

**بررسی تأثیر فیلم در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک سوپر آلیاژ Hastelloy X\***

(یادداشت پژوهشی)

محسن حامدی<sup>(۲)</sup>مهدی آتش‌پروا<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در این مقاله ابتدا یک رابطه جدید برای محاسبه مقاومت الکتریکی ناشی از فشردگی جریان و حضور فیلم‌های سطحی بر روی ورق‌ها در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک ارائه شده است. سپس شبیه‌سازی با استفاده از مدل جدید انجام شده و اعتبار آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تصدیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی پس از ساخت *Set-up* آزمایش‌های عملی بر روی ورق‌هایی از جنس Hastelloy X انجام پذیرفت و مشخص گردید که قطر دکمه جوش حاصل از آزمایش‌ها دارای سازگاری خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد. بیشترین میانگین قطر جوش در صورت وجود لایه نازک فیلم به وجود می‌آید. همچنین وجود فیلم استحکام کششی را بهبود می‌دهد. ارتفاع دکمه جوش در صورت وجود فیلم ضخیم بیشینه می‌باشد که به دلیل رخداد بیرون‌زدگی است.

**واژه‌های کلیدی** جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک، مقاومت فیلم، مقاومت تماسی، Hastelloy X.

**Investigating the Effect of Film in SSRSW of Hastelloy X Superalloy**

M. Atashparva

M. Hamedi

**Abstract** At this paper, a new equation has been presented to calculate the electrical resistance caused by constriction and presence of surface films on the sheets in small scale resistance spot welding. Then, the simulations have been conducted using the new model and its validity has been evaluated. Experimental verification was carried out on sheets made of Hastelloy X and it was found that the experimental nugget diameters have a good agreement with the results of the simulation. The maximum nugget diameter was created in the case of thin film. Also, existence of film layer improves tensile strength. At the presence of thick film the height of the weld is maximum that can be due to expulsion.

**Key Words** Small Scale Resistance Spot Welding; Film resistance; Contact resistance; Hastelloy X.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۲/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱/۱۵ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.63369

(۱) نویسنده مسئول: دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران. m\_atashparva@ut.ac.ir

(۲) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.

## مقدمه

جریان از چنین سطحی توسط هدایت از طریق فیلم‌ها و نقاط تماس مستقیم فلز با فلز انجام می‌شود و در نتیجه یک مقاومت در مقابل عبور جریان وجود خواهد داشت، بنابراین می‌توان گفت مقاومت تماسی خود از دو جزء تشکیل شده است: مقاومت انقباضی ( $R_s$ ) ناشی از فشردگی جریان در زیر نواحی تماسی و مقاومتی که به واسطه فیلم‌های سطحی با رسانایی کمتر ایجاد می‌شود ( $R_f$ ).

$$R_c = R_s + R_f \quad (۳)$$

در زمینه مقاومت انقباضی مدل‌های گوناگونی ارائه شده است که توضیحات و مقایسه آنها توسط حامدی و آتش پروا [2] انجام پذیرفته است، اما در مورد مقاومت فیلم تحقیقات چندانی انجام نشده است. در میان حدود پانزده مدلی که تاکنون برای محاسبه مقاومت تماسی ارائه شده‌اند، فقط سه مدل وجود دارند که علاوه بر مقاومت انقباضی، مقاومت فیلم را نیز مدل‌سازی نموده‌اند که به بیان آنها می‌پردازیم.

برای لایه‌های نازک گازها یا روغن با ضخامت تقریبی یک مولکول (حدود ۳۰ آنگستروم یا کمتر)، مقاومت فیلم می‌تواند توسط رابطه زیر محاسبه شود [3]:

$$R_f = \gamma / A_a \quad (۴)$$

که  $A_a$  سطح تماس و  $\gamma$  مقاومت فیلم به ازای واحد سطح است که بستگی به ضخامت فیلم و انرژی خروج الکترون ماده مورد نظر دارد. برای فیلم‌های ضخیم که توسط تغییر شکل پلاستیک تحت بار وارد شده تخریب می‌شوند، مقاومت فیلم بستگی به کل زیر نواحی به جای کل ناحیه تماسی خواهد داشت [3].

