فصلنامهٔ علمی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

بهبود روش شناسایی موتور احتراق داخلی با هدف بهره‌گیری در نگاشت الگوی پایه

سمانه سلطانعلی‌زاده[۱]، وحید اصفهانیان[۲*]، محمدرضا حائری یزدی[۳]، سیامک علیزاده‌نیا[۴]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، s.soltanalizadeh@ut.ac.ir

[۲] عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، evahid@ut.ac.ir

[۳] عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، myazdi@ut.ac.ir

[۴] کارشناس ارشد مکانیک، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، s_alizadehnia@ipco.com

* نویسندهٔ مسئول

چکیده

نگاشت موتورهای احتراق داخلی پیشرفته بسیار پیچیده است و نیاز به‌صرف زمان و هزینهٔ هنگفت بر روی بستر آزمون دارد. پیچیدگی این امر نه فقط به دلیل تعداد زیاد متغیرهای نگاشت، بلکه به‌دلیل بهینه‌سازی همزمان مصرف سوخت و انتشار آلاینده است. این امر اساساً نگاشت را به مسأله بهینه‌سازی چندمنظوره تبدیل می‌کند. علاوه براین، با افزایش تعداد متغیرهای تنظیمی، امکان نگاشت موتور، تنها با استفاده از بستر آزمون عملاً غیرممکن است؛ درنتیجه در این مقاله توسعه روش‌های نگاشت الگوی پایه با هدف دستیابی کامل به رفتار و درجات آزادی موتور احتراق داخلی به‌منظور کاهش زمان و هزینه نگاشت، بهبود دقت بهینه‌سازی و درنهایت بهبود راهبرد پایشی ارائه شده است. در راستای شناسایی الگوهای احتراق، جعبه ابزار الگوسازی به کمک روش‌های شناسایی هوشمند، توسعه یافته‌است و در راستای داده‌برداری بهینه، روش‌های طراحی آزمایش بررسی و متناسب با مساله پیش‌رو، روش مناسب با هدف پوشش سراسری و با کم‌ترین تعداد داده، انتخاب شده است. در این تحقیق، مطالعه برروی موتور ملی EF7 موجود در اتاق آزمون شرکت ایپکو انجام شده است و نشان داده‌شد که به کمک طراحی آزمون پیشرفته به روش سوبل و الگوسازی با بهره‌گیری از شبکه عصبی عمیق، می‌توان تعداد داده‌های آزمایشگاهی مورد نیاز را از ۵۵۰۰ داده به ۱۵۰۰ داده کاهش داد. درنهایت برای تعیین بهینه متغیرهای تنظیمی، الگو آموزش‌دیده، جایگزین موتور واقعی گردیده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۳۰ دی ۱۳۹۹

پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

نگاشت الگوپایه

بهینه‌سازی چندمنظوره

شناسایی هوشمند

بستر آزمون

طراحی آزمایش

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

قیمت سوخت در سال‌های اخیر به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است و از آنجایی‌که انتشار گازهای احتراق باعث آسیب زیستی می‌شود و اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان دارد، حد مجاز انتشار آلاینده‌ها توسط قوانین زیست محیطی محدود می‌شود. در چنین شرایطی مصرف‌کنندگان، خودروهای کارآمدتری را درخواست می‌کنند. برای پاسخ به این درخواست‌ها، پیچیدگی موتورهای احتراق داخلی به‌طور مداوم در حال افزایش است. در طول سی سال گذشته تقریباً تمام سامانه‌های پایش مکانیکی با سامانه‌های پایش برقی جایگزین شده‌اند برای مثال، سوخت‌آماها[1] با تزریق سوخت برقی جایگزین شده‌اند. از زمان ظهور تزریق سوخت برقی، تولیدکنندگان خودرو توانسته‌اند بهره‌وری سوخت و تولید توان را افزایش دهند و در راستای رسیدن به استاندارد آلاینده‌ها حرکت کنند. برای موتورهای دیزلی و بنزینی، فناوری‌های جدید مانند تزریق مستقیم، تزریق چندگانه، دریچه متغیر و گردش مجدد گازهای خروجی در راستای بهبود اقتصاد سوخت و کاهش انتشار گازهای آلاینده گسترش یافته‌اند. این فناوری‌ها منجر به سامانه‌هایی با درجه آزادی زیاد می‌شوند و موتور احتراق داخلی را از منظر معادلات ریاضی به یک سامانهٔ دینامیکی پیچیدهٔ غیرخطی تبدیل می‌کنند [۱].

در این حالت، سامانه مدیریت موتور باید با شناخت کافی از رفتار موتور، قابلیت مدیریت این پیچیدگی‌ها را داشته‌باشد. به‌همین دلیل امروزه فشار رقابت برای تولیدکنندگان در راستای توسعه و نگاشت[2] سامانه پایشی بالاتر است. الگوسازی موتور با هدف شناسایی رفتار موتور در شرایط مختلف و آشنایی با زوایای پنهان موتور و جایگزینی موتور مجازی با موتور واقعی با هدف بهبود عملکرد خودرو و کاهش زمان و هزینه، از جمله کارهایی است که در راستای پیشرفت فناوری خودرو در حال انجام است.

محققان بسیاری در طول دو دهه گذشته به الگوسازی موتورهای احتراق داخلی با هدف به کارگیری در توسعه پایشی و نگاشت پرداخته‌اند. در مرجع [۲] از الگو شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار جی‌تی‌پاور برای نگاشت بهره گرفته شده است و بهره‌گیری از الگوسازی به کمک شبکه عصبی در بهینه‌سازی آلاینده‌ها در مراجع [۳] و [۴] ارائه شده است. همچنین شرکت خودروسازی هیوندای و تویوتا به ترتیب در مراجع [۵] و [۶] به اهمیت الگوسازی در نگاشت موتورهای احتراق داخلی اشاره کرده‌اند. به گفته این دو شرکت خودروسازی با الگوسازی می‌توان ۸۰ درصد زمان و هزینه نگاشت را کاهش داد. همچنین نرم‌افزاهای تجاری Cameo–AVL و MBC-Matlab در مراجع [۷] و [۸] به مزایای نگاشت مبتنی بر الگو پرداخته‌اند. در این مقاله به بررسی روش‌های شناسایی موتورهای احتراق داخلی با هدف بهره‌گیری در نگاشت و توسعه راهبرد پایشی پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نگاشت

در راهبرد پایشی موتور توابعی تعریف شده‌اند که هرکدام محاسبات خاصی را انجام می‌دهند و خروجی محاسبات آنها در توابع دیگر و یا در راه‌اندازی عملگرها استفاده می‌شود. در این توابع با توجه به رفتار پیچیده و غیرخطی دینامیک موتور، تعدادی از متغیرهای مورد استفاده در توابع به‌صورت متغیرهای تنظیمی تعیین می‌شوند، یعنی مقدار آنها از محاسبات دیگر تعیین نمی‌شود؛ بلکه به صورت قراردادی برای اهدافی خاص کالیبره می‌شوند.

این متغیرها بسته به اهداف مورد نظر یا پیکربندی موتور مورد نظر تنظیم و به دو صورت عدد ثابت و نگاشت در منطق پایشی ذخیره می‌شوند. در صورتی که متغیر پایشی در تمام شرایط موتور مقدار ثابتی داشته باشد به‌صورت عدد ثابت ذخیره می‌شود. در صورتی که متغیر پایشی، براساس شرایط عملکردی موتور تغییر کند، به‌صورت نگاشتی از متغیرهای موثر ذخیره می‌شود.

