

بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد موتور اتومبیل با استفاده

از طراحی آزمایش‌ها

حسین شکوری‌فر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

هاشم محلوچی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

توجه به بهبود کیفیت محصولات فعلی و جدید برای رفع نیاز مشتری همراه با صرفه‌جویی در هزینه و زمان، لزوم بهره‌گیری از روش‌هایی مانند «طراحی آزمایش‌ها» را آشکار می‌سازد. طراحی آزمایش‌ها، به‌همراه ابزارهای آن نظیر متدولوژی سطح پاسخ، سعی می‌کنند تا دستیابی به اهداف بهبود را با صرفه‌جویی در زمان و هزینه همراه کنند. در این تحقیق، این روش برای شناسایی متغیرهای مؤثر بر بازده تنفسی موتور و بهبود مقدار میانگین موزون بازده تنفسی به‌کار گرفته شده است.

مقدمه

آن دسته از فعالیت‌های پژوهشی و بهینه‌سازی که بتواند در زمان وجود رقابت، در خصوصیات رقابتی محصول بیشترین افزایش یا برای محصول جدید در کم‌ترین زمان و با کم‌ترین هزینه بهترین طرح را میسر سازد، در شمار راهبردهای قابل قبول و موجه قرار خواهد گرفت. در شرایطی که به دلیل تنوع محصول و سرعت پیشرفت فناوری تولید، سرعت تغییر در خصوصیات محصول و سطح خواسته‌های مشتریان بالا می‌رود تولیدکننده باید حفظ هماهنگی، همزمانی با سایر رقبا در عرصه‌ی محصولات جدید، و ابداع و نوآوری را همواره مد نظر قرار دهد. در صنعت خودروسازی یکی از اصلی‌ترین و چالش برانگیزترین عرصه‌های تولید، بحث تولید موتور با خصوصیات یک موتور ایده‌آل است. از یک سو پیشرفت بسیار سریع سازندگان در به‌کارگیری شیوه‌های جدید و اندیشه‌های نو در راستای بهبود خصوصیات موتور، نظیر توان سرعت و طول عمر - لزوم پرداختن به نظریه‌هایی مانند به‌کارگیری اجزایی با ویژگی‌های فیزیکی متغیر (مانند طول متغیر منیفولد) یا استفاده از سوخت جایگزین را آشکار می‌سازد و از سوی دیگر محدودیت‌هایی مانند استانداردهای زیست‌محیطی سازندگان را مجبور به بهینه‌سازی مداوم محصول می‌کند. بر اثر چنین عواملی، گاه فکر استفاده از روش‌هایی کاملاً متفاوت از روند موجود، مانند استفاده از سوخت هیدروژن، به ذهن می‌آید.

طراحی آزمایش‌ها به‌عنوان یکی از راه‌های جست‌وجوی رفتار پاسخ و عوامل تأثیرگذار بر آن سعی دارد از کوتاه‌ترین و کم‌هزینه‌ترین راه به هدف دست یابد. روش به‌کار گرفته شده مبتنی است بر مدل‌سازی رفتار

پاسخ با استفاده از چند جمله‌ایها. با توجه به حذف پیچیدگی از مدل ساخته شده، و نیز جست و جوی کوتاه‌ترین راه برای دستیابی به هدف، این شیوه یکی از مؤثرترین راه‌های کاهش هزینه و زمان در بهینه‌سازی است. همین ویژگی‌ها باعث شده تا در سال‌های اخیر استفاده از طراحی آزمایش‌ها مورد توجه شرکت‌های بزرگ تحقیقات موتور مانند AVL^۱ و RICARDO^۲ قرار گیرد، و بدین منظور بخش‌هایی را به این کار اختصاص داده و نرم‌افزارهای کارآمدی طراحی کنند. CAMEO^۳ نمونه‌یی از این نرم‌افزارهاست که در AVL طراحی شده و در بردارنده‌ی بخش‌های خاصی برای طراحی آزمایش‌هاست.

در این نوشتار سعی شده است با تمرکز بر موتور خودرو پیکان ۱۶۰۰ cc و بررسی میزان تأثیر چند متغیر بر رفتار میانگین موزون بازده تنفسی، و نیز غربال متغیرها به تعداد کم‌تر در دو مرحله و سپس بررسی دقیق‌تر نوع و میزان تأثیر متغیرها بر پاسخ، توانایی طراحی آزمایش‌ها برای استفاده در حوزه‌ی بهینه‌سازی مؤلفه‌های عملکرد موتور مورد بررسی قرار گیرد. در این متن بیشتر معرفی این روش و بیان توانایی آن در چنین کاربردهایی را هدف قرار داده‌ایم. به دلیل هزینه و زمان مورد نیاز برای اعمال آزمایش‌های لازم در شرایط آزمایشگاه و روی مدل واقعی، در این تحقیق نیز همانند اکثر تحقیقات روی موتور، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای انجام آزمون‌ها و کسب نتایج کمک گرفته شده است. نرم‌افزار مورد استفاده در این طرح Markplus بوده است. همچنین به‌منظور تصادفی کردن ترتیب آزمایش‌ها، از طرح‌های ساخته شده به‌وسیله‌ی نرم‌افزار Minitab که دارای امکان تصادفی کردن ترتیب آزمون‌ها است بهره گرفته شده است.

طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها عبارت است از انتخاب وضعیت‌هایی برای متغیرهای ورودی به منظور نمونه‌گیری از پاسخ.^[۱] استفاده از این روش برای بهبود کیفیت محصول یا فرایند، از طریق شناخت علل تغییر رفتار پاسخ می‌تواند متخصصین کنترل کیفیت را در دستیابی به ویژگی‌های مورد نظر یاری دهد.^[۲]

طراحی آزمایش‌ها به عنوان ابزاری آماری برای تحلیل رفتار سیستم، در بسیاری از حوزه‌های صنعتی می‌تواند راه‌گشای متخصصین در شناخت خصوصیات سیستم و برنامه‌ریزی برای بهبود آن باشد. از همین رو، کاربرد آن در علوم مختلف گسترش روز افزون داشته است. نقطه‌ی قوت این شیوه در مقایسه با روش‌های معمول جست‌وجوی علت، توجه آن به چندین متغیر در یک زمان است. در حالی که شیوه‌های سنتی به بررسی یک عامل در هر زمان^۴ می‌پردازند، طراحی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن چند عامل به طور همزمان تعداد آزمون‌های مورد نیاز را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد و از هدر رفتن هزینه و زمان پیشگیری می‌کند.

در دنیای مهندسی، طرح آزمایش یک ابزار فوق‌العاده مهم برای اصلاح عملکرد فرایندهای تولید است و نیز در بسط فرایندهای جدید وسیعاً کاربرد دارد. کاربرد تکنیک‌های اولیه‌ی طرح آزمایش در توسعه‌ی فرایند ممکن است به اصلاح فرایند، کاهش تغییرپذیری و مطابقت آن با نیازها، کاهش زمان گسترش، یا کاهش هزینه بینجامد. همچنین روش‌های طرح آزمون در طرح فعالیت‌های مهندسی نیز نقش عمده دارند که در آن یک فرآورده‌ی جدید تکامل می‌یابد یا فرآورده‌های فعلی اصلاح می‌شوند. بعضی کاربردهای آزمایش در طراحی مهندسی عبارت‌اند از: ارزیابی و مقایسه‌ی پیکربندی‌های طرح پایه‌ی، ارزیابی دگرگونی‌های مواد، انتخاب پارامترهای طرح به گونه‌ی که فرآورده تحت شرایط مختلف به خوبی کار کند، و تعیین پارامترهای طرح فرآورده که بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند.

روش‌های طرح آزمون طرح عاملی^۵

طرح عاملی همه‌ی ترکیبات سطوح مختلف را که برای عوامل در نظر گرفته شده شامل می‌شود. اگر تعداد متغیرها را با n_{dv} و تعداد سطوح هر یک را با l نشان دهیم، تعداد آزمون‌های لازم برابر با $l^{n_{dv}}$ خواهد بود. مزیت طرح عاملی در این است که تخمین‌های صورت گرفته به‌وسیله‌ی آن، به دلیل آنکه از حدس زدن اجتناب می‌کند، دقیق است. چندین شکل خاص طرح‌های عاملی وجود دارد که از اهمیت بالایی برخوردارند.^[۳] مهم‌ترین این طرح‌ها، طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ است. در این

طرح برای هر عامل، دو سطح بالا و پایین در نظر گرفته می‌شود و در هر آزمون، عوامل در یکی از دو سطح خود قرار دارند. از آنجا که فقط دو سطح برای هر متغیر در نظر گرفته شده است، فقط مؤلفه‌های خطی، یا حداکثر مؤلفه‌های مختلط (متقابل یا چندعاملی) پاسخ می‌توانند با این روش تخمین زده شوند.

طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ دارای خواص مهم «تعامد» و «دوران‌پذیری» است که می‌توان تعریف مشروح آن را در خوری و کرنل یافت.^[۴] همان‌طور که قبلاً ذکر شد، یکی از نکاتی که باید در استفاده از طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ مورد توجه قرار گیرد این است که این طرح فقط می‌تواند مؤلفه‌های خطی و مختلط سطح پاسخ را تخمین بزند. این خاصیت، استفاده از طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ در بسیاری از مسائل را محدود می‌کند. وقتی انتظار می‌رود تابع حقیقی (که قرار است به‌وسیله‌ی سطح پاسخ تخمین زده شود) یک انحنای قابل توجه در فضای طرح داشته باشد، معمولاً باید طراح به سراغ طرح‌های $3^{n_{dv}}$ برود. طرح‌های عاملی $3^{n_{dv}}$ امکان تخمین همه‌ی مؤلفه‌های یک مدل درجه‌ی دوم (کوادراتیک) را فراهم می‌آورند.

