol (at 5%, 10%, and 15% by volume), and toluene (at 5%, 10%, and 15% by volume). The primary objective was to quantitatively analyze the effects of varying ratios of oxygenated and aromatic additives on key combustion parameters, including power, torque, and exhaust emissions, as well as to develop a predictive framework for emissions using an artificial neural network (ANN). Experimental tests were conducted under full-load conditions at constant engine speeds of 2000, 2500, and 3000 rpm. To analyze the combustion reactions, stoichiometrically balanced equations and reaction enthalpies were calculated for all fuel blends. The results indicated that E10 and T15 significantly influenced the optimization of environmental and performance parameters, respectively. Bioethanol notably reduced carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions, while toluene, through increasing the octane number, improved power and torque, although a marked increase in nitrogen oxides (NO_x) was observed for toluene-containing fuels. Furthermore, a multilayer ANN model was developed in the TensorFlow environment. This model, with inputs including fuel type, power, torque, and engine speed, predicted emissions with a mean absolute error below 5%. The close agreement between model predictions and experimental data demonstrated that machine learning can provide an effective, reliable, and scalable approach for simulating multiparameter combustion systems and for analyzing and predicting emissions in spark-ignition engines.



© 2026 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: kharazmi@semnan.ac.ir (Sh. Kharazmi)

Received 14 August 2025; Accepted 2 August 2026

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

Cite this article: Shahabiniya MP, Kharazmi Sh, Saghafi R, Majidi Majd M, Kamalzadeh H. Experimental investigation of EF7 engine performance using blended fuels of gasoline, toluene, and bioethanol and emission prediction via artificial neural network. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):1-20. doi: [10.22034/ER.2026.2067965.1099](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2067965.1099)

بررسی تجربی عملکرد موتور ملی با سوخت‌های ترکیبی شامل بنزین، تولوئن و زیست-اتانول و پیش‌بینی آلاینده‌گی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

محمد پارسا شهابی نیا^۱، شهاب الدین خوارزمی^{۱*}، ریحانه ثقفی^۲، مائده مجیدی مجد^۳، هادی کمال زاده^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این تحقیق، عملکرد ترمودینامیکی و رفتار آلاینده‌گی موتور ملی در مواجهه با سوخت‌های ترکیبی شامل بنزین خالص، زیست-اتانول (در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵) و تولوئن (در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵) ارزیابی تجربی و عددی شد. هدف اصلی، تحلیل کمی اثر نسبت‌های متفاوت افزودنی‌های اکسیژنه و آروماتیک بر متغیرهای کلیدی احتراق از جمله توان، گشتاور و آلاینده‌های خروجی و نیز توسعه چارچوبی برای پیش‌بینی آلاینده‌گی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بود. آزمون‌های تجربی در شرایط بار کامل و در دورهای ثابت ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ د.د. انجام گرفت. به‌منظور تحلیل واکنش‌های احتراق، معادلات موازنه‌شده درست و گرمای واکنش برای تمامی ترکیبات سوختی محاسبه گردید. نتایج نشان دادند که E10 و T15 بترتیب در بهینه‌سازی متغیرهای زیست محیطی و عملکردی موتور تأثیر بسزایی دارند. زیست-اتانول موجب کاهش محسوس کربن مونواکسید و هیدروکربن و تولوئن با افزایش عدد اکتان باعث بهبود توان و گشتاور شد، هرچند افزایش اکسیدهای ازت در سوخت‌های تولوئنی به‌وضوح مشهود بود. در ادامه، الگوی شبکه عصبی مصنوعی با ساختار چندلایه در محیط تنسورفلو توسعه یافت. این الگو با ورودی‌هایی نظیر نوع سوخت، توان، گشتاور و دور موتور، خروجی آلاینده‌ها را با میانگین خطای مطلق زیر ۵٪ پیش‌بینی کرد. تطابق دقیق نتایج الگو با داده‌های تجربی نشان داد که استفاده از یادگیری رایانه‌ای در شبیه‌سازی سامانه‌های احتراقی چندمتغیری، رویکردی مؤثر، قابل اعتماد و مقیاس‌پذیر برای تحلیل و پیش‌بینی آلاینده‌گی در موتورهای اشتعال جرقه‌ای محسوب می‌شود.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

سوخت‌های ترکیبی
شبکه عصبی
آلاینده‌های گازی موتور
تحلیل تجربی عملکرد موتور
شبیه‌سازی احتراق غیرخطی



© 2026 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: kharazmi@semnan.ac.ir (شهاب الدین خوارزمی)

دریافت ۲۳ مرداد ۱۴۰۴؛ پذیرش ۱۱ مرداد ۱۴۰۵

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

Cite this article: Shahabiniya MP, Kharazmi Sh, Saghaifi R, Majidi Majd M, Kamalzadeh H. Experimental investigation of EF7 engine performance using blended fuels of gasoline, toluene, and bioethanol and emission prediction via artificial neural network. The Journal of Engine Research. 2026 Aug 23;73(2):1-20. doi: 10.22034/er.2026.2067965.1099

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، روند فزاینده آلودگی هوا، گرمایش جهانی و نگرانی در خصوص اتمام منابع سنگواره‌ای موجب تمرکز گسترده محققان بر توسعه و ارزیابی سوخت‌های جایگزین برای موتورهای احتراق داخلی شده است [۱]. یکی از مسیرهای کلیدی در این راستا، استفاده از سوخت‌های اکسیژنه مانند زیست-اتانول و ترکیبات آروماتیک نظیر تولوئن به عنوان افزودنی به بنزین است [۲]. زیست-اتانول به دلیل تجدیدپذیر بودن عدد اکتان بالا، اکسیژن‌دار بودن و تأثیر مثبت در کاهش آلایندگی‌هایی مانند مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته، یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی در دهه گذشته بوده است [۳، ۴]. تولوئن نیز به عنوان یک هیدروکربن آروماتیک با عدد اکتان بالا، به طور گسترده به منظور بهبود مقاومت سوخت در برابر پدیده ضربه در موتورهای اشتعال جرقه‌ای کاربرد دارد [۵].

ساختار آروماتیکی پایدار این ترکیب، موجب افزایش دمای شعله و نرخ واکنش‌های احتراقی شده است که در نتیجه آن بازده حرارتی و توان خروجی موتور بهبود خواهد یافت [۶، ۷]. لازم به ذکر است تولوئن با کاهش تمایل به احتراق زودرس امکان استفاده از نسبت تراکم‌های بالاتر را فراهم کرده است که این امر در طراحی موتورهای کارآمدتر حائز اهمیت است [۸].

با این حال، ماهیت آروماتیکی و افزایش دمای اوج احتراق می‌تواند منجر به تشدید تشکیل آلایندگی‌های دمایی نظیر اکسیدهای ازت شود که خود نیازمند ملاحظات دقیق در راهبردهای مهار آلاینده‌ها است [۹]. در نتیجه، ترکیب چنین موادی با بنزین نه تنها منجر به افزایش عدد اکتان شده بلکه بر الگوهای احتراق، بازدهی و آلاینده‌ها نیز تأثیر خواهد گذاشت [۱۰].

در دهه گذشته پژوهش‌های بسیاری در این حوزه صورت گرفته است که مطالعات فن و همکاران در سال ۲۰۲۰ و همچنین لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان داد که استفاده از زیست-اتانول به عنوان افزودنی در بنزین می‌تواند موجب بهبود عملکرد احتراقی و کاهش برخی آلایندگی‌ها شود [۱۱، ۱۲]. نکته قابل توجه این است که افزایش بیش از حد زیست-اتانول ممکن است باعث افزایش مصرف سوخت شود [۱۳، ۱۴].

از سوی دیگر تحقیقات انجام‌شده توسط برخی از پژوهشگران نشان داد که استفاده از درصدی مشخصی از تولوئن^۱ به مانند ۵، ۱۰ و ۱۵٪ می‌تواند موجب بهبود گشتاور و کاهش ضربه‌زنی در موتورهای بنزینی شود. چرا که تولوئن به عنوان یک ترکیب آروماتیک با عدد اکتان بزرگ و فشار بخار ضعیف، نقش مهمی در پایداری فرآیند احتراق در موتورهای جرقه‌ای ایفا می‌کند [۱۵-۱۸].

از آنجا که مقدار انتشار آلاینده‌ها نیز یکی از عوامل بسیار مهم است باید به این نکته توجه داشت که برخی مطالعات نیز به افزایش آلایندگی‌هایی مانند اکسیدهای ازت^۲ در حضور تولوئن اشاره کرده‌اند [۱۹، ۲۰]. موتور ملی ایران به عنوان یک سکوی تحقیقاتی مناسب به منظور بررسی عملکرد سوخت‌های ترکیبی گوناگون بر پایه بنزین در کشور ایران مطرح است [۲۱]. چرا که این موتور با طراحی انعطاف‌پذیر خود امکان بررسی تجربی ترکیب‌های مختلف بنزین با افزودنی‌هایی مانند اتانول و تولوئن را در بستر آزمایشگاهی فراهم ساخته است [۲۲].

بررسی تجربی موتور ملی ایران با هر یک از سوخت‌های ترکیبی شامل زیست-اتانول و تولوئن در شرایط بار کامل و دور ثابت، می‌تواند تصویری دقیق از تغییرات عملکردی و آلاینده‌ها ناشی از هر سوخت ارائه دهد. امروزه در کنار تحلیل آزمایشگاهی موتورهای احتراق داخلی استفاده از ابزارهای نوین به مانند: هوش مصنوعی، یادگیری عمیق و بویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار پیچیده سامانه‌های احتراقی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۲۳، ۲۴].