در تئوری کلاسیک هنگامی که یک فیلم عایق روی سطح فلزی وجود دارد، الکترون‌ها قادر نیستند از فیلم

جوشکاری مقاومتی یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای الکتریکی است که در صنایع استفاده می‌شود. جوش، توسط ترکیب حرارت، فشار و زمان ایجاد می‌گردد. قطعه‌کارها توسط دو الکتروود فشرده می‌شوند تا با اعمال نیرو، فیلم یا اکسیدهای روی سطوح تماس شکسته شود و یک اتصال مناسب تولید گردد. علاوه بر کاربردهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقیاس بزرگ، علاقه به جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک نیز به دلیل نیاز به کوچک‌سازی در صنایع شدت گرفته است. کاربرد این نوع از جوشکاری در وسایل الکترونیکی خودرو، اجزای ارتباط از راه دور و محصولات پزشکی می‌باشد. در این فرایند، حرارت لازم به خاطر مقاومت الکتریکی در برابر عبور جریان ایجاد می‌شود. مطابق با قانون ژول این حرارت ( $q$ ) از رابطه (۱) به دست می‌آید [1]:

$$q = R_t I^2 t \quad (۱)$$

که  $I$  شدت جریان،  $R_t$  مقاومت الکتریکی کل و  $t$  زمان عبور جریان است. مقاومت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_t = R_b + R_c \quad (۲)$$

که در آن  $R_b$  مقاومت جسمی مواد و  $R_c$  مقاومت تماسی می‌باشند. مقاومت جسمی از رابطه معروف  $\rho l/A$  قابل محاسبه است؛ ولی مقاومت تماسی نیاز به بحث و بررسی بیشتری دارد. از آنجاکه سطوح کاملاً صاف نیست و دارای زبری‌های بسیار کوچک می‌باشد، تماس مستقیم واقعی بین سطوح فقط در تعداد محدودی از نقاط اتفاق می‌افتد. همچنین همه فلزات دارای اکسیدهایی با هدایت حرارتی پایین هستند و سطوح کاملاً تمیز در واقعیت وجود ندارند. عبور

تأثیر مقاومت‌های فیلم و انقباضی را روی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مراحل گرم‌شدن، ذوب‌شدن، خنک‌شدن و فشردگی بررسی کرده‌است.

لی و همکاران [9] عنوان کردند که مقادیر مقاومت استاتیک اندازه‌گیری شده اکثراً تأثیر فیلم را نشان می‌دهد که ممکن است اندازه آن بزرگ‌تر از مقاومت انقباضی باشد و به شرایط سطحی، فشار و دما حساس باشد. جریان جوشکاری در چند سیکل اول فیلم‌های سطحی را می‌شکند و مقاومت فیلم در مقایسه با مقاومت انقباضی ناچیز می‌شود.

وان و همکاران [10] مطالعه‌ای با هدف توسعه یک سیستم کنترل کیفیت مؤثر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک براساس مقاومت دینامیک انجام دادند و متوجه شدند که تغییرات مقاومت دینامیک با فرایند شکل‌گیری دکمه جوش مرتبط است.

### تحلیل تئوری

چنانچه تعداد نقاط تماسی زیاد باشد، می‌توان مقاومت انقباضی را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد [3]:

$$R_s = \rho / 2\tau \quad (7)$$

که  $\rho$  مقاومت ویژه الکتریکی است و شعاع هالم ( $\tau$ ) می‌تواند با استفاده از سطحی که بار را تحمل می‌کند ( $A_b$ ) به دست آید:

$$\tau = \sqrt{A_b / \pi} \quad (8)$$

این فرض صحیح است، زیرا هنگامی که بار تا حد نهایی خود افزایش می‌یابد، تعداد نقاط تماسی زیاد خواهند شد تا این که سرانجام به یکدیگر پیوسته می‌شوند و یک ناحیه واحد را تشکیل می‌دهند. همچنین در این حالت در برجستگی‌های تماسی تسلیم رخ خواهد داد. ناحیه تحمل‌کننده بار توسط رابطه زیر

عبور کنند، اما مطابق با فیزیک کوانتوم هنگامی که ضخامت فیلم با مسیر آزاد متوسط الکترون فلزات در دمای اتاق قابل مقایسه باشد؛ یعنی در محدوده  $\text{\AA}$  5000-50، الکترون‌ها ممکن است بتوانند توسط اثر تونلی از فیلم عبور کنند [4]. در این موارد مقاومت فیلم می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [3, 4]:

$$R_f = \rho_f \xi H / F \quad (5)$$

که  $\rho_f$  مقاومت فیلم به‌ازای سطح واحد است و مقاومت ویژه تونلی نامیده می‌شود [4]. همچنین  $H$  سختی،  $F$  نیروی فشاری و  $\xi$  ضریب فشار هستند که مقدار ضریب فشار اغلب  $0.7$  در نظر گرفته می‌شود.