طرح‌های عاملی کسری^۶

طرح‌های عاملی این مشکل را دارند که در مواجهه با مواردی که ابعاد مسئله زیاد است ناتوان‌اند. در چنین حالاتی که تعداد متغیرهای طرح یا تعداد سطوح آنها زیاد است، طراحان معمولاً به استفاده از کسری از نقاط آزمون به جای همه‌ی آنها روی می‌آورند.

طرح‌هایی که فقط کسری از نقاط طرح عاملی را استفاده می‌کنند، «طرح‌های عاملی کسری» نامیده می‌شوند. یک کسر از طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ که فقط $2^{n_{dv}-m}$ ترکیب را مورد استفاده قرار می‌دهد، و در آن m عددی صحیح و مثبت با شرط $n_{dv} + 1 > 2^{n_{dv}-m}$ است، کسر 2^{-m} طرح عاملی $2^{n_{dv}}$ نامیده می‌شود.

طرح عاملی کسری می‌تواند چنان انتخاب شود که خصوصیات طرح‌های کامل یعنی «تعامد» و «دوران‌پذیری» را حفظ کند. باید توجه داشت که هر کجا از طرح‌های کسری استفاده کنیم، خاصیت مهم درون‌یابی را از دست می‌دهیم و برای قسمتی از دامنه‌ی طرح، تقریب‌زنی سطح پاسخ براساس برون‌یابی انجام خواهد شد که معمولاً دقت کم‌تری دارد.

طرح ترکیب مرکزی^۷

شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی تمام نقاط آزمون ممکن برای یک آزمایش با سه عامل، و سه سطح برای هر یک از عوامل است. در صورت استفاده از طرح ترکیب مرکزی، و با این فرض که بخواهیم آزمون در نقطه‌ی مرکزی را ۱۶ بار تکرار کنیم، کلاً به ۳۰ آزمون نیاز خواهد بود. این طرح شامل ۳ نوع نقطه‌ی آزمون می‌شود: $2^{n_{dv}}$ نقطه‌ی عاملی^۸، $2n_{dv}$ نقطه‌ی

۲. بررسی رفتار پاسخ در ناحیهی بهینه؛

۳. تخمین شرایط بهینه؛

۴. صحه‌گذاری.

روش سطح پاسخ یک فرایند ترتیبی است. ابتدا یک نقطه به صورت تخمینی یا بر پایه‌ی اطلاعات قبلی انتخاب می‌شود. با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها نقاط آزمون‌گیری در یک ناحیه‌ی کوچک در اطراف نقطه‌ی اولیه انتخاب و نمونه‌برداری از پاسخ در آنها صورت می‌گیرد. بر پایه‌ی این نتایج، یک مدل خطی برای برازش داده‌ها در این ناحیه تهیه می‌شود و با استفاده از جدول تحلیل واریانس، کفایت این مدل چندجمله‌یی بررسی می‌شود. با استفاده از اطلاعات این مدل، یک ناحیه‌ی جدید برای طرح انتخاب می‌شود و عمل نمونه‌گیری و مدل‌سازی مجدداً تکرار می‌شود. این کار تا زمانی که دیگر یک برازش خطی نتواند مدل مناسبی ایجاد کند ادامه می‌یابد. سپس یک برازش درجه‌ی دوم یا غیرخطی تهیه، و وضعیت بهینه برای متغیرهای طرح تعریف می‌شود.

استفاده از طراحی آزمایش‌ها برای بهبود بازده

تنفسی موتور

کار صورت گرفته در این تحقیق با هدف تعیین عوامل مؤثر بر میانگین موزون بازده تنفسی موتور و بهبود مقدار این میانگین بوده است. بازده تنفسی ماهیت نموداری دارد و بر حسب دور موتور قابل ترسیم است. به دلیل اینکه در بررسی‌های آماری با روش‌های موجود، باید رفتار پاسخی عددی بررسی شود، لازم بود این نمودار به عدد تبدیل شود. لذا با توجه به نظرات متخصصین موتور در مورد میزان اهمیت دورهای مختلف موتور در کل کارکرد آن، میانگین موزون بازده تنفسی به عنوان پاسخ مورد استفاده قرار گرفت. میانگین تعریف شده برای بازده به صورت زیر است:

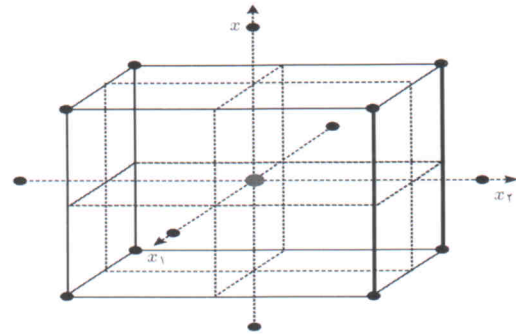
$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{10} w_i r_i}{\sum_{i=1}^{10} w_i} = [0.75(R_{1000} + R_{1500} + R_{2000}) + 2(R_{2500} + R_{3000} + R_{3500} + R_{4000}) + 1/5(R_{4500} + R_{5000} + R_{5500})] \div [3 * 0.75 + 4 * 2 + 3 * 1/5] \quad (1)$$

i = دور موتور

W_i = وزن دور i

R_i = بازده موتور در دور i

تعداد پارامترهایی که در ابتدا به عنوان عوامل مورد مطالعه انتخاب شده‌اند ۱۳ پارامتر است. همچنین برای هر کدام از آنها، دو سطح به عنوان



شکل ۱. طرح ترکیب مرکزی برای سه عامل در سه سطح.

