سی امین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران
، ایران، ۲۰ تا ۲۲اردیبهشت ۱۴۰۱

ISME2022-IC1015

بهینه‌سازی استحکام اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با بکارگیری روش تاگوچی و الگوریتم تبرید تدریجی

علیرضا نیکروان[۱]، فرهاد کلاهان[۲]

[۱] دانشگاه فنی و حرفه‌ایی، دانشکده شهید محمد منتظری مشهد
[۲]دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

چکیده

در این مقاله میزان تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام کششی اتصالات آلیاژ آلومینیوم ۷۲۷۷ مورد مطالعه قرارگرفت. به منظور گردآوری داده‌های مورد نیاز ۱۶ تست جوشکاری بر اساس طرح L_{16} تاگوچی اجرا گردید. سرعت دورانی، سرعت پیشروی عمودی و زمان ماند ابزار به عنوان پارامترهای تنظیمی فرآیند انتخاب شده و در مقابل استحکام کششی برشی اتصال به عنوان مشخصه خروجی در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد ارتباط بین پارامترهای تنظیمی و مشخصه‌ی عملکردی استحکام از روش مدل‌سازی رگرسیونی استفاده شد. در مرحله پایانی به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی مدل رگرسیونی انتخاب شده، از الگوریتم تبرید تدریجی استفاده شد. در ادامه از روش سیگنال به نویز در روش تاگوچی نیز برای انتخاب سطوح بهینه پارامترهای تنظیمی برای نیل به بیشترین مشخصه خروجی استفاده شد که سرعت دورانی ۶۰۰ rpm و نرخ پیشروی ۵ mm/min و زمان ماند ۱۰ s پیشنهاد شد. شایان ذکر است که اثرات متقابل پارامترها نیز در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که در انتها دقت رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی در این تحقیق، با نتایج آزمایش‌های تجربی ارزیابی و صحه‌گذاری شد.

واژه های کلیدی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، روش تاگوچی، تحلیل آماری، مدل‌سازی، بهینه‌سازی، الگوریتم تبرید تدریجی.

مقدمه

در فرآیندهای صنعتی یکی از مراحل اصلی تولید خصوصاً محصولاتی که با اتصالات فلزی در ارتباط هستند، اتصالات جوشکاری می‌باشد. اتصالات جوشکاری باید دارای کمترین عیوب ناشی از جوشکاری باشند تا بهترین استحکام را در شرایط مختلف دارا باشند. از آن میان جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای یک فرآیند نسبتاً جدید اتصال حالت‌جامد است که بیشتر به‌منظور اتصال فلزات جوش ناپذیر با روش‌های ذوبی مانند آلیاژهای آلومینیوم، بکار گرفته می‌شود.

مزایای این روش در مقایسه با سایر روش‌های مشابه اتصال مصرف انرژی کمتر، عدم اعوجاج ناشی از حرارت به دلیل نرسیدن به دمای ذوب، کاهش هزینه عملیاتی به دلیل عدم نیاز به سیستم خنک کاری با آب یا هوای فشرده را می‌توان نام برد. علاوه بر این هیچ پاششی هنگام جوشکاری ایجاد نمی‌گردد. سایر مزایای این روش عمر بالای ابزار، بهره‌وری بالا وعدم نیاز به استفاده از گاز یا پوشش محافظ است [۱].

خواص مکانیکی اتصال ایجاد شده یکی از مهم‌ترین مواردی می‌باشد که طراحان به دنبال آن می‌باشند که همیشه یک اتصال با استحکام کششی بالاتر مطلوب بوده و در بسیاری از موارد بررسی‌ها برای افزایش استحکام کششی اتصال صورت گرفته است. بنا بر نظر بادارینارایان [۲] استحکام جوش به‌طور اساسی تابع دو عامل است: شرایط موجود در فرآیند جوشکاری و هندسه ابزار. شرایط فرآیندی مانند سرعت دورانی ابزار، عمق نفوذ پین و زمان نگهدار ابزار می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که جوش‌های با استحکام بالاتر دارای ناحیه اغتشاشی بزرگتری هستند که با دورهای پایین‌تر ابزار به دست می‌آیند. افزایش عمق نفوذ ابزار باعث افزایش استحکام جوش می‌شود ولی اگر این اندازه خیلی زیاد باشد به دلیل نازک شدن بیش‌ازحد ورق بالایی باعث کاهش استحکام جوش می‌شود.