متغیرها و نگاشت‌های ذخیره شده در منطق پایشی، دستورات پایشی مربوط به شرایط کاری مختلف موتور را تعیین و عملکرد سنسورها و عملگرها را تنظیم می‌کند. بدیهی است، برای به حداکثر رساندن عملکرد موتور، باید مقادیر متغیرها و نگاشت‌های موتور با دقت تنظیم شوند. فرآیند تعیین مقادیر بهینه برای نگاشت‌ها و متغیرهای موتور نگاشت موتور نامیده می‌شود. یکی از مراحل مهم در توسعه موتورهای احتراق داخلی را می‌توان به نگاشت موتور اختصاص داد. تنظیم بهینه متغیرهای تنظیمی برای دریافت گواهی‌نامه استاندارد با هدف کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها، تامین ایمنی موتور و خودرو و دستیابی به آسایش سرنشین و قابلیت رانندگی مناسب از اهداف نگاشت به شمار می‌آیند. نگاشت در موتور معمولاً با عنوان جدول جستجو[3] معرفی می‌شود.

نگاشت موتور یک روند تکراری، زمان‌بر، گران قیمت و پیچیده است. پیچیدگی این کار نه‌تنها به دلیل تعداد زیاد متغیرهای نگاشت، بلکه از مصالحه[4]بین بهره‌وری و انتشار آلاینده نیز به‌وجود می‌آید، که اساساً نگاشت را به یک مسأله بهینه‌سازی چندمنظوره تبدیل می‌کند. مطابق شکل ۱، در فرآیند نگاشت رایج، تنظیمات بهینه از طریق صدها آزمون سعی و خطا، به‌صورت دستی و برروی بستر آزمون انجام می‌شود. مهندسان در هر آزمون متغیرهای تنظیمی را بر اساس تجربه خود تنظیم کرده و سپس عملکرد موتور بررسی می‌شود و این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا نتیجه مطلوب حاصل شود.

---

[1] Carburetor

[2] Calibration

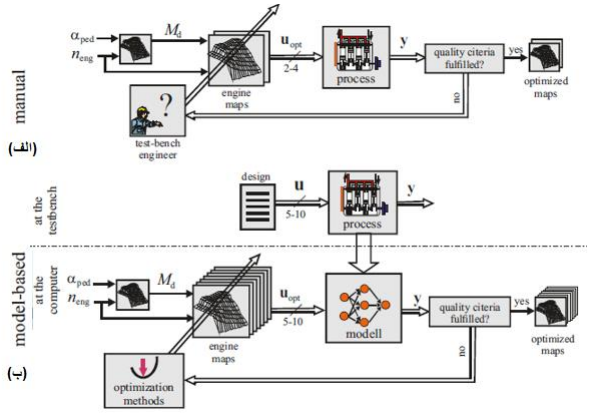
[3] Look-up Table

[4] Trade Off

امروزه فناوری موتورها به‌طور فزاینده‌ای در حال پیچیده‌شدن است که به متغیرهای قابل پایش بیشتر منجر می‌شود و بنابراین زمان توسعه روش پایش افزایش می‌یابد. هنگامی‌که درجه آزادی افزایش می‌یابد، تعداد جداول جستجو به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد که بنوبه خود منجر به افزایش پیچیدگی و هزینه داده‌برداری و نگاشت می‌شود و حتی ممکن است دستیابی به مقادیر مطلوب با آزمایش‌های دستی بر روی بستر آزمون امکانپذیر نباشد.

به‌همین دلیل، طی دو دهه گذشته حجم قابل توجهی از مطالعات بر-اساس نگاشت الگوپایه انجام شده است. ظهور روش‌های نگاشت الگوپایه برای کوتاه‌کردن زمان‌بندی نگاشت موتورها و بهبود کیفیت سامانه‌های پایش ارایه شده است. برای بهینه‌سازی الگوی پایه، به یک الگو از موتور هدف، نیاز است.

در این روش حجم آزمون‌های مورد نیاز برای توصیف دقیق فضای طراحی کاهش می‌یابد و با بهره‌گیری از روش‌های الگوسازی، الگوی از موتور حاصل می‌شود که جایگزین موتور واقعی می‌شود و به کمک آن، فرآیند نگاشت با بهره‌گیری از رایانه و روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته و بدون حضور بستر آزمون انجام می‌شود.



شکل ۱: (الف) بهینه‌سازی در اتاق آزمون (ب) بهینه‌سازی مبتنی بر الگو[۹].

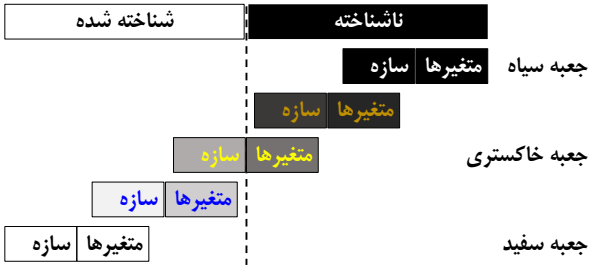
در این مقاله به کمک داده‌های به‌دست آمده از موتور در بستر آزمون، یک الگو تقریبی با هدف بهره‌گیری در نگاشت موتور، پیش‌بینی شده است. بسته به پیچیدگی موتور و بهینه‌سازی کاربردی، سازه‌های مختلف الگو مناسب هستند و متغیرهای آن‌ها با یک روش تئوری یا الگوسازی تجربی شناسایی می‌شوند.

۲-۲- روش های شناسایی سامانه

روش شناسایی براساس ویژگی الگو هدف انتخاب می‌شود. الگوها می‌توانند به‌صورت فیزیکی –تجربی، ایستایی– دینامیکی، محلی–سراسری و متغیری–غیرمتغیری تقسیم‌بندی شوند. در ادامه برخی دسته‌بندی‌های الگو ارایه شده است.

۲-۲-۱- الگوی فیزیکی و الگوی تجربی

الگوهای پایشی را می‌توان مطابق شکل ۲ به سه گروه اصلی الگوهای تجربی، الگوهای فیزیکی و الگوهای جعبه خاکستری تقسیم کرد [۱۰].



شکل ۲: انواع روش‌های الگوسازی برمبنای مقدار دانش

در الگوی فیزیکی یا الگو جعبه سفید ویژگی‌های عملکرد سامانه را می‌توان با استفاده از الگوسازی ریاضی به کمک قوانین فیزیکی حاکم بر سامانه، نظیر قانون نیوتون، قانون بقای انرژی، قانون بقای جرم و... به‌دست آورد.

الگوسازی فیزیکی پیچیده است و نیاز به دانش زیادی از سامانه دارد. الگوهای به‌دست‌آمده از این روش دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارند و هر متغیر یا متغیر، مفهوم فیزیکی دارد. با این حال، برای پایش زمان واقعی الگوهای فیزیکی، محدودیت خاصی وجود دارد، به‌ویژه هنگامی‌که الگوهای کارآمد با محاسبات کم مورد نیاز باشند.

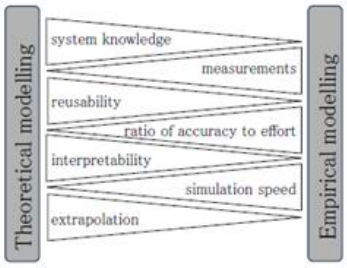
علاوه بر این تمام فرآیندهای خودرو را نمی‌توان دقیقاً توضیح داد. به‌عنوان مثال، تشکیل آلاینده‌ها، تنها تا حدی شناخته شده است و نیاز به تلاش غیرمعقول برای الگوسازی به‌صورت فیزیکی دارد. در چنین حالتی، الگوهای تجربی یا الگو جعبه سیاه می‌توانند برای ردیابی رفتار سامانه بدون آگاهی کافی از فیزیک فرآیندها استفاده شوند.