¹ Toluene

² NO_x

³ Artificial Neural Networks – ANN

از مزایای اصلی این چارچوب‌های ترکیبی که شامل استفاده از آزمایشگاه و ابزارهای نوین است را می‌توان قابلیت یادگیری از داده‌های تجربی، شبیه‌سازی روابط غیرخطی و پیش‌بینی دقیق متغیرهای خروجی مانند مقدار آلاینده‌ها بر اساس ورودی‌هایی مانند نوع سوخت، توان، گشتاور و دور موتور است نام برد [۲۵، ۲۶]. در سال‌های اخیر پژوهشگران توانسته‌اند با شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی آلاینده‌هایی نظیر دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن را با دقت مناسبی که شامل خطای ۵ تا ۱۵٪ است پیش‌بینی کنند [۲۷]. احمد و همکاران الگویی به منظور پیش‌بینی همزمان آلاینده‌های کربن مونوکسید و هیدروکربن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی طراحی کردند و نشان دادند دقت آن در مقایسه با الگوهای قبل از آن بسیار بالاتر است. همچنین شبکه‌ای برای پیش‌بینی اکسیدهای ازت توسعه دادند که دقت آن به بیش از ۹۰٪ رسید [۲۸]. البته برخی از پژوهشگران نیز از شبکه عصبی مصنوعی همراه با روش بهینه‌سازی به منظور شبیه‌سازی عملکرد موتور احتراق داخلی با سوخت‌های اکسیژنه استفاده کرده‌اند [۲۹]. در جدول ۱، مطالعات اخیر در حوزه پیش‌بینی آلایندگی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داده شده است.

جدول ۱ مطالعات اخیر در حوزه پیش‌بینی آلایندگی با شبکه عصبی مصنوعی

مرجع	دستاوردها
۳۰	پیش‌بینی دقیق‌تر غلظت آلاینده‌ها با کاهش داده‌های اضافی و بهبود دقت پیش‌بینی بلندمدت
۳۱	پیش‌بینی عملکرد و آلایندگی موتور تک‌استوانه با استفاده از ترکیب‌های سوختی، به دقت کمتر از ۵٪ خطا نسبت به مقادیر تجربی
۳۲	پیش‌بینی دقیق‌تر آلایندگی با کاهش خطای میانگین مربعات تا ۲۲٪
۳۳	پیش‌بینی دقیق‌تر آلاینده‌ها نسبت به روش‌های سنتی
۳۴	انتقال دانش بین مناطق مختلف برای پیش‌بینی آلایندگی
۳۵	مهار آلایندگی موتور احتراق داخلی با استفاده از رویکرد جدید مهار و شبیه‌سازی‌ها، کاهش آلایندگی‌ها

پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب تجربی - محاسباتی به بررسی عملکرد و پیش‌بینی مقدار آلایندگی موتور ملی ایران با سوخت‌های ترکیبی گوناگون با درصد ترکیبات متفاوت پرداخته است. در این پژوهش با به کارگیری شبکه عصبی مصنوعی به عنوان بازوی محاسباتی این چارچوب برخلاف مطالعات پیشین که تمرکز آنها بر ترکیب دوگانه سوختی یا شبیه‌سازی عملکرد موتور احتراق داخلی بنزینی بوده است با ترکیب نتایج آزمایشگاهی، پلتفرم موتور واقعی و شبیه‌سازی دقیق، هوشمند و عمیق شبکه عصبی مصنوعی اقدام به پیش‌بینی مقدار انتشار آلایندگی موتور احتراق داخلی از طریق بازوی محاسباتی و بررسی عملکرد موتور از طریق نتایج آزمایشگاهی کرده است.

۲- روش پژوهش

مطالعات تجربی این تحقیق در آزمایشگاه آزمون موتور دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان و روی موتور ملی ایران با کد ملی انجام شده است. این موتور دارای چهار استوانه خطی، سامانه زمان‌بندی متغیر دریچه^۱، حجم جابجایی ۱۶۴۹ سانتی‌متر مکعب و نسبت تراکم ۱۱:۱ می‌باشد. مشخصات کامل موتور در جدول ۲ ذکر شده است.

نمای طرح سامانه آزمایشگاهی و بستر آزمایش در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این آرایش سوخت از مخزن توسط پمپ به مدار تغذیه ارسال شده و پس از عبور از صافی و تنظیم‌کننده فشار، وارد لوله افشانه‌ها می‌شود. تنظیم تزریق سوخت، زمان‌بندی جرقه و پایش سایر متغیرهای عملکردی توسط رایانه موتور انجام می‌گیرد. موتور به یک لگام ترمز آبی متصل است که امکان بارگذاری پیوسته و اندازه‌گیری دقیق توان و گشتاور ترمزی را فراهم می‌کند. سامانه خنک‌کاری شامل

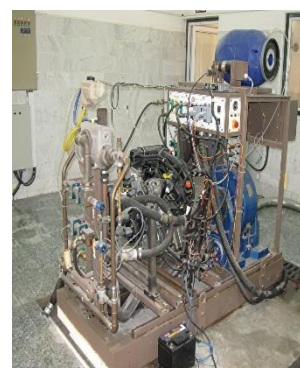
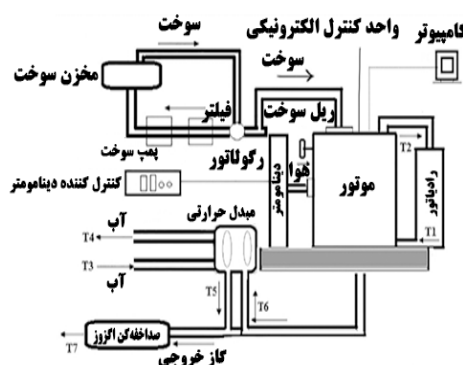
¹ VVT

مبدل حرارتی طراحی شده است تا دمای موتور در شرایط آزمون پایدار بماند. گازهای خروجی پس از عبور از مبدل حرارتی و صداخفه‌کن تخلیه شده و دمای نقاط کلیدی سامانه به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. این چپش آزمایشگاهی، ارزیابی دقیق فرآیند احتراق، مشخصه‌های حرارتی و عملکرد موتور را ممکن ساخته است. در این پژوهش از هفت نوع سوخت استفاده شده است که شامل بنزین خالص به عنوان سوخت پایه، زیست-اتانول و تولوئن با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ بعنوان سوخت ترکیبی است. ترکیب سوخت‌های مذکور در جدول ۳ درج شده است.

تمام سوخت‌ها قبل از ورود به موتور به صورت دقیق اندازه‌گیری شده و در مخزن تحت شرایط تنظیم‌شده نگهداری شدند. مسیر سوخت رسانی با سوخت داخل مخزن یکسان شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سوخت‌های مورد استفاده شامل چگالی، نقطه جوش، نقطه اشتعال، درصد خلوص و مقدار آلاینده‌های اولیه در جدول ۴ و ساختار شیمیایی آنها در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲ مشخصات موتور

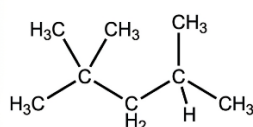
ویژگی	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
حجم جابجایی موتور	۱۶۴۹	CC	بیشینه قدرت	۸۲	kW
قطر استوانه	۷۸.۶	mm	بیشینه قدرت در دور	۵۷۵۰	RPM
طول مسیر جابجایی	۸۵	mm	بیشینه گشتاور	۱۵۰	N.m
نسبت تراکم	۱۱	-	بیشینه گشتاور در دور	۳۳۰۰	RPM



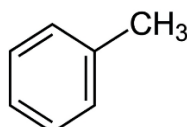
شکل ۱ سامانه آزمایشگاهی و بستر آزمون

جدول ۳ ترکیب درصدی سوخت‌ها

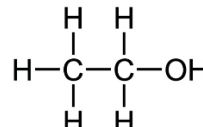
سوخت	درصد ترکیبات	سوخت	درصد ترکیبات
E5	۹۵٪ بنزین و ۵٪ زیست-اتانول	T5	۹۵٪ بنزین و ۵٪ تولوئن
E10	۹۰٪ بنزین و ۱۰٪ زیست-اتانول	T10	۹۰٪ بنزین و ۱۰٪ تولوئن
E15	۸۵٪ بنزین و ۱۵٪ زیست-اتانول	T15	۸۵٪ بنزین و ۱۵٪ تولوئن



ساختار شیمیایی بنزین



ساختار شیمیایی تولوئن



ساختار شیمیایی بیواتانول

شکل ۲ ساختار شیمیایی افزودنی‌ها به بنزین در جهت ساخت سوختی ترکیبی [۳۶]

جدول ۴ مشخصات زیست-اتانول و تولوئن

تولوئن			زیست-اتانول		
مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
خلوص الکلی	۹۹.۵	%	خلوص	۹۹.۵	%
وزن مخصوص	۰.۷۸۹	kg/m ³	وزن مخصوص	۰.۸۶۷	g/cm ³
متانول	۰.۰۵۵	g/L	نقطه جوش	۱۱۰.۶	°C
آلدئید	۰.۰۰۴۴	g/L	نقطه اشتعال	۴.۴	°C

برای حصول شرایط پایدار، موتور پیش از شروع هر آزمون به مدت ۲۵ دقیقه در سرعت ۲۰۰۰ د.د.د.^۱ در حالتی که ۵۰٪ درجه گاز باز است یا به عبارتی موتور تحت بار ۵۰٪ است، روشن نگه داشته شد تا دماهای سیال خنک‌کننده، روغن، سوخت و سایر بخش‌های موتور به شرایط پایدار برسند. لازم به ذکر است آزمایش اصلی در شرایط بار کامل و در دور موتورهای ثابت ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ انجام شده است. در هر آزمون، مقادیر دما و فشار مربوط به اجزای مختلف (آب ورودی و خروجی، روغن، سوخت، محفظه میل‌لنگ و محیط) پایش و ثبت گردید. در جدول ۵ سایر مشخصه‌های موتور در زمان آزمون بنزین خالص در دور ۳۰۰۰ در بار کامل قابل مشاهده است.

جدول ۵ سایر مشخصه‌های موتور در زمان آزمون بنزین خالص در دور ۳۰۰۰ در بار کامل

مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
دمای سوخت	۸۶.۶	°C	دمای آب ورودی موتور	۷۳.۷	°C
فشار روغن	۲۴۷.۱	Pa	دمای آب خروجی موتور	۸۲.۵۴	°C
فشار سوخت	۳۳۷.۸۱	Pa	دمای روغن موتور	۳۳.۲۹	°C
فشار محفظه میل‌لنگ	۰.۰۸	kPa	فشار محیط	۹۰.۱	kPa

۲-۱- پیش‌بینی آلاینده‌ها با شبیه‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

برای هر یک از سوخت‌ها، پس از رسیدن به شرایط پایدار، مقادیر آلاینده‌های گازی شامل مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای ازت و هیدروکربن‌های نسوخته با استفاده از گازشناس^۲ با دقت بالا اندازه‌گیری شدند. داده‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان مبنای توسعه الگوی پیش‌بینی آلایندگی به کار رفتند. برای پیش‌بینی مقادیر آلاینده‌های خروجی، از شبکه عصبی مصنوعی با ساختار چند لایه^۳ در محیط تنسور فلو استفاده شد.

