

# تعیین میزان بهینه‌ی عوامل مؤثر بر کیفیت جوش MAG با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ و مقایسه آن با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (مطالعه‌ی موردی: شاسی وانت مزدا)

حسین خانکی<sup>۱</sup>

مهدی عزیزمحمدی<sup>۲</sup>

مسعود وکیلی<sup>۳</sup>

سعید خان‌محمدیان<sup>۴</sup>

## چکیده

در این مقاله به بررسی و بهینه‌سازی شاخص‌های مهم یکی از روش‌های جوشکاری با عنوان جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ (GMAW) پرداخته می‌شود. این روش یکی از فرایندهای مهم در ایجاد اتصالات دائمی فلزی با کیفیت بالا در صنایع مختلف از جمله صنعت خودرو است که هدف از آن بهبود اندازه‌ی ساقه‌ی جوش و همچنین شاخص‌های کیفی آن است. یکی از تکنیک‌های کاربردی برای مدل‌سازی و حل این مسائل روش شناسایی سطح پاسخ است. در این مقاله با توجه به اهمیت بسزای پنج عامل به‌عنوان متغیرهای ورودی مستقل و قابل کنترل شامل: سرعت حرکت جوشکار، زاویه‌ی تورچ با قطعه‌ی کار، قطر سیم جوش، سرعت سیم جوش و همچنین میزان فلوی گاز CO<sub>2</sub> که تأثیرگذار بر سطوح پاسخ مورد نظر است، رابطه‌ی میان این متغیرهای ورودی و متغیرهای سطح پاسخ با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی تعیین شد و سپس مقدار بهینه‌ی هر یک از عوامل با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی محاسبه و برای بررسی آن، جواب‌های به‌دست‌آمده با خروجی‌های ناشی از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه شد و در نهایت به‌دلیل مطلق نبودن جواب بهینه‌ی ارائه‌شده از سوی نرم‌افزار Lingo پاسخ‌های ناشی از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مد نظر قرار گرفت. در این نوشتار با در نظر گرفتن توأم متغیرهای کیفی و کمی سعی در بررسی و بهینه‌سازی همه‌ی متغیرهای پاسخ با توجه به هم‌نوع نبودن از طریق تئوری مجموعه‌های فازی و روش Lp متریک برای یافتن پاسخی بهینه مدل ریاضی چندهدفه و مقایسه‌ی آنها با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است.

**واژگان کلیدی:** طراحی آزمایشات، روش‌شناسی سطح پاسخ، جوشکاری MAG، شاسی خودرو، الگوریتم‌های متاهیورستیک.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، (دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، ایران)  
Khanaki@hotmail.com (نویسنده‌ی مسئول)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، (دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، ایران)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک پردیس ۲- دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- کارشناس مهندسی صنایع تحلیل سیستم، رئیس کنترل و تضمین کیفیت شرکت شاسی‌ساز ایران (گروه بهمن)

## مقدمه و مرور ادبیات

امروزه با توجه به روش‌های مختلف اتصال فلزات، روش جوشکاری با گاز محافظ (GMAW) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش جوشکاری در صنایع خودروسازی به‌کار می‌رود. کیفیت جوش در اتصال و مونتاژ شاسی خودرو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکست در ناحیه‌ی اتصالات منفصله‌ی قطعات، موجب ناکارایی شاسی به‌عنوان عضوی از خودرو که کلیه‌ی قطعات بر روی آن قرار می‌گیرند، می‌شود که این امر به بروز حوادث در حین رانندگی منجر می‌شود.

از این‌رو، به‌تازگی رویکردهای ریاضی و آماری برای این منظور پیشنهاد شده‌اند. رگرسیون خطی و غیرخطی، روش سطح‌سطح پاسخ و طراحی آزمایشات (DOE) در زمره‌ی این روش‌ها قرار دارند، زیرا در گذشته برای تعیین سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی فرایند، عموماً از تجربه‌ی کاربر یا روش‌های مبتنی بر سعی و خطا استفاده می‌شده است. این روش‌ها علاوه بر دقت کم، اغلب پرهزینه نیز هستند. بنابراین شناخت نحوی تأثیر هریک از شاخص‌های تنظیمی و انتخاب مناسب مقادیر آنها، نقش مهمی در افزایش راندمان فرایند و بهبود کیفیت و استحکام اتصال دارد.

روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) در سال ۱۹۵۱ میلادی با آثار Wilson و Box آغاز شد که مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است و برای فرایندهای بهبود و بهینه‌سازی مفید است. همچنین می‌تواند با کمترین منابع و داده‌های کمی، با طرح آزمایشی مناسب، بهینه‌ی چندین متغیر را به‌طور هم‌زمان تعیین کند.

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 مد نظر در طراحی آزمایشات و روش‌شناسی سطح پاسخ که غالباً به‌طور متوالی انجام می‌شوند، به ترتیب عبارت‌اند از: استخراج عوامل یا متغیرهایی که در سطح پاسخ مؤثرند و تنظیم حدود این عوامل یا متغیرها

تا به بهترین میزان پاسخ منجر شود.

«کوپا» و همکاران (۱۹۸۹) از روش طرح‌های عاملی برای بررسی رابطه‌ی میان متغیرهای مستقل نرخ تغذیه کابل، ولتاژ مدار باز، فاصله‌ی نازل تا صفحه، سرعت جوشکاری و ضخامت قطعه با مقادیر پاسخ شامل میزان نفوذ جوش، ضخامت جوش، استحکام جوش و رقت جوش استفاده کردند و در پایان مشخص شد که استفاده از طرح‌ها عاملی برای پیش‌بینی اثرات اصلی و متقابل شاخص‌های جوشکاری مناسب است [۱]. «مورگان» و همکاران (۱۹۹۷) نیز با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ (RSM) مدلی ریاضی برای بررسی اثرات اصلی و متقابل شاخص‌های جوشکاری زیرپودری (SAW) شامل ولتاژ مدار باز، نرخ تغذیه‌ی کابل، سرعت جوش و فاصله‌ی نازل تا قطعه، بر روی عمق نفوذ، استحکام و ضخامت جوش ارائه دادند [۲]. «بین» و همکاران (۱۹۹۸) به‌منظور تعیین تنش تسلیم ناشی از پیچش و استحکام نهایی در فرایند جوشکاری نقطه‌ای مطالعه‌ای انجام دادند. عامل‌های بررسی‌شده عبارت بودند از: تکنیک اتصال، ضخامت ورق، استحکام فولاد، مساحت مقطع جوشکاری، نوع طراحی قطعه‌ی جوشکاری و جوشکاری نهایی. تأثیر این عوامل بر خواص پیچشی مقاطع مختلف جوشکاری بررسی و مشخص شد که تکنیک جوشکاری، مساحت مقطع و ضخامت مقطع جوشکاری مهم‌ترین عوامل مؤثر بر استحکام پیچشی مقاطع جوشکاری‌شده هستند. به‌علاوه، استحکام فولاد به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر تنش تسلیم و استحکام نهایی است [۳]. «ساتاورنوچت» و همکاران (۲۰۰۶) از رویکرد طرح مرکب مرکزی برای تعیین و بهینه‌سازی عامل‌های فرایند جوشکاری توپودری (FCAW) ورق ST37 شامل جریان، ولتاژ، زاویه و فاصله‌ی نوک الکتروود استفاده کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شرایط بهینه عبارت است از جریان ۳۰۰ آمپر، ولتاژ ۳۰ ولت و فاصله‌ی ۴۵ میلیمتری نوک الکتروود با زاویه‌ی ۶۰ درجه [۴]. «یانگ» و همکاران (۱۹۹۳) معادله‌ی رگرسیون منحنی خطی را