برای الگوهای جعبه سیاه، برخلاف الگوهای جعبه سفید هیچ دانش پیشینی لازم نیست. درنتیجه متغیرها و متغیرها، ضرورتاً معنا و معادل فیزیکی ندارند. الگو به‌دست آمده از این روش، به ورودی، نقطه عملکرد و شرایط محیطی بستگی دارد. بنابراین اعتبار آن محدود است در حالی که روش اول در تمام محدوده‌های عملکرد دقیق است.

بنابراین، به‌دلیل فقدان دانش فیزیکی، اینگونه الگوها نمی‌توانند دینامیک الگو را در پاسخ به تغییرات متغیری نشان دهند. از آنجایی‌که در بسیاری از موارد قوانین حاکم بر سامانه نامشخص است و الگوسازی فیزیکی تک تک اجزای موتور امری وقتگیر و خسته‌کننده است، روش‌های شناسایی تجربی می‌توانند جایگزین مناسب برای الگوهای فیزیکی باشند. الگوی تجربی قادر است عوامل غیرخطی ناشناخته سامانه را که در داده‌های نمونه‌برداری شده کدگذاری شده‌اند ترکیب و الگوهای دقیق‌تر را در عمل اجرا کند. در شکل ۳ مقایسه دو روش فیزیکی و تجربی نشان داده شده است [۱۱].

بسته به اینکه چقدر دانش پیشین را می‌توان در ساختار الگو گنجاند، الگوهای جعبه خاکستری مابین الگوهای جعبه سیاه و جعبه سفید ایجاد

می‌شوند. الگوهای جعبه خاکستری می‌توانند از مزایای هر دو گروه از الگوهای جعبه سفید و جعبه سیاه استفاده کنند. در نتیجه در سامانه‌هایی که متغیرهای سامانه، متغیر با زمان باشد از روش‌جعبه خاکستری استفاده می‌شود.



شکل ۳: مقابسه الگوی فیزیکی و الگوی تجربی[۱۲].

۲-۲-۲- الگوسازی متغیری و غیرمتغیری

ساختن الگو ریاضی و تخمین بهینه متغیرها توسط آزمایش، شناسایی متغیری سامانه نامیده می‌شود. الگو متغیری دارای تعداد محدودی از متغیرهاست که به‌طور مستقیم با مقادیر فیزیکی ارتباط دارند. در یک رده از الگوهای ریاضی باید الگوی را انتخاب کرد که از نظر اهداف داده‌شده، دینامیک سامانه را به‌نحو مطلوبی توصیف کرده وکمترین تعداد متغیرها را داشته باشد. برخی از روش‌های متغیری اعم از روش حداقل مربعات، حداقل مربعات بازگشتی، صافی کالمن، پیشگویی خطا و... در مراجع [۱۳] و [۱۴] بررسی شده‌اند.

الگو غیرمتغیری، نظیر الگو متغیری توسط داده‌های تجربی تولید می‌شود اما برای توصیف دقیق فرآیند نیاز به تعداد نامتناهی متغیر دارد. درنتیجه الگوهای غیرمتغیری اغلب در جداول جستجو یا منحنی‌ها ارائه می‌شوند. این روش‌ها الزاماً به دنبال یک متغیر از پیش تعیین‌شده که بتواند بهترین توصیف از سامانه را بعمل آورد، نخواهد بود. تحلیل گذرا ، همبستگی طیفی، گاوسی، ولترا، شبکه عصبی نمونه‌ای از روش‌های غیرمتغیری هستند.

در راستای تلاش محققان برای دستیابی به الگوسازی دقیق‌تر، ساده‌تر، حجم محاسباتی کم‌تر و تعداد داده‌های آزمایشی کم‌تر، برخی از رویکردهای الگوسازی، مانند شبکه عصبی MLP (چند لایه پرسپترون)، شبکه عصبی RBF (تابع پایه شعاعی) ، فرآیند گاوسی [۱۵] ، الگو LOPOMOT [۴]، رویکرد منطقی-فازی[1]، شبکه عصبی RNN و LSTM [۱۶]، روش‌های یادگیری ELM و SVM [۱۷] و شبکه عصبی یادگیری عمیق [۱۸] و ... در مطالعات اخیر برای شناسایی سامانه‌های مختلف استفاده شده اند.

دراین مقاله، روش‌های شناسایی تجربی برای بهره‌گیری در نگاشت الگوی پایه انتخاب شده است. در گذشته، الگوهای نسبتاً ساده برای الگوسازی موتور استفاده می‌شود. با این وجود، با افزایش تعداد متغیرهای تنظیمی، استفاده از الگوهای متعارف مانند الگوهای چندجمله‌ای[2] کاهش می‌یابد، زیرا این الگوها نمی‌توانند مسائل با ابعاد بالاتر را حل کنند. در حال حاضر الگوهای جعبه سیاه بر اساس شبکه‌های عصبی و پردازش گاوسی[3] مورد توجه محققان در زمینه خودرو است. مزیت این روش‌ها این است که توانایی الگوسازی سامانه‌های غیرخطی چندبعدی بسیار پیچیده را دارند.

در سال‌های اخیر مجموعه نرم‌افزارهای AVL ،ETAS-ASCMO FEV Topexpert، Cameo و... انواع روش‌های الگوسازی در راستای نگاشت الگوپایه را ارائه کرده‌اند. از معایب این نرم‌افزار می‌توان به محدودبودن روش‌های الگوسازی آن، به روش‌های چندجمله‌ای، اسپی‌لاین‌ها، توابع پایه شعاعی و ... اشاره کرد. از این رو به کمک این نرم افزارها غالباً امکان شناسایی اثرات همه متغیرها به صورت یکجا و در یک الگو سراسری[4] وجود ندارد؛ درنتیجه با ثابت نگه داشتن اثرات برخی متغیرها، الگوسازی محلی[5] انجام می‌شود.

از آنجایی که هدف این مقاله الگوسازی مبتنی بر داده‌های تجربی است، به جمع‌آوری داده از بستر آزمون موتورهای احتراق داخلی نیاز است که به آزمون‌هایی با هزینه‌های بالا منجر می‌شود، بنابراین آشنایی با مفهوم طراحی آزمایش، با هدف جمع‌آوری اطلاعات ورودی-خروجی در حداقل اندازه‌گیری‌های ممکن، اهمیت می‌یابد که در ادامه بدان پرداخته شده است.

۲-۳- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش[6]، روشی برای انجام نظام‌مند مجموعه‌ای از آزمایش‌هاست. هدف این روش به‌دست آوردن نتایج قابل اطمینان و مناسب برمبنای تعداد محدودی از مشاهدات است. عمده‌ترین ابزار حوزه شناسایی به دو بخش طراحی و تحلیل آزمایش‌ها تقسیم می‌شود. در صنایع، اصطلاح "طراحی آزمایش" به معنای کل فرآیند شناسایی، شامل برنامه‌ریزی طراحی، الگوسازی و بهینه‌سازی است.

اگرچه اصل این اصطلاح تنها به معنی برنامه‌ریزی طراحی است. در این مقاله طراحی آزمایش تنها با مفهوم برنامه‌ریزی و ابزار طراحی آزمایش درنظر گرفته شده است و انواع روش‌های توزیع داده با هدف به‌دست آوردن حداکثر اطلاعات از حداقل تعداد آزمایش‌ها بررسی شده است. این امر برای موتور پیشرفته به دلیل تعاملات پیچیده و محدودیت‌ها، الزامی است. در واقع اولین گام در توسعه نگاشت موتور، طراحی آزمایش است[۱۹].