الگوی طراحی‌شده شامل چند لایه تمام متصل^۴ به همراه تابع فعال‌سازی ReLU بود. در فرآیند آموزش از تابع میانگین مربعات خطا^۵ و معیار ارزیابی MAE استفاده شده است. متغیرهای ورودی شبکه شامل نوع سوخت (به‌صورت کدگذاری عددی)، توان خروجی موتور، گشتاور خروجی موتور، دور موتور که در این پژوهش مقدار ثابت ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ د.د.د. دارد که نتایج در حالت بار کامل برای دور موتورهای ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ د.د.د. در بخش نتایج و بحث ذکر شده است و علت این موضوع تفاوت بسیار ناچیز در نتایج مرتبط با دور موتور ۲۵۰۰ د.د.د. است و به منظور درک بهتر مقدار تفاوت آلایندگی نتایج مرتبط با آلایندگی دورهای ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ د.د.د. تنها ذکر شده است.

^۱ Revolution per minute (rpm)

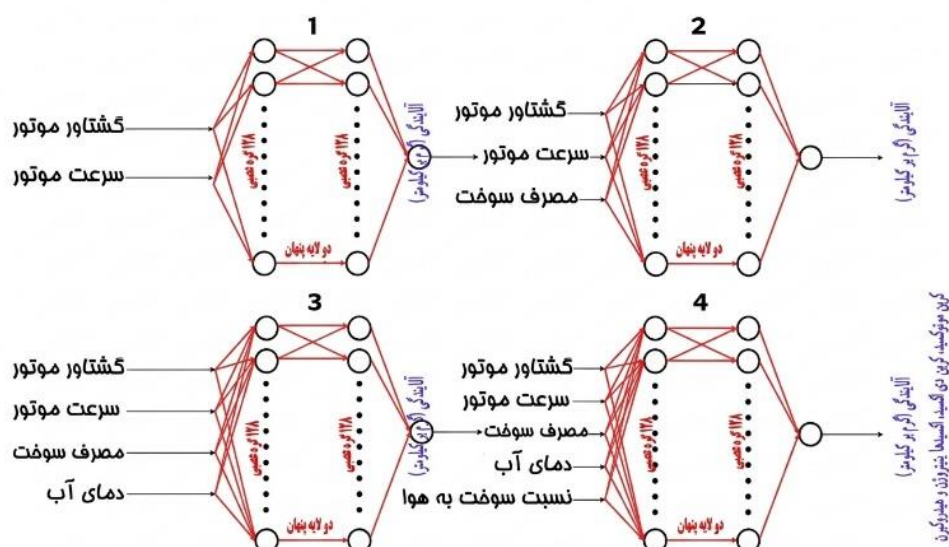
^۲ Gas analyzer

^۳ Multi-Layer Perceptron

^۴ Dense layer

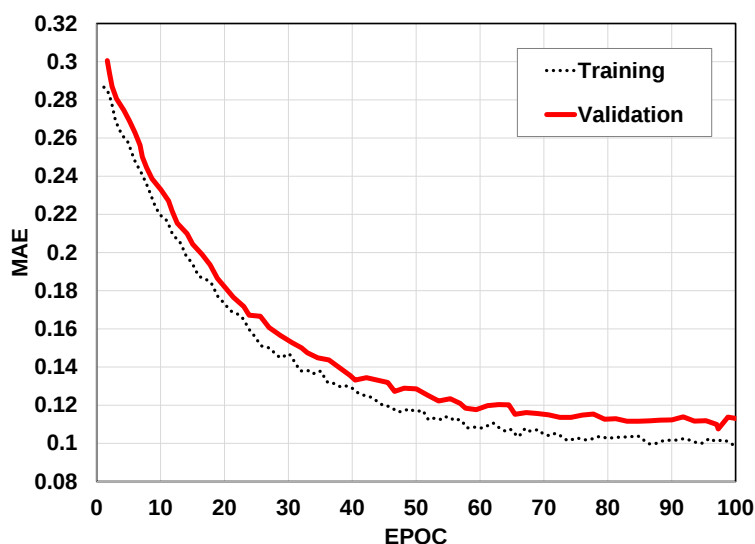
^۵ Mean Squared Error (MSE)

لازم به ذکر است خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده شامل: مقادیر آلاینده‌های کربن مونوکسید، کربن دی اکسید، اکسیدهای ازت و هیدروکربن است. تمام داده‌ها پیش از آموزش، به صورت بهنجار^۱ شدند و بعد وارد شبکه شدند. مجموعه داده به نسبت ۸۰٪ برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون تقسیم گردیده است. فرایند آموزش تا رسیدن به حداقل مقدار خطا ادامه یافت و سپس الگو با داده‌های آزمایشی ارزیابی شد. ساختار شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده که طرح آن با الگو گرفتن از پژوهش جیگو و همکاران در سال ۲۰۲۱ طراحی و در شکل ۳ درج شده است [۳۷].



شکل ۳ ساختار شماییک شبکه عصبی مصنوعی

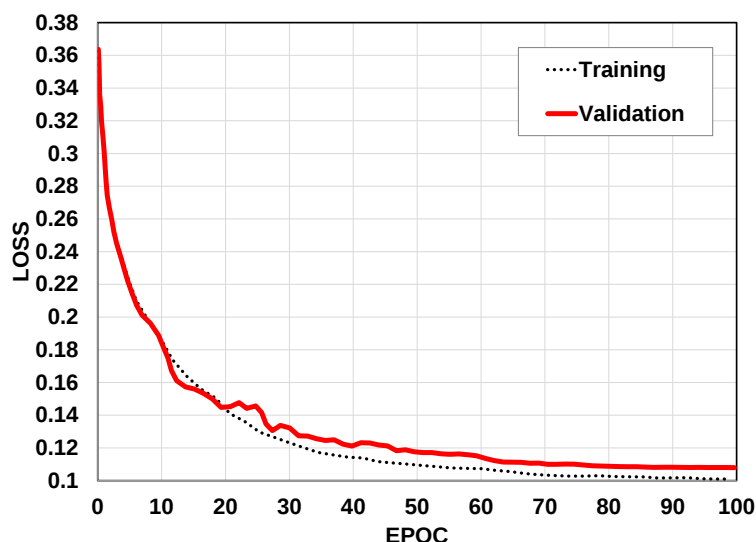
به منظور ارزیابی دقت و عملکرد شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده بترتیب نمودارهای بررسی یادگیری شبکه عصبی مصنوعی و بررسی خطای نتایج شبکه عصبی مصنوعی در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۴ بررسی یادگیری شبکه عصبی مصنوعی

¹ Normalized

در شکل ۴ کیفیت یادگیری الگو بررسی شده است که خطای الگو روی داده‌های آموزشی با خطای الگو روی داده‌های اعتباریابی مقایسه شده است. محور افقی تعداد دفعاتی که الگو روی کل داده‌ها آموزش دیده است. هر اجرا معادل یک بار آموزش روی داده‌ها و محور عمودی اختلاف میانگین بین پیش‌بینی الگو و مقدار واقعی است.



شکل ۵ بررسی خطای نتایج شبکه عصبی مصنوعی

لازم به ذکر است مقادیر آلاینده‌ی پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی مصنوعی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه که با استفاده از دستگاه آلاینده‌سنج که تصویری از آن در آزمایشگاه آزمون موتور دانشگاه سمنان در شکل ۶ بدست آمده است مقایسه شدند.



مشخصات دستگاه آلاینده سنج ۵ گاز تولید شرکت کرونگ

تصویری از دستگاه آلاینده سنج در آزمایشگاه تست موتور دانشگاه سمنان

شکل ۶ تصویری از دستگاه آلاینده‌سنج در آزمایشگاه آزمون موتور دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان

این مقادیر مربوط به سوخت بنزین خالص در دور موتور ۳۰۰۰ د.د. و تحت بار کامل بوده و صرفاً برای بررسی صحت نتایج الگوی شبکه عصبی مصنوعی در فرآیند یادگیری و آموزش به کار رفته‌اند. درصد خطای نسبی برای هر متغیر بدین صورت محاسبه شده است:

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{تجربی} - \text{نظری}}{\text{تجربی}} \times 100 \quad (۱)$$

نتایج صحه‌گذاری الگوی شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۶ قابل مشاهده است.

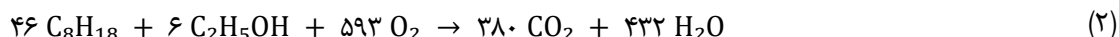
جدول ۶ نتایج صحه‌گذاری الگوی شبکه عصبی مصنوعی برای گازهای آلاینده بر حسب گرم بر حسب کیلومتر

آلاینده	مقدار محاسبه شده با کمک شبکه عصبی	مقدار تجربی	درصد خطا
کربن مونوکسید	۱.۱۷۵	۱.۲۲	۳.۶۹
کربن دی‌اکسید	۲۱۵.۷۲	۲۰۵.۷۵	۴.۶۲
اکسیدهای ازت	۱.۴۵۱	۱.۵۸	۸.۱۶
هیدروکربن	۱.۱۷	۱.۲۶	۷.۱۴

نتایج حاصل از فرآیند صحه‌گذاری نشان دهنده آن است که الگوی طراحی شده مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، از توانایی قابل توجهی در پیش‌بینی آلاینده‌های اصلی گازهای خروجی موتور برخوردار است. تحلیل نتایج بیان می‌کند که الگوی پیشنهادی با دقت و پایداری مناسبی عمل کرده و روند تغییرات آلاینده‌های موتور را تحت شرایط مختلف کاری به طور مؤثری شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، مقادیر آلاینده‌های پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های گزارش‌شده در مطالعات اخیر، که به پیش‌بینی آلاینده‌های احتراق داخلی از طریق شبکه عصبی مصنوعی پرداخته اند انطباق قابل‌توجهی دارد و در نتیجه، صحت و اعتبار الگوی پیشنهادی تأیید شده است [۳۸-۴۳].