همچنین مقاومت فیلم در سطح تداخل می‌تواند توسط رابطه (6) بیان گردد که در آن  $\rho_f$  مقاومت ویژه لایه فیلم،  $a$  شعاع مؤثر نقطه تماس،  $H_v$  سختی ورق،  $n$  تعداد نقاط تماسی و  $F$  بار می‌باشد [5].

$$R_f = \rho_f S / \pi a^2, \quad a = \sqrt{F / \pi n H_v} \quad (6)$$

در مطالعه نا و پارک [6] مقاومت تماسی به‌عنوان یک المان یک‌بعدی توسط این فرض که فیلم آلودگی در ناحیه تماسی به تعداد قطعه‌هایی با فواصل مساوی خواهد شکست، مدل‌سازی گردید. آنها تأثیر نیروی تماسی روی شکل‌گیری دکمه جوش را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری مقاومت تماسی در ورق آلیاژ آلومینیم توسط کرین و اوانس [7] انجام شد. در این کار تأثیر زبری سطح و ضخامت فیلم بررسی گردید. نتایج در قالب تئوری مقاومت انقباضی هالم برای نقاط تماس فلز به فلز که با حضور فیلم‌های اکسید پوشیده شده بودند، تفسیر گردید. در یک مطالعه دیگر تأثیرات مقاومت تماسی موضعی روی متغیرهای فرایند، نرخ خنک‌شدن، توزیع محلول جامد و شکل دکمه جوش بعد از انجماد توسط وی و وو بررسی شد [8]. این کار

### شبیه‌سازی کامپیوتری

در شبیه‌سازی کار حاضر فرض شده‌است که الکترودها خصوصیات حرکتی کامل دارند به نحوی که یک نیروی الکتروود گسترده ثابت و یکنواخت می‌تواند به‌عنوان شرایط مرزی مکانیکی استفاده شود. همچنین در تحلیل مکانیکی مواد همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. تغییر فاز از حالت جامد به مایع فقط برای ورق‌ها در نظر گرفته شده‌است که این پدیده در صورتی که هر نقطه از ورق به دمای  $1618\text{ K}$ ، که دمای ذوب Hastelloy X است، برسد در همان محل رخ خواهد داد. مقدار دمای نهان ذوب نیز  $310\text{ kJ/kg}$  در نظر گرفته شده‌است. نوع جریان الکتریکی اعمال‌شده جریان مستقیم (DC) می‌باشد.

شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده‌است. کلیه معادلات موجود در مدل شبیه‌سازی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول معادلاتی هستند که به‌عنوان ورودی به شبیه‌سازی داده خواهند شد. برای مثال می‌توان به معادلات به‌دست‌آمده توسط مؤلفان اشاره کرد که برای محاسبه مقاومت تماسی و کلیه ویژگی‌های مواد برای ورق‌ها و الکترودها، به‌صورت معادلات وابسته به دما در شبیه‌سازی لحاظ می‌شوند. تمامی این گروه از معادلات به‌صورت توابع تحلیلی به شبیه‌سازی اعمال می‌شوند، اما گروه دوم معادلات دیفرانسیلی هستند که در حین شبیه‌سازی و مابین ماژول‌های مختلف شبیه‌سازی وجود دارند. برای مثال می‌توان به معادله میدان الکتریکی برحسب پتانسیل الکتریکی، توزیع میدان حرارت گذرا و کلیه معادلات انتقال حرارت (رسانش و جابه‌جایی) اشاره کرد. این گروه از معادلات در برنامه COMSOL با استفاده از روش تکرار شونده نوع نیوتونی حل می‌شوند. گام زمانی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر  $2\text{ ms}$  است و نتیجه حل معادلات هر ماژول پس از به‌روزرسانی در

به مقدار بار اعمالی و تنش تسلیم ماده ( $\sigma_y$ ) مرتبط خواهد شد:

$$A_b = F/\sigma_y \quad (9)$$

با ترکیب رابطه‌های (۷-۹) می‌توان مقاومت انقباضی را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$R_s = \rho \sqrt{\pi \sigma_y / 4F} \quad (10)$$

بدیهی است که  $F$  مقدار حداکثر بار است؛ زیرا مقاومت انقباضی زمانی به‌وجود می‌آید که جریان از قطعه‌ها عبور کند، که در این زمان مقدار نیروی اعمالی از سوی الکترودها به حداکثر مقدار خود رسیده‌است. البته در این رابطه تنش تسلیم می‌تواند به‌صورت تابعی از دما بیان گردد.

