

پیش‌بینی و بهینه‌سازی اندازه قطر دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر ورق مورد استفاده

در صنعت کشتی‌سازی با استفاده از طراحی آزمایشات

مجید اویسی^۱، نصرالله بنی مصطفی عرب^۲، غلامحسین پایگانه^۲^۱ عضو هیات علمی دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار^۲ عضو هیات علمی دانشگاه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم افزار Design Expert آزمایشاتی در قالب ماتریس رویه سطح طراحی گردید. بر اساس این آزمایشات، یک مدل ریاضی ارائه شد تا تأثیرات اصلی، متقابل و درجه دوم پارامترهای جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بر قطر دکمه جوش در فولادهای St12 مورد استفاده در بدنه کشتی با ضخامت ۰/۸ میلیمتر را نشان دهد. اعتبار مدل و پارامترهای اثرگذار به وسیله دیاگرام های پراکندگی و آنالیز واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به سطوح پاسخ بدست آمده از آزمایشات مشخص گردید در فشار ثابت افزایش زمان و جریان جوشکاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقادیر پایین و متوسط باعث افزایش قطر دکمه جوش می‌گردد اما در مقادیر بالا به دلیل وجود اثر متقابل بین پارامترها تأثیر آن‌ها بر قطر دکمه جوش اثرعکس دارد. در پایان به منظور کسب بزرگترین اندازه قطر دکمه جوش، بهینه‌سازی مدل بدست آمده صورت گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که تقریباً در جریان ۱۱ کیلوآمپر و زمان ۸/۶۳ سیکل و فشار ثابت ۲/۵ بار نقطه جوش‌هایی با قطر ۵/۴۳ میلیمتر شکل می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، طراحی آزمایشات، نرم‌افزار Design Expert، St12، مدل ریاضی، دکمه جوش

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به علت سرعت بالا، راحتی بکارگیری و قابلیت اتوماسیون بطور وسیعی در صنایع کشتی‌سازی، اتومبیل‌سازی، هواپیما سازی و... بکار گرفته می‌شود (Chao, 2003) با وجود این مزایا کنترل کردن این فرآیند مشکل می‌باشد بطوریکه کارخانجات هزینه‌های زیادی به منظور دستیابی به جوش‌هایی با اندازه بهینه متقبل می‌شوند. جهت دستیابی به نقطه جوش‌هایی بدون عیب مجموعه پارامترهای فرآیند جوشکاری باید بصورت بهینه انتخاب گردند و همچنین شرایط به گونه‌ای کنترل شود تا مجموعه شرایط بهینه همواره ثابت نگه داشته شوند. قطر دکمه جوش از مهمترین پارامترهایی است که بر خواص مکانیکی جوش تأثیرگذار است. با افزایش قطر دکمه جوش ظرفیت تحمل بار کششی - برشی افزایش می‌یابد (pouranvari et al., 2003). استانداردهای صنعتی اندازه‌های متفاوتی را برای حداقل قطر دکمه جوش با توجه به ضخامت ورق‌ها پیشنهاد کرده‌اند. برای مثال استانداردهای (ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 standard 1997) رابطه ۱ را پیشنهاد نموده‌اند:

$$d = 4\sqrt{t} \quad (1)$$

در رابطه فوق d و t به ترتیب قطر دکمه جوش و ضخامت ورق بر حسب میلیمتر می‌باشند. قابل ذکر است قطر دکمه جوشی که بر اساس ضخامت ورق به دست می‌آید در بیشتر مواقع از استحکام کافی برخوردار نمی‌باشد (ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 standard 1997).

هدف این تحقیق، تهیه مدل مبتنی بر داده‌های تجربی (تابع رگرسیونی) می‌باشد که قابلیت ایجاد ارتباط معنی‌دار بین پارامترهای ورودی با متغیرهای خروجی را داشته باشد.

روش سطح پاسخ (Response surface method) یکی از روشهای طراحی آزمایشات می‌باشد که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد استفاده می‌گردد و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پاسخ است (Khuri and Cornell, 1996).

امروزه روش‌های متنوعی جهت مدل‌سازی فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های آماری و غیر آماری اشاره نمود (Cho and hu, 2006; Han et al., 2006).

