



بررسی و شبیه‌سازی احتراق ناقص در موتورهای احتراق سرد با شبکه فازی - عصبی

هوشنگ کاویانی^۱، بهرام بحری^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی خودرو، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران، Kavianihoushang@gmail.com

^۲ مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و آلودگی، گروه مهندسی خودرو، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران، Bahri@iaush.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۸ دی ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

موتور احتراق تراکمی مخلوط همگن

اتانول

احتراق ناقص

شبکه فازی - عصبی

چکیده

موتورهای احتراق تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول به عنوان یک سوخت تجدید پذیر، راه حل امیدوار کننده برای مقابله با برخی از چالش‌های عمده موتورهای احتراقی است. احتراق ناقص یا نادرست عملکرد این موتورها را محدود کرده و به سامانه‌های پس پالایش و دود آسیب رسانده و سبب افزایش آلودگی در خودرو می‌شود. در این تحقیق داده‌های تجربی یک موتور ۰٫۳ لیتری احتراق تراکمی مخلوط همگن برای شبیه‌سازی و تحلیل احتراق ناقص استفاده شده استفاده شده است. نتایج نشان داد که بین احتراق ناقص و تغییرات فشار استوانه در ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ زاویه میل لنگ ارتباط معنی داری وجود دارد. این یافته‌های تجربی برای طراحی یک شبکه فازی-عصبی برای تشخیص احتراق ناقص در موتور احتراق تراکمی مخلوط همگن استفاده شد. نتایج ارزیابی دقت شبیه‌سازی فازی-عصبی بدست آمده با استفاده از داده‌هایی آزمایشگاهی نشان داد، که همبستگی بسیار مناسبی ($R^2 = 0.98$) بین داده‌های پیش بینی شده شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد که بیانگر دقت قابل قبول شبیه‌سازی فازی-عصبی برای تشخیص احتراق ناقص انتخاب شده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

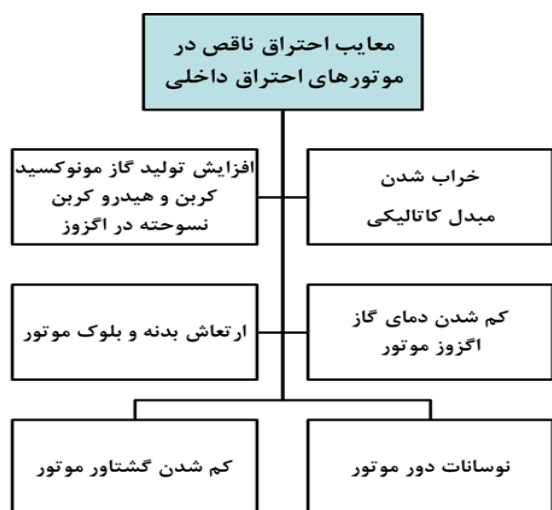
۱- مقدمه

از دیگر معایب احتراق ناقص می‌توان به افزایش تولید گاز مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته در دود خودروها اشاره کرد. همچنین در صورت احتراق ناقص در موتور بدنه استوانه و بدنه موتور دچار لرزش شده و این لرزش اثرات زیانباری برای موتور دارد که منجر به کاهش گشتاور موتور و نوسانات دور موتور می‌شود.

احتراق ناقص ناگهانی باعث کاهش سرعت موتور به علت کمبود گشتاور و ایجاد تغییر در سرعت موتور می‌شود. احتراق ناقص عاملی است که باعث محدود شدن عملیات احتراق کامل سوخت در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن می‌شود [۶].

جهت جلوگیری از آسیب دیدن و اطمینان از عملکرد پایدار موتور، احتراق ناقص، بایستی سریعاً تشخیص داده شود. ضربه در موتور می‌تواند با استفاده از حسگر ضربه به طور معمول در یک موتور قابل دسترسی و تشخیص باشد، اما هنوز یک حسگر مستقیم برای تشخیص احتراق ناقص در موتور احتراق تراکمی مخلوط همگن تولید نشده است [۷].

معایب احتراق ناقص در موتورهای احتراق داخلی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: معایب احتراق ناقص در موتورهای احتراق داخلی

تشخیص احتراق ناقص، موضوع بسیار مهمی در موتورهای احتراق داخلی است و بسیاری از محققان برای ایجاد پنکه آوری مناسب برای تشخیص احتراق ناقص تلاش کرده‌اند. تشخیص احتراق ناقص برای نظارت بر کارکرد موتورهای احتراق داخلی ضروری است برای جلوگیری از آسیب زدن به سامانه‌های پس پالایش بعد دود و اطمینان از خروجی گشتاور موتور مناسب است. محققان متعددی جهت ایجاد سامانه‌های تشخیص احتراق ناقص فعالیت کرده‌اند.

سال‌هاست که آلودگی کلان شهرها به یک مسئله سخت تبدیل شده است. با توجه به افزایش آلودگی‌های تولید شده توسط موتورهای احتراق داخلی، جهت کاهش انتشار آلودگی‌ها و بهبود کارایی این موتورها، لزوم جایگزینی و استفاده از موتورهای جدید احساس می‌شود. مفهوم احتراق کم دما پایه گذار بسیاری از پیشرفت‌ها در توسعه موتورهای احتراق داخلی برای برقراری استاندارد زیست محیطی است [۱].

موتورهای احتراق تراکمی داخلی^۱ پیشرفته در صنعت، باید بتواند تقاضای افزایش جهت کاهش انتشار آلودگی و بهبود بازده تبدیل سوخت را پاسخ دهد. موتورهای احتراق تراکمی مخلوط همگن^۲ در مقایسه با موتورهای احتراق جرقه‌ای^۳ و احتراق تراکمی^۴ دارای راهبرد احتراق مؤثرتر، بازده حرارتی بالاتر و ذرات معلق خروجی از موتور کمتر بوده و تولید گاز اکسید نیتروژن کمتری را نشان می‌دهند [۲].

موتورهای احتراق سرد از جمله موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، یک فناوری جدید بوده که با کاهش دمای احتراق آلودگی‌های ناشی از احتراق دما بالا نظیر اکسیدهای نیتروژن و دوده را کاهش می‌دهند [۳].