برای یک سطح واقعی یک ترم مقاومت دیگر نیز لازم است که ناشی از حضور فیلم سطحی می‌باشد (رابطه ۳). برای سادگی فرض می‌شود تأثیر فشار روی مقاومت فیلم همانند تأثیر آن بر مقاومت انقباضی است. پس می‌توان فرض کرد:

$$R_f = \frac{\rho_f}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma_y}{F}} \quad (11)$$

در عمل تنش تسلیم با افزایش دما کاهش می‌یابد و مقاومت فیلم نیز چنین رفتاری دارد. بنابراین در این مدل رابطه بین مقاومت فیلم و دما به‌صورت کیفی صحیح است. در مدل مقاومت تماسی در شبیه‌سازی با هدف کاربردهای عملی مطلوب است که تعداد پارامترهای ورودی را در صورتی که بتوان دقت را در حد معقولی حفظ نمود حتی‌الامکان کم کرد. این یکی از دلایلی است که در هر دو جزء مقاومت تماسی تأثیر فشار نرمال به‌صورت یکسان در نظر گرفته شده‌است، اگرچه این عمل نیاز به اعتبارسنجی تجربی دارد.

شده است (مجموع روابط ۱۰ و ۱۱) که  $\rho_f$ ،  $\rho$  و  $\sigma_y$  هر یک به صورت تابعی از دما به مدل داده خواهند شد. در ابتدا سیکل فشردگی توسط تحلیل مکانیکی مدل می‌شود. فشار توزیعی یکنواخت مطابق با نیروی الکتروود مشخص شده محاسبه می‌شود و بر روی الکتروود بالایی اعمال می‌گردد، در حالی که کف الکتروود پایینی از حرکت در جهت عمودی منع شده است. خروجی تحلیل این بلوک که شامل تغییر شکل، فشار تماسی، شعاع تماس، مقدار نفوذ و غیره می‌باشد به تحلیل الکتریکی - حرارتی داده می‌شود که در آن جریان جوشکاری اعمال می‌گردد. پتانسیل الکتریکی صفر به کف الکتروود پایینی اعمال می‌شود و توزیع چگالی جریان از مقدار جریان ورودی اعمال شده به بالای الکتروود فوقانی محاسبه می‌شود. همه سطوح آزاد الکتروود و ورق که در این بازه زمانی در تماس نیستند، دارای انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد با هوای اطراف می‌باشند. پس از اعمال شرایط مرزی الکتریکی، توزیع حرارت که از تحلیل الکتریکی - حرارتی فوق برای یک گام زمانی مشخص محاسبه شده است به عنوان شرایط بارگذاری حرارتی برای بخش تحلیل حرارتی - مکانیکی بعدی اعمال می‌شود. تغییر شکل الکتروود ورق‌ها و تغییر وضعیت تماس در پایان هر تحلیل حرارتی - مکانیکی افزایشی به عنوان ورودی به مرحله بعدی تحلیل الکتریکی - حرارتی داده می‌شود. این روش به روزرسانی برای یک بازه زمانی مشخص تکرار می‌شود تا این که کل سیکل جوشکاری تکمیل شود.

در شکل (۱) توزیع حرارت ناحیه جوش در زمان ۶۰ ms با استفاده از نیروی ۱۵ N و جریان ۳۷۲ A دیده می‌شود. شکل (۲) نیز مقطع برش خورده بین دو ورق را در وسط الکتروودها نشان می‌دهد که نحوه رشد منطقه مذاب در آن مشخص می‌باشد.

