

کاربرد روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ (RSM) و روش رگرسیون فازی در تعیین میزان بهینه‌ی عوامل مؤثر در فرایند مونتاژ کاسه‌چرخ خودرو

مقصود امیری (دانشیار)

دانشکده‌ی حسابداری و مدیریت، دانشگاه علامه طباطبائی

با توجه به نقش حساس مجموعه اکسل، بالخصوص کاسه‌چرخ خودرو، به دلیل مرتبط بودن آن با ایمنی سرنشینان، بررسی فرایند تولید و مونتاژ و نیز انجام آزمایش‌های کنترل کیفی حین این مراحل از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این نوشتار با توجه به اهمیت بالای سه عامل اصلی قطر توپی قسمت کاسه‌نمد، قطر داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی به‌عنوان متغیرهای مستقل، می‌کوشیم میزان گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ خودرو را (تحت عنوان متغیر پاسخ اول)، به کمک مباحث مطرح در طراحی آزمایش‌ها و روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ و لقی کاسه‌چرخ (تحت عنوان متغیر پاسخ دوم) به کمک روش رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق بهینه کنیم. در نهایت جواب بهینه به استفاده از روش LP سنجی بررسی شده است.

واژگان کلیدی: طراحی آزمایش‌ها، رگرسیون فازی، روش‌شناسی رویه پاسخ، کنترل کیفیت، کاسه‌چرخ، مجموعه اکسل، متغیر پاسخ.

mg_ami@yahoo.com

۱. مقدمه

نمونه‌های تشکیل‌شده از مواد انعطاف‌ناپذیر اقدام کردند.^[۴] در تحقیق یادشده تأثیر پراکندگی داده‌های آزمایش به‌منظور شناسایی پارامترهای مواد تشریح شد. داده‌های آزمایش‌ها محصول انجام سه نوع آزمایش بر روی فولاد ضدزنگ AINSI SS۳۱۶ در درجه حرارت صفر -- شامل آزمایش کشش، آزمایش تنش با فشار ثابت و استراحت میانی، و آزمایش دوره‌ی فشار و کشش -- بود؛ هر یک از آزمایش‌ها با ۱۲ نمونه در نرخ‌های فشار متفاوت انجام شد. به هر حال برای ارزیابی آماری تعداد آزمایش‌های متعدد ضرورت دارد. «شبه‌سازی تصادفی» شیوه‌ی قابل قبول در مهندسی است که هیچ‌گونه پیچیدگی بر فرایند شناسایی مواد نمی‌افزاید و نیز زمان محاسباتی شناسایی مواد را تا حد امکان کوتاه می‌کند و ضریب اطمینان درخصوص مناسب بودن پارامترهای مواد را مورد بررسی قرار می‌دهد.^[۳]

در سال ۲۰۰۵ با استفاده از «روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ» به‌منظور تجزیه و تحلیل ضرایب مستقل و مؤثر از جمله فشار فرایند، زمان پردازش و مقدار رطوبت موجود در خاک مدل‌های تجربی بسط داده شد.^[۴] و نیز شرایط بهینه‌ی استحصال روغن با در نظر گرفتن عوامل یاد شده بررسی شد. پیش‌تر در سال ۱۹۹۹، پژوهش‌گران با استفاده از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ شرایط عملیاتی بهینه در صنایع غذایی را شناسایی کردند و به کمک آن بیشترین میزان محصول و کم‌ترین هزینه‌ی صرف شده را تعیین کردند.^[۵]

در سال ۲۰۰۸ با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی روشی برای بهینه‌سازی مسائل آماری چندپاسخه ارائه شد؛^[۶] این روش به‌وسیله‌ی الگوریتمی اجرا خواهد شد که در محیط برنامه‌نویسی LINGO آزمایش می‌شود. در این شیوه‌ی پیشنهادی، از

طراحی آزمایش‌ها یکی از ابزارهای قوی در اصلاح و بهبود عملکرد فرایندهای تولید است که با تعیین اهداف یک آزمایش و انتخاب عوامل فرایند آغاز می‌شود. در یک تعبیر ریاضی، هدف پیدا کردن شرایط عملیاتی یا سطوح عامل (X_1, X_2, \dots, X_k) است تا T متغیر پاسخ (Y_1, Y_2, \dots, Y_r) بسته به نوع مسئله کمیته یا بیشینه شوند. به بیان دیگر اهداف مد نظر در طراحی آزمایش‌ها و روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ -- که غالباً به‌طور متوالی انجام می‌شوند -- به ترتیب عبارت‌اند از: ۱. استخراج عوامل یا متغیرهای مؤثر در سطح پاسخ؛ ۲. تنظیم حدود این عوامل یا متغیرها به‌منظور تأمین بهترین میزان پاسخ.

از طرف دیگر یکی از مسائلی که از پدیده‌های طبیعی و تبدیل کردن آنها به مسائل ریاضی حاصل می‌شود عدم قطعیت است. پیچیدگی تمدن در اجتماع معاصر بیان متغیرها را به‌صورت ریاضی و واقعی ضروری می‌سازد. بنابراین انجام مطالعات در شرایط عدم قطعیت و رفع مشکلات با استفاده از شیوه‌های ریاضی شایسته است. در سال ۲۰۰۰، طی تحقیقی با در نظر گرفتن سه محدودیت -- شدت صوت، ارتعاش و نامساعد بودن محیط -- و به کمک مباحث مطرح در «روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ» طراحی بدنه‌ی خودرو بهینه شد.^[۱] همچنین در سال ۲۰۰۱ به کمک روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ و طراحی آزمایش‌ها، در قالب مقاله‌ی تحقیقی عوامل مؤثر در طراحی بدنه‌ی خودرو تنظیم شد.^[۲] در سال ۲۰۰۲ محققین به‌منظور شناسایی پارامترهای مواد، نسبت به تجزیه و تحلیل آماری و طراحی آزمایش‌ها روی

که در آن $x_{i0} = 1$. برای به دست آوردن فاصله‌ی بین اطلاعات خروجی فازی مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده از برش‌های α آنها استفاده می‌شود. برای این منظور باید به بررسی معادلات ۴ تا ۶ پرداخت.

$$y_i = \sum_{j=0}^p m_j x_{ij} \quad (4)$$

$$y_i - (1 - \alpha)(y_i - l_{y_i}) = \sum_{j=0}^p l_j(\alpha) x_{ij} \quad (5)$$

$$y_i + (1 - \alpha)(r_{y_i} - y_i) = \sum_{j=0}^p r_j(\alpha) x_{ij} \quad (6)$$

در این معادلات $\sum_{j=0}^p r_j(\alpha) x_{ij}$ و $\sum_{j=0}^p l_j(\alpha) x_{ij}$ به برش α ی نقاط انتهایی چپ و راست عدد فازی $\sum_{j=0}^p A_j x_{ij}$ دلالت می‌کنند. برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق برای مرکز ضرایب رگرسیون فازی با نماد \hat{m}_j نشان داده می‌شوند و از طریق کمینه‌سازی رابطه‌ی ۷ -- همان مجموع انحراف مطلق -- به دست می‌آید.