به دست آورند که به وسیله ی آن ارتباط میان ضرایب همبستگی و انحراف استاندارد خطا درباره ی جوشکاری قوس الکتریکی پیش بینی شده است [۵]. «کیم» و همکاران (۲۰۰۳) معادلات چندگانه ی خطی و غیرخطی برای مدل سازی جوشکاری خودکار (اتومات) قوس الکتریکی CO<sub>2</sub> ارائه دادند. این توابع، شاخص های فرایند جوشکاری را با مشخصه های هندسه ی گرده جوش ارتباط می دهند. آنها همچنین نتایج به دست آمده از مدل را با نتایج تجربی مقایسه کرده و دقت مناسبی را برای روش خود گزارش کرده اند [۶]. در همان سال «ژو» و همکاران تلاش کردند تا به کمک مدل سازی آماری، بین هندسه ی گرده جوش و استحکام آن، تحت بارگذاری کششی، ارتباط برقرار کنند [۷]. دوباره در همان سال «رولندس» و «آنتونی» کاربرد DOE را در شناخت درست شاخص های مهم فرایند جوشکاری نقطه ای و تأثیر آنها را در استحکام کششی متوسط اتصالات جوشکاری نشان دادند [۸].

«مارکلج» و «توسک» (۲۰۰۱) از توابع چندجمله ای ریاضی برای مدل سازی شاخص های جریان و ولتاژ جوشکاری در خصوص اتصالات T شکل، در روش قوس الکتریکی با الکتروود تنگستنی (GTAW) استفاده کردند، سپس نتایج خود را برای بهینه سازی از سوی الگوریتم های ابتکاری به کار بردند [۹].

«کیم» و «لین» (۱۹۹۸) یک رویکرد مدل سازی فازی برای بهینه سازی سیستم پاسخ دوگان (Dual Respond) پیشنهاد کردند که در آن درجه ی رضایت و انحراف استاندارد پاسخ ها به طور هم زمان ماکزیمم می شود [۱۰]. یک سال بعد، «ونتر» و «هافتکا» (۱۹۹۹) مفاهیم فازی را برای مدل سازی نوعی از عدم قطعیت استفاده کردند و نشان دادند برای مسائل مشابه، طراحی بر مبنای تئوری فازی بهتر است [۱۱]. «چوی» و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله ی خود روش رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده های کمترین انحراف مطلق (FLDA) را تشریح و بررسی کردند [۱۲]. «بشیری» و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از روش رگرسیون فازی اقدام به تعریف

تابع انحراف و تشکیل ماتریس بازده برای مقادیر انحراف و تجمیع دو مدل عینی به یک هدف اقدام کردند [۱۳]. «امیری» (۲۰۱۱) با استفاده از روش رگرسیون فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کمترین انحراف مطلق مدلی برای متغیر پاسخ لقی کاسه‌چرخ ارائه کردو با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و روش  $L_p$  متریک مقادیر بهینه را استخراج نمود [۱۴]. در این میان جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی، جزء فرایندهای پرکاربرد برای ایجاد اتصالات با کیفیت بالا، محسوب می‌شود. قابلیت جوشکاری بیشتر آلیاژها، کاهش اعوجاج و تنش پسماند در قطعات، کاهش مصرف الکتروود مصرفی، قابلیت جوشکاری پیوسته و بدون توقف و قابلیت اتوماسیون بسیار خوب این روش، سبب افزایش روزافزون و کاربرد وسیع آن در صنایع، به‌خصوص صنعت نفت و گاز که مهم‌ترین صنعت در کشور ما محسوب می‌شود، شده است.

با وجود انجام تحقیقات گسترده در زمینه‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی جوشکاری، هنوز در بسیاری از مواقع نیاز به رویکرد جامعی به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی این گروه از فرایندها احساس می‌شود، زیرا تحقیقات انجام شده بیشتر بر مبنای اطلاعات کمی بوده و به همین دلیل مشخصات کیفی که بر مبنای اطلاعات کیفی هستند اغلب مد نظر قرار نگرفته‌اند. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های کمی و کیفی دریافت‌شده از سوی نویسندگان، مدل ریاضی از فرایند جوشکاری GMAW برای مطالعه‌ی موردی با مد نظر قراردادن قطر الکتروود ۱.۲ میلی‌متر طراحی و پیشنهاد می‌شود و در پایان نیز مدل ارائه‌شده به دو روش دقیق و استفاده از الگوریتم‌های متاهیورستیک حل شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

ساختار مقاله چنین است که در بخش دوم به فرایند تولید قطعه پرداخته و در بخش سوم عوامل مؤثر و سطوح آنها ارائه می‌شود. در بخش چهارم متغیرهای پاسخ انتخاب و در بخش پنجم پس از تعریف مسئله، سطوح شاخص‌های بررسی شده، تعداد و

ترتیب انجام آزمایش‌ها تعیین می‌شود، در بخش ششم نحوه‌ی انجام آزمایش و در بخش هفتم چگونگی مدل‌سازی و به‌دست‌آوردن جواب بهینه و مقایسه‌ی جواب به‌دست‌آمده از روش‌های حل مد نظر خواهیم پرداخت. در بخش هشتم نیز نتیجه‌گیری مقاله ارائه خواهد شد.

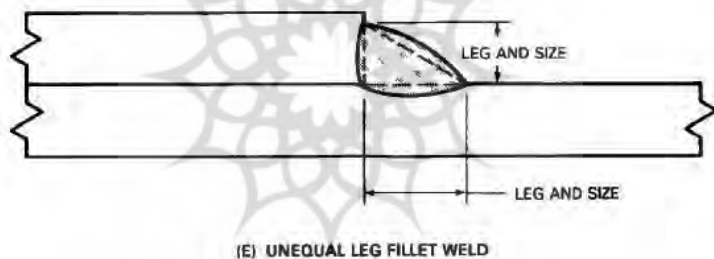
### فرایند تولید شاسی وانت مزدا

به منظور تولید شاسی وانت مزدا چندین فرایند کلیدی بر روی مواد اولیه که ورق فولادی به جنس SAPH310 است، صورت می‌گیرد. مراحل به این شرح که ابتدا ورق به‌صورت کویل در سالن ساخت در ایستگاه دیکویلر، دیکویل می‌شود و در ابعاد و اندازه‌هایی مطابق با طرح بازرسی و تولید می‌شود که پس از مرحله‌ی دیکویلر، دستگاه پرس عملیات بلنک و فرمینگ انجام می‌شود و تیرک که یکی از اجزای مهم شاسی است تولید می‌شود. مرحله‌ی بعد که در سالن مونتاژ شاسی صورت می‌پذیرد، مونتاژ قطعات و اسمبل شاسی است. در این سالن خط تولید به دو قسمت پیش‌مونتاژ و مونتاژ اصلی تقسیم می‌شود که در خط پیش‌مونتاژ قطعات جانبی به یکدیگر به منظور سوارشدن بر روی تیرک با فرایند جوشکاری آماده می‌شوند. در خط اصلی نخستین ایستگاه جوشکاری تقویتی داخل تیرک برای استحکام بخشیدن به شاسی پس از مونتاژ تیرک‌های تودلی و اصلی است.

