

استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی جهت پیش‌بینی دینامیک احتراق در یک محفظه احتراق آزمایشگاهی با شعله پایدار شده چرخشی

روزبه ریاضی^۱، علیرضا ترابی^۲، محمد اسرار دل^۳، مازیار شفائی روشنی^۴، شیدوش وکیلی پور^۵،
هادی زارع^۶ و هادی ویسی^۷

۱- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران (نویسنده مخاطب)، ro_riazi@ut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، a_torabi@ut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، m.asrardel@gmail.com

۴- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، mshafae@ut.ac.ir

۵- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، vakilipour@ut.ac.ir

۶- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، h.zare@ut.ac.ir

۷- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، h.veisi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۳۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۵/۳/۴، پذیرش: ۹۵/۴/۳)

چکیده: در این مطالعه، ارتباط بین مقادیر سطح آلاینده NO_x ، سطح نویز تولیدشده و میزان نوسانات فشار در یک محفظه احتراق آزمایشگاهی، با کاربرد در توربین‌های گازی نیروگاهی، نسبت به تغییرات پارامترهایی همچون نسبت هم‌ارزی کلی محفظه (ϕ) و میزان دبی پاشش سوخت ثانویه (Q_{sec})، با کمک دو روش داده‌کاوی مختلف بررسی شده است. پارامترهای سطح آلاینده NO_x ، سطح نویز و میزان نوسانات فشار تولیدشده در محفظه به‌عنوان مقادیر خروجی اندازه‌گیری شده از محفظه و همچنین پارامترهای نسبت هم‌ارزی کلی و دبی پاشش سوخت ثانویه به‌عنوان متغیرهای ورودی محفظه احتراق در نظر گرفته شدند. از شبکه عصبی پرسپترون (MLP) و روش پاسخ سطح (RSM) برای پیش‌بینی رابطه غیرخطی موجود بین پارامترهای ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده محفظه احتراق استفاده شده است. آزمایش‌های مربوطه با به‌کارگیری چهار نوع انژکتور پاشش سوخت ثانویه، با ساختار هندسی و طراحی متفاوت، در شرایط نسبت هم‌ارزی کلی در محدوده $0.7 \sim 0.9$ همراه با دبی‌های پاشش سوخت متفاوت در محدوده $0.2 \sim 0.6$ لیتر بر دقیقه انجام پذیرفت. نتایج حاصل از پیش‌بینی پارامترها با دو روش داده‌کاوی مذکور نشان می‌دهند که این دو روش توانایی قابل قبولی در دستیابی به تطابق مناسب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده پارامترهای خروجی محفظه احتراق دارند. البته نتایج حاکی از آن است که روش MLP نسبت به RSM توانایی بیشتری در پیش‌بینی پارامترهای احتراقی این مطالعه (سطح آلاینده NO_x ، سطح نویز تولیدشده و میزان نوسانات فشار) دارد.

کلیدواژگان: محفظه احتراق با شعله پایدار شده چرخشی، پاشش سوخت ثانویه، شبکه عصبی مصنوعی، پاسخ سطح مبتنی بر چندجمله‌ای

مقدمه

در فرایند طراحی و توسعه توربین‌های گازی جدید، کاهش سطح تولید اکسیدهای نیتروژن می‌بایست به‌عنوان یک هدف جدی مدنظر قرار گیرد. با توجه به این که فرایند تولید اکسیدهای نیتروژن وابستگی زیادی به دمای محفظه احتراق دارد، استفاده از احتراق پیش‌مخلوط رقیق، به‌منظور کاهش دمای شعله در محفظه، برای این چهارچوب از طراحی توصیه می‌شود. هرچند باید توجه داشت که این شرایط عملکردی موجب بروز ناپایداری‌های ترموآکوستیکی در محفظه می‌شود. در حالت کلی، به‌دلیل

همگیری بین نوسانات میدان جریان و نوسانات حرارت آزاد شده از شعله، ناپایداری های ترموآکوستیکی ظاهر می شوند [۱]. این همگیری سبب ایجاد نوسانات با مقدار دامنه بزرگ در پارامترهای میدان جریان و حرارت آزاد شده از شعله می شود که آن هم خود سبب کاهش بازده عملکردی محفظه احتراق می شود [۲-۵]. همان طور که رایلی [۶] در گزارش های علمی خود بیان کرده، می توان با آزادسازی انرژی در فاز مخالف با نوسانات حرارت آزاد شده، ناپایداری های ایجاد شده در محفظه احتراق را کنترل کرد. براساس تحقیقات پیشین [۷-۹]، از جمله راه های کنترل نوسانات احتراق پاشش سوخت ثانویه است.

روش پاشش سوخت ثانویه، به عنوان یک روش مطلوب جهت فرونشاندن نوسانات فشار و جلوگیری از پدیده خاموشی شعله به صورت رقیق^۱ در توربین های گازی، در نظر گرفته می شود. تأثیر مکان قرارگیری انژکتور پاشش سوخت ثانویه بر کیفیت کنترل احتراق توسط لی و همکاران [۷] بررسی شده است. همچنین، مجموعه ای از آزمایش ها توسط تاجیبانا و همکاران [۱۰] با استفاده از پنج نوع انژکتور مختلف تحت شرایط پاشش یکنواخت سوخت ثانویه انجام شد. تأثیر زاویه، مقدار و موقعیت پاشش سوخت ثانویه بر روی سطح نوسانات فشار محفظه ارزیابی شد. در طیفی از مطالعات، با استفاده از یک انژکتور سوخت ثانویه با زاویه پاشش سوخت ۴۵ درجه، جهت کنترل نوسانات احتراق در یک محفظه احتراق پیش مخلوط با شعله پایدار شده چرخشی، نوعی کنترل حلقه باز پیاده سازی شد [۸، ۱۱، ۹، ۱۴]. چوی و همکاران [۱۴] نشان دادند که سطح نویز و تولید اکسید نیتروژن در محفظه با شعله پایدار شده چرخشی، به دلیل آنکه پاشش سوخت ثانویه موجب ایجاد تغییر در ساختارهای محلی شعله می شود، هر دو کاهش می یابند. در رابطه با این نوع محفظه، مطالعاتی به وسیله ابزار لیزر PLIF^۲ برای درک چگونگی تأثیرگذاری پاشش سوخت ثانویه بر روی سازوکار^۳ تولید یا کاهش نویز در محفظه توسط تاناهاشی و همکاران [۱۱] برای احتراق شعله پیش مخلوط آشفته صورت پذیرفت. علاوه بر این، جهت درک چگونگی سازوکار کاهش نویز محفظه، از روش اندازه گیری SPIV^۴ همراه با اندازه گیری نوسانات فشار در محفظه احتراق با شعله پایدار شده چرخشی استفاده شد [۹].

تاناهاشی و همکاران [۱۱] تولید و شکل گیری ساختارها را هم در ناحیه شعله و هم در ناحیه بازچرخش^۵ مطالعه کردند و براساس شدت نورتابی یون OH، مقدار متوسط متغیرها در بررسی آن ها محاسبه شد. آن ها نشان دادند که پاشش سوخت ثانویه می تواند باعث فرونشاندن نوسانات گاز محترق با دمای بالا در ناحیه بازچرخش بشود. همان طور که در مطالعات آن ها پیشنهاد داده شد [۱۱]، به دلیل کنترل میدان سرعت مغشوش، پاشش سوخت ثانویه می تواند موجب تضعیف نقش جملات تنش رینولدز و آنتروپی، که با اضمحلال انرژی اغتشاشی از طریق منبع صدای آکوستیک در ارتباط است، بشود [۱۵]. برای مطالعه جزئیات بیشتر در این خصوص، به مرجع [۱۱] مراجعه شود. علاوه بر این، شیمورا و همکاران [۹] بیان کردند که فرونشاندن جریان های گردابه ای با مقیاس بزرگ^۶ می تواند نقش مؤثری در کاهش سطح نویز حاصل از احتراق داشته باشد. مجموعه ای از آزمایش ها توسط کلو و هنگو [۱۶] برای اندازه گیری میدان سرعت و دما برای یک شعله پایدار شده در مجرا^۷ صورت پذیرفت. در مطالعه آن ها، کاهش متوسط غلظت NO_x به همراه افزایش دامنه نوسانات، در شرایط عملکردی نزدیک به شرایط استوکیومتری، گزارش شد. آن ها در مطالعات خود کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن را به کاهش مدت زمان ماندگاری گاز محترق در دمای بالا مرتبط دانستند.

از سوی دیگر، ریاضی و همکاران [۸] مجموعه ای از آزمایش ها را برای مطالعه تأثیر دبی جریان سوخت ثانویه، قطر انژکتور و میزان انحراف انژکتور (نسبت به مرکز انژکتور) بر روی سطح نویز محفظه، سطح نوسانات فشار و میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در یک محفظه احتراق با شعله پایدار شده چرخشی، اجرا کردند. هدف از این مطالعه، بررسی و درک ارتباط بین

1. Lean Blowout
2. Planner Laser Induced Fluorescence
3. Mechanism
4. Stereoscopic Particle Image Velocimetry
5. Recirculation Zone
6. Large-Scale Vortical Motion
7. Duct

پارامترهای احتراقی مذکور بود. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی این نوع محفظه [۱۱،۹،۸-۱۴]، در محدوده احتراق رقیق تا شرایط عملکردی نزدیک به استوکیومتری $\phi = 0.7 \sim 0.9$ ، انجام شده است و از ۴ نوع انژکتور با ساختارهای هندسی و طراحی متفاوت به همراه دبی‌های پاشش سوخت ثانویه متفاوت در محدوده $Q_{sec} = 0.6-4.2$ lit/min استفاده شده است. آن‌ها نشان دادند که پاشش سوخت ثانویه همراه با انحراف^۱ در مقایسه با انژکتورهای بدون انحراف پاشش، برای تمامی محدوده‌های نسبت هم ارزی، سبب کاهش تولید NO_x می‌شود.

علاوه بر این، افزایش سطح نوسانات فشار نیز برای انژکتورهای دارای انحراف در پاشش، گزارش شده است [۸]. آن‌ها، رفتار نوسانی و بالا کشیده شدن شعله در انژکتورهای دارای انحراف را به دلیل پاشش خارج از مرکز سوخت ثانویه به قسمت داخلی ناحیه بازچرخش، که سبب تقویت جریان‌های گردابه‌ای با مقیاس بزرگ و تشدید تأثیرات ساختارهای گردابه‌ای با مقیاس بزرگ بر روی نوسانات جبهه شعله خواهد شد، دانستند. به دنبال آن، این امر سبب تقویت جمله‌های آنتروپی در منبع میدان آکوستیک، و هم‌زمان سبب افزایش نویز حاصل از احتراق، در مقایسه با وضعیتی که پاشش سوخت ثانویه بدون انحراف نسبت به راستای مرکز انژکتور صورت می‌پذیرد، خواهد شد. از سوی دیگر، به منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف محفظه احتراق صنعتی، مانند شدت چرخش جریان هوا^۲، سطح تولید NO_x محفظه و سیگنال‌های نوری ساطع‌شده از تشعشعات شعله، روش رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی توسط ساز و همکاران [۱۷] استفاده شد.

بالستر و همکاران [۱۸] مطالعات خود را بر روی شعله پیش‌مخلوط حاصل از مخلوط گاز طبیعی/هیدروژن در یک محفظه احتراق با شعله پایدارشده چرخشی همراه با تکنیک‌های مشاهده و ثبت نورتابی شیمیایی از شعله گسترش داده‌اند. آن‌ها برای مطالعه ارتباط بین پارامترهای نورتابی شیمیایی، مانند سیگنال‌های $PM\ T^2$ و PD^2 که از شعله پیش‌مخلوط ثبت شده بود، و سایر پارامترهای احتراق مانند نسبت هم‌ارزی و سطح تولید آلاینده‌های NO_x و CO ، از شبکه عصبی (ANN)^۵ استفاده کردند. مطالعات موفق دیگری نیز در خصوص استفاده از شبکه‌های عصبی در بررسی میدان‌های احتراقی وجود دارد [۲۰، ۱۹]. بر مبنای تحقیقات ذکر شده بالا و با در نظر گرفتن پتانسیل بالا در روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون برای مطالعه شعله مغشوش، استفاده از روش‌های داده‌کاوی برای بررسی پارامترهای احتراق در محفظه احتراق با شعله پایدارشده بسیار مورد توجه است.