[1] Fuzzy Logic
[2] Polynomial Models
[3] Gaussian Process
[4] Global
[5] Local
[6] Design of Experiment

از آنجایی‌که یک الگوی تجربی رفتار سامانه را توسط اطلاعات موجود در مجموعه داده‌های آموزش داده‌شده ارائه می‌دهد، تعداد زیادی آزمایش مورد نیاز است که منجر به افزایش زمان و هزینه می‌شود. درنتیجه به فرآیند طراحی آزمایش پیشرفته برای انجام پوشش مناسب و کاوش در فضای ورودی سامانه نیاز است. طراحی آزمایش برای از بین بردن روش آزمون و خطا در انجام آزمایش‌ها استفاده می‌شود. این یک روش سامانه‌اتیک است که تمام متغیرها را به‌طور همزمان درنظر می‌گیرد. در روش‌های طراحی آزمایش رایج، فقط یک عامل به‌عنوان متغیر درنظر گرفته می‌شود و دیگر عوامل در یک سطح ثابت قرار می‌گیرد که این روش یک متغیر در یک زمان[1] نامیده می‌شود. در این روش اثرات متقابل بین متغیرها مطالعه نمی‌شود و اثرات کامل عوامل قابل نمایش نیست. به طور کلی طراحی آزمایش شامل مراحل زیر است:

الف) انتخاب فاکتورها و دامنه تغییرات

ب) انتخاب متغیر پاسخ

ج) انتخاب طرح آزمایش

د) انجام آزمایش

ه) تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری

برای تعیین توزیع داده‌ها در فضای طراحی، بسته به پیچیدگی سامانه می‌توان یکی از روش‌های زیر را انتخاب کرد:

۱- روش‌های رایج بر مبنای طرح‌های سازمان یافته

۲- روش‌های بهینه

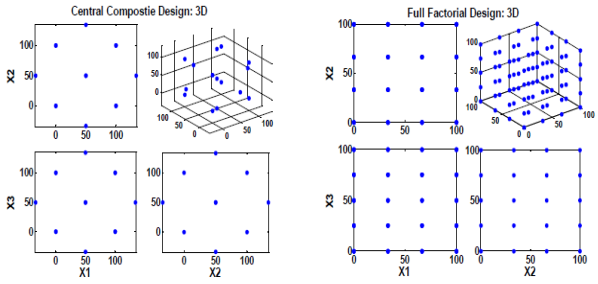
۳- روش پر کردن فضا[2] به‌صورت تصادفی

۲-۳-۱- طراحی آزمایش رایج

روش‌های طراحی رایج، نقاط با فاصله‌های به‌طور مساوی را فراهم می‌کنند، این طرح‌ها برای مناطق ساده مناسب هستند و معمولاً برای الگوهای چندجمله‌ای مرتبه پایین، استفاده می‌شوند. طرح‌های آزمایش رایج را می‌توان بر اساس ساختار خود به دو دسته فاکتوریل کامل و فاکتوریل جزیی دسته‌بندی کرد. طرح‌های فاکتوریل کامل یکی از روش‌های رایج در آزمایش موتور است.

طراحی کامل فاکتوریل تمام فضای طراحی را پوشش می‌دهد، اما حاوی مناطقی بین الگوهای شبکه است که در مجموعه داده‌ها ثبت نشده است. این مشکل می‌تواند با انجام آزمایش‌های بیشتر و کاهش فاصله بین نقاط حل شود، اما این کار زمان صرف شده برای آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها را افزایش می‌دهد.

طرح فاکتوریل کسری، زیرمجموعه‌ای از طرح فاکتوریل کامل است، درصورتی‌که برخی تعاملات متغیرها ناچیز باشد، می‌توان از طرح‌های فاکتوریل کسری استفاده کرد که مستلزم دانش کافی از رفتارسامانه هدف است. از جمله روش‌های فاکتوریل جزیی می‌توان به روش‌های باکس-بنکن[3] و مرکب مرکزی[4] اشاره کرد. در شکل ۴ برخی از روش‌های رایج قابل مشاهده است.



شکل ۴ : روش‌های طراحی آزمایش رایج

اگرچه طراحی‌های رایج برای مسائل ساده عملکرد بسیار خوبی دارند، اما این طرح‌ها دارای نقاط ضعفی به‌صورت زیر هستند:

۱- با افزایش متغیرها و سطوح تغییر ، تعداد نقاط نمونه به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد.

۲- طراحی‌های رایج انعطاف‌پذیر نیستند، به این معنا که تمام نقاط آزمون طراحی شده باید عملی باشد در غیر این صورت کیفیت نهایی طراحی به خطر می‌افتد. بنابراین، برای اجرای یک طراحی رایج، باید تمام مرزهای طراحی از قبل مشخص باشد تا از معتبر بودن تمام نقاط آزمون اطمینان حاصل شود. شایان ذکر است که تعیین محدوده‌های مرزی ممکن است به مقدار زیادی پیش آزمون (به‌عنوان مثال روش‌های غربالگری) نیاز داشته باشد.

۳- طرح‌های رایج را نمی‌توان برای متغیرهای طراحی با مرزهای نامتقارن پذیرفت.

۴- برای اجرای طرح فاکتوریل کسری به‌جای طرح فاکتوریل کامل، دانش قبلی در مورد رفتار سامانه نیاز است.

با توجه به آنچه ذکر شد، طراحی‌های رایج ممکن است یک طراحی آزمایش بهینه برای سامانه‌های غیرخطی پیچیده چندبعدی، مانند موتور، فراهم نکند [۲۰].

۲-۳-۲- طراحی آزمایش بهینه

در طراحی آزمایش بهینه ، تعیین نقاط آمون براساس ساختار الگو از پیش تعیین شده، انجام می‌شود و با توجه به معیارهای آماری صحت انتخاب‌ها ارزیابی می‌شود. طراحی‌های بهینه نیاز به دانش قبلی در مورد نوع الگو دارند و درنتیجه در این روش برای سامانه‌های ناشناخته به تعداد زیادی پیش آزمون نیاز است.

---

[1] One Factor At a Time(OFAT)

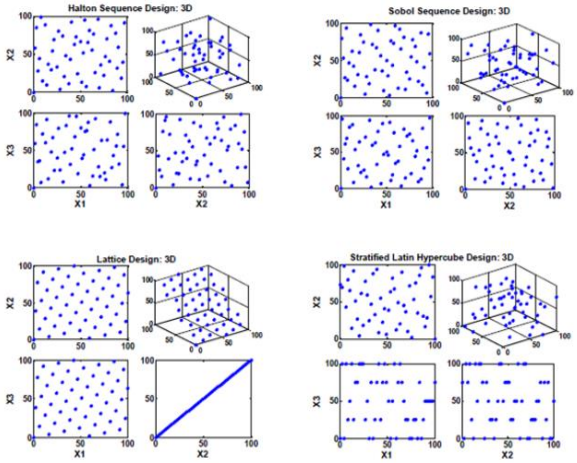
[2] Space-Filling Design

[3] Box-Behnken

[4] Central Composite

۲-۳-۳- طراحی آزمایش پرکردن فضا

طراحی‌های پرکننده فضا با توزیع یکنواخت نقاط آزمایش در فضای طراحی به جمع‌آوری اطلاعات مربوط به رفتار سامانه از سراسر فضای طراحی می‌پردازد. این نوع طرح‌ها بدون توجه به بعد مسأله و اندازه نمونه یک روش شبه‌تصادفی برای انتخاب آزمایش‌ها ارائه می‌دهند. یکی از اصول پر بودن فضا در یک طرح آزمایشی، بررسی فاصله اقلیدسی است. طراحی مشبک یکی از این طرح‌ها است. این روش دارای پوشش خوب در تعامل دو متغیر ورودی است، اما در بیش از دو متغیر دچار مشکل می‌شود. یکی دیگر از روش‌های پرکردن فضا هایپرکیوب لاتین است که حاوی مناطقی است که در آن الگوی شبکه وجود دارد و بنابراین حاوی شکاف در پوشش فضا است. در میان انواع روش‌های پرکردن فضا، طرح‌های هالتون و سوبل فاصله‌ای نابرابر ایجاد می‌کنند و هیچ الگوی مشخصی برای انتخاب نقاط آزمون ندارند و پوشش جامع و کاملی از فضای طراحی را فراهم می‌کنند. در شکل ۵ برخی روش‌های پرکردن فضا نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه ای از طراحی آزمایش پرکردن تصادفی فضا