$$\sum_{i=1}^n \left| y_i - \sum_{j=0}^p m_j x_{ij} \right| = \min! \quad (7)$$

به‌علاوه، $\hat{l}_j(\alpha)$ و $\hat{r}_j(\alpha)$ برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق برای نقاط انتهایی چپ و راست برش α برای ضرایب رگرسیون با استفاده از معادلات ۸ تا ۱۱ حاصل می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n \left| y_i + (1 - \alpha)(r_{y_i} - y_i) - \sum_{j=0}^p r_j(\alpha) x_{ij} \right| = \min! \quad (8)$$

مشروط بر این که:

$$\hat{m}_j \leq r_j(\alpha) \quad (9)$$

و

$$\sum_{i=1}^n \left| y_i - (1 - \alpha)(y_i - l_{y_i}) - \sum_{j=0}^p l_j(\alpha) x_{ij} \right| = \min! \quad (10)$$

مشروط بر این که:

$$\hat{m}_j \geq l_j(\alpha) \quad (11)$$

وقتی $\alpha = 0$ آنگاه: $\hat{l}_j(0) = \hat{r}_j(0) = \hat{m}_j$. بنابراین مدل رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق (FLAD) چنین حاصل می‌شود:

$$\hat{Y}_i = \hat{A}_0 + \hat{A}_1 x_{i1} + \dots + \hat{A}_p x_{ip}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

که در آن: $\hat{A}_i = (\hat{l}_i \hat{m}_i \hat{r}_i)$ و $\hat{Y}_i = (l_{\hat{y}_i} \hat{y}_i r_{\hat{y}_i})$.

۳. توضیح مختصری از فرایند مونتاز کاسه‌چرخ

توبی کاسه‌چرخ یکی از اجزای اصلی در این مجموعه است. پس از قرارگیری توبی بر روی طبق، سیلندر ترمز، اهرم رگلاژ و کفشک‌های ترمز بر روی طبق نصب

روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ برای مدل‌کردن متغیرهای پاسخ استفاده شد. پژوهش‌گران در تحقیق دیگری، بهینه‌سازی آماری چندپاسخه را با استفاده از روش تابع مطلوبیت^۲ مدل‌سازی کردند؛ آنان همچنین برای مدل‌کردن متغیر پاسخ از روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ بهره گرفتند.^[۷] در پژوهشی دیگر، روشی برای بهینه‌سازی مسائل چندپاسخه با استفاده از تابع تصمیم‌گیری در چارچوب روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ ارائه شد.^[۸] همچنین در دو مطالعه‌ی موردی بر روی فرایند کشش ورق گلگیر عقب پراید ۱۴۱ بررسی، و پس از آن مقادیر قابل قبول عوامل و متغیرهای مستقل و وابسته با استفاده از مباحث روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ و تصمیم‌گیری چندهدفه (در هر دو مطالعه موردی) محاسبه و تعیین شد.^[۹] مطالعه‌ی موردی اول به شناسایی عوامل مؤثر در کیفیت محصول (تعداد قطعه/نمونه‌ی سالم) و عمر قالب کشش گلگیر به‌وسیله‌ی طراحی آزمایش‌ها به‌صورت دو طرح فاکتوریل ۲۴ و ۲۳ می‌پرداخت، و در مطالعه‌ی موردی دوم مسئله‌ی شناسایی عوامل مؤثر بر بهبود فرایند قالب‌گیری تزریقی پلاستیک و تعیین متغیرهای وابسته به آنها در چارچوب اهداف طراحی آزمایش‌ها و در قالب یک طرح فاکتوریل بررسی شد.

در سال ۲۰۰۷، روش رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق^۳ تشریح و بررسی شد، و همچنین بر عملکرد مدل‌های رگرسیون فازی با استفاده از اندازه خطای دقیق نظارت شد.^[۱۰] در بررسی دیگری، مفاهیم رگرسیون فازی و کاربرد آن در قطعات رایانه ارائه شد و روش رگرسیون فازی نیز به‌صورت کامل تشریح شد.^[۱۱]

بررسی تحقیقات پیشین حاکی از آن است که به‌رغم توسعه‌ی چشم‌گیر طراحی آزمایش‌ها و تجزیه‌وتحلیل داده‌های آماری به‌عنوان روش‌هایی مؤثر در بهبود کیفیت محصولات صنایع غذایی، شیمیایی، و دارویی به روش‌های بهینه‌سازی یادشده در صنایع دیگری همچون خودروسازی توجه کافی نشده است. همچنین بررسی متغیر پاسخ به‌صورت کیفی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین در این نوشتار سعی شده تا کاربرد روش‌های فوق در صنعت خودرو مورد توجه قرار گیرد.

۲. مروری بر روش رگرسیون خطی فازی با کاربرد

برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق

در این قسمت به مرور یک مدل رگرسیون فازی می‌پردازیم که در آن اطلاعات ورودی غیرفازی، اما اطلاعات خروجی فازی‌اند. مدل رگرسیون فازی در حالتی که اطلاعات ورودی غیرفازی و اطلاعات خروجی فازی است چنین بیان می‌شود:^[۱۰]

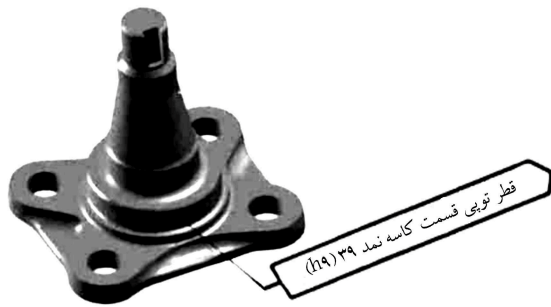
$$Y_i = A_0 + A_1 x_{i1} + \dots + A_p x_{ip}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که در آن A_i یک عدد فازی مثلثی با تابع عضویت μ_{A_i} ، و x_{ij} یک عدد واقعی مثبت، و μ_{Y_i} تابع عضویت Y_i است. اگر $A_i = (l_i \ m_i \ r_i)$ به یک عدد فازی با نقطه‌ی انتهایی چپ l_i ، نقطه‌ی انتهایی راست r_i و مرکز m_i در مدل دلالت کند. برش α متغیر وابسته $Y_i = (l_{y_i} \ y_i \ r_{y_i})$ فاصله‌ی بسته همانند رابطه‌ی ۲ است. برش α برای Y :

$$[y_i - (1 - \alpha)(y_i - l_{y_i}), y_i + (1 - \alpha)(r_{y_i} - y_i)] \quad (2)$$

به‌طوری که $0 \leq \alpha \leq 1$. با تداوم عملیات جبری خواهیم داشت:

$$\sum_{j=0}^p A_j x_{ij} = \left(\sum_{j=0}^p l_j x_{ij} \quad \sum_{j=0}^p m_j x_{ij} \quad \sum_{j=0}^p r_j x_{ij} \right) \quad (3)$$



شکل ۲. قطر تویی قسمت کاسه نمد.

جدول ۲. حدود قطر داخلی کاسه نمد.