در مطالعه حاضر، جهت پیش‌بینی مناسب دینامیک احتراق محفظه با شعله مغشوش پایدارشده، برای مطالعه ارتباط بین پارامترهای احتراقی اندازه‌گیری شده مانند نسبت هم‌ارزی کلی و مقادیر مختلف نرخ پاشش سوخت ثانویه از یک سو، با مقادیر تولید NO_x ، سطح نویز و نوسانات فشار از سوی دیگر، از دو تکنیک داده‌کاوی مختلف (شبکه عصبی مصنوعی و روش پاسخ سطح) استفاده شد. همچنین، نتایج حاصل از به‌کارگیری این دو روش با هم مقایسه شدند. نوآوری این پژوهش در آن است که تا کنون بر روی این محفظه احتراق مغشوش (همراه با پاشش سوخت ثانویه) که در مطالعه حاضر بررسی شده هیچ‌گونه مطالعه داده‌کاوی صورت نگرفته است. انجام این مطالعه بر روی محفظه احتراق مذکور برای اولین بار انجام شده است.

مجموعه محفظه احتراق آزمایشگاهی مورد مطالعه

در بررسی حاضر، از محفظه احتراقی که در آن شعله به صورت چرخشی پایدار می‌شود و در مطالعات گذشته نیز به‌کار رفته [۱۴، ۱۳، ۱۱، ۹، ۸] استفاده شده است. در شکل ۱، تصویری از محفظه احتراق آزمایشگاهی [۸] به‌کار گرفته شده در این مطالعه و نازل چرخشی آن ارائه شده است. همچنین، در شکل ۲، طرحواره‌ای از محفظه احتراق به‌کار رفته در این تحقیق

1. Secondary Fuel Injection with Offset
2. Swirl Intensity
3. Photomultiplier
4. Photodiode
5. Artificial Neural Network

نشان داده شده و جزئیات مربوط به مشعل جریان چرخشی ارائه شده است. تجهیزات این دستگاه شامل یک ناحیه همگرایی (ناحیه‌ای که در آن جریان مخلوط متان-هوا پس از عبور از یک شیپوره همگرا آماده عبور از نازل جریان چرخشی می‌شود)، بخش نازل چرخشی و یک محفظه احتراق است.



Figure 1- Images of the experimental swirl-stabilized combustor[8] used in this study

شکل ۱- تصاویری از محفظه احتراق آزمایشگاهی با شعله پایدار شده چرخشی [۸] مورد مطالعه در این پژوهش

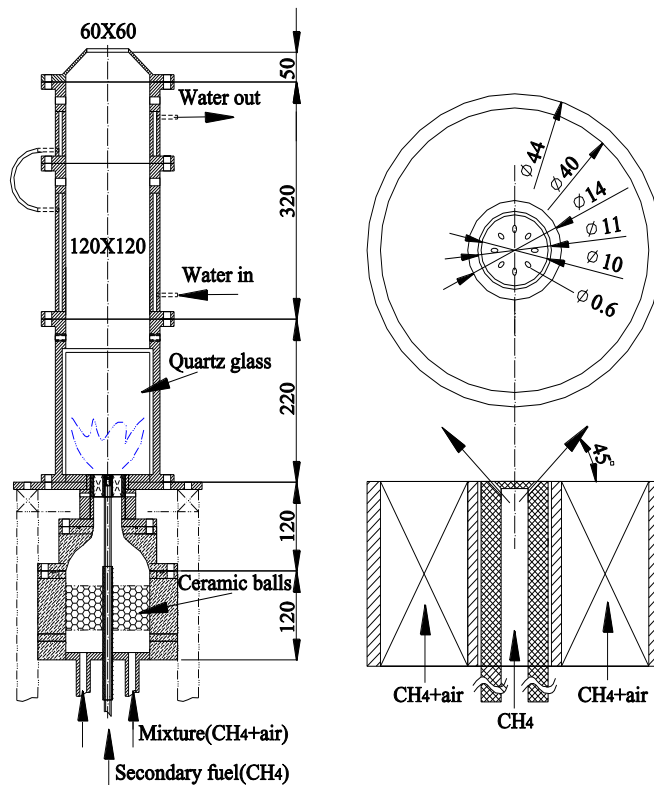


Figure 2- Schematics of the swirl-stabilized combustor and details of swirler and secondary fuel injector (dimensions are in millimeter)

شکل ۲- طرحواره محفظه احتراق با شعله پایدار شده چرخشی و جزئیات نازل جریان چرخشی و انژکتور سوخت ثانویه (ابعاد برحسب میلی‌متر است)

ناحیه همگرایی، محفظه‌ای است که در ابتدا قطر داخلی ۱۲۰ میلی‌متری دارد و در آن توپ‌های سرامیکی قرار گرفته‌اند. پس از عبور جریان مخلوط متان-هوا از میان توپ‌های سرامیکی و یک شیپوره همگرا، قطر داخلی این محفظه به ۴۰ میلی‌متر در بخش انتهایی کاهش می‌یابد. در قسمت انتهایی ناحیه همگرایی، نازل چرخشی قرار دارد. نازل چرخشی خود دارای ۸ پره چرخشی با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر و قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر است که زاویه ۴۵ درجه با محور نازل می‌سازند.

مقطع داخلی محفظه احتراق نیز از ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ میلی‌متر به ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر در مقطع خروجی محفظه تقلیل می‌یابد. ارتفاع کلی اجزای یادشده با در نظر گرفتن ارتفاع محفظه ۵۹۰ میلی‌متر است و برای داشتن دید مرئی به شعله از چهار صفحه شیشه‌ای (از جنس کوارتز) با ابعاد ۱۷۰×۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر در هر طرف محفظه احتراق استفاده شده است. جریان گاز پیش‌مخلوط متان-هوا از نازل چرخشی عبور کرده و شعله در بالای پره‌های چرخشی پایدار می‌شود. در جدول ۱، مشخصات ابعادی برخی از اجزای محفظه احتراق آزمایشگاهی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ابعادی اجزای محفظه احتراق و نازل چرخشی

Table 1- Dimensions of the components of combustor and swirler

Dimensions of the combustor components	Dimensions (in millimeters)
Combustion chamber inner cross-section at the inlet	120×120
Combustion chamber inner cross-section at the outlet	60×60
Dimensions of glass plates	170×120×5
Overall length of combustion chamber	590
Inner diameter of the swirl nozzle	14
Outer diameter of the swirl nozzle	40
Angle of inclination of swirl vanes	45 degree

در شکل ۳، طرحواره‌ای از طراحی ۴ نوع انژکتور مربوط به پاشش سوخت ثانویه، که در پژوهش گذشته [۸] و مطالعه حاضر به کار رفته‌اند، نشان داده شده است. تمامی این انژکتورها در توپی مرکزی نازل چرخشی قرار می‌گیرند. در واقع جریان اصلی گاز پیش‌مخلوط از نازل چرخشی عبور می‌کند و شعله‌ای چرخشی بر روی نازل تشکیل می‌شود. سپس با کمک جریان سوخت ثانویه، که به وسیله انژکتورهای شکل ۳ از توپی مرکزی نازل چرخشی به قسمت داخلی شعله چرخشی پاشیده می‌شود، کنترل شعله اصلی، سطح نوسانات فشار و میزان آلاینده NO_x انجام می‌شود. انژکتور مبنا (A)، که قبلاً در مطالعات گذشته [۹، ۱۱، ۱۲، ۱۴] نیز استفاده شده است، دارای ۸ مجرای پاشش با قطر داخلی ۰/۶ میلی‌متر است که نسبت به محور مشعل زاویه ۴۵ درجه می‌سازند. برای مطالعه اثرات قطر پاشش سوخت ثانویه بر دینامیک احتراق و میزان NO_x تولیدشده توسط محفظه، از انژکتور نوع B استفاده شده است. این انژکتور نیز دارای ۸ سوراخ پاشش با قطر داخلی کوچک‌تر (۰/۴ میلی‌متر) است که در آن راستای پاشش سوخت نسبت به محور نازل و مشعل زاویه ۴۵ درجه می‌سازد. در انژکتورهای C و D طراحی و موقعیت سوراخ‌های پاشش سوخت به گونه‌ای است که این مجاری نسبت به راستای پاشش از مرکز انژکتور (آنچه در انژکتور مبنا A قبلاً وجود داشته) دارای انحراف معینی معادل ۲/۱ میلی‌مترند. به عبارتی دیگر، در انژکتورهای C و D سوخت ثانویه با اندکی انحراف^۱ نسبت به راستای مرکزی انژکتور به فضای درون شعله پیش‌مخلوط چرخشی پاشیده می‌شود. این در حالی است که در انژکتورهای A و B سوخت ثانویه در راستای مرکز انژکتور از وسط توپی مرکزی نازل چرخشی به فضای داخلی شعله پیش‌مخلوط چرخشی پاشیده می‌شود. جهت انحراف پاشش در انژکتور C به گونه‌ای است که سوخت پاشیده شده در خلاف جهت جریان چرخشی اصلی با شعله پیش‌مخلوط چرخشی اندرکنش می‌کند. با تغییر نرخ سوخت ثانویه، میزان اندرکنش بین سوخت ثانویه پاشیده شده و شعله چرخشی اصلی تغییر می‌کند.

1. Injection Offset

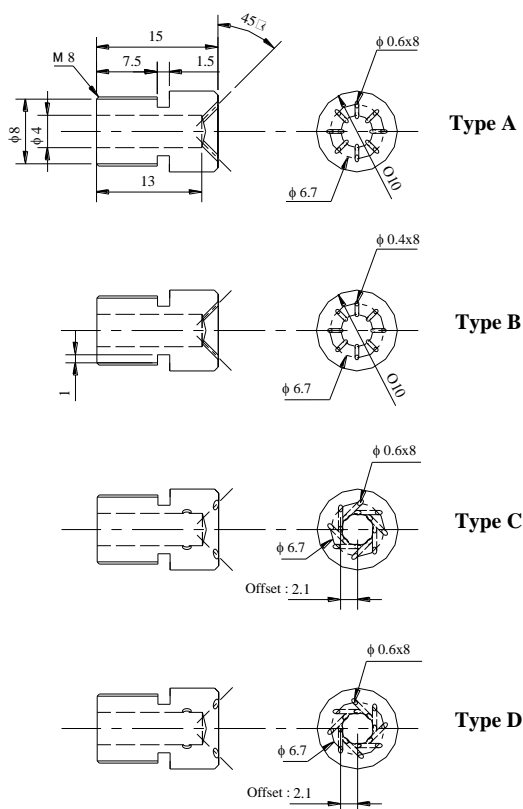


Figure 3- Designing parameters and dimensions of secondary fuel injectors
 شکل ۳- طراحی انژکتورهای سوخت ثانویه

برخلاف انژکتور C، سوخت پاشیده شده توسط انژکتور D در جهت جریان چرخشی اصلی است و لذا شرایط اندرکنش سوخت ثانویه، با شعله چرخشی پیش مخلوط، نسبت به انژکتور C متفاوت است. همچنین، قابل توجه است که راستای پاشش سوخت در انژکتورهای C و D نیز نسبت به محور مشعل و انژکتور همان زاویه ۴۵ درجه را دارد. در جدول ۲، برخی مشخصات ابعادی ۴ نوع انژکتور به کار گرفته شده برای پاشش سوخت ثانویه، در این مطالعه، ارائه شده است.