مرزوق و همکارانش [۳] در مطالعه‌ای تأثیر سرعت دورانی و پیشروی ابزار را در استحکام جوش آلومینیوم ۶۰۶۰ مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق، سرعت دورانی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۱۶ تا ۳۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه را در برمی‌گیرد. استحکام میانگین جوش در تست کشش ۵ کیلو نیوتن گزارش‌شده است. بهترین عملکرد مربوط به قطعه جوشکاری شده با پارامترهای ۱۶ میلی‌متر بر دقیقه و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و بدترین عملکرد مربوط به قطعه جوشکاری شده با پارامترهای

۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه ذکرشده است. این مقدار ۱.۹۸ کیلو نیوتن گزارش‌شده است.

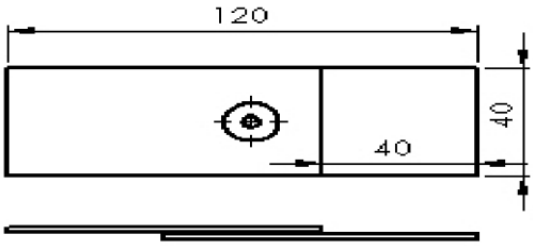
ژانگ و همکارانش [۴] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای را بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ مورد مطالعه قرار دادند. بر طبق نتایج تحقیقات ایشان با افزایش سرعت دورانی استحکام جوش کاهش می‌یابد ولی زمان انجام فرآیند تأثیر محسوسی بر استحکام جوش ندارد. بیشترین استحکام برای تست کششی-برشی مربوط به ۱۵۴۱ دور بر دقیقه و زمان ۵ ثانیه و معادل ۲۴۴۷/۷ نیوتن گزارش‌شد.

توزاکی [۵] تأکید می‌کند که افزایش زمان نگهداری ابزار و دور ابزار باعث افزایش استحکام در بارگذاری برشی می‌شود ولی استحکام تحت بارگذاری متعامد کاهش می‌یابد.

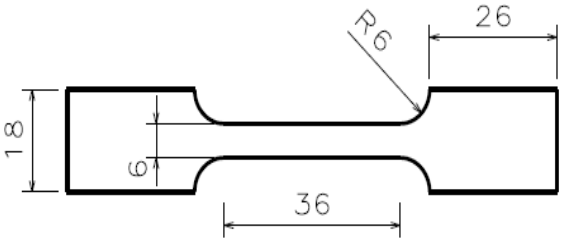
در این تحقیق هدف بررسی پارامترهای مؤثر بر استحکام کششی اتصال حاصل از جوشکاری نقطه‌ای آلیاژ آلومینیوم ۷۲۷۷ و همچنین مدل‌سازی آماری این روش برای بهینه سازی (افزایش استحکام کششی) می‌باشد. سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زمان ماند ابزار در این فرآیند به‌عنوان متغیرهای ورودی و استحکام کششی اتصال به وجود آمده به‌عنوان خروجی فرآیند در نظر گرفته‌شده‌اند. سرعت دورانی و زمان ماند ابزار با چهار سطح و سرعت پیشروی ابزار با دو سطح در نظر گرفته‌شده‌اند. در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایشات بهره برده شده است. با استفاده از طرح L_{16} تاگوچی و با در نظر گرفتن ترکیب آزمایشی پیشنهادی این روش در نهایت با انجام ۱۶ نمونه اتصال، نمونه‌ها به یکدیگر اتصال داده شده و برای مشخص شدن مقدار استحکام کششی هر نمونه، تحت کشش قرار گرفته‌اند. با استفاده از روش‌های آماری و داده‌های به‌دست آمده از تست کشش، مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی بر داده‌ها برازش داده شده و در نهایت بهترین رابطه از میان رابطه‌های بررسی شده استخراج شده است. بهینه‌سازی (افزایش استحکام کششی اتصال) فرآیند در این تحقیق با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی صورت گرفته است و در نهایت اعتبار مدل‌ها از نظر انطباق بر داده‌ها با آزمایشات تجربی مقایسه شده است.