هر گام زمانی به ماژول بعدی انتقال می‌یابد. ماژول‌های اصلی شامل مکانیکی، الکتریکی و انتقال حرارت می‌باشند که هر یک دارای زیربخش‌های گوناگون هستند. در کل باید گفت که مدل مقاومت تماسی جدیدی که در این مطالعه ارائه شده است یک مدل تحلیلی است. سپس این مدل تحلیلی توسط شبیه‌سازی عددی اعتبارسنجی می‌شود و در پایان نتایج آن با روش تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

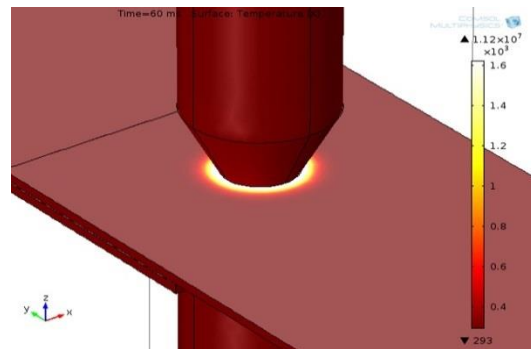
المان‌های انتخاب شده برای مش‌بندی مدل ترکیبی از دو نوع چهارضلعی و مثلثی می‌باشند و تعداد آنها ۳۹۲۷۱ عدد از نوع چهارضلعی و ۲۱۰۳۵ عدد از نوع سه‌گوش می‌باشد. همچنین مدل از ۱۱۱۵ عدد المان لبه‌ای یا ضلعی و ۴۸ عدد المان از نوع رأس یا نقطه‌ای برای مش‌بندی استفاده کرده است.

ابعاد ورق‌ها ۳۸×۱۵ mm است و دارای ضخامت ۰/۴ mm می‌باشند. همچنین از الکتروودهای نوک مخروطی با قطر قسمت استوانه‌ای ۶ mm، قطر نوک الکتروود ۳ mm و طول ۲۸ mm استفاده شده است. جنس الکتروودها از آلیاژ مس مطابق با استاندارد RWMA Class 2 می‌باشد.

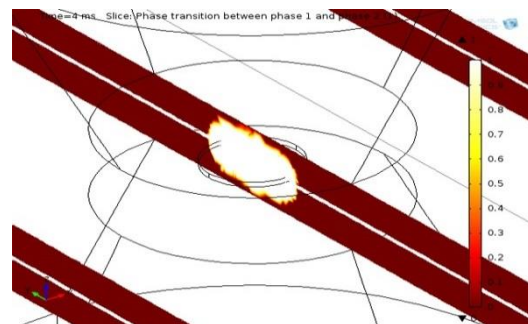
فرایند شبیه‌سازی حاضر تمامی پارامترهای مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و همچنین اثرات متقابل آنها از جمله انبساط حرارتی، گرمایش الکترومغناطیسی و اثرات ترموالکتریک را در نظر می‌گیرد. همچنین لایه فیلم روی ورق‌ها نیز مدل‌سازی شده است. برخلاف LRSW به علت ابعاد کوچک الکتروود در SSRSW آب برای خنک کردن الکتروودها استفاده نمی‌شود. مقدار نیروی اعمالی به الکتروود فوقانی در سه مقدار ۱۵/۴۱، ۲۳/۱۱ و ۳۰/۸۲ نیوتن روبه‌پایین قابل تنظیم است و شدت جریان می‌تواند ۲۸۲، ۳۲۷ و یا ۳۷۲ آمپر باشد که این مقادیر با استفاده از انجام آزمایش‌های عملی به دست آمده‌اند. مقاومت تماسی بین دو ورق با استفاده از رابطه به دست آمده در بخش تحلیل تئوری اعمال

دارد. شکل (۳) شبیه‌سازی مدل جدید را با نیروی N ۱۰۰ و در زمان ۴۰ ms به‌عنوان یک نمونه نشان می‌دهد. قطر جوش در حدود ۱/۱ mm است که دقیقاً با نتایج [11] هم‌خوانی دارد.

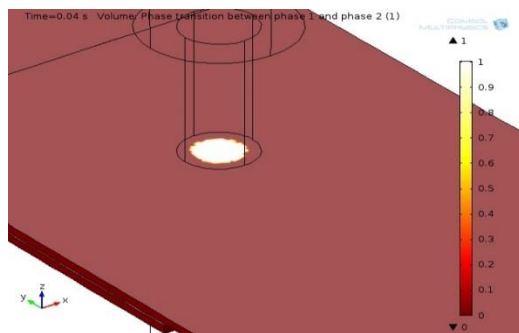
در مرحله بعد کل شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل پیش‌فرض برنامه COMSOL برای مقاومت الکتریکی تماسی، تکرار می‌گردد. قطر دکمه جوش از منطقه تماسی بین دو ورق در هر دو حالت (مدل پیش‌فرض و مدل جدید ارائه‌شده در این تحقیق) برای تمامی مقادیر نیرو، جریان و زمان اندازه‌گیری می‌گردد که یک نمونه از نتایج آنها در نمودار شکل (۴) قابل مشاهده است.