۲-۲- بررسی معادلات احتراق سوخت‌های ترکیبی و بنزین خالص

معادلات احتراق درست^۱ موازنه‌شده و گرمای واکنش سوخت‌های مذکور در جدول ۲ محاسبه و در جدول ۷ درج شده است. هدف اصلی، بررسی تأثیر درصد افزودنی‌های اکسیژنه و آروماتیک بر متغیرهای کلیدی احتراق موتور، از جمله توان، گشتاور، فشار متوسط مؤثر ترمزی و انتشار آلاینده‌ها بوده است. به عنوان نمونه، محاسبه گرمای احتراق کامل سوخت E5 در معادله ۲ درج شده است.



در معادله ۳ گرمای واکنش احتراق کامل سوخت E5 محاسبه شده است.

$$\Delta H^\circ = [380 \times (393.5) + 432 \times (241.8)] - [46 \times (250.1) + 6 \times (277.7)] = -240816.8 \text{ kJ} \quad (3)$$

جدول ۷ معادلات درست و گرمای سوخت‌های مورد استفاده (برحسب هزارژول) در این پژوهش

سوخت	مقدار گرما	معادله واکنش (موازنه شده)
G100	-۱۰۹۴۰	$2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O$
E5	-۲۴۰۸۱۶,۸	$46C_8H_{18} + 6C_2H_5OH + 593O_2 \rightarrow 380CO_2 + 432H_2O$
E10	-۹۴۳۵۲,۶	$18C_8H_{18} + 5C_2H_5OH + 240O_2 \rightarrow 154CO_2 + 177H_2O$
E15	-۸۳۲۴۵,۴	$16C_8H_{18} + 7C_2H_5OH + 221O_2 \rightarrow 142CO_2 + 165H_2O$
T5	-۳۲۲۱۰۶,۲	$62C_8H_{18} + 4C_7H_8 + 811O_2 \rightarrow 524CO_2 + 574H_2O$
T10	-۱۲۳۸۳۱,۳	$22C_8H_{18} + 3C_7H_8 + 302O_2 \rightarrow 197CO_2 + 210H_2O$
T15	-۲۷۰۵۰۵,۶	$46C_8H_{18} + 10C_7H_8 + 665O_2 \rightarrow 438CO_2 + 454H_2O$

¹ Stoichiometric

نتایج نشان‌دهنده آن است که افزودنی‌های اتانول باعث کاهش انرژی ویژه مخلوط سوخت نسبت به بنزین خالص می‌شوند، که ناشی از گرمای نهان تبخیر بالاتر و محتوای اکسیژن مولکولی بیشتر است. این پدیده در شرایط بار کامل موجب کاهش فشار متوسط مؤثر و کاهش نسبی توان و گشتاور خواهد شد.

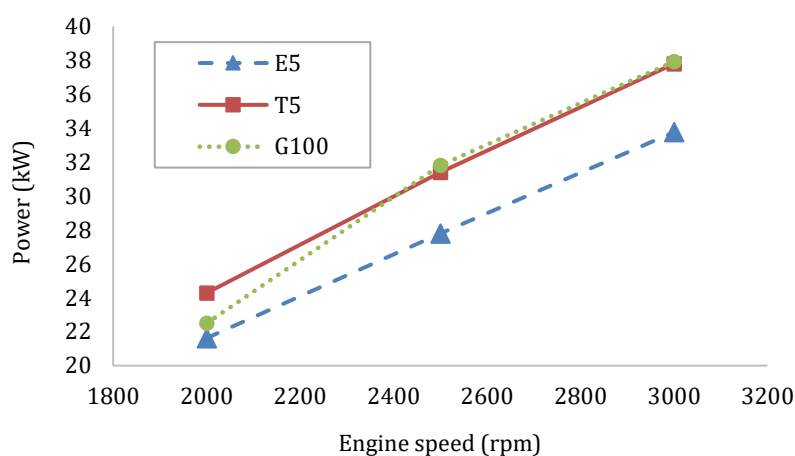
سوخت‌های حاوی تولوئن با افزایش عدد اکتان و ساختار آروماتیک پایدار، منجر به افزایش دمای شعله و نرخ واکنش احتراقی گردیده و کارایی حرارتی موتور را بهبود خواهند بخشید. با این حال، افزایش اکسیدهای ازت در سوخت‌ها نیز مشاهده شده است. بنابراین، تحلیل ترمودینامیکی معادلات احتراق نقش کلیدی در تحلیل رفتار تجربی موتور احتراق داخلی بنزینی و ارتباط درصد افزودنی‌ها با عملکرد و مقدار انتشار آلاینده‌گی دارد.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمون تجربی موتور ملی ایران با سوخت‌های مختلف شامل بنزین خالص، زیست-اتانول با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و تولوئن با درصدهای مشابه زیست-اتانول از نظر توان، گشتاور و آلاینده‌های خروجی ارائه و تحلیل شده است. همچنین نتایج پیش‌بینی الگوی شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با داده‌های واقعی بررسی شده است.

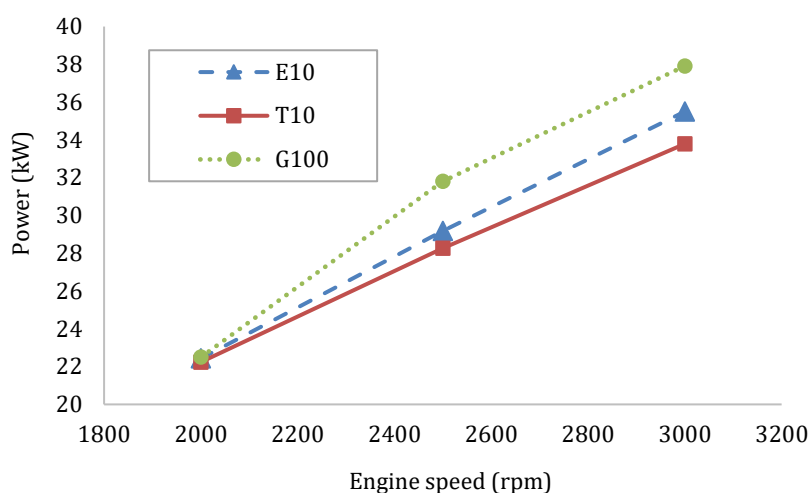
۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۷ توان خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۵٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است.



شکل ۷ توان در حالت استفاده از سوخت با ۵٪ افزودنی

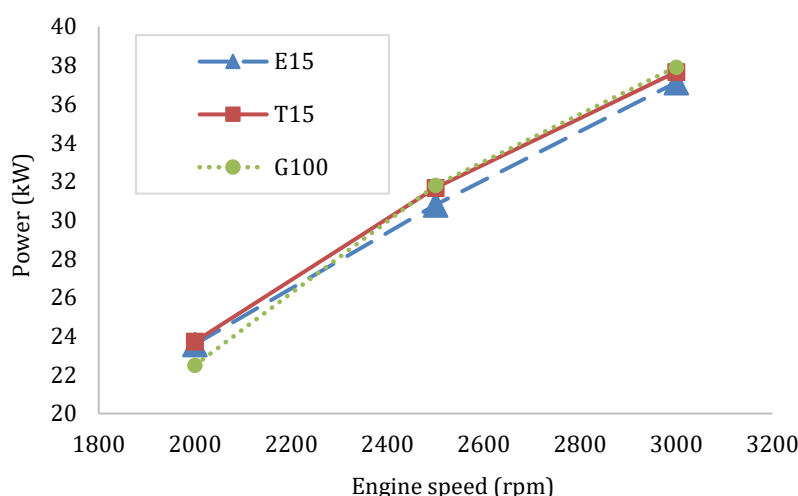
افزودن ۵٪ زیست-اتانول به بنزین پایه موجب افت توان ترمزی موتور در مقایسه با استفاده از بنزین خالص شده است. عدد اکتان بالاتر زیست-اتانول ذاتاً سبب کاهش توان نمی‌شود، بلکه امکان بهره‌برداری از نسبت تراکم بالاتر و جلوگیری از ضربه را فراهم می‌کند. افت توان مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از چگالی انرژی حجمی کمتر زیست-اتانول است که باعث کاهش انرژی شیمیایی ورودی به استوانه در هر چرخه می‌شود. علاوه بر این، گرمای نهان تبخیر بالاتر زیست-اتانول موجب کاهش دمای مخلوط هوا - سوخت و افت فشار مطلق در انتهای تراکم شده که این امر بویژه در شرایط بار کامل سبب کاهش توان خروجی شده است. در شکل ۸ توان خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۱۰٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است.



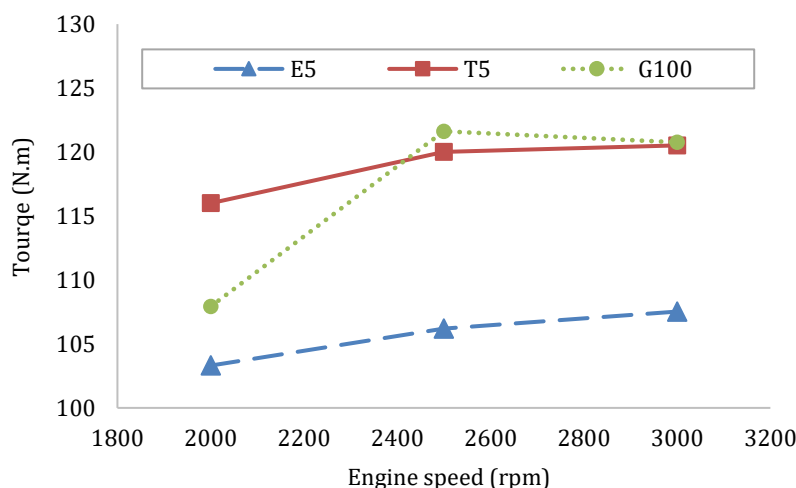
شکل ۸ توان در حالت استفاده از سوخت با ۱۰٪ افزودنی

در سوخت E10، توان موتور به صورت محسوس نسبت به E5 افزایش یافته که نشان می‌دهد نسبت ۱۰٪ زیست-اتانول نقطه‌ای بهینه بین عدد اکتان بالا و کاهش ارزش حرارتی را ایجاد کرده است. احتراق پایدارتر و کاهش ضربه باعث بهبود نرخ آزادسازی انرژی و در نتیجه توان بیشتر در دور بالا شده است. البته، در سوخت T10 توان نسبت به سوخت T5 کمتر است. در شکل ۹ توان خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۱۵٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است.