در مقابل با مزایایی موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن، تعدادی از محدودیت‌های مهم این موتورها نیز بایستی یادآوری شود. برخی از این محدودیت‌ها شامل محدوده‌ی عملکرد کوچک بین دو منطقه احتراق صدادار^۵ و احتراق ناقص^۶، تولید سطوح بالای از مونوکسید کربن، تولید هیدروکربن نسوخته و قابلیت مهار احتراق موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن‌اند. احتراق ناقص و صدادار دو عامل است که مانع از کارکرد مناسب موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول می‌شوند [۴].

برای جلوگیری از احتراق ناقص بایستی در اسرع وقت این نوع احتراق تشخیص داده شده تا باعث عدم آسیب دیدن قطعات موتور و ادامه عملکرد پایدار موتور گردد. در حال حاضر حسگر مستقیمی که احتراق ناقص را در یک موتور احتراق سرد تشخیص دهد، تولید نشده است. احتراق ناقص، احتراق گم شده یا ناقص، احتراق بسیار نامنظم و ایجاد آلودگی در موتور به دلیل عدم احتراق کامل در موتور، به علت تأخیر در فاز احتراق است و احتراق ناپایدار می‌تواند منجر به تولید آلودگی مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته بالا گردد [۵].

سوخت محترق نشده بوسیله گاز خروجی از موتور وارد مبدل واکنشگری می‌شود و این می‌تواند اثر خنک کننده بر روی واکنشگر داشته باشد. در صورتی که دمای واکنشگر زیر دمای کارکرد مؤثر قرار گیرد، مبدل واکنشگری در کاهش آلودگی دود ناکارآمد می‌شود.

^۱ Compression ignition (CI) engine

^۵ Ringing combustion

^۶ Misfire combustion

^۱ Internal combustion engine (ICE)

^۲ Homogenous charge compression ignition (HCCI)

^۳ Spark ignition (SI) engine

۲- تاریخچه روش‌های تشخیص احتراق ناقص در موتورهای احتراق داخلی

احتراق ناقص در یکی از استوانه‌های موتور احتراقی سبب عدم وجود گشتاور مثبت در میل‌لنگ در طول یک چرخه کاری موتور احتراقی و ایجاد نوسان در سرعت موتور می‌شود. ریزونی با استفاده از حسگر موقعیت میل‌لنگ و نوسانات سرعت حرکت میل‌لنگ توانست احتراق ناقص را تشخیص دهد. حسگر دور موتور و حسگر سرعت القایی برای شناسایی تغییرات جزئی در سرعت زاویه‌ای متغیر ناشی از احتراق ناقص استفاده شدند. این روش جهت تشخیص احتراق ناقص و اندازه‌گیری تغییرات سرعت زاویه‌ای در سرعت‌های بالاتر با چالش مواجه گردید [۸].

کای و کالینگس یک حسگر اکسیداسیون در مبدل واکنشگری برای تولید یک سامانه جهت تشخیص عملکرد عملیاتی مبدل واکنشگری موتور و جلوگیری از احتراق ناقص در موتور تولید کردند. احتراق ناقص مصنوعی بوسیله قطع کردن ولتاژ شمع جرقه زن در یکی از چهار استوانه برای یک چرخه کامل تولید شد. حسگر دمای ناگهانی دمای گاز خروجی را در هنگام اشتعال تشخیص می‌داد و بر اساس آن احتراق ناقص تشخیص داده می‌شد [۹].

سولیوان و همکاران دما و مقدار گازهای آلاینده در مبدل واکنشگری را در هنگام خروج از موتور پس از اشتعال ناشی از اشتعال ناقص اندازه‌گیری می‌کردند. آنها نشان دادند که در طول رویداد احتراق ناقص، غلظت اکسیژن در چندراهه دود بالا رفته، بنابراین غلظت اکسیژن راه دیگری برای تشخیص احتراق ناقص است. تغییر در مقدار غلظت اکسیژن با استفاده از حسگر اکسیژن در چندراهه خروجی در زمان احتراق ناقص اندازه‌گیری می‌شد [۱۰].

چونگ و همکاران نشان دادند که در هنگام احتراق ناقص، فشار چندراهه خروجی از حد غیرمعمول کاهش می‌یابد و به صورت دوره‌ای در هنگام احتراق ناقص در یک استوانه مشخص تغییر می‌کند. احتراق ناقص نیز با اندازه‌گیری دامنه نوسانات علامت فشار چندراهه تشخیص داده شد. اما این روش در سرعت‌های تندتر میل‌لنگ که مجموع گشتاورهای تولید شده توسط چهار استوانه در طی چرخش ایجاد می‌شد، محدود بود [۱۱].

چانگ و همکاران برای تشخیص احتراق ناقص از یک حسگر پیزوالکتریک محوری استفاده کردند که اطلاعات این حسگر تحریک می‌شد و طول موج علامت‌های ارتعاش بدنه تبدیل به اطلاعات قابل اندازه‌گیری می‌گردید. لازم به ذکر است که استفاده از حسگر ارتعاش بدنه موتور برای تشخیص احتراق ناقص دارای عدم حساسیت مناسب در هنگام احتراق ناقص در موتورهای احتراق داخلی بود به همین علت نیاز به زمان محاسبه را افزایش می‌داد و باعث می‌شد که برای تشخیص احتراق ناقص مفید نباشد [۱۲].