با توجه به اینکه طرح‌های پرکردن فضا بدون درنظر گرفتن نوع الگو یا رفتار سامانه، آزمایش را برنامه‌ریزی می‌کنند، این طرح‌ها برای الگوسازی ایستایی موتور به ویژه هنگامی که رفتار موتور ناشناخته باشد گزینه مناسبی هستند. طرح‌های پرکننده فضا انعطاف‌پذیرتر از طرح‌های رایج و بهینه هستند. بنابراین، در مواردی که تمام نقاط طراحی در محدوده مجاز عملکرد نیستند، حذف نقاط غیرقابل اجرا باعث کاهش یکپارچگی طراحی آزمایشی نمی‌شود. بر این اساس، برای اجرای یک طرح پرکردن فضا، هیچ مرحله پیش آزمایش گسترده‌ای مورد نیاز نیست و بدین ترتیب به کمک این روش، شرایط مناسب برای شناخت مرز متغیرها فراهم می‌شود و کاربر را قادر می‌سازد تا از روش‌های پیشرفته الگوسازی استفاده کند [۲۰].

۲-۴- اجرای طراحی آزمون و الگوسازی موتور

پس از آشنایی با روش‌های طراحی آزمایش و روش‌های شناسایی، به اجرای روش‌های ذکر شده، برروی موتور خودرو پرداخته شده است. موتور انتخابی این مقاله، موتور ملی EF7 است.

۲-۴-۱- انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی الگو و دامنه تغییرات

اولین گام برای شناسایی سامانه‌ها، شناسایی تمام ورودی‌ها و خروجی-های سامانه و پیدا کردن ورودی‌های مربوطه و مناسب، با توجه به کاربرد الگو است. برای الگوسازی موتور می‌توان کل موتور را به‌صورت یکجا الگو کرد. همچنین می‌توان موتور را به زیرسامانه‌های اصلی مسیر هوا، تزریق سوخت، جرقه‌زنی، احتراق، مسیر خروجی گازها و... تقسیم‌بندی کرد و هریک را مجزا الگو کرد. از آنجایی‌که هدف این مقاله الگوسازی ایستایی احتراق است، ورودی‌ها و خروجی‌های این زیرسامانه مطابق شکل ۶ برای طراحی آزمون انتخاب شده‌اند. ورودی زیرسامانه احتراق به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

- سرعت موتور
- جرم هوا (بار)
- زاویهٔ جرقه‌زنی
- لامبدا (نسبت هوا به سوخت)
- دریچه هوا
- دریچه دود

در الگوسازی مدنظر، زاویه پاشش سوخت، دمای هوای ورودی و ارتفاع در مقدار مرجع قرار گرفته‌اند و از اثر این متغیرها صرف نظر شده است. خروجی زیرسامانه احتراق به‌صورت زیر انتخاب شده است:

- گشتاور
- انتشار آلاینده (Nox, CO, HC)
- مرز کوبش

شکل ۶: ورودی و خروجی الگو موتور هدف

برای تعیین محدوده کاری متغیرهای ورودی، می‌توان به دو شیوه عمل کرد:

۱- موتور را به‌عنوان سامانه ناشناخته درنظر گرفت و بدون شناخت از مرزهای عملکرد موتور، طراحی آزمایش انجام شود. در این صورت، در حین انجام آزمایش در اتاق آزمون، مرزهای عملکردی موتور براساس وقوع کوبش، عدم تشکیل شعله، خوداشتعالی، محافظت حرارتی و...

مشخص می‌شوند و به‌دلیل آنکه امکان داده‌برداری خارج از این مرزها وجود ندارد، بخشی از داده‌های طراحی آزمون حذف می‌شوند.

۲- طراحی آزمایش در دو مرحله انجام شود. مرحله اول طراحی آزمایش برای شناخت مرزهای عملکردی اجرا شود و در مرحله دوم طراحی آزمایش، داخل مرزهای تعیین شده و با هدف شناخت رفتار سامانه انجام شود.

در این مقاله از روش اول جهت طراحی آزمون استفاده شده است. محدوده عملکردی متغیرهای ورودی در جدول۱ ارایه شده است.

جدول ۱: محدوده عملکرد متغیرهای ورودی

متغیر ورودی	کمینه	بیشینه
سرعت موتور (rpm)	۱۲۰۰	۶۰۰۰
بار (-)	۱۰	۱۰۰
لامبدا (-)	۰,۸	۱,۰۵
زاویهٔ جرقه‌زنی (CA)	-۱۵	۵۰
دریچه ورودی هوا (CA)	۰	۶۰
دریچه خروجی هوا (CA)	-۵۲	۰

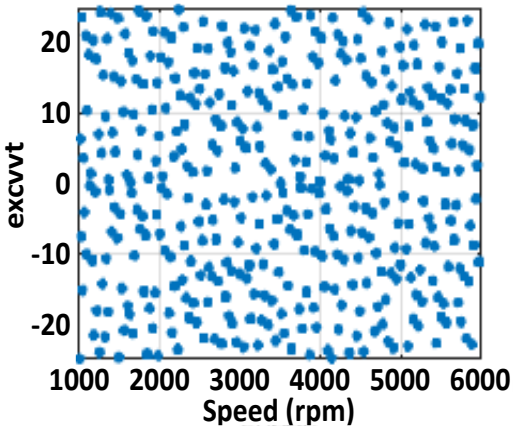
۲-٤-۲- انتخاب طرح آزمایش و تعیین تعداد نقاط آزمایش

با توجه به آنچه ذکر شد به‌دلیل عدم شناخت الگو سامانه، استفاده از روش‌های طراحی آزمایش بهینه مناسب به‌نظر نمی‌رسد. همچنین به‌دلیل حجم زیاد متغیرها و سطوح عملکرد آنها، استفاده از روش‌های رایج منجر به حجم زیاد داده‌های آزمون می‌شود. باتوجه به پیچیدگی الگو موتور و حذف داده‌های خارج از مرزهای مجاز، روش‌های پرکردن فضا نظیر سوبل و هالتون به‌دلیل تصادفی‌بودن و پوشش مناسب فضای طراحی، برای نوع آزمون انجام‌شده در این پروژه، بهترین راهکارهای طراحی آزمایش را ارائه می‌دهند.

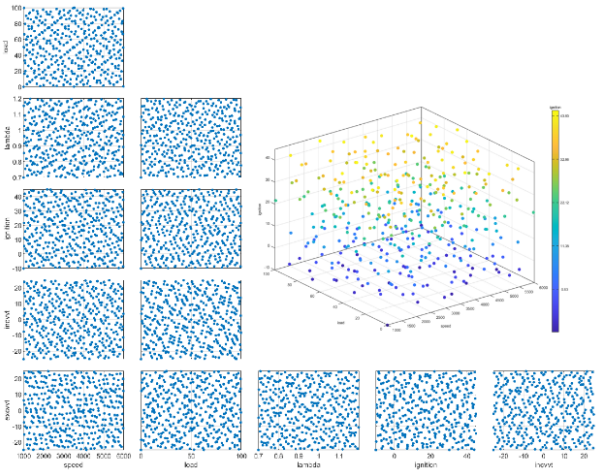
بنابراین روش طراحی آزمایش سوبل برای این تحقیق استفاده شده است. سوال مهم در طراحی آزمایش این است که چه تعداد آزمون برای ایجاد یک نگاشت دقیق و قوی مورد نیاز است؟

روش‌های طراحی آزمایش تعداد آزمون‌های مورد نیاز را تعیین نمی‌کنند. تعداد آزمون‌ها باید از قبل انتخاب شوند و به‌طور معمول توسط تجربه تعیین می‌شوند. این حالت زمانی مشکل ایجاد می‌کند که یک سامانه پیچیده جدید در حال مطالعه باشد. در چنین حالتی باید با یک تعداد پیش فرض، طراحی آزمایش شروع و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها در صورت مکفی نبودن اطلاعات مجدداً طراحی آزمایش تکرار شود.