عامل مؤثر	سطح بالا (+)	سطح پایین (-)
قطر داخلی کاسه نمد (mm)	۳۹	۳۸٫۹۳۸

۲.۴. قطر داخلی کاسه نمد

طبق استاندارد KES-T-۱۱۶۸، کاسه نمد باید از جنس N.B.R با کد B باشد. به منظور جلوگیری از نشتی و نفوذ گریس به داخل مجموعه طبق ترمز، یک عدد از این قطعه در مجموعه‌ی کاسه چرخ به کار گرفته می‌شود. کم و زیاد بودن قطر داخلی کاسه نمد سبب ایجاد درگیری و اصطکاک بیشتر بین کاسه نمد و تویی، و در نتیجه افزایش یا کاهش میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ و لقی آن می‌شود. تصویر این قطعه در شکل ۲ و سطوح بالا و پائین این عامل مطابق نقشه‌ی فنی مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۴. گشتاور مهره قفلی

پس از مونتاژ مهره قفلی، محکم بسته شدن و کامل بسته نشدن مهره، عامل تعیین کننده‌ی میزان درگیری رولبرینگ‌ها و تویی و در نتیجه گشتاور چرخشی کاسه چرخ و لقی کاسه چرخ خواهد بود؛ بدین ترتیب که کم یا زیادی گشتاور مهره قفلی سبب ایجاد درگیری کم‌تر یا بیشتر بین تویی و رولبرینگ خواهد بود که به افزایش یا کاهش میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ و لقی کاسه چرخ منجر می‌شود. سطوح بالا و پائین این عامل در جدول ۳ آمده است.

۵. انتخاب متغیر پاسخ

با توجه به این که متغیر پاسخ باید در برگیرنده‌ی خصوصیات مهمی از فرایند مورد بررسی باشد^[۱۲] و نیز با توجه به تحقیقات انجام شده، بالا بودن گشتاور چرخشی کاسه چرخ یکی از عوامل مؤثر در قفل شدن چرخ‌های عقب اتومبیل، کاهش عمر رولبرینگ‌ها خواهد بود. از سوی دیگر، پائین بودن این گشتاور سبب ایجاد لقی چرخ‌ها می‌شود. در نهایت، مجموع عوامل فوق ایمنی سرنشینان را تهدید خواهد کرد. بر این اساس «گشتاور چرخشی کاسه چرخ» متغیر پاسخ اول، و «لقی کاسه چرخ»

جدول ۳. حدود گشتاور مهره قفلی.

عامل مؤثر	سطح بالا (+)	سطح پایین (-)
گشتاور مهره قفلی (kg.m)	۰٫۷	۰٫۴

می‌شوند. سپس کنس خارجی رولبرینگ کوچک و بزرگ در داخل کاسه چرخ قرار می‌گیرد و کاسه نمد بر روی مجموعه کاسه چرخ سوار می‌شود. بعد از کسب اطمینان از مشخصه‌های کیفی، مجموعه‌ی کاسه چرخ را روی طبق قرار می‌دهیم. نهایتاً مجموعه‌ی یادشده توسط واشر و مهره قفلی به یکدیگر مونتاژ می‌شوند. گشتاور اندازه‌گیری شده‌ی مهره قفلی و چرخشی کاسه چرخ در این مرحله باید به ترتیب در بازه ۰٫۴ kg.m تا ۰٫۷ و ۶٫۵ kg.cm تا ۱۰ باشد. پس از این مراحل در پوش مهره قفلی را نصب می‌کنیم. سپس کارشناس مربوطه به بیان کیفی «لقی کاسه چرخ» می‌پردازد.

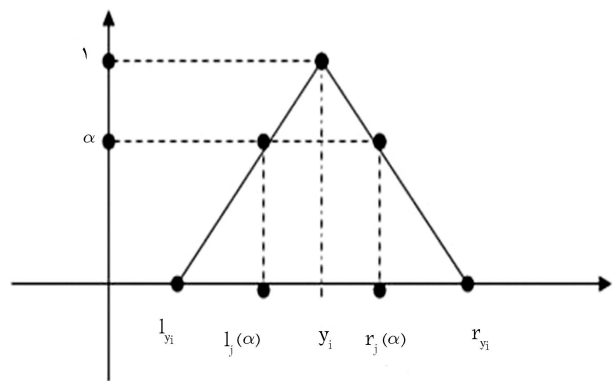
۴. انتخاب عوامل مؤثر برای تعیین مقدار بهینه گشتاور

کاسه چرخ و تعیین سطوح آنها

با توجه به بررسی‌های انجام شده و اتفاق نظر کارشناسان، عوامل مؤثر عبارتند از:

۱.۴. قطر تویی قسمت کاسه نمد

مطابق شکل ۱، تویی از جنس فولاد و مطابق استاندارد NES، یا از جنس ۷۴۴۷ ۱۰ و مطابق استاندارد DIN است. این تویی بر روی پایه‌ی خود چهار سوراخ دارد و مشخصه‌ی قسمت رزوه‌ی آن $M16 \times 1.5 - 2$ mm است. در هر طرف از مجموعه طبق ترمز راست و چپ یک عدد از این قطعه قرار می‌گیرد. مجموعه طبق ترمز توسط چهار پیچ تویی هزارخار که در داخل هر یک از سوراخ‌های تویی قرار می‌گیرند، به پوسته متصل می‌شود. بر روی بدنه‌ی تویی یک عدد رولبرینگ بزرگ و یک عدد رولبرینگ کوچک قرار می‌گیرد که به چرخش کاسه چرخ کمک می‌کنند. این در حالی است که تویی در داخل مجموعه طبق ترمز به صورت ثابت قرار دارد. با توجه به موارد یادشده، قطر تویی قسمت کاسه نمد نقش بسیار مهمی در تعیین مقدار گشتاور چرخشی کاسه چرخ و لقی کاسه چرخ دارد. در جدول ۱ سطوح بالا و پایین این قطر مطابق نقشه فنی مربوطه آمده است.



شکل ۱. برش α .

جدول ۱. حدود قطر تویی قسمت کاسه نمد.

عامل مؤثر	سطح بالا (+)	سطح پایین (-)
قطر تویی قسمت کاسه نمد (mm)	۳۹	۳۸٫۹۳۸

یکی از عوامل مؤثر در خارج شدن رینگ اتومبیل از قسمت کاسه‌چرخ است که منجر به منحرف شدن اتومبیل می‌شود و در نهایت ایمنی سرنشینان را تهدید می‌کند. بنا براین، لقی کاسه‌چرخ نیز به‌عنوان متغیر پاسخ دوم در نظر گرفته شده است.

۶. انتخاب طرح آزمایش برای متغیر پاسخ اول (گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ خودرو)

گام مهم دیگر در انجام تحقیق انتخاب طرحی برای آزمایش است. برازش و تحلیل رویه‌های پاسخ با انتخاب صحیح طرح آزمایش بسیار ساده است. در بیشتر مسائل مربوط به روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ (RSM)، به‌منظور برازش مدل از چندجمله‌یی‌ها و توابع خطی استفاده می‌شود. اگر پاسخ به‌وسیله‌ی تابعی خطی به‌خوبی از متغیرهای مستقل مدل شده باشد، آنگاه تابع تقریب‌کننده‌ی مدل یک مدل مرتبه‌ی اول است. اگر در سیستم خمیدگی وجود داشته باشد آنگاه باید از چندجمله‌یی‌های درجه بالاتر مانند مدل مرتبه‌ی دوم استفاده کرد. در این نوشتار نیز برای متغیر پاسخ اول از مدل درجه دوم استفاده شده، که شکل کلی آن مطابق رابطه‌ی ۱۳ است:^[۱۳]

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1, j \neq i}^2 \beta_{ij} x_i x_j \quad (13)$$