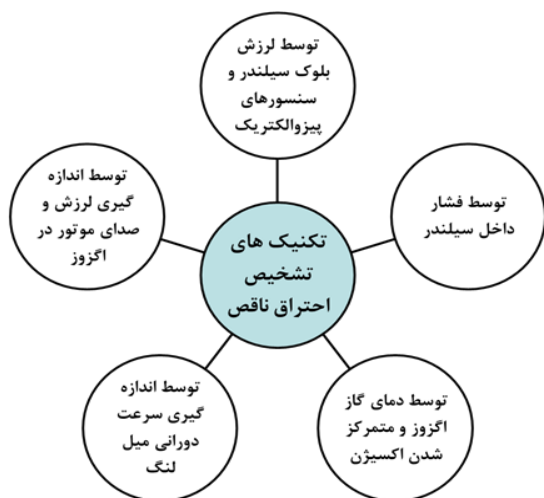
در یک موتور اشتعال جرقه‌ای، از آنجایی که شمع جرقه در داخل محفظه

احتراق قرار دارد، می‌تواند به عنوان یک سامانه تشخیص احتراق ناقص و به عنوان دستگاه سنجش استفاده شود. احتراق ناقص می‌تواند بسته به غلظت یون موجود در شکاف الکترود شناسایی شود. حضور جریان یونیزه کردن، احتراق موفقیت آمیز را نشان می‌دهد در حالی که عدم وجود جریان یونیزه کردن نشان دهنده عدم احتراق کامل است. این روش توسط یوشیمورا و همکاران مورد استفاده قرار گرفت [۱۳].

مرکیز و بوگو از روش اندازه‌گیری ویسکواکوستیک یا صدای دود موتور به منظور شبیه‌سازی روش‌های غیر خطی برای تشخیص احتراق ناقص در موتورهای لوکوموتیو استفاده کردند. این روش با توجه به نیاز ورودی چند حسگر، ساختار محاسباتی پیچیده و یکپارچه‌سازی سامانه برای استفاده دارای چالش بود [۱۴]. یکی دیگر از روش‌های مناسب برای تشخیص احتراق ناقص استفاده از فشار داخل استوانه است. فشار داخل استوانه یک متغیر مؤثر برای تشخیص احتراق ناقص است [۱۵].

مشکل در احتراق باعث می‌شود موتورها مانند حالت بدون سوخت و احتراق کامل حرکت کنند که در این صورت فشار متوسط مؤثر درست منفی می‌شود و این فشار می‌تواند در حین حرکت جهت تشخیص احتراق ناقص محاسبه شود. در این تحقیق از اطلاعات حسگر فشار جهت تشخیص احتراق ناقص استفاده شده است.

شکل ۲ روش‌های استفاده شده برای تشخیص احتراق ناقص در موتورهای اشتعال تراکمی و اشتعال جرقه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲: روش‌های تشخیص احتراق ناقص در موتورهای احتراق داخلی

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک موتور دیزل تک-استوانه، هوا-خنک، پاشش مستقیم، چهار-زمانه یانمار به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول تبدیل شده است که اطلاعات موتور یانمار استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۳ شمای تمام اجزا آزمون و راه اندازی موتور نشان داده شده است. سرعت موتور و بار توسط یک دینامومتر مجهز به ترمز جریان گردابی Magtrol ۳۰ کیلووات تنظیم می‌شود.

در مجموع، داده‌های موتور برای ۱۲۰ چرخه متوالی جمع‌آوری شده و در هر نقطه از عملکرد ثابت، تحلیل می‌شود.

۴- شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی توسط شبکه فازی-عصبی

با بکارگیری ۷۰ درصد از داده‌های موجود و با انجام آزمون و خطاهای مختلف و ترکیب متفاوت از توابع عضویت و تعداد متفاوت این توابع، سامانه شبکه عصبی-فازی با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ به عنوان شبکه بهینه برای بدست آوردن تغییرات فشار متوسط مؤثر درست انتخاب گردید. به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی بهینه بدست آمده، با استفاده از ۳۰ درصد از داده‌هایی که در مرحله آموزش و انتخاب سامانه بهینه شرکت داده نشده بودند، ارزیابی گردید. بر اساس جدول ۲ مقدار همبستگی نتایج پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی همبستگی بسیار مناسبی را نشان داد که بیانگر دقت قابل قبول شبیه‌سازی فازی-عصبی انتخاب شده است.

جدول ۲: سامانه شبکه فازی-عصبی بهینه برای ارزیابی مقادیر تغییرات فشار متوسط مؤثر درست

نوع تابع عضویت	تعداد توابع عضویت	R2	MSE
تابع عضویت گوسی	۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰	۰,۹۸	۰,۰۴۲

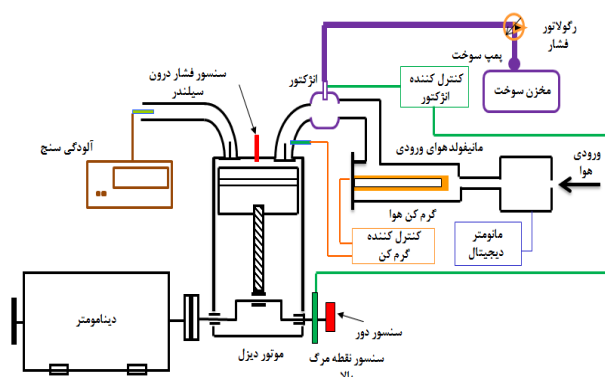
ارزیابی همبستگی مقادیر آزمایشگاهی تغییرات فشار متوسط مؤثر درست با مقادیر پیش‌بینی شده توسط سامانه بهینه انتخاب شده با داده‌های شرکت داده نشده در مرحله آموزش، ساختارهای نهایی شبیه‌سازی‌های بهینه استنتاج فازی عصبی تطبیقی مهار شد. در جدول ۳ نیز اطلاعات کامل شامل تعداد توابع عضویت برای هر ورودی، تعداد قوانین، تعداد دوره‌های آموزش و نوع توابع عضویت ورودی و خروجی و جزئیات کامل دیگر نشان داده شده است.