ایستگاه شماره ۲ جوشکاری تیرک تودلی به اصلی است که تقریباً اصلی‌ترین ایستگاه جوشکاری است که اهمیت ویژه‌ای دارد، از این‌رو مطالعه‌ی موردی بر روی کیفیت این ایستگاه صورت پذیرفته است. پس از مونتاژ قطعات به تیرک جفت‌شده در ایستگاه انتهایی جوش‌های شاسی از نظر ابعاد و ظاهر جوش و جافتادگی قطعات بازرسی می‌شود که مبنای تأیید و عدم تأیید جوش، استاندارد MES که متعلق به شرکت مزدا می‌باشد است. پس از مونتاژ شاسی، مرحله‌ی بعدی رنگ‌آمیزی شاسی است که این فرایند در سالن رنگ صورت می‌گیرد.

در این فرایند عملیات پوشش‌دهی به وسیله‌ی رنگ پودری مشکی انجام می‌شود که این فرایند نیازمند آماده‌سازی سطح از قبیل چربی‌گیری و ساچمه‌پاشی و فسفات‌کاری روی است که پس از این مراحل رنگ اعمال شده و سپس در کوره‌ی عملیات پخت صورت می‌گیرد. در نهایت بازرسی نهایی شاسی انجام شده و به مشتری تحویل داده می‌شود.

در مرحله‌ی جوشکاری تیرک تودلی به تیرک اصلی با ضخامت‌های ۳.۲ و ۲.۳ میلیمتر با طرح اتصال لبروهم و در حالت افقی با کمک فرایند MAG به صورت شکل ۱ صورت می‌پذیرد.



شکل ۱. نمای دوبعدی چگونگی اتصال

## انتخاب عوامل و تعیین سطوح آنها

در این مورد مطالعاتی، مطالعه بر روی کیفیت ظاهری و ابعادی جوش شاسی و انت مزدا که یکی از تولیدات شرکت گروه بهمن است صورت پذیرفته است. برخی عوامل تأثیرگذار عمده در فرایند جوشکاری مطابق با هندبوک AWS D1.1 به‌قرار زیر هستند:

- سرعت حرکت جوشکار: نسبت مسافت طی‌شده‌ی تورچ به وسیله‌ی جوشکار نسبت به زمان در راستای خط جوش؛

- زاویه ی تورچ با قطعه ی کار: زاویه قرارگیری تورچ نسبت به محور عمود بر خط جوش؛
  - قطر الکتروود: میزان قطر سیم جوش مصرفی برای جوشکاری؛
  - سرعت سیم جوش: میزان خروج سیم از وایرفید بر واحد زمان؛
  - میزان گاز مصرفی CO<sub>2</sub>: میزان فلوی جریان گاز از سر تورچ بر حسب لیتر بر دقیقه.
- با توجه به شرایط تولید و نظر کارشناسان [15]، در نهایت عوامل مد نظر به شرح زیر پذیرفته شدند:

۱. سرعت حرکت جوشکار؛
  ۲. زاویه ی تورچ با قطعه ی کار؛
  ۳. سرعت سیم جوش؛
  ۴. میزان گاز مصرفی CO<sub>2</sub>.
- در جدول ۱ مقادیر حدی هر یک از عوامل بیان شده است.
- جدول ۱. مقادیر حدی هر یک از عوامل

ردیف	شرح عوامل تأثیرگذار	سطح بالای عامل (+)	سطح پایین عامل (-)
۱	سرعت حرکت جوشکار	۱ متر بر دقیقه	۰.۵ متر بر دقیقه
۲	زاویه ی تورچ با قطعه ی کار	۶۰ درجه	۳۰ درجه
۳	سرعت سیم جوش	۱۴ متر بر دقیقه	۸ متر بر دقیقه
۴	میزان گاز مصرفی CO <sub>2</sub>	۱۳ لیتر در دقیقه	۹ لیتر در دقیقه

### انتخاب متغیر پاسخ

پس از بررسی خصوصیات اصلی محصول و نیازهای مشتری و موارد مهم در طراحی صورت گرفته، به ویژه به دلیل تأثیر این قطعه در میزان ایمنی سرنشینان در زمان تصادفات و همچنین با توجه به تعریف مسئله، سطوح پاسخ به صورت زیر بیان می شوند:



- کیفیت ظاهری جوش ( $Y_1$ ): شامل کلیه عیوب جوش که از طریق بازرسی چشمی مطابق با الزامات شرکت مزدا قابل تشخیص است.
- میزان پاشش جوش ( $Y_2$ ): میزان پرتاب مذاب ایجادشده از قوس جوشکاری حین فرایند جوشکاری که میزان بهینه ۱۰ درصد از میزان مذاب ایجاد شده است.
- اندازه‌ی ساق جوش ( $Y_3$ ): اندازه‌ی تماس سطح مذاب جوش با قطعه‌ی کار در جوش نبشی. (شکل ۱)

### انتخاب طرح آزمایش

بهینه‌سازی مسئله با چند سطح پاسخ در طرح‌های پایدار برای تعیین مشخصه‌های بهینه‌ی فرایند در یک منطقه‌ی رضایت‌بخش و کاهش واریانس متغیرهای پاسخ به کار می‌رود. در بیشتر مسائل مربوط به RSM از چندجمله‌ای‌ها و توابع خطی برای برازش مدل استفاده می‌شود. اگر پاسخ به‌خوبی به‌وسیله‌ی یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شده باشد آنگاه تابع تقریب‌کننده‌ی مدل، مدل مرتبه‌ی اول است. اگر در سیستم خمیدگی وجود داشته باشد آنگاه باید از چندجمله‌ای‌های درجه بالاتر، مانند مدل مرتبه‌ی دوم استفاده کرد که در آنها  $\beta_{ij}$  نشان‌دهنده‌ی اثرهای مرتبه‌ی دوم محض کوادراتیک است. در این مقاله نیز به‌دلیل وجود خمیدگی از مدل درجه‌ی دوم استفاده شده که شکل کلی آن به‌صورت رابطه‌ی شماره ۱ است [۱۶]:

$$\hat{Y}_K = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^4 \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

در رابطه‌ی بالا  $\hat{Y}_K$  متغیر پاسخ به‌ازای  $K=1,2,3,4$ ،  $\beta_{ii}, \beta_j, \beta_i, \beta_0$  ضرایب و  $X_i$  به‌ازای  $i=1,2,3,4$  عامل‌های مؤثر بر فرایند هستند که هر یک با استفاده از رابطه‌ی

شماره ۲ به صورت گذشته درمی آیند [۱۷].

$$X_i = \frac{X_i - [\max(X_i) + \min(X_i)]/2}{[\max(X_i) - \min(X_i)]/2} \quad \text{رابطه ی ۲}$$

دوران پذیری، خاصیتی بسیار مهم برای انتخاب طرح سطح پاسخ است. طرحی با چنین خاصیتی، وقتی آن را حول مرکز  $(0, \dots, 0, 0)$  دوران دهیم، واریانس  $\hat{Y}$  در آن تغییر نمی کند. از آنجا که هدف RSM بهینه سازی است و به دلیل اینکه جایگاه نقطه ی بهینه پیش از اجرای آزمایش نامعلوم است، از طرحی که در تمام امتداد، دقتی یکسان در برآورد دارد استفاده می شود. یکی از طرح های به کاررفته برای برآزش مدل مرتبه ی دوم، طرح مرکب مرکزی است و آن عبارت است از عامل  $2^k$  که با نمادهای  $+1$  و  $-1$  کد شده است که با الحاق  $2K$  نقطه ی محوری  $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$ ،  $(0, \dots, 0, \pm\alpha)$ ،  $(0, \dots, 0, 0, \dots, 0, \pm\alpha)$  و  $n_c$  نقطه ی مرکزی  $(0, \dots, 0, 0)$ ، طرح مرکب مرکزی با انتخاب مناسب  $\alpha$  دوران پذیر می شود. مقدار  $\alpha$  برای دوران پذیری به تعداد نقاط در بخش عاملی طرح بستگی دارد. در واقع با انتخاب  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  معلوم می شود که طرح مرکب مرکزی دوران پذیر است. در این رابطه  $n_f$  تعداد نقاط استفاده شده در بخش عاملی طرح است [۱۸].