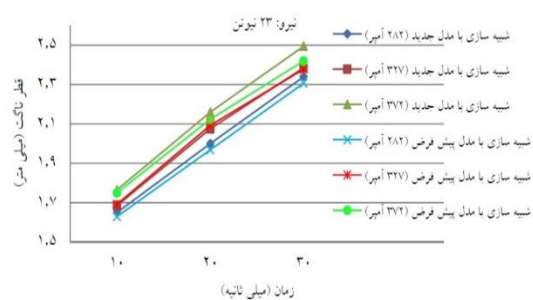
شکل ۱ توزیع حرارت ناحیه جوش (۶۰ ms، ۳۷۲ A و ۱۵ N)



شکل ۲ مقطع برش خورده بین دو ورق در وسط الکترودها (۴ ms، ۳۷۲ A و ۱۵ N)



شکل ۳ شبیه‌سازی مدل جدید، قطر دکمه جوش ۱/۱ mm (۴۰ ms، ۱۰۰۰ A و ۱۰۰ N)



شکل ۴ مقایسه قطر دکمه جوش حاصل از شبیه‌سازی با مدل پیش‌فرض نرم‌افزار و مدل جدید برای سطوح مختلف نیرو، جریان و زمان جوشکاری

از این نمودارها مشخص است که روند تغییرات هر دو مدل تقریباً یکسان است و نتایج عددی به‌دست آمده برای قطر دکمه جوش بسیار به هم نزدیک

اعتبارسنجی مدل. پس از شبیه‌سازی با استفاده از رابطه تماسی جدید، زمان آن فرا می‌رسد که مدل توسط یک منبع دیگر اعتبارسنجی شود. به این خاطر با استفاده از اطلاعات موجود در مرجع [11] مدل شبیه‌سازی می‌شود و کارایی مدل جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مرجع [11] از ورق‌هایی با جنس فولاد نرم با ضخامت ۰/۲ mm استفاده شده است. نوع الکترودها RWMA Class 2 پله‌ای سرتخت با قطر ۳/۲ mm و قطر نوک الکترودها ۱/۵۸ mm می‌باشد. مقدار نیرو دارای سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتن است و شدت جریان ۱۰۰۰ آمپر است. قطر جوش در حالت‌های مختلف ارزیابی گردیده است. نتایج حاصل از مدل جدید سازگاری خوبی با نتایج مرجع [11] دارد. همچنین زمان شروع ذوب در مرجع [11] برای نیروهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۴۲ میلی‌ثانیه است که با نتایج حاصل از مدل جدید تطابق

### آزمایش‌های تجربی

دستگاه‌های جوشکاری مقیاس کوچک در کشور ما وجود ندارند و خرید تجهیزات آنها بسیار گران‌قیمت است. از طرفی منبع تغذیه‌های جوشکاری صنعتی انعطاف‌پذیری لازم برای تحقیقات کنترل RSW را ندارند؛ لذا ساخت یک Set-up برای انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر ضروری است. به‌منظور کاهش هزینه‌ها، تصمیم بر آن شد که به‌جای استفاده از رکتیفایر یا اینورتر برای یکسو سازی جریان، مستقیماً از یک باتری با جریان مستقیم استفاده گردد. هنگامی باید به این امر توجه شود که جریان جوشکاری از طریق الکتروود به قطعه‌کارها جریان می‌یابد، منطقی است که اندازه نوک الکتروود، اندازه جوش مقاومتی نقطه‌ای را کنترل نماید. قطر الکتروود که در اینجا مورد بحث می‌باشد به قطر نوک الکتروود در نقطه تماس با ورق برمی‌گردد، نه به قطر اصلی کل نوک الکتروود. رابطه‌ای که عموماً استفاده می‌شود به‌صورت زیر است [12]:

