تابستان ۱۳۸۵، شماره‌ی سی و چهارم، ص. ۶۹-۷۵

Archive of SID

بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد موتور اتومبیل با استفاده از طراحی آزمایش‌ها

حسین شکوری‌فر (دانشجوی کارشناسی ارشد)
هاشم محلوجی (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 وجودِ رقابت، در خصوصیات رقابتیِ محصول بیشترین افزایش یا برای محصول جدید درکم‌ترین زمان و باکم‌ترین 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 خصوصیاتِ 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 ـ 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 به‌کارگرفته 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] قرارگیرد، 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 خودروِ پیکان ۱۶۰۰^{cc} و بررسی میزان تأثیر چند متغیر بر رفتارِ میانگینِ موزون بازده تنفسی، و نیز غربال متغیرها به تعدادِ کم‌تر در دو مرحله و سپس بررسی دقیق‌ترِ نوع و میزانِ تأثیر متغیرها بر پاسخ، توانایی طراحی آزمایش‌ها برای استفاده در حوزه‌ی بهینه‌سازیِ مؤلفه‌های عملکردِ موتور مورد بررسی قرارگیرد. 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 اِعمال 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 Minitabکه دارای امکان تصادفی کردن ترتیب آزمون‌ها است بهره گرفته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها عبارت است از انتخاب وضعیت‌هایی برای متغیرهای ورودی به‌منظور 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 به‌عنوان 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 نظرگرفتن چند عامل به‌طور همزمان تعداد آزمون‌های مورد نیاز را به‌طور 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 فراورده‌ی جدید تکامل می‌یابد یا فراورده‌های فعلی اصلاح می‌شوند. بعضی کاربردهای آزمایش در طراحی مهندسی عبارت‌اند از: ارزیابی و مقایسه‌ی پیکربندی‌های طرح پایه‌یی، ارزیابی دگرگونی‌های مواد، انتخاب پارامترهای طرح به گونه‌یی که فراورده تحت شرایط مختلف به‌خوبی کار کند، و تعیین پارامترهای طرح فراورده 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، به‌دلیل 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 $۲^{n_{dv}}$ است. در این طرح برای هر عامل، دو سطح بالا و پایین در نظرگرفته می‌شود و در هر آزمون، عوامل در یکی از دو سطح خود قرار دارند. از آنجا که فقط دو سطح برای هر متغیر در نظرگرفته شده است، فقط مؤلفه‌های خطی، یا حداکثر مؤلفه‌های مختلط (متقابل یا چندعاملی) پاسخ می‌توانند با این روش تخمین زده شوند.

طرح عاملی $۲^{n_{dv}}$ دارای خواص مهم «تعامد» و «دوران‌پذیری» است که می‌توان تعریف مشروح آن را در خوری و کرنل یافت.[۴]

همان‌طورکه قبلاً ذکر شد، یکی از نکاتی که باید در استفاده از طرح عاملی $۲^{n_{dv}}$ مورد توجه قرارگیرد این است که این طرح فقط می‌تواند مؤلفه‌های خطی و مختلط سطح پاسخ را تخمین بزند. این خاصیت، استفاده از طرح عاملی $۲^{n_{dv}}$ 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 $۳^{n_{dv}}$ برود. طرح‌های عاملی $۳^{n_{dv}}$ 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 همهٔ آنها روی می‌آورند.

طرح‌هایی که فقط کسری از نقاط طرح عاملی را استفاده می‌کنند، «طرح‌های عاملی کسری» نامیده می‌شوند. یک کسر از طرح عاملی $۲^{n_{dv}}$ که فقط $۲^{n_{dv}-m}$ ترکیب را مورد استفاده قرار می‌دهد، و در آن m عددی صحیح و مثبت با شرط $۲^{n_{dv}-m} > n_{dv}+۱$ است، کسر ۲^{-m} طرح عاملی $۲^{n_{dv}}$ نامیده می‌شود.

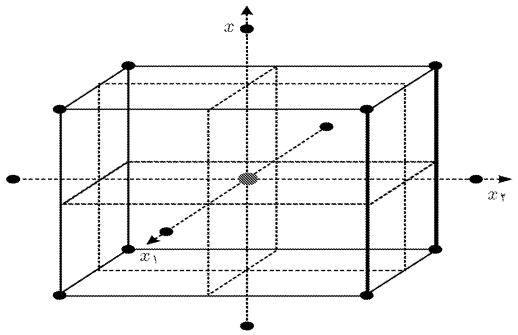
طرح عاملی کسری می‌تواند چنان انتخاب شود که خصوصیات طرح‌های کامل یعنی «تعامد» و «دوران‌پذیری» را حفظ کند. باید توجه داشت که هر کجا از طرح‌های کسری استفاده کنیم، خاصیت مهم درون‌یابی را از دست می‌دهیم و برای قسمتی از دامنه‌ی طرح، تقریب‌زنی سطح پاسخ براساس برون‌یابی انجام خواهد شد که معمولاً دقت کم‌تری دارد.