با افزایش سهم اتانول به ۱۵٪ در سوخت E15، توان خروجی موتور نسبت به E10 کاهش یافته است. این افت به دلیل کاهش چگالی انرژی مخلوط و گرمای نهان تبخیر بسیار بالای اتانول است که باعث جذب حرارت و سرد شدن مخلوط قبل از احتراق می‌شود و در نهایت بازده احتراق را کاهش می‌دهد. بر اساس نمودارها، استفاده از تولوئن موجب افزایش توان نسبت به بنزین خالص شد، بویژه در ترکیب T10 که بیشینه توان را فراهم کرد. علت این رفتار را می‌توان در عدد اکتان بالاتر تولوئن و خواص تبخیر آرام‌تر آن جستجو کرد. در مقابل، افزایش درصد زیست-اتانول گرچه در تأثیر مثبتی بر توان داشت، اما در E15 منجر به افت توان شد که این پدیده به دلیل گرمای نهان تبخیر بالای اتانول و ارزش حرارتی کمتر آن قابل توضیح است. در شکل ۱۰ گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۵٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است.

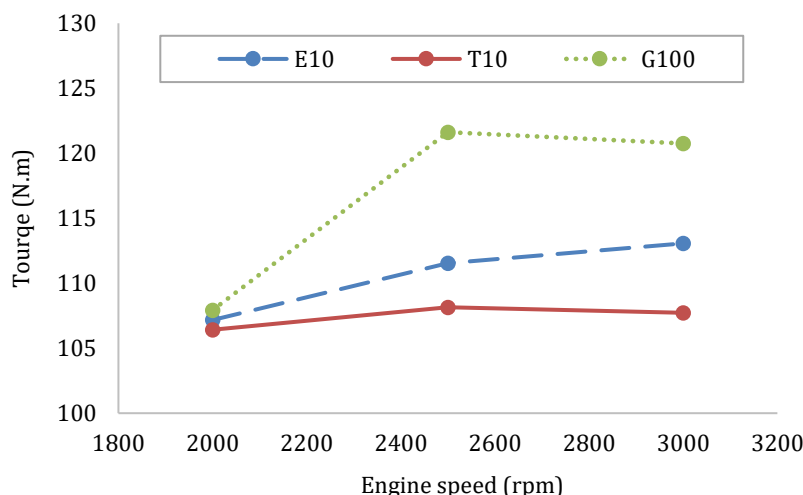


شکل ۹ توان در حالت استفاده از سوخت با ۱۵٪ افزودنی



شکل ۱۰ گشتاور در حالت استفاده از سوخت با ۵٪ افزودنی

استفاده از سوخت E5 باعث کاهش محسوس گشتاور ترمزی موتور نسبت به بنزین خالص شده است. اگرچه وجود اکسیژن در ساختار مولکولی زیست-اتانول فرآیند احتراق را کامل‌تر کرده و تمایل به ضربه^۱ را کاهش می‌دهد، اما این ویژگی‌ها به تنهایی تضمین‌کننده افزایش گشتاور نیست. کاهش گشتاور عمدتاً ناشی از چگالی انرژی پایین‌تر مخلوط E5 است که باعث کاهش انرژی شیمیایی ورودی به هر چرخه احتراق می‌شود. علاوه بر این، گرمای نهان تبخیر بالای زیست-اتانول موجب افت دمای مخلوط هوا-سوخت و در نتیجه کاهش فشار مطلق انتهای تراکم شده که این امر به افت فشار متوسط مؤثر ترمزی^۲ و گشتاور خروجی منجر شده است. همچنین با توجه به نسبت درست پایین‌تر زیست-اتانول نسبت به بنزین، مخلوط E5 برای دستیابی به نسبت هم‌ارز $\lambda=1$ به جرم سوخت بیشتری نیاز دارد که بدون اصلاح استراتژی تزریق، می‌تواند منجر به محدودیت در تأمین انرژی مورد نیاز در شرایط بار کامل شود [۱۳، ۲۲]. در شکل ۱۱ گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۱۰٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است.

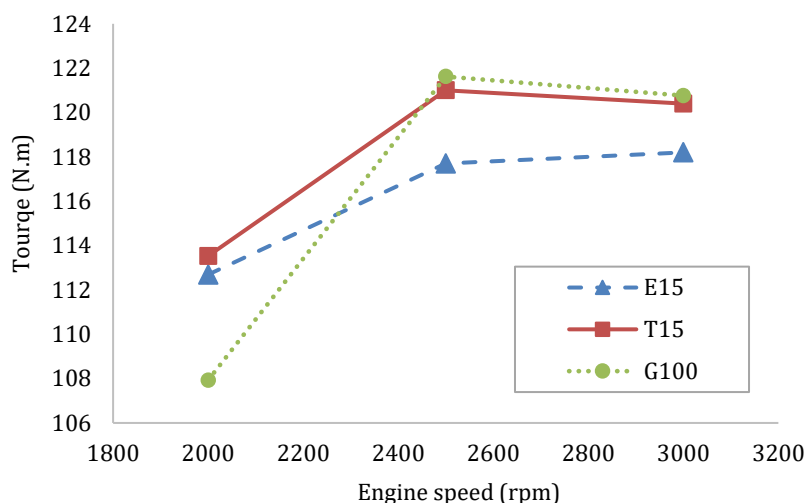


شکل ۱۱ گشتاور در حالت استفاده از سوخت با ۱۰٪ افزودنی

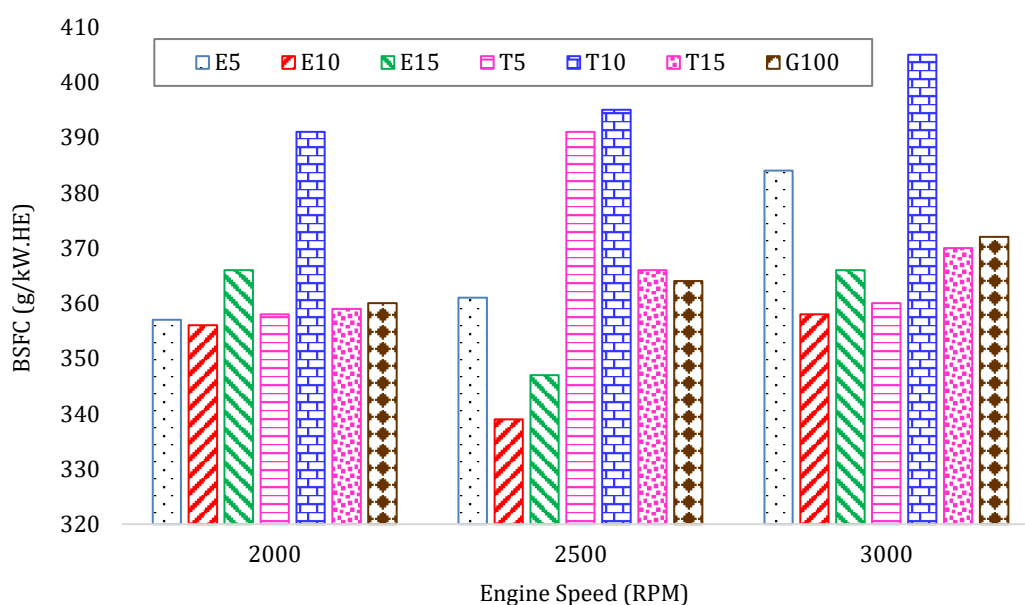
¹ Knock

² BMEP

بیشینه گشتاور خروجی با سوخت E10 مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تعادل مطلوب میان خواص احتراق (اکتان بالا، پایداری شعله) و انرژی ویژه سوخت است. این ترکیب منجر به بیشینه‌سازی بازده ترمودینامیکی و بهینه‌سازی نرخ افزایش فشار در استوانه می‌شود. در شکل ۱۲ گشتاور خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از سوخت‌های با درصد ترکیب ۱۵٪ افزودنی در مقایسه با بنزین خالص قابل مشاهده است. با افزایش نسبت اتانول به ۱۵٪، گشتاور خروجی کاهش می‌یابد که احتمالاً ناشی از کاهش دمای احتراق به دلیل تبخیر گرمای بالای اتانول است. این عامل منجر به افت دمای گازهای احتراق و در نتیجه کاهش نیروی وارد بر پیستون و گشتاور تولیدی شده است. ضمناً مشاهده می‌شود که در تولوئن، افزایش درصد از ۵٪ به ۱۰٪ باعث افزایش محسوس گشتاور شد، در حالی که در T15 تغییر چندانی دیده نشد. در سمت مقابل، گشتاور در سوخت‌های حاوی زیست-اتانول با افزایش درصد آن کاهش یافته است، به طوری که گشتاور E15 کمتر از بنزین خالص بوده است. این کاهش را می‌توان به افت نرخ آزادسازی انرژی در مرحله احتراق نسبت داد. همچنین در شکل ۱۳ نمودار مصرف سوخت ویژه ترمزی برای تمامی سوخت‌های مورد استفاده در این پژوهش در دور موتورهای مختلف تحت بار کامل درج شده است.