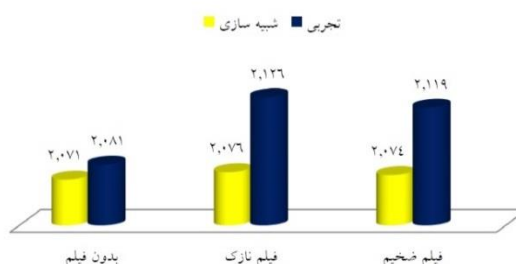
$$d_e = 5\sqrt{T} \quad (12)$$

که در آن  $T$  ضخامت ورق و  $d_e$  قطر نوک الکتروود می‌باشد. با استفاده از رابطه (12) مقدار  $3/16$  mm برای قطر نوک الکتروود به‌دست می‌آید. الکتروود فوقانی روی سر رزوه‌شده پیستون و الکتروود تحتانی روی کفی نصب می‌شوند. پس از نصب تجهیزات مکانیکی، Set-up تراز شده و از هم‌راستایی الکتروودها اطمینان حاصل شده‌است. تصویر Set-up نهایی در شکل (6) قابل مشاهده است. برای کنترل زمان رفت و برگشت پیستون از شیر برقی - پنوماتیک استفاده شده‌است. کنترل فشار (نیرو) توسط رگولاتوری که بر روی خروجی کمپرسور نصب شده‌است، انجام می‌گیرد. مدار برقی مربوط به سیلندر پنوماتیک دارای بخش‌های منبع تغذیه، PLC، شیر برقی - پنوماتیک و شستی می‌باشد.

است. نکته قابل ذکر این است که در اکثر موارد مدل جدید قطر دکمه جوش را کمی بیشتر از مدل پیش‌فرض برنامه پیش‌بینی می‌کند. طبق نتایج شبیه‌سازی قطر دکمه جوش با افزایش جریان و زمان جوشکاری افزایش پیدا می‌کند و با افزایش نیرو مقدار آن کاهش می‌یابد. سایر مقایسه‌ها و تحلیل نتایج پس از انجام آزمایش‌های تجربی ارائه خواهد شد.

**بررسی تأثیر فیلم.** تأثیر ضخامت لایه فیلم برای سه حالت بدون فیلم، فیلم نازک با ضخامت  $1 \mu\text{m}$  و فیلم ضخیم با ضخامت  $10 \mu\text{m}$  شبیه‌سازی شده‌است. اندازه‌گیری قطر دکمه جوش در سطح بین دو ورق و به‌صورت میانگین قطرهای افقی و عمودی برای هر جوش انجام پذیرفته‌است. نمودارهای بررسی تأثیر ضخامت فیلم بر نتایج شبیه‌سازی قطر دکمه جوش برای سه سطح نیرو، سه سطح جریان و سه سطح زمان مشخص می‌کند که در حالت‌های گوناگون اثر ضخامت فیلم متفاوت است و در برخی از مواقع باعث افزایش قطر دکمه جوش و در برخی دیگر از مواقع باعث کاهش قطر آن شده‌است؛ اما در مجموع نتایج بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. به‌همین خاطر در شکل (5) تأثیر ضخامت فیلم بر میانگین قطر دکمه جوش ترسیم شده‌است که نشان‌دهنده این واقعیت است که میانگین قطرهای حاصل از شبیه‌سازی بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. اگرچه بیشترین میانگین قطر دکمه جوش در حضور لایه فیلم نازک به‌دست آمده‌است؛ اما به‌نظر می‌رسد بررسی تأثیر فیلم نیاز به مطالعات تجربی بیشتر دارد.

فقط میانگین قطر دکمه جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها (میلی‌متر)



شکل 5 تأثیر ضخامت فیلم بر میانگین قطر دکمه جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها



(۱) آنالیز شیمیایی Hastelloy X مشاهده می شود.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی Hastelloy X (درصد وزنی)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
۴۷	۲۲	۱۸	۹	۱/۵	۰/۶	۰/۱	۱*	۱*	۰/۰۰۸*

\* حداکثر

به منظور اندازه گیری پارامترها از دو مولتی متر به صورت هم زمان برای اندازه گیری مقاومت تماسی و شدت جریان استفاده شده است. این دستگاه همچنین قادر است اختلاف پتانسیل بین دو نقطه را اندازه گیری نماید. یک خروجی دیگر (غیر از خروجی شیر پنوماتیک) در برنامه نویسی PLC تعریف می گردد که این خروجی توسط رله ای که در مسیر آن قرار می گیرد به یک استارتر خودرو فرمان می دهد و استارتر در زمان مشخص شده در برنامه PLC جریان الکتریکی را قطع و وصل می کند. زمانی پس از قطع جریان عمل جدا شدن الکترو از ورق بالایی انجام می پذیرد که این زمان قابل تنظیم است.