محوری^۹ و نقطه(های) مرکزی. اگر امکان تغییر مقدار متغیر به راحتی فراهم باشد، می‌توان فاصله‌ی این نقاط را از مرکز، برابر فاصله‌ی نقاط عاملی قرار داد.

در واقع طرح ترکیب مرکزی، طرح عاملی کامل یا کسری را با یک رشته نقاط اضافی همراه می‌کند تا بتوان یک مدل چندجمله‌یی درجه‌ی دوم کامل ساخت.^[۵] این طرح اولین بار به وسیله‌ی باکس و ویلسون معرفی شده است.^[۶] طرح ترکیب مرکزی، حاصل افزودن n_c تکرار در یک نقطه‌ی خاص (نقطه‌ی مرکزی) و $2n_{dv}$ حاصل تغییر فقط یکی از متغیرها از مقدار مرکزی (نقاط محوری) به طرح عاملی دوسطحی است، در حالی که در طرح عاملی سه‌سطحی، به این نقاط، مانند نقاط عاملی نگریسته شده است. به همین دلیل، تعداد آزمون‌های لازم برای یک طرح ترکیب مرکزی که در آن برای هر عامل، دو سطح به همراه نقاط محوری و مرکزی در نظر گرفته شده، در مقایسه با طرح عاملی سه‌سطحی به میزان زیادی کاهش می‌یابد.

روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، به‌گفته‌ی مونته‌گومری^{۱۰} عبارت است از: «مجموعه‌یی از شیوه‌های ریاضی و آمار مفید برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که در آنها یک پاسخ تحت تأثیر چند متغیر قرار دارد و هدف بهینه‌سازی این پاسخ دنبال می‌شود».^[۷] مزیت این روش بر سایر روش‌های مدل‌سازی در این است که دیگر روش‌ها بر نگاشت همه‌ی فضای طرح با یک مدل ریاضی تکیه دارند، اما روش سطح پاسخ با ساخت مدل‌های محلی و تکرار این کار در زیرفضاهای کوچک‌تر سعی در ارائه‌ی یک مدل ریاضی بهتر برای فضای طرح دارد.^[۲]

اولین کاری که علاقه به استفاده از مجموعه تکنیک‌های سطح پاسخ را ایجاد کرد، مقاله‌ی ارائه شده توسط باکس و ویلسون بود.^[۶] در اغلب موارد این روال برای بهینه‌سازی یک فرایند به‌کار می‌رود. راهکار اساسی این روش شامل چهار گام است:

۱. تهیه‌ی روال‌هایی برای حرکت به سمت ناحیه‌ی بهینه؛

جدول ۳. نتایج نهایی فاز مدل‌سازی غیر خطی و وضعیت پارامترهای مستقل در نقطه‌ی بهینه.

مقدار	نام متغیر	
بی‌اهمیت	A	حداکثر جابه‌جایی سوپاپ هوا
۲۷۳۰	B	زمان باز بودن سوپاپ هوا
بی‌اهمیت	C	زمان باز بودن سوپاپ دود
۳ mm	D	قطر پورت هوا
۵۰ mm	E	طول شاخه‌های منیفلد
بی‌اهمیت	F	طول لوله‌ی مکش بعد از فیلتر هوا
بی‌اهمیت	G	طول لوله‌ی مکش قبل از فیلتر

سایر اثرات اصلی یا دوعاملی، تخمین زده می‌شوند. با توجه به اینکه در اکثر موارد عملی، اثرات بالاتر از دوعاملی اهمیت چندانی ندارند، می‌توان گفت که نتایج حاصل از این طرح برای تخمین اهمیت اثرات اصلی قابل قبول است. ولی اثرات دوعاملی با یکدیگر آمیختگی دارند و نمی‌توان استدلال محکمی در مورد آنها صورت داد.

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های این گام با استفاده از نمودار احتمال نیم‌نرمال و نمودار اثرات اصلی و متقابل و جدول تحلیل واریانس نشان داد که از بین ۱۳ عامل اولیه، ۴ اثر اصلی و ۳ اثر دوعاملی مهم‌تر از بقیه‌اند. به منظور رعایت اختصار، در اینجا فقط جدول تحلیل واریانس در جدول ۵ آمده است و از آوردن نمودارها خودداری شده است. بررسی نمودارها مؤید نتایج حاصل از جدول تحلیل واریانس است. گرچه استدلال در مورد اثرات دوعاملی به دلیل ذکر شده در بالا چندان پشتیبانی ندارد اما برای پیشگیری از حذف آثاری که احتمال مهم بودن آنها وجود دارد، این متغیرها نیز حفظ شده‌اند. با این فرض، ۷ عامل از ۱۳ عامل اولیه در مدل حفظ شدند و در مرحله‌ی بعد مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفتند. فهرست این ۷ عامل در جدول ۲ آورده شده است.