در این مقاله گام نخست طراحی آزمایش با تعداد ۱۵۰۰ داده آغاز و در صورت عدم دقت الگو به‌دست آمده مجددا در مناطقی که الگو دقت خود را از دست داده‌است، طراحی آزمون تکرار می‌شود. در شکل ۷ و شکل ۸ طراحی آزمون انجام شده ارایه شده است.



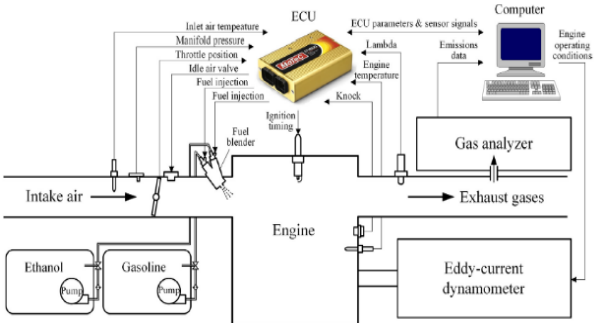
شکل ۷: داده‌های انتخاب شده به روش طراحی آزمایش



شکل ۸: طراحی آزمایش موتور هدف

۲-٤-۳- اجرای آزمایش

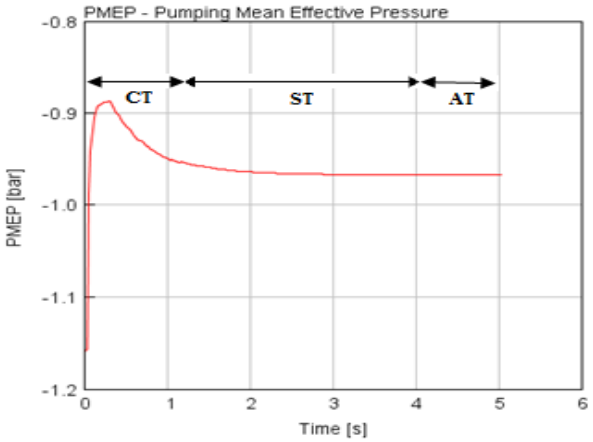
مطابق شکل ۹ برای اجرای طراحی آزمایش و نمونه‌برداری مناسب نیاز به یک اتاق آزمون است. در این مقاله داده‌برداری، برروی موتور واقع در اتاق آزمون شرکت ایپکو انجام شده است.



شکل ۹: مربوط به اتاق آزمون با هدف جمع‌آوری داده [۱۶].

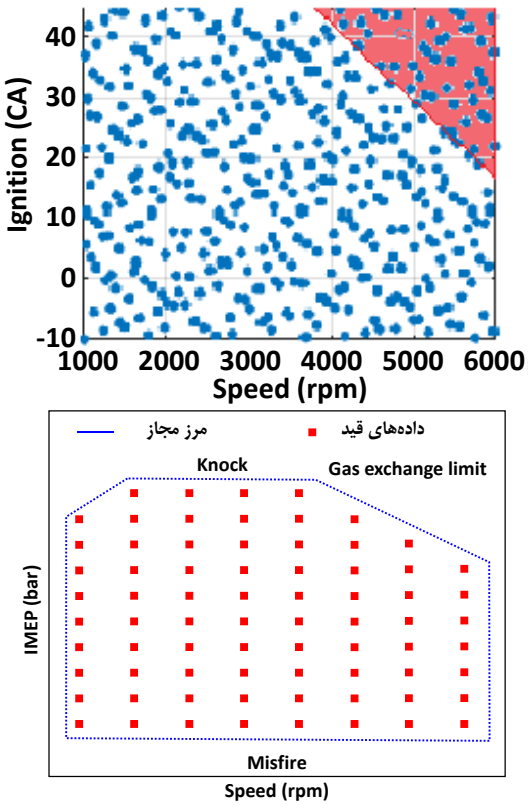
از آنجایی‌که در جداول جستجوی پایه نقاط بهینه متغیرهای تنظیمی در شرایط پایدار موتور تنظیم می‌شوند، طراحی آزمون و الگوسازی به‌صورت ایستایی انجام می‌شود. بنابراین در اتاق آزمون، مطابق

شکل۱۰ به ازای تنظیم هر نقطه عملکرد، زمان مشخصی صرف پایدارشدن موتور شده و سپس داده‌برداری انجام شده است.



شکل ۱۰: اندازه‌گیری ایستایی : CT زمان پایش، ST زمان پایداری، AT زمان میانگین

درنهایت نقاط طراحی توسط تکنسین اتاق آزمون اجرا و مطابق شکل۱۱ آزمون‌هایی که به‌دلیل کوبش، محافظت حرارتی، عدم تشکیل شعله و... امکان اجرای آن وجود ندارد، حذف شده‌اند و درنتیجه مرزهای عملکرد موتور مشخص شده است.



شکل ۱۱: مرزهای عملکردی موتور هدف

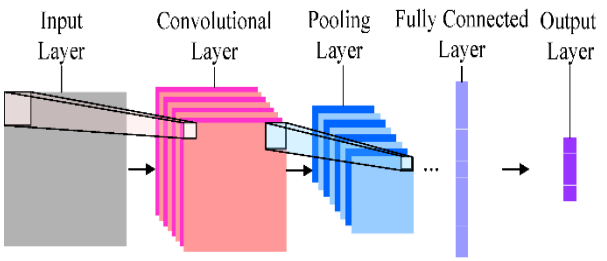
۲-۵- الگوسازی موتور

در این مقاله در محدوده نگاشت موتور، روش الگوسازی تجربی، غیربرخط، ایستایی، سراسری و غیرمتغیری برای توصیف رفتار ایستایی موتور بررسی شده و الگوسازی به‌صورت چند ورودی و تک خروجی اجرا شده است. همچنین بهره‌گیری از مزایای شبکه عصبی در تولید الگو موتور از اهداف این مقاله است که در ادامه بررسی شده است.

برخلاف روش‌های شناسایی غیرخطی متغیری (رایج)، که در آن به اطلاعات دقیق در مورد ساختار الگو نیاز است، شبکه‌های عصبی قادر به یافتن الگوهای غیرخطی به‌طور مستقیم از داده‌های ورودی/خروجی اندازه‌گیری‌شده بدون شناخت سامانه می‌باشند. از آنجایی‌که قدرت محاسباتی بسرعت در حال افزایش است، شبکه‌های عصبی به یک روش بسیار رقابتی برای الگوسازی تبدیل شده‌اند. درنتیجه میان انواع روش‌های شناسایی، در این مقاله به روش شبکه عصبی توجه شده است و در همین راستا در ادامه، به الگوسازی ایستایی موتور به روش شبکه عصبی عمیق همگشت[1] (CNN) پرداخته شده است. با فرض آشنایی با شبکه عصبی معمولی از ذکر مجدد در این مقاله خودداری شده است.

شبکه عصبی عمیق همگشت از سه لایه اصلی تشکیل می‌شود که عبارتند از: لایهٔ همگشت، لایهٔ تجمیع[2] و لایه اتصال کامل (شکل۱۲). تفاوت اصلی شبکه‌های عمیق عصبی و شبکه‌های عصبی معمولی در تعداد لایه‌های درونی آنها است. شبکه عصبی معمولی حداکثر از سه لایه تشکیل شده است اما در شبکه عصبی عمیق، داده‌ها باید از یک شبکه با چندین لایه عبور کنند.

شبکه‌های عصبی عمیق دقت بالایی در شناسایی سامانه دارند. اما برای آموزش این شبکه به تعداد زیادی داده نیاز است. در این شبکه، لایه همگشت و تصفیه کردن داده‌ها منجر به حذف اثرات نوفه می‌شود. بنابراین در صورتی که داده‌های سامانه در اندازه‌گیری همراه نوفه و خطا باشند، دقت نتایج شبکه همگشت کاهش نمی‌یابد. غالباً از شبکه عصبی عمیق همگشت در پردازش تصویر استفاده می‌شود. دراین مقاله نشان داده می‌شود که می توان از مزایای این روش در الگوسازی سامانه‌های غیرخطی بهره گرفت.



شکل ۱۲: شبکه عصبی همگشت

[1] Convolution

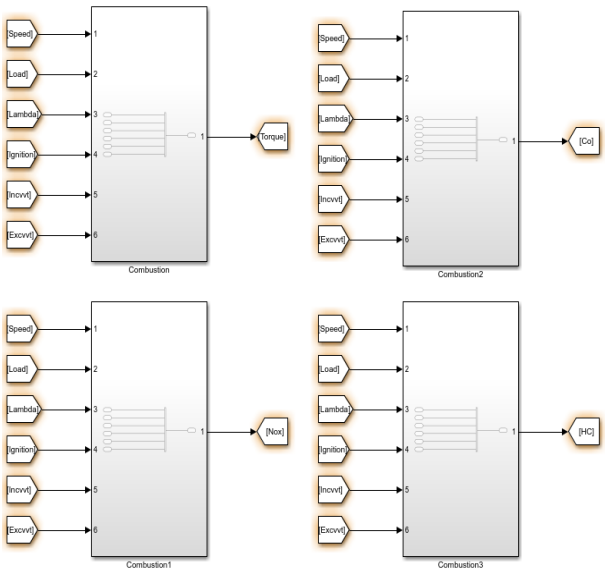
[2] Pooling layer

داده‌های اندازه‌گیری شده از اتاق آزمون به سه بخش داده‌های آموزش، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های آزمون تقسیم می‌شوند. غالباً با ۸۰ درصد داده‌ها، شبکه آموزش داده می‌شود و با ۲۰ درصد مابقی اعتبار الگو بررسی می‌شود. به کمک داده‌های آموزش، شبکه آموزش می‌بیند و مقادیر بهینه وزن‌ها تعیین می‌شود. به کمک داده‌های اعتبارسنجی، ساختار شبکه عصبی از منظر تعداد لایه‌ها، عصب‌ها، فعال‌سازها و... بهینه می‌شود و با توقف آموزش شبکه در زمان مناسب از بیش برازش[1] شبکه جلوگیری می‌کند. درنهایت پس از تعیین ساختار شبکه و به روزرسانی وزن‌ها، اعتبار نهایی الگو به کمک داده‌های آزمون، بررسی می‌شود.

در این مقاله الگوسازی سامانه مطابق شکل ۱۳ به صورت چندورودی تک‌خروجی انجام شده است. الگوسازی به سه روش چندجمله‌ای، شبکه عصبی پرسپترون و شبکه عصبی همگشت انجام و نتایج الگوسازی‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت الگوسازی چندجمله‌ای نتایج قابل قبولی در الگوسازی سراسری موتور ندارد و بهتراست از این روش در الگوسازی‌های محلی بهره گرفته شود. مطابق نتایج ارائه شده، شبکه عصبی پرسپترون و شبکه عصبی همگشت با دقت قابل قبولی الگو موتور را پیش‌بینی کرده‌اند و شبکه عصبی همگشت به‌دلیل وجود لایه‌های بیشتر و صافی همگشت، با دقت بالاتری الگو را آموزش داده است.

در شبکه‌های عصبی متناسب با رفتار غیرخطی سامانه می‌توان از توابع فعالساز مختلف بهره گرفت. نتایج مقایسه دو فعالساز relu و tanh در جدول ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، فعالساز relu با دقت بالاتری رفتار غیرخطی موتور را الگو کرده است. نقاط ورودی و خروجی الگو استاندارد شده‌اند و خطای MSE براساس نقاط استاندارد شده در جدول ۲ محاسبه شده است.

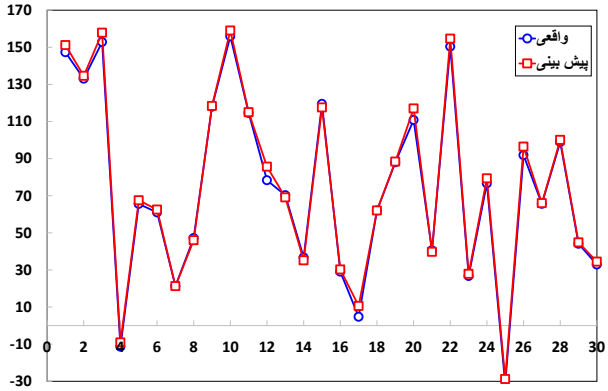


شکل ۱۳: الگوسازی چندورودی تک خروجی موتور هدف

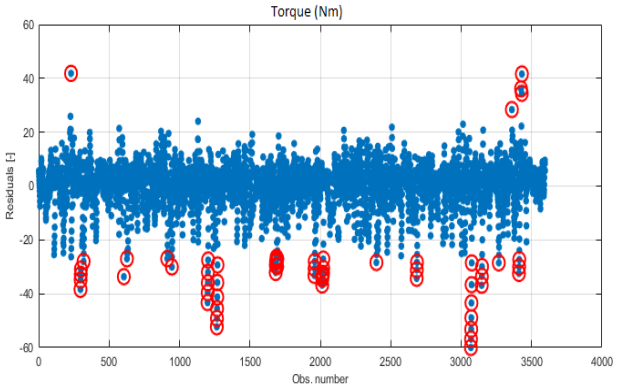
جدول ۲: نتایج الگوسازی موتور

الگو	MSE	
	گشتاور	Nox
چندجمله‌ای (مرتبه ۳)	3.014×10^{-2}	1.0263×10^{-1}
MLP (relu)	2.002×10^{-3}	7.853×10^{-3}
CNN (tanh)	3.082×10^{-3}	4.226×10^{-3}
CNN (relu)	7.521×10^{-4}	2.1945×10^{-3}

دقت الگو آموزش دیده توسط شبکه عصبی همگشت در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۱۵ مقدار خطای الگو چندجمله‌ای در هر نقطه آزمون نشان داده شده است.



شکل ۱۴: نقاط پیش‌بینی شده توسط الگو همگشت

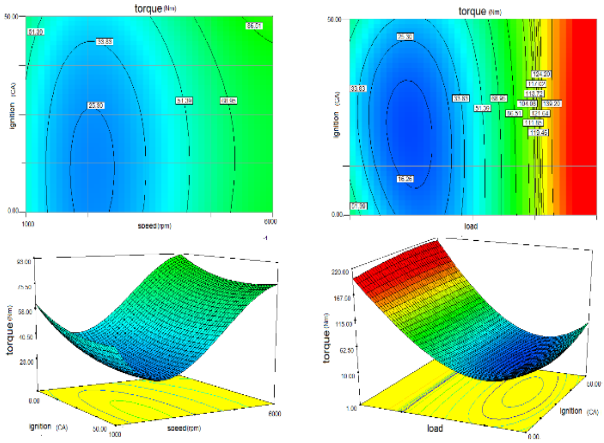


شکل ۱۵: خطای نقاط پیش‌بینی‌شده توسط الگو چندجمله‌ای

بدین‌ترتیب به کمک الگوسازی انجام شده، برای بررسی رفتار موتور دیگر نیاز به اندازه‌گیری در اتاق آزمون نیست و الگو، بخوبی رفتار موتور را شبیه‌سازی می‌کند. این الگو می‌تواند جایگزین موتور واقعی در حلقه‌های MIL[2]، SIL[3] و HIL[4] شود و مابقی فعالیت‌ها در زمینه توسعه پایشی و نگاشت برروی آن انجام شود.

[1] Overfitting
[2] Model in Loop
[3] Software in Loop
[4] Hardware in Loop

برخی از نمودارهای سه‌بعدی و خطوط همتراز الگو آموزش‌دیده در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.



شکل ۱۶: اثر زاویهٔ جرقه‌زنی بر تولید گشتاور در سرعت ها و بارهای مختلف

به کمک این الگو می‌توان اثرات متغیرهای تنظیمی نظیر زاویهٔ جرقه‌زنی، هوای اضافه[1]، زاویه دریچه هوا و دود و . . . بر روی گشتاور و انتشار آلاینده‌ها بررسی کرد و در نهایت بهینه‌ترین مقدار این متغیرها را با هدف افزایش تولید گشتاور و کاهش انتشار آلاینده‌ها تعیین کرد. در این صورت بدون حضور اتاق آزمون و تنها به کمک الگو به‌دست آمده نگاشت جداول جستجو انجام می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

[۱] برای نگاشت جداول پایه در حدود ۵۵۰۰ داده آزمایشگاهی نیاز است. در این مقاله نشان داده شد که به کمک ۱۵۰۰ داده آزمایشی و با استفاده از طراحی آزمون و الگوسازی می‌توان مابقی نقاط را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد. در این مقاله با بهره‌گیری از روش‌های طراحی آزمایش پیشرفته و روش‌های الگوسازی، روش‌های مختلف الگوسازی بررسی و مزایای بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی ارائه شد و با ارائه الگو موتور با دقت بالا، صحت ادعای شرکت‌های خودروسازی در زمینهٔ کاهش ۸۰ درصدی داده آزمایشگاهی و به تبع آن کاهش زمان و هزینه در روش نگاشت الگوی پایه نشان داده شد.

[۲] اهمیت الگوسازی موتور و ایجاد نگاشت‌های مبتنی برالگو از آنجایی پررنگ می‌شود که در مراکز علمی خودروسازی ایران، همچنان به شیوه رایج و سعی و خطا و بدون درنظر گرفتن روش-های بهینه‌سازی، روند نگاشت نقشه‌های موتور صورت می‌گیرد. این در حالیست که به‌منظور نگاشت کارآمد موتورهای پیچیده با توجه به اهمیت زمان در بازار رقابتی، بسترهای آزمون موتور موجود و امکان سرمایه‌گذاری قابل قبول در راستای نگاشت، روش‌های نگاشت رایج پاسخگو نیستند. در چنین شرایطی شناخت موتور و الگوسازی زوایای پنهان موتور، کمک شایانی به تولیدکنندگان برای بومی‌سازی سامانه مدیریت خودرو خواهد داشت و راه را برای محققان برای طراحی و نگاشت پایشگرهای مناسب فراهم می‌کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت فنی شرکت تحقیق،طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) تدوین شده است.

مراجع و منابع

[1]. R. Everett, An Improved Model-Based Methodology for Calibration of an Alternative Fueled Engine. 2011, MSc. dissertation, the Graduate School of The Ohio State University.
[2]. S. Grasreiner, M. Wensing, Model-based virtual engine calibration with the help of phenomenological methods for spark-ignited engines, Applied Thermal Engineering, 2017. 121: p. 190–199.
[3]. K. Schürholz, et al, Modeling of the three-way catalytic converter by recurrent neural networks, IFAC-PapersOnLine 51.15, 2018: p. 742-747.
[4]. H. Sequenz, Emission Modelling and Model-Based Optimisation of the Engine Control, 2013, Ph.D. dissertation, Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt.
[5]. Y. Cho, Optimization of Gasoline Engines Model-based calibration at Hyundai, in ADVANCED CALIBRATION, 2017.
[6]. Goh, Got, Model-base engine calibration shorten the development corp, in Optimized engine calibration, 2016.
[7]. G. Broustail, Model Based Development and Calibration, 2015, AVL UK Expo.
[8]. MathWorks, Generating Optimal Engine Calibrations Using Model-Based Calibration Toolbox, 2010.
[9]. R. Isermann, Engine Modeling and Control Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines, 2014: Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
[10]. R. Fiifi Turkson, M. Ahmed Ali, J. Hu, Artificial neural network applications in the calibration of spark-ignition engines: An overview, Engineering Science and Technology, an International Journal 19 2016: p. 1346–1359.

[1] Lambda

[11]. A. Ohata, Improving Model-based Design for Automotive Control Systems Development, in Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea. 2008, Toyota Motor Corporation.
[12]. N. Tietze, Model-based Calibration of Engine Control Units Using Gaussian Process Regression, in zur Erlangung des akademischen 2015, Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt.
[13]. R. Isermann, Identification of Dynamic Systems An Introduction with Applications, 2011: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
[14]. L. Wang, H. G., System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design, 2012: Springer London Dordrecht Heidelberg New York.
[15]. B. Berger, Robust Gaussian Process Modelling For Engine Calibration, IFAC Proceedings Volumes, 2012. Pages 159-164.
[16]. Y. Wang, A new concept using LSTM Neural Networks for dynamic system identification, in American Control Conference (ACC), 2017, IEEE: Seattle, WA, USA
[17]. Y. Cay, Prediction of a gasoline engine performance with artificial neural network, Fuel 111, 2013: p. 324–331.
[18]. O. Ogunmolu, et al, Nonlinear systems identification using deep dynamic neural networks, 2016.
[19]. S. Park, S. Woo, K. Lee, Optimization and calibration strategy using design of experiment for a diesel engine, in Thermal Engineering 123 2017. p. 917–928.
[20]. M.R. KIANIFAR, Application of multidisciplinasry design optimization frameworks for engine mapping and calibration in faculty of engineering and formatics, 2014, Ph.D. dissertation, University of Bradford.

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Improving identification of combustion engine to use in model-based calibration

S. Soltanalizadeh[1], V.Esfahaniyan[2*], M. Haeri Yazdi[3], S. Alizadehnia[4]

[1] PhD Candidate, Mechanical Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran, s.soltanalizadeh@ut.ac.ir
[2] Faculty of Mechanical Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran, evahid@ut.ac.ir
[3] Faculty of Mechanical Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran, myazdi@ut.ac.ir
[4] MSc, Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran, s_alizadehnia@ipco.com
*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 January 2021
Accepted: 04 February 2021

Keywords:
Model-based calibration
Multi-objective optimization
Intelligent identification
Test bench
Design of experiment

ABSTRACT

The calibration of modern internal combustion engines is complex and requires a lot of time and cost on the test bench. A large number of calibration parameters and a tradeoff between fuel consumption and emissions make calibration a complex multi-objective optimization problem. The purpose of this article is the development of calibration and model-based optimization techniques for internal combustion engines to reduce calibration time and cost and improve optimization accuracy. This paper focuses on empirical modeling of engines and optimization concerning emissions standards and fuel consumption. To identify the combustion models, a modeling toolbox is developed with an intelligent identification method. To optimize the data collection, the design of experiment methods is reviewed and appropriate methods are selected to collect information with the minimum data from all over the design space. Finally, a study is performed on the EF7 engine in the test room of IPCO and it is shown that the number of experimental data is reduced from 5500 data to 1500 data with the help of the design of experiment by Sobol method and modeling by a deep neural network. so, the virtual engine can replace the real engine in the calibration process.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.