در این مقاله چهار عامل مورد بررسی قرار گرفته است و به همین دلیل بخش عاملی شامل  $n_f = 2^4 = 16$  نقطه است و مقدار  $\alpha$  برای دوران پذیری طرح  $\alpha = (16)^{1/4} = 2$  خواهد بود. در این مقاله تعداد نقاط مرکزی شش نقطه انتخاب شده و در جدول ۲ حدود سطوح هر عامل، نقاط مرکزی و محوری مشخص شده است:

جدول ۲. سطوح گذشته‌ی عوامل مؤثر

شرح عامل	نماد	$-\alpha$	-۱	۰	+۱	$+\alpha$
سرعت حرکت جوشکار	$X_1$	۰.۲۵	۰.۵	۰.۷۵	۱	۱.۲۵
زاویه‌ی تورچ با قطعه‌ی کار	$X_2$	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵
سرعت سیم جوش	$X_3$	۵	۸	۱۱	۱۴	۱۷
میزان گاز مصرفی CO2	$X_4$	۷	۹	۱۱	۱۳	۱۵

### انجام آزمایش

گام مهم بعدی در انجام تحقیق، انتخاب طرح‌هایی است که براساس آن باید آزمایش انجام داد. در این مطالعه‌ی موردی از طرح‌های  $2^K$  استفاده شده است (K عامل هریک تنها در دو سطح وجود دارند). سطوح عوامل می‌توانند دلخواه باشند که ما آنها را بالا و پایین می‌نامیم. از مزایای این طرح‌ها هزینه و زمان کمتر به نسبت دیگر طرح‌های آزمایش است که هر عامل فقط در دو سطح بررسی می‌شود [۱۹]. با توجه به موارد اشاره شده در بالا، طرح عاملی  $2^4$  برای انجام آزمایش مناسب است. باید توجه داشت که یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای بخش تجزیه و تحلیل آماری، انجام آزمایش به صورت تصادفی است. بدین منظور طرح آزمایش‌ها را ابتدا به صورت جدول شماره ۳ ثبت کرده و سپس با تولید عددهای کاملاً تصادفی بین اعداد ۱ تا ۳۰ به تعیین توالی کاملاً تصادفی از انجام آزمایشات مد نظر اقدام می‌کنیم. در ابتدا همه‌ی آزمایشات را به همراه شش نقطه‌ی مرکزی اجرا کرده و پس از بررسی خمیدگی در مدل و در صورت تأیید وجود خمیدگی، ضمن افزودن نقاط محوری معنادار بودن متغیرهای توان ۲ را نیز با افزودن هشت نقطه‌ی محوری و تحلیل اطلاعات، بررسی می‌کنیم. به منظور بررسی متغیرهای کیفی در هر سطح نظر سه کارشناس دریافت شده است. مقادیر کلامی در پنج سطح مورد استفاده هستند که در جدول شماره ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. مجموعه‌ی فازی مقادیر کلامی

شرح مقادیر کلامی	اختصار	مثلثی		
		پایین	میانه	بالا
خیلی بد	VH	7	9	9
بد	H	5	7	9
متوسط	M	3	5	7
خوب	L	1	3	5
خیلی خوب	VL	1	1	3

جدول ۴. اطلاعات آزمایش و مقادیر مشاهده‌شده‌ی متغیرهای پاسخ

مقادیر متغیر پاسخ $Y_3$	مقادیر متغیر پاسخ $Y_2$			مقادیر متغیر پاسخ $Y_1$			مقادیر عوامل بصورت کد شده				شماره اجرا	آزمایش
	$Y_{23}$	$Y_{22}$	$Y_{21}$	$Y_{13}$	$Y_{12}$	$Y_{11}$	X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>		
3	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	-1	-1	-1	-1	1	1
2	متوسط	متوسط	متوسط	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	-1	-1	-1	1	18	2
1	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی بد	خیلی بد	خیلی بد	-1	-1	1	-1	19	3
3.5	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	-1	1	-1	-1	29	4
0.5	خوب	خوب	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	1	-1	-1	-1	11	5
4	خوب	خوب	متوسط	بد	خیلی بد	بد	-1	-1	1	1	22	6
1.8	بد	بد	خیلی بد	متوسط	متوسط	متوسط	-1	1	-1	1	20	7
1.5	خوب	خوب	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	1	-1	-1	1	27	8
3.2	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	خوب	خوب	-1	1	1	-1	16	9

تعیین میزان بهینه‌ی عوامل مؤثر بر کیفیت جوش... ۱۶۵

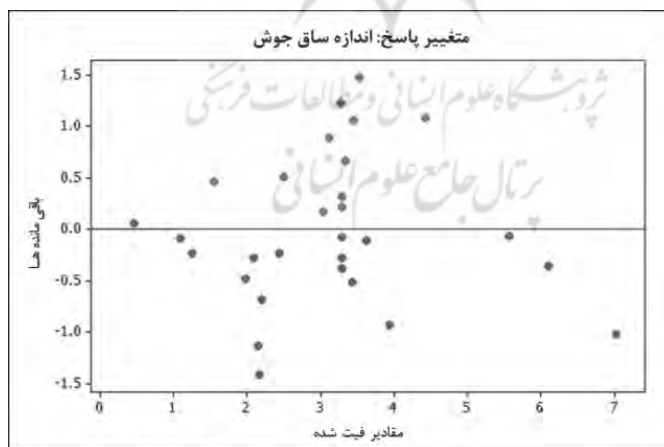
2.2	متوسط	خیلی خوب	متوسط	خیلی بد	خیلی بد	خیلی بد	1	-1	1	-1	8	10
0.75	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	خوب	خوب	1	1	-1	-1	23	11
2.9	بد	خیلی بد	خیلی بد	متوسط	متوسط	متوسط	-1	1	1	1	21	12
5.75	خوب	خوب	متوسط	خیلی بد	خیلی بد	خیلی بد	1	-1	1	1	9	13
4	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی بد	بد	بد	1	1	-1	1	13	14
3	متوسط	خوب	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	1	1	1	-1	7	15
6	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	1	1	1	1	14	16
3.5	خیلی خوب	خیلی خوب	خوب	بد	بد	متوسط	0	0	0	0	4	17
3.6	خیلی خوب	خوب	خیلی خوب	بد	متوسط	بد	0	0	0	0	24	18
3.2	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط	متوسط	متوسط	0	0	0	0	15	19
3	خیلی خوب	خوب	خوب	بد	متوسط	متوسط	0	0	0	0	25	20
3.5	خوب	خیلی خوب	خوب	متوسط	متوسط	بد	0	0	0	0	12	21
2.9	خیلی خوب	خوب	خوب	متوسط	متوسط	متوسط	0	0	0	0	6	22
5.5	متوسط	متوسط	بد	متوسط	متوسط	بد	0	0	0	$-\alpha$	5	23
4.5	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط	متوسط	متوسط	0	0	0	$\alpha$	26	24
5.5	بد	بد	متوسط	خیلی بد	خیلی بد	خیلی بد	0	0	$-\alpha$	0	2	25
1	خوب	خوب	خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	0	0	$\alpha$	0	28	26