جدول ۳: متغیرهای شبیه‌سازی‌های انقیس بهینه‌ی انتخاب شده

متغیرها	مقدار متغیرها
تعداد توابع عضویت برای ورودی P0	۱۰
تعداد توابع عضویت برای ورودی P5	۱۰
تعداد توابع عضویت برای ورودی P10	۱۰
تعداد توابع عضویت برای ورودی P15	۱۰
تعداد توابع عضویت برای ورودی P20	۱۰
نوع توابع عضویت ورودی‌ها	گوسی
تعداد قوانین	۱۰
نوع تابع عضویت فشار متوسط مؤثر درست	خطی
روش غیرفازی سازی	Wtaver
روش اجتماع خروجی	Sum
تعداد گره	۱۵۸

جدول ۱: مشخصات موتور یانمار استفاده شده در آزمایش‌ها

مقدار	مشخصه‌های موتور (واحد)
۱	تعداد استوانه (-)
۱۹,۵	نسبت تراکم (-)
۷۸	قطر استوانه (میلیمتر)
۶۲	پیمایش سمبه (میلیمتر)
۰,۲۵۶	حجم جابجایی (لیتر)
۲	تعداد دریچه (-)
۱۵۵	زمان باز شدن دریچه هوا (CAD aBDC)
۵۹	زمان بسته شدن دریچه هوا (CAD aBDC)
-۵۹	زمان باز شدن دریچه دود (CAD aBDC)
-۱۵۵	زمان بسته شدن دریچه دود (CAD aBDC)

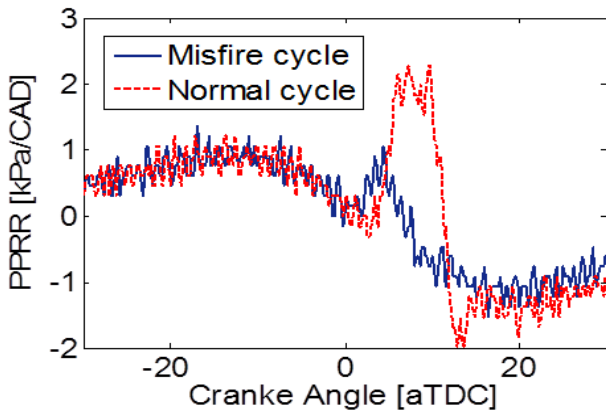


شکل ۳: تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده برای جمع‌آوری داده‌ها در موتور [۷].

در گذرگاه ورودی هوای موتور، یک افشانه سوخت اتانول به صورت درگاهی استفاده شده است. یک گرم‌کننده برقی سه کیلو واتی برای تسهیل گرم کردن هوای ورودی استفاده شده است به نحوی که برای هر آزمایش، دمای هوای ورودی ثابت نگه داشته می‌شود. ثبت داده‌ها با یک سامانه جمع‌آوری داده به نام DEWE-5000 و نرم‌افزار تحلیل احتراق DEWEca انجام می‌شود. در بستر موتور دیزل، یک حسگر فشار با بسامد ۶۰۱۰ (Kistler 601A) تعبیه شده تا فشار درون استوانه را با زاویه میل‌لنگ ۰,۲ درجه اندازه‌گیری و ثبت نماید. مقدار زاویه میل‌لنگ به وسیله حسگر زاویه میل‌لنگ (Kistler 2613B) که به میل‌لنگ متصل شده است، اندازه‌گیری می‌شود. دماسنج‌های نوع K با دقت $\pm 1,5$ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی و دود موتور استفاده شده است. دمای بدنه استوانه موتور با استفاده از یک پنکه خنک‌کننده مهار می‌شود. مصرف هوای موتور توسط یک مخزن هوای نسبتاً بزرگ، یک اریفیس و مانومتر عددی اندازه‌گیری می‌شود.

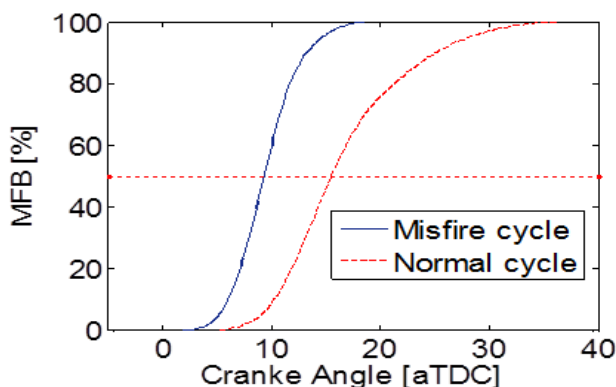
اندازه‌گیری مقدار آلودگی گازهای خارج شده از دود با یک آلودگی سنج پنج‌گازی قابل حمل انجام شده که هیدروکربن نسوخته و کربن مونوکسید را با دقت ۴ و ۰,۰۶٪ به ترتیب، اندازه‌گیری می‌کند.

نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت یک احتراق کامل و یک احتراق ناقص توسط نرخ افزایش فشار بیشینه استوانه (مشتق فشار استوانه بر اساس زاویه میل‌لنگ) بخوبی بیانگر شرایط کارکردی دو ناحیه است. جهت دو چرخه احتراق ناقص و احتراق کامل همان طور که مشاهده می‌شود نزدیک نقطه مکث بالا احتراق ناقص است نوسان زیاد ندارد که نشان دهنده نبود افزایش زیاد به علت ضعیف بودن احتراق است. در شرایط احتراق کامل، نوسان افزایش پیدا کرده و به مقدار ۲ kPa/CAD می‌رسد. در احتراق کامل افزایش فشار مشهود است که بخوبی توسط نرخ افزایش فشار بیشینه استوانه نشان داده شده است.



شکل ۶: نمودار نرخ افزایش فشار بیشینه استوانه در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل و احتراق ناقص

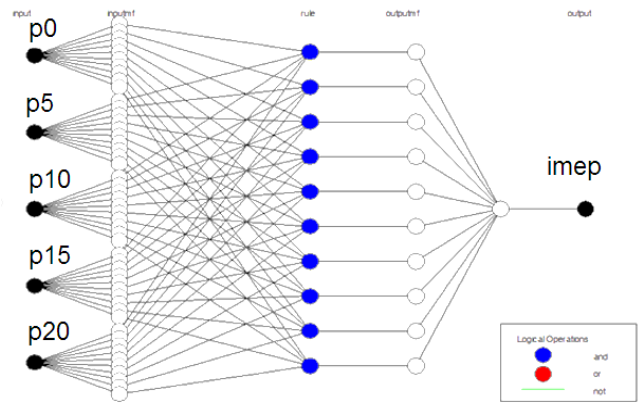
شکل ۷ نمودار نرخ کسر جرم سوخته در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل و احتراق ناقص نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در یک چرخه احتراق ناقص، احتراق بسیار سریع رخ داده که نشان کمی مقدار سوخت و یا عدم احتراق مناسب سوخت است. در منحنی کسر جرم سوخته احتراق کامل احتراق طولانی‌تر بوده و شروع و خاتمه احتراق در زوایای میل‌لنگ بزرگتر رخ خواهند داد.