برای اندازه گیری نوسانات فشار در محفظه از یک سنسور فشار (تویودا، پی دی ۱۰۴)^۱ به همراه اتصالی جهت خنک کاری سنسور استفاده شده و سنسور در فاصله ۵۰۰ میلی متر پایین تر از نازل جریان چرخشی بر روی دیواره محفظه احتراق (۹۰ میلی متر پایین تر از نازل خروجی محفظه) نصب شده است. سطح نوپز تولید شده نیز توسط یک صداسنج (اونووسکی، ال-ای ۱۲۴۰)^۲ اندازه گیری شد. این صداسنج در فاصله ۲۳۰ میلی متری از دیواره محفظه و در راستای محور آن، ۵۰۰ میلی متر بالاتر از صفحه خروجی نازل جریان چرخشی (صفحه ای که بر خروجی نازل جریان چرخشی و انژکتور سوخت ثانویه مماس است) نصب شده است. غلظت اکسیدهای نیتروژن به وسیله یک دستگاه سنجش غلظت اجزای گاز (شیمادزو، نووا ۷۰۰۰)^۳ اندازه گیری شده است. برای نمونه گیری از محصولات احتراق از پروب نمونه گیری^۴ استفاده شده است. این پروب، که با آب خنک می شود، دارای یک سوراخ مکش به قطر ۱ میلی متر است (که جهت هدایت گاز نمونه گیری شده به واحد سنجش به کار می رود) و پروب در فاصله ۲۰ میلی متر در بالادست صفحه خروجی محفظه احتراق در امتداد محور مشعل در مرکز دهانه خروجی محفظه (۵۷۰ میلی متر

1. TOYODA, PD104
 2. ONO SOKKI, LA-1240
 3. SHIMADZU, NOA-7000
 4. Sampling Probe

بالتر از محل نصب نازل جریان چرخشی و انژکتور سوخت ثانویه) نصب می‌شود. از آنجایی که گاز نمونه‌گیری شده، قبل از ورود به دستگاه، رطوبت‌زدایی می‌شود، داده‌های مربوط به غلظت اکسیدهای نیتروژن به صورت غلظت گاز بدون رطوبت ارائه شده است. غلظت NO_x نیز به صورت مجموع مقادیر غلظت‌های NO و NO_2 در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات ابعادی انژکتورهای پاشش سوخت ثانویه

Table 2- Dimensions of the secondary fuel injectors

Injector Type	Number of injection holes	Injection diameter	Injection offset	Injection angle
Injector Type A	8	0.6 mm	0	45 degree
Injector Type B	8	0.4 mm	0	45 degree
Injector Type C	8	0.6 mm	2.1 mm	45 degree
Injector Type D	8	0.6 mm	2.1 mm	45 degree

شرایط عملکردی محفظه احتراق آزمایشگاهی

نرخ کلی جریان مخلوط سوخت و هوا ۳۰۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. از گاز متان خالص (با خلوص ۹۹/۵ درصد) به عنوان سوخت ثانویه استفاده شده است. براساس مطالعات گذشته صورت گرفته بر روی این محفظه احتراق [۱۴] سطح نويز و نوسانات فشار در محفظه در محدوده نسبت هم‌ارزی $\phi = 0.7 \sim 0.9$ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه، براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده [۱۴]، دمای متوسط محفظه در محدوده ۱۰۰۰-۱۳۰۰ کلوین است، فرکانس‌های غالب در محفظه را می‌توان به تحریک مد آکوستیکی با ساختار یک‌چهارم طول موج^۱ نسبت داد [۱۴،۸].

در این مطالعه، با در نظر گرفتن نسبت هم‌ارزی کلی در محدوده $\phi = 0.7 \sim 0.9$ و مقادیر مختلف نرخ پاشش سوخت ثانویه در محدوده $Q_{sec} = 0.6 \sim 4.2$ لیتر بر دقیقه (که معادل ۰/۲ الی ۱/۴ درصد از دبی کلی جریان مخلوط سوخت-هواست) آزمایش‌های تجربی بر روی محفظه احتراق انجام شد. برای مطالعه اثر نرخ جریان سوخت ثانویه بر سطح نوسانات فشار و سطح تولید NO_x در هر مقدار مشخص از نسبت هم‌ارزی کلی، با ثابت نگاه‌داشتن دبی جریان هوا، مقادیر نرخ جریان سوخت ثانویه و سوخت جریان اصلی پیش مخلوط به گونه‌ای تنظیم شدند که نسبت هم‌ارزی کلی سوخت-هوا در شرایط عملکردی محفظه احتراق ثابت بماند. در جدول ۳، طبقه‌بندی شرایط مختلف عملکردی محفظه احتراق براساس مقادیر متفاوت نسبت هم‌ارزی کل و دبی پاشش سوخت ثانویه ارائه شده است.

جدول ۳- طبقه‌بندی شرایط مختلف عملکردی محفظه احتراق براساس مقادیر متفاوت نسبت هم‌ارزی و دبی پاشش سوخت ثانویه

Table 3- Classification of different operating conditions of the combustor based on various amounts of overall equivalence ratio and secondary fuel injection rate

Operating condition	$Q_{sec}(L/min)$	ϕ	Operating condition	$Q_{sec}(L/min)$	ϕ
1	0.0	0.7	14	1.8	0.85
2	0.0	0.75	15	1.8	0.9
3	0.0	0.8	16	3.0	0.7
4	0.0	0.85	17	3.0	0.75
5	0.0	0.9	18	3.0	0.8
6	0.6	0.7	19	3.0	0.85
7	0.6	0.75	20	3.0	0.9
8	0.6	0.8	21	4.2	0.7
9	0.6	0.85	22	4.2	0.75
10	0.6	0.9	23	4.2	0.8
11	1.8	0.7	24	4.2	0.85
12	1.8	0.75	25	4.2	0.9
13	1.8	0.8	-	-	-

نتایج و بحث

در شکل ۴، عکس‌هایی از شعله‌های مغشوش متان-هوا (که در مطالعه حاضر بررسی شده‌اند) نمایش داده شده است که در آن سوخت ثانویه به‌طور پیوسته با انژکتورهای A، B، C و D به میزان $Q_{sec} = 4/2$ لیتر بر دقیقه به درون شعله پیش‌مخلوط پاشیده شده است. نسبت هم‌ارزی کلی مخلوط سوخت-هوا و دبی کلی جریان مخلوط سوخت-هوا به ترتیب بر روی $\phi = 0/9$ و 300 لیتر بر دقیقه تنظیم شده‌اند. هیچ‌کدام از شعله‌های تشکیل شده دوده تولید نکردند و احتراق با رنگ آبی روشن انجام شد [۸]. با پاشش سوخت ثانویه به‌وسیله انژکتورهای A و B، شعله‌هایی به شکل لاله^۱ بر روی نازل جریان چرخشی تشکیل می‌شود. حال آنکه شعله‌های مرئی آبی‌رنگی که به‌وسیله انژکتورهای C و D تشکیل می‌شوند از روی نازل جریان چرخشی برخاسته^۲ و به‌صورت یکنواخت پهن می‌شوند [۸].

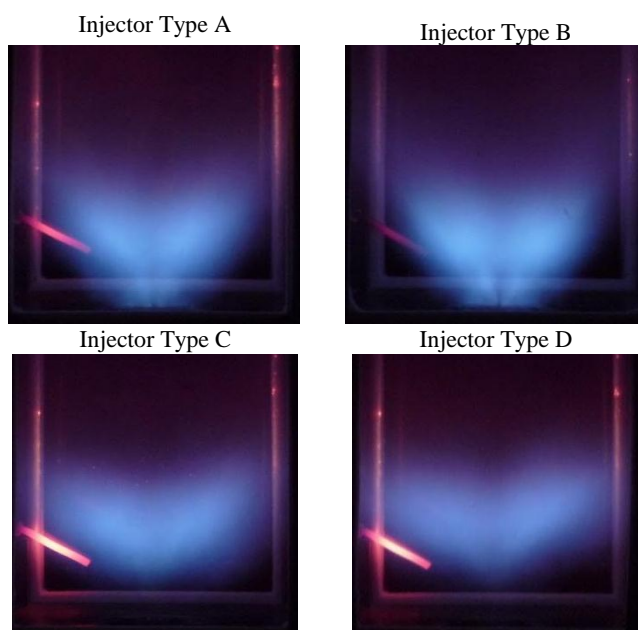


Figure 4- Long-time exposure photograph of methane-air turbulent premixed flame [8] for $\phi = 0.9$ and $Q_{sec} = 4.2$ L/min with injectors A, B, C and D

شکل ۴- عکس‌هایی از شعله‌های پیش‌مخلوط مغشوش متان-هوا [۸] با $\phi = 0/9$ و $Q_{sec} = 4/2$ لیتر بر دقیقه و با به‌کارگیری انژکتورهای A، B، C و D

در شکل ۵، تغییرات شاخص انتشار آلاینده NO_x بر حسب نسبت هم‌ارزی کلی سوخت-هوا و نرخ پاشش سوخت ثانویه برای انژکتور A نمایش داده شده است. مستقل از میزان نرخ سوخت ثانویه، شاخص انتشار NO_x با افزایش نسبت هم‌ارزی سوخت-هوا افزایش می‌یابد. همچنین، شکل ۵ نشان می‌دهد که در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر ($\phi > 0/85$)، به‌ازای مقادیر بالای نرخ پاشش سوخت ثانویه ۳ یا $4/2$ لیتر بر دقیقه، میزان NO_x کمتری نسبت به مقادیر پایین سوخت ثانویه تولید می‌شود. اثرات تعیین‌کننده‌ای در رابطه با میزان سطح تولید NO_x وجود دارند که در خصوص دلایل کاهش تولید NO_x باید مورد توجه قرار گیرند. این اثرات شامل تأخیر در اختلاط، احتراق در شرایط غیراستوکیومتریک و دمای پایین شعله‌اند [۷]. همچنین، کاهش آلاینده NO_x ممکن است به دلیل کاهش زمان اقامت محصولات احتراق در دمای بالا به دلیل اختلاط سریع محصولات

1. Tulip-shaped blue flame
2. Flame lift-off

احتراق با مخلوط سرد واکنش دهنده‌ها باشد [۱۶]. در مطالعه حاضر، ترکیبی از اثرات بالا نیز می‌تواند عاملی برای کاهش سطح NO_x باشد. این بحث به‌طور مفصل در مطالعه مرتبط قبلی [۸] بررسی شده است. میزان شاخص انتشار NO_x در محدوده $\phi = 0.75 \sim 0.90$ برای پاشش سوخت ثانویه با نرخ $4/2$ لیتر بر دقیقه بالاتر از پاشش با نرخ 3 لیتر بر دقیقه است، لیکن در محدوده $\phi = 0.75 \sim 0.85$ مقدار شاخص انتشار NO_x در مقایسه با شرایط پاشش 3 لیتر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

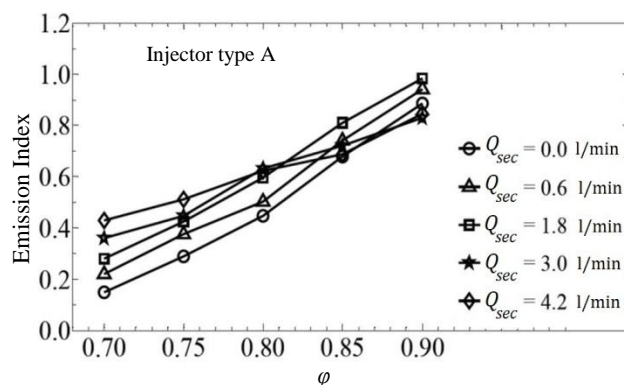


Figure 5- Variation of emission index (NO_x emission) versus equivalence ratio for various amounts of secondary fuel injection rate using the injector type A

شکل ۵- تغییرات شاخص انتشار NO_x برحسب میزان پاشش سوخت ثانویه و نسبت هم‌ارزی کلی سوخت-هوا برای انژکتور نوع A

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب تغییرات نوسانات فشار و سطح نویز محفظه احتراق را برحسب نسبت هم‌ارزی برای مقادیر مختلف پاشش سوخت ثانویه به‌وسیله انژکتور نوع A نشان می‌دهند. با پاشش سوخت ثانویه به میزان 3 یا $4/2$ لیتر بر دقیقه، سطح نویز احتراق و نوسانات فشار در محدوده پایین نسبت هم‌ارزی به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابند. همان‌طور که در مطالعات گذشته چو و همکارانش [۱۴] مطرح شده، این کاهش در میزان سطح نویز احتراق را به کنترل ساختارهای موضعی شعله، به دلیل پاشش سوخت ثانویه و حذف نوسانات فشار، می‌توان نسبت داد. همچنین، همان‌طور که در بررسی تاناهاشی و همکاران [۱۱] عنوان شده، پاشش سوخت ثانویه موجب کاهش نوسانات سرعت میدان آشفته در ناحیه چرخش داخلی^۱ شعله می‌شود. این کاهش، با پایین آمدن عدد رینولدز در ناحیه چرخشی شعله ارتباط دارد. هنگامی که تعداد گردابه‌هایی که مقیاس ریز دارند^۲ کاهش می‌یابد، اگر مسئله از نگاه منابع تولید صدا مورد بررسی شود، دیده خواهد شد که جمله تنش رینولدز و جمله آنتروپی، که با استهلاك انرژی اغتشاشی ارتباط دارند، همان‌گونه که در مطالعه تاناهاشی و همکاران [۱۵] بیان شده، تضعیف می‌شوند. این سازوکار، که موجب کاهش سطح نویز می‌شود، تأثیرات مهمی نیز بر ناحیه شعله دارد. این نتایج نشان داد که پاشش سوخت ثانویه به میزان 3 لیتر بر دقیقه با استفاده از انژکتور مبنای A، همان‌گونه که در مطالعات گذشته نیز عنوان شده [۹، ۱۱-۱۴]، بهترین شرایط را برای کاهش نوسانات فشار و نویز حاصل از احتراق ایجاد می‌کند، ضمن آنکه میزان NO_x تولیدشده در این شرایط نیز در حد قابل قبولی خواهد بود. همچنین، قابل توجه است که با افزایش نرخ پاشش سوخت ثانویه به $4/2$ لیتر بر دقیقه و استفاده از انژکتور نوع A در محدوده عملکردی با نسبت هم‌ارزی $\phi < 0.85$ ، سطح نویز حاصل از احتراق و نوسانات فشار کاهش می‌یابند.