در این رابطه متغیر پاسخ با نماد \hat{Y} ، ضرایب با نمادهای β_0 ، β_i و β_{ij} و عوامل مستقل گذشته با نمادهای x_1 ، x_2 ، x_3 نشان داده شده‌اند. سطوح قطر توبی قسمت کاسه‌نمد، قطر داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی، هریک به‌طور خطی به‌وسیله‌ی معادله‌ی ۱۴ با ارزش‌های اصلی بیان می‌شوند:

$$x_i = \frac{Y(X_i - \bar{X}_i)}{d_i} \quad (14)$$

به‌طوری که X_i اندازه‌ی واقعی عامل i ام در بُعد مربوطه، \bar{X}_i میانگین سطوح بالا و پایین X_i و d_i فاصله‌ی میان سطوح بالا و پایین X_i هستند.^[۱۴] دوران پذیری خاصیتی بسیار مهم برای انتخاب طرح رویه‌ی پاسخ است. اگر طرح دارای چنین خاصیتی باشد، وقتی آن را حول مرکز $(0, 0, 0, \dots, 0)$ دوران دهیم واریانس \hat{Y} تغییری نمی‌کند. از آنجا که هدف روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ (RSM) بهینه‌سازی است، و چون مکان نقطه‌ی بهینه قبل از اجرای آزمایش نامعلوم است، از طرحی استفاده می‌شود که در تمام راستاها دارای دقتی یکسان در برآورد است. این مدل مقدار R^2 (ضریب تعیین چندگانه) بیشتری از مدل مرتبه اول یا مدل مرتبه اول با روابط متقابل دارد؛ همچنین نسبت به دو مدل مذکور میانگین مجذور خطای

(MSE) کم‌تری دارد. یکی از طرح‌های مورد استفاده برای برازش مدل مرتبه دوم، طرح مرکب مرکزی است. این طرح عبارت است از 2^k عامل (کدبندی شده با نماد معمول (± 1)) با الحاق 2^k نقطه‌ی محوری $(0, 0, 0, \dots, 0)$ ، $(\pm \alpha, 0, 0, \dots, 0)$ و $(0, 0, 0, \dots, 0)$ است. طرح مرکب مرکزی با انتخاب مناسب α دوران‌پذیر می‌شود. مقدار α برای دوران‌پذیری به تعداد نقاط در بخش عاملی طرح بستگی دارد. در واقع با انتخاب $\alpha = (n_f)^{\frac{1}{2}}$ معلوم می‌شود که طرح مرکب مرکزی دوران‌پذیر است؛ n_f تعداد نقاط استفاده‌شده در بخش عاملی طرح است.

در این نوشتار چون 3 عامل مورد بررسی قرار گرفته، بنابراین بخش عاملی متغیر پاسخ اول شامل $2^3 = 8$ نقطه است و مقدار α نیز برای دوران‌پذیری طرح برابر است با $1.768 = 2^{\frac{3}{2}}$. خواص دیگر طرح مرکب مرکزی را می‌توان با انتخاب تعداد نقاط مرکزی (nc) کنترل کرد. با انتخاب درست nc می‌توان طرح مرکب مرکزی را متعامد ساخت یا از آن طرحی با دقت یک‌نواخت درست کرد.^[۱۲] در این نوشتار برای ایجاد طرحی با دقت یک‌نواخت 5 نقطه‌ی مرکزی در نظر گرفته شده است. حدود سطوح و نقاط محوری و مرکزی برای 3 ترکیب یادشده، در جدول ۴ مشخص شده است.

۷. انجام آزمایش

با توجه به این که اندازه‌گیری مقدار گشتاور کاسه‌چرخ و لقی کاسه‌چرخ یکی از عملیاتی است که حین فرایند مونتاژ آن انجام می‌شود، و در حین این فرایند توقف خط به‌لحاظ تغییر حدود عوامل مؤثر ممکن نیست، آزمایش مورد نظر در آزمایشگاه صورت می‌پذیرد. روش انجام آزمایش چنین است که ابتدا توبی و کاسه‌نمد را با مشخصات مورد نظر از واحد انبار تهیه کرده و در اختیار واحد آزمایشگاه قرار می‌دهیم. (برای توبی و کاسه‌نمدی با مشخصه‌ی α و $-\alpha$ چون چنین قطعانی وجود ندارد، ابتدا درخواست ساخت‌شان به شرکت سازنده داده می‌شود و پس از ساخت برای انجام آزمایش به واحد آزمایشگاه ارسال می‌شود.) باید توجه داشت که یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای بخش تجزیه و تحلیل آماری، تصادفی‌بودن انجام آزمایش‌ها است. بدین‌منظور با این فرض که آزمایش‌ها برای متغیر پاسخ اول به‌صورت جدول ۵، و برای متغیر پاسخ دوم به‌صورت جدول ۶ شماره‌گذاری شده باشد، برای متغیر پاسخ اول یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۱۹ اختیار می‌شود. این فرایند تا زمانی که آزمایش نوزدهم انجام شود، ادامه دارد. در این نوشتار اعداد تصادفی تولیدی برای متغیر پاسخ اول عبارت است از: ۶، ۹، ۲، ۱۹، ۱۱، ۳، ۸، ۵، ۴، ۱۵، ۱۷، ۷، ۱۳، ۱۰، ۱۲، ۱، ۱۸، ۱۴، ۱۶ که از آنها برای ترتیب انجام آزمایش‌ها استفاده خواهد شد. مثلاً در آزمایش شماره ۱ با مشخصه‌ی -1 و -1 و -1 قطر توبی قسمت کاسه‌نمد، قطر

جدول ۴. حدود سطوح و نقاط مرکزی و محوری برای متغیر پاسخ اول.

ضریب	ارزش کدبندی‌نشده	سطوح گذشته (x_i)				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
قطر توبی قسمت کاسه نمد (mm)	X_1	۳۸,۹۱۶۹	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۶۹	۳۹	۳۹,۰۲۱
قطر داخلی کاسه نمد (mm)	X_2	۳۸,۹۱۶۹	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۶۹	۳۹	۳۹,۰۲۱
گشتاور مهره قفلی (kg.m)	X_3	۰/۳	۰/۴	۰/۵۵	۰/۷	۰/۸

که $\alpha = \sqrt[3]{N} = 1.76818$ است.

جدول ۵. اطلاعات آزمایش و ارزش مشاهده شده‌ی پاسخ با ترکیبات مختلف قطر توپی قسمت کاسه‌نمد و قطر داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی، با استفاده از طرح مرتبه‌ی دوم دوران‌پذیر مرکب مرکزی برای روش‌شناسی رویه‌ی پاسخ.