مدل‌سازی غیرخطی

برای فاز دوم طرح، به منظور مطالعه‌ی دقیق‌تر چگونگی تغییرات، یک طرح عاملی کامل به همراه تکرار در نقطه‌ی مرکزی انتخاب شد. بنابراین تعداد کل آزمون‌های این مرحله، ۱۲۸ اجرا برای نقاط عاملی و ۵ تکرار در نقطه‌ی مرکزی است.

جدول ۴. مقدار مؤلفه‌های مدل و پاسخ آزمون برای نقاط آزمون روی بردار گرادینان مدل.

شماره آزمون	مؤلفه اول (درجه)	مؤلفه دوم (میلی متر)	مؤلفه سوم (میلی سوم)	پاسخ
۱	۲۷۰	۲۳/۵۰	۴۰۰/۰۸	۸۹/۶۱۴۷
۲	۲۶۸	۱۷/۰۰	۴۰۰/۱۶	۸۱/۵۵۱۴
۳	۲۶۶	۱۰/۴۹	۴۰۰/۲۴	۴۱/۴۳۹۷
۴	۲۶۴	۱۰/۴۹	۴۰۰/۳۲	۴۳/۵۳۵۴

جدول ۱. متغیرهای مورد نظر برای فاز غربالگری و سطوح هر یک.

عوامل	سطوح عوامل	
	سطح بالا	سطح پایین
A	حداکثر جابه‌جایی سوپاپ هوا	۹/۵
B	زمان باز بودن سوپاپ هوا	۲۹۰
C	حداکثر جابه‌جایی سوپاپ دود	۹/۹
D	زمان باز بودن سوپاپ دود	۲۷۲
E	قطر پورت دود	۳۴
F	قطر پورت هوا	۳۶
G	طول لوله‌های آگزوز قبل از مافلر ۱	۱/۵
H	طول لوله‌های آگزوز قبل از مافلر ۲	۲
J	حجم پلونیوم	۲۲۰۰
K	قطر شاخه‌های منیفلد هوا	۵۰
L	طول شاخه‌های منیفلد هوا	۴۰۰
M	طول لوله مکش بعد از فیلتر هوا	۸۰۰
N	طول لوله مکش قبل از فیلتر هوا	۵۰۰

سطوح بالا و پایین متغیر انتخاب شد که مجموعه‌ی این اطلاعات در جدول ۱ آمده است.

غربالگری

به دلیل تعدد متغیرهای اولیه، و با توجه به تجربیات حاصل از تحقیقات صورت گرفته در خصوص محدود بودن تعداد متغیرهای اثرگذار بر یک عامل در اولین گام و با استفاده از یک طرح غربالی سعی شد از تعداد پارامترها کاسته شود. بنابراین، با انتخاب یک طرح آزمون با ۴۲ اجرا، سعی شد در اولین گام، یک غربالگری روی متغیرها صورت گیرد تا بتوان مطالعه را در فاز بعد، بر روی متغیرهای مهم‌تر متمرکز و با اجرای آزمون‌های بیشتر، پاسخ را با دقت بیشتری مدل‌سازی کرد.

در طرح مورد استفاده، مدل‌سازی پاسخ را با اجرای ۳۲ آزمون انجام داده، و نیز ۱۰ آزمون در نقطه‌ی مرکزی انجام شده‌اند تا در صورت وجود انحنا در پاسخ، نتایج آزمون این مسئله را روشن سازند. این طرح IV- تجزیه است که با استفاده از آن اثرات اصلی، بدون آمیختگی با

جدول ۲. متغیرهای فاز مدل‌سازی غیرخطی و سطوح هر یک.

نام متغیر	سطح	
	بالا	پایین
A	حداکثر جابه‌جایی سوپاپ هوا	۹/۵
B	زمان باز بودن سوپاپ هوا	۲۹۰
C	زمان باز بودن سوپاپ دود	۲۷۲
D	قطر پورت هوا	۳۶
E	طول شاخه‌های منیفلد هوا	۴۰۰
F	طول لوله مکش بعد از فیلتر هوا	۸۰۰
G	طول لوله مکش قبل از فیلتر هوا	۵۰۰

جدول ۵. خلاصه‌ی تحلیل واریانس عوامل در فاز غربالگری.

	Prob > F	F Value	Mean Square	DF	Sum of Square	Source
significant	< ۰,۰۰۰۱	۲۴,۹۴	۹,۲۶۳E-۰۰۴	۱۰	۹,۲۶۳E-۰۰۳	Model
	۰,۲۱۳۴	۱,۶۲	۶,۰۰۲E-۰۰۵	۱	۶,۰۰۲E-۰۰۵	A
	< ۰,۰۰۰۱	۱۴۰,۱۲	۵,۲۰۵E-۰۰۳	۱	۵,۲۰۵E-۰۰۳	B
	۰,۰۰۰۲	۱۷,۶۰	۶,۵۳۶E-۰۰۴	۱	۶,۵۳۶E-۰۰۴	D
	< ۰,۰۰۰۱	۳۹,۴۱	۱,۴۶۴E-۰۰۳	۱	۱,۴۶۴E-۰۰۳	F
	< ۰,۰۰۰۱	۲۷,۷۶	۱,۰۳۱E-۰۰۳	۱	۱,۰۳۱E-۰۰۳	L
	۰,۷۳۲۳	۰,۱۲	۴,۴۲۸E-۰۰۶	۱	۴,۴۲۸E-۰۰۶	M
	۰,۴۹۱۹	۰,۴۸	۱,۷۹۸E-۰۰۵	۱	۱,۷۹۸E-۰۰۵	N
	۰,۰۱۵۱	۶,۶۵	۲,۴۷۱E-۰۰۴	۱	۲,۴۷۱E-۰۰۴	AM
	۰,۰۱۷۰	۶,۳۹	۲,۳۷۳E-۰۰۴	۱	۲,۳۷۳E-۰۰۴	AN
	۰,۰۰۴۹	۹,۲۵	۳,۴۳۶E-۰۰۴	۱	۳,۴۳۶E-۰۰۴	BL
significant	۰,۰۱۷۷	۶,۳۰	۲,۳۴۱E-۰۰۴	۱	۲,۳۴۱E-۰۰۴	Curvature
			۳,۷۱۴E-۰۰۵	۳۰	۱,۱۱۴E-۰۰۳	Residual
not significant	۰,۹۹۹۱	۰,۱۹	۱,۶۴۳E-۰۰۵	۲۱	۳,۴۵۰E-۰۰۴	Lack of Fit
			۸,۵۴۸E-۰۰۵	۹	۷,۶۹۳E-۰۰۴	Pure Error
				۴۱	۰,۰۱۱	Cor Total
		۰,۸۹۲۶	R-Squared		۶,۰۹۵E-۰۰۳	Std. Dev.
		۰,۸۵۶۸	Adj R-Squared		۰,۸۵	Mean
		۰,۸۳۵۰	Pred R-Squared		۰,۷۲	C.V.
		۲۲,۴۶۰	Adeq Precision		۱,۷۵۱E-۰۰۳	PRESS

از ۷ عامل قبل اثرات قابل توجهی بر پاسخ دارند. بنابراین مدلی براساس این ۳ عامل و به صورت زیر تشکیل شد:

$$\%W.R. = ۱۳۷,۶۸۷ - (۰,۱۶۳۳۳۲)B - (۰,۲۱۲۲۸۶)D - (۰,۰۸۹۲۰۶۰)E + (۳,۲۶۷۴۶E - ۰۰۴)BE \quad (۲)$$

$B =$ زمان باز بودن سوپاپ هوا

$D =$ قطر پورت هوا

$E =$ طول شاخه‌های منی‌فولد هوا

مشاهده‌ی نمودار مانده‌ها برحسب ترتیب آزمون، مانده‌ها برحسب مقدار پیش‌بینی شده، نمودار نرمال مانده‌ها و نمودار مقدار پیش‌بینی شده برحسب مقدار واقعی مؤید کفایت مدل است و نظم خاصی که نشان‌دهنده‌ی کنارگذاشتن عوامل مهم از مدل باشد دیده نمی‌شود.

پس از تشکیل مدل، برای یافتن بهینه‌ی پیشنهادی و مقایسه‌ی آن با مقدار واقعی پاسخ، مشتقات جزئی مدل به‌ازای هر متغیر محاسبه شد و با اعمال محدودیت‌های مربوط به مرز فضای جواب، مقدار پیشنهادی هر متغیر در نقطه‌ی بهینه به دست آمد. شرایط بهینه در جدول ۳ آمده است. مقدار پاسخ در این نقطه براساس پیش‌بینی

گرچه در فاز اول این نتیجه به دست آمد که از میان متغیرها ۶ متغیر تأثیر چندانی بر پاسخ ندارند، ولی برای تعیین سطوح ثابت شده‌ی این ۶ متغیر، براساس نتایج فاز اول غربالگری، سطحی برای آنها در نظر گرفته شد که انتظار می‌رفت جواب بهتری تولید کند یا تأثیر متغیرهای باقیمانده را بهتر نشان دهد.

از آنجا که نتایج فاز قبل نشان داد که عامل انحنا در دامنه‌ی فعلی اهمیت دارد، بنابراین برای مدل‌سازی غیر خطی پاسخ، همین دامنه مجدداً انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر سطوح متغیرهای باقی‌مانده، همان مقادیری خواهد بود که در فاز قبل فرض شده‌اند.

با تشکیل طرح اولیه، آزمون‌های لازم صورت گرفت و نتایج حاصل برای اطمینان از صحت مشاهدات تحلیل شد. در نتیجه مشخص شد که برخی از آزمون‌ها پاسخ‌هایی غیرمعمول ایجاد کرده‌اند. این آزمون‌ها دوباره تکرار شدند تا از تأثیر آنها بر استدلالات جلوگیری شود. پس از جایگزینی این مشاهدات، تحلیل‌های لازم با هدف تعیین عوامل موثر و تشکیل مدل مناسب صورت گرفت.

نتیجه‌گیری از نمودارهای احتمال نیم نرمال، جدول تحلیل واریانس جدول ۶، و نمودارهای اثرات اصلی و متقابل نشان داد که تنها ۳ عامل

جدول ۶. تحلیل واریانس و سایر اطلاعات آماری برای مدل غیرخطی.

	Prob > F	F Value	Mean Square	DF	Sum of Squares	Source
significant	< ۰,۰۰۰۰۱	۳۱,۲۵	۲,۹۰E-۰۳	۴	۰,۰۱۲	Model
	< ۰,۰۰۰۰۱	۴۷,۶۸	۴,۴۲E-۰۳	۱	۴,۴۲E-۰۳	B
	< ۰,۰۰۰۰۱	۵۵,۹۸	۵,۱۹E-۰۳	۱	۵,۱۹E-۰۳	D
	۰,۰۰۰۲۷	۹,۴	۸,۷۲E-۰۴	۱	۸,۷۲E-۰۴	E
	۰,۰۰۰۰۷	۱۱,۹۴	۱,۱۱E-۰۳	۱	۱,۱۱E-۰۳	BE
not significant	۰,۳۳۳۹	۰,۹۴	۸,۷۲E-۰۵	۱	۸,۷۲E-۰۵	Curvature
			۹,۲۷E-۰۵	۱۲۷	۰,۰۱۲	Residual
not significant	۰,۳۶۵۶	۱,۵۶	۹,۳۸E-۰۵	۱۲۳	۰,۰۱۲	Lack of Fit
			۶,۰۱E-۰۵	۴	۲,۴۰E-۰۴	Pure Error
				۱۳۲	۰,۰۲۳	Cor Total
		۰,۴۹۶	R-Squared		۹,۶۳E-۰۳	Std. Dev.
		۰,۴۸۰۲	Adj R-Squared		۰,۸۶	Mean
		۰,۴۵۱۳	Pred R-Squared		۱,۱۳	C.V.
		۱۴,۸۵	Adeq Precision		۰,۰۱۳	PRESS

جدول ۷. تحلیل واریانس برای مدل خطی با ۷ عامل.

	Prob > F	F Value	Mean Square	DF	Sum of Squares	Source
significant	< ۰,۰۰۰۰۱	۳۴,۷۲۱۷۹۵	۰,۰۰۳۴۹۵	۳	۰,۱۰۴۸۵	Model
	< ۰,۰۰۰۰۱	۴۳,۹۳۱۱۵۲	۰,۰۰۴۴۲۲	۱	۰,۰۰۴۴۲۲	B
	< ۰,۰۰۰۰۱	۵۱,۵۷۴۵۴۹	۰,۰۰۵۱۹۲	۱	۰,۰۰۵۱۹۲	D
	۰,۰۰۰۳۹	۸,۶۵۹۶۸۳	۰,۰۰۰۸۷۲	۱	۰,۰۰۰۸۷۲	E
not significant	۰,۳۵۳۶	۰,۸۶۶۶۲۵	۰,۰۰۰۰۸۷	۱	۰,۰۰۰۰۸۷	Curvature
			۰,۰۰۰۰۱۰۱	۱۲۸	۰,۰۱۲۸۸۵	Residual
not significant	۰,۳۲۹۱	۱,۶۹۶۴۱۶	۰,۰۰۰۰۱۰۲	۱۲۴	۰,۰۱۲۶۴۴	Lack of Fit
			۰,۰۰۰۰۰۶۰	۴	۰,۰۰۰۰۲۴۰	Pure Error
				۱۳۲	۰,۰۲۳۴۵۷	Cor Total
		۰,۴۴۸۶۶۹	R-Squared		۰,۰۱۰۰۳۳	Std. Dev.
		۰,۴۳۵۷۴۷	Adj R-Squared		۰,۸۵۵۸۴۳	Mean
		۰,۴۰۹۶۱۷	Pred R-Squared		۱,۱۷۲۲۹۳	C.V.
		۱۵,۲۷۳۵۹۱	Adeq Precision		۰,۰۱۳۸۴۹	PRESS

بین پیش‌بینی مدل و مقدار واقعی می‌تواند از این واقعیت نشأت گیرد.