در مطالعه حاضر، ارتباط بین مقادیر سطح آلاینده NO_x ، سطح نویز و نوسانات فشار به‌عنوان مقادیر خروجی اندازه‌گیری شده از محفظه، که وابسته به دو متغیر نسبت هم‌ارزی کلی (ϕ) و دبی جریان سوخت ثانویه (Q_{sec}) به‌عنوان کمیت‌های ورودی محفظه هستند، با دو رویکرد داده‌کاوی متفاوت، بررسی شد. برای نیل به این هدف، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و روش

1. Inner Recirculation Zone
2. Fine Scale Eddies

پاسخ سطح برای محاسبه و ارزیابی رابطه غیرخطی بین کمیت‌های ورودی و خروجی محفظه احتراق و پیش‌بینی برخی از پارامترهای احتراق، که داده‌های مرتبط با آن‌ها در فرایندهای آموزش به کار گرفته نشده بودند، استفاده شده است. از روش k-Fold برای انتخاب تصادفی زیرمجموعه‌ای [۲۱] از داده‌های موردنیاز برای پی‌ریزی و ارزیابی شبکه‌های عصبی و پاسخ سطح استفاده شد. رویکرد ارزیابی خطا برای روش‌های داده‌کاوی مذکور بر مبنای محاسبه و گزارش خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین [۲۱] بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده، شکل گرفته است. بر مبنای همین دو پارامتر ارزیابی، در مرحله استفاده از شبکه عصبی کیفیت عملکرد دو نوع شبکه عصبی نیز، بررسی شده است.

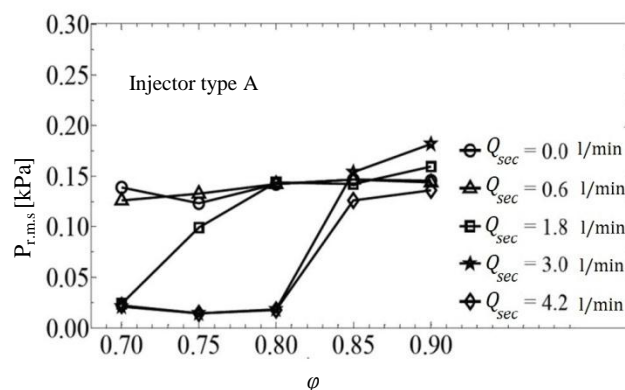


Figure 6- Variation of r.m.s. of pressure fluctuations versus equivalence ratio for various amounts of secondary fuel injection rate using the injector type A

شکل ۶- تغییرات جذر میانگین مربعات نوسانات فشار بر حسب میزان پاشش سوخت ثانویه برای انژکتور نوع A

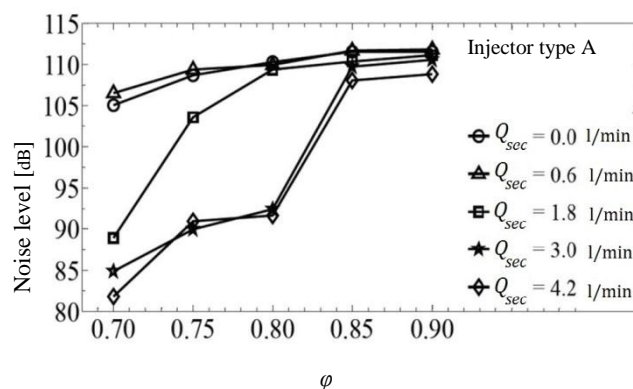


Figure 7- Variation of noise level versus equivalence ratio for various amounts of secondary fuel injection rate using the injector type A

شکل ۷- تغییرات سطح نویز حاصل از احتراق بر حسب میزان پاشش سوخت ثانویه در انژکتور A

استفاده از شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته می‌شوند که به صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند. در طبیعت، عملکرد شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزاء تعیین می‌شود. بنابراین، می‌توان یک ساختار مصنوعی به تبعیت از شبکه‌های طبیعی ساخت و با تنظیم مقادیر هر اتصال، تحت عنوان وزن اتصال، نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین کرد [۲۲]. ساختار کلی یک شبکه عصبی مصنوعی شامل موارد ذیل است (این ساختار در شکل ۸ نشان داده شده است): (۱) لایه ورودی، نورون‌های تشکیل‌دهنده این لایه به پارامترهای ورودی مسئله

متصل‌اند و پردازش را بر روی داده‌های ورودی انجام می‌دهند؛ (۲) لایه‌های پنهان میانی، این لایه‌ها وظیفه اتصال بین پارامترهای لایه خارجی و پارامترهای لایه ورودی را برعهده دارند. با توجه به نوع پیچیدگی مسئله، تعداد آن می‌تواند از یک تا چند زیرلایه مخفی تغییر کند؛ (۳) لایه خروجی، در این لایه، نورون‌های موجود در لایه به پارامترهای خارجی (که پیش‌بینی آن‌ها موردنظر است) متصل می‌شوند.

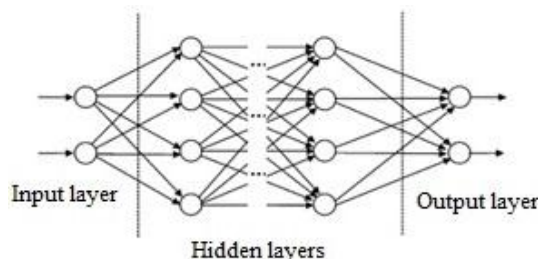


Figure 8- General schematic for the structure of layers of a neural network

شکل ۸- ساختار لایه‌های شبکه عصبی

مطالعات نشان داده که یک شبکه عصبی با دو زیرلایه مخفی، که تابع تبدیل زیرلایه اول آن سیگموئید^۱ و تابع تبدیل لایه دوم آن خطی باشد، توانایی تقریب بسیاری از توابع غیرخطی را دارد. در این مطالعه، برای پی‌ریزی یک شبکه عصبی مناسب جهت مدل‌سازی پارامترهای دینامیک احتراق از دو ساختار متفاوت برای شبکه عصبی استفاده شد.

ساختار اول با نام شبکه آلفا (α)، یک شبکه عصبی با یک زیرلایه مخفی به تعداد ۱۰ نورون و با اختصاص تابع تبدیل سیگموئید برای نورون‌های آن در نظر گرفته شده است. همچنین، در این شبکه تعداد ۲ نورون براساس تعداد متغیرهای مسئله برای لایه ورودی و ۳ نورون بر مبنای متغیرهای خروجی محفوظه احتراق در لایه خروجی در نظر گرفته شده است. ساختار دوم، با نام شبکه گاما (γ)، یک شبکه عصبی با دو زیرلایه مخفی به تعداد ۱۰ نورون در هر لایه و با اختصاص تابع تبدیل سیگموئید برای نورون‌های زیرلایه مخفی اول و تابع تبدیل خطی برای زیرلایه مخفی دوم آن است. برای شبکه عصبی گاما (γ)، تعداد ۲ نورون برای لایه ورودی و ۳ نورون برای لایه خروجی در نظر گرفته شده است.

مجموعه داده‌های ثبت‌شده مرتبط با محفوظه احتراق آزمایشگاهی، قبل از ارجاع به شبکه عصبی، بی‌بعد شده‌اند تا بتوان نتایج حاصل از اعتبارسنجی پیش‌بینی پارامترهای احتراق توسط شبکه عصبی را با یکدیگر مقایسه کرد. این فرایند بی‌بعدسازی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که داده‌های حاصله همگی در بازه ۰ تا ۱ قرار بگیرند. با انجام این فرایند، سرعت آموزش نیز افزایش می‌یابد. برای اعتبارسنجی نتایج شبکه عصبی از روش k-Fold استفاده شد. این روش توسعه‌یافته برای تحلیل صحت پیش‌بینی است. در این روش، اعتبارسنجی، مجموعه داده‌ها به k بخش مجزا تقسیم می‌شوند. فرایند مدل‌سازی برای k مرتبه تکرار می‌شود و در هر مرتبه از k-1 بخش از داده‌ها برای فرایند آموزش استفاده می‌شود و همچنین، یک بخش از داده‌ها، که در فرایند آموزش شرکت داده نشده، برای فرایند تست و اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی‌کننده (که در اینجا شبکه عصبی و روش پاسخ سطح، RSM^۲ است)، استفاده می‌شود. در خاتمه، از خطای پیش‌بینی محاسبه‌شده در هر یک از k مرحله متوسط‌گیری می‌شود. معیار ارزیابی عملکرد شبکه عصبی بر مبنای محاسبه خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین (R^2) در نظر گرفته شده است. عمده تلاش صورت گرفته جهت معرفی مدل واجد شرایط برای توصیف ارتباط بین پارامترهای این سیستم احتراقی بر این استوار است که مدل مذکور بتواند خطای پیش‌بینی میزان نوسانات فشار محفوظه احتراق را کمینه کند.

1. Sigmoid transfer function
2. Response Surface Method

شکل ۹ چگونگی تغییرات خطای پیش‌بینی برای سطح نوسانات فشار محفظه را در دو ساختار مختلف از شبکه‌های عصبی نوع آلفا و گاما برای چهار نوع انژکتور مختلف، به‌نمایش می‌گذارد.

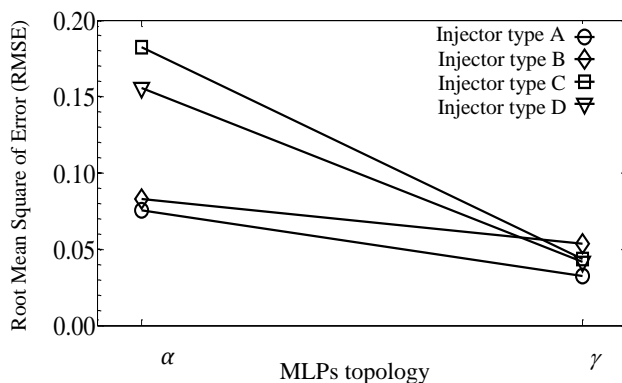


Figure 9- Root Mean Square of Error (RMSE) calculated based on the predicted values of P_{rms} with neural network topologies of α and γ considering various injector types A, B, C and D

شکل ۹- RMSE محاسبه شده برای پیش‌بینی سطح نوسانات فشار محفظه احتراق به‌وسیله دو معماری مختلف شبکه عصبی α و γ ، برای چهار نوع انژکتور مختلف

همان‌طور که از شکل ۹ قابل استنباط است، استفاده از شبکه عصبی نوع گاما، که ساختاری پیچیده‌تر از نوع آلفا دارد، سبب افزایش عملکرد شبکه و کاهش قابل‌توجه در خطای پیش‌بینی میزان نوسانات فشار برای تمامی انژکتورها شده است. فرضاً، برای انژکتور نوع C، می‌توان شاهد کاهش خطای پیش‌بینی نوسانات فشار به نصف مقدار محاسبه شده با استفاده از شبکه نوع α بود. در واقع شبکه عصبی نوع γ با داشتن تعداد واحدهای پردازنده بیشتر (تعداد نورون‌های بیشتر) و همچنین ترکیب اتصالات بین‌لایه‌ای پیچیده‌تر (شبکه آلفا با ۵۰ اتصال و شبکه نوع گاما با ۱۵۰ اتصال بین‌لایه‌ای)، نسبت به شبکه با ساختار آلفا، توانایی بالاتری جهت مدل‌سازی پارامترهای احتراق و تقریب ارتباط بین آن‌ها به‌نمایش می‌گذارد. نمودارهای شکل ۱۰ تا ۱۳ کیفیت نتایج پیش‌بینی به‌وسیله شبکه گاما را برای پارامترهای احتراقی مورد مطالعه در این بررسی در چهار نوع انژکتور مختلف به‌نمایش می‌گذارد. در این نمودارها، فاصله نقاط مختلف از خط قطری ترسیم‌شده در این اشکال بیانگر میزان خطای پیش‌بینی است.