انجام آزمایشات و اندازه‌گیری خروجی مورد نظر

در این تحقیق برای انجام آزمایشات و جمع آوری دیتاهای مورد نیاز برای اهداف مدل‌سازی و بهینه‌سازی از روش تاگوچی استفاده شد. بعد از مشخص شدن ماتریس آزمایشات (L_{16}) با بکارگیری روش تاگوچی، آزمایشات انجام شدند. شایان ذکر است که به منظور کسب نتایج دقیقتر آزمایشات به صورت تصادفی انجام شد. شکل (۱) ابعاد و قطعات جوشکاری شده را نشان می‌دهد. بعد از اتمام آزمایشات، اقدام به اندازه‌گیری خروجی مورد نظر (استحکام کششی) شد (شکل ۲). در ادامه به منظور ایجاد ارتباط معنادار بین پارامترهای ورودی و مشخصه‌ی عملکردی از روش مدل‌سازی رگرسیونی استفاده و آنالیزهای آماری برای صحه‌سنجی مدل‌های آماری صورت پذیرفت و بهترین مدل به عنوان تابع هدف انتخاب شد.



شکل ۱: ابعاد قطعات جوشکاری شده



شکل ۲: ابعاد قطعات برای تست کشش

مدل‌سازی رگرسیونی

مدل‌سازی رگرسیونی یک ابزار ریاضی است که هدف آن تعیین رابطه‌ای برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی و مشخصه‌های خروجی به شکل یک تابع تقریبی برای مجموعه‌ای داده اولیه به‌صورت زوج مرتب می‌باشد. در این زوج‌های مرتب یک مختصه به عنوان متغیر وابسته (که در اینجا خروجی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، استحکام کششی نهایی می‌باشد) و دیگر مختصه‌ها به عنوان متغیر مستقل و ورودی (مانند سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زمان ماند ابزار) در نظر گرفته می‌شوند. تابع حاصل از برازش فرمولی خواهد بود که در آن با مقداردهی متغیرهای مستقل، مقدار متغیر وابسته تقریب زده می‌شود. برای تنظیم تابع تعدادی ضریب در نظر گرفته می‌شود. هرچه تعداد این ضرایب بیشتر باشد انعطاف‌پذیری تابع نیز بیشتر است. ضرایب مدل ریاضی به نحوی

تنظیم می‌شود که خطای بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی و داده‌های واقعی کمینه شود تا رابطه‌ای ایجاد شود که از داده‌ها پیروی نماید و درعین‌حال بتواند رفتار فرآیند را در محدوده طراحی آزمایش‌ها پیش‌بینی نماید. پس از این‌که به کمک فرمول‌های برازش مقادیر ضرایب مدل به دست آمد، تلاش می‌شود به کمک آزمون‌های آماری دقت، کیفیت و شایستگی مدل بررسی گردد. ازنظر آماری بهترین مدل برازشی، ساده‌ترین مدل با خطای کم قابل چشم پوشی است. در جدول ۱، ماتریس آزمایشات و در جدول ۲ نتایج مربوط به آنالیز واریانس ارایه شده است. معادله‌های ۱ تا ۳ مربوط به مدل‌های درجه اول، دوم تعدیل شده (با حذف پارامترهای بی اثر)، و سوم تعدیل شده (با حذف پارامترهای بی اثر) می باشند.