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: $۲^{n_{dv}}$ نقطه‌ی عاملی[۸]، $۲n_{dv}$ نقطه‌ی

www.SID.ir

Archive of SID



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

محوری[۹] و نقطه(های) مرکزی. اگر امکان تغییر مقدار متغیر به‌راحتی 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 $۲n_{dv}$ حاصلِ تغییرِ فقط یکی از متغیرها از مقدار مرکزی (نقاط محوری) به طرح عاملی دوسطحی است، در حالی که در طرح عاملیِ سه‌سطحی، به این نقاط، مانند نقاط عاملی نگریسته شده است. به‌همین 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 به‌میزان زیادی کاهش می‌یابد.

روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ، به‌گفته‌ی مونتگومری[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 همهٔ 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؛

۲. بررسی رفتار پاسخ در ناحیه‌ی بهینه؛

۳. تخمین شرایط بهینه؛

۴. صحه‌گذاری.

روش سطح پاسخ یک فرایند ترتیبی است. ابتدا یک نقطه به‌صورت 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. به‌دلیل 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 درمورد میزان اهمیت دورهای مختلف موتور در کل کارکرد آن، میانگین موزون بازده تنفسی به‌عنوان پاسخ مورد استفاده قرارگرفت. میانگین تعریف شده برای بازده به‌صورت زیر است:

$$Y = \frac{\sum_{i=۱}^{۱۰} w_i ri}{\sum_{i=۱}^{۱۰} w_i} = [۰/۷۵(R_{۱۰۰۰} + R_{۱۵۰۰} + R_{۲۰۰۰}) +$$

$$۲(R_{۲۵۰۰} + R_{۳۰۰۰} + R_{۳۵۰۰} + R_{۴۰۰۰}) + ۱/۵(R_{۴۵۰۰} +$$

$$R_{۵۰۰۰} + R_{۵۵۰۰})] \div [۳ * ۰/۷۵ + ۴ * ۲ + ۳ * ۱/۵] \quad (۱)$$

i= دور موتور

W_i = وزن دور i

R_i= بازده موتور در دورi

تعداد پارامترهایی که در ابتدا به‌عنوان عوامل مورد مطالعه انتخاب شده‌اند ۱۳ پارامتر است. همچنین برای هرکدام از آنها، دو سطح به‌عنوان

www.SID.ir

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

عوامل	سطوح عوامل	سطح بالا	سطح پایین
A	حداکثر جابجایی سوپاپ هوا	۹٫۵	۸
B	زمان باز بودن سوپاپ هوا	۲۹۰	۲۷۲
C	حداکثر جابجایی سوپاپ دود	۹٫۹	۹
D	زمان باز بودن سوپاپ دود	۲۷۲	۲۶۰
E	قطر پورت دود	۳۴	۲۸
F	قطر پورت هوا	۳۶	۳۰
G	طول لوله‌های اگزوز قبل از مافلر ۱	۱٫۵	۰٫۷۵
H	طول لوله‌های اگزوز قبل از مافلر ۲	۲	۱٫۵
J	حجم پلونیوم	۲۲۰۰	۱۴۰۰
K	قطر شاخه‌های منیفولد هوا	۵۰	۳۰
L	طول شاخه‌های منیفولد هوا	۴۰۰	۲۰۰
M	طول لوله مکش بعد از فیلتر هوا	۸۰۰	۵۰۰
N	طول لوله مکش قبل از فیلتر هوا	۵۰۰	۲۰۰

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

غربالگری

به‌دلیل تعدد متغیرهای اولیه، و با توجه به تجربیات حاصل از تحقیقاتِ 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 هریک.

	نام متغیر	سطح	
		بالا	پایین
A	حداکثر جابجایی سوپاپ هوا	۹٫۵	۸
B	زمان باز بودن سوپاپ هوا	۲۹۰	۲۷۲
C	زمان باز بودن سوپاپ دود	۲۷۲	۲۶۰
D	قطر پورت هوا	۳۶	۳۰
E	طول شاخه‌های منیفولد هوا	۴۰۰	۲۰۰
F	طول لوله مکش بعد از فیلتر هوا	۸۰۰	۵۰۰
G	طول لوله مکش قبل از فیلتر هوا	۵۰۰	۲۰۰

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

Archive of SID

	نام متغیر	مقدار
A	حداکثر جابه‌جایی سوپاپ هوا	بی‌اهمیت
B	زمان باز بودن سوپاپ هوا	۲۷۳۰
C	زمان باز بودن سوپاپ دود	بی‌اهمیت
D	قطر پورت هوا	۳۰^{mm}
E	طول شاخه‌های منیفولد	۵۰۰^{mm}
F	طول لوله‌ی مکش بعد از فیلتر هوا	بی‌اهمیت
G	طول لوله‌ی مکش قبل از فیلتر	بی‌اهمیت

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 نمی توان 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 نمودارهامؤید نتایج حاصل از جدول تحلیل واریانس است. گرچه استدلال در مورد اثرات دوعاملی به دلیل ذکر شده در بالا چندان پشتوانه‌یی 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 قرارگرفتند. فهرست این ۷ عامل در جدول ۲ آورده شده است.

مدل‌سازی غیرخطی

برای فاز دوم طرح، به‌منظور 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 گرادیان مدل.

شماره آزمون	مؤلفه اول (درجه)	مؤلفه دوم (میلی‌متر)	مؤلفه سوم (میلی‌متر)	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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. خلاصه‌ی تحلیل واریانس عوامل در فاز غربال‌گری.

Source	Sum of Square	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	۹٫۲۶۳E-۰۰۳	۱۰	۹٫۲۶۳E-۰۰۴	۲۴٫۹۴	< ۰٫۰۰۰۱	significant
A	۶٫۰۰۲E-۰۰۵	۱	۶٫۰۰۲E-۰۰۵	۱٫۶۲	۰٫۲۱۳۲	
B	۵٫۲۰۵E-۰۰۳	۱	۵٫۲۰۵E-۰۰۳	۱۴۰٫۱۲	< ۰٫۰۰۰۱	
D	۶٫۵۳۶E-۰۰۴	۱	۶٫۵۳۶E-۰۰۲	۱۷٫۶۰	۰٫۰۰۰۲	
F	۱٫۲۶۲E-۰۰۳	۱	۱٫۲۶۲E-۰۰۳	۳۹٫۲۱	< ۰٫۰۰۰۱	
L	۱٫۰۳۱E-۰۰۳	۱	۱٫۰۳۱E-۰۰۳	۲۷٫۷۶	< ۰٫۰۰۰۱	
M	۲٫۲۲۸E-۰۰۶	۱	۲٫۲۲۸E-۰۰۶	۰٫۱۲	۰٫۷۳۲۳	
N	۱٫۷۹۸E-۰۰۵	۱	۱٫۷۹۸E-۰۰۵	۰٫۴۸	۰٫۴۹۱۹	
AM	۲٫۲۷۱E-۰۰۴	۱	۲٫۲۷۱E-۰۰۲	۶٫۶۵	۰٫۰۱۵۱	
AN	۲٫۳۷۳E-۰۰۴	۱	۲٫۳۷۳E-۰۰۴	۶٫۳۹	۰٫۰۱۷۰	
BL	۳٫۴۳۶E-۰۰۴	۱	۳٫۴۳۶E-۰۰۴	۹٫۲۵	۰٫۰۰۴۹	
Curvature	۲٫۳۴۱E-۰۰۴	۱	۲٫۳۴۱E-۰۰۴	۶٫۳۰	۰٫۰۱۷۷	significant
Residual	۱٫۱۱۴E-۰۰۳	۳۰	۳٫۷۱۴E-۰۰۵			
Lack of Fit	۳٫۴۵۰E-۰۰۴	۲۱	۱٫۶۴۳E-۰۰۵	۰٫۱۹	۰٫۹۹۹۱	not significant
Pure Error	۷٫۶۹۳E-۰۰۴	۹	۸٫۵۴۸E-۰۰۵			
Cor Total	۰٫۰۱۱	۴۱				
Std. Dev.	۶٫۰۹۵E-۰۰۳		R-Squared	۰٫۸۹۲۶		
Mean	۰٫۸۵		Adj R-Squared	۰٫۸۵۶۸		
C.V.	۰٫۷۲		Pred R-Squared	۰٫۸۳۵۰		
PRESS	۱٫۷۵۱E-۰۰۳		Adeq Precision	۲۲٫۴۶۰		

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

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

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 کنارگذاردن 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

www.SID.ir

Archive of SID

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

		F	Mean		Sum of	
	Prob > F	Value	Square	DF	Squares	Source
significant	<۰٫۰۰۰۱	۳۱٫۲۵	۲٫۹۰E-۰۳	۴	۰٫۰۱۲	Model
	< ۰٫۰۰۰۱	۴۷٫۶۸	۴٫۴۲E-۰۳	۱	۴٫۴۲E-۰۳	B
	< ۰٫۰۰۰۱	۵۵٫۹۸	۵٫۱۹E-۰۳	۱	۵٫۱۹E-۰۳	D
	۰٫۰۰۲۷	۹٫۴	۸٫۷۲E-۰۴	۱	۸٫۷۲E-۰۴	E
	۰٫۰۰۰۷	۱۱٫۹۴	۱٫۱۱E-۰۳	۱	۱٫۱۱E-۰۳	BE
not significant	۰٫۳۳۳۹	۰٫۹۲	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.

		F	Mean		Sum of	
	Prob > F	Value	Square	DF	Squares	Source
significant	< ۰٫۰۰۰۱	۳۴٫۷۲۱۷۹۵	۰٫۰۰۳۴۹۵	۳	۰٫۱۰۴۸۵	Model
	< ۰٫۰۰۰۱	۴۳٫۹۳۱۱۵۲	۰٫۰۰۴۴۲۲	۱	۰٫۰۰۴۴۲۲	B
	< ۰٫۰۰۰۱	۵۱٫۵۷۴۵۴۹	۰٫۰۰۵۱۹۲	۱	۰٫۰۰۵۱۹۲	D
	۰٫۰۰۳۹	۸٫۶۵۹۶۸۳	۰٫۰۰۰۸۷۲	۱	۰٫۰۰۰۸۷۲	E
not significant	۰٫۳۵۳۶	۰٫۸۶۶۶۲۵	۰٫۰۰۰۰۸۷	۱	۰٫۰۰۰۰۸۷	Curvature
			۰٫۰۰۰۱۰۱	۱۲۸	۰٫۰۱۲۸۸۵	Residual
not significant	۰٫۳۲۹۱	۱٫۶۹۶۴۱۶	۰٫۰۰۰۱۰۲	۱۲۴	۰٫۰۱۲۶۴۴	Lack of Fit
			۰٫۰۰۰۰۶۰	۴	۰٫۰۰۰۲۴۰	Pure Error
				۱۳۲	۰٫۰۲۳۴۵۷	Cor Total
		۰٫۲۲۸۶۶۹	R-Squared		۰٫۰۱۰۰۳۳	Std. Dev.
		۰٫۴۳۵۷۴۷	Adj R-Squared		۰٫۸۵۵۸۴۳	Mean
		۰٫۲۰۹۶۱۷	Pred R-Squared		۱٫۱۷۲۲۹۳	C.V.
		۱۵٫۲۷۳۵۹۱	Adeq Precision		۰٫۰۱۳۸۴۹	PRESS

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 به‌ذکر است که به‌دلیل 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 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

www.SID.ir

مدل‌های غیرخطی با استفاده از تحلیل ماتریسی مدل مشخص می‌شود که در مدل فعلی، به‌دلیل صفر بودن دترمینان ضرایب اثرات دو عاملی و درجه‌ی دوم، ممکن نیست. به این دلیل اثرBE 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 به‌صورت زیر است:

$$\%W.R. = ۱۱۰/۱۴۳ - ۰/۰۶۵۳ * B - ۰/۲۱۲۲۹ * D + ۰/۰۰۲۶۰۹۶ * E \quad (۳)$$

براساس این مدل، بهترین مقدار میانگین بازده تنفسی در ناحیه‌ی فعلی به‌ازای قراردادن 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 به‌ترتیب در جهات محورهای x، y و z، به‌صورت زیر است:

$$\vec{\nabla}(\%W.R.) = -۰/۰۶۵۳\vec{i} - ۰/۲۱۲۲۹\vec{j} + ۰/۰۰۲۶۰۹۶\vec{k} \quad (۴)$$

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

$$\Delta D = \frac{j}{\frac{i}{\Delta B}} = \frac{-۰/۲۱۲۲۹}{\frac{۰/۰۶۵۳}{۲}} = -۶/۵۰۲mm \quad (۵)$$

$$\Delta E = \frac{k}{\frac{i}{\Delta B}} = \frac{۰/۰۰۲۶۰۹۶}{\frac{۰/۰۶۵۳}{۲}} = ۰/۰۸mm \quad (۶)$$

بدین‌ترتیب آزمون‌های بعد مطابق با جدول ۴ انجام شد و پاسخ‌های ذکر شده، به‌دست 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٪ به‌مقدار ۵/۴۷۴۶٪ بهبود داشته است.

نتیجه‌گیری

انجام ۳ مرحله‌یی آزمون و مدل‌سازی و تحلیل مشاهدات و مدل‌ها، دو نتیجه‌ی عمده به‌همراه 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.

پانوشت

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 Metamodels. Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA (1998).
2. نورالسناء، رسول. طراحی آزمایش‌ها: روشی برای بهبود کیفیت. تهران، سازمان مدیریت صنعتی، (۱۳۷۹).
3. Vitali, R., "Response surface method for high dimentional 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).

Archive of SID
www.SID.ir