به‌عبارتی دیگر، هرچه نقاط مرتبط با یک پارامتر معین از خط قطری ترسیم‌شده دورتر باشند، می‌توان گفت که خطای پیش‌بینی آن پارامتر بیشتر بوده و مقدار پیش‌بینی شده اختلاف بیشتری با مقدار اندازه‌گیری‌شده آزمایشگاهی داشته است. در عین حال، می‌توان گفت که برای نقاطی که به خط قطری نزدیک‌اند، دقت پیش‌بینی بسیار بالا بوده است. نتایج نشان می‌دهند که شبکه عصبی با معماری گاما، در تمامی محدوده عملکردی محفظه احتراق برای تمامی انژکتورها، عملکرد بسیار قابل‌قبولی در خصوص پیش‌بینی پارامترهای مختلف احتراقی ارائه کرده است. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی گاما، برای تمامی پارامترهای محفظه احتراق و در هر چهار انژکتور به‌کار رفته، بیش از ۰/۹۶ است که نشان می‌دهد شبکه عصبی نوع γ برای پیش‌بینی پارامترهای احتراقی دقت بالایی دارد. در جدول ۴، مقادیر $RMSE$ محاسبه‌شده مرتبط با پیش‌بینی پارامترهای احتراقی محفظه توسط شبکه عصبی نوع گاما برای چهار نوع انژکتور A, B, C و D ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که خطای پیش‌بینی برای پارامتر سطح آلاینده در تمامی انژکتورها از سایر پارامترهای مورد پیش‌بینی کمتر است. به‌طور کلی، شبکه عصبی نوع گاما توانسته پارامترهای احتراق را در محفظه مذکور با خطایی کمتر از ۰/۰۵۴۴ پیش‌بینی کند.

1. Root Mean Square of Error

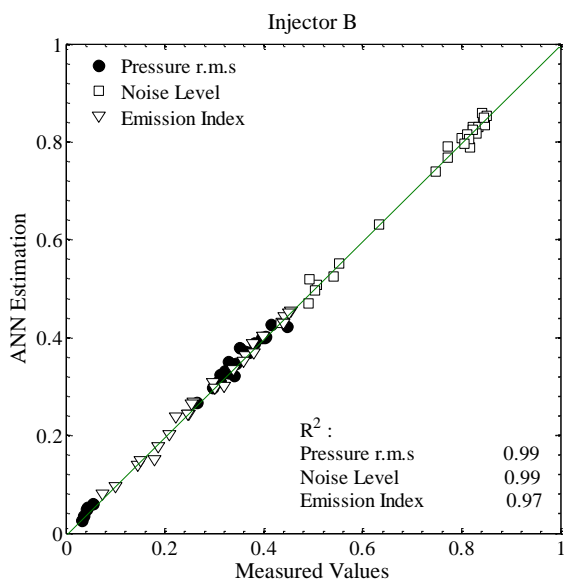


Figure 11- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type B, using the ANN type γ

شکل ۱۱- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط شبکه عصبی گاما در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع B

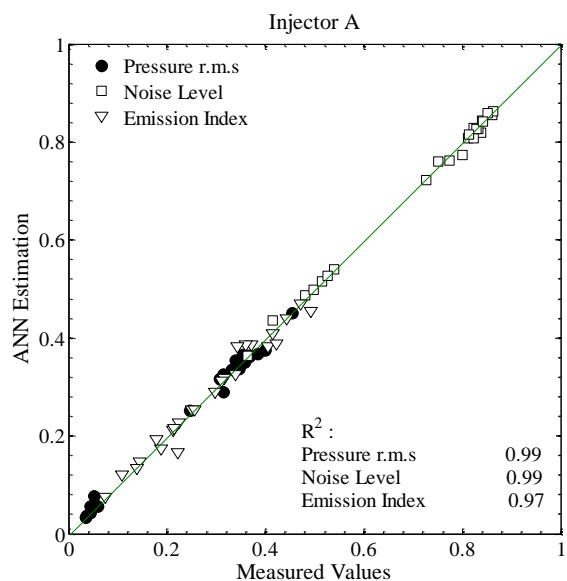


Figure 10- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type A, using the ANN type γ

شکل ۱۰- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط شبکه عصبی گاما در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع A

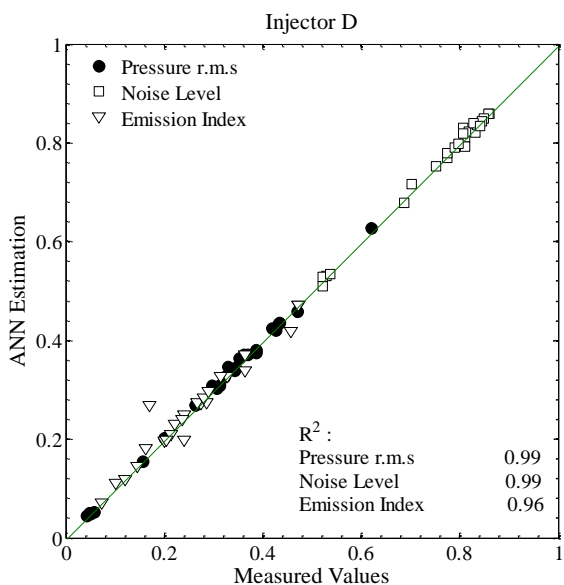


Figure 13- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type D, using the ANN type γ

شکل ۱۳- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط شبکه عصبی گاما در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع D

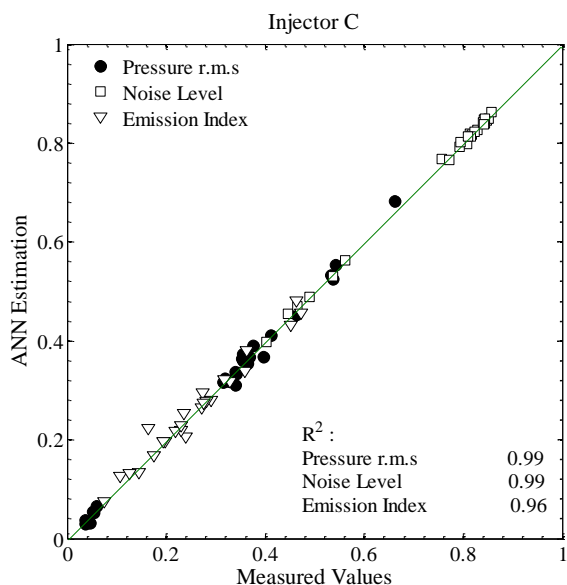


Figure 12- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type C, using the ANN type γ

شکل ۱۲- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط شبکه عصبی گاما در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع C

جدول ۴- مقادیر RMSE محاسبه شده مرتبط با پیش بینی پارامترهای احتراقی محفظه توسط شبکه عصبی نوع γ (مقادیر گزارش شده بی بعدند)

Table 4- Calculated RMSE's related to predicted values of combustor parameters using the neural network type γ (the reported quantities are dimensionless)

Injector Type	Pressure	Noise level	Emission index
Injector type A	0.0323	0.0544	0.0181
Injector type B	0.0535	0.0538	0.0262
Injector type C	0.0437	0.0309	0.0122
Injector type D	0.0419	0.0484	0.0156

استفاده از روش پاسخ سطح

روش های پاسخ سطح (RSM) مجموعه ای از تکنیک های قدرتمند آماری و ریاضی اند که در علوم مختلف کاربرد دارند [۲۳]. بر مبنای مطالعات پیشین [۲۴-۲۶]، روش پاسخ سطح توانایی مناسبی برای پیش بینی، مدل سازی و کاربرد در مسائل بهینه سازی دارد. کاربرد عمده RSM در مسائلی است که با توجه به شرایط مسئله، چند متغیر ورودی به طور مؤثری بر رفتار و تغییرات یک متغیر مورد بررسی تأثیر می گذارند. در این بخش از مطالعه، هدف، توسعه مدلی مناسب جهت توصیف ارتباط بین متغیرهای خروجی محفظه احتراق (سطح نویز محفظه، سطح تولید NO_x و میزان نوسانات فشار) و متغیرهای کنترل کننده سیستم احتراقی که ورودی های محفظه در نظر گرفته شده اند (نسبت هم آری و دبی جریان سوخت ثانویه) است. در حالت کلی، این رابطه به صورت معادله (۱) توصیف می شود:

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p) + \varepsilon \quad (1)$$

در رابطه (۱)، y متغیر پاسخ است (که در مطالعه حاضر هر کدام از متغیرهای خروجی محفظه احتراق اند) که تغییرات و عملکرد آن مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p$ متغیرهای ورودی تأثیرگذار بر متغیر پاسخ اند که متغیرهای مشاهده نامیده می شوند. ε خطای مدل سازی است. تابع f ، که توصیف کننده رفتار متغیر پاسخ است، می تواند یک تابع غیر خطی و یا یک چند جمله ای از مرتبه دلخواه باشد. در این میان، مدل های پاسخ سطح مبتنی بر چند جمله ای، توصیف پذیری ساده تری نسبت به سایر توابع دارند. رابطه (۲) نشان دهنده یک چند جمله ای پاسخ سطح مرتبه ۲ است که در مطالعه حاضر استفاده شده است:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن x_1 و x_2 در واقع متغیرهای ورودی محفظه اند و β_i ضرایب چند جمله ای پاسخ سطح است. شکل ماتریسی عبارت (۲) را می توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

که در آن Y ماتریسی $(n \times 1)$ از بردار مشاهدات است، ε بردار $(n \times 1)$ از خطای تصادفی در n متغیر از مشاهدات است. X ماتریسی با ابعاد $(n \times n_p)$ است، که در آن n_p تعداد ضرایب معادله جبری توصیف کننده روش پاسخ سطح است. برای یک مدل مرتبه دوم با تعداد p متغیر ورودی، تعداد ثابت های پاسخ سطح معادل $\frac{(p+1)(p+2)}{2!}$ خواهند بود. β برداری به ابعاد $(n_p \times 1)$ است، که محتوی ضرایب معادله جبری است. ماتریس X برای مدل مرتبه ۲ با تعداد n مشاهده به شرح زیر است:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{11}^2 & x_{11}x_{21} & x_{21}^2 \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{12}^2 & x_{12}x_{22} & x_{22}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1i} & x_{2i} & x_{1i}^2 & x_{1i}x_{2i} & x_{2i}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{1n}^2 & x_{1n}x_{2n} & x_{2n}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ماتریس ضرایب β با رویکرد یافتن بردار حداقل مربعات برای ε به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

در این مطالعه، برای یافتن مدل پاسخ سطح مبتنی بر چندجمله‌ای مطلوب جهت پیش‌بینی پارامترهای احتراق و با هدف کمینه‌کردن خطای پیش‌بینی، مدل‌های مرتبه اول تا مرتبه چهار از پاسخ سطح مبتنی بر چندجمله‌ای مورد آزمون قرار گرفت. برای پی‌ریزی مدل‌های موردنظر و اعتبارسنجی عملکرد آن‌ها، از روش k-fold استفاده شد. مجموعه داده‌های ثبت‌شده مرتبط با محفظه احتراق آزمایشگاهی قبل از پی‌ریزی مدل پاسخ سطح، بی‌بعد شده‌اند تا بتوان نتایج حاصل از اعتبارسنجی پیش‌بینی پارامترهای احتراق توسط این روش را با یکدیگر مقایسه کرد. این فرایند بی‌بعدسازی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که داده‌های حاصله همگی در بازه ۰ تا ۱ قرار بگیرند. در فرایند مدل‌سازی مشخص شد که در بین پارامترهای محفظه، خطای جذر میانگین مربعات مربوط به پیش‌بینی سطح نوسانات فشار از دیگر پارامترهای محفظه بیشتر است. در شکل ۱۴، روند تغییرات خطای اعتبارسنجی (خطای جذر میانگین مربعات محاسبه‌شده مرتبط با پیش‌بینی سطح نوسانات فشار محفظه) برای هریک از مدل‌های مرتبه یک تا چهار از RSM نمایش داده شده است.