شکل ۷: نمودار نرخ کسر جرم سوخته در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل و احتراق ناقص

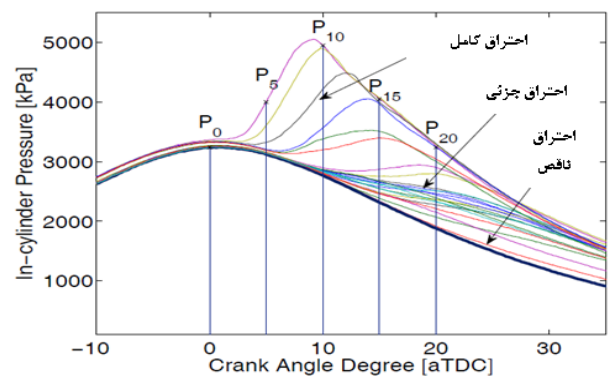
شکل ۸ نرخ آزاد سازی انرژی بیشینه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص نشان داده

ساختار شبیه‌سازی بهینه پیش بینی فشار متوسط مؤثر درست با استفاده از ورودی‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار شبیه‌سازی بهینه پیش بینی فشار متوسط مؤثر درست

برای معرفی ورودی‌های شبیه‌سازی فازی-عصبی در شکل ۵ فشار استوانه در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص نشان داده شده است. پنج نقطه از فشار استوانه را به عنوان ورودی شبیه‌سازی در نظر گرفته شده، که فشار استوانه در زاویه‌های مختلف است که با علائم P0-P5-P10-P15-P20 نشان داده شده‌اند. نقطه P0 به عنوان فشار استوانه در ۰ درجه یا نقطه مکث بالا، P5 به عنوان فشار استوانه در ۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا، P10، P15، و P20 به ترتیب با فشار استوانه در ۱۰ درجه، ۱۵ درجه و ۲۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا برابر‌اند. این مقادیر فشار در محدوده منطقه احتراق ناقص‌اند که در آن منطقه فشار استوانه تغییرات زیادی را دارا است.

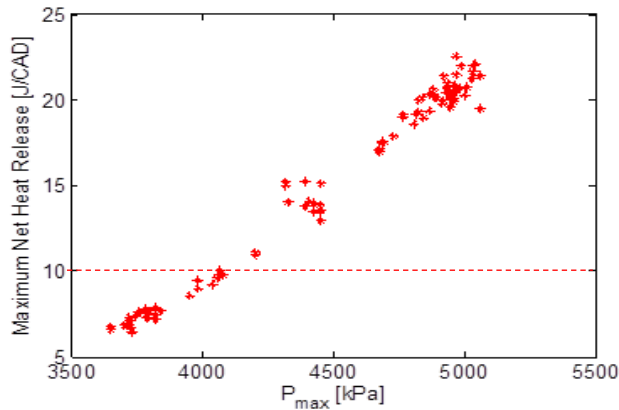


شکل ۵: نمودار فشار استوانه در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص

۵- بحث و نتایج

در این بخش ابتدا متغیرهای موتور در شرایط احتراق کامل و ناقص بیان شده است و در ادامه شبیه‌سازی جهت تشخیص احتراق ناقص شرح داده شده است. نمودار شکل ۶ نرخ افزایش فشار بیشینه استوانه در مقابل زاویه میل‌لنگ در حالت‌های احتراق کامل و احتراق ناقص

نمودار فشار بیشینه استوانه در مقابل بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده نقاط با فشار بیشینه بیشتر دارای مقادیر بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی بیشتری بوده و در نقاط دارای احتراق ناقص مقدار آن کمتر است.



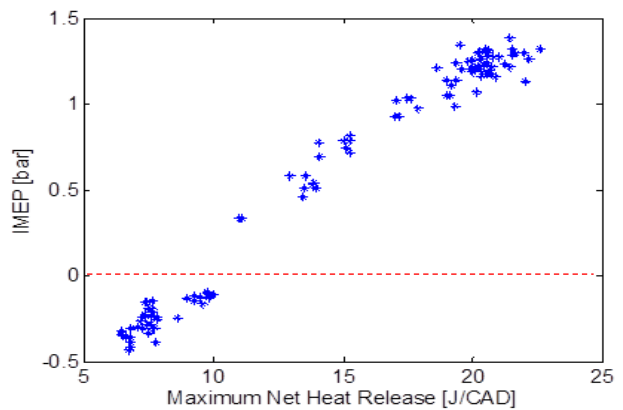
شکل ۱۰: نمودار فشار بیشینه استوانه در مقابل بیشینه نرخ آزاد سازی انرژی در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص

۱-۵- نتایج شبیه‌سازی احتراق ناقص توسط انفیس

شکل ۱۱ مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های آموزش شبکه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های آموزش نشان می‌دهد که روند تغییرات بخوبی توسط شبیه‌سازی فازی-عصبی قابل تشخیص بوده و نقاط دارای احتراق کامل و احتراق ناقص بخوبی تشخیص داده شده اند. در زیر نقطه چین نمودار شبیه‌سازی مربوط به نقاط دارای احتراق ناقص در شبیه‌سازی است و در بالای نقطه چین نقاط دارای احتراق کامل نشان داده شده است. نمودار خطا و منحنی تطابق هیست نشان می‌دهد که مقدار خطا در نزدیکی صفر بیشتر است.

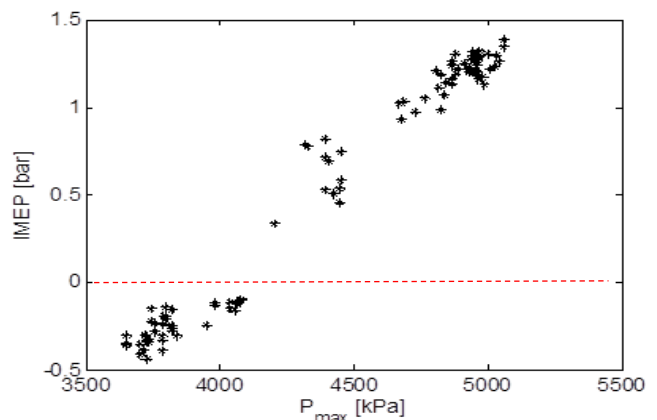
شکل ۱۲ مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های آزمون شبکه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های آزمون نشان می‌دهد که روند تغییرات بخوبی توسط شبیه‌سازی فازی-عصبی قابل تشخیص بوده و نقاط دارای احتراق کامل و احتراق ناقص بخوبی قابل تشخیص اند. در زیر نقطه چین نمودار شبیه‌سازی به نقاط که دارای احتراق ناقص در شبیه‌سازی اند و در بالای نقطه چین نقاط دارای احتراق کامل نشان داده شده است. نمودار خطا و منحنی هیست فیت نشان می‌دهد که مقدار خطا در نزدیکی صفر بیشتر است.

شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در فشارهای متوسط مؤثر درست منفی که نقاط عملکردی در زیر خط چین اند، احتراق ناقص اتفاق افتاده و نقاط بالای خط چین که دارای فشار متوسط مؤثر درست بالای صفر اند دارای احتراق جزئی و احتراق کامل اند. نقاط دارای نرخ آزاد سازی انرژی بیشینه در مقابل دارای فشار متوسط مؤثر بیشتر بوده که حالت‌های احتراق کامل را دارا هستند. فشار مؤثر متوسط درست با نرخ آزاد سازی انرژی که یک نسبت خطی با یکدیگر دارند. در فشار متوسط مؤثر درست کوچک تر از صفر، احتراق ناقص دارای مقادیر آزاد سازی انرژی بسیار کمی است.

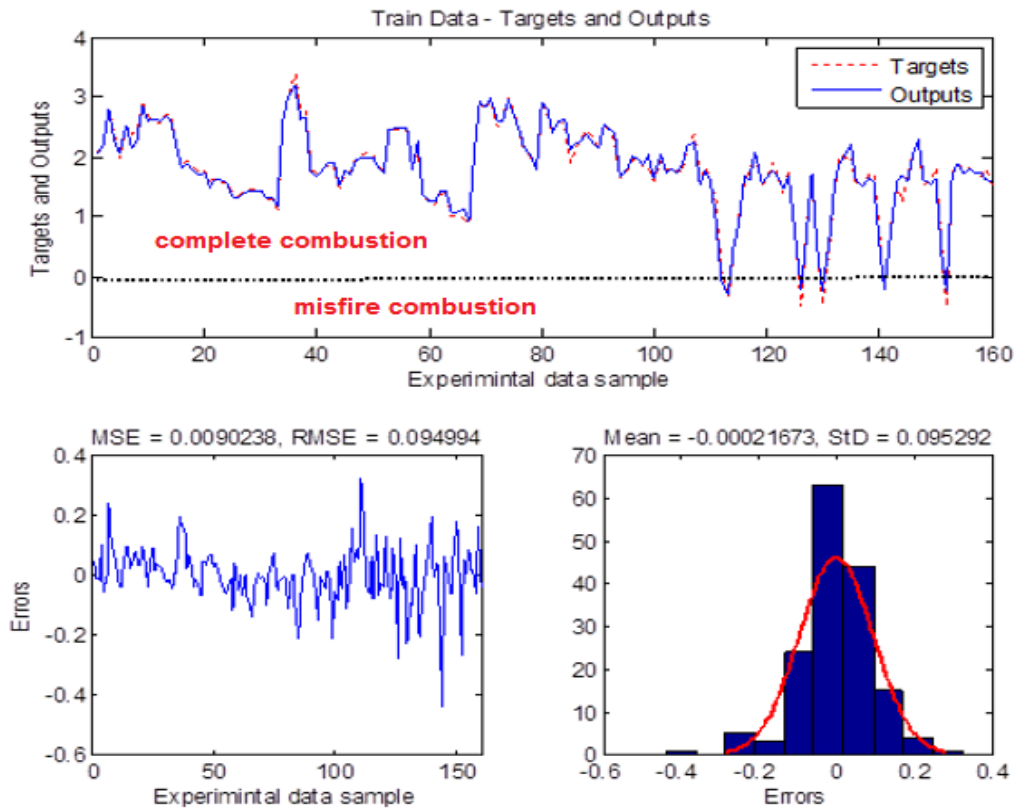


شکل ۸: نمودار نرخ آزاد سازی انرژی بیشینه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص

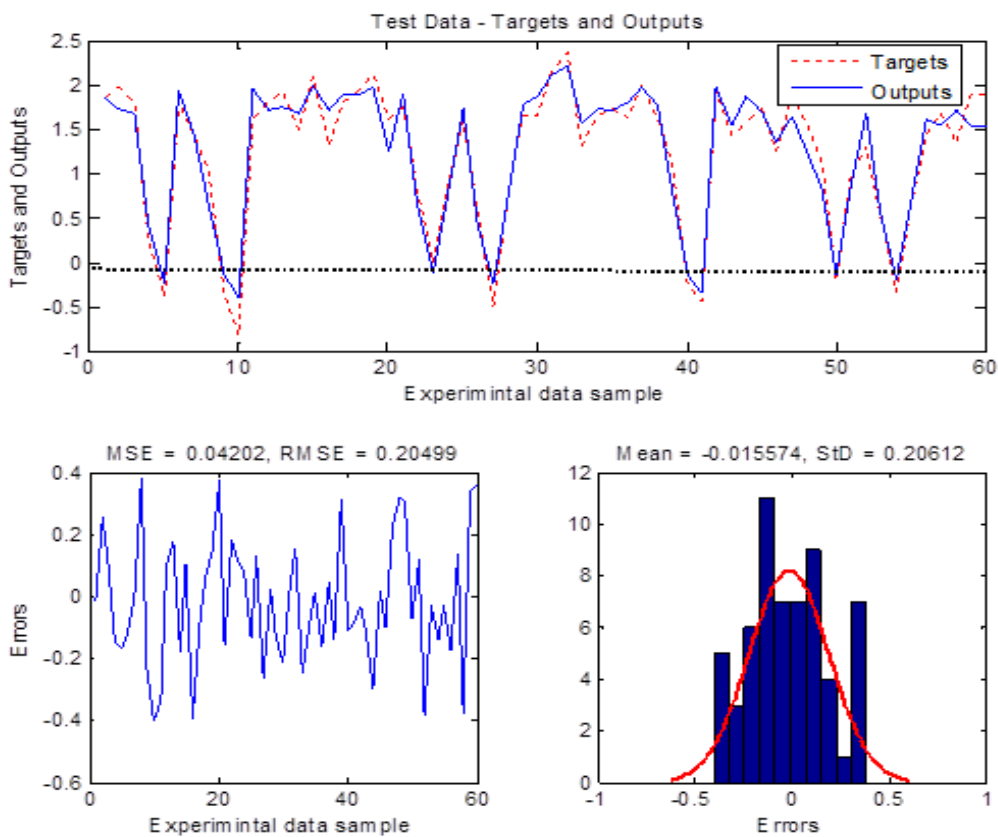
فشار بیشینه استوانه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فشار بیشینه استوانه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در نواحی دارای احتراق ناقص دارای مقادیر بسیار کمی است ولی برای نقاط با احتراق کامل مقدار فشار استوانه بیشینه به مقدار ۵۰۰۰ kPa می‌رسد. در احتراق ناقص فشار استوانه افزایشی نداشته و مانند حالت بدون احتراق موتور کار خواهد کرد.