خروج از فضای اولیه‌ی طرح چنانچه بخواهیم از ناحیه‌ی فعلی در جست‌وجوی پاسخ بهتر خارج شویم، باید بهترین مسیر را برای حرکت انتخاب کنیم. این مسیر در

مدل برابر با ۸۶,۷۲۶۶٪ و مقدار واقعی پاسخ در این نقطه معادل ۸۶,۲۹۴۲٪ است. این عدد نسبت به مقدار اولیه‌ی میانگین موزون بازده تنفسی (۸۴,۱۴۰۶٪) به میزان ۲,۱۵۳۶٪ افزایش دارد. لازم به ذکر است که به دلیل خروج مشخصات نقطه‌ی بهینه از فضای جوابی که مدل براساس درون‌یابی در آن تشکیل شده است، ممکن است صحت استدلالات مدل برای این نقطه سؤال برانگیز باشد. فاصله‌ی

برای حرکت در این مسیر با تعیین مقدار تغییر ۲ درجه به عنوان طول گام متغیر B، مقدار تغییر سایر متغیرها به صورت زیر است:

$$\Delta D = \frac{j}{\Delta B} = \frac{-0.21229}{\frac{0.0653}{2}} = -6.4502 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\Delta E = \frac{k}{\Delta B} = \frac{0.0026096}{\frac{0.0653}{2}} = 0.08 \text{ mm} \quad (6)$$

بدین ترتیب آزمون‌های بعد مطابق با جدول ۴ انجام شد و پاسخ‌های ذکر شده، به دست آمد. می‌توان دید که بهترین پاسخ در اولین نقطه‌ی خارج از فضای اولیه به دست آمده است. این مقدار برابر با ۸۹/۶۱۴۷٪ است که نسبت به مقدار اولیه‌ی ۸۴/۱۴۰۶٪ به مقدار ۵/۴۷۴۶٪ بهبود داشته است.

نتیجه‌گیری

انجام ۳ مرحله‌ی آزمون و مدل‌سازی و تحلیل مشاهدات و مدل‌ها، دو نتیجه‌ی عمده به همراه داشته است. اولین و اصلی‌ترین یافته، اثبات توانایی روش طراحی آزمایش‌ها در یافتن عوامل تأثیرگذار بر فرایند و تحلیل نوع اثر هر یک از آنها بر پاسخ است. همچنین یافته‌ها باعث شد که مقدار میانگین موزون بازده تنفسی به مقدار ۵/۴۷۴۶٪ بهبود یابد که با توجه به بالا بودن مقدار اولیه‌ی آن و نزدیکی این مؤلفه به حداکثر مقدار ممکن، به نظر می‌رسد این بهبود قابل ملاحظه باشد.

مدل‌های غیرخطی با استفاده از تحلیل ماتریسی مدل مشخص می‌شود که در مدل فعلی، به دلیل صفر بودن دترمینان ضرایب اثرات دو عاملی و درجه‌ی دوم، ممکن نیست. به این دلیل اثر BE برای ساده‌سازی حذف شد. تحلیل آماری مدل خطی حاصل و نمودارهای مربوط به آن نشان داد که مدل کفایت لازم را دارد. در این مورد، جدول تحلیل واریانس در جدول ۷ آمده است. مدل خطی نهایی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} /W.R. = & 110.143 - 0.0653 * B \\ & - 0.21229 * D + 0.0026096 * E \end{aligned} \quad (3)$$

براساس این مدل، بهترین مقدار میانگین بازده تنفسی در ناحیه‌ی فعلی به ازای قرار دادن مقادیر متغیرهای B و D در حد پایین و مقدار متغیر E در حد بالای خود، حاصل می‌شود. این پاسخ، برابر با ۸۷/۰۵۷٪ و مقدار حاصل از آزمون در این نقطه ۸۷/۹۱۷٪ است. پس از تعیین بهینه‌ی محلی، برای ادامه‌ی مسیر به سمت بهترین جواب، از بردار دترمینان مدل استفاده می‌شود. مشخصات این بردار با فرض قرارگرفتن مؤلفه‌های B، D و E به ترتیب در جهات محورهای x، y و z، به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}(/W.R.) = & -0.0653 \vec{i} - 0.21229 \vec{j} + \\ & 0.0026096 \vec{k} \end{aligned} \quad (4)$$

پانوش

1. AVL List GmbH, A-8020 Graz, Kleiststrasse 48, Graz-Austria
2. Ricardo Ltd, Wolston Business Park, Main Street, Wolston 3LR, England CV8 Coventry
3. Website: <http://www.avl.com>
4. One-factor-at-a-time
5. Factorial Design
6. Fractional Factorial Designs
7. Central Composite Design
8. Factorial Point
9. Axial Point
10. Douglas C. Montgomery

منابع

1. Sasena, M. J., Optimization of Computer Simulations via Smoothing Splines and Kriging Meta-models. Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA (1998).
2. نورالسنا، رسول. طراحی آزمایش‌ها: روشی برای بهبود کیفیت. تهران، سازمان مدیریت صنعتی، (۱۳۷۹).
3. Vitali, R., "Response surface method for high dimensional structural design problems", PhD Thesis, University of Florida, (2000).
4. Khori, A. I., Cornell, J. A., Response Surface. 2nd Edition, New York: Marcel Dekker (1996).
5. Pilly, A. D., Beaumont, A. J., Robinson, D., Mowll, D., "Design of experiments for optimization of engines to meet future emissions targets", International Symposium on Advanced Transportation Applications, Ref: 94EN014 (1994).
6. Box, G.E.P., Wilson, K.G., On The Experimental Attainment of Optimum Conditions, Journal of Royal Statistical Society, B. **13**, pp.1-45 (1951).
7. Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments, fifth Edition, New York: John Wiley, P. 427 (2001).