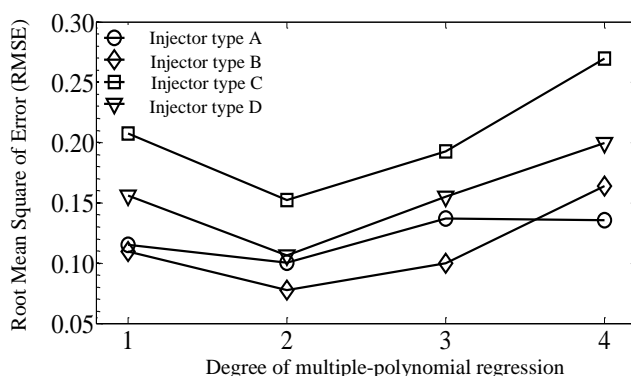


Figure 14- Root Mean Square of Error (RMSE) calculated based on the predicted values of $P_{r.m.s}$ using various degrees of Multiple Polynomial Regression considering different injector types A, B, C and D

شکل ۱۴- خطای جذر میانگین مربعات محاسبه‌شده مرتبط با پیش‌بینی سطح نوسانات فشار در مدل‌های مختلف RSM (از مرتبه یک تا چهار)، برای انژکتورهای نوع A, B, C و D

همان‌طور که از شکل ۱۴ قابل درک است، خطای پیش‌بینی از مدل مرتبه یک تا دو سیر نزولی دارد و پس از آن، تا مدل مرتبه چهار، افزایش می‌یابد. کمینه خطای مرتبط با پیش‌بینی سطح نوسانات فشار، در مدل پاسخ مرتبه دو رخ می‌دهد. علت این است که با افزایش مرتبه RSM، مدل موردنظر دچار بیش‌برازش^۱ شده و در فرایند اعتبارسنجی، کارایی مناسبی از خود نشان نمی‌دهد. به بیانی دیگر، با افزایش درجه چندجمله‌ای مدل RSM به کار گرفته شده، مدل حاصل داده‌های انتخاب‌شده برای فرایند آموزش را با دقت بالایی می‌تواند پیش‌بینی کند. حال آنکه، در مرحله اعتبارسنجی، در خصوص پیش‌بینی داده‌هایی که در فرایند آموزش استفاده نشده‌اند، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. شکل ۱۴، همچنین، نشان می‌دهد که برای تمام مدل‌های RSM استفاده‌شده در این مطالعه، مقدار خطای جذر میانگین مربعات محاسبه‌شده برای پیش‌بینی سطح نوسانات فشار ایجادشده با انژکتورهای C و D بزرگ‌تر از خطای پیش‌بینی مربوط به انژکتورهای A و B است. این مسئله می‌تواند به دلیل رفتار به‌شدت پیچیده و غیرخطی شعله‌های تشکیل‌شده در شرایط استفاده از انژکتورهای C و D (انژکتورهایی که دارای انحراف در پاشش سوخت نسبت به راستای مرکزی‌اند) باشد. در واقع، همان‌گونه که در مطالعات قبلی [۸،۹] گفته شده، پاشش سوخت ثانویه به درون ناحیه چرخش داخلی (IRZ)^۲ شعله، جهت فرونشاندن نوسانات احتراق، کارایی زیادی دارد.

1. Over-Fitting
2. Inner Recirculation Zone (IRZ)

به عبارتی دیگر، پاشش سوخت ثانویه از راستای مرکزی انژکتور و از مرکز نازل چرخشی (بدون انحراف از راستای مرکزی) به درون IRZ موجب فرونشاندن اختلالات سرعت در اطراف ناحیه IRZ می‌شود [۹،۸] (اتفاقی که در شعله‌های تشکیل شده در شرایط پاشش سوخت ثانویه بدون انحراف از راستای مرکزی با انژکتورهای A و B می‌افتد). این تضعیف اختلالات سرعت نیز، باعث کاهش اغتشاشات جبهه شعله و نوسانات حرارت آزاد شده از شعله می‌شود. در نتیجه، پاشش سوخت ثانویه بدون انحراف از راستای مرکزی (پاشش با انژکتورهای A و B) موجب تضعیف جمله آنتروپی در منبع صدای آکوستیک می‌شود. در مقابل، در شرایط استفاده از پاشش سوخت ثانویه همراه با انحراف (انژکتورهای C و D)، به دلیل پاشش از راستایی خارج از راستای مرکزی انژکتور و خارج از راستای مرکزی تویی مشعل به درون IRZ، سطح نوسانات فشار افزایش می‌یابد و در برخی موارد برخاستگی شعله^۱ ایجاد می‌شود. به بیانی دیگر، در شرایط پاشش سوخت ثانویه همراه با انحراف نسبت به راستای پاشش از مرکز انژکتور^۲، به خصوص زمانی که از مقادیر بالای نرخ پاشش سوخت استفاده می‌شود ($Q_{sec} \geq 0.3$ لیتر بر دقیقه)، به دلیل پاشش نامناسب سوخت به درون IRZ حاصل از شعله اصلی، حرکت ساختارهای چرخشی با مقیاس بزرگ^۳ در ناحیه IRZ به-جای آن که تضعیف شود، تقویت می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که تأثیر ساختارهای چرخشی با مقیاس بزرگ^۴ بر روی اغتشاشات جبهه شعله شدیدتر شود [۹،۸]. به دلیل افزایش شدت حرکت ساختارهای چرخشی با مقیاس بزرگ، جملات آنتروپی در منبع صدای آکوستیک تقویت می‌شوند [۹،۸]. در نتیجه، سطح نویز تولید شده حاصل از احتراق در مقایسه با شرایط پاشش بدون انحراف (انژکتور A و B) افزایش می‌یابد. به همین شکل، سطح نوسانات فشار تولید شده در شعله‌های حاصل از پاشش همراه با انحراف (انژکتورهای C و D) نیز از میزان مربوط به انژکتورهای A و B بیشتر خواهد بود. رفتار به شدت نوسانی شعله در شرایط پاشش همراه با انحراف که با افزایش شدید و غیرقابل پیش‌بینی سطح نوسانات فشار (به خصوص در شرایط افزایش نسبت هم‌ارزی و افزایش نرخ پاشش سوخت ثانویه) همراه است، باعث می‌شود که دقت پیش‌بینی سطح نوسانات فشار توسط تمام مدل‌های RSM کاهش یابد. این می‌تواند دلیلی باشد بر بالاتر بودن خطای این پیش‌بینی در شرایط استفاده از انژکتورهای C و D (که پاشش سوخت ثانویه را همراه با انحراف از مرکز انجام می‌دهند) نسبت به انژکتورهای A و B (که پاشش سوخت ثانویه را از راستای مرکزی مشعل انجام می‌دهند) که در شکل ۱۴ دیده می‌شود. مدل RSM مرتبه دو با ایجاد مصالحه مناسب بین داشتن دقت پیش‌بینی قابل قبول و در عین حال عدم رخداد بیش برآزش، به عنوان مدل مناسب جهت توصیف ارتباط بین پارامترهای احتراق، در مطالعه حاضر انتخاب شده است.

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸، نتایج استفاده از مدل RSM مرتبه دوم، برای پیش‌بینی پارامترهای احتراقی محفظه با مقادیر اندازه‌گیری شده این پارامترها مقایسه شده است. همچنین، مقادیر محاسبه شده ضریب تعیین (R^2) مربوط به پیش‌بینی پارامترهای احتراقی نیز در این شکل‌ها ارائه شده است. همانند بحثی که قبلاً مطرح شد، در این نمودارها فاصله نقاط مختلف از خط قطری ترسیم شده در این شکل‌ها بیانگر میزان خطای پیش‌بینی است. در عین حال، می‌توان گفت که برای نقاطی که به خط قطری نزدیک‌اند، دقت پیش‌بینی بسیار بالا بوده است.

در جدول ۵، خطای جذر میانگین مربعات مربوط به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق با روش RSM مرتبه ۲ ارائه شده است. نتایج در این جدول نیز نشان می‌دهند که خطای پیش‌بینی برای پارامتر میزان آلاینده NO_x از دیگر پارامترهای احتراقی کمتر است. با توجه به مقادیر محاسبه شده خطای جذر میانگین مربعات، می‌توان گفت که RSM مرتبه ۲ عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی پارامترهای احتراقی داشته است. به طور کلی، روش پاسخ سطح مرتبه دوم توانسته پارامترهای احتراق را در محفظه مذکور با خطایی کمتر از ۰/۱۶۰۸ پیش‌بینی کند.

1. Flame Lift-off
2. Secondary Fuel Injection with Offset
3. Large Scale Vortical Motion
4. Large Scale Vortical Structures

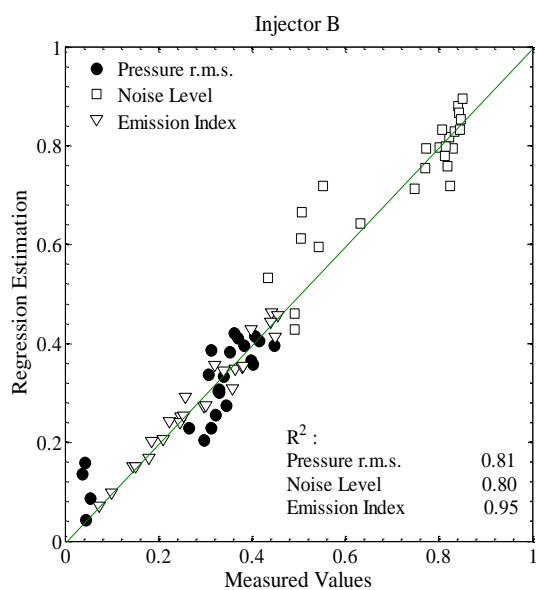


Figure 16- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type B, using the MPR technique
 شکل ۱۶- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط مدل RSM مرتبه دو (همان MPR مرتبه ۲) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع B

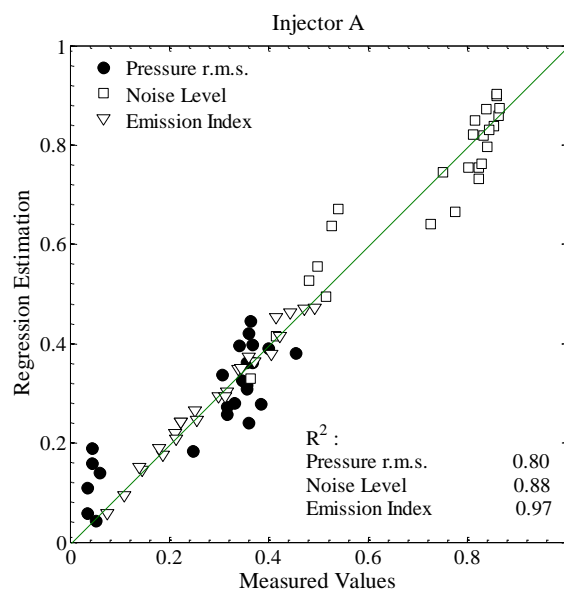


Figure 15- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type A, using the MPR technique
 شکل ۱۵- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط مدل RSM مرتبه دو (همان MPR مرتبه ۲) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع A

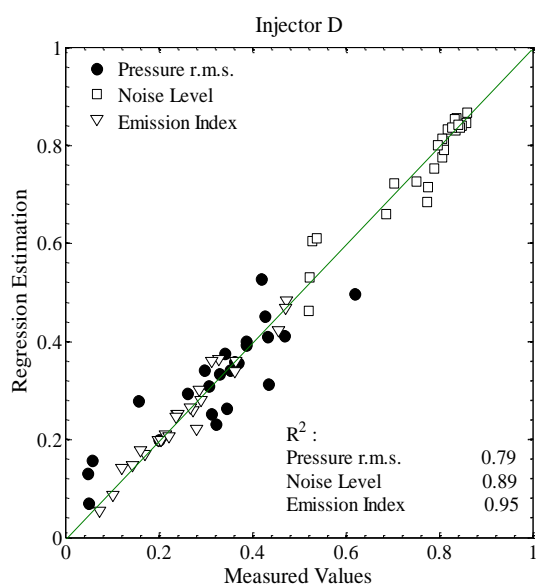


Figure 18- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type D, using the MPR technique
 شکل ۱۸- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط مدل RSM مرتبه دو (همان MPR مرتبه ۲) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع D

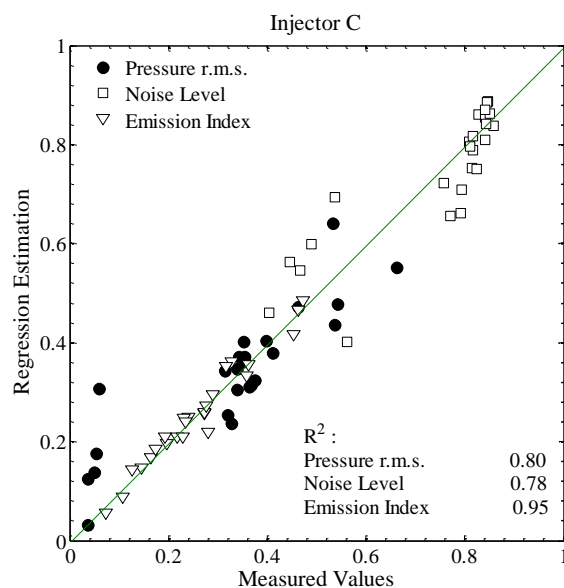


Figure 17- Predicted and measured values of combustor parameters, for injector type C, using the MPR technique
 شکل ۱۷- مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای محفظه احتراق توسط مدل RSM مرتبه دو (همان MPR مرتبه ۲) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای انژکتور نوع C

همان طور که از شکل های ۱۵ تا ۱۸ قابل استنباط است، پراکندگی نقاط مرتبط با پیش بینی پارامترهای سطح نوسانات فشار و سطح نویز محفظه از میزان آلاینده NO_x بیشتر است. همچنین، مطابق با جدول ۵، میزان خطای پیش بینی داده های نوسانات فشار و سطح نویز محفظه (برای تمام انژکتورهای A، B، C و D)، به وسیله روش چندجمله ای پاسخ سطح، بیش از خطای پیش بینی برای سطح آلاینده NO_x است.