برای بررسی تأثیر لایه فیلم و اکسید بر روی قطعه ها، نمونه ها به سه گروه تقسیم می شوند؛ نمونه های تمیز (بدون فیلم)، نمونه هایی با فیلم نازک و نمونه هایی با فیلم ضخیم که ایجاد لایه فیلم توسط قرار دادن نمونه ها در آب جوش به مدت ۵ دقیقه برای فیلم نازک و ۴۰ دقیقه برای فیلم ضخیم صورت پذیرفته است. برای تحلیل نتایج قطر و ارتفاع دکمه جوش اندازه گیری می شود. فرایند آزمایش کشش - برش برای دستیابی به حداکثر باری که قطعه ها می توانند تحمل نمایند نیز با استفاده از دستگاه کشش Universal شرکت Gotech انجام می پذیرد. نمودار تنش - کرنش برای هر یک از نمونه ها ترسیم می شود و همچنین مقادیر تنش تسلیم، بیشترین بار، مقاومت کششی و افزایش طول در هر یک از حالت ها مشخص می گردد.



شکل ۶ Set-up ساخته شده و اجزای آن

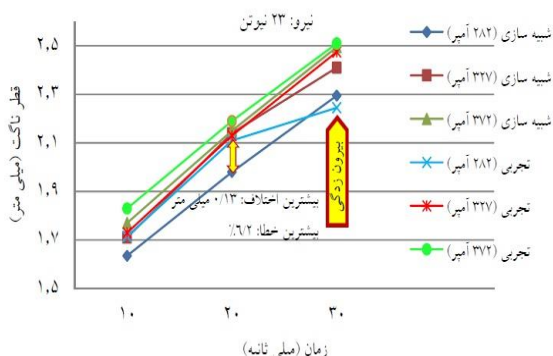
با استفاده از باتری خودرو موفق شدیم جوش با استحکام مناسب را ایجاد نماییم. برای رفع مشکل تخلیه باتری و همچنین کاهش جریان آن و جلوگیری از عدم توانایی کنترل جریان، باتری به یک شارژر متصل می گردد که یک جریان DC پشت باتری ایجاد می کند و دارای ۳ سطح جریان گوناگون می باشد که با زدن کلیدهای آن می توان از جریان خود باتری، جریان متوسط و یا جریان بیشینه استفاده نمود. وظیفه تبدیل جریان برق شهر به جریان DC برای تغذیه باتری نیز به عهده همین دستگاه می باشد. فرکانس دستگاه ۵۰ Hz است و ولتاژ خروجی آن ۱۲ V می باشد.

آلیاژ Hastelloy X که برای استفاده در آزمایش ها در نظر گرفته شده است یک آلیاژ نیکل - کروم است که دارای ترکیبی استثنائی از مقاومت در برابر اکسیداسیون، قابلیت ساخت و مقاومت در دمای بالا می باشد. این آلیاژ کاربرد وسیعی در موتورهای توربین گازی برای اجزای قسمت محفظه احتراق دارد. برای مثال می توان به کانال های انتقال، قوطی محفظه احتراق، میله اسپری و نگه دارنده های شعله اشاره کرد. همچنین در انژکتور سوخت در موتور توربین و لوله خارج کننده دود شعله کاربرد دارد. این آلیاژ برای استفاده در کوره های صنعتی به دلیل مقاومت اکسیداسیون خارق العاده آن در فشارهای کم و معمولی پیشنهاد می گردد. در جدول



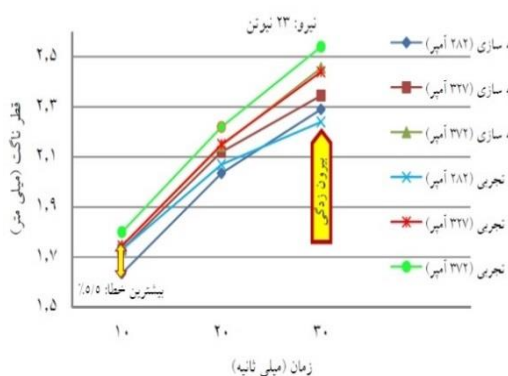
### نتایج و بحث

شکل (۷) نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها را با در نظر گرفتن لایه فیلم به ضخامت  $1 \mu\text{m}$  برای قطر دکمه جوش در نیروی  $23 \text{ N}$  مقایسه می‌کند. بررسی نمودارهای مشابه در سایر نیروها نشان می‌دهد که هر چند نتایج نزدیک هستند، اما مقدار اختلاف در قطر دکمه جