

تعیین میزان بهینه عوامل موثر در گشتاور چرخشی کاسه چرخ خودرو با استفاده از روش شناسی رویه پاسخ و الگوریتم ژنتیک

مقصود امیری*، جمشید صالحی صدقیانی، روزبه عزیزمحمدی و حسن هادی پور

کلمات کلیدی

طراحی آزمایشات،
روش شناسی رویه پاسخ،
کنترل کیفیت،
گشتاور چرخشی کاسه چرخ،
مجموعه اکسل،
متغیر پاسخ،
الگوریتم ژنتیک

چکیده:

با توجه به نقش حساس مجموعه اکسل بالاخص کاسه چرخ خودرو، به دلیل مرتبط بودن آن با ایمنی سرنشینان، بررسی فرآیند تولید و مونتاژ و انجام آزمایشات کنترل کیفی حین این مراحل از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این مقاله با توجه به اهمیت بالای سه عامل اصلی قطر تویی قسمت کاسه نمد، قطر داخلی کاسه نمد و گشتاور مهره قفلی به عنوان متغیرهای مستقل، سعی بر آن داریم میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ خودرو را (تحت عنوان متغیر پاسخ)، به کمک مباحث مطرح در طراحی آزمایشات و روش سطح پاسخ بهینه نمائیم. در ادامه میزان گشتاور بهینه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی محاسبه و جهت بررسی آن با جواب به دست آمده از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده اند.

۱. مقدمه

طراحی آزمایشات یکی از ابزارهای قوی در اصلاح و بهبود عملکرد فرآیندهای تولید می‌باشد که با تعیین اهداف یک آزمایش و انتخاب عوامل فرآیند آغاز می‌شود. در یک تعبیر ریاضی، هدف پیدا کردن شرایط عملیاتی یا سطوح عامل (X_1, X_2, \dots, X_k) است تا r متغیر پاسخ (Y_1, Y_2, \dots, Y_r) بسته به نوع مسئله کمینه یا بیشینه شوند. به بیان دیگر اهداف مدنظر در طراحی آزمایشات و روش شناسی رویه پاسخ که غالباً بطور متوالی انجام می‌شوند، به ترتیب عبارتند از: استخراج عوامل یا متغیرهایی که در سطح پاسخ موثرند و تنظیم حدود این عوامل یا متغیرها که بهترین میزان پاسخ را منجر شود.

تاریخ وصول: ۸۸/۱۱/۲۳

تاریخ تصویب: ۸۹/۹/۱۷

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر مقصود امیری، استادیار و عضو هیات علمی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبائی.

دکتر جمشید صالحی صدقیانی، استاد و عضو هیات علمی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبائی.

روزبه عزیزمحمدی، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه پیام نور تهران.
Roozbeh_mie@yahoo.com

حسن هادی پور، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

بررسی تحقیقات پیشین حاکی از آن است که به رغم توسعه چشمگیر طراحی آزمایشات و تجزیه و تحلیل داده‌های آماری به عنوان روش‌هایی موثر در بهبود کیفیت محصولات در صنایع غذایی، شیمیایی، دارویی، روش‌های بهینه سازی یاد شده در صنایع دیگر همچون خودروسازی مورد توجه کافی قرار نگرفته است. ذیلاً به معرفی نمونه‌ای از آنها می‌پردازیم:

Sobieszczanski-sobieski و همکارانش (2000) در یک بررسی طراحی بدنه خودرو را با در نظر گرفتن سه محدودیت شدت صوت، ارتعاش و نامساعد بودن محیط به کمک مباحث مطرح در RSM بهینه نمودند [۳]. Marklund و همکارانش (2001) به کمک روش شناسی رویه پاسخ و طراحی آزمایشات طی مقاله‌ای به تنظیم عوامل موثر در طراحی بدنه اتومبیل پرداختند [۴].

Chun و همکارانش (2003) در مقاله خود تجزیه و تحلیل آماری و طراحی آزمایشات را به منظور شناسایی پارامترهای مواد بر روی نمونه‌های تشکیل شده از مواد غیر انعطاف پذیر انجام دادند. آنان در این مقاله اثرات پراکنده اطلاعات آزمایش را بر روی شناسایی پارامترهای مواد تشریح نمودند. نتایج اطلاعاتی آزمایشات از سه نوع آزمایش انجام شده بر روی فولاد ضدزنگ AINSI SS316 در درجه حرارت صفر که شامل تست کشش، تست تنش با فشار ثابت

می‌گیرد. بعد از قرارگیری توپی بر روی طبق، سیلندر ترمز، اهرم رگلاژ و کفشک‌های ترمز بر روی طبق نصب می‌گردند. پس از این مرحله کنس خارجی رولبرینگ کوچک و بزرگ را در داخل کاسه چرخ قرار داده و کاسه نم‌بر روی مجموعه کاسه چرخ قرار می‌گیرد. پس از حصول اطمینان از قرارگیری متقارن کفشک‌ها در وسط طبق و تنظیم شیار سیلندر ترمز، مجموعه کاسه چرخ را روی طبق قرار می‌دهیم.

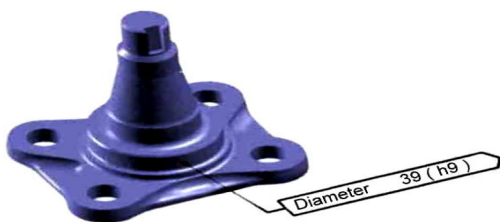
نهایتاً مجموعه فوق توسط واشرو مهره قفلی به یکدیگر مونتاژ می‌شوند. گشتاور اندازه‌گیری شده مهره قفلی و چرخشی کاسه چرخ در این مرحله باید به ترتیب در بازه 0.4-0.7 kg.m و 6.5- kg.cm باشد. پس از این مراحل درپوش مهره قفلی را نصب کرده و بعد از قرار دادن اشیپیل، آن را توسط میله فلزی خم نموده و بعد از پر کردن درپوش مهره قفلی با گریس، با دریافت درپوش مهره قفلی را با ضربه چکش سفت می‌نماییم.

۳. انتخاب عوامل موثر و تعیین سطوح آنها

با توجه به بررسی‌های انجام شده و اتفاق نظر کارشناسان [۱۳]، عوامل مذکور به شرح ذیل می‌باشند:

۳-۱. قطر توپی قسمت کاسه نم‌د

توپی از جنس فولاد (شکل ۱) و از استاندارد NES و یا از جنس 1.07447 مطابق با استاندارد DIN است. دارای چهار عدد سوراخ بر روی پایه خود و قسمت رزوه با مشخصه $M16 \times 1.5-2 \text{ mm}$ می‌باشد. این قطعه در مجموعه طبق ترمز راست و چپ در هر طرف به تعداد یک عدد قرار می‌گیرد. اتصال مجموعه طبق ترمز به پوسته توسط چهار عدد پیچ توپی هزار خاری که در داخل هر یک از سوراخهای توپی قرار می‌گیرند، صورت می‌گیرد. بر روی بدنه توپی یک عدد رولبرینگ بزرگ و یک عدد رولبرینگ کوچک قرار می‌گیرد که نقش چرخش کاسه چرخ را بر عهده دارند. این در حالیست که توپی در داخل مجموعه طبق ترمز به صورت ثابت قرار دارد. با توجه به موارد مذکور قطر توپی قسمت کاسه نم‌د در تعیین مقدار گشتاور چرخشی کاسه چرخ از اهمیت بسیاری برخوردار است. در جدول ۱ سطوح بالا و پائین این قطر مطابق نقشه فنی مربوط آمده است.



شکل ۱. قطر توپی قسمت کاسه نم‌د

با استراحت میانی و تست فشار و کشش به صورت دوره ای بوده و هر یک از آزمایشات با ۱۲ نمونه در نرخ‌های فشار متفاوت انجام شده، به هر حال برای ارزیابی آماری، تعداد بسیاری از آزمایشات نیاز می‌باشند. روش شبیه‌سازی تصادفی یک تکنیک قابل قبولی را در مهندسی ارایه می‌دهد که هیچگونه پیچیدگی به فرآیند شناسایی مواد اضافه نمی‌کند و از طرف دیگر زمان محاسباتی شناسایی مواد را تا حد امکان پایین نگه داشته و یک بررسی ضریب اطمینان بر روی مناسب بودن پارامترهای مواد انجام می‌دهد [۵].

Rezzough و همکارانش (2005) با استفاده از روش شناسی رویه پاسخ به بسط مدل‌های تجربی برای تجزیه و تحلیل فاکتورهای مستقل و موثر از جمله فشار فرآیند، زمان پردازش و مقدار رطوبت موجود در خاک پرداخته و شرایط بهینه استحصال روغن را با در نظر گرفتن عوامل یاد شده با استفاده از تجزیه و تحلیل رویه پاسخ به دست آوردند [۶]. Dalvi و همکارانش (1999) از روش شناسی رویه پاسخ برای به دست آوردن شرایط عملیاتی بهینه در صنایع غذایی استفاده نمودند و به کمک آن ماکزیمم محصول و مینیمم هزینه صرف شده را تعیین نمودند [۷].