جدول ۵- مقادیر RMSE محاسبه شده برای پیش بینی توسط RSM مرتبه ۲ (مقادیر گزارش شده بی بعدند)

Table 5- Calculated RMSE's related to predicted values of combustor parameters using the RSM with degree of 2 (the reported quantities are dimensionless)

Injector Type	Pressure	Noise level	Emission index
Injector type A	0.1004	0.0974	0.0324
Injector type B	0.0775	0.1064	0.0451
Injector type C	0.1522	0.1608	0.0391
Injector type D	0.1062	0.0609	0.0418

پس می توان گفت که توانایی مدل RSM مرتبه دو در پیش بینی میزان آلاینده NO_x محفظه بیشتر از توانایی آن در پیش بینی میزان نویز و سطح نوسانات فشار محفظه بوده است. این امر می تواند به دلیل رفتار به شدت غیرخطی در تغییرات دو پارامتر میزان نویز و سطح نوسانات فشار در اثر تغییر نسبت هم آرزوی (ϕ) باشد. با افزایش ϕ و Q_{sec} ، این رفتار غیرخطی تشدید می شود و خصوصاً در شعله هایی که با انژکتورهای C و D (همراه با انحراف در پاشش سوخت ثانویه) ایجاد می شوند این پیچیدگی بیشتر است (مراجعه شود به شکل های ۵ تا ۷ در مطالعه حاضر و شکل های ۱۰ تا ۱۵ از مرجع [۸] که جهت اختصار در مطالعه حاضر تکرار نشدند). به بیانی دیگر، با افزایش ϕ و Q_{sec} ، به دلیل تشدید اثرات مرتبط با اندرکنش فواره^۱ سوخت ثانویه و ناحیه چرخش داخلی (IRZ)، رفتار مربوط به اغتشاشات جبهه شعله و نوسانات حرارت آزاد شده بسیار پیچیده تر می شود. این مسئله خود سبب می شود که رفتار تغییرات سطح نوسانات فشار و میزان نویز اندازه گیری شده از محفظه بر حسب تغییرات ϕ و Q_{sec} بسیار پیچیده و غیرقابل پیش بینی بشود. این رفتار پیچیده و غیرخطی در شرایط پاشش سوخت همراه با انحراف (در مورد انژکتورهای C و D که پاشش سوخت ثانویه را همراه با انحراف از مرکز انجام می دهند) شدت و پیچیدگی بیشتری نیز می یابد. در نتیجه، دقت پیش بینی سطح نوسانات فشار و میزان نویز توسط مدل RSM نسبت به دقت پیش بینی پارامتر میزان آلاینده NO_x کاهش یابد.

برای اطمینان از درستی مدل رگرسیونی که براساس تحلیل احتمالاتی خطاها به دست می آید، خطاهای محاسبه شده حاصل از تفاوت مقادیر واقعی با مقادیر پیش بینی شده باید از توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس ثابت تبعیت کنند [۲۷]. بدین منظور از بافت نگار^۲، نمودار چندک-چندک^۳ و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۴ برای مدل های پیش بینی مختلف به منظور تشخیص درستی مدل براساس خطاها استفاده می شود. شرح نتایج برای انژکتور نوع D در شکل های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می شود. از بافت نگار می توان دریافت که فرض گاوسی بودن توزیع خطاها و صفر بودن میانگین خطای پیش بینی برقرار بوده است. از شکل ۲۰، که نمودار چندک-چندک خطاهاست، نیز می توان نتیجه گرفت که، با توجه به اینکه پراکنش حول خط صورت گرفته است، فرض گاوسی بودن خطاهای به دست آمده از برازش مدل معتبر است و میانگین خطای به دست آمده به صورت بامعنایی نزدیک به صفر است. همچنین، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف به صورت آماری فرض گاوسی را با مقدار احتمال^۵ ۰/۲۵ مورد تایید قرار می دهد. برای تمام مدل های پیش بینی رگرسیونی دیگر نیز با استفاده از این نمودارها و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نتایج مشابهی به دست آمد که به جهت اختصار ذکر نشده اند. در شکل ۲۱، با استفاده از مدل RSM مرتبه دو، مبتنی

1. Jet
2. Histogram
3. Quatile-Quantile plot
4. Kolmogorov-Smirnov Test
5. P-value

بر چندجمله‌ای، نمودار خطای پیش‌بینی مرتبط با داده‌های سطح آلاینده NOx برای انژکتور D ارائه شده است. در واقع، برای تمام نقاط عملکردی محفظه، که طبق جدول ۳ طبقه‌بندی شده بودند، میزان سطح آلاینده NOx پیش‌بینی شده و مقدار خطای مربوط به اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین خطای پیش‌بینی در نقطه عملکردی ۲۳ (طبق طبقه‌بندی انجام شده در جدول ۳) که مرتبط است با شرایط عملکردی $\phi = 0.8$ و میزان پاشش سوخت ثانویه $4/2$ لیتر بر دقیقه اتفاق افتاده است. میزان این خطا حدوداً 0.118 است. نمودارهای مشابهی در خصوص دیگر پارامترهای خروجی محفظه احتراق و در مورد سایر انژکتورها ایجاد شده‌اند که به جهت اختصار در اینجا ذکر نشده‌اند.

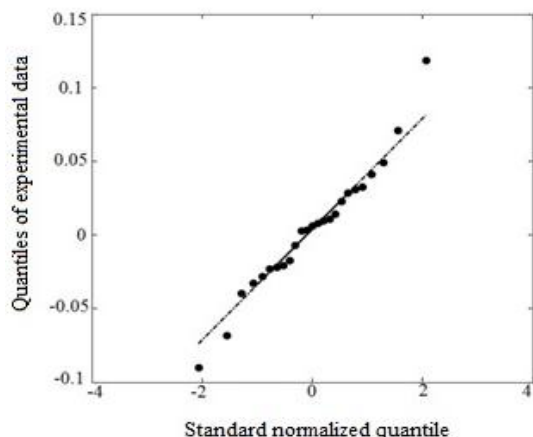


Figure 20- Quantile-Quantile plot of prediction error distribution for the NOx emission data related to the injector type D

شکل ۲۰- نمودار چندک-چندک از توزیع خطای پیش‌بینی برای داده‌های سطح آلاینده NOx مرتبط با انژکتور نوع D

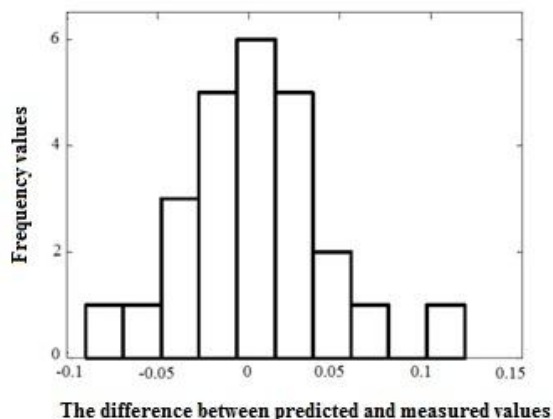


Figure 19- Histogram of prediction error using the MPR with degree of 2 for the NOx emission data related to the injector type D

شکل ۱۹- بافت‌نگار مربوط به خطای پیش‌بینی توسط مدل پاسخ سطح مرتبه ۲ برای داده‌های سطح آلاینده NOx مرتبط با انژکتور نوع D

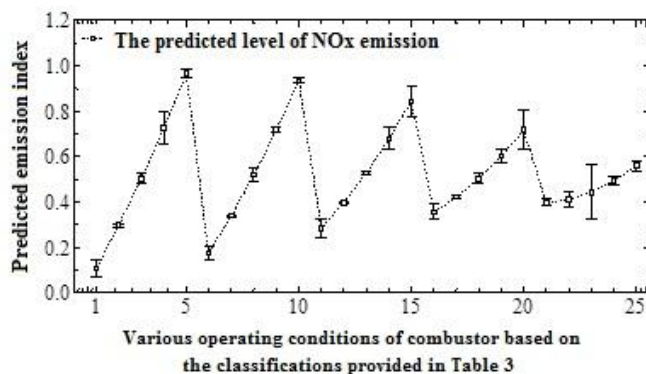


Figure 21- The predicted NOx emission and the related errors for various operating conditions (considering Table 3) for the injector type D

شکل ۲۱- سطح آلاینده NOx پیش‌بینی شده و خطای متناظر با هر نقطه عملکردی (طبق جدول ۳) مرتبط با انژکتور نوع D

در مجموع، با مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری روش شبکه عصبی پرسپترون (MLP)^۱ و روش پاسخ سطح (RSM) مرتبه دو (همان‌گونه که در مقایسه شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ و ۱۵ تا ۱۸ دیده می‌شود) و با در نظر گرفتن نتایج جداول ۴ و ۵،

1. Multi-Layer Perceptron

می‌توان نتیجه گرفت که روش MLP توانایی بیشتری در تخمین پارامترهای مختلف احتراقی، در مقایسه با روش RSM، از خود نشان می‌دهد. این مسئله می‌تواند به دلیل آن باشد که روش RSM مرتبه ۲ مبتنی بر چندجمله‌ای، اساساً یک روش خطی است، در حالی که در شبکه عصبی پرسپترون به کار برده شده در مطالعه حاضر، از توابع تبدیل غیرخطی (تابع سیگموید^۱) استفاده شده است. در نتیجه، روش شبکه عصبی MLP توانایی بیشتری در پیش‌بینی ارتباط به شدت غیرخطی بین پارامترهای محفظه احتراق با شعله پایدار شده چرخشی (که در مطالعه حاضر بررسی شده است) خواهد داشت.