Lin et al. (2008) فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولادی استحکام بالا^۱ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعه خود پارامترهای زمان، جریان، نیرو و قطر الکترود را به عنوان پارامترهای مورد مطالعه انتخاب نمودند. تأثیر پارامترهای فوق بر کیفیت دکمه جوش به وسیله روش تاگوچی بررسی شد سپس از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه پارامترهای فوق استفاده گردید. (Luo et al. (2009) تأثیر پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر هندسه دکمه جوش در ورق‌های گالوانیزه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق خود از روش آرایه‌های متعامد به منظور مدل‌سازی فرآیند استفاده کردند و به وسیله آنالیز واریانس مدل بدست آمده را بهینه نمودند.

^۱ - High strenght steel

علیرغم تحقیقات گسترده انجام شده، هنوز مدلی مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برای ورق‌های با جنس مورد مطالعه در این تحقیق گزارش نشده است. در مقاله حاضر، با استفاده از نتایج آزمایشات تجربی و مدل سازی فرآیند و بکارگیری روش رویه سطح ارتباطی دقیق بین پارامترهای تنظیمی و قطر دکمه جوش ورق‌های فولادی St12 ایجاد شده است. نتایج این تحقیق در استاندارد سازی‌های جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از طریق پیش‌بینی تأثیر پارامترها بر قطر نقطه جوش ورق می‌تواند بسیار موثر و مستند باشد. تعیین دقیق تأثیر پارامترهای فرآیند می‌تواند موجب کاهش تنظیمات خط تولید و کاهش ضایعات شود که این به نوبه خود کاهش هزینه‌های تولید و بهبود کیفیت را به دنبال خواهد داشت.

۲- مواد و روش تحقیق

ورق فولادی کم‌کربن با ضخامت ۰/۸ میلیمتر که به وفور در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد در این پژوهش استفاده شده است. جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه ای ثابت با توان ۱۲۰ KVA از نوع ستونی انجام شد. برای این منظور از الکتروود گروه A مطابق کلاس ۲ دسته بندی RWMA^۱ استفاده شد. جنس این الکتروود از آلیاژ مس-کروم- زیرکونیوم و شکل آن بصورت مخروط سرزده با قطر تماس ۵ میلیمتر می‌باشد.

به منظور تعیین تأثیر پارامترهای جریان، فشار و زمان بر قطر دکمه جوش پارامترهای مذکور پس از انجام آزمایشات سعی و خطا و تغییر هر فاکتور در یک زمان^۲ در سه سطح کد شده و مطابق جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱. سطوح پارامترهای جوشکاری

پارامترها	واحد	-۱	۰	+۱
جریان (I)	KA	۷	۹	۱۱
زمان (t)	Cycle	۷	۹	۱۱
فشار (P)	Bar	۲/۵	۲/۵	۲/۵

۱۷ آزمایش بر اساس ماتریس طراحی آزمایشات طبق ترتیب پیشنهادی نرم افزار Design Expert و با استفاده از سطوح پارامترهای جدول ۱ بطور تصادفی انجام شد تا اثرات ناشی از خطای محیطی و خطای حاصل از دقت تنظیم پارامترها بر روی ماشین حذف گردند. ورق‌ها به ابعاد ۱۰۰×۵۰×۰/۸ میلیمتر مطابق شکل ۱ جوشکاری شدند.

شکل ۱. نمونه جوشکاری شده



با استفاده از نتایج این آزمایشات و نرم افزار مذکور مدل ریاضی درجه دومی (رابطه ۱) می‌توان ارائه نمود که قادر است اثرات اصلی، متقابل و درجه دوم جریان، زمان و فشار جوشکاری را بر قطر دکمه جوش پیش‌بینی نماید [۹].

$$y = S_0 + \sum_{j=1}^k S_j x_j + \sum_{i < j} S_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k S_{jj} x_j^2 + v \quad (1)$$

به منظور اندازه گیری قطر دکمه جوش از روش متالوگرافی استفاده گردید. بدین منظور نمونه‌های متالوگرافی بر اساس استاندارد آماده شدند و ماکروساختار نمونه‌ها با بزرگنمایی ۱۰X در زیر میکروسکوپ نوری مشاهده گردید و با استفاده از کاغذ مدرج قطر دکمه جوش اندازه گیری - شد (شکل ۲).