امیری و صالحی صدقیانی (2006) در مقاله خود روشی برای بهینه سازی مسائل آماری چند پاسخ با استفاده از برنامه ریزی آرمانی ارائه دادند، همچنین در این مقاله از روش شناسی رویه پاسخ برای مدل کردن متغیرهای پاسخ استفاده نمودند [۸]. پسندیده و اخوان نیایی (2006) در مقاله خود مسئله بهینه سازی آماری چند پاسخ را با استفاده از روش تابع مطلوبیت مدل‌سازی نمودند. همچنین برای مدل کردن متغیر پاسخ از روش شناسی رویه پاسخ استفاده نمودند. [۹]. نورالسنا و همکارانش (2003) در مقاله خود روشی برای بهینه سازی مسائل چند پاسخ با استفاده از تابع تصمیم‌گیری در چارچوب روش شناسی رویه پاسخ ارائه نمودند [۱۰]. در مقاله ای دیگر امیری و همکارانش (2007) در دو مطالعه موردی بر روی فرایند کشش ورق گلگیر عقب پراید ۱۴۱ به عنوان مورد اول به شناسایی عوامل موثر در کیفیت محصول (تعداد قطعه نمونه سالم) و عمر قالب کشش گلگیر بوسیله طراحی آزمایشها به صورت دو طرح فاکتوریل 2^2 و 2^3 و در مطالعه موردی دوم مسئله شناسایی عوامل موثر بر بهبود فرایند قالب‌گیری تزریق پلاستیک و تعیین متغیرهای وابسته به آنها در چارچوب اهداف طراحی آزمایشات و در قالب یک طرح فاکتوریل بررسی و پس از آن مقادیر قابل قبول عوامل و متغیرهای مستقل و وابسته را با استفاده از مباحث روش شناسی رویه پاسخ و تصمیم‌گیری چند هدفه (در هر دو مطالعه موردی) محاسبه و تعیین نموده اند [۱۱].

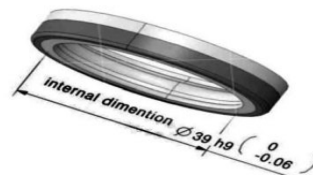
۲. توضیح مختصری از فرآیند مونتاژ کاسه چرخ

توپی کاسه چرخ یکی از اجزای اصلی در این مجموعه می‌باشد. این قطعه دارای ۴ عدد پیچ بوده که توسط این پیچ‌ها بر روی طبق قرار

۲-۳. قطر داخلی کاسه نم

جنس کاسه نم (شکل ۲) طبق استاندارد KES-T-1168 باید از N.B.R با کد B باشد. از این قطعه به تعداد ۱ عدد در مجموعه کاسه چرخ برای جلوگیری از نشتی و نفوذ گریس به داخل مجموعه طبق ترمز، استفاده می شود.

کم و زیاد بودن قطر داخلی کاسه نم سبب ایجاد درگیری و اصطکاک بیشتر بین کاسه نم و تویی و در نتیجه سبب افزایش و یا کاهش میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ می گردد. سطوح بالا و پائین این قطعه مطابق نقشه فنی مربوطه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. قطر داخلی کاسه نم

۳-۳. گشتاور مهره قفلی

پس از مونتاژ مهره قفلی، محکم بسته شدن و کامل بسته نشدن مهره، میزان درگیری رولبرینگها و تویی و در نتیجه گشتاور چرخشی کاسه چرخ را تعیین می کند. سطوح بالا و پائین این عامل در جدول ۱ آمده است.

لازم به ذکر است که مشخصات طراحی قطر تویی قسمت کاسه نم و قطر داخلی کاسه نم مطابق نقشه فنی با یکدیگر برابر می باشند.

جدول ۱. سطوح عوامل

عامل موثر	سطح بالا (+)	سطح پایین (-)
قطر تویی قسمت کاسه نم (mm)	39	38.938
قطر داخلی کاسه نم (mm)	39	38.938
گشتاور مهره قفلی (kg.m)	0.7	0.4

۴. انتخاب متغیر پاسخ

با توجه به اینکه متغیر پاسخ باید خصوصیات مهمی از فرآیند مورد بررسی را در بر داشته باشد [۲] و از طرف دیگر با توجه به تحقیقات صورت یافته، بالا بودن گشتاور چرخشی کاسه چرخ یکی از عوامل موثر در قفل شدن چرخهای عقب اتومبیل، کاهش عمر رولبرینگها و از سوی دیگر پائین بودن گشتاور فوق سبب ایجاد لقی چرخها می شود که در نهایت، مجموع عوامل فوق ایمنی سرنشینان را تهدید خواهد نمود. بنا به دلایل فوق الذکر، در این بررسی متغیر پاسخ گشتاور چرخشی کاسه چرخ در نظر گرفته شده است.