اجرا	شماره‌ی آزمایش	سطح معتبر گذشته			گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ (Y) (kg.cm)
		x_1	x_2	x_3	
۱۶	۱	-۱	-۱	-۱	۹
۳	۲	-۱	۱	-۱	۷
۶	۳	-۱	-۱	۱	۱۲
۸	۴	-۱	۱	۱	۹
۹	۵	۱	-۱	-۱	۱۸
۱	۶	۱	۱	-۱	۷
۱۲	۷	۱	-۱	۱	۲۳٫۵
۷	۸	۱	۱	۱	۱۱
۲	۹	$-\alpha$	۰	۰	۶٫۵
۱۴	۱۰	α	۰	۰	۲۱
۵	۱۱	۰	$-\alpha$	۰	۱۹
۱۵	۱۲	۰	α	۰	۶
۱۳	۱۳	۰	۰	$-\alpha$	۷
۱۸	۱۴	۰	۰	α	۱۲
۱۰	۱۵	۰	۰	۰	۹
۱۹	۱۶	۰	۰	۰	۸٫۵
۱۱	۱۷	۰	۰	۰	۹٫۵
۱۷	۱۸	۰	۰	۰	۸
۴	۱۹	۰	۰	۰	۹

داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی هر سه را در پائین‌ترین سطح‌شان در نظر گرفته، سپس مقدار متغیر پاسخ اول را اندازه‌گیری می‌کنیم. این کار را برای تمامی آزمایش‌ها به همراه ۵ نقطه‌ی مرکزی و ۶ نقطه‌ی محوری (پیرامونی) اجرا می‌کنیم. در جدول ۵ داده‌های مربوط به مقدار گشتاور کاسه‌چرخ (متغیر پاسخ اول) ارائه شده است. در این بررسی اندازه لقی کاسه‌چرخ به صورت متغیرهای زبانی به صورت زیاد، خیلی زیاد، کم، متوسط و خیلی کم توسط متخصصین بیان می‌شود. روش کار بدین‌گونه است که اندازه‌ی متغیر پاسخ در سطوح مربوطه (قطر توپی قسمت کاسه‌نمد، قطر داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی) از سه کارشناس خبره در این زمینه پرسیده می‌شود. سپس این متغیرهای زبانی در قالب جدول ۷ به صورت اعداد فازی بیان می‌شوند. برای تصادفی‌بودن انجام آزمایش‌های متغیر پاسخ دوم، یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۲۴ اختیار می‌شود. این فرایند تا زمانی که آزمایش بیست‌وچهارم انجام شود، ادامه دارد. در این نوشتار اعداد تصادفی تولیدی برای متغیر پاسخ دوم عبارت‌اند از: ۷،

۱۲، ۱۷، ۲۳، ۱۰، ۵، ۲۰، ۱۵، ۱۱، ۳، ۲۴، ۹، ۱۴، ۲۱، ۶، ۱۶، ۱، ۱۸، ۲، ۲۲، ۸، ۱۳، ۱۹، ۴ که از آنها برای ترتیب انجام آزمایش‌ها استفاده خواهد شد. بعد از انجام آزمایش‌های متغیر پاسخ دوم، برای تبدیل نظرات کارشناسان به یک نظر واحد از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم:

اگر نظر فازی همه‌ی تصمیم‌گیرندگان به صورت اعداد فازی مثلثی $(a_k b_k c_k)$ بیان شود، جمع این اعداد فازی برابر است با: [۱۳]

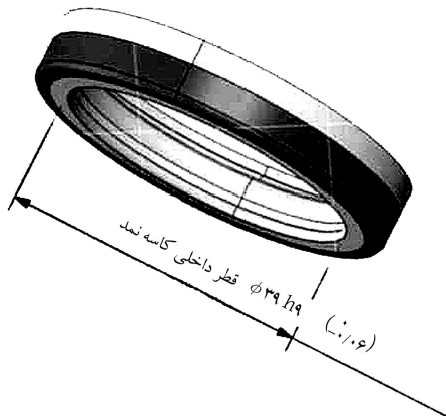
$$R = (a \ b \ c) : \quad n = 1, 2, \dots, k$$

$$a = \min\{a_n\} \quad b = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k b_n \quad c = \max\{c_n\} \quad (15)$$

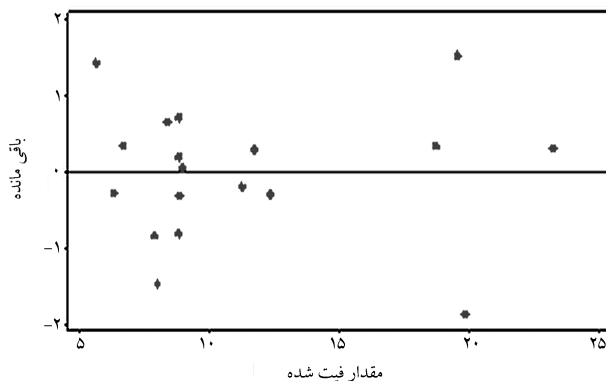
داده‌های جدول ۸ مربوط است به مقدار لقی کاسه‌چرخ (متغیر پاسخ دوم) که برگرفته از نظرات سه کارشناس و تبدیل آن به یک نظر واحد است.

۸. تجزیه و تحلیل آماری

نتایج آماری متغیرهای پاسخ، مدل رگرسیون چندمتغیره‌ی برازش شده، نمودار احتمال نرمال (Y_1) در شکل ۳ و نمودار پراکنش مشاهده شده (ei) در مقابل مقادیر متغیر پاسخ اول در شکل ۴ و جداول ۹ و ۱۰ توسط نرم‌افزار SAS و Minitab ۱۴ و MATLAB ارائه شده است. در این جداول نتایج آزمون‌های فرض مربوط به وجود اثرات اصلی و متقابل متغیر پاسخ اول (گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ



شکل ۳. قطر داخلی کاسه‌نمد.



شکل ۴. نمودار پراکنش مشاهده شده (ei) در مقابل مقادیر متغیر پاسخ اول.

جدول ۶. اطلاعات متغیر پاسخ دوم (لقی کاسه‌چرخ).

اجرا	شماره‌ی آزمایش	سطوح معتبر کد نشده			لقی کاسه‌چرخ	تبدیل اعداد کیفی به فازی
		X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (kg.m)		
۱۷	۱	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۴	زیاد	(۵, ۷,۵, ۱۰)
۱۹	۲	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۴	متوسط	(۲,۵, ۵, ۷,۵)
۱۰	۳	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۴	متوسط	(۲,۵, ۵, ۷,۵)
۲۴	۴	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۴	خیلی زیاد	(۷,۵, ۱۰, ۱۰)
۶	۵	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۴	زیاد	(۵, ۷,۵, ۱۰)
۱۵	۶	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۴	خیلی زیاد	(۷,۵, ۱۰, ۱۰)
۱	۷	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۲۱	۸	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۱۲	۹	۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۵	۱۰	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۷	متوسط	(۲,۵, ۵, ۷,۵)
۹	۱۱	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۲	۱۲	۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۷	متوسط	(۲,۵, ۵, ۷,۵)
۲۲	۱۳	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۴	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۱۳	۱۴	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۴	خیلی کم	(۰, ۰, ۲,۵)
۸	۱۵	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۴	خیلی کم	(۰, ۰, ۲,۵)
۱۶	۱۶	۳۹	۳۹	۰,۴	خیلی زیاد	(۷,۵, ۱۰, ۱۰)
۳	۱۷	۳۹	۳۹	۰,۴	خیلی زیاد	(۷,۵, ۱۰, ۱۰)
۱۸	۱۸	۳۹	۳۹	۰,۴	زیاد	(۵, ۷,۵, ۱۰)
۲۳	۱۹	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۷	خیلی کم	(۰, ۰, ۲,۵)
۷	۲۰	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۷	خیلی کم	(۰, ۰, ۲,۵)
۱۴	۲۱	۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۷	خیلی کم	(۰, ۰, ۲,۵)
۲۰	۲۲	۳۹	۳۹	۰,۷	متوسط	(۲,۵, ۵, ۷,۵)
۴	۲۳	۳۹	۳۹	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)
۱۱	۲۴	۳۹	۳۹	۰,۷	کم	(۰, ۲,۵, ۵)

خودرو) از طریق مقایسه‌ی آماری F^* و $F_{0,05,1,11} = 6,72$ محاسبه شده است.