شکل ۱۲ گشتاور در حالت استفاده از سوخت با ۱۵٪ افزودنی



شکل ۱۳ مصرف سوخت ویژه ترمزی برای سوخت‌های مختلف در دور موتورهای گوناگون

مقادیر مصرف سوخت ویژه ترمزی در سه دور موتور ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ د.د.د. برای مخلوط‌های حاوی اتانول و تولوئن نسبت به بنزین خالص مقایسه شده‌اند. نتایج بیانگر آن است که افزودن اتانول تا ۱۰٪ باعث کاهش محسوس مصرف سوخت ویژه ترمزی به ویژه در دور موتور ۲۰۰۰ د.د.د. تحت بار کامل شده است که نشان‌دهنده احتراق کارآمدتر به دلیل حضور اکسیژن در ساختار مولکولی اتانول و بهبود همگنی مخلوط است. در مقابل، افزایش اتانول به ۱۵٪ به دلیل کاهش چگالی انرژی سوخت و گرمای نهان تبخیر بالا موجب افزایش نسبی مصرف سوخت ویژه ترمزی شده است. ترکیبات حاوی ۱۰ و ۱۵٪ تولوئن عملکردی مشابه بنزین خالص دارند، در حالی که ترکیب حاوی ۱۰٪ تولوئن با افت توان خروجی موتور بیشترین مصرف سوخت ویژه ترمزی را در تمام شرایط دارد که این موضوع به اثرات ترکیبی عدد اکتان بالاتر، تغییر در واکنش‌های احتراقی و کاهش نسبی سرعت شعله‌پذیری مخلوط مربوط است. نتایج بیانگر آن است که سوخت E10 ترکیب بهینه‌ای از نظر کاهش مصرف سوخت و آلایندگی است.

۳-۲- نتایج پیش‌بینی آلایندگی توسط شبکه عصبی مصنوعی

به منظور بررسی مقدار انتشار آلایندگی موتور احتراق داخلی مقدار آلایندگی موتور با سوخت G100 که بنزین خالص است به صورت تجربی و در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است و با استفاده از الگوی شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده مقدار انتشار آلایندگی موتور با استفاده از سوخت‌های ترکیبی پیش‌بینی شده است که نتایج آن در جدول ۵ درج و نشان از عملکرد صحیح و دقت شبکه عصبی مصنوعی دارد. در شکل ۱۴ مقدار انتشار کربن مونو اکسید سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی در دور ۳۰۰۰ د.د.د. و تحت بار کامل قابل مشاهده است.

در سوخت‌های تولوئن‌دار بویژه T10 و T15، مقدار کربن مونوکسید نسبت به بنزین خالص کاهش یافته است. این کاهش به احتراق کامل‌تر ناشی از پایداری شعله بهتر و سوختن کامل کربن به کربن دی اکسید نسبت داده می‌شود. همچنین عدد اکتان بالای تولوئن منجر به کاهش نقاط سرد احتراق می‌گردد که تولید کربن مونوکسید را محدود می‌کند. در شکل ۱۵ مقدار انتشار کربن دی اکسید سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی در دور ۳۰۰۰ د.د.د. و تحت بار کامل قابل مشاهده است.

روند افزایش CO₂ در سوخت‌های T10 و T15 نسبت به G100 بیانگر بهبود بازده احتراق است. افزایش دمای شعله، اکسیژن موجود در مخلوط و پایداری واکنش‌های شدید منجر به اکسیدشدن کامل کربن و تولید بیشتر CO₂ نسبت به CO شده است. در شکل ۱۶ مقدار انتشار هیدروکربن سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی در دور ۳۰۰۰ د.د.د. و تحت بار کامل قابل مشاهده است.

کاهش محسوس مقدار هیدروکربن نسوخته در سوخت‌های تولوئن‌دار نشان‌دهنده افزایش دمای نهایی احتراق و زمان اقامت مؤثر برای سوختن کامل است. حضور تولوئن با پیوندهای آروماتیک پایدار، به بهبود واکنش‌های زنجیره‌ای احتراق کمک کرده و از خام‌سوزی جلوگیری می‌کند. در شکل ۱۷ مقدار انتشار اکسیدهای ازت سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی در دور ۳۰۰۰ د.د.د. و تحت بار کامل قابل مشاهده است.

افزایش چشمگیر اکسیدهای ازت در سوخت‌های T10 و T15 نسبت به بنزین خالص عمدتاً به دمای داغ‌تر احتراق و زمان اقامت طولانی‌تر در ناحیه دمای بحرانی مربوط است. سازوکار زلدوویچ^۱ در این شرایط فعال شده و به تولید بیشتر اکسیدهای ازت در واکنش بین ازت هوا و اکسیژن کمک می‌کند.

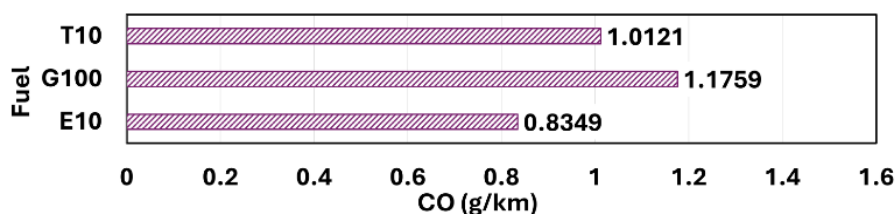
در تمامی متغیرهای آلایندگی، الگوی شبکه عصبی مصنوعی عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. کمترین خطا مربوط به کربن مونوکسید و بیشترین خطا مربوط به ازت اکسید بود. این موضوع نشان می‌دهد که الگو بیشترین دقت را در پیش‌بینی سوخت سوزی ناقص دارد و پیش‌بینی رفتار گرمایی وابسته به دما مانند اکسیدهای ازت دشوارتر است. در

¹ Zeldovich

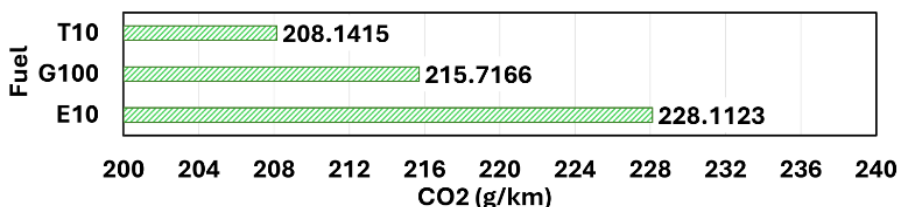
ادامه، مقادیر پیش‌بینی شده برای تمام سوخت‌ها در جدول ۸ قابل مشاهده است، لازم به ذکر است به دلیل اینکه مقادیر آلاینده‌ها برای دور موتور ۲۵۰۰ د.د. در حالتی که تحت بار کامل است با سایر نتایج مذکور در جدول مربوطه تفاوت بسیار ناچیزی دارد. در همین راستا مقادیر پیش‌بینی آلاینده‌ها برای دور موتور ۲۵۰۰ د.د. ذکر نشده است.

نتایج ارائه‌شده در جدول ۸ بیانگر پیش‌بینی مقادیر آلاینده‌های اصلی شامل مونوکسیدکربن، دی‌اکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای ازت برای طیف وسیعی از سوخت‌های ترکیبی در دو سرعت دورانی ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ د.د. توسط شبکه عصبی مصنوعی هستند. تطابق این نتایج با روندهای مشاهده‌شده در نمودارهای ۱۰ تا ۱۳ حاکی از دقت و توانمندی الگو در پیش‌بینی رفتار غیرخطی سامانه احتراق موتور ملی است.

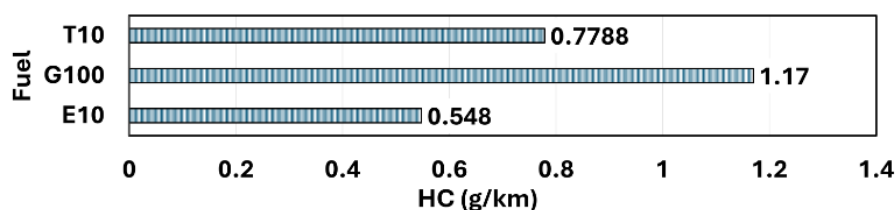
بررسی مقادیر کربن مونواکسید نشان می‌دهد که افزودن اتانول یا تولوئن به بنزین منجر به کاهش محسوس این آلاینده شده است، که این اثر در سوخت‌های T10 و T15 بمراتب چشم‌گیرتر است. علت این کاهش را می‌توان در عدد اکتان بزرگتر تولوئن و بهبود پایداری شعله آن جستجو کرد که احتراق کامل‌تری را فراهم می‌سازد. همچنین، ساختار اکسیژنه اتانول در ترکیبات E10 و E15 باعث تسهیل اکسیدشدن ناقص کربن و در نتیجه کاهش کربن مونواکسید شده است.



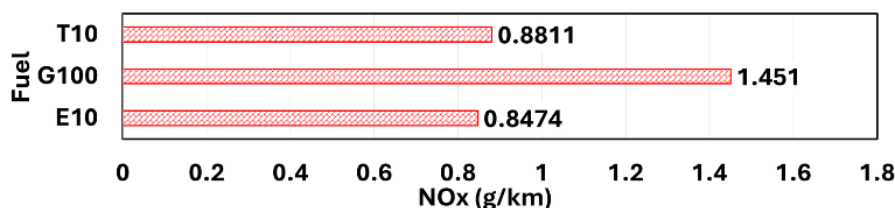
شکل ۱۴ مقدار انتشار کربن مونواکسید سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی تحت بار کامل در دور ۳۰۰۰ د.د.



شکل ۱۵ مقدار انتشار کربن دی‌اکسید سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی تحت بار کامل در دور ۳۰۰۰ د.د.



شکل ۱۶ مقدار انتشار هیدروکربن سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی تحت بار کامل در دور ۳۰۰۰ د.د.



شکل ۱۷ مقدار انتشار اکسیدهای ازت سوخت‌های ترکیبی با ۱۰٪ افزودنی تحت بار کامل در دور ۳۰۰۰ د.د.