4.5	متوسط	متوسط	متوسط	خوب	خوب	خوب	0	$-\alpha$	0	0	10	27
1	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	بد	بد	بد	0	$\alpha$	0	0	17	28
5	خوب	خوب	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	$-\alpha$	0	0	0	30	29
1.5	متوسط	متوسط	متوسط	خیلی خوب	متوسط	متوسط	$\alpha$	0	0	0	3	30

در ادامه ابتدا به ارائه‌ی مدل متغیر پاسخ کمی ( $Y_3$ ) می‌پردازیم و پس از آن به بررسی متغیرهای پاسخ کیفی خواهیم پرداخت.

#### ۶-۱. بررسی واریانس خطاها

اگر مدل رگرسیون متغیرهای پاسخ  $Y_3$  درست باشد، مانده‌ها باید بی‌ساختار باشند و همچنین به هیچ متغیر دیگری از جمله متغیر پاسخ وابسته نباشند. شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی این امر در خصوص متغیر پاسخ  $Y_3$  است که به وسیله‌ی نرم‌افزار MINITAB 16 تهیه شده است.



شکل ۲. نمودار پراکندگی خطای مشاهده‌شده در مقابل مقادیر متغیر پاسخ  $Y_3$

### ۲-۶. بررسی مستقل بودن

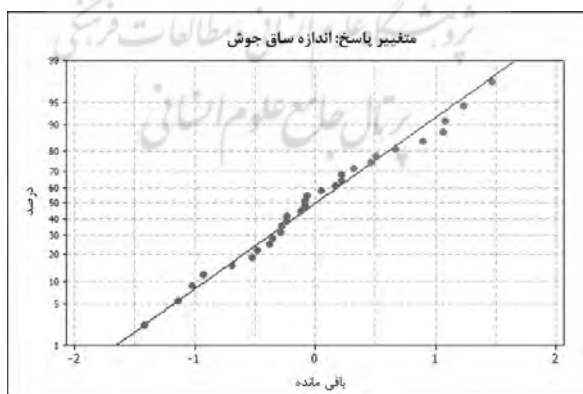
فرض می‌شود که اجزای درون تابع رگرسیون جامعه، تصادفی یا ناهمبسته‌اند. اگر این فرض نقض شود مشکل همبستگی سریالی یا خودهمبستگی به وجود می‌آید. از این رو با استفاده از نرم‌افزار MINITAB16 ضریب همبستگی متغیرها را بررسی کردیم که نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان دهنده‌ی مستقل بودن چهار متغیر است.

جدول ۵. ضریب همبستگی متغیرها

ضریب همبستگی	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$X_1$	1	0	0	0
$X_2$	0	1	0	0
$X_3$	0	0	1	0
$X_4$	0	0	0	1

### ۳-۶. بررسی کفایت مدل (نرمال بودن)

با رسم نمودار احتمال نرمال مانده‌ها می‌توان در صورت نزدیکی نمودار یادشده به خط مستقیم، به کفایت مدل پی برد. در زیر با توجه به شکل ۳ که به وسیله‌ی نرم‌افزار MINITAB16 در خصوص متغیر پاسخ  $Y_3$  ایجاد شده، می‌توان کفایت مدل را تأیید کرد.



شکل ۳. نمودار احتمال نرمال مانده‌ها برای متغیر پاسخ  $Y_3$

#### ۴-۶. بررسی خمیدگی مدل

اگر مدل دارای خمیدگی باشد فرض صفر اشاره شده در رابطه‌ی شماره ۳ رد می‌شود و در غیر این صورت مدل بدون مقادیر درجه ۲ اعتبار دارد [۲۰].

$$H_0: E[y] = b_0 + b_1X$$

رابطه‌ی ۳

$$H_A: E[y] \neq b_0 + b_1X$$

همچنین اگر فرض صفر پذیرفته شود (دلیل منطقی برای رد آن پیدا نکنیم) برازش انجام شده مناسب است و نیازی به افزودن اثر نقاط محوری در مدل رگرسیون و بررسی معنادار بودن آنها وجود ندارد. آزمون‌های یاد شده در نرم‌افزار SAS با استفاده از دستور عدم برازش انجام شده و نتیجه‌ی این آزمون در نرم‌افزار SAS9.2 در جدول شماره ۶ در خصوص متغیر پاسخ  $Y_3$  ارائه شده است.

جدول ۶. نتیجه‌ی بررسی وجود خمیدگی در مدل متغیر پاسخ قطر ساقه‌ی جوش ( $Y_3$ )

آنالیز واریانس					
منبع	درجه‌ی آزادی	مجموع خطا	میانگین خطا	ارزش F	Pr > F
مدل	10	50.5581	5.0558	4.63	0.0020
خطا	19	20.7438	1.0917		
میزان آزمون	14	20.3155	1.4511	16.94	0.0028
خطای خالص	5	0.42833	0.0856		
خطای کل	29	71.3020			

با توجه به مقدار فرض شده برای  $\alpha$  و مقدار P-VALUE استخراج شده برای آزمون عدم برازش (Lack of Fit) می‌توان نتیجه گرفت که متغیر پاسخ  $Y_3$  خمیدگی دارد



( $\alpha=0.1$ )؛ البته در صورتی که رابطه‌ی شماره ۴ برقرار باشد نیز فرض صفر رد می‌شود و نشانه‌ی آن است که مدل خمیدگی دارد [۲۰].

$$F^* = \left( \frac{MS_{LF}}{MS_{PE}} \right) > F_{\alpha}(c-2; n-c)$$

رابطه‌ی ۴

### ۵-۶. تجزیه و تحلیل آماری

با توجه به نمودارهای پراکنش باقیمانده‌ها، نمودارهای نرمال و ضریب همبستگی ارائه‌شده در بالا به بررسی و استخراج مدل رگرسیون متغیرپاسخ  $Y_3$  با استفاده از نرم‌افزار SAS9.2 خواهیم پرداخت. در جدول ۷ نتایج آزمون‌های فرض مربوط به اثرات اصلی و متقابل را با مد نظر قراردادن  $\alpha=0.1$  در خصوص متغیرپاسخ  $Y_3$  بررسی می‌کنیم و اثرات معنادار را تعیین می‌نماییم (\*: معنی دار در سطح  $\alpha=0.1$ ).