¹ - Resistance welding manufacturing alliance

² - One factor at a time



شکل ۲. نمونه بدست آمده در زیر میکروسکوپ نوری

۳- نتایج و بحث

بر اساس آنالیز واریانس (ANOVA) داده‌های حاصل از نرم افزار و حذف پارامترهای غیر موثر و ضرایب آن‌ها رابطه ۱ بصورت مدل ریاضی زیر ارائه گردید:

$$D = 5.14 + .96I + .44t - .27P - .59It - .67I^2 - .4It^2 \quad (2)$$

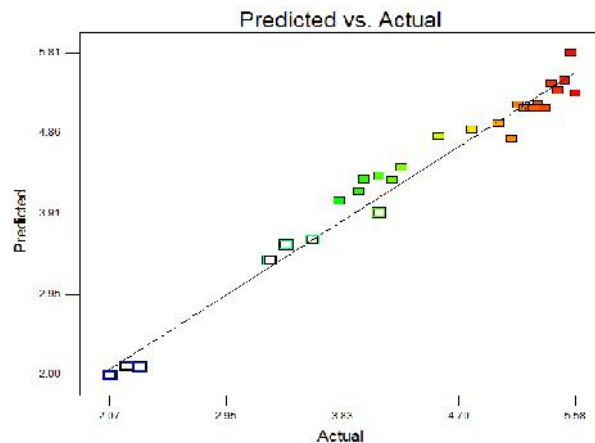
در رابطه فوق D قطر دکمه جوش بر حسب میلی‌متر و P، I و t مقادیر کد شده پارامترها بر اساس جدول ۱ می‌باشند. ضریب تعیین تعدیل یافته برای مدل فوق ۰/۹۰ محاسبه شده است. نزدیک بودن این ضریب به عدد یک بدین معناست که مدل بدست آمده با تقریب قابل قبول نتایج واقعی را تخمین می‌زند.

۳-۱. صحت گذاری مدل

به دو روش می‌توان به مدل فوق در بازه آزمایش شده اطمینان نمود:

۱- استفاده از نمودارهای پراکندگی

۲- بیشینه و کمینه کردن متغیرهای مدل



شکل ۳. نمودار پراکندگی مقادیر واقعی در برابر مقادیر بدست آمده به وسیله مدل

در شکل ۳ نمودار پراکندگی مقایسه قطر دکمه جوش واقعی با قطر دکمه جوش پیش‌بینی شده به وسیله مدل آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مدل مذکور در محدوده مورد نظر رفتار خوبی را دارا می‌باشد. نتایج بیشینه و کمینه کردن متغیرهای مدل در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مقایسه مقادیر مدل با نتایج واقعی در نقاط بیشینه و کمینه مدل

قطر دکمه جوش پیش بینی (mm)	قطر دکمه جوش واقعی (mm)	فشار (bar)	زمان (cycl)	جریان (kA)
۲/۲۴	۲/۰۶	۲/۵	۷	۷
۵/۶۶	۵/۴۳	۲/۵	۸/۶۳	۱۱

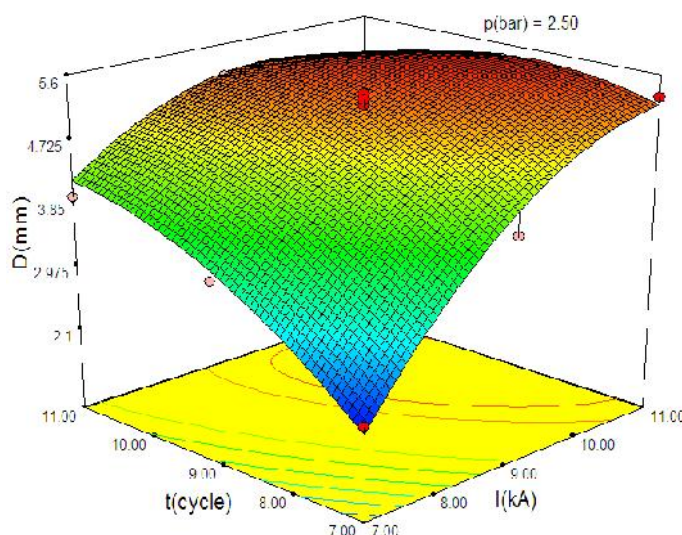
این نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در محدوده در نظر گرفته شده متغیرها با تقریب خوبی کار برد دارد.