۱۰. مدل رگرسیون متغیر پاسخ Y_2 (اندازه‌ی لقی

کاسه‌چرخ خوردرو)

مدل رگرسیون متغیر پاسخ Y_2 با استفاده از اطلاعات به دست آمده از جدول ۸ و با استفاده از روش رگرسیون خطی فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق به صورت زیر است:

$$Y_2 = (-1309,4 - 1308,6 - 1308) + (-33,8 - 33,7 - 33,7) \times X_1 + (67,6 \ 67,6 \ 67,6) \times X_2 + (-12,5 - 12,5 - 10,4) \times X_3 \quad (17)$$

۹. مدل رگرسیون متغیر پاسخ Y_1 (گشتاور چرخشی

کاسه‌چرخ خوردرو)

مدل رگرسیون گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ عبارت است از:

$$Y = 8,802 + 1,743x_1 + 1,3x_2 + 0,237x_3 + 3,434x_4 - 3,689x_2 + 1,678x_3 - 2,312x_1 \times x_2 \quad (16)$$

جدول ۷. مجموعه‌های فازی و توابع عضویت.

مجموعه‌های فازی و توابع عضویت			
مجموعه فازی	تابع عضویت	دامنه	مثلت (بالا، میانه، پایین)
خیلی زیاد	$U(x) = (x - ۷,۵) / (۱۰,۰ - ۷,۵)$	$۷,۵ \leq x \leq ۱۰,۰$	$۷,۵, ۱۰,۰, ۱۰,۰$
زیاد	$U(x) = (x - ۵,۰) / (۷,۵ - ۵,۰)$	$۵,۰ \leq x \leq ۷,۵$	$۵,۰, ۷,۵, ۱۰,۰$
	$U(x) = (۱۰,۰ - x) / (۱۰,۰ - ۷,۵)$	$۷,۵ \leq x \leq ۱۰,۰$	
متوسط	$U(x) = (x - ۲,۵) / (۵,۰ - ۲,۵)$	$۲,۵ \leq x \leq ۵,۰$	$۲,۵, ۵,۰, ۷,۵$
	$U(x) = (۷,۵ - x) / (۷,۵ - ۵,۰)$	$۵,۰ \leq x \leq ۷,۵$	
کم	$U(x) = (x - ۰,۰) / (۲,۵ - ۰,۰)$	$۰,۰ \leq x \leq ۲,۵$	$۰,۰, ۲,۵, ۵,۰$
	$U(x) = (۵,۰ - x) / (۵,۰ - ۲,۵)$	$۲,۵ \leq x \leq ۵,۰$	
خیلی کم	$U(x) = (۲,۵ - x) / (۲,۵ - ۰,۰)$	$۰,۰ \leq x \leq ۲,۵$	$۰,۰, ۰,۰, ۲,۵$

جدول ۸. تبدیل اعداد کیفی به یک عدد فازی.

سطح متغیر کد بندی شده			لقی کاسه چرخ	تبدیل اعداد کیفی به یک عدد فازی
X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (kg.m)		
۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۴	متوسط، متوسط، زیاد	(۲,۵, ۵, ۸۳, ۱۰)
۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۴	خیلی زیاد، زیاد، خیلی زیاد	(۵, ۹, ۲, ۱۰)
۳۸,۹۳۸	۳۸,۹۳۸	۰,۷	کم، کم، کم	(۰, ۲, ۵, ۵)
۳۸,۹۳۸	۳۹	۰,۷	متوسط، کم، متوسط	(۰, ۴, ۲, ۷, ۵)
۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۴	خیلی کم، خیلی کم، کم	(۰, ۰, ۸۳, ۵)
۳۹	۳۹	۰,۴	زیاد، خیلی زیاد، خیلی زیاد	(۵, ۹, ۲, ۱۰)
۳۹	۳۸,۹۳۸	۰,۷	خیلی کم، خیلی کم، خیلی کم	(۰, ۰, ۲, ۵)
۳۹	۳۹	۰,۷	کم، کم، متوسط	(۰, ۳, ۳۳, ۷, ۵)

جدول ۹. آزمون معناداری برای ضرایب رگرسیون Y_1 .

متغیر	DF	ضریب	انحراف معیار	ارزش نادرست	$p_2 > F $
x_1	۱	۳,۴۳۴۲۸	۰,۶۶۴۷۲	۲۶,۶۹*	۰,۰۰۰۳
x_2	۱	-۳,۶۸۹۳۲	۰,۶۶۴۷۲	۳۰,۸۰*	۰,۰۰۰۲
x_3	۱	۱,۶۷۸۳۰	۰,۶۶۴۷۲	۶,۳۷*	۰,۰۲۸۲
$x_1 \times x_2$	۱	-۲,۳۱۲۵۰	۰,۸۶۸۱۱	۷,۱۰*	۰,۰۲۲۰
$x_1 \times x_3$	۱	۰,۵۶۲۵۰	۰,۸۶۸۱۱	۰,۴۲	۰,۵۳۰۳
$x_2 \times x_3$	۱	-۰,۳۱۲۵۰	۰,۸۶۸۱۱	۰,۱۳	۰,۷۲۵۷

$$F_{۰,۰۵,۱,۱۱} = ۶,۷۲ \text{ و } \alpha = ۰,۰۵$$

* معنی دار

جدول ۱۰. تحلیل واریانس و رگرسیون برای Y_1 .

منبع	مجموع خطا	درجه آزادی	میانگین خطا	ارزش F	$p > F $
مدل	۴۸۴,۷۳۹۱	۷	۶۹,۲۴۸۴	۵۹,۵۷	< ۰,۰۰۰۱
خطا	۱۲,۷۸۷۲	۱۱	۱,۱۶۲۵		
کل	۴۹۷,۵۲۶۳	۱۸			

ضریب تعیین (R^2), ۰,۹۷۴۲۹۸
 ضریب تعیین تعدیل شده (R^2), ۰,۹۵۷۹
 ضریب تغییرات ۹,۶۶۲۹۳۹٪

۱۲. بررسی کفایت مدل Y_1

با فرض این که خطاها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشند، با رسم نمودار احتمال نرمال مانده‌ها در صورتی که این نمودار شبیه یک خط مستقیم باشد می‌توان به کفایت مدل پی برد. این نمودار در شکل ۵ نشان داده شده است.

۱۳. بهینه‌سازی فرایند چندپاسخه مبنی بر LP سنجی

روش LP سنجی به منظور سنجش نزدیکی یک راه حل ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیوه‌ی این سنجش از انحراف عبارت خواهد بود: [۱۵، ۱۴]

$$\min Z = \sum_{j=1}^n w_j \left(\frac{y_j^* - y_j}{y_j^*} \right)^p$$

S.t.