نوآوری این پژوهش در آن است که تا کنون بر روی پارامترهای میدان احتراقی این محفظه احتراق مغشوش (همراه با پاشش سوخت ثانویه)، که در مطالعه حاضر بررسی شده، هیچ‌گونه مطالعه داده‌کاوی صورت نگرفته و انجام این مطالعه بر روی محفظه احتراق مذکور برای اولین بار انجام شده است. در مطالعات آینده، می‌توان با ایجاد یک شبکه عصبی پیچیده‌تر تعداد پارامترهای ورودی را بیشتر کرد. فرضاً، می‌توان از تصویر شعله^۲ به عنوان یک پارامتر ورودی (افزون بر پارامترهای دیگر) برای سیستم داده‌کاوی (شبکه عصبی) استفاده کرد که در بررسی‌های آینده، توسط نویسندگان تحقیق حاضر، انجام خواهد شد. به بیانی دیگر، اطلاعات مربوط به تصویر شعله و ویژگی‌های استخراج شده از تصویر شعله (شامل ویژگی‌های هندسی و نورتایی) به عنوان ورودی‌های جدید (اضافه بر دیگر ورودی‌ها) به شبکه عصبی داده خواهد شد. فرایند استخراج ویژگی از تصویر شعله می‌تواند شامل این موارد باشد: تبدیل کانال تصاویر ثبت شده شعله، میانگین‌گیری از تصاویر شعله، برش تصاویر و کادربندی، افزایش وضوح و کاهش نویز تصاویر، و نهایتاً استخراج ویژگی‌های هندسی و نورتایی مرتبط با شعله. برخی از این ویژگی‌های استخراج شده از تصویر شعله می‌توانند شامل موقعیت مرکز روشنایی تصویر شعله، طول شعله^۳ و محیط تصویر شعله باشند.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با به کارگیری دو رویکرد داده‌کاوی مختلف، ارتباط بین مقدار سطح آلاینده NO_x ، میزان نویز، سطح نوسانات فشار در یک محفظه احتراق آزمایشگاهی، با کاربرد در توربین‌های گازی نیروگاهی، با تغییرات پارامترهایی هم چون نسبت هم‌ارزی کلی محفظه (ϕ) و میزان دبی پاشش سوخت ثانویه، بررسی شد. نوآوری این پژوهش در آن است که تاکنون بر روی پارامترهای میدان احتراقی این محفظه احتراق مغشوش [۸] هیچ‌گونه مطالعه داده‌کاوی صورت نگرفته و انجام این مطالعه بر روی محفظه احتراق مذکور برای اولین بار انجام شده است. برای دستیابی به این هدف از الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون چندلایه که زیرمجموعه‌ای از روش‌های هوش مصنوعی است و روش پاسخ سطح مبتنی بر چندجمله‌ای (که یک روش تجزیه و تحلیل آماری است) استفاده شد. در این راستا پارامترهای سطح نویز تولید شده در محفظه، میزان نوسانات فشار و سطح آلاینده NO_x به عنوان متغیرهای خروجی اندازه‌گیری شده از محفظه و پارامترهای نسبت هم‌ارزی کلی (ϕ) و نرخ پاشش سوخت ثانویه (Q_{sec})، به عنوان متغیرهای ورودی محفظه احتراق آزمایشگاهی با شعله پایدار شده چرخشی، در نظر گرفته شده‌اند.

در بررسی حاضر، داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی حاصل از چهار نوع انژکتور پاشش سوخت ثانویه با ساختار هندسی و طراحی متفاوت، و شرایط عملکردی محفظه احتراق با نسبت هم‌ارزی کلی سوخت-هوا در محدوده $\phi = 0.7 \sim 0.9$ و نرخ جریان سوخت ثانویه در بازه $Q_{sec} = 0.4 \sim 0.6$ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده‌اند. جهت ارزیابی خطای پیش‌بینی در روش‌های داده‌کاوی مذکور، مقدار خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه شد. بر اساس همین مقادیر محاسبه شده خطا، توانایی دو روش داده‌کاوی شبکه عصبی (MLP) و پاسخ سطح مبتنی بر چندجمله‌ای (RSM) جهت پیش‌بینی پارامترهای خروجی محفظه با یکدیگر مقایسه شد. در روند بررسی‌ها از دو شبکه عصبی (MLP) با معماری‌های متفاوت استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی با ساختار دو زیرلایه مخفی و ۱۰

1. Sigmoid Transfer Function
2. Direct Flame Image
3. Flame Length

نورون در هرلایه، در مقایسه با نوع دیگر شبکه عصبی با ساختار تک‌لایه و تعداد ۱۰ نورون، توانایی بالاتری در پیش‌بینی پارامترهای محفظه احتراق از خود به‌نمایش می‌گذارد. این بدان علت است که شبکه عصبی با ساختار ۲ زیرلایه، به‌دلیل داشتن تعداد واحدهای پردازنده بیشتر (تعداد نورون‌های بیشتر)، نسبت به شبکه عصبی با ساختار تک‌لایه، توانایی بیشتری (از نظر کم‌تر بودن خطای پیش‌بینی) در مدل‌سازی پارامترهای احتراقی و تقریب ارتباط بین آن‌ها دارد.

همچنین، نشان داده شد که در هر دو روش شبکه عصبی و پاسخ سطح، دقت پیش‌بینی سطح آلاینده NO_x بالاتر از دقت پیش‌بینی پارامترهای میزان نویز و سطح نوسانات فشار محفظه است. این مسئله می‌تواند به‌دلیل رفتار به‌شدت غیرخطی در تغییرات دو پارامتر میزان نویز و سطح نوسانات فشار در اثر تغییرات نسبت هم‌ارزی (ϕ) و میزان دبی پاشش سوخت ثانویه (Q_{sec}) باشد. رفتار غیرخطی مذکور، با افزایش ϕ و Q_{sec} ، شدیدتر می‌شود و این پیچیدگی، به‌ویژه در شعله‌هایی که با انژکتورهای C و D (انژکتورهای پاشش سوخت ثانویه دارای انحراف نسبت به راستای مرکزی) همراه با مقادیر بالای دبی سوخت ثانویه تشکیل می‌شوند، سبب می‌شود که دقت پیش‌بینی سطح نویز و میزان نوسانات فشار حاصل از این شعله‌ها کاهش یابد.

منابع

1. A. Chaparro, E. Landry and B. Cetegen, "Transfer Function Characteristics of Bluff-Body Stabilized Conical V-Shaped Premixed Turbulent Propane-Air Flames," *Combustion and Flame*, 145, 2006, pp. 290-299.
2. J. Broda, S. Seo, R. Santoro, G. Shirhattikar and V. Yang, "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector," *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, 1998, pp. 1849-1856.
3. S. Candel, "Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, 2002, pp. 1-28.
4. A. Dowling and S. Stow, "Acoustic Analysis of Gas Turbine Combustors," *Journal of Propulsion and Power*, 19, No. 5, 2003, pp. 751-764.
5. S. Ducruix, T. Schuller, D. Durox and S. Candel, "Combustion Dynamics and Instabilities: Elementary Coupling and Driving Mechanisms," *Journal of Propulsion and Power*, 19, No. 5, 2003, pp. 722-734.
6. L. Rayleigh, *The Theory of Sound*, New York, Dover, 1945.
7. J. Lee, K. Kim and D. Santavicca, "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System using Secondary Fuel Injection," *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, No.1, 2000, pp. 739-746.
8. R. Riazi, M. Farschi, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, "An Experimental Study on Combustion Dynamics and NOx Emission of a Swirl Stabilized Combustor with Secondary Fuel Injection," *Journal of Thermal Science and Technology*, 5, No. 2, 2010, pp. 266-281.
9. M. Shimura, M. Tanahashi, G. Choi and T. Miyauchi, "Large-Scale Vortical Motion and Pressure Fluctuation in Noise-Controlled Swirl-Stabilized Combustor," *Journal of Thermal Science and Technology*, 4, No. 4, 2009, pp. 494-506.
10. S. Tachibana, L. Zimmer, Y. Kurosawa and K. Suzuki, "Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection Coupling with Chemiluminescence Imaging Technique," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2007, pp. 3225-3233.
11. M. Tanahashi, S. Inoue, M. Shimura, S. Taka, G. Choi and T. Miyauchi, "Reconstructed 3D Flame Structures in Noise-Controlled Swirl-Stabilized Combustor," *Experiments in Fluids*, 45, No. 3, 2008, pp. 447-460.
12. M. Tanahashi, S. Murakami, G. Choi, Y. Fukuchi and T. Miyauchi, "Simultaneous CH-OH PLIF and Stereoscopic PIV Measurements of Turbulent Premixed Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, 2005, pp. 1665-1672.
13. M. Tanahashi, S. Murakami, T. Miyauchi and G. Choi, "Control of Oscillating Combustion and Measurements of Turbulent Flames," *Proceedings of 5th Symposium on Smart Control of Turbulence*, 2004, pp. 75-84.
14. G. Choi, M. Tanahashi and T. Miyauchi, "Control of Oscillating Combustion and Noise Based on Local Flame Structure," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, No. 2, 2005, pp. 1807-1814.
15. M. Tanahashi, S. Tsukinari, T. Saitoh, T. Miyauchi, G. Choi, M. Ikame, T. Kishi, K. Harumi and K. Hiraoka, "On the Sound Generation and its Controls in Turbulent Combustion Field," *Proceedings of 3rd Symposium on Smart Control of Turbulence*, 2002, pp. 149-160.
16. J. Keller and I. Hongo, "Pulse Combustion: The Mechanisms of NOx Production," *Combustion and Flame*, 80, 1990, pp. 219-237.
17. A. Sanz, J. Ballester, R. Hernandez and L. Cerecedo, "Advanced Monitoring of Industrial Burners Based on Fluctuating Flame Signals," *Fuel*, 87, No. 7, 2008, pp. 1063-1075.
18. J. Ballester, R. Hernandez, A. Sanz, A. Smolarz, J. Barroso and A. Pina, "Chemiluminescence Monitoring in Premixed Flames of Natural Gas and its Blends with Hydrogen," *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, No. 2, 2009, pp. 2983-2991.

19. A. Baris and M. Suresh, Turbulent Premixed Flame Modeling using Artificial Neural Networks Based Chemical Kinetics, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, No. 1, 2009, pp. 1605-1611.
20. A. Chatzopoulos and S. Rigopoulos, "A Chemistry Tabulation Approach Via Rate-Controlled Constrained Equilibrium (RCCE) and Artificial Neural Networks (ANNs), with Application to Turbulent non-Premixed CH₄/H₂/N₂ Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, No. 1, 2013, pp. 1465-1473.
21. T. Hastie, R. Tibshirani and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Springer, New York, 2009.
22. M. Hagan, H. Demuth and M. and Beale, *Neural Network Design*, Boston, PWS Publishing, 1996
23. M. Kathleen, N. Carley and J. Kamneva, *Response Surface Methodology*, Pittsburgh, United States, Carnegie Mellon University, 2004
24. S. Vianna and R. Cant, "Explosion Pressure Prediction via Polynomial Mathematical Correlation Based on Advanced CFD Modelling," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 2012, pp. 81-89.
25. A. Yamaguchi and Y. Tajima, "A numerical Study of Radiation Heat Transfer In Sodium Pool Combustion and Response Surface Modeling of Luminous Flame Emissivity," *Nuclear Engineering and Design*, 236, 2006, pp. 1179-1191.
26. K. Chiang and F. Chang, "Application of Response Surface Methodology in the Parametric Optimization of a Pin-Fin Type Heat Sink," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 2006, pp. 836-845.
27. A. Gelman and J. Hill, *Data Analysis using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*, New York, Cambridge University Press, 2006.

English Abstract

Employment of Statistical and Artificial Intelligence Techniques for Prediction of Combustion Dynamics in an Experimental Swirl-stabilized Combustor

Rouzbeh Riazi*, Ali Reza Torabi, Mohamad Asrardel, Maziar Shafae Roshani, Shidvash Vakilipour, Hadi Zare, Hadi Veisi

Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
(Received:, Received in revised form:, Accepted:,)

In the present work, the relations between three output quantities measured in an experimental combustor and two input quantities of overall equivalence ratio (ϕ) and secondary fuel injection rate (Q_{sec}) were studied. The three measured output quantities of the combustor are the amount of NO_x emission, noise level, and the level of pressure oscillations generated by the combustion field. The experimental combustor has certain applications in power plant gas turbines. In order to study the relations between the measured output and input quantities of the combustor, two different data mining approaches were utilized. Specifically, in this research, Multilayer Perceptron (MLP) Neural Network and Response Surface Method (RSM) techniques were employed to provide an estimation of the nonlinear relationship between the inputs and outputs of the combustor. The related experiments were already performed using four different types of secondary fuel injectors (with different designs) for an overall equivalence ratio between $\phi = 0.7 \sim 0.9$, along with different amounts of secondary fuel injection rate in the range of $Q_{sec} = 0.6 \sim 4.2$ l/min. The results show that, in general, both the MLP neural network and RSM approaches have good predicting capability for estimation of noise level, level of pressure oscillations, and NO_x emission. However, the degree of agreement between the predicted and measured values would even be enhanced for the case of NO_x emission. Also, comparing the two data mining methods, the results indicate that the MLP neural network has better prediction ability for estimation of various combustor parameters than the RSM, for the cases of different injectors.

Keywords: Swirl-stabilized Combustor, Secondary Fuel Injection, Artificial Neural Network, Polynomial Response Surface