جدول ۱: طرح تاگوچی ارایه شده با مقادیر استحکام کششی

شماره آزمایش	سرعت دوران rpm	زمان ماند s	سرعت پیشروی mm/min	استحکام کششی F(N)
۱	۶۰۰	۵	۵	۶۴۴۸
۲	۶۰۰	۱۰	۵	۵۰۹۶
۳	۶۰۰	۱۵	۱۰	۲۰۴۱
۴	۶۰۰	۲۰	۱۰	۲۴۷۳
۵	۱۰۰۰	۵	۵	۲۵۴۳
۶	۱۰۰۰	۱۰	۵	۲۴۰۶
۷	۱۰۰۰	۱۵	۱۰	۲۰۸۱
۸	۱۰۰۰	۲۰	۱۰	۲۵۶۶
۹	۱۲۵۰	۵	۱۰	۲۱۵۵
۱۰	۱۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۵۲۹
۱۱	۱۲۵۰	۱۵	۵	۳۵۱۹
۱۲	۱۲۵۰	۲۰	۵	۳۴۸۵
۱۳	۱۶۰۰	۵	۱۰	۲۰۳۰
۱۴	۱۶۰۰	۱۰	۱۰	۲۹۴۹
۱۵	۱۶۰۰	۱۵	۵	۳۱۸۳
۱۶	۱۶۰۰	۲۰	۵	۱۶۵۳

جدول ۲: نتایج مربوط به آنالیز واریانس

مدل	R^2 %	R^2(adj)%	R^2(pred)%	F-value	P-value
مرتبه اول	۴۸/۲	۳۵/۲	۱/۱۴	۳/۷۲	۰/۰۵
مرتبه دوم	۷۵/۹	۴۸/۳	۰۰ .۰۰	۲/۷۵	**۰/۱**
مرتبه دوم تعدیل شده	۷۴/۷	۶۲/۱	۲۸/۱۴	۵/۹۱	۰/۰۰۸
مرتبه سوم	۹۸/۰۰	۹۳/۷۰	۹۵/۵۹	۲۰۴/۰۹	۰/۰۴
مرتبه سوم تعدیل شده	۹۶/۸	۹۲/۰	۷۴/۶۹	۲۰/۱۴	۰/۰۱

$$F = 6953-1.37V-55.8S-238W \quad (۱)$$

$$F=16869 - 15.1V - 98S - 1141W + 0.00241V^2 - 1.13S^2 + 0.153VS + 0.883VW + 1.4\,SW \quad (۲)$$

$$F= 43191 - 89.6V - 1793S - 147W + 0.0635V^2 + 3.11VS - 0.000015V^3 + 1.21S^3 - 0.000869V^2S - 0.0419VS^2 \quad (۳)$$

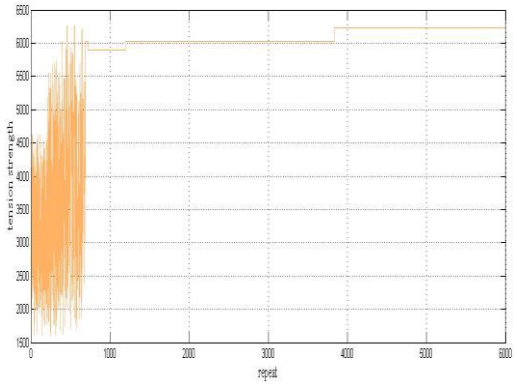
بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری تبرید تدریجی

همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد یکی از اهداف این تحقیق بهینه کردن سطوح متغیرهای مؤثر در فرآیند با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد. در این تحقیق از الگوریتم تبرید تدریجی استفاده شده است. با توجه به شرایط فرآیند در این تحقیق و با استفاده از مدل برازش داده شده‌ی مرتبه سوم تعدیل یافته که مناسب‌ترین پارامترهای آماری را دارا بوده است سطوح بهینه متغیرهای مؤثر بر فرآیند با استفاده از برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار Matlab به دست آمده‌اند.