۵. انتخاب طرح آزمایش

گام مهم دیگر در انجام تحقیق انتخاب طرحی برای آزمایش است، برازش و تحلیل رویه های پاسخ با انتخاب صحیح طرح آزمایش بسیار ساده است. در اکثر مسایل مربوط به RSM از چند جمله ایها و توابع خطی برای برازش مدل استفاده میشود. اگر پاسخ به خوبی به وسیله یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شده باشد آنگاه تابع تقریب کننده مدل، مدل مرتبه اول است. اگر در سیستم خمیدگی وجود داشته باشد آنگاه باید از چند جمله ایهای درجه بالاتر مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد. در این مقاله نیز از مدل درجه دوم استفاده شده، که شکل کلی آن به صورت زیر میباشد [۴]:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^3 \beta_{ij} x_i x_j$$

در رابطه فوق \hat{Y} متغیر پاسخ؛ β_0 و β_i و β_{ii} و β_{ij} ضرایب و x_1, x_2, x_3 عوامل مستقل گذشته هستند. سطوح قطر تویی قسمت کاسه نم، قطر داخلی کاسه نم و گشتاور مهره قفلی به ترتیب هر کدام به طور خطی به وسیله معادله زیر با ارزش های اصلی بیان می شوند:

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

به طوریکه X_i اندازه واقعی عامل i ام در دیمانسیون مربوطه، \bar{X}_i میانگین سطوح بالا و پایین X_i و d_i فاصله میان سطوح بالا و پایین X_i می باشند [۴-۵]. دوران پذیری خاصیتی بسیار مهم برای انتخاب طرح رویه پاسخ است، طرح با چنین خاصیتی وقتی آن را حول مرکز $(0,0,0,0,0)$ دوران دهیم واریانس \hat{Y} تغییر نمیکند. به دلیل اینکه منظور RSM بهینه سازی است و به دلیل اینکه مکان نقطه بهینه قبل از اجرای آزمایش نامعلوم است لذا از طرحی که در تمام امتداد دقتی یکسان در بر آورد دارد استفاده میشود.

این مدل دارای مقدار $R^2 = 97.4\%$ (ضریب تعیین چندگانه) بیشتری از مدل مرتبه اول با ضریب تعیین 77.4% و یا مدل مرتبه اول با روابط متقابل با ضریب تعیین 86% است و همچنین دارای $MSE = 1.162$ (میانگین مجذور خطا) کمتری از آن دو مدل با میانگین مجذور خطا های $4.98, 7.5$ می باشد. یکی از طرحهای بکار رفته برای برازش مدل مرتبه دوم، طرح مرکب مرکزی است این طرح عبارت است از عاملی 2^k (کد بندی شده با نماد معمول (± 1) با الحاق $2k$ نقطه محوری $(0, \dots, 0, \pm \alpha, 0, \dots, 0)$ ، $(\pm \alpha, 0, \dots, 0, \pm \alpha, 0, \dots, 0)$ ، $(0, \dots, \pm \alpha, 0, \dots, \pm \alpha, 0, \dots, 0)$).

خواص دیگر طرح مرکب مرکزی را میتوان با انتخاب تعداد نقاط مرکزی n_c کنترل کرد. با انتخاب درست n_c میتوان طرح مرکب مرکزی را متعامد ساخت یا می توان از آن طرحی با دقت یکنواخت درست کرد [۱۲].

در این مقاله تعداد نقاط مرکزی برای ایجاد طرحی با دقت یکنواخت، ۵ نقطه در نظر گرفته شده است. حدود سطوح و نقاط محوری و مرکزی برای ۳ ترکیب ذکر شده، در جدول ۲ مشخص شده است:

$$N = n_c = \sqrt[4]{N} = 1.681 \text{ (طرح عاملی)}, \alpha = \sqrt[4]{N} = 1.681$$

$(0, \dots, 0)$ و $(0, 0, \dots, 0, \pm\alpha)$ و n_c تعداد نقاط مرکزی $(0, \dots, 0)$ است.

طرح مرکب مرکزی با انتخاب مناسب α دوران پذیر میشود. مقدار α برای دوران پذیری وابسته به تعداد نقاط در بخش عاملی طرح است در واقع با انتخاب $\alpha = (n_f)^{1/4}$ معلوم میشود که طرح مرکب مرکزی دوران پذیر است که در آن n_f تعداد نقاط استفاده شده در بخش عاملی طرح است. در این مقاله ۳ عامل مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین بخش عاملی شامل $n_f = 2^3 = 8$ نقطه است پس مقدار α برای دوران پذیری طرح $\alpha = (8)^{1/4} = 1.681$ است.

جدول ۲. حدود سطوح و نقاط مرکزی و محوری برای متغیر پاسخ اول

Effective factor	Un coded value	Coded level (X_i)				
		Lower level (-)		Center	Upper level (+)	
		$- \alpha$	-۱	۰	۱	α
(mm) قطر توپی قسمت کاسه نمد	X_1	۳۸.۹۱۶۹	۳۸.۹۳۸	۳۸.۹۶۹	۳۹	۳۹.۰۲۱
(mm) قطر داخلی کاسه نمد	X_2	۳۸.۹۱۶۹	۳۸.۹۳۸	۳۸.۹۶۹	۳۹	۳۹.۰۲۱
(kg.m) گشتاور مهره قفلی	X_3	۰.۳	۰.۴	۰.۵۵	۰.۷	۰.۸

داده‌های جدول زیر (جدول ۳) مقدار گشتاور کاسه چرخ (متغیر پاسخ) را نشان می‌دهند.