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i : i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

y_j بیانگر تابع هدف زام است و هر هدف y_j به صورت بیشینه مد نظر است. همچنین y_j^* نشان‌دهنده‌ی جواب ایده‌آل برای هدف زام و w_j نشان‌دهنده‌ی درجه اهمیت (وزن) هدف زام است. برای از بین بردن مشکل متفاوت بودن مقیاس‌های اهداف، میزان انحراف جواب ایده‌آل هدف زام و تابع هدف آن را بر y_j^* تقسیم می‌کنیم. توان p هم مشخص‌کننده‌ی درجه‌ی تأکید بر انحرافات است به گونه‌ی که

به منظور استفاده‌ی همزمان از این مدل و مدل به دست آمده از متغیر پاسخ Y_1 در مسائل چندمنظوره، مدل Y_2 باید از حالت فازی خارج و به صورت کدشده بیان شود؛ شرح انجام این کار عبارت است از:
 فرض کنید اعداد فازی ضرایب تابع هدف به صورت اعداد فازی مثلثی تعریف شوند؛ یعنی بردار فازی \tilde{C} چنین تعریف شود:

$$\tilde{C} = (C^p \ C^m \ C^o) \quad (18)$$

رویکردهای مختلفی برای تبدیل ضریب فازی فوق به ضریب کلاسیک وجود دارد. ما در این مطالعه برای دوفازی کردن از رابطه‌ی ۱۹ استفاده کرده‌ایم:

$$C_j = \frac{C_j^p + 4C_j^m + C_j^o}{6} \quad (19)$$

مدل به دست آمده پس از دوفازی کردن عبارت است از:

$$Y_2 = -1308763 - 33772 \times X_1 + 6776 \times X_2 - 12715 \times X_3 \quad (20)$$

متغیرهای مستقل این مدل نیز توسط رابطه زیر به صورت کدشده بیان می‌شوند:

$$x_i = \frac{2(X_i - \bar{X}_i)}{d_i}$$

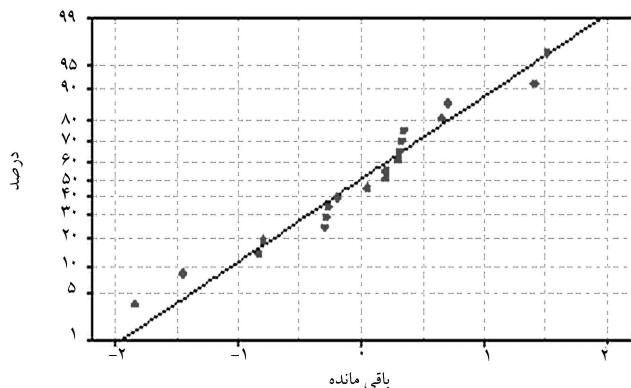
به طوری که X_i اندازه‌ی واقعی عامل i ام در ابعاد مربوطه، \bar{X}_i میانگین سطوح بالا و پایین X_i ، و d_i فاصله‌ی میان سطوح بالا و پایین X_i هستند. مدل رگرسیون Y_2 که از آن در مسئله‌ی چندمنظوره استفاده می‌شود عبارت است از:

$$Y_2 = 490565 - 104532 \times x_1 + 20956 \times x_2 - 18225 \times x_3 \quad (21)$$

قابل توجه است که مدل رگرسیون به دست آمده به صورت \min است.

۱۱. بررسی واریانس خطای Y_1

اگر مدل درست باشد و فرض نرمال بودن نیز برقرار باشد، مانده‌ها باید بی‌ساختار باشند و نیز به هیچ متغیر دیگری، از جمله متغیر پاسخ، وابسته نباشند. با توجه به نمودار پراکنش خطا در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده که در شکل ۴ دیده می‌شود، خطاها هم‌واریانس‌اند.



شکل ۵. نمودار نقطه‌ی احتمال نرمال مانده‌ها برای متغیر پاسخ اول.

جدول ۱۱. جواب‌های بهینه‌ی اولیه.

x_3	x_2	x_1	پاسخ	
۰٫۶۵	۰٫۷۵	۰٫۷۵	۱۰	Max Y_1
۱	۰	۱	-۲٫۰۸۸۶۸	Max Y_2

حال سعی می‌کنیم تابع انحرافات حاصل از دو تابع فوق را کمینه کنیم:

$$\min Z = \left(\frac{10 - 1,7802 - 1,743x_1 - 1,3x_2 - 0,273x_3 - 3,434x_4 + 3,689x_5 - 1,678x_6 + 2,312x_7x_8}{10} \right)^p + \left(\frac{-2,08868 + 0,5865 - 1,0432x_1 + 2,0956x_2 - 1,8225x_3}{-2,08868} \right)^p \quad (23)$$

s.t.

$$x_1 \geq -1$$

$$x_2 \geq -1$$

$$x_3 \geq -1$$

$$x_1 \leq 1$$

$$x_2 \leq 1$$

$$x_3 \leq 1$$

هرچه این ارزش بزرگ‌تر باشد تأکید بیشتری بر بزرگ‌ترین انحراف خواهد بود. تابع هدف کلی روش LP سنجی نیز به منظور کمینه‌سازی انحرافات از ایده‌آل باید کمینه شود. در اینجا برای این که دو مرحله‌ی یادشده در مراحل مونتاژ کاسه‌چرخ از درجه اهمیت یکسانی برخوردار باشند، مقدار وزن (w_j) را برای دو مرحله برابر ۱ در نظر می‌گیریم. با استفاده از نرم‌افزار LINGO و با تغییر مقدار P میزان تابع هدف بالا و متغیرهای مسئله و با استفاده از آنها مقادیر z_j ($j = 1, 2$) را به دست می‌آوریم تا جواب مؤثر پیدا شود. در این روش توابع هدف را به‌طور جداگانه از طریق نرم‌افزار LINGO بهینه کرده و جواب‌های بهینه‌ی به دست آمده از هر تابع هدف را در توابع هدف دیگر قرار می‌دهیم. جواب‌های به دست آمده در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۲. نتایج به دست آمده با استفاده از LP سنجی.

Z	$Z_2(\max)$	Z_1	x_3	x_2	x_1	P
-۱٫۹۹۱۳۴۰	-۶٫۹۷۸۹۸۹۳۵۸	۶٫۵۰۰۰۰۰۰۰۰۲	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۰۹۲	۱
۰٫۵۲۲۱۴۴۸	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۲
-۱۲٫۷۹۲۰۵	-۶٫۹۷۸۹۸۹۳۵۸	۶٫۵۰۰۰۰۰۰۰۰۲	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۰۹۲	۳
۰٫۲۷۲۶۳۵۲	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۴
-۷۰٫۳۵۴۱۲	-۶٫۹۷۸۹۸۸۹۵	۶٫۵۰۰۰۰۰۰۰۵۳۴	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۱۳۱	۵
۰٫۱۴۲۳۵۵۰	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۶
-۳۸۵٫۷۰۰۳	-۶٫۹۷۸۹۸۸۹۵	۶٫۵۰۰۰۰۰۰۰۵۳۴	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۱۳۱	۷
۰٫۰۷۴۳۲۹۹۴	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۸
-۲۱۱۴٫۳۶۶	-۶٫۳۲۰۹۹۹۱۱۵	۸٫۰۵۰۳۴۷۱۹۲	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۰۳۹	۹
۰٫۰۳۸۸۱۰۹۹	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۱۰
-۱۱۵۹٫۰۶۹	-۶٫۹۷۸۹۸۹۹۱۲	۶٫۴۹۹۹۹۹۹۲۷۸	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۰۳۹	۱۱
۰٫۰۲۰۲۶۴۹۶	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۱۲
-۶۳۵۳٫۰۶۸	-۶٫۹۷۸۹۸۹۹۱۲	۶٫۴۹۹۹۹۹۹۲۷۸	۰	۱	۰٫۰۶۹۹۴۰۳۹	۱۳
۰٫۰۱۰۵۸۱۲۴	-۳٫۵۹۷۹۵۱۵۹	۹٫۹۹۹۹۹۹۹۹۹	۱	۰٫۲۲۱۳۹۳۲	۰	۱۴

جدول ۱۳. جواب به دست آمده توسط LP سنجی.