الگوریتم تبرید تدریجی در اوایل دهه ۱۹۸۰ و توسط کریک پاتریک و همکارانش معرفی شد. کریک و همکارانش، متخصصانی در زمینه فیزیک آماری بودند. آنها برای حل مسایل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تبرید تدریجی پیشنهاد دادند. این روش، فرآیند بازپخت مواد را شبیه‌سازی می‌کند. طی فرآیند باز پخت، یک ماده تا دمایی کمتر از دمای ذوبش گرم می‌شود و سپس به تدریج دمای آن پایین آورده می‌شود. نحوه‌ی کاهش دما بسیار کند و در حدی است که ماده در تعادل ترمودینامیکی است. در الگوریتم تبرید تدریجی ، جواب‌های پیشنهادی برای مسأله، در دمای بالاتر قرار دارند و غالباً جواب‌های مناسبی نیستند. این نامناسب بودن را می‌توان به شکنندگی تشبیه کرد. سپس متغیری که نقش دما را بر عهده دارد، به‌مرور زمان کاهش داده می‌شود تا به این ترتیب جواب‌های بهتری در دماهای پایین تشکیل شوند. الگوریتم جواب‌های بعدی را با استفاده از جواب‌های فعلی به دست می‌آورد. در این الگوریتم گرم کردن با اعمال تغییرات تصادفی بیشتر بر روی متغیرها مترادف است. در دماهای بالا متغیرها دارای تغییرات زیادی هستند و هر چه دما پایین تر می آید، دامنه تغییرات تصادفی متغیرها نیز کمتر و کمتر می‌شود. همواره تغییراتی که منجر به بهتر شدن نتیجه شوند، پذیرفته می‌شوند. این روش برخلاف روش‌های جستجوی معمولی، در هرتکرار علاوه بر حرکت به سوی جواب بهتر، جواب‌های با مقدار تابع هدف بهتر را نیز با احتمال غیرصفری قبول می کند و تغییراتی که منجر به بدتر شدن نتیجه شوند، با احتمالی پذیرفته می‌شوند. این احتمال نیز با کمتر شدن دما کمتر می‌شود. افزایش در مقدار تابع هدف، فقط هنگامی پذیرفته می‌شود که شرط $\text{Exp}(-\Delta F/T)>r$ برقرار باشد که در آن T دما و r یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۰,۱] است. دمای سیستم که درجه تصادفی بودن حرکت به سوی جواب را تعیین

می‌کند، مطابق با یک برنامه معین با پیشرفت روش حل، کاسته می‌شود [۶].

برنامه کامپیوتری استفاده شده در این تحقیق در پیوست آورده شده است. با توجه به خروجی الگوریتم تبرید تدریجی در این فرآیند، سطوح بهینه متغیرها برای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زمان ماند ابزار به ترتیب ۶۰۰، ۵ و ۵ می‌باشد که با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش نیز این نتیجه نسبتاً تایید می‌شود. طبق نتایج داده‌های تجربی نیز این سطوح از متغیرها دارای بیشترین استحکام کششی می‌باشند.



شکل ۳: همگرایی الگوریتم تبرید تدریجی

با توجه به شکل‌های بالا، الگوریتم تبرید تدریجی برای این فرآیند استحکام کششی بهینه را ۶۶۳۹ نیوتن گزارش می‌دهد. با توجه به داده‌های آزمایش که بیشترین استحام مقدار ۶۴۴۸ نیوتن به‌دست آمده است خطای بسیار ناچیزی را در این مدل‌سازی شاهد هستیم. با توجه به این خطای بسیار پایین می‌توان به این نتیجه رسید که این مدل یک مدل مطلوب برای پیش‌بینی فرآیند برای آلیاژ ۷۲۷۷ می‌باشد.

روش سیگنال به نویز

روش تاگوچی ترکیبی از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که در مطالعات تجربی استفاده می‌شود. این روش می‌تواند با کمترین تعداد آزمایش‌ها، شرایط بهینه را تعیین کند. در سرتاسر این متن اصطلاحات فاکتورها، متغیرها و پارامترها مترادف فاکتورهایی هستند که بر نتیجه‌ی محصول یا فرآیند اثر می‌گذارند. تاگوچی فاکتورها را به طور کلی به فاکتورهای قابل کنترل (سیگنال) و غیرقابل کنترل (اغتشاشی یا نویز) تقسیم‌بندی کرده است. عوامل کنترلی عواملی هستند که به‌منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی پروسه‌های ساخت به‌کار می‌روند. به عنوان مثال سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زمان ماند در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای به عنوان عوامل کنترلی در نظر گرفته می‌شوند، وعوامل غیرکنترلی تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند اما به دلیل این‌که کنترل آن‌ها مشکل است یا کنترل آن‌ها هزینه‌ی زیادی دارد برحسب شرایط ثابت در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و فشار جزء عوامل غیر کنترلی محسوب می‌شوند [۷].