۲-۳ بررسی رفتار مدل:

برای بررسی رفتار مدل به منظور دستیابی به شرایطی که بزرگترین دکمه جوش ایجاد شود از نمودارهای سه بعدی استفاده می‌شود تا اثر پارامترها بر قطر دکمه جوش مشاهده گردد. قابل ذکر است به دلیل تاثیر متقابل پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق مطالعه موردی هر پارامتر امری گمراه کننده می‌باشد (نورالسنا، ۱۳۸۶).

۳-۲-۱. تاثیر جریان- زمان بر قطر دکمه جوش

شکل (۴) تاثیر جریان و زمان در فشار ثابت ۲/۵ بار بر قطر دکمه جوش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش جریان و زمان جوشکاری به علت افزایش انرژی ورودی به منطقه جوش، قطر دکمه جوش افزایش می‌یابد. همچنین قطر دکمه با افزایش زمان به یک حد بیشینه می‌رسد و پس از آن مقدار قطر دکمه در جریان بالا کاهش می‌یابد. در زمان‌ها و جریان‌های بالا به دلیل بالا رفتن مقدار گرما در محدوده دکمه جوش، پس از مدتی جوش ریزش خواهد کرد و در این زمان می‌باشد که خواص مکانیکی جوش نیز افت خواهد کرد و له شدن قطعه کار در زیر الکترودها پدید می‌آید. با افزایش زمان، جریان مربوط به افزایش اندازه دکمه بیشینه به سمت مقادیر کمتر خود میل می‌کند. اگر بخواهیم اثر زمان را در جریان‌های مختلف بررسی کنیم دیده می‌شود در جریان‌های کم افزایش زمان باعث افزایش اندازه دکمه می‌گردد و مقادیر زمان به ازای رسیدن به اندازه دکمه بیشینه در زمان‌های بین ۸ تا ۱۰ سیکل رخ می‌دهد.

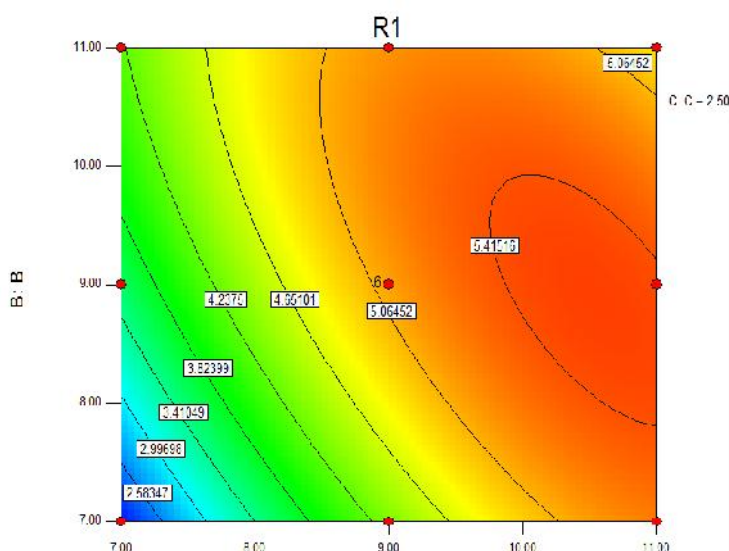


شکل ۴. اثر گذاری جریان و زمان در فشار ثابت ۲/۵ بار بر قطر دکمه جوش

با افزایش مقادیر جریان، شیب افزایش اندازه دکمه با تغییرات زمان، کاهش می‌یابد که نشان دهنده نزدیکتر شدن به زمان‌های اندازه دکمه بیشینه می‌باشد.

قابل توجه می‌باشد که قطر دکمه جوش بزرگتر در هنگام به کارگیری جریان‌های بالاتر در زمان‌های کوتاهتر بدست می‌آید.

شکل دو بعدی (۵) نشان می‌دهد در زمان‌های کم، حداکثر اندازه دکمه جوش حدود ۵/۴۳ میلی‌متر می‌باشد و حوالی جریان‌های ۹ کیلو آمپر بدست می‌آید. نکته دیگری که در خطوط اندازه دکمه ثابت دیده می‌شود فشردگی آن‌ها در مقادیر جریان کم به نسبت جریان‌های بالا می‌باشد که نشان دهنده حساسیت بالاتر تغییرات اندازه دکمه با تغییرات جریان در مقادیر کم نسبت به مقادیر بالا می‌باشد. به عبارت بهتر اثر گذاری جریان روی اندازه دکمه جوش با تولرانس بسته تر در جریان‌های کمتر نسبت به جریان‌های بالاتر مشاهده می‌شود.