جدول ۷. تحلیل رگرسیون برای متغیرپاسخ قطر ساقه‌ی جوش ( $Y_3$ )

متغیر	درجه‌ی آزادی	ضریب	انحراف معیار	ارزش t	Pr >  t
عرض از مبدأ	1	3.28333	0.40380	8.13	<.0001*
X1	1	0.53333	0.20190	2.64	0.0185*
X2	1	0.83333	0.20190	4.13	0.0009*
X3	1	0.50833	0.20190	2.52	0.0237*
X4	1	0.38750	0.20190	1.92	0.0742*
X1* X1	1	0.30521	0.18886	1.62	0.1269
X2* X2	1	-0.13229	0.18886	-0.70	0.4944
X3* X3	1	-0.25729	0.18886	-1.36	0.1932
X4* X4	1	-0.13229	0.18886	-0.70	0.4944
X1* X2	1	0.48125	0.24728	1.95	0.0706*
X1* X3	1	-0.14375	0.24728	-0.58	0.5696
X1* X4	1	0.67500	0.24728	2.73	0.0155*
X2* X3	1	-0.05625	0.24728	-0.23	0.8231
X2* X4	1	0.58750	0.24728	2.38	0.0313*
X3* X4	1	0.15000	0.24728	0.61	0.5532

### ۶-۶. مدل رگرسیون متغیر پاسخ $Y_3$

مدل رگرسیون با توجه به آنالیزهای انجام شده به شرح زیر است:

$$Y_3 = 3.28 + (0.53)X_1 + (0.83)X_2 + (0.5)X_3 + (0.39)X_4 + (0.48)X_1 * X_2 + (0.67)X_1 * X_4 + (0.59)X_2 * X_3$$

### ۶-۷. ایجاد مدل رگرسیون متغیرهای پاسخ $Y_1$ و $Y_2$

در این مقاله متغیرهای پاسخ کیفیت ظاهری جوش ( $Y_1$ ) و میزان پاشش جوش ( $Y_2$ )، به صورت متغیر زبانی و مطابق جدول شماره ۳ به وسیله‌ی متخصصان بیان می‌شود. روش کار بدین صورت است که یک نمونه دریافت شده و سپس نظر سه فرد خبره در خصوص آن گرفته می‌شود. اگر نظر فازی هر سه خبره را به صورت اعداد فازی مثلثی ( $a_k, b_k, c_k$ ) در نظر بگیریم، جمع این اعداد فازی با استفاده از رابطه‌ی ۵ به دست خواهد آمد [۲۱]:

$$R = (a \ b \ c) ; n=1,2,3,\dots,k \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

$$a = \min\{a_n\} ; b = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k b_n ; c = \max\{c_n\}$$

حال با استفاده از رابطه‌ی ۵ مقادیر موجود در جدول شماره ۸ استخراج شده و به وسیله‌ی آن، برای هر یک از متغیرهای پاسخ کیفی، یک معادله‌ی رگرسیون فازی خواهیم داشت. به منظور استفاده‌ی هم‌زمان از این مدل‌ها و مدل متغیر پاسخ کمی ( $Y_3$ ) می‌بایست مدل‌های فازی از حالت فازی با استفاده از رابطه‌ی ۶ خارج شوند و برای هر یک از متغیرهای کیفی ( $Y_1$  و  $Y_2$ ) مدل رگرسیون غیرفازی ایجاد شود [۲۱]:

$$C_j = \frac{C_j^p + 4C_j^m + C_j^o}{6} \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

جدول ۸. تبدیل مقادیر کیفی آزمایشات به یک عدد فازی

مقادیر عوامل گذشته				مقادیر متغیر پاسخ $Y_1$			مقادیر متغیر پاسخ $Y_2$		
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	c	b	a	c	b	a
-1	-1	-1	-1	3	1	1	3	1	1
1	-1	-1	-1	3	1	1	7	5	3
-1	1	-1	-1	9	9	7	3	1	1
-1	-1	1	-1	5	2.3	1	3	1	1
-1	-1	-1	1	3	1	1	5	3	1
1	1	-1	-1	9	7.7	5	7	3.7	1
1	-1	1	-1	7	5	3	9	7.7	5
1	-1	-1	1	3	1	1	5	3	1
-1	1	1	-1	5	3	1	3	1	1
-1	1	-1	1	9	9	7	7	3.7	1
-1	-1	1	1	5	3	1	3	1	1
1	1	1	-1	7	5	3	9	8.3	5
1	1	-1	1	9	9	7	7	3.7	1
1	-1	1	1	9	7.7	5	3	1	1
-1	1	1	1	3	1	1	7	3.7	1
1	1	1	1	7	5	3	7	5	3
0	0	0	0	9	6.3	3	5	1.7	1
0	0	0	0	9	6.3	3	5	1.7	1
0	0	0	0	7	5	3	5	1.7	1
0	0	0	0	9	5.7	3	5	2.3	1
0	0	0	0	9	5.7	3	5	2.3	1
0	0	0	0	7	5	3	5	2.3	1
$-\alpha$	0	0	0	9	6.3	3	9	5.7	3
$\alpha$	0	0	0	7	5	3	3	1	1
0	$-\alpha$	0	0	9	9	7	9	6.3	3
0	$\alpha$	0	0	3	1	1	5	3	1
0	0	$-\alpha$	0	5	3	1	7	5	3
0	0	$\alpha$	0	9	7	5	3	1	1
0	0	0	$-\alpha$	7	5	3	7	3.7	1
0	0	0	$\alpha$	7	3.7	1	7	5	3

### ۶-۷-۱. مدل‌های رگرسیون متغیرهای پاسخ $Y_1$ و $Y_2$

حال برای هر یک از متغیرهای پاسخ که در جدول شماره ۸ به صورت اعداد فازی ارائه شده‌اند، مدل رگرسیون فازی ارائه کرده و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۶ مدل‌های فازی را به مدل قطعی تبدیل می‌کنیم. مدل‌های رگرسیون متغیرهای پاسخ  $Y_1$  و  $Y_2$  با استفاده از اطلاعات به دست آمده از جدول شماره ۸ و با استفاده از روش رگرسیون خطی فازی با کاربرد برآوردکننده‌های کمترین انحراف مطلق، به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_1 = & (3;5.67;6.73) + (0.33;0.61;0.67)X_1 + (1.33;1.33;1.78)X_2 \\ & + (-0.83;-0.61;0)X_3 + (0;0;0.33)X_4 + (0;0;0.25)X_2 * X_2 \\ & + (-0.43;-0.25;0)X_4 * X_4 + (-0.25;0;0)X_1 * X_2 + (0.75;0.75;0.92)X_1 * X_3 \\ & + (0;0;0.25)X_1 * X_4 + (-2.17;-1.75;-1.5)X_2 * X_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_2 = & (1;2;5) + (0.67;1.31;1.33)X_1 + (0;0.58;0.83)X_2 + (0.33;0.5;0.52)X_3 \\ & + (-0.5;-0.3;0)X_4 + (0;0;0.21)X_1 * X_1 + (0.21;0.37;0.51)X_2 * X_2 \\ & + (0;0.21;0.5)X_3 * X_3 + (0;0.21;0.37)X_4 * X_4 + (0;0.5;0.54)X_1 * X_3 \\ & + (-1.25;-1.21;-0.5)X_1 * X_4 + (0;0.25;0.45)X_2 * X_3 + (0.25;0.55;0.75)X_2 * X_4 \\ & + (-0.62;-0.5;-0.25)X_3 * X_4 \end{aligned}$$

حال با استفاده از رابطه‌ی ۶ مدل‌های فازی بالا را به مدل‌های قطعی تبدیل می‌کنیم:

$$\begin{aligned} Y_1 = & (5.4) + (0.57)X_1 + (1.4)X_2 + (-0.54)X_3 + (0.05)X_4 + (0.04)X_2 * X_2 \\ & + (-0.24)X_4 * X_4 + (-0.04)X_1 * X_2 + (0.78)X_1 * X_3 + (0.04)X_1 * X_4 + (-1.78)X_2 * X_3 \end{aligned}$$

$$Y_2 = (2.33) + (1.21)X_1 + (0.53)X_2 + (0.47)X_3 + (-0.28)X_4 + (0.03)X_1 * X_1 \\ + (0.37)X_2 * X_2 + (0.22)X_3 * X_3 + (0.20)X_4 * X_4 + (0.42)X_1 * X_3 \\ + (-1.1)X_1 * X_4 + (0.24)X_2 * X_3 + (0.53)X_2 * X_4 + (-0.48)X_3 * X_4$$

### به دست آوردن جواب‌های بهینه

اینک با توجه به سه مدل رگرسیون به دست آمده از طراحی آزمایش‌ها به دنبال آن هستیم که این سه مدل را به عنوان معیار سنجش قرار دهیم و از طریق روش L-P متریک که یکی از روش‌های MODM برای بهینه‌سازی توأم شاخص‌هاست عمل کنیم.

### ۷-۱. روش L-P متریک

روش L-P متریک به منظور سنجش نزدیکی یک راه‌حل ایده‌آل استفاده می‌شود. این سنجش از انحراف به صورت زیر خواهد بود [۲۲]:

$$\min Z = \sum_{j=1}^K W_j \left( \frac{Z_j^* - Z_j}{Z_j^*} \right)^P$$

اهمیت (وزن) هدف  $(W_j \geq 0)$  است. برای از بین بردن مشکل متفاوت بودن مقیاس‌های اهداف، میزان انحراف جواب ایده‌آل هدف  $Z_j^*$  را بر  $Z_j^*$  تقسیم می‌کنیم.  $1 \leq P \leq \infty$  هم مشخص‌کننده‌ی درجه تأکید بر انحرافات است؛ به گونه‌ای که هرچه این ارزش بزرگ‌تر باشد تأکید بیشتری بر بزرگ‌ترین انحراف خواهد بود. تابع هدف کلی روش L-P متریک نیز به منظور حداقل کردن انحرافات از ایده‌آل باید کمینه شود. در این روش توابع هدف را به طور جداگانه از طریق نرم‌افزار Lingo 11 بهینه می‌کنیم و جواب‌های بهینه‌ی به دست آمده از هر تابع هدف را در توابع هدف دیگر قرار می‌دهیم و بدین ترتیب جدول ۹ به دست می‌آید.

جدول ۹. جواب‌های بهینه‌ی اولیه

	Y1	Y2	Y3	X1	X2	X3	X4
Min Y1	۲.۳	۴.۶۱	۱.۵۳	۱	-۱	-۱	-۱
Min Y2	۶.۹۵	۰.۱۸	۲.۴۵	-۱	۰.۳۲	-۱	-۱
Max Y3	۵.۶۸	۴.۶۹	۷.۲۷	۱	۱	۱	۱

حال سعی می‌کنیم تابع انحراف حاصل از چهار تابع بالا را بهینه کنیم:

$$MIN = Z$$

$$W_1 * \left( \frac{2.33 - Y_1}{2.33} \right)^P \leq Z;$$

$$W_2 * \left( \frac{0.18 - Y_2}{0.18} \right)^P \leq Z;$$

$$W_3 * \left( \frac{Y_3 - 7.27}{7.27} \right)^P \leq Z;$$

$$Y_1 = 5.4 + 0.57 * X_1 + 1.4 * X_2 - 0.54 * X_3 + 0.05 * X_4 + 0.04 * X_2 * X_2 - 0.24 * X_4 * X_4 - 0.04 * X_1 * X_2 + 0.78 * X_1 * X_3 + 0.04 * X_1 * X_4 - 1.78 * X_2 * X_3;$$

$$Y_2 = 2.33 + 1.21 * X_1 + 0.53 * X_2 + 0.47 * X_3 - 0.28 * X_4 + 0.03 * X_1 * X_1 + 0.37 * X_2 * X_2 + 0.22 * X_3 * X_3 + 0.2 * X_4 * X_4 + 0.42 * X_1 * X_3 - 1.1 * X_1 * X_4 + 0.24 * X_2 * X_3 + 0.53 * X_2 * X_4 - 0.48 * X_3 * X_4;$$

$$Y_3 = 3.28 + 0.53 * X_1 + 0.83 * X_2 + 0.5 * X_3 + 0.39 * X_4 + 0.48 * X_1 * X_2 + 0.67 * X_1 * X_4 + 0.59 * X_2 * X_3;$$

$$-1 \leq X_1, X_2, X_3, X_4 \leq 1$$

با توجه به نظر تصمیم‌گیران، وزن‌های مقایسه‌ای و دیگر عوامل، پاسخ نهایی در جدول ۱۰ آورده شده است. بدیهی است با افزایش مقدار P پاسخ‌ها یا تغییر نخواهد کرد یا بدتر خواهد شد.

جدول ۱۰. جواب‌های نهایی گذشته و گذشته

	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	P	Y1	Y2	Y3	X1	X2	X3	X4
Code	0.1	0.1	0.8	5	2.98	3.63	3.91	-1	1	1	1
Un-Code								0.5	60	14	13

## ۷-۲. بهینه‌سازی مسئله با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

در این قسمت برای بررسی مطلق بودن جواب به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Lingo از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌کنیم. این الگوریتم، یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی است. منشأ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده، نتیجه‌ی کارهای «کریک پاتریک» و «کرنی» و همکارانشان در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است [۲۳][۲۴] کریک پاتریک و همکارانش، متخصصانی در زمینه‌ی فیزیک آماری بودند. آنها برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی پیشنهاد کردند که می‌تواند برای جست‌وجوی جواب‌های موجه یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با هدف همگرایی به یک جواب بهینه به‌کار رود [۲۵]. تکنیک تبرید تدریجی، به‌وسیله‌ی متالورژیست‌ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده‌ی جامد، به‌خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می‌شود. این تکنیک شامل قراردادن ماده در دمای بالا و سپس کم‌کردن تدریجی این دماست. ابتدا به‌وسیله‌ی الگوریتم یادشده به حل مسئله می‌پردازیم و سپس جواب‌های بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آن را با جواب بهینه‌ی قطعی حاصل از نرم‌افزار Lingo11 مقایسه می‌کنیم. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در جدول ۱۱ آمده است.

جدول ۱۱. بهترین نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌صورت مقادیر گذشته

ردیف	Y1	Y2	Y3	x1	x2	x3	x4
1	5.82	2.90	5.26	0.83	0.15	0.67	0.99
2	5.75	2.91	5.02	0.76	0.07	0.78	0.91
3	5.96	2.72	5.00	0.86	0.18	0.22	0.93
4	5.78	2.72	4.99	0.72	0.18	0.40	0.99
5	5.51	2.98	4.97	0.49	0.31	0.63	0.92

حال با توجه به جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و نرم‌افزار Lingo

به دلیل نزدیک نبودن مقادیر دو روش با یکدیگر، می توان به مطلق نبودن جواب بهینه‌ی ارائه شده از سوی نرم افزار Lingo پی برد و آن را نتیجه‌ی بهینگی محلی دانست. به همین دلیل مجموعه جواب‌های به دست آمده از الگوریتم شبیه سازی تبرید به تصمیم گیران ارائه شد تا نسبت به انتخاب بهترین حالت اقدام شود که تصمیم نهایی در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. جواب نهایی گذشته و گذشته‌ی مد نظر تصمیم گیران

	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	P	Y1	Y2	Y3	X1	X2	X3	X4
Code								0.92	0.63	0.31	0.49
Un-Code	0.1	0.1	0.8	5	4.97	2.98	5.51	0.98	54.45	11.93	11.98

### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از طراحی آزمایشات، عوامل مؤثر بر فرایند جوشکاری شاسی و انت مزدا مشخص شد. سپس کاربرد روش شناسایی سطح پاسخ در مدل سازی و ایجاد رابطه میان متغیرهای ورودی مؤثر و متغیرهای سطح پاسخ در فرایند مطالعه شد. در این مرحله با استفاده از تابع رگرسیون یک رابطه‌ی غیرخطی بین این متغیرها برای هر متغیر پاسخ شکل گرفت و مقادیر آنها با بهره گیری از روش برنامه ریزی غیرخطی تعیین شد. در این مقاله سعی شد ضمن بررسی فرایند به صورتی واقعی و با مد نظر قراردادان چندین متغیر پاسخ و به صورت ترکیبی از متغیرهای کمی و کیفی در راستای حل یکی از مهم ترین دغدغه های مدیران در صنایع کشور که همانا بهین کردن چندین متغیر پاسخ گام برداشت. در پایان می توان این گونه نتیجه گیری کرد که در خصوص این گونه مسائل به دلیل وجود چندین تابع هدف (وجود چندین متغیر پاسخ) و لزوم بهینگی تمامی آنها، در صورت بزرگی مسئله نیاز به استفاده از الگوریتم های ابتکاری احساس می شود. استفاده از مدل های  $2^{K-P}$



به دلیل نیاز به نمونه‌های کمتر و درعین حال بهبود شاخص R-Square به دلیل افزایش تعداد شاخص‌های ورودی را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل برای توسعه‌ی استفاده از این متدولوژی در صنعت بر شمرده، زیرا به طور هم‌زمان علاوه بر کاهش هزینه‌های سرسام‌آور نمونه‌گیری به دلیل لزوم تولید محصولات نامنطبق در بسیاری از موارد، با افزایش عوامل، برآورد دقیق‌تری نیز از مدل رگرسیون مورد نظر ارائه خواهد داد. همچنین استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری فازی می‌تواند به عنوان مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

تقدیر و قدردانی

در پایان بر خود واجب می‌دانیم از مدیریت محترم عامل شرکت شاسی‌سازی ایران جناب آقای مهندس «اصغر عامری» به دلیل همکاری صمیمانه و حمایتشان از پروژه‌های دانش‌محور تشکر و قدردانی کنیم.

پانوش:

- 1- RSM: Response Surface Methodology
- 2- DOE: Design of Experiments
- 3- FLDA: Fuzzy Regression Using Least Absolute Deviation Estimators
- 4- MAG: Metal Active Gas
- 5- GMAW: Gas Metal Arc Welding
- 6- SAW: Submerged Arc Welding
- 7- FCAW: Flux Cored Arc Welding
- 8- GTAW: Gas Tungsten Arc Welding
- 9- MES: Mazda Engineering Standard
- 10- AWS: American welding Society

## منابع و مآخذ

1. Gupta VK, Parmar RS. Fractional factorial technique to predict dimensions of the weld bead in automatic submerged arc welding. IE(I) J-MC 1989;70(November):67-75.
2. Murugan N, Parmar RS. Effect of welding conditions on microstructure and properties of type 316L stainless steel submerged arc welding cladding. Weld J, AWS 1997;76(5):210-230.
3. Pine T, Lee MM, Jones TB. "Factors affecting torsional properties of box sections". J Ironmaking Steelmaking, 25(3):PP.205-209, (1998).
4. Sathavornvichit, N., Bookkamana, P., Plubin, B., "Central Composite Design in Optimization of the Factors of Automatic Flux Cored Arc Welding for Steel ST37", proceedings of the 2nd IMT-GT Regional conference on mathematics, statistics and applications university sains Malaysia, penang, PP.13-15, (2006)
5. Yang, L. J., Chandel, R. S., and Bibby, M. J., "An analysis of curvilinear regression equations for modeling the submerged-arc welding process", J Mater Process Technol, Vol. 37, pp.601-611, 1993.
6. Kim, I.S., Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y., and Kim O.S., "A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding", J Mater Process Technol, Vol.136, pp.139-145, 2003).
7. Zhou, M., Zhang, H., and Hu, S.J., "Relationship between quality and attributes of spot welds", Weld J Suppl, pp.72s-79s, 2003.
8. Rowlands, H., and Antony, F., "Application of design of experiments to a spot welding process", Assembly Autom, Vol.23, pp.273-279, 2003.
9. Markelj, F., Tusek, J., "Algorithmic optimization of parameters in tungsten inert gas welding of stainless-steel sheet", Sci Technol Weld Join, Vol.6, pp.375-382, 2001.
10. Kim K.-J., Lin D. K. J., "Dual response Surface Optimization: A Fuzzy Modeling Approach", Journal of Quality Technology, 30, 1-10, (1998).
11. Venter G., Haftka R.T., "Using response surface approximations in fuzzy set based design optimization", Structural Optimization, 18, 218-227, (1999).
12. Choi, S.H. and Buckley, J.J. "Fuzzy regression using least absolute deviation estimators", Soft Computing, 12(3), pp. 257-263, (2007).
13. Bashiri, M., M.Hosseini-zhad, S.J. "A Fuzzy Programming for Optimizing Multi Response Surface in Robust Designs", Journal of Uncertain Systems, Vol.3, No.3, pp.163-173, (2009).
14. Amiri, M., "Application of Response Surface Methodology and Fuzzy Regression Method to Determine Optimum Amount of Effective Factors in Vehicle Brake Drum Assembling Problem", International Journal of Industrial Engineering and Production Management, Sharif University of Technology. Vol.27, No. 1, PP. 133-143, (2011).

15. Tatsuyuki. A, Response Surface Methodology and Its application to Automotive Suspension design , Toyota central R&D Labs.Inc ,Japan ,(2001)
16. Marklund P-O, Nilsson L. "Optimization of a car body component subjected to impact." Structural and Multidisciplinary Optimization.Vol.21, No.5, PP.383-392. (2001).
17. Amiri, M., Mousakhani, M., Alaghebandha, M. and Saeedi, S.R. "DOE by RSM Approach. 1<sup>st</sup> Ed. Chapter 2", Farhikhtegane Daneshgah Pub. Co., Tehran. (2010).
18. Kunter, M. Nachtsheim, C. Neter, J. Li, W., "Applied Linear Statistical Methods. 5<sup>th</sup> Ed". McGraw – Hill, New york , (2005).
19. Santner, T.J. Williams, B.J. Notz, W.I. "The Design and Analysis of Computer Experiments". Springer Verlag, New York. (2003).
20. Neter, J.; Kutner, M.H., Wasserman, W., Nachtsheim, C. and Neter, J., Applied Linear Statistical Methods, 4th ed., McGraw-Hill, New york (1996).
21. 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).
22. Asgharpour, M.G., "Multiple Objective Decision Making. 2<sup>nd</sup> Ed", Tehran University Publishes (2002).
23. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, PP.671-680. (1983).
24. Cerny, V., "A Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, PP.41-51. (1985).
25. Alamtabriz, A., Zandiyeh, M., Mohammad Rahimi, A.R., "Meta Heuristic Algorithms in Combinatorial Optimization. 2<sup>nd</sup> Ed", Saffar Publishes (2011).