از نسبت سیگنال به نویز می‌توان در تعیین سطوح بهینه پارامتری بهره جست. در روش تاگوچی و با استفاده از فرمول‌های موجود در این روش مقادیر بهینه متغیر ها در نموداری محاسبه خواهند شد.

با توجه به شرایط مسئله و از نقطه نظر کیفیت، مشخصه‌های کیفی مطلوب و موردنظر را به سه دسته می‌توان تقسیم‌بندی کرد که در زیر بیان می‌شوند:

حالت کوچکترین، بهترین

در برخی مسائل مهندسی هدف کمینه کردن پارامتر خروجی است. به عنوان مثال در فرآیندهای جوشکاری هدف کمینه کردن اندازه دانه در محل اتصال است. در این حالت مقدار بهینه، برای خروجی در بهترین حالت برابر صفر است. بنابراین داریم [۲۵]:

چون در این حالت خروجی مطلوب (y_0) برابر صفر است داریم:

حالت بزرگترین، بهترین

در برخی مسائل مهندسی هدف بیشینه کردن پارامتر خروجی است به عنوان مثال در فرآیندهای جوشکاری هدف بیشینه کردن استحکام اتصال جوشکاری است. در این حالت نیز مجدداً نقطه‌ی صفر را به عنوان مقدار مشخصه، تعریف می‌کنیم و نحوه‌ی محاسبه‌ی MSD را تغییر داده و y_0 را به تبدیل می‌کنیم چون معکوس هر عدد کوچک عددی بزرگ است و بالعکس. این کار باعث ایجاد حداکثر تمایز بین فاکتورهای قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل می‌شود[۲۵].

حالت مقدار نامی، بهترین

در برخی مسائل مهندسی مثل تولید قطعات مونتاژی هدف نزدیک کردن خروجی به یک مقدار نامی است. در این حالت برای محاسبه سیگنال به نویز داریم [۲۵]

$$S/N=-10\ LOG\ (MSD) \quad (۵)$$

$$MSD=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-y_0)^2 \quad (۶)$$

$$S/N=-10\times\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i)^2\right) \quad (۷)$$

$$S/N=-10\times\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{y_i}\right)^2\right) \quad (۸)$$

.

$$S/N = 10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i)^2\right) \quad (۹)$$

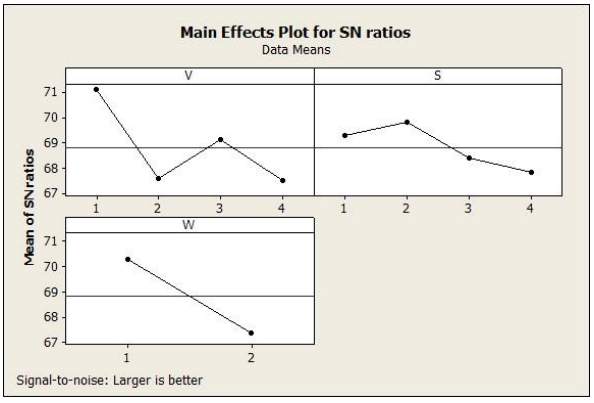
با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مقادیرمختلف S/N را برای خروجی جوشکاری محاسبه شده و در جدول ۳، نشان داده شده است. این مقادیر با توجه به حالت هرچه بزرگتر، بهتر برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای (استحکام کششی نهایی) محاسبه شده‌اند.