شکل ۱. شکل دو بعدی تأثیر همزمان جریان - زمان در فشار ثابت ۲/۵ bar

۳-۳. بهینه‌سازی

با توجه به اینکه استحکام جوش تابع قطر دکمه جوش می‌باشد جهت بیشینه نمودن قطر دکمه جوش مقادیر پارامترهای زمان، جریان و فشار را باید بطور بهینه انتخاب نمود. تعدادی از نتایج بهینه‌سازی انجام شده توسط نرم افزار در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. نتایج بهینه‌سازی

فشار جوشکاری (bar)	زمان کاری (cycle)	جریان جوشکاری (kA)	قطر دکمه (mm)
۲/۵	۸/۶۳	۱۱	۵/۴۳
۲/۵	۹	۱۰/۶۴	۵/۴۳
۲/۵	۱۰/۶۲	۹/۵۱	۵/۴۳

با توجه به جدول ۳، تحت شرایط مختلف جریان، زمان و فشار می‌توان به جوشی با حداکثر اندازه دست یافت. نظر به این‌که سرعت انجام کار در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از مزایای مهم این فرآیند می‌باشد و می‌تواند معیار انتخاب شرایط بهینه باشد لذا زمان حداقل را می‌توان از جدول فوق انتخاب نمود و پارامترهای جریان و فشار را بر طبق آن تنظیم نمود تا دکمه جوشی با قطر ۵/۴۳ میلی‌متر دست آید.

۴. نتیجه‌گیری

- ۱- با توجه به ضریب تعیین بدست آمده قطر دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به شدت تحت تاثیر پارامترهای مورد مطالعه می‌باشد و فرآیند قابل کنترل است.
- ۲- با توجه به مدل بدست آمده تاثیر پارامتر جریان بر دکمه جوش تشکیل شده بیشتر از تاثیر زمان و فشار می‌باشد. به عبارتی نرخ رشد قطر دکمه جوش بیشتر تحت تاثیر جریان می‌باشد.
- ۳- علیرغم این‌که در جریان‌ها و زمان‌های جوشکاری بالاتر گرمای بیشتری تولید می‌شود، اما به دلیل وجود اثر متقابل بین پارامترها کوچک شدن قطر دکمه جوش رخ می‌دهد.
- ۴- در تحقیق انجام شده حداکثر قطر دکمه جوش در جریان‌های بین ۱۰ تا ۱۱ کیلوآمپر و در زمان متوسط جوشکاری ۹ سیکل در فشار ۲/۵ بار به دست آمد.

۵. مراجع

[۱] نورالسنا، رسول، طراحی و تحلیل آزمایش‌ها، مرکز نشر دانشگاه علم و صنعت، تهران، ۱۳۸۶.

- [2] Chao, Y.j. "Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, or combined Tensile/Shear Loads ", Journal of Engineering Materials and Technology , 125, 125-133, 2003.
- [3] Cho, Y., Li, W., Hu, S. J. "Design of Experiment Analysis and Weld Lobe Estimation for Aluminum Resistance Spot Welding", Welding Journal, 45s-51s, 2006.
- [4] Han, M., Byeong, K.M., Lee, H., Kim, C. S., Kim, D. H., Park, Y. "Strength Characteristics on Resistance Spot Welding of Al Alloy Sheets by Taguchi Method", International Journal of Modern Physics, 20, 4297-4320, 2006.
- [5] Khuri, A., Cornell, J. P. Response Surfaces Design and Analysis, Marcel Dekker, 2nd edition, New York, 1996.
- [6] Lin, L., Chou, T., Chou, C. P. "Modeling and optimization of the Resistance Spot Welding Process via a Taguchi-Neural Approach in The Automobile Industry", Volume, 222, 1385-1393, 2008.
- [7] Luo, Y. I., Ye, Hong., Zhi, Cheng., Xiong, Lin., Xu, M. " Resistance Spot Welding Process of Galvanized Steel Sheet Based on Regression Modeling", Journal of Material Science Forum, 610, 681-689, 2009.
- [8] Pouranvari, M., Asgari, H., Marashi, P., Goodarzi, M." Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds", Journal of Science and Technology of Welding and Joining, 2, 223-231, 2003.
- [9] Recommended practices for test methods and evaluation the resistance spot welding behavior of automotive sheet steels. ANSI/AWS/SAE/D8.9-97, 1997.