جدول ۳. اطلاعات آزمایش و ارزش مشاهده شده پاسخ

Run	شماره آزمایش	Coded variable level			گشتاور چرخشی کاسه چرخ (Y) (kg.cm)
		X_1	X_2	X_3	
16	1	-1	-1	-1	9
3	2	-1	1	-1	7
6	3	-1	-1	1	12
8	4	-1	1	1	9
9	5	1	-1	-1	18
1	6	1	1	-1	7
12	7	1	-1	1	23.5
7	8	1	1	1	11
2	9	- α	0	0	6.5
14	10	α	0	0	21
5	11	0	- α	0	19
15	12	0	α	0	6
13	13	0	0	- α	7
18	14	0	0	α	12
10	15	0	0	0	9
19	16	0	0	0	8.5
11	17	0	0	0	9.5
17	18	0	0	0	8
4	19	0	0	0	9

۷. بررسی مستقل بودن

با توجه به محاسبه ضریب همبستگی دو دویی متغیرها توسط نرم افزار MINITAB 14 و صفر شدن ضریب همبستگی می توان به مستقل بودن ۳ متغیر پی برد. ضرایب همبستگی استخراج شده در جدول ۴ ارائه شده اند..

۶. انجام آزمایش

با توجه به اینکه اندازه گیری مقدار گشتاور کاسه چرخ یکی از عملیاتی است که حین فرآیند مونتاژ آن انجام می‌شود و در این خلال امکان توقف خط بلحاظ تغییر حدود عوامل موثر، وجود ندارد لذا آزمایش مورد نظر در آزمایشگاه صورت می پذیرد. روش انجام آزمایش بدینصورت است که ابتدا توپی و کاسه نمد با مشخصات مورد نظر را از واحد انبار تهیه نموده و در اختیار واحد آزمایشگاه قرار می‌دهیم. (برای توپی و کاسه نمد با مشخصه α و $- \alpha$ به دلیل وجود نداشتن چنین قطعاتی ابتدا درخواست ساخت آنها به شرکت سازنده داده می‌شود و پس از ساخت جهت انجام آزمایش به واحد آزمایشگاه ارسال می‌گردد).

باید توجه داشت که یکی از مهمترین پیش نیازهای بخش تجزیه و تحلیل آماری، تصادفی بودن انجام آزمایش‌ها می‌باشد. بدین منظور فرض کنید آزمایش‌ها به صورت جدول ۵ شماره گذاری شده باشند. حال یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۱۹ اختیار می‌شود این فرآیند تا زمانی که آزمایش نوزدهم انجام شود، ادامه دارد. در این مقاله اعداد تصادفی تولیدی به صورت ۶، ۹، ۲، ۱۹، ۱۱، ۳، ۸، ۴، ۵، ۱۵، ۱۷، ۷، ۱۳، ۱۰، ۱۲، ۱، ۱۸، ۱۴، ۱۶ می- باشند که از آن برای ترتیب انجام آزمایش‌ها استفاده خواهد شد. به عنوان مثال در آزمایش شماره ۱ با مشخصه -۱ و -۱ و -۱ قطر توپی قسمت کاسه نمد، قطر داخلی کاسه نمد و گشتاور مهره قفلی هر سه در پائین‌ترین سطحشان در نظر گرفته سپس مقدار متغیر پاسخ را اندازه‌گیری می‌نمائیم. این کار را برای کلیه آزمایش‌ها به همراه ۵ نقطه مرکزی و ۶ نقطه محوری (پیرامونی) اجرا می‌نمائیم.

جدول ۴. ضریب همبستگی

ضریب همبستگی	x_1	x_2	x_3
x_1	1	0	0
x_2	0	1	0
x_3	0	0	1

$$SS_{\text{خطا}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C}$$

که در آن n_F تعداد نقاط طرح عاملی و n_C تعداد نقاط مرکزی می باشند، \bar{y}_C و \bar{y}_F به ترتیب متوسط اجراهای نقاط عاملی و نقاط مرکزی می باشند. آزمون خمیدگی در واقع فرضهای روبرو را آزمون می کند:

$$H_0 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} = 0$$

$$H_1 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \neq 0$$

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول زیر (جدول ۶) و این که $F_{0.05,1,4} = 12.22$ و $F^* > F_{0.05,1,4}$ ، در نتیجه فرض صفر رد می شود یعنی در مدل خمیدگی وجود دارد.