جدول ۳: نتایج مربوط به آنالیز سیگنال به نویز

شماره آزمایش	استحکام کششی (N)	سیگنال به نویز
۱	۶۴۴۸	۷۲.۵۹
۲	۵۰۹۶	۷۱.۸۵
۳	۲۰۴۱	۶۶.۱۹
۴	۲۴۷۳	۶۷.۸۶
۵	۲۵۴۳	۶۸.۱۰
۶	۲۴۰۶	۶۷.۶۲
۷	۲۰۸۱	۶۶.۳۶
۸	۲۵۶۶	۶۸.۱۸
۹	۲۱۵۵	۶۶.۶۷
۱۰	۲۵۲۹	۶۸.۰۶
۱۱	۳۵۱۹	۷۰.۹۳
۱۲	۳۴۸۵	۷۰.۸۵
۱۳	۲۰۳۰	۶۶.۱۵
۱۴	۲۹۴۹	۷۰.۴۰
۱۵	۳۱۸۳	۷۰.۰۵
۱۶	۱۶۵۳	۶۴.۳۷

بهینه سازی پارامترهای فرآیندبا استفاده از تاگوچی

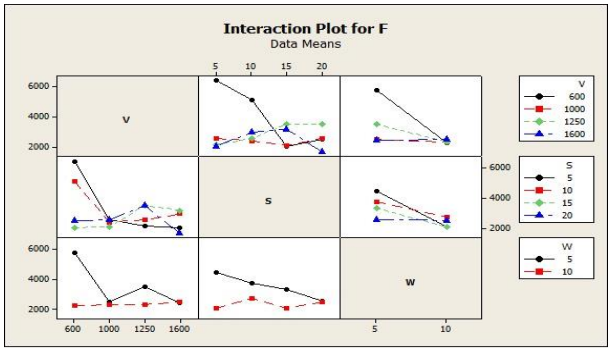
شکل ۴، تاثیرات اصلی پارامترهای ورودی بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. این نمودار به‌منظور تعیین سطوح بهینه به‌منظور اخذ اتصالی با استحکام کششی بیشینه ترسیم شده است. همچنین این نمودارها به عنوان ابزاری جهت بهینه‌سازی پارامترهای تنظیمی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با روش تاگوچی استفاده شده است.



شکل ۴: نمودار تاثیرات اصلی پارامترهای ورودی بر استحکام کششی مدل S/N

نحوه ترسیم این شکل ها نیز بدین گونه است که برای هر سطح از پارامتری خاص، متوسط استحکام کششی تمام اتصالات با این سطح پارامتر محاسبه شده و به عنوان متوسط استحکام کششی در این سطح تعیین می‌شود. با توجه به شکل ۳، با تنظیم سرعت دورانی در سطح اول (600rpm)، سرعت پیشروی در سطح اول (5mm/min) و زمان ماند در سطح دوم (10 s) استحکام کششی اتصال بیشینه خواهد بود. نمودار شکل ۳، حاصل تجزیه و تحلیل به روش سیگنال به نویز روش تاگوچی می‌باشد.

اثرات متقابل پارامترهای ورودی بر استحکام کششی اتصال در شکل ۵، نشان داده شده است. این شکل سه ردیف دارد که در هر ردیف اثر متقابل یک پارامتر بر دو پارامتر دیگر نشان داده شده است. به عنوان مثال می‌توان ملاحظه کرد که در ردیف اول و ستون آخر اثر متقابل سرعت دورانی و سرعت پیشروی نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود با انتخاب سرعت دورانی با سطح اول (سرعت دورانی 600rpm) و سرعت پیشروی با سطح اول (5mm/min) اتصالی با بیشترین استحکام کششی به دست خواهد آمد. با توجه به اثرات متقابل و تاثیرات کلی پارامترهای ورودی بر استحکام کششی اتصال می‌توان مقادیر بهینه این پارامترها را برای ماکزیمم کردن خروجی بطور تقریبی تعیین کرد.



