

مدل سازی، بهینه سازی عملکرد و آلاینده‌گی یک موتور دیزلی سوخت رسانی شده با امولسیون های آب-دیزل حاوی افزودنی نانوذرات فلزی-آلی به کمک یادگیری ماشین

سید حسن حسینی^۱، مرتضی آغباشلو^{۲*}، میثم طباطبایی^۳، علی حاجی احمد^۴، علیرضا ختائی^۵، محمدحسین

نادیان^۶

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی ماشین های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، Hosseini.70@ut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی ماشین های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، maghbashlo@ut.ac.ir

۳- دانشیار، بیوتکنولوژی میکروبی، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، meisam.tabatabaei@umt.edu.my

۴- استادیار، مهندسی ماشین های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، hajiahmad@ut.ac.ir

۵- استاد، شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ar_khataee@yahoo.com

۶- استادیار، پژوهشکده علوم شناختی، پژوهشگاه دانش های بنیادی، تهران، ایران، fmmh11510@gmail.com

*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹)

چکیده: تحقیق حاضر، به منظور مدل سازی و بهینه سازی عملکرد و ویژگی های انتشار آلاینده گی یک موتور دیزل سوخت-رسانی شده با امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات چارچوب فلزی-آلی با استفاده از ترکیب سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO-ANFIS) انجام شده است. به منظور بهینه سازی پارامترهای عملکرد موتور و ترکیب سوخت از الگوریتم ازدحام ذرات چند منظوره (MOPSO) استفاده شده است. مقدار آب اضافه شده به امولسیون، بار موتور و غلظت افزودنی نانوذرات چارچوب فلزی-آلی به عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شدند. مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازده حرارتی ترمزی، CO، CO₂، UHC، NOx و دوده به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده اند. از ۱۶ داده تجربی در فرآیند مدل سازی و بهینه سازی استفاده شده است. نتایج نشان داد مدل های توسعه یافته PSO-ANFIS با دقت کافی توابع هدف را پیش بینی می کند. بین تمامی داده های هدف و خروجی مدل های توسعه یافته تطابق خوبی وجود داشت. با توجه به نتایج بهینه سازی مشاهده شد که سوخت امولسیون آب-دیزل حاوی ۲۶/۲۷ ppm نانوذره چارچوب فلزی-آلی و ۴/۱۴ درصد وزنی آب تحت بار موتور ۶۰/۱۵ درصد از بار کامل دارای شرایط بهینه است.

کلیدواژگان: امولسیون آب-دیزل، نانوذرات چارچوب فلزی-آلی، سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

مقدمه

موتورهای دیزلی، به دلیل مصرف مخصوص سوخت کمتر، استحکام، قابلیت اطمینان و دوام در تمام بخش های اصلی مانند حمل و نقل، تولید توان، صنعت، دریایی و کشاورزی نقش مهمی ایفا می کنند [۱]. همچنین، موتورهای دیزلی در شرایط کار یکسان، بازده حرارتی بیشتر [۲] و مقادیر هیدروکربن های نسوخته (UHC) و مونواکسید کربن (CO) کمتری نسبت به

1. Unburned hydrocarbons

موتورهای بنزینی تولید می‌کنند [۳]. با این حال، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و ذرات دوده تولید شده در موتورهای دیزلی منبع اصلی آلودگی هوا در مناطق شهری هستند [۴]. بنابراین، با توجه به افزایش روزافزون هزینه‌های سوخت و نگرانی‌های عمومی از کیفیت هوای شهری به دلیل افزایش استفاده از سوخت‌های دیزل، مطالعات زیادی در چند دهه گذشته به منظور توسعه موتورهای دیزلی تمیزتر و کارآمدتر و استفاده از آنها انجام شده است [۵]. قوانین آینده برای کنترل انتشار گازهای خروجی موتور، انتشار NOx را به سطوح بسیار پایین محدود می‌کند و یکی از عیب‌های اصلی موتورهای دیزلی انتشار زیاد NOx است [۶]. به همین منظور، روش‌های مختلفی مانند گردش مجدد گازهای خروجی (EGR) [۳]، به تأخیر انداختن زمان تزریق سوخت برای کاهش دمای اوج احتراق و تغییر شکل سوخت به منظور کاهش انتشار NOx توسعه یافته است [۷،۶]. در بین این روش‌ها، استفاده از روش تغییر شکل سوخت به صورت امولسیون سازی آب-دیزل برای کاهش انتشار دوده و NOx به طور همزمان به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. همچنین، جلوگیری از اثر خوردگی احتمالی روی سطح سیلندر موتور و اثر ترکیبی ریز انفجار و پاشش ثانویه که با تبخیر شدید و اختلاط بهتر هوا و سوخت باعث افزایش واکنش احتراق سیلندر موتور می‌شوند از مزایای استفاده از روش امولسیون سوخت آب-دیزل در موتور است [۹].

علی‌رغم تأثیرات مطلوب استفاده از امولسیون آب-دیزل بر روی انتشار NOx و دوده، موارد افزایش مصرف سوخت، انتشار UHC و CO مشاهده می‌شود [۱۰-۱۲]. به منظور توجه به عوارض نامطلوب استفاده از امولسیون آب-دیزل که می‌تواند جنبه‌های مثبت استفاده از امولسیون آب-دیزل را تحت الشعاع قرار دهد، استفاده از مواد افزودنی نانو باهدف جبران کاستی‌های موجود در این روش پیشنهاد شده است [۱۳]. تأثیرات نامطلوب افزودن آب به سوخت با افزودن نانوذرات به امولسیون سوخت که به پدیده پاشش ثانویه ذرات سوخت منجر می‌شود و باعث یکنواخت شدن مخلوط سوخت و هوا در محفظه احتراق، کاهش تأخیر در اشتعال و کوتاه شدن مدت زمان احتراق سوخت می‌شود، جبران می‌شود [۱۴،۱۵]. پژوهش‌های زیادی در زمینه استفاده از نانوذرات فلزی، کربنی و ترکیبی از نانوذرات فلزی/کربنی به عنوان افزودنی به سوخت با هدف بررسی عملکرد و انتشار آلاینده‌های موتور دیزل اضافه گرفته است. در جدول (۱) چند نمونه از پژوهش‌های انجام شده با استفاده از نانوذرات مختلف و نتایج حاصل از آن ارائه شده است.

1. Carbon monoxide
2. Nitrogen oxides
3. Exhaust gas recirculation

جدول ۱- اثرات نانو افزودنی‌ها بر روی عملکرد و آلاینده‌های موتورهای دیزلی.

Table 1- Effects of nanoadditives on performance and exhaust emissions characteristics of diesel engines.

Fuel blend	Nanoparticle concentration	Engine characteristics	Operating condition	Performance parameters		Emission parameters					Ref.
				BSFC	BTE	CO	CO ₂	UHC	NOx	Smoke	
Diesel	Carbon nanotubes (25, 50, 100 ppm)	Single-cylinder, Water-cooled, RATED power of 12 HP@2400rpm, Displacement of 638 cm ³ , Compression ratio of 17.7	Constant engine speed of 1800 rpm, Various engine loads (0 – 100% of full load)	↓	↑	↑	↑	↓	↓	-	[2]
83% diesel + 2% surfactant + 15% water	Aluminum oxide (25, 50, 100 ppm)	Single-cylinder, Air-cooled, Naturally-aspirated, Rated power of 4.4 kW@1500 rpm, Displacement of 661 cm ³ , Compression ratio of 17.5	Constant engine speed of 1500 rpm, Various brake mean effective pressures (0.08–0.53 MPa), constant injection timing	↓	↑	↑	-	↓	↓	↓	[9]
Diesel	Ferrofluid (0.4%, 0.8% by volume)	Four-Cylinder, Water-cooled, Maximum power of 43 kW@4800 rpm, Displacement of 1.8 liters, Compression ratio of 17	Constant engine speed of 2200 rpm, Various brake mean effective pressures (30 –180 kPa)	↓	↑	↑	-	-	↓	-	[16]
Diesel	Titanium oxide (0.20%)	Four-Cylinder, Water-cooled, Turbocharged, Maximum power of 120 kW@3400 rpm, Displacement of 2982 cm ³ , Compression ratio of 17.9	Various engine speed (1000–3000 rpm), Constant engine load	↓	-	↓	↓		↓	-	[17]
Diesel	Aluminum oxide, Copper oxide (50 ppm)	Single-cylinder, Water-cooled, Naturally-aspirated, Rated power of 5.1 kW, Displacement of 349 cm ³ , Compression ratio of 20.3	Various engine speeds (1200–3600 rpm), Constant engine load (full-load operation)	↓	-	↓	-	↓	↓	-	[18]
93% diesel + 2% surfactant + 5% water	Carbon nanotubes (25, 50 ppm)	Single-cylinder, Air-cooled, Naturally-aspirated, Rated power of 4.4 kW@1500 rpm, Displacement of 661 cm ³ , Compression ratio of 17.5	Constant engine speed of 1500 rpm, Various brake mean effective pressures (0.8 –5.3 bar)	↓	↑	↓	-	↓	↓	↓	[19]
70% diesel+ 10% biodiesel+20% ethanol	Cerium oxide + Carbon Nanotubes (25, 50, 100 ppm)	Single-cylinder, Water-cooled, Rated power of 3.7 kW@1500 rpm, Displacement of 603 cm ³ , Compression ratio of 5–20	Constant engine speed of 1500 rpm, Various brake mean effective pressures (0 –0.55 MPa)	↓	↑	↑		↓	↓	↓	[20]
Jatropha biodiesel	Alumina+ Carbon Nanotubes (25 ppm)	Single-cylinder, Air-cooled, Rated power of 4.4 kW@1500 rpm, Displacement of 661 cm ³ , Compression ratio of 17.5	Constant engine speed of 1500 rpm, Various brake mean effective pressures (0 –0.53 MPa)	↓	↑	↓	↓	↓	-	-	[21]

همان‌طور که در جدول (۱) قابل مشاهده است، استفاده از نانوذرات مختلف فلزی و کربنی به‌عنوان افزودنی به سوخت در موتور دیزل باعث افزایش بازده حرارتی و کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی شده است. همچنین استفاده از نانوذرات مختلف فلزی و کربنی به‌طور کلی باعث کاهش انتشار آلاینده‌گی خروجی از موتور دیزل شده است. علی‌رغم ویژگی‌های مطلوبی که در استفاده از نانو افزودنی‌های فلزی و کربنی در مخلوط سوخت دیزل ثبت شده اما محدودیت‌های چالش‌برانگیزی مانند هزینه بالای آن‌ها و همچنین سمیت بالقوه پس‌مانده‌های احتراق آن‌ها برای محیط‌زیست و انسان، بی‌ثباتی سوخت و وقوع رسوب و همچنین تغییر در رنگ سوخت وجود دارد [۲۲-۲۷]. به‌منظور برطرف کردن محدودیت‌های نانوذرات فلزی و آلی، دسته جدیدی از نانوذرات که ترکیبی از مواد فلزی و آلی می‌باشند، می‌تواند به‌عنوان یک نانو افزودنی ایده‌آل سوخت مورد استفاده قرار گیرد [۲۸].

چارچوب‌های فلزی-آلی^۱ (MOF) دسته مهمی از نانومواد که از فلزات با پیوند دهنده‌های مواد آلی تشکیل شده‌اند و دارای خواص ویژه مانند مساحت سطح و تخلخل بالا، اندازه و شکل قابل تنظیم، هزینه بسیار کم، کارکرد آسان، پایداری حرارتی بالا، تجزیه‌پذیری ذاتی و سمیت کم، قابلیت بازیافت و سازگاری با محیط‌زیست می‌باشند. ویژگی‌های خوب این نوع مواد موجب شده آن‌ها برای کاربردهایی در زمینه‌های انرژی، محیط‌زیست و زمینه ذخیره‌سازی گاز، جداسازی، تبادل یونی، سنجش و کاتالیز کردن مورد توجه و استفاده قرار گیرند [۲۹-۳۳]. چارچوب‌های ایمیدازولی زئولیتی^۲ (ZIF) زیرمجموعه جدیدی از چارچوب‌های متخلخل فلزی-آلی هستند که در مقایسه با انواع دیگر مواد چارچوب فلزی-آلی، اغلب پایداری حرارتی و شیمیایی بهتری را نشان می‌دهند. از این‌رو، در بسیاری از برنامه‌ها مانند ذخیره‌سازی گاز، جداسازی، به‌عنوان کاتالیزور و حسگرهای شیمیایی توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند [۳۲، ۳۴، ۳۵]. به‌همین منظور تحقیقی با هدف بررسی استفاده از نانوذرات چارچوب فلزی-آلی به‌طور ویژه، نانوذرات چارچوب فلزی-آلی مبتنی بر روی (Zn)، یعنی چارچوب ایمیدازولات زئولیتی^۳ (ZIF-8) به‌عنوان افزودنی به مخلوط امولسیون آب-دیزل بر عملکرد و انتشار آلاینده‌گی یک موتور دیزل انجام شده است که در مرجع [۳۶] قابل مشاهده است.

از آنجائی‌که، انجام آزمایش‌ها در موتورهای دیزل برای تعیین ویژگی‌های عملکردی موتور، فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است. به‌همین دلیل، می‌توان با مدل‌های محاسباتی مانند سامانه استنتاج عصبی-فازی^۴ (ANFIS) پارامترهای موتور را با تلاش بسیار کمی شبیه‌سازی کرد. با استفاده از ANFIS، می‌توان پدیده‌های فیزیکی سامانه‌های احتراق و عملکرد آن‌ها را در شرایط بارگذاری مختلف مدل‌سازی کرد. این نوع مدل‌سازی کاربردهایی در زمینه‌های مختلف مانند پردازش داده و سامانه‌های کنترل فازی دارد و می‌تواند بهترین راه حل برای کاربردهای موتور ارائه دهد [۳۷]. مدل‌های پیشرفته مبتنی بر ANFIS به دلیل قابلیت‌های یادگیری که پاسخ سریع به تغییرات را فراهم می‌کند، به‌عنوان یک روش محاسباتی مهم برای عملکردهای غیر خطی سطح بالا در نظر گرفته شده است [۳۸]. همچنین، ANFIS از مزایای رویکرد شبکه عصبی و سامانه منطق فازی بهره می‌برد، می‌تواند با توسعه توابع هدف قابل اطمینان و دقیق، فرآیند بهینه‌سازی را تسهیل کند [۳۹].

قابل ذکر است، روش معمولی آزمایش و خطا که معمولاً در بررسی ساختار بهینه ANFIS برای سامانه‌های پیچیده و غیرخطی مانند فرآیندهای احتراق استفاده می‌شود، بسیار وقت‌گیر و مستعد خطا است [۳۹]. برای غلبه بر این مشکل می‌توان سامانه ANFIS را به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل با روش‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۵ (PSO) و الگوریتم رقابت استعماری همراه کرد [۴۰]. از طرفی، فرایند پیدا کردن ترکیبات بهینه مخلوط سوخت و پارامترهای عملکردی موتور به‌دلیل وجود اهداف متناقض (مانند حداقل یا حداکثر کردن پارامترها به‌طور همزمان) با

1. Metal-organic frameworks
2. Zeolitic imidazolate frameworks
3. Zeolitic imidazolate framework (ZIF-8)
4. Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)
5. Particle swarm optimization (PSO)

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی معمولی بسیار دشوار یا تقریباً غیرممکن است. بر این اساس، روش‌های پیشرفته با مدل‌سازی و قابلیت‌های بهینه‌سازی بهتر باید برای بررسی ترکیبات بهینه مخلوط سوخت و شرایط عملکرد موتورهای دیزلی در نظر گرفته شوند. در بین الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی تکاملی که تاکنون معرفی شده‌اند، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند منظوره^۱ در حل مشکلات بهینه‌سازی با اهداف ناسازگار قوی است [۴۱]. با توجه به موارد گفته شده، روش‌های محاسبات نرم-افزاری به عنوان ابزاری امیدوارکننده برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی ویژگی‌های احتراق، عملکرد و انتشار آلاینده‌های موتورهای دیزلی که در محدوده وسیعی از ترکیبات سوخت مختلف کار می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود [۴۱].

چند نمونه از پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد سامانه ANFIS در مدل‌سازی پارامترهای موتور در ادامه آمده است. هوسوز^۲ و همکاران از ANFIS برای پیش‌بینی توان، مصرف سوخت ویژه ترمزی^۳ (BSFC)، بازده حرارتی ترمزی^۴ (BTE)، دمای گازهای خروجی آگروز و همچنین انتشار UHC، CO و NOx از موتورهای دیزلی که با استفاده از مخلوط سوخت دیزل/بیودیزل حاصل از روغن کلزا سوخت رسانی شده با در نظر گرفتن بیودیزل موجود در سوخت، سرعت دورانی موتور و بار موتور به‌عنوان پارامترهای ورودی استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد، داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از مدل سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی توسعه یافته با مقادیر تجربی بسیار مطابقت دارد [۴۲]. پراکاش و سروان کومار^۵ از ANFIS به‌منظور مدل‌سازی عملکرد (مصرف سوخت ویژه ترمزی و بازده حرارتی ترمزی) و آلاینده‌های (UHC، CO، NOx و دوده) موتورهای دیزلی سوخت رسانی شده با دیزل/بیودیزل استفاده کردند. حرارت آزاد شده، فشار سیلندر و زاویه میل‌لنگ به‌عنوان پارامترهای ورودی سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی توسعه یافته پارامترهای مورد نظر خروجی را به طور رضایت بخشی پیش‌بینی کردند [۳۷]. کومار سینگه^۶ و همکاران، با استفاده از ترکیب ANFIS و الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی عملکرد و آلاینده‌های موتور دیزل استفاده کردند. فشار تزریق، زمان تزریق سوخت، مخلوط‌های بیودیزل و بار موتور، به‌عنوان متغیرهای ورودی و پارامترهای بازده حرارتی ترمزی، UHC و NOx به‌عنوان متغیرهای خروجی مدل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که ترکیب ANFIS و الگوریتم ژنتیک پیش‌بینی دقیق‌تری از پارامترهای خروجی را در مقایسه با ANFIS ارائه داده است و یک الگوریتم ترکیبی مانند ANFIS و الگوریتم ژنتیک راه حل موثر و قابل اعتماد برای پیش‌بینی دقیق پارامترهای عملکرد و آلاینده‌های موتور است [۳۸]. در تحقیقی دیگر، توسط کومار سینگه^۷ و همکاران مدل‌سازی موتور دیزلی را با معرفی مدل‌های توسعه‌یافته با استفاده از ANFIS، ترکیب ANFIS با الگوریتم ژنتیک و ترکیب ANFIS با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO-ANFIS) مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای فشار تزریق، زمان تزریق سوخت، مخلوط‌های بیودیزل و بار موتور به‌عنوان متغیرهای ورودی و بازده حرارتی ترمزی، UHC و NOx به‌عنوان پارامترهای خروجی مدل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد، مدل توسعه یافته PSO-ANFIS فرایند بهینه‌سازی بهتری را ارائه داده است و یک روش موثر و قابل اعتماد برای ارزیابی پارامترهای آلاینده‌های موتور است [۴۳]. عطارد و همکاران موتور دیزلی سوخت‌رسانی شده با امولسیون آب-دیزل حاوی نانو ذرات کربن را با PSO-ANFIS مدل‌سازی کردند و بهینه‌سازی توابع هدف موردنظر را با الگوریتم MOPSO انجام دادند. نتایج نشان داد مدل‌سازی PSO-ANFIS با دقت خوبی پارامترهای خروجی را پیش‌بینی کرده است و الگوریتم MOPSO به خوبی شرایط عملیاتی و ترکیب سوخت بهینه را مشخص کرد [۴۱].

از آنجائی‌که از نانوذرات چارچوب‌های فلزی-آلی به‌عنوان افزودنی سوخت در موتور دیزل با هدف مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌های موتور دیزل استفاده نشده است، در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌هایی که

1. Multi-objective particle swarm optimization (MOPSO)
2. Hosoz
3. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)
4. Brake Thermal Efficiency (BTE)
5. Saravanakumar and Prakash
6. Kumar Singh
7. Kumar Singh

نتایج آن در مرجع [۳۶] قابل مشاهده است، مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی موتور دیزل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در تحقیق حاضر، به منظور سرعت بخشیدن و کم کردن خطای مدل‌سازی از سامانه PSO-ANFIS برای مدل‌سازی پارامترهای عملکردی و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی موتور در شرایط کاری مختلف استفاده شده است. در ادامه به منظور پیدا کردن ترکیبات بهینه مخلوط سوخت و پارامترهای عملکردی موتور به دلیل وجود اهداف متناقض از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی MOPSO که در حل مشکلات بهینه‌سازی با اهداف ناسازگار قوی است، استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

نصب و راه‌اندازی تجهیزات آزمایشگاهی و داده‌برداری

در این پژوهش از یک موتور دیزل چهارسیلندر، آب خنک که مشخصات آن در جدول (۲) آمده، استفاده شده است. جدول (۲) مشخصات تجهیزات و دستگاه‌های استفاده شده در فرآیند انجام تست موتور را نشان می‌دهد. جزئیات کامل نحوه‌ی انجام آزمایش در مرجع [۳۶] به‌طور جامع بیان شده است.

جدول ۲- مشخصات تجهیزات و دستگاه‌های استفاده شده در تست موتور آزمایش

Table 2: Specifications of equipment and devices used in engine testing.

Test Engine	Dynamometer	Emissions analyzer	Other Device and Sensor
D243 model diesel engine, Vertical, Four-stroke, Direct-injection, Compression-ignition, Four-cylinder, Naturally aspirated, Air-fuel mixing method by Space atomization and film evaporation, Maximum speed of 2200 rpm, Maximum power of 56 kW@2200 rpm, Maximum torque of 740Nm@1400 rpm, Swept volume of 4.75 L, Compression ratio of 16.7, Fuel injection timing 24° BTDC, Injector opening pressure 180 bar	Model AVL APA 100, 220-kW Eddy current dynamometer, Maximum torque of 934 Nm@8000 rpm	AVL CEB exhaust gas analyzer, Automatic calibrated, Emission diagnostics of UHC, CO, CO ₂ , and NOx	-Fuel flow meter: AVL Fuel Balance 733s -Air flow meter: AVL Sensyflow 735 -Combustion chamber pressure measurement: piezoelectric transducer (GH13Z-31, AVL) -Exhaust gas temperature sensor: PT100 -Lambda measurement sensor: LC-2 -Smoke number measurement device: AVL 415SE

جدول (۳) مشخصه‌های مربوط به دامنه و دقت اندازه‌گیری‌ها در نتایج پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. دقت، سازگاری و قابلیت اطمینان داده‌های احتراق به دست آمده باید قبل از تجزیه و تحلیل بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. به‌همین منظور، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت (معادله ۱) با استفاده از روش توسعه یافته توسط هولمن انجام شد [۳۶].

$$U = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial z_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial z_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

در معادله (۱)، U عدم قطعیت، تابع F متغیرهای مستقل، u_1, \dots, u_n عدم قطعیت متغیرهای مستقل و z_1, \dots, z_n متغیرهای مستقل هستند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت‌های مرتبط با پارامترهای احتراق، عملکرد و انتشار آلاینده‌ی کمتر از ۵ درصد بود. عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های تجربی و مجموع عدم قطعیت‌ها برای پارامترهای محاسبه شده به‌طور کامل در مقاله منتشر شده ما در مرجع [۳۶] گزارش شده است. مقدار عدم قطعیت کمتر از ۵ درصد برای مطالعات تجربی قابل قبول است. در نتیجه، نتایج به دست آمده قابل اعتماد بوده است.

جدول ۳- مشخصات و دقت ابزارهای اندازه‌گیری [۳۶].

Table 3. Characteristics and accuracies of measuring instruments [36].

Parameters	Range	Accuracy
Engine speed	1–8000 rpm	±1%
Torque	0–934 Nm	±1%
Fuel consumption	0–150 kg/h	0.12%
Air flowmeter	0–500 kg/h	±0.1%
Combustion chamber pressure	0–250 bar	1%
Lambda	0.5–8.0	±0.7%
Exhaust temperature	-200–650 °C	± 0.35%
CO	0–100,000 ppm	±1%
CO ₂	0–180,000 ppm	±1%
UHC	0–10,000 ppm	±1%
NO _x	0–15,200 ppm	±1%
Smoke	0–10 FSN	±0.1%

آماده‌سازی سوخت مورد استفاده

در تحقیق حاضر از روش سنتز سبز در دمای اتاق برای تولید نانوذرات ZIF-8 استفاده شده است. میانگین اندازه نانوذرات ZIF-8 حدود ۱۰۰ نانومتر است. در شکل (۱) تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری^۱ (TEM) و تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^۲ (SEM) نانوذرات ZIF-8 نشان داده شده است. به منظور تولید و آماده‌سازی مخلوط‌های سوخت مورد نظر، نانوذرات سنتز شده ZIF-8 ابتدا در آب مقطر حل شدند. سپس محلول حاصل با استفاده از ماده جاذب سطحی به نسبت وزنی ۱:۲ از اسپن ۸۰^۳ و توئین ۸۰^۴ به سوخت دیزل اضافه شد. درصد جرمی مخلوط آب و ماده جاذب سطحی در سوخت امولسیون ۷ درصد وزنی بود. دو سطح غلظت ۱۵ و ۳۰ ppm از نانوذرات ZIF-8، در پژوهش حاضر استفاده شده است. به منظور بهبود پایداری سوخت‌های امولسیونی، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هموژنایزر به مدت ۱۵ دقیقه و با استفاده از همزن در دور ۱۳۰۰ دور بر دقیقه در دمای محیط همگن شدند. به طور کلی، چهار مخلوط سوخت دیزل، امولسیون آب-دیزل (به‌عنوان سوخت امولسیون)، امولسیون آب-دیزل با ۱۵ ppm نانوذرات ZIF-8، امولسیون آب-دیزل با ۳۰ ppm نانوذرات ZIF-8 در آزمون‌ها استفاده شد. گرانیوی، چگالی سوخت، ارزش حرارتی، عدد ستان، نقطه اشتعال و کشش سطحی مخلوط سوخت‌ها بلافاصله پس از آماده‌سازی سوخت‌ها تعیین شدند. جدول (۴) خواص تمام مخلوط‌های سوخت مورد استفاده را بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM نشان می‌دهد.

1. Transmission electron micrographs (TEM)
 2. Scanning electron microscopy
 3. Span 80
 4. Tween 80

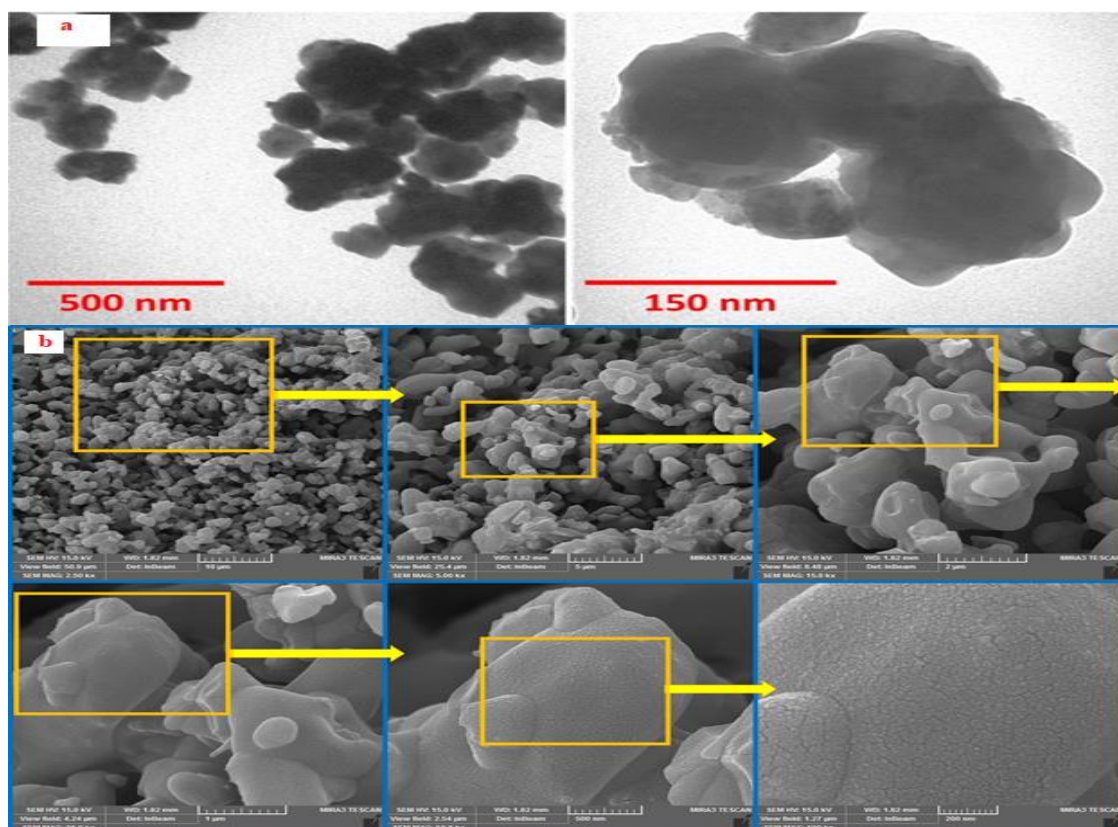


Fig. 1. TEM images of ZIF-8 (a), and SEM images of ZIF-8 nanoparticle
شکل ۱- تصویر TEM (a) و تصویر SEM (b) نانوذره ZIF-8

جدول ۴- خواص فیزیکوشیمیایی مخلوط‌های سوخت مورد آزمایش [۳۶].

Table 4. Physiochemical properties of the tested fuel blends [36].

Fuel property	Standard	Diesel	Emulsion fuel	Nano-emulsion 15 ppm	Nano-emulsion 30 ppm
Density @ 15 °C, (g/cm ³)	ASTM D445	0.8323	0.8513	0.8512	0.8518
Viscosity @ 40 °C, mm ² /s	ASTM D445	3.08	4.13	4.17	4.31
Calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	45.22	43.80	43.95	43.97
Flash point (°C)	ASTM D6450	69	65	66	66
Cetane number (-)	ASTM D6890	51.0	48.0	48.7	49.2
Surface tension @ 40 °C (dyn/cm)	ASTM D971	25.45	28.40	28.76	29.02

به منظور اندازه‌گیری چگالی و گرانروی، ارزش حرارتی، نقطه اشتعال و کشش سطحی مخلوط‌های سوخت تهیه شده به ترتیب از ویسکوزومتر (Stabinger Anton Paar SVM 300)، بمب داماسنج (IKA C2000)، دستگاه تست نقطه اشتعال (FLPH) و دستگاه کشش‌سنج (Krüss K12) استفاده شده است. عدد ستان مخلوط‌های سوخت با استفاده از تأخیر اشتعال آن‌ها به وسیله‌ی دستگاه اندازه‌گیری کیفیت احتراق (IQT measured) محاسبه شد [۴۴]. سوخت‌های امولسیون مورد استفاده در طول دوره آزمایش پایدار بودند. هیچ‌گونه جداسازی فاز یا رسوب شدن برای مخلوط‌های سوخت ترکیب شده مشاهده نشد، که نشان دهنده کیفیت قابل قبول آن‌ها است. مخلوط‌های سوخت مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است.

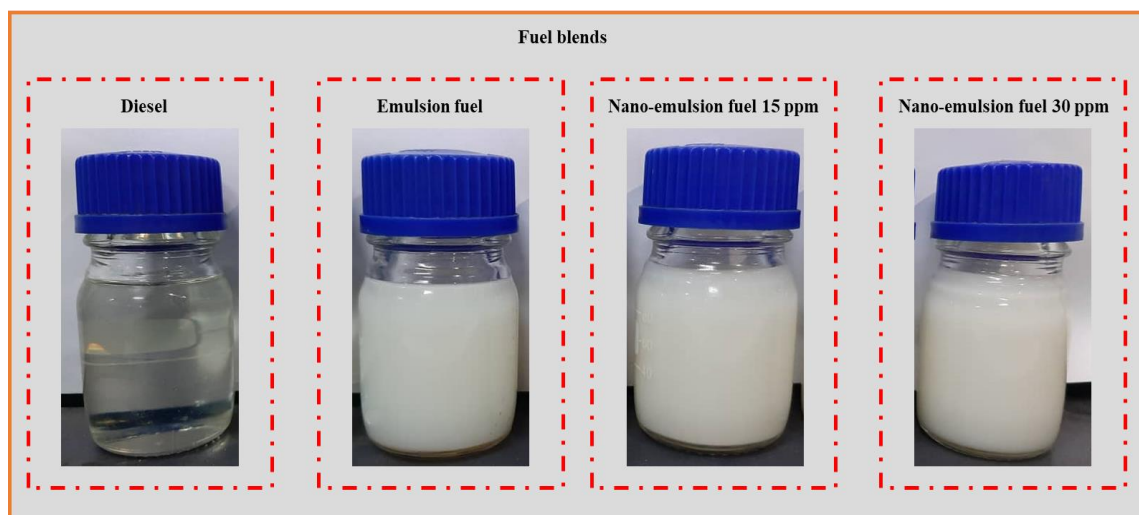


Fig. 2. Blend of prepared fuels used in the present study [36].

شکل ۲- مخلوط سوخت‌های آماده شده مورد استفاده در پژوهش حاضر [۳۶].

روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در دور ثابت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه موتور بر اساس ماکزیمم قدرت اسمی موتور و تحت بارهای مختلف ۱۰۰-۲۵٪ بافاصله ۲۵٪ انجام شد. گشتاور، توان، مصرف سوخت ویژه، دمای گازهای خروجی و آلاینده‌گی خروجی از موتور برای هر آزمون ثبت شده و تمام داده‌ها به کامپیوتر منتقل شدند. آزمایش‌ها در سه مرحله تکرار شدند. پس از تجزیه و تحلیل و تشخیص خطای اولیه، به‌منظور اطمینان از عدم وجود خطا و با هدف دقت و درستی آزمون‌ها برخی از تست‌ها تکرار شد.

فرایند مدل‌سازی و بهینه‌سازی سامانه استنتاج عصبی-فازی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

هدف اصلی تحقیق حاضر، پیش‌بینی عملکرد (مصرف سوخت ویژه ترمزی و بازده حرارتی ترمزی) و آلاینده‌گی (CO_2 ، CO ، UHC ، NOx و دوده) با افزودن نانوذرات ZIF-8 به موتور سوخت‌رسانی شده با امولسیون سوخت آب-دیزل توسط ترکیب سامانه استنتاج عصبی-فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است. از نرم‌افزار متلب نسخه R2022b برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد و انتشار موتور دیزل در شرایط مختلف استفاده شد. توابع هدف مورد نیاز الگوریتم MOPSO با مدل‌سازی PSO-ANFIS ایجاد شد. جهت آموزش سامانه طراحی شده از الگوریتم تکاملی PSO در مدل‌سازی ANFIS استفاده شده است. یک سامانه استنتاج فازی است که در یک چارچوب تطبیقی پیاده‌سازی شده است. این یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که از سامانه استنتاج فازی ادغام شده در محیط شبکه عصبی استفاده می‌کند. منطق فازی ویژگی استدلال انسان مانند را به ANFIS می‌آورد. چنین ترکیبی یک مزیت دوگانه از استدلال انسان مانند به همراه شبکه تطبیقی که مسئول پالایش قوانین فازی است را فراهم می‌کند. بنابراین چنین طرح یادگیری ترکیبی، ANFIS را به روشی کارآمد برای توابع غیرخطی و در نتیجه یک پیش‌بینی کارآمد و قوی تبدیل می‌کند. در یک سامانه فازی سنتی، یک متخصص مسئول ایجاد رابطه مبتنی بر "اگر" در بین ورودی و خروجی است. از سوی دیگر، ANFIS ماهیت تطبیقی دارد و می‌تواند به طور خودکار قوانین عضویت فازی را با توجه به محیط تنظیم کند [۴۵]. اطلاعات بیشتر در مورد الگوریتم PSO توسط کندی توضیح داده شده است [۴۶]. مقدار آب اضافه شده به سوخت، بار موتور و مقدار افزودنی نانوذرات ZIF-8 به امولسیون آب-دیزل به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شدند. در این پژوهش از داده‌های موجود در مرجع [۳۶] استفاده شده است. بر اساس داده‌های ورودی و به ازای هر خروجی یک مدل ANFIS استخراج شد (شکل ۳)، بطوری‌که با کمک PSO تمامی مدل‌های

ANFIS بهینه شد. سپس با استفاده از هفت مدل ANFIS بهینه و بکار گرفتن الگوریتم MOPSO نقاط بهینه پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌گی موتور بر اساس یک تابع هفت هدفه با تابع هدف بیشینه کردن بازده حرارتی ترمزی و کمینه کردن سایر خروجی‌ها (شش خروجی دیگر) استخراج شدند. ساختار کلی فرایندهای مدل‌سازی و بهینه‌سازی انجام شده پژوهش حاضر در مطالعه حاضر در شکل (۴) نشان داده شده است.

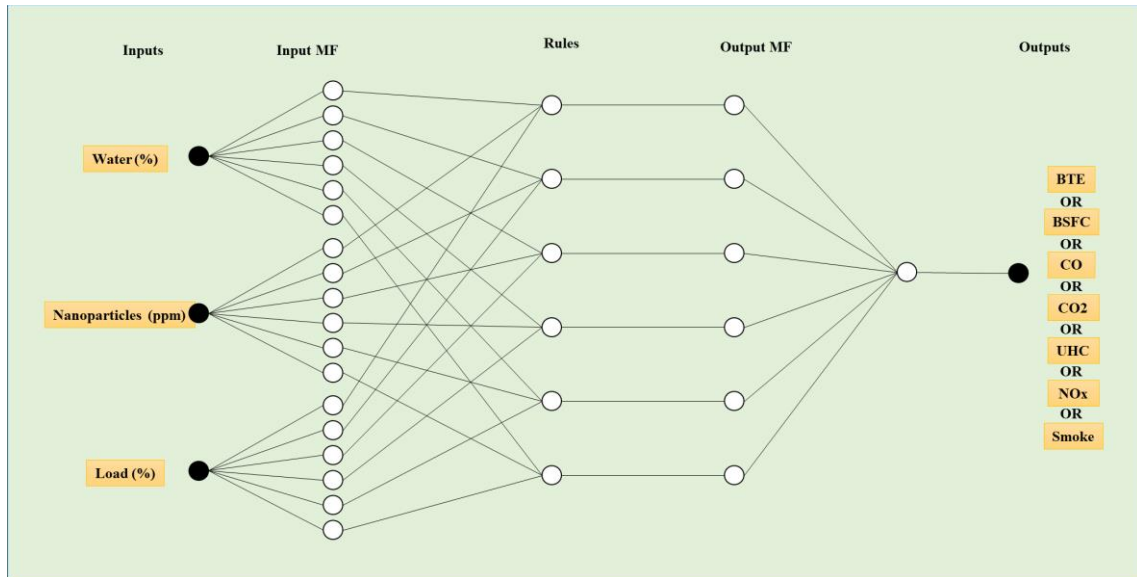


Fig. 3. Flowchart of Anfis modeling with input and output parameters at present study.

شکل ۳- طرح‌واره‌ای از مدل‌سازی ANFIS با نمایش پارامترهای ورودی و خروجی در مدل‌سازی مطالعه حاضر.

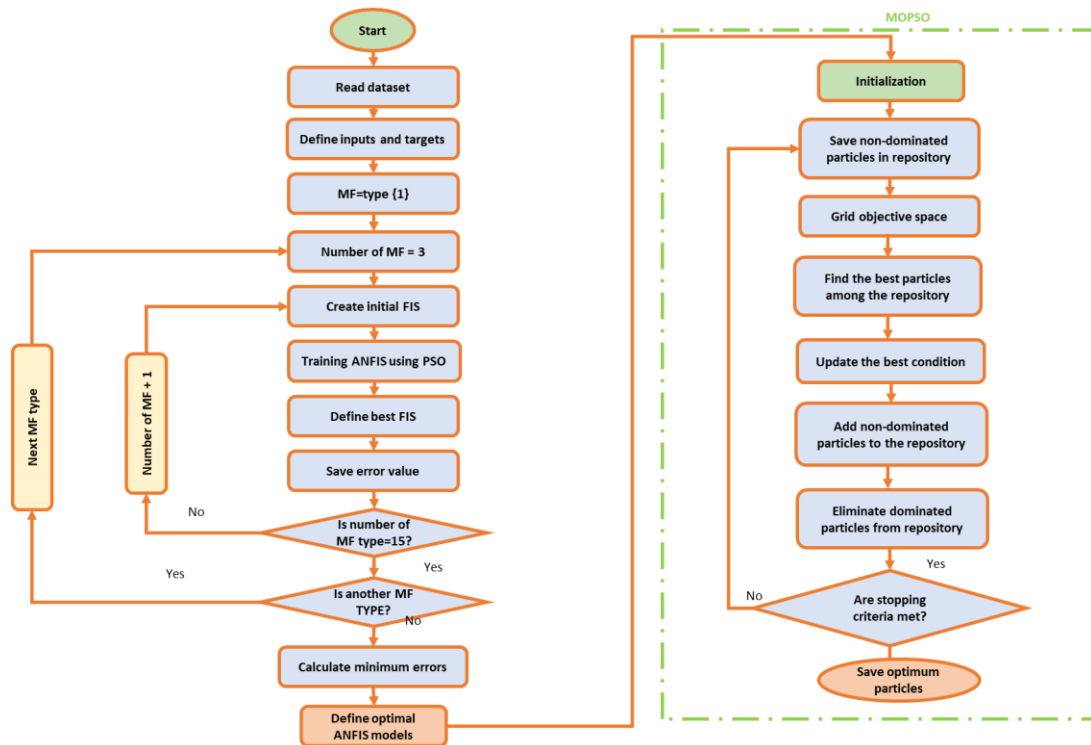


Fig. 4. Flowchart of modeling and optimization processes conducted throughout the present study. MF: Membership Function; FIS: Fuzzy Inference System.

شکل ۴- طرح‌واره‌ای از مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای انجام شده مطالعه حاضر.

در فرایند مدل‌سازی و بهینه‌سازی پژوهش حاضر، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش PSO-ANFIS، ۲۰ درصد باقی مانده داده‌ها برای آزمون مدل ایجاد شده، استفاده شد. در پژوهش حاضر از ۱۶ داده برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شده است. دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS با استفاده از چهار معیار آماری مانند ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) که روابط آن در جدول (۵) ارائه شده، استفاده شد. سپس توابع هدف توسعه یافته مبتنی بر PSO-ANFIS با استفاده از الگوریتم MOPSO به‌منظور یافتن پارامترهای بهینه موتور و ترکیب سوخت مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای عددی الگوریتم‌های PSO و MOPSO که برای تنظیم توپولوژی ANFIS و بهینه‌سازی پارامترهای موتور و ترکیب سوخت استفاده شد، در جدول (۶) ارائه شده است. در معادلات ارائه شده در جدول (۵)، n تعداد نمونه مورد آزمایش، P_i مقادیر اندازه‌گیری شده (هدف)، O_i مقادیر پیش‌بینی‌شده (خروجی) و O میانگین مقادیر پیش‌بینی شده است.

جدول ۵- پارامترهای آماری استفاده شده در پژوهش حاضر.

Table 5- Statistical parameters used in the present study.

Formula	Formula Number	Ref.
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{(P_i - O)^2}$	(2)	[47]
$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}$	(3)	[48]
$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}}$	(4)	[48]
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i }{n}$	(5)	[49]

جدول ۶- پارامترهای عددی الگوریتم‌های PSO و MOPSO که برای تنظیم توپولوژی ANFIS و بهینه‌سازی پارامترهای موتور و ترکیب سوخت.

Table 6. Numerical parameters of the PSO and MOPSO algorithms used to adjust the ANFIS topology and optimize the fuel blends and engine operation condition.

Characteristic	PSO algorithm	MOPSO algorithm
Maximum iterations number	3,500	8,000
Maximum particles number	300	200
Initial inertia weight	1	1
Inertia weight damping ratio	0.39	0.99
Cognitive acceleration (C_1)	1	1
Social acceleration (C_2)	2	2
Number of grids per dimension	-	30
Inflation rate (α)	-	0.1
Leader selection pressure (β)	-	2
Deletion selection pressure (γ)	-	2
Mutation rate (μ)	-	0.1

نتایج و بحث

جدول (۷) نتایج به‌دست آمده از عملکرد و آلاینده‌گی موتور در تحقیق را که در مرجع [۳۶] آمده به‌منظور درک بهتر از مدل‌سازی مطالعه حاضر نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که، سوخت امولسیون آب-دیزل به طور قابل توجهی باعث انتشار CO بیشتری از سوخت دیزل شده است. به‌طور کلی، انتشار CO از سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات تحت بار کامل موتور کمتر از سوخت امولسیون آب-دیزل بود. از نظر انتشار CO_2 توسط سوخت امولسیون آب-دیزل کمی مقادیر کمتری از

سوخت دیزل را نشان داده است. به طور کلی، سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات به دلیل فعالیت کاتالیزوری نانوذرات باعث انتشار CO_2 بیشتری از سوخت امولسیون آب-دیزل شده‌اند. همچنین نتایج نشان داد با افزودن نانوذرات به سوخت امولسیون آب-دیزل تحت شرایط کاری موتور در بارهای بالا، کاهش مصرف سوخت ویژه مشاهده شده است. انتشار UHC سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات کمتر از سوخت امولسیون آب-دیزل تحت بارهای ۵۰ و ۷۵ درصد بار بود. همچنین نتایج نشان داد که سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات باعث کاهش انتشار NO_x نسبت به سوخت دیزل در شرایط کاری موتور تا ۷۵ درصد از بار کامل موتور شده است. سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات از نظر انتشار دوده تحت بار کامل موتور نسبت به دیزل بهتر عمل می‌کنند. به طور ویژه، می‌توان گفت سوخت‌های امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات می‌توانند NO_x را نسبت به سوخت دیزل به طور میانگین حدود ۱۵ درصد کاهش دهند. به طور کلی می‌توان گفت کاهش قابل توجهی در انتشار NO_x و دوده موتورهای دیزلی سوخت‌رسانی شده با امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات چارچوب فلزی-آلی مشاهده شده است. نتایج استفاده از سوخت امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات بر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل به طور کامل در مرجع [۳۶] ارائه شده است.

جدول ۷- پارامترهای عملکردی و آلاینده‌های موتور دیزلی مورد استفاده در این تحقیق [۳۶].

Table 7- Performance parameters and exhaust emissions of the investigated diesel engine blends [36].

Sample	Water (%)	Nano (ppm)	Load (%)	Performance		Emissions (g/kW.hr)				
				BSFC (g/kWh)	BTE (%)	CO	CO ₂	UHC	NO _x	Smoke
Diesel	0	0	25	318.6	25.1	7.88	1238.8	1.45	12.23	170.6
Diesel	0	0	50	364.9	23.6	2.50	986.9	0.60	12.77	1012.9
Diesel	0	0	75	353.6	24.4	3.35	964.5	0.48	11.75	1908.7
Diesel	0	0	100	395.5	21.8	12.16	1020.2	0.69	8.45	2767.5
Emulsion fuel	7	0	25	245.4	32.5	8.98	1199.10	1.763	10.14	979.2
Emulsion fuel	7	0	50	260.4	33.1	4.89	987.4	1.11	10.57	1314.5
Emulsion fuel	7	0	75	282.3	30.6	4.99	961.0	0.77	10.26	1986.7
Emulsion fuel	7	0	100	274.5	31.4	13.20	1027.5	0.90	8.56	2326.8
Nano-emulsion 15 ppm	7	15	25	233.7	34.1	11.61	1286.1	1.84	10.30	758.4
Nano-emulsion 15 ppm	7	15	50	261.7	33.0	5.18	1039.8	1.05	10.56	1259.8
Nano-emulsion 15 ppm	7	15	75	248.7	34.7	4.47	970.4	0.59	10.45	1975.6
Nano-emulsion 15 ppm	7	15	100	248.3	34.7	10.02	1010.3	1.00	8.47	2128.6
Nano-emulsion 30 ppm	7	30	25	243.7	32.7	14.35	1395.1	2.27	10.72	236.9
Nano-emulsion 30 ppm	7	30	50	256.4	33.7	4.89	1017.5	1.01	9.82	1420.1
Nano-emulsion 30 ppm	7	30	75	255.8	33.8	4.34	961.1	0.64	9.88	1854.1
Nano-emulsion 30 ppm	7	30	100	261.2	33.0	12.21	1023.1	1.00	8.45	2231.4

مدل‌سازی و بهینه‌سازی توسط ترکیب سامانه استنتاج عصبی-فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای پارامترهای عملکرد و آلایندگی موتور اشتعال تراکمی با استفاده از مخلوط‌های سوخت آماده شده مورد بررسی قرار گرفت. تعداد بهینه توابع عضویت زنگوله‌ای شکل^۱ برای مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازده حرارتی ترمزی، CO ، CO_2 ، UHC، NO_x و دوده به ترتیب ۳، ۴، ۲، ۴، ۴ و ۵ بود. تعداد بهینه توابع عضویت در مدل‌های توسعه‌یافته ANFIS در محدوده ۵-۲ مشاهده شد. کمترین تعداد توابع عضویت برای مدل ANFIS توسعه‌یافته در مدل‌سازی انتشار CO_2 مشاهده شد. در حالی که بیشترین تعداد توابع عضویت برای مدل ANFIS توسعه‌یافته در مدل‌سازی انتشار دوده مشاهده شد. معیارهای آماری عملکرد مدل‌های PSO-ANFIS برای پیش‌بینی مصرف سوخت ویژه، بازده حرارتی ترمزی، CO ، CO_2 ، UHC، NO_x و دوده در جدول (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۸)، به طور کلی، می‌توان گفت مدل‌های توسعه‌یافته PSO-ANFIS می‌توانند پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلایندگی موتور دیزل را به طور دقیق پیش‌بینی کنند. در مدل‌های توسعه‌یافته PSO-

1. Bell-shaped membership

ANFIS بیشترین دقت برای بازده حرارتی ترمزی (BTE)، در حالی که کمترین دقت برای انتشار CO یافت شد. به طور کلی، مقدار R^2 برای همه مدل‌های PSO-ANFIS به اندازه کافی بالا بود در حالی که مقادیر MSE، RMSE و MAPE برای هر دو مرحله آموزش و آزمون جزئی بودند.

جدول ۸- پارامترهای عملکرد آماری معماری منتخب PSO-ANFIS در پیش‌بینی BSFC، BTE، CO، CO₂، UHC، NOx و دوده
Table 8. Statistical performance parameters of the selected PSO-ANFIS architectures in predicting the BSFC, BTE, CO, CO₂, UHC, NOx and Smoke

Parameter		R ²	MSE	RMSE	MAE
BSFC	Training	0.951	5.39×10^{-3}	0.0700	2.70×10^{-2}
	Testing	0.946	5.72×10^{-3}	4.88×10^{-2}	2.84×10^{-2}
BTE	Training	0.983	2.38×10^{-3}	4.82×10^{-2}	2.8×10^{-2}
	Testing	0.998	2.43×10^{-3}	4.02×10^{-2}	2.79×10^{-2}
CO	Training	0.904	2.16×10^{-2}	14.65×10^{-2}	9.25×10^{-2}
	Testing	0.956	2.22×10^{-2}	12.93×10^{-2}	9.29×10^{-2}
CO ₂	Training	0.963	3.8×10^{-3}	5.99×10^{-2}	2.57×10^{-2}
	Testing	0.799	3.99×10^{-3}	4.30×10^{-2}	2.61×10^{-2}
UHC	Training	0.869	1.67×10^{-2}	12.51×10^{-2}	6.01×10^{-2}
	Testing	0.766	1.77×10^{-2}	8.88×10^{-2}	6.38×10^{-2}
NOx	Training	0.852	1.41×10^{-2}	11.78×10^{-2}	5.75×10^{-2}
	Testing	0.954	1.31×10^{-2}	8.33×10^{-2}	5.38×10^{-2}
Smoke	Training	0.971	3.27×10^{-3}	5.65×10^{-2}	2.68×10^{-2}
	Testing	0.960	3.32×10^{-3}	4.56×10^{-2}	2.66×10^{-2}

نمودارهای پراکندگی برای راستی‌آزمایی داده‌های اندازه‌گیری شده (هدف) و داده‌های پیش‌بینی شده (خروجی) به منظور بررسی مدل‌های توسعه یافته انجام شد. قابل ذکر است، شکل (۵) نمودارهای پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده (هدف) و پیش‌بینی شده (خروجی) برای توابع هدف را نشان می‌دهد. بدیهی است، نتایج نشان داد مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS با دقت کافی توابع هدف را پیش‌بینی می‌کند و بین تمامی داده‌های هدف و خروجی مدل‌های توسعه یافته تطابق خوبی وجود دارد. این امر با توزیع یکنواخت مقادیر پیش‌بینی شده در یک خط مستقیم ۴۵ درجه نشان داده شد. با توجه به اینکه مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS، با دقت کافی توابع هدف را پیش‌بینی کردند، بنابراین می‌توان از توابع هدف مدل توسعه یافته به‌طور قابل اعتماد برای پیدا کردن پارامترهای بهینه موتور و ترکیب سوخت با استفاده از الگوریتم MOPSO استفاده کرد.

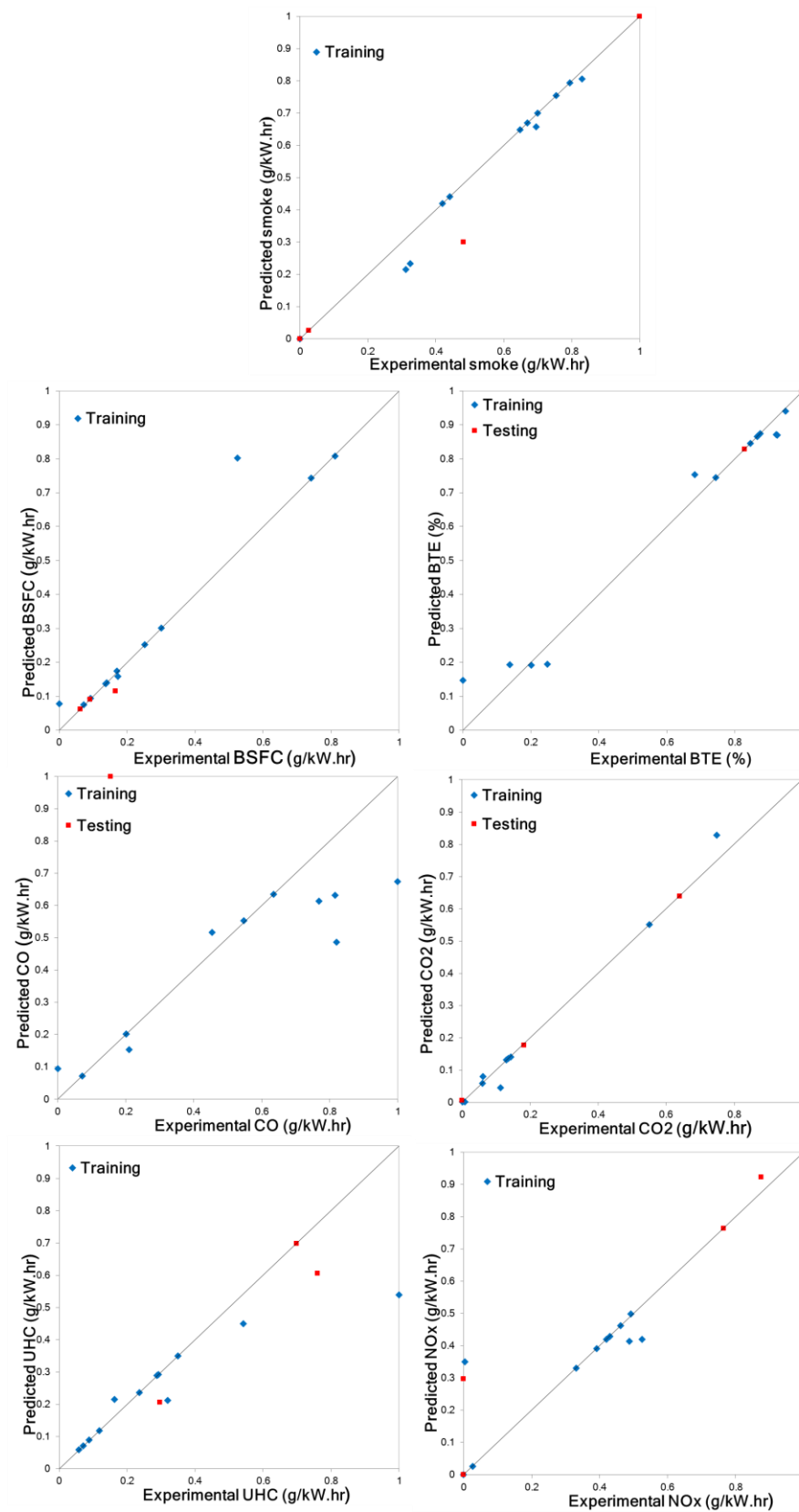


Fig. 5. Scatter plots of the experimental and predicted data for the objective functions

شکل ۵- نمودارهای پراکنندگی داده‌های اندازه‌گیری شده (هدف) و پیش‌بینی شده (خروجی) برای توابع هدف

جدول (۹)، شرایط بهینه پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی موتور دیزل با استفاده از سوخت‌های استفاده شده توسط الگوریتم MOPSO و خروجی‌های مربوطه در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. تمام نقاط داده‌های پیشنهادی را می‌توان به عنوان پارامترهای بهینه موتور و ترکیب سوخت از نظر مقادیر عملکرد و انتشار آلاینده‌ی در نظر گرفت. به طور کلی، ترکیب سوخت و شرایط کاری بهینه موتور، سوخت امولسیون آب-دیزل حاوی ۲۶/۲۷ ppm نانوذره ZIF-8 و ۴/۱۴ درصد وزنی آب تحت بار موتور ۶۰/۱۵ درصد از بار کامل انتخاب شده است. شرایط عملیاتی موتور و ترکیب سوخت به دلیل قابل قبول بودن پارامترهای عملکردی (بالا بودن بازده حرارتی و کم بودن مصرف سوخت ویژه ترمزی) موتور و همچنین مقادیر انتشار آلاینده‌ی قابل قبول (کم بودن پارامترهای آلاینده‌ی موتور) به عنوان شرایط بهینه انتخاب شدند. مقادیر مصرف سوخت ویژه و بازده حرارتی ترمزی با استفاده از مخلوط سوخت انتخاب شده و در شرایط عملیاتی انتخابی نسبت به سوخت دیزل خالص بهتر بود. همچنین مقادیر انتشار NOx و CO₂ کمتر از دیزل بود. علاوه بر این، به‌طور کلی می‌توان گفت انتشار CO، UHC و دوده برای سوخت امولسیون انتخابی تحت بار موتور نسبت به سوخت دیزل خالص مقادیر کمتری را نشان داده است. لازم به ذکر است که شرایط بهینه به دست آمده از ترکیب محاسبات نرم‌افزاری توسعه یافته می‌تواند به صورت تجربی با تقریب بسیار خوب با توجه به دقت بالای مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS محقق شود.

جدول ۹- عملکرد و آلاینده‌ی بهینه موتورهای دیزلی پیشنهاد شده توسط الگوریتم MOPSO و خروجی‌های مربوطه (خط برجسته پارامترهای ورودی بهینه انتخاب شده و متغیرهای خروجی مربوطه را نشان می‌دهد)

Table 9. Optimal performance and emissions of diesel engine proposed by the MOPSO algorithm and their corresponding outputs (The bolded line indicates the selected optimal input parameters and the related output variables)

Water (%)	Nano (ppm)	Load (%)	BSFC (g/kW.hr)	BTE (%)	CO (g/kW.hr)	CO ₂ (g/kW.hr)	UHC (g/kW.hr)	NOx (g/kW.hr)	Smoke (g/kW.hr)
4.057	27.45	58.20	328.89	30.01	4.46	986.81	0.6104	10.59	1146.21
4.23	26.64	56.39	331.33	29.83	4.44	981.05	0.6275	10.56	1108.41
4.36	25.50	59.17	332.88	30.56	4.41	967.32	0.6113	10.32	1202.51
3.48	26.32	61.21	331.49	30.74	6.16	987.89	0.5692	10.53	1274.71
4.14	26.27	60.15	328.33	30.68	4.51	984.96	0.5908	10.54	1214
4.07	28.46	60.83	326.49	30.05	6.20	999.55	0.5944	10.63	1165.21
3.79	27.87	58.57	330.58	30.05	4.43	978.46	0.6131	10.54	1157.07
4.44	26.78	61.54	332.82	30.42	4.42	969.94	0.6056	10.41	1209.8
3.73	28.55	60.40	324.95	30.29	5.40	1000	0.5733	10.66	1212.09
4.24	27.45	65.43	333.21	30.18	4.41	967.07	0.6199	10.42	1171.03

نتیجه گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر، مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی یک موتور دیزل سوخت‌رسانی شده با امولسیون آب-دیزل حاوی نانوذرات ZIF-8 با استفاده از ترکیب سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO-ANFIS) بود. در مدل‌سازی پژوهش حاضر، ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون استفاده شد. نتایج نشان داد تعداد بهینه توابع عضویت زنگوله‌ای شکل برای مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازده حرارتی ترمزی، CO، CO₂، UHC، NOx و دوده به ترتیب ۳، ۴، ۳، ۲، ۴، ۴ و ۵ بوده است. همچنین مشاهده شد، مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS با دقت کافی توابع هدف را پیش‌بینی می‌کند و بین تمامی داده‌های هدف و خروجی مدل‌های توسعه یافته تطابق خوبی وجود دارد. نتایج نشان داد، مدل‌های توسعه یافته PSO-ANFIS می‌تواند پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های انتشار آلاینده‌ی موتور دیزل را با ضریب تبیین بزرگتر از ۰/۷۶۶، میانگین مربعات خطا کمتر از ۰/۰۲۲۲، جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۰/۱۴۶۵ و میانگین خطای مطلق کمتر از ۰/۰۹۲۹، پیش‌بینی کند. همچنین، نتایج بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد و انتشار آلاینده‌ی موتور دیزل با استفاده از الگوریتم MOPSO نشان داد سوخت امولسیون آب-دیزل حاوی ۲۶/۲۷ ppm نانوذره ZIF-8 و ۴/۱۴ درصد وزنی آب تحت بار موتور ۶۰/۱۵ درصد از بار کامل دارای شرایط بهینه است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه تهران برای حمایت از پژوهش حاضر قدردانی بعمل می‌آید.

منابع

1. J. S. Basha and R. B. Anand, "Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using Carbon Nanotubes blended Jatropha Methyl Ester Emulsions," *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 2, pp. 259–273, 2014, doi: 10.1016/j.aej.2014.04.001.
2. A. F. Chen, M.A. Adzmi, A. Adam, M.F. Othman, M.K. Kamaruzzaman, and A.G. Mrwan, "Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide," *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, pp. 461–477, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.06.004.
3. M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, E. Khalife, T. Roodbar Shojaei, and A. Dadak, "Exergoeconomic analysis of a DI diesel engine fueled with diesel/biodiesel (B5) emulsions containing aqueous nano cerium oxide," *Energy*, vol. 149, pp. 967–978, 2018.
4. H. He and Y. Yu, "Selective catalytic reduction of NOx over Ag/Al₂O₃ catalyst: from reaction mechanism to diesel engine test," *Catal. Today*, vol. 100, no. 1–2, pp. 37–47, 2005.
5. M. Zhu, Y. Ma, and D. Zhang, "Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine," *Appl. Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 166–172, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.09.007.
6. B. Mohan *et al.*, "Emulsion fuel with novel nano-organic additives for diesel engine application," *Fuel*, vol. 104, no. September 2016, pp. 726–731, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.04.051.
7. S. Saravanan, G. Nagarajan, and S. Sampath, "Multi response optimization of NOx emission of a stationary diesel engine," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3235–3240, 2010.
8. K. A. Subramanian, "A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 2, pp. 849–857, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.08.010.
9. P. Taylor, J. S. Basha, and R. B. Anand, "An experimental study in a CI engine using nanoadditive blended water–diesel emulsion fuel," *Int. J. green energy*, vol. 8, no. 3, pp. 332–348, 2011, doi: 10.1080/15435075.2011.557844.
10. A. Jhalani, D. Sharma, S. L. Soni, and P. K. Sharma, "Effects of process parameters on performance and emissions of a water-emulsified diesel-fueled compression ignition engine," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1080/15567036.2019.1669739.
11. R. Vigneswaran, K. Annamalai, B. Dhinesh, and R. Krishnamoorthy, "Experimental investigation of unmodified diesel engine performance, combustion and emission with multipurpose additive along with water-in-diesel emulsion fuel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 172, no. April, pp. 370–380, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.039.
12. A. Sartomo, B. Santoso, and O. Muraza, "Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 213, no. February, p. 112817, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112817.
13. H. Hosseinzadeh-Bandbafha, E. Khalife, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, M. Khanali, P. Mohammadi, T.R. Shojaei, and S. Soltanian, "Effects of aqueous carbon nanoparticles as a novel nanoadditive in water-emulsified diesel/biodiesel blends on performance and emissions parameters of a diesel engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1153–1166, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.077.
14. E. Khalife, M. Tabatabaei, A. Demirbas, and M. Aghbashlo, "Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 59, pp. 32–78, 2017.
15. V. D. Raju, P. S. Kishore, K. Nanthagopal, and B. Ashok, "An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 164, no. November 2017, pp. 655–666, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.032.
16. M. B. Shafii, F. Daneshvar, N. al Jahani, and K. Mobini, "Effect of ferrofluid on the performance and emission patterns of a four-stroke diesel engine," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 3, p. 529049, 2011, doi: 10.1155/2011/529049.
17. K. Fangsuwannarak and K. Triratanasirichai, "Effect of metalloid compound and bio-solution additives on biodiesel engine performance and exhaust emissions," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, p. 1201, 2013, doi: 10.3844/ajassp.2013.1201.1213.
18. S. Gumus, H. Ozcan, M. Ozbey, and B. Topaloglu, "Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine," *Fuel*, vol. 163, pp. 80–87, 2016.
19. J. S. Basha and R. B. Anand, "An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water-diesel emulsion fuel," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 225, no. 3, pp. 279–288, 2011.
20. V. A. M. Selvan, R. B. Anand, and M. Udayakumar, "Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine," *Fuel*, vol. 130, pp. 160–167, 2014.
21. J. S. Basha and R. B. Anand, "The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 35, no. 3, pp. 257–264, 2013.
22. A. I. El-seesy and H. Hassan, "Investigation of the effect of adding graphene oxide, graphene nanoplatelet, and

- multiwalled carbon nanotube additives with n-butanol-Jatropha methyl ester on a diesel engine performance,” *Renew. energy*, vol. 132, pp. 558–574, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.026.
23. M. Mirzajanzadeh *et al.*, “A novel soluble nano-catalysts in diesel-biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions,” *Fuel*, vol. 139, pp. 374–382, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.008.
 24. J. Lee and I. Mudawar, “Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 3–4, pp. 452–463, 2007.
 25. M. N. Pantzali, A. G. Kanaris, K. D. Antoniadis, A. A. Mouza, and S. V Paras, “Effect of nanofluids on the performance of a miniature plate heat exchanger with modulated surface,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 30, no. 4, pp. 691–699, 2009.
 26. A. Keskin, M. Gürü, and D. Altıparmak, “Influence of metallic based fuel additives on performance and exhaust emissions of diesel engine,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 60–65, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.039.
 27. M. E. M. Soudagar, N.-N. Nik-Ghazali, M. A. Kalam, I. A. Badruddin, N. R. Banapurmath, and N. Akram, “The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: A comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 178, pp. 146–177, 2018.
 28. W. Xie and F. Wan, “Immobilization of polyoxometalate-based sulfonated ionic liquids on UiO-66-2COOH metal-organic frameworks for biodiesel production via one-pot transesterification-esterification of acidic vegetable oils,” *Chem. Eng. J.*, vol. 365, pp. 40–50, 2019.
 29. C.Y. Sun, C. Qin, X.L. Wang, G.S. Yang, K.Z. Shao, Y.Q. Lan, Z.M. Su, P. Huang, C.G. Wang, and E.B. Wang, “Zeolitic imidazolate framework-8 as efficient pH-sensitive drug delivery vehicle,” *Dalt. Trans.*, vol. 41, no. 23, pp. 6906–6909, 2012, doi: 10.1039/c2dt30357d.
 30. K. Zhou, B. Mousavi, Z. Luo, S. Phatanasri, S. Chaemchuen, and F. Verpoort, Verpoort *et al.*, “Characterization and properties of Zn/Co zeolitic imidazolate frameworks vs. ZIF-8 and ZIF-67,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 3, pp. 952–957, 2017, doi: 10.1039/C6TA07860E.
 31. T. A. Vahed, M. R. Naimi-Jamal, and L. Panahi, “Alginate-coated ZIF-8 metal-organic framework as a green and bioactive platform for controlled drug release,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 49, no. September 2018, pp. 570–576, 2019, doi: 10.1016/j.jddst.2018.12.022.
 32. E. E. Sann, Y. Pan, Z. Gao, S. Zhan, and F. Xia, “Highly hydrophobic ZIF-8 particles and application for oil-water separation,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 206, no. December 2017, pp. 186–191, 2018, doi: 10.1016/j.seppur.2018.04.027.
 33. Y. Li, B. Zou, A. Xiao, and H. Zhang, “Advances of Metal- Organic Frameworks in Energy and Environmental Applications,” *Chinese J. Chem.*, vol. 35, no. 10, pp. 1501–1511, 2017, doi: 10.1002/cjoc.201700151.
 34. Q. Shi, Z. Chen, Z. Song, J. Li, and J. Dong, “Synthesis of ZIF- 8 and ZIF- 67 by steam- assisted conversion and an investigation of their tribological behaviors,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 50, no. 3, pp. 672–675, 2011.
 35. Y. Pan, Y. Liu, G. Zeng, L. Zhao, and Z. Lai, “Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system,” *Chem. Commun.*, vol. 47, no. 7, pp. 2071–2073, 2011, doi: 10.1039/c0cc05002d.
 36. S. H. Hosseini, H. Rastegari, M. Aghbashlo, A. Hajiahmad, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, P. Mohammadi, ... and M. Tabatabaei, “Effects of metal-organic framework nanoparticles on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine,” *Energy*, vol. 260, p. 125070, 2022.
 37. L. Saravanakumar and R. Prakash, “Validation of performance and emissions of a CI engine fueled with calophyllum inophyllum methyl esters using soft computing technique,” *Fuel*, vol. 266, no. December 2019, p. 117070, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117070.
 38. Singh. NK, Singh. Y, Sharma. A, and Abd Rahim. E, “Prediction of performance and emission parameters of Kusum biodiesel based diesel engine using neuro-fuzzy techniques combined with genetic algorithm,” *Fuel*, vol. 280, no. July, p. 118629, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118629.
 39. M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, M. Hossein, M. H. Nadian, V. Davoodnia, and S. Soltanian, “Prognostication of lignocellulosic biomass pyrolysis behavior using ANFIS model tuned by PSO algorithm,” *Fuel*, vol. 253, no. December 2018, pp. 189–198, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.169.
 40. M. Suleymani and A. Bemani, “Application of ANFIS-PSO algorithm as a novel method for estimation of higher heating value of biomass,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 40, no. 3, pp. 288–293, 2018, doi: 10.1080/15567036.2017.1413453.
 41. P. Atarod *et al.*, “Soft computing-based modeling and emission control/reduction of a diesel engine fueled with carbon nanoparticle-dosed water/diesel emulsion fuel,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 407, p. 124369, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124369.
 42. M. Hosoz. M, Ertunc. H. M, Karabektas. M, and Ergen. G, “ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 60, no. 1–2, pp. 24–32, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.06.040.
 43. N. Kumar *et al.*, “Diesel engine performance and emission analysis running on jojoba biodiesel using intelligent hybrid prediction techniques,” *Fuel*, vol. 279, no. April, p. 118571, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118571.
 44. A. International, “Standard Test Method for Determination of Ignition Delay and Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils by Combustion in a Constant Volume Chamber,” 2008.
 45. Roy. S, Das. A. K, Bhadouria. V. S, Mallik. S. R, Banerjee. R, and Bose. P. K, "Adaptive-neuro fuzzy inference system (ANFIS) based prediction of performance and emission parameters of a CRDI assisted diesel engine under CNG dual-fuel operation." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. pp. 274-283, 2015.

46. J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*, Springer, 2011, pp. 760–766.
47. M. Azadbakht, M. V. Torshizi, and A. Ziaratban, "Application of Artificial Neural Network (ANN) in predicting mechanical properties of canola stem under shear loading," *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 18, no. 5, pp. 413–424, 2016.
48. M. Y. B. Khoshnevisan, Sh. Rafiee, M. Omid, "Prediction of environmental indices of Iran wheat production using artificial neural networks," *Int. J. Energy Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 339–348, 2013.
49. M. Azadbakht, H. Aghili, A. Ziaratban, and M. Vehedi Torshizi, "Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes," *Energy*, vol. 120, pp. 947–958, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.006.

English Abstract

Modeling and optimization of performance and emissions of a diesel engine fueled with water-diesel emulsions containing metal-organic nanoparticles by machine learning

Seyyed Hassan Hosseini¹, Mortaza Aghbashlo^{2*}, Meisam Tabatabaei³, Ali Hajiahmad⁴, Alireza Khataee⁵, Mohammad Hossein Nadian⁶

- 1- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Hosseini.70@ut.ac.ir
- 2- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, maghbashlo@ut.ac.ir
- 3- Microbial Biotechnology Department, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, meisam.tabatabaei@umt.edu.my
- 4- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, hajiahmad@ut.ac.ir
- 5- Research Laboratory of Advanced Water and Wastewater Treatment Processes, Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, 51666-16471 Tabriz, Iran, ar_khataee@yahoo.com
- 6- Brain Engineering Research Center, Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), P.O. Box 19395-5531, Tehran, Iran, fmnh11510@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2022/08/17, Received in revised form: 2022/10/18, Accepted: 2022/10/21)

The present study aimed to model and optimize the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with water-diesel emulsions containing metal-organic framework nanoparticles using a combination of adaptive neural-fuzzy inference system with optimal algorithm particle swarm generation (PSO-ANFIS). The multi-purpose particle swarm algorithm (MOPSO) was used to optimize engine performance and fuel composition. Water inclusion rate, engine load, and metal-organic framework nanoparticle concentration were considered as input parameters of the model. Brake specific fuel consumption, brake thermal efficiency, CO, CO₂, UHC, NO_x, and smoke were considered as model outputs. Sixteen experimental data were used in modeling and optimization processes. The results showed that the developed PSO-ANFIS models could accurately predict the objective functions. There was a good agreement between all the target data and the output of the developed models. According to the optimization results, water-diesel emulsion fuel containing 26.27 ppm metal-organic framework nanoparticles and 4.14 wt% water under engine load 60.15% of the full-load operating level was found to be optimal conditions.

Keywords: Water/diesel emulsion, Metal-organic framework nanoparticles, Adaptive neuro-fuzzy inference system, Particle swarm optimization algorithm.