۸. خمیدگی مدل

مجموع مربعات خمیدگی با یک درجه آزادی با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود [۱۱]:

جدول ۵. تحلیل واریانس

منبع تغییرات	SS	Df	MS	F
خمیدگی (انحن)	32.75	1	32.75	
خطا	1.3	4	0.325	100.77

$$n_F = 2^3 = 8 \text{ و } n_C = 5 \text{ و } \bar{y}_F = 12.0625 \text{ و } \bar{y}_C = 8.8 \text{ و } SSE = \sum_{i=1}^C (y_i - \bar{y}_C)^2$$

$$df_{\text{خطا}} = n_C - 1$$

جدول ۶. تحلیل واریانس

Variable	DF	coefficient	Standard error	F value	$p_r > F $
x_1	1	3.43428	0.66472	26.69*	0.0003
x_2	1	-3.68932	0.66472	30.80*	0.0002
x_3	1	1.67830	0.66472	6.37*	0.0282
$x_1 \times x_2$	1	-2.31250	0.86811	7.10*	0.0220
$x_1 \times x_3$	1	0.56250	0.86811	0.42	0.5303
$x_2 \times x_3$	1	-0.31250	0.86811	0.13	0.7257

۹. تجزیه و تحلیل آماری

$F_{0.05,1,11} = 6.72$ محاسبه گردیده و در جدول ۷ مشخصات مربوط به متغیر پاسخ مدل برازش شده ارائه شده است.

نتایج آماری طرح، مدل رگرسیون برازش شده توسط نرم افزار SAS و نمودار پراکنش مشاهده شده (e_i) در مقابل مقادیر متغیر پاسخ در شکل ۳ و نمودار احتمال نرمال Y در شکل ۴ توسط نرم افزار MINITAB14 ارائه شده است. در جدول ۶ نتایج آزمونهای فرض مربوط به وجود اثرات اصلی و متقابل از طریق مقایسه آماره F^* و

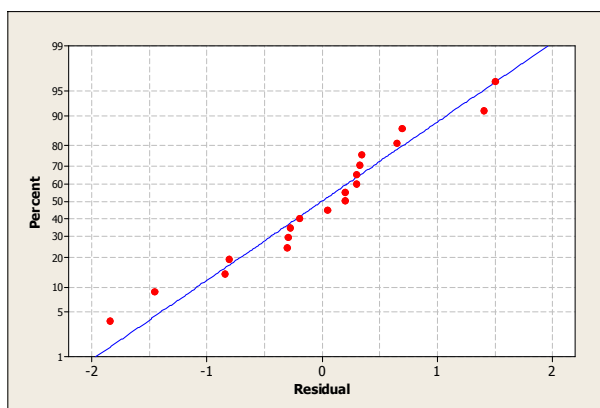
× معنی دار

$$F_{0.05,1,11} = 6.72 \text{ و } \alpha = 0.05$$

جدول ۷. تحلیل واریانس و رگرسیون برای گشتاور چرخشی کاسه چرخ

source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	$p_r > F $
Model	484.7391	7	69.2484	59.57	< .0001
error	12.7872	11	1.1625		
total	497.5263	18			

Coefficient of correlation (R^2), 0.974298
 Coefficient of determination (adjusted R^2), 0.9579
 Coefficient of variation, 9.662939%



شکل ۴. نمودار نقطه ای احتمال نرمال مانده ها برای متغیر پاسخ

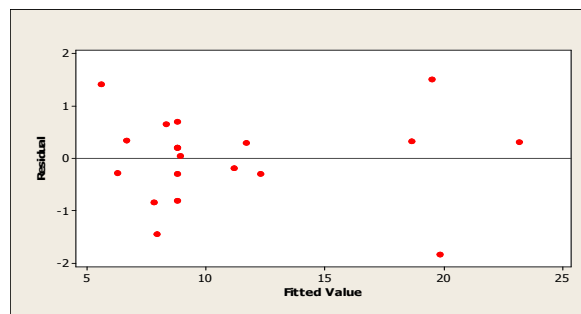
۱۰. مدل رگرسیون متغیر پاسخ Y

مدل رگرسیون گشتاور چرخشی کاسه چرخ به صورت زیر می باشد:

$$Y = 8.802 + 1.743x_1^2 + 1.3x_2^2 + 0.237x_3^2 + 3.434x_1 - 3.689x_2 + 1.678x_3 - 2.312x_1 \times x_2$$

۱۱. بررسی واریانس خطا

اگر مدل درست باشد و پذیره ها برقرار باشند مانده ها باید بی ساختار باشند و همچنین به هیچ متغیر دیگری از جمله متغیر پاسخ وابسته نباشند. با توجه به نمودار پراکنش خطا در مقابل مقادیر پیش بینی شده (شکل ۳)، خطاها هم واریانس هستند.



شکل ۳. نمودار پراکنش مشاهده شده (e_i) در مقابل مقادیر متغیر پاسخ

۱۳. بدست آوردن یک جواب بهینه

برای به دست آوردن جواب بهینه مدل برازش شده معادله پاسخ یا همان گشتاور چرخشی کاسه چرخ را به صورت یک مسئله برنامه ریزی ریاضی نوشته و یک جواب قابل قبول را با در نظر گرفتن X_i ، $i=1,2,3$ به عنوان متغیرهای کدگذاری شده بین 1 و -1 بدست می آوریم.

۱۳-۱. صورت کلی برنامه ریزی ریاضی مسئله

با توجه به اینکه میزان گشتاور کاسه چرخ می بایستی در بازه ۱۰-۶٫۵ kg.cm بیشینه گردد، لذا مدل برنامه ریزی ریاضی آن را می توان بصورت زیر فرموله نمود:

$$\max Y = 8.802 + 1.743x_1^2 + 1.3x_2^2 + 0.237x_3^2 + 3.434x_1 - 3.689x_2 + 1.678x_3 - 2.312x_1 \times x_2$$

s.t:

$$x_1 \geq -1$$

$$x_2 \geq -1$$

$$x_3 \geq -1$$

$$x_1 \leq 1$$

$$x_2 \leq 1$$

$$x_3 \leq 1$$

۱۲. بررسی کفایت مدل

با فرض اینکه خطاها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشند با رسم نمودار احتمال نرمال مانده ها در صورتی که این نمودار شبیه یک خط مستقیم باشد میتوان به کفایت مدل پی برد (شکل ۴).

$$8.802 + 1.743x_1^2 + 1.3x_2^2 + 0.237x_3^2 + 3.434x_1 - 3.689x_2 + 1.678x_3 - 2.312x_1 \times x_2 \leq 10$$

$$8.802 + 1.743x_1^2 + 1.3x_2^2 + 0.237x_3^2 + 3.434x_1 - 3.689x_2 + 1.678x_3 - 2.312x_1 \times x_2 \geq 6.5$$

جدول ۸. نتایج آزمایشات GA

شماره اجرا	متغیر های ورودی (کد شده)			ارزش برازندگی (Z)	مدت زمان اجرا
	x_1	x_2	x_3		
1	0.0062	0.0452	0.7156	9.9992	3.5469
2	0.0888	-0.1950	0.0412	9.9992	3.5781
3	0.8081	0.5383	-0.0619	9.9974	3.5000
4	-0.5256	-0.9798	-0.7910	9.9940	3.5469
5	0.5673	0.4596	0.3972	9.9970	3.5938
6	0.0732	0.2673	0.9628	9.9930	3.5625
7	0.6286	0.6745	0.6573	9.9933	3.7813
8	0.2982	0.5224	0.9965	9.9920	3.7500
9	0.5272	0.5034	0.5669	9.9946	3.6094
10	-0.2395	-0.5512	-0.1261	9.9956	3.6563
11	-0.0729	-0.1275	0.5261	9.9893	3.7813
12	-0.5219	-0.7046	0.0681	9.9945	3.5000
13	-0.4656	-0.6783	0.0286	9.9993	3.6563
14	-0.2333	-0.4517	0.1262	9.9998	3.6250
15	0.2315	-0.0336	0.0960	9.9974	3.5625
16	-0.0766	0.0626	0.8690	9.9988	3.7031
17	0.7335	0.7743	0.6122	9.9982	3.6406
18	0.5989	0.6520	0.6798	9.9952	3.6719
19	-0.4549	-0.4694	0.4818	9.9967	3.5625
20	0.1511	-0.3370	-0.5740	9.9964	3.5781
				Max	9.9998
				Mean	9.9960

الگوریتم ژنتیک، می توان به مطلق بودن جواب بهینه ارئه شده توسط نرم افزار Lingo دست یافت.

جدول ۹. متغیر ورودی برای نقطه بهینه بوسیله GA

Coded value			Uncoded value		
x_1	x_2	x_3	X_1	X_2	X_3
-0.233	-0.452	0.126	38.96	38.96	0.57

جدول ۱۰. پاسخ های بدست آمده برای نقطه بهینه به وسیله GA و lingo

	Lingo optimization	GA optimization
Y	10	9.9998

۱۵. نتیجه گیری

در این مقاله ضمن بررسی و تعیین عوامل موثر در میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ خودرو، این عوامل (قطر توپی قسمت کاسه

پس از حل توسط نرم افزار Lingo جواب های زیر حاصل می شوند:

$$x_1 = 0.75 = X_1 = 38.992mm$$

$$x_2 = 0.75 = X_2 = 38.992mm$$

$$x_3 = 0.65 = X_3 = 0.65kg m$$

اندازه پاسخ پیش بینی شده (گشتاور چرخشی کاسه چرخ) توسط نرم افزار Lingo:

$$\hat{Y} = 10kg.cm$$

۱۴. بهینه سازی مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این قسمت جهت بررسی مطلق بودن جواب بدست آمده از نرم افزار Lingo، از الگوریتم ژنتیک استفاده می شود.

جدول ۸ نتایج به دست آمده به وسیله الگوریتم ژنتیک را نشان می دهد. همچنین نقاط بهینه ای که به وسیله الگوریتم ژنتیک به دست آمده در جدول ۹ و مقایسه ارزش به دست آمده برای تابع هدف توسط الگوریتم ژنتیک و نرم افزار Lingo در جدول ۱۰ نشان داده شده است. از مقایسه جواب های ارائه شده در جدول ۱۰ به لحاظ نزدیک بودن مقدار آن با جواب به دست آمده توسط

Under Microirrigation", Agricultural water management, 41, 1999, pp. 11-19

- [8] Amiri, M., Salehiye sadeghiyani, J., "A Methodology for Optimizing Statistical Multi-Response Problems using goal Programming", 2001.
- [9] Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A., "Multi-Response Simulation Optimization Using Genetic Algorithm Within Desirability Function Framework". Applied Mathematics and Computation, Vol. 175, No. 1, April, 2006.08.01. pp. 336-382.
- [10] Nuorollsena, R., 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 Engineering Science*. Iran university of science and technology. Vol. 15, 2003, pp. 221-233.
- [11] Myers, R.H., Montgomery, D.C., "Response Surface Methodology: Process and Optimization Using Designed Experiment", John Wiley and sons Inc, 1995.
- [12] Neter, J., Kunter, M., Wasserman, W., Nachtsheim, Ch., *Applied Linear Statistical Methods*, 4ed, McGraw – Hill, New york, 1996.
- [13] Tatsuyuki, A., *Response Surface Methodology and Its Application to Automotive Suspension Design*, Toyota central R&D Labs. Inc, Japan, 2001.

نمد، قطر داخلی کاسه نمد و گشتاور مهره قفلی) به نحوی تنظیم گردیدند که میزان متغیر پاسخ بهینه گردد.

سطوح بالا و پایین و نقاط مرکزی و محوری عوامل موثر طی آزمایشاتی که شرح آن در صفحات قبل گذشت ارائه و با توجه به مقدار P-value و سطح اهمیت $\alpha=0.05$ تمام عوامل اصلی X_1, X_2, X_3 و اثر متقابل $X_1 \times X_2$ روی متغیر پاسخ موثر تشخیص داده شدند. مدل مرتبه دوم ارائه شده به علت داشتن MSE بسیار پایین و میزان ضریب تعیین مناسب و همچنین مقادیر نرمال با میانگین صفر و واریانس یکسان دارای کفایت مناسبی برای توصیف داده ها می باشد. در ادامه میزان عوامل موثر به کمک حل یک مدل برنامه ریزی غیر خطی محاسبه و با اعمال مقادیر بدست آمده طی یک آزمایش عملی میزان گشتاور چرخشی کاسه چرخ 10.5 kg.cm بدست آمد که اختلاف ناچیز 5 درصدی با مقدار پیش بینی شده دارد. همچنین جواب حاصل به لحاظ نزدیک بودن مقدار آن با جواب به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه مطلق نیز می باشد.

منابع

- [1] امیری، مقصود، قشلاقی، کمیل، کیومرثی، هادی، کاربرد طراحی آزمایشات، روش شناسی رویه پاسخ و تصمیم گیری چند هدفه در بهبود مشخصه های کیفی (مطالعات موردی بروی فرآیند کشش ورق گلگیر عقب پراید ۱۴۱ و فرآیند قالب گیری تزریق پلاستیک)، (۱۳۸۵)، نشریه فنی (علمی - پژوهشی) دانشگاه تهران.
- [۲] نورالسنا، رسول، "ارائه روشی برای بدست آوردن تابع تصمیم برای بهینه سازی چند پاسخ در روش سطح پاسخ" مجله ی امیرکبیر، شماره ی ۶۰، جلد دوم، ۱۳۸۸.
- [3] Sobieszcanski-sobieski, J., Kodiyalam, S., Yang, R-J., *Optimization of Car Body Under Constraints of Noise, vibration, and harshness (NVH), and crash*. AIAA paper No. 2000-1521, 2000.
- [4] Marklund, P-O., Nilsson, L., *Optimization of a Car Body Component Subjected to Impact*. Struct Multidisc Opt 2001; 21: 383-92.
- [5] Chun, B.K., Jinn, J.T., Lee, J.K., Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I theory. Int. J. Plasticity 18 (5-6), 2002, pp. 571-595.
- [6] Rezzoug, S.A., Botekedjiret, C., Allaf, K., "Optimization of Operating Conditions of Rosemary Oil Extraction by Fast Controlled Pressure Drop Process Using Response Surface Methodology," journal of food engineering, 71, 2005, pp. 9-17
- [7] Dalvi, V.B., Tiwari, K.N., Pawade, M.N., Phirke, P.S., "Response Surface Analysis of Tomato Production