شکل ۵: نمودار تأثیر متقابل پارامترها برای استحکام کششی نهایی

جدول ۴: پارامترهای بهینه برای حصول استحکام کششی بیشینه با استفاده از روش سیگنال به نویز

پارامتر بهینه	سرعت دورانی rpm	سرعت پیشروی mm/min	زمان ماند ابزار
مقدار	۶۰۰	۵	۱۰

صحه‌گذاری نتایج با آزمایش‌های تجربی

با توجه به پارامترهای مشخص‌شده از نمودارهای اثرات اصلی و متقابل و با توجه به اینکه ترکیب آزمایشی مشخص‌شده در طرح آزمایش وجود داشته و عملا از قبل نتیجه آن مشخص‌شده است، بنابراین برای صحه گذاری بر نتایج آزمایش و همچنین صحه گذاری بر مدل انتخابی از طرح آزمایشی تاگوچی و با استفاده از نرم افزار Minitab یک ترکیب تصادفی با ترکیب آزمایشی سرعت دورانی با سطح۲، زمان ماند ابزار با سطح۳ و سرعت پیشروی ابزار با سطح۱ که در ترکیب‌های

قبلی تکرار نشده باشد را انتخاب نموده و با استفاده از تکرار تمامی مراحل طولانی آزمایش و با همان دستگاه های قبلی یک اتصال را تشکیل داده و سپس در همان دستگاه قبلی (ZWICKZ350) کشیده شده و نتایج آن برای مقایسه در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقایسه مقدار پیش‌بینی شده و مقدار آزمایش شده

میزان خطا (٪)	مقدار آزمایش	پیش‌بینی تاگوچی	سطوح انتخابی
۹/۱۱	۲۵۲۲	۲۷۵۲	$V_2S_3W_1$

با توجه به جدول ۵، مقدار پیش‌بینی شده بر اساس مدل تاگوچی محاسبه شده است که مقدار پیش‌بینی شده برابر با ۲۷۵۲ نیوتن است. پس از آنجام عملیات جوشکاری با سطوح پارامترهای مشخص‌شده در جدول عملیات تست کشش برای نمونه‌ی تهیه شده انجام گرفت و استحکام کششی نهایی اتصال ایجاد شده برابرست با: ۲۵۲۱ نیوتن می باشد. نتیجه با مقدار پیش‌بینی شده بر اساس مدل تاگوچی مقایسه گردیده است و با توجه به مقدار خطا (۹/۱۱ درصد) که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، صحت مدل‌ها و تحلیل‌های آماری انجام شده را تایید می‌کند.

با توجه به آزمایشات انجام شده و تحلیل های آماری به وضوح مشخص است که روش ارایه شده یک روش مطلوب برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی می‌باشد. نتایج مربوط به بهینه‌سترزی توسط آزمایشات تجربی مورد صحه‌سنجی قرار گرفت و نتایج آزمایشات تنها مقدار کمتر از ۱۰ درصد خطا را نشان داد که با توجه به تجهیزات مورد استفاده مورد تایید بوده و عملکرد مطلوب روش مدل‌سازی و بهیه سازی را نشان می‌دهد.

منابع و مراجع

[1] Yin, Y., A. Ikuta, and T. North, "Microstructural features and mechanical properties of AM60 and AZ31 friction stir spot welds", Materials & Design, 2010. 31(10): p. 4764-4776.

[2] Badarinarayan. H, Shi. Y, Li. X, "Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. 49(11): p. 814-823.

[3] Merzoug. M, Mazari. M, Lahcene. I, "Parametric studies of the process of friction spot stir n welding of aluminium 6060-T5 alloys", Materials & Design, 2010. 31(6): p. 3023-3028.

[4] Zhang. Z, Yang. X, Zhang. J, Zhou. G, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy", Materials & Design, 2011. 32(8): p. 4461-4470.

[5] Tozaki. Y, Y. Uematsu and K. Tokaji, "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. 47(15): p. 2230-2236.

[6] Kolahan, F., Golmezerji, R., and Azadi Moghaddam, M., 2012, Multi Objective Optimization of Turning Process using Grey Relational Analysis and Simulated Annealing Algorithm, Applied Mechanics and Materials, pp. 2926-2932.

[7] Jahromi MHMA, Tavakkoli-Moghaddam R, Makui A, Shamsi A (2012) Solving an one-dimensional cutting stock problem by simulated annealing and tabu search. Journal of Industrial Engineering International 8:1-8.