جدول ۸ نتایج پیش‌بینی آلاینده‌گی بر حسب گرم در هزارمتر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

سوخت	دور موتور (rpm)	کربن مونوکسید (CO)	کربن دی‌اکسید (CO ₂)	اکسیدهای ازت (NO _x)	هیدروکربن (HC)
E5	۲۰۰۰	۰.۲۲۰۰	۲۰۹.۶۵۰۰	۰.۰۰۹۰	۱.۱۲۰۰
E5	۳۰۰۰	۰.۱۶۵۰	۲۱۴.۸۹۱۲	۰.۰۱۲۰	۱.۱۴۸۰
E10	۲۰۰۰	۰.۶۸۳۹	۲۱۰.۲۰۷۵	۰.۷۹۴۲	۰.۵۰۹۵
E10	۳۰۰۰	۰.۸۳۴۹	۲۲۸.۱۱۲۳	۰.۸۴۷۴	۰.۵۴۸۰
E15	۲۰۰۰	۱.۱۳۶۷	۲۱۳.۶۵۰۷	۰.۷۹۱۴	۰.۳۹۴۱
E15	۳۰۰۰	۱.۲۸۱۲	۲۳۱.۲۱۱۲	۰.۸۴۴۶	۰.۴۳۲۵
G100	۲۰۰۰	۰.۹۵۶۲	۱۹۷.۸۱۱۸	۱.۰۱۵۷	۰.۷۵۳۲
G100	۳۰۰۰	۱.۱۷۵۹	۲۱۵.۷۱۶۶	۱.۴۵۱۰	۱.۱۷۰۰
T5	۲۰۰۰	۰.۵۳۰۰	۲۱۰.۴۹۰۰	۱.۴۰۰۰	۲.۳۸۰۰
T5	۳۰۰۰	۰.۶۴۵۷	۲۱۵.۷۵۲۲	۱.۴۳۵۰	۲.۴۳۹۵
T10	۲۰۰۰	۰.۸۶۱۲	۱۹۰.۹۲۵۳	۰.۸۲۵۰	۰.۷۴۶۷
T10	۳۰۰۰	۱.۰۱۲۱	۲۰۸.۱۴۱۵	۰.۸۸۱۱	۰.۷۷۸۸
T15	۲۰۰۰	۱.۳۷۳۰	۱۹۹.۸۷۷۷	۰.۶۰۹۱	۰.۳۴۲۸
T15	۳۰۰۰	۱.۵۲۳۹	۲۱۷.۰۹۳۹	۰.۶۶۵۲	۰.۳۹۴۱

این نتایج با افزایش هم‌زمان کربن دی‌اکسید در همین سوخت‌ها همراه بوده و نشان‌دهنده ارتقای بازده احتراق هستند. در رابطه با آلاینده هیدروکربن نسوخته، مشاهده می‌شود که درصد این ترکیب در سوخت‌های ترکیبی نسبت به بنزین خالص به‌طور محسوسی کاهش یافته است. کاهش دمای شعله و زمان اقامت مناسب برای سوختن کامل‌تر، بویژه در حضور افزودنی‌هایی با ویژگی‌های حرارتی متفاوت، از جمله عوامل مؤثر در این روند هستند.

از سوی دیگر، تحلیل اکسیدهای ازت نشان می‌دهد که با افزایش درصد تولوئن در سوخت، مقدار این آلاینده روند افزایشی دارد؛ به‌طوری که در سوخت T15 و در دور ۳۰۰۰ د.د.د. بیشینه مقدار اکسیدهای ازت مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان با تکیه بر سازوکار زلدویج و افزایش دمای موضعی در ناحیه احتراق به‌واسطه احتراق سریع‌تر و پرانرژی‌تر تولوئن تفسیر نمود.

در سوی مقابل، ترکیبات حاوی زیست-اتانول، بویژه E10، مقدار اکسیدهای ازت کمتری تولید کرده‌اند که ناشی از دمای سردتر احتراق و اثرات خنک‌کنندگی اتانول است. در مجموع، تحلیل جدول ۶ مؤید این نکته است که الگوی شبکه عصبی مصنوعی توسعه‌یافته در این پژوهش توانسته است با دقت خوبی، رفتار آلاینده‌گی موتور را نسبت به نوع سوخت و شرایط عملکردی شبیه‌سازی کند. این موفقیت، مسیر مناسبی برای استفاده از روش‌های یادگیری رایانه‌ای در پیش‌بینی رفتار سامانه‌های پیچیده احتراق فراهم می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد و آلاینده‌گی موتور ملی در مواجهه با سوخت‌های ترکیبی حاوی زیست-اتانول (E5، E10، E15) و تولوئن (T5، T10، T15) در قالب یک چارچوب ترکیبی از آزمون تجربی و شبیه‌سازی هوشمند بررسی شد. هدف اصلی، تحلیل اثرات ترمودینامیکی و شیمی‌احتراقی این افزودنی‌ها بر فرآیند احتراق، متغیرهای توان و گشتاور، و تولید آلاینده‌های کلیدی بود.

همچنین، با توسعه یک الگوی شبکه عصبی مصنوعی چندلایه، امکان پیش‌بینی دقیق مقادیر خروجی گازهای آلاینده ارزیابی گردید. نتایج تجربی نشان دادند که افزودن زیست-اتانول در نسبت‌های پایین (بویژه E10) منجر به بهبود کارایی حجمی، احتراق کامل‌تر و کاهش قابل‌ملاحظه آلاینده‌های CO و HC گردید؛ که این به دلیل اکسیژن ذاتی در ساختار اتانول و پتانسیل بالای آن برای تسریع واکنش‌های احتراقی است.

با این حال، افزایش بیش از حد اتانول (E15) به واسطه گرمای نهان تبخیر بالا و کاهش چگالی انرژی سوخت، موجب افت توان و گشتاور خروجی شده و مقادیر اکسیدهای ازت را نیز تا حدی افزایش داده است. در سوی مقابل، افزودن تولوئن به عنوان ترکیبی آروماتیک با عدد اکتان بزرگ، در نسبت‌های ۱۰ و ۱۵٪، موجب ارتقای محسوس توان و گشتاور موتور گردید. همچنین کاهش چشمگیر CO و HC در سوخت‌های T10 و T15 مشاهده شد که مؤید احتراق پایدارتر، شعله قوی‌تر و کاهش نواحی غیرفعال احتراق است.

با این حال، افزایش دمای شعله و فشار جزئی اکسیژن در شرایط حرارتی بالا، منجر به تسریع سازوکار زلدویچ و در نتیجه افزایش آلاینده اکسیدهای ازت گردیده است. الگوی شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده، با ساختار تمام اتصال^۱ و تابع فعال‌سازی ReLU، در پیش‌بینی مقادیر آلاینده‌گی در هر دو دور موتور عملکرد بسیار دقیق و پایدار از خود نشان داد. میانگین خطای مطلق کمتر از ۵٪ برای اکثر خروجی‌ها و تطابق بالای نتایج پیش‌بینی با داده‌های آزمایشگاهی، حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب این الگو در تحلیل فرآیندهای احتراقی غیرخطی است. در جمع‌بندی، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که طراحی ساختارهای ترکیبی سوخت بر پایه اتانول و تولوئن، در صورت رعایت نسبت‌های بهینه، می‌تواند بهبود هم‌زمان در عملکرد موتور و مهار انتشار آلاینده‌ها را به همراه داشته باشد. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، راهکاری مؤثر و دقیق برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سامانه‌های احتراقی محسوب می‌شود و می‌تواند نقش بسزایی در توسعه نسل جدید موتورها با سوخت‌های ترکیبی ایفا نماید.

فهرست علائم

CO	کربن مونوکسید
CO ₂	کربن دی اکسید
HC	هیدروکربن‌های نسوخته
ΔH	گرمای استاندارد واکنش
RPM	د.د.د.
ANN	شبکه عصبی مصنوعی
SI Engine	موتور احتراق داخلی جرقه ای
TensorFlow (TF)	تنسورفلو (بستریادگیری)
VVT	زمان بندی متغیر دریچه‌ها
LHV	ارزش حرارتی کمتر سوخت
RELU	تابع فعال‌سازی خطی اصلاح شده
MAE	میانگین خطای مطلق
RMSE	جذر میانگین مربعات خطا

¹ Fully Connected

References

- [1] Kharazmi S, Talebi F, Shahabiniya MP, Majidi Majd M, Kamalzadeh H, Saghafi R. Experimental Performance Analysis and ANN Prediction of Emissions in EF7 Engines with Blended Fuels. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*. 2026 Jan 25. doi: [10.22075/jhmtr.2026.39336.1851](https://doi.org/10.22075/jhmtr.2026.39336.1851)
- [2] Dhamodaran G, Esakkimuthu GS, Palani T, Sundaraganesan A. Reducing gasoline engine emissions using novel bio-based oxygenates: a review. *Emergent materials*. 2023 Oct;6(5):1393-413. doi: [10.1007/s42247-023-00470-7](https://doi.org/10.1007/s42247-023-00470-7)
- [3] Gajewski M, Wyrąbkiewicz S, Kaszkowiak J. Effects of ethanol-gasoline blends on the performance and emissions of a vehicle spark-ignition engine. *Energies*. 2025 Jul 1;18(13):3466. doi: [10.3390/en18133466](https://doi.org/10.3390/en18133466)
- [4] Yousefi H, Farhadi A. Evaluating Exhaust Gas Emissions from Blended Ethanol-Gasoline Combustion in Two Iranian National Common Light-Vehicle Engines at Different Speeds. *Journal of Energy Management and Technology*. 2023 Sep 1;7(3):165-73. doi: [10.22109/jemt.2023.391758.1440](https://doi.org/10.22109/jemt.2023.391758.1440)
- [5] Rao YS, Bansod PJ, Moreno M, Manickam M. ANALYSING THE EFFECTS OF TOLUENE PERCENTAGES AND EXHAUST GAS RE-CIRCULATION RATES ON SPARK-IGNITION ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS. *Thermal Science*. 2024 Jan 1;28(1A):197. doi: [10.2298/TSCI221021270R](https://doi.org/10.2298/TSCI221021270R)
- [6] Trombley G, Toulson E. Ignition Delay Time Measurements of Substituted Phenol Additives in a Toluene Reference Fuel. *ACS omega*. 2024 Nov 1;9(45):45319. doi: [10.1021/acsomega.4c06985](https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06985)
- [7] Chansauria P, Mandloi RK. Effects of ethanol blends on performance of spark ignition engine-a review. *Materials Today: Proceedings*. 2018 Jan 1;5(2):4066-77. doi: [10.1016/j.aej.2018.02.015](https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.015)
- [8] Badia JH, Ramírez E, Bringué R, Cunill F, Delgado J. New octane booster molecules for modern gasoline composition. *Energy & Fuels*. 2021 Jul 6;35(14):10949-97. doi: [10.1021/acs.energyfuels.1c00912](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00912)
- [9] Venkatesh SV, Udayakumar R. Performance and emissions of si engine with octane boosters. In *MATEC Web of Conferences 2018* (Vol. 249, p. 03008). EDP Sciences. doi: [10.1051/mateconf/201824903008](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824903008)
- [10] Pazmiño-Viteri K, Cabezas-Terán K, Echeverría D, Cabrera M, Taco-Vásquez S. Average Carbon Number Analysis and Relationship with Octane Number and PIONA Analysis of Premium and Regular Gasoline Expended in Ecuador. *Processes*. 2024 Aug 14;12(8):1706. doi: [10.3390/pr12081706](https://doi.org/10.3390/pr12081706)
- [11] Liu S, Lin Z, Zhang H, Fan Q, Lei N, Wang Z. Experimental study on combustion and emission characteristics of ethanol-gasoline blends in a high compression ratio SI engine. *Energy*. 2023 Jul 1;274:127398. doi: [10.1016/j.energy.2023.127398](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127398)
- [12] Li Y, Ning Z, Lee CF, Lee TH, Yan J. Performance and regulated/unregulated emission evaluation of a spark ignition engine fueled with acetone-butanol-ethanol and gasoline blends. *Energies*. 2018 May 2;11(5):1121. doi: [10.3390/en11051121](https://doi.org/10.3390/en11051121)
- [13] Bonini VR, Lemos LF, Starke AR, da Silva AK. Analyzing the impact of an increased bioethanol share in the fuel blend for the Brazilian lightweight fleet transportation sector. *Energy*. 2025 Oct 15;334:137515. doi: [10.1016/j.energy.2025.137515](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137515)
- [14] Kalvakala KC, Singh H, Pal P, Gonzalez JP, Kolodziej CP, Aggarwal SK. Computational study on the impact of gasoline-ethanol blending on autoignition and soot/NOx emissions under gasoline compression ignition conditions. *arXiv preprint arXiv:2403.10687*. 2024 Mar 15. doi: [10.48550/arXiv.2403.10687](https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.10687)
- [15] Wang H, Yao M, Yue Z, Jia M, Reitz RD. A reduced toluene reference fuel chemical kinetic mechanism for combustion and polycyclic-aromatic hydrocarbon predictions. *Combustion and Flame*. 2015 Jun 1;162(6):2390-404. doi: [10.1016/j.combustflame.2015.02.005](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.02.005)
- [16] Anderlohr JM, Bounaceur R, Da Cruz AP, Battin-Leclerc F. Modeling of autoignition and NO sensitization for the oxidation of IC engine surrogate fuels. *Combustion and Flame*. 2009 Feb 1;156(2):505-21. doi: [10.48550/arXiv.0903.3809](https://doi.org/10.48550/arXiv.0903.3809)
- [17] Thakur AK, Kaviti AK, Mehra R, Mer KK. Progress in performance analysis of ethanol-gasoline blends on SI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Mar 1;69:324-40. doi: [10.1016/j.rser.2016.11.056](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.056)
- [18] Najafi G, Ghobadian B, Tavakoli T, Buttsworth DR, Yusaf TF, Faizollahnejad MJ. Performance and

- exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network. *Applied energy*. 2009 May 1;86(5):630-9. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.09.017
- [19] Turner D, Xu H, Cracknell RF, Natarajan V, Chen X. Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine. *Fuel*. 2011 May 1;90(5):1999-2006. doi: 10.1016/j.fuel.2010.12.040
- [20] Demirbas A. Progress and recent trends in biofuels. *Progress in energy and combustion science*. 2007 Feb 1;33(1):1-8. doi: 10.1016/j.pecs.2006.06.001
- [21] Hosseini H, Hajjalimohammadi A, Gavzan IJ, Hajimousa MA. 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*. 2023 Apr 1;337:127252. doi: 10.1016/j.fuel.2022.127252
- [22] Baratian A, Mirsane SA, Jadidi AM, Hajiali Mohammadi A. Investigating the effect of bioethanol fuel concentration with different percentages on power and torque in EF7 engine. *The Journal of Engine Research*. 2023 Nov 22;70(3):18-29. doi: 10.22034/er.2024.2026552.1050
- [23] Agarwal AK. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in energy and combustion science*. 2007 Jun 1;33(3):233-71. doi: 10.1016/j.pecs.2006.08.003
- [24] Mirmohammadi A, Marvasti AK. Investigating the performance and emission of RCCI engines with different compositions and percentages of natural gas. *The Journal of Engine Research*. 2024;71(1):16-39. doi: 10.22034/er.2024.2025008.1031 [In Persian]
- [25] Mohammadi A, Montazer Y, Rahimi Asiabaraki H. Reduction of fuel consumption and emissions of Iranian naturally aspirated engine on Samand vehicle with thermal management. *The Journal of Engine Research*. 2025 Feb 19;71(4):58-76. doi: 10.22034/er.2025.2053701.1077
- [26] Bögrek A, Haşımoğlu C, Calam A, Aydoğan B. Effects of n-heptane/toluene/ethanol ternary fuel blends on combustion, operating range and emissions in premixed low temperature combustion. *Fuel*. 2021 Jul 1;295:120628. doi: 10.1016/j.fuel.2021.120628
- [27] Shankar V, Leach F. Effects of oxygenate and aromatic content on engine-out aldehyde emissions from pure, binary, and ternary mixtures of ethanol, toluene, and iso-octane. In 2023 JSAE/SAE Powertrains, Energy and Lubricants International Meeting 354456 2023 Sep 29.
- [28] Ahmed E, Usman M, Anwar S, Ahmad HM, Nasir MW, Malik MA. Application of ANN to predict performance and emissions of SI engine using gasoline-methanol blends. *Science Progress*. 2021 Mar;104(1):00368504211002345. doi: 10.1177/00368504211002345
- [29] Zhu Z, Wang J, Deng T, Dai H. An artificial intelligence-based strategy for multi-objective optimization of internal combustion engine performance and emissions. *Expert Systems with Applications*. 2025 Apr 25;270:126472. doi: 10.1016/j.eswa.2025.126472
- [30] Chen G, Chen S, Li D, Chen C. A hybrid deep learning air pollution prediction approach based on neighborhood selection and spatio-temporal attention. *Scientific Reports*. 2025 Jan 29;15(1):3685. doi: 10.1038/s41598-025-88086-1
- [31] Shaik F, Kumar DV, Naik NC, Krishna GR, Khan TY, Shaik AS, Buradi A, Emma AF. Predictive modeling and optimization of SI engine performance and emissions with GEM blends using ANN and RSM. *Scientific Reports*. 2025 Feb 7;15(1):4585. doi: 10.1038/s41598-025-88486-3
- [32] Bodendorfer N. A HEART for the environment: Transformer-based spatiotemporal modeling for air quality prediction. arXiv preprint arXiv:2502.19042. 2025 Feb 26. doi: 10.48550/arXiv.2502.19042
- [33] Yadav V, Yadav AK, Singh V, Singh T. Artificial neural network an innovative approach in air pollutant prediction for environmental applications: A review. *Results in Engineering*. 2024 Jun 1;22:102305. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102305
- [34] Jairi I, Ben-Othman S, Canivet L, Zgaya-Biau H. Enhancing air pollution prediction: A neural transfer learning approach across different air pollutants. *Environmental Technology & Innovation*. 2024 Nov 1;36:103793. doi: 10.1016/j.eti.2024.103793
- [35] Wetering MV, Danninger A, Vos B. Artificial Neural Network-Based Emission Control for Future ICE Concepts. In *Energy & Propulsion Conference & Exhibition* 339925 2023 Oct 31. doi: 10.4271/2023-01-1605
- [36] Uyaroglu A, Ünalı M. The influences of gasoline and diesel fuel additive types. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2021 Sep 9;8(3):143-53. doi: 10.31593/ijeat.791973
- [37] Seo J, Yun B, Park J, Park J, Shin M, Park S. Prediction of instantaneous real-world emissions from

- diesel light-duty vehicles based on an integrated artificial neural network and vehicle dynamics model. *Science of the Total Environment*. 2021 Sep 10;786:147359. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.147359](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147359)
- [38] Shailaja M, Sita Rama Raju AV. Neural network—Based diesel engine emissions prediction for variable injection timing, injection pressure, compression ratio and load conditions. In *Emerging Trends in Electrical, Communications and Information Technologies: Proceedings of ICECIT-2015* 2016 Nov 15 (pp. 109-122). Singapore: Springer Singapore. doi: [10.1007/978-981-10-1540-3_12](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1540-3_12)
- [39] Su Q, Latypov R, Chen S. ANN modeling for predicting NO_x and particulate matter emissions from cement kilns. *Journal of Cleaner Production*. 2025 Jun 25;512:145707. doi: [10.1016/j.jclepro.2025.145707](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145707)
- [40] Oduduwa OY, Tartibu LK, Kusakana K. Artificial neural network modelling for predicting efficiency and emissions in mini-diesel engines: Key performance indicators and environmental impact analysis. *Fuel*. 2025 May 1;387:134294. doi: [10.1016/j.fuel.2025.134294](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134294)
- [41] Venu H, Soudagar ME, Kiong TS, Razali NM, Wei HR, Khan TY, Almakayeel N, Kalam MA, Cuce E. Performance and emission prediction using ANN (artificial neural network) on H₂-assisted *Garcinia gummi-gutta* biofuel doped with nano additives. *Scientific Reports*. 2025 Feb 18;15(1):5911. doi: [10.1038/s41598-025-90165-2](https://doi.org/10.1038/s41598-025-90165-2)
- [42] Gad MS, Fawaz HE. Artificial neural network based forecasting of diesel engine performance and emissions utilizing waste cooking biodiesel. *Scientific Reports*. 2024 Sep 20;14(1):21980. doi: [10.1038/s41598-024-71675-x](https://doi.org/10.1038/s41598-024-71675-x)
- [43] Seetharaman S, Suresh S, Shivaranjani RS, Dhamodaran G, Js FJ, Alharbi SA, Pugazhendhi A, Varuvel EG. Prediction, optimization, and validation of the combustion effects of diisopropyl ether-gasoline blends: A combined application of artificial neural network and response surface methodology. *Energy*. 2024 Oct 1;305:132185. doi: [10.1016/j.energy.2024.132185](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132185)