شکل ۹: نمودار فشار ماکزیمم استوانه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در حالت‌های احتراق کامل، احتراق جزئی و احتراق ناقص



شکل ۱۱: مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های آموزش شبکه



شکل ۱۲: مقایسه مقدار حقیقی و مقدار خروجی شبیه‌سازی برای داده‌های تست

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک موتور دیزل تک-استوانه، هوا-خنک، پاشش مستقیم، چهار-زمانه یانمار به موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت اتانول تبدیل شده است و با استفاده از ۳۸ نقطه عملکردی در دور موتور ۱۵۵۰ RPM ارتباط پارامترهای عملکردی، احتراقی و آلودگی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سطح صدای احتراق مطالعه شده است. نتایج به صورت خلاصه در ادامه بیان شده است:

جهت دو چرخه احتراق ناقص و احتراق کامل همان طور که مشاهده می شود نزدیک نقطه مکث بالا احتراق ناقص است نوسان زیاد ندارد که نشان دهنده نبود افزایش زیاد به علت ضعیف بودن احتراق است. در شرایط احتراق کامل، نوسان افزایش پیدا کرده و به مقدار ۲ kPa/CAD می رسد. در احتراق کامل افزایش فشار مشهود است که بخوبی توسط نرخ افزایش فشار بیشینه استوانه نشان داده شده است.

در یک چرخه احتراق ناقص، احتراق بسیار سریع رخ داده که نشان کمی مقدار سوخت و یا عدم احتراق مناسب سوخت است. در منحنی کسر جرم سوخته احتراق کامل احتراق طولانی تر بوده و شروع و خاتمه احتراق در زوایای میل لنگ بزرگتر رخ خواهند داد.

در فشارهای متوسط مؤثر درست منفی، احتراق ناقص اتفاق افتاده و نقاط بالای خط چین که دارای فشار متوسط مؤثر درست بالای صفر اند دارای احتراق جزئی و احتراق کامل اند. نقاط دارای نرخ آزاد سازی انرژی بیشینه در مقابل دارای فشار متوسط مؤثر بیشتر بوده که حالت های احتراق کامل را دارا اند.

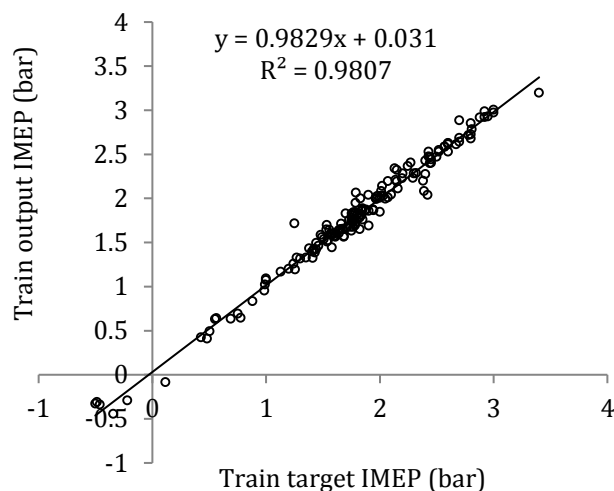
فشار بیشینه استوانه در مقابل فشار متوسط مؤثر درست در نواحی دارای احتراق ناقص دارای مقادیر بسیار کمی است ولی برای نقاط با احتراق کامل مقدار فشار استوانه بیشینه به مقدار ۵۰۰۰ kPa می رسد. در احتراق ناقص فشار استوانه افزایشی نداشته و مانند حالت بدون احتراق موتور کار خواهد کرد

به منظور ارزیابی دقت شبیه سازی بهینه سازی-عصبی بدست آمده با استفاده از داده هایی که در مرحله آموزش و انتخاب سامانه بهینه شرکت داده شده (داده های آموزش) و داده هایی که در مرحله آموزش و انتخاب سامانه بهینه شرکت داده نشده (داده های تست) بودند مقدار دقت آن ارزیابی گردید. مقدار همبستگی نتایج پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی همبستگی بسیار مناسبی را نشان داد ($R^2 = 0.98$) که بیانگر دقت قابل قبول شبیه سازی فازی-عصبی برای تشخیص احتراق ناقص انتخاب شده است.

تشکر و قدردانی

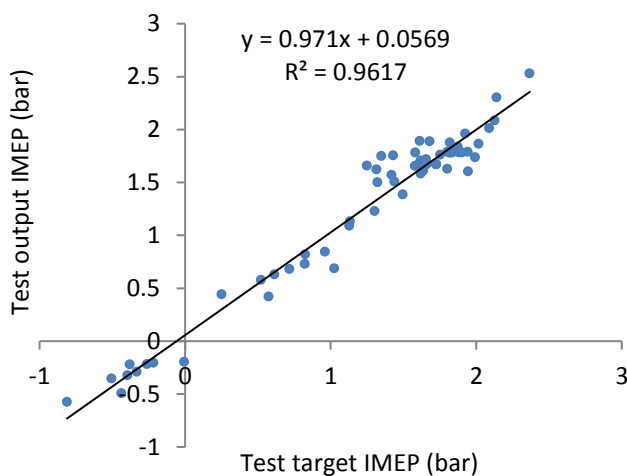
اینجانب نهایت تشکر از مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و آلودگی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا و مرکز توسعه خودرو دانشگاه صنعتی مالزی را داشته که با همکاری آنها نگارش این مقاله میسر گردید.

همچنین در شکل ۱۳ مقادیر میانگین مربعات خط ریشه میانگین مربعات خط، میانگین خط و انحراف معیار نشان داده شده است که بسیار پایین است.



شکل ۱۳: ارزیابی همبستگی مقادیر آزمایشگاهی فشار متوسط مؤثر درست با مقادیر پیش بینی شده توسط سامانه بهینه انتخاب شده با داده های شرکت داده شده در مرحله آموزش

به منظور ارزیابی دقت شبیه سازی بهینه سازی فازی-عصبی بدست آمده با استفاده از داده هایی که در مرحله آموزش و انتخاب سامانه بهینه شرکت داده شده (داده های آموزش) و داده هایی که در مرحله آموزش و انتخاب سامانه بهینه شرکت داده نشده (داده های تست) بودند مقدار دقت آن ارزیابی گردید. بر اساس شکل ۱۳ و ۱۴ مقدار همبستگی نتایج پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی همبستگی بسیار مناسبی را نشان داد ($R^2 = 0.96$) که بیانگر دقت قابل قبول سامانه فازی-عصبی انتخاب شده است.



شکل ۱۴: ارزیابی همبستگی مقادیر آزمایشگاهی فشار متوسط مؤثر درست با مقادیر پیش بینی شده توسط سامانه بهینه انتخاب شده با داده های شرکت داده نشده در مرحله آموزش (داده های تست)

[8] G. Rizzoni, Diagnosis of individual cylinder misfires by signature analysis of crankshaft speed fluctuations. SAE Paper 890884; 1989.

[9] W. Cai, NA. Collings, Catalytic oxidation sensor for the on board detection of misfire and catalyst efficiency. SAE Paper 922248; 1992.

[10] RD. O'Sullivan, NS. Will, The effect of intermittent engine misfire and air to fuel ratio excursions on exhaust catalyst temperature, SAE Paper 940927; 1994.

[11] Y. Chung, C. Bae, S. Choi, K. Yoon, application of a wide range oxygen sensor for the misfire detection. SAE Paper 1999-01-1485; 1999.

[12] J. Chang, M. Kim, K. Min, Detection of misfire and knock in spark ignition engines by wavelet transform of engine block vibration signals, Measurement science and technology, 13(2002) 8-14.

[13] K. Yoshimura, Y. Tokunaga, D. Hashimoto, H. Sakurai, Knock and misfire detection using ion current measurement for ultra-lean burn medium speed gas engine, SAE Paper 2007-01-2078; 2007.

[14] J. Merkisz, F. Tomaszewski, G. Szymański, M. Waligórski. application of the time-frequency selection of the vibration signal for misfire sensing in diesel engines. SAE Paper 2009-01-0242; 2009.

[15] B. Bahri, M. Shahbakht, AA. Aziz, Real time modeling of ringing in HCCI Engines using artificial neural network, Energy 125 (2017) 509-518.

مراجع و منابع

[1] R.D. Reitz, Directions in internal combustion engine research, Combustion and Flame 160 (2013) 1-8.

[2] M. Sjoberg, J.E. Dec, Ethanol Autoignition Characteristics and HCCI Performance for Wide Ranges of Engine Speed, Load and Boost, Journal of Engine 33 (2010) 84-106.

[3] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Ethanol fuelled HCCI engine: A review. International Journal of Mechanic, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 7 (2013) 437-43.

[4] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Misfire detection based on statistical analysis for an ethanol fuelled HCCI engine., International Review of Mechanical Engineering (IREME) 6 (2012) 1276-1282.

[5] B. Bahri, A.A. Aziz, M. Shahbakhti, M.F. Muhamad Said, Understanding and detecting misfire in an HCCI engine fuelled with ethanol, Applied Energy 108 (2013) 24-33.

[6] S. Saxena, I. Dario Bedoya, N. Shah, A. Phadke, Understanding Loss Mechanisms and Identifying Areas of Improvement for HCCI Engines Using Detailed Exergy Analysis, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 135 (2013) 091505-091505.

[7] B. Bahri, M. Shahbakht, k. Kanna, AA. Aziz, Identification of ringing operation for low temperature combustion engines, Applied Energy 171 (2016) 142-152.



Data driven model for detecting misfiring combustion in low temperature combustion engine using Neuro-Fuzzy

H. Kaviani¹, B. Bahri^{2*}

¹ Automotive Engineering Department, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran, Kavianihoushang@gmail.com

² Automotive, Fuel and Emission Research center, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran, Bahri@iaush.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 December 2019

Accepted: 18 February 2020

Keywords:

HCCI

Ethanol

Misfiring combustion

Neuro-Fuzzy model

ABSTRACT

The homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines with ethanol fuel as a renewable fuel is a promising solution to some of the major challenges of combustion engines. Incomplete or misfiring combustion limits HCCI operation and damages the catalyst converter and exhaust systems. The experimental data of a 0.3-liter combustion engine was used for modeling and detecting misfiring combustion. Incomplete and misfiring combustion in HCCI engine was studied by fuzzy-neural network. There is a significant relationship between misfiring combustion and in-cylinder pressure variations at 0, 5, 10, 15 and 20 crankshafts. These experimental findings were used to design a fuzzy-neural network for misfiring incomplete combustion in a HCCI engine. This model has been tested on experimental data. The results showed that the fuzzy-neural network fault diagnostic model can detect incomplete and misfiring combustion in HCCI engine with ethanol fuel. In addition, the developed model was able to identify the transition success from the normal operating area and incomplete combustion.