Z	x_3	x_2	x_1	Y_2	Y_1		
۰٫۵۲۲۱	۱	۰٫۲۲۱۴	۰	-۳٫۵۹۷۹	۱۰	$W_1 = W_2$	کدشده
۰٫۵۲۲۱	۰٫۷	۳۸٫۹۷۶	۳۸٫۹۶۹	-۳٫۵۹۷۹	۱۰	$P = 2$	کدننشده

ارائه شد و با توجه به مقدار ارزش نادرستی و سطح معنی‌دار $\alpha = 0.05$ تمام عوامل اصلی x_1, x_2, x_3 و اثر متقابل $x_1 \times x_2$ روی متغیر پاسخ اول (گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ خودرو) مؤثر تشخیص داده شدند. مدل مرتبه‌ی دوم ارائه شده برای متغیر پاسخ اول به‌علت داشتن MSE بسیار پایین و میزان ضریب تعیین مناسب و همچنین مقادیر نرمال با میانگین صفر و واریانس یکسان دارای کفایت مناسبی برای توصیف داده‌های متغیر پاسخ اول است. همچنین مدل متغیر پاسخ دوم (لقی کاسه‌چرخ) با استفاده از روش رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کم‌ترین انحراف مطلق به دست آمد. در ادامه، میزان عوامل مؤثر به کمک حل یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی محاسبه و با اعمال مقادیر به دست آمده طی یک آزمایش عملی میزان گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ 10.5 kg.cm و لقی کاسه‌چرخ خیلی کم به دست آمدند که با مقدار پیش‌بینی شده به ترتیب اختلاف ناچیز 5 و 8 درصدی دارند. همچنین مقدار این عوامل با روش LP سنجی نیز بررسی شده است. بعضی نواحی تحقیقاتی آینده، حل کردن مدل به دست آمده توسط LP سنجی توسط یکی از الگوریتم‌های فزادهنی مثل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، شبکه‌های عصبی، الگوریتم مورچگان و غیره برای حل کردن مسئله‌ی مورد نظر است.

تشکر و قدردانی

از هیئت مدیره شرکت محور سازان گروه کوشا به‌دلیل حمایت‌های مالی و نیز از همکاری بی‌دریغ کارکنان این شرکت کمال تشکر را داریم.

پانویس

1. response surface methodology (RSM)
2. desirability function approach
3. fuzzy regression using least absolute deviation estimators (FLAD)

منابع

1. Sobieszczanski-Sobieski, J.; Kodiyalam, S. and Yang, R.Y. "Optimization of car body under constraints of noise, vibration, and harshness (NVH), and crash", *Structural and multidisciplinary optimization*, **22**(9), pp. 295-306 (2000).
2. Marklund, P.O. and Nilsson, L. "Optimization of a car body component subjected to side impact", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **21**(5), pp. 383-392 (2001).
3. Chun, B.K.; Kim, H.Y. and Lee, J.K. "Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part II: Applications", *International Journal of Plasticity*, **18**(5-6), pp. 597-616 (2002).
4. Rezzoug, S.A.; Boutekdjiret, C. and Allaf, K. "Optimization of operating conditions of rosemary essential

$$8,780.2 + 1,774.3x_1 + 1,73x_2 + 0,237x_3 + 3,434x_1 - 3,689x_2 + 1,678x_3 - 2,312x_1 \times x_2 \geq 6,5 \quad (30)$$

$$8,780.2 + 1,774.3x_1 + 1,73x_2 + 0,237x_3 + 3,434x_1 - 3,689x_2 + 1,678x_3 - 2,312x_1 \times x_2 \leq 10 \quad (31)$$

تکرارهای بیشتر از 14 به دلیل ایجاد مقادیر X_i مشابه نشان داده نشده است. با توجه به جدول 12، تکرار $P = 2$ به‌علت ایجاد مقادیر Y_1 و Y_2 مطلوب (با توجه به موارد گفته شده در نوشتار) و مقدار مورد قبول تابع هدف را می‌توان به‌عنوان جوابی مؤثر انتخاب کرد.

با توجه به نظر تصمیم‌گیران، وزن‌های مقایسه‌ی و جواب حاصل با استفاده از نرم‌افزار LINGO در جدول 13 آورده شده است. این جواب‌ها به‌ازای $p = 2$ حاصل شده و با افزایش مقدار p جواب‌های حاصله برابر مقادیر ذکر شده یا بدتر از آن به دست می‌آید.

14. نتیجه‌گیری

در این نوشتار ضمن بررسی و تعیین عوامل مؤثر در میزان گشتاور چرخشی کاسه‌چرخ خودرو و لقی کاسه‌چرخ، این عوامل (قطر توپی قسمت کاسه‌نمد، قطر داخلی کاسه‌نمد و گشتاور مهره قفلی) چنان تنظیم شدند که میزان متغیرهای پاسخ بهینه شوند. سطوح بالا و پایین و نقاط مرکزی و محوری عوامل مؤثر طی آزمایش‌های مشروحه

oil extraction by a fast controlled pressure drop process using response surface methodology", *Journal of Food Engineering*, **71**(1), pp. 9-17 (2005).

5. Dalvi, V.B.; Tiwari, K.N.; Pawade, M.N. and Phirke, P.S. "Response surface analysis of tomato production under microirrigation", *Agricultural water management*, **41**(1), pp. 11-19 (1999).
6. Amiri, M. and Salehiye-sadeghiyani, J. "A methodology for optimizing statistical multi-response problems using goal programming", *Scientia Iranica*, **15**(3), pp. 389-397 (2008).
7. Pasandideh, S.H.R. and Niaki, S.T.A. "Multi-response simulation optimization using genetic algorithm within desirability function framework", *Applied Mathematics and Computation*, **175**(1), pp. 366-382 (2006).
8. Nuorollsen, R. and Sultan-Penah, H. "Offering a method for extracting D.M function and using it for the multi-purpose optimization within the framework of RSM", *International Journal of Engineering Science*, **15**, pp. 221-233 (2003).
9. Amiri, M.; Gheshlaghi, K. and Kiyomarsi, H. "Application of design of experiments (DOE), response surface methodology (RSM), multi objective decision making (MODM) in effective quality characteristic improvement", *Journal of Tehran University*, **109**(7), (2007).

10. Choi, S.H. and Buckley, J.J. "Fuzzy regression using least absolute deviation estimators", *Soft Computing*, **12**(3), pp. 257-263 (2007).
11. Ip, K.W.; Kwong, C.K. and Wong, Y.W. "Fuzzy regression approach to modelling transfer moulding for microchip encapsulation", *journal of materials processing technology*, **140**(1-3), pp. 147-151 (2003).
12. Noorosana, R. "The presentation of methodology to obtain the decision function for multiple-response optimization in response surface methodology", *Amirkabir Journal of Science and Technology*, **60**, pp. 25-37 (2005).
13. Chen-Tung, C.; Ching-Torng, L. and Sue-Fn, H. "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management", *International Journal of Production Economics*, **102**(2), pp. 289-301 (2006).
14. Neter, J.; Kutner, M.H.; Wasserman, W.; Nachtsheim, C. and Neter, J., *Applied Linear Statistical Methods*, 4th ed., McGraw-Hill, New york (1996).
15. Myers, R.H. and Montgomery, D.C., *Response Surface Methodology: Process and Optimization Using Designed Experiment*, John Wiley and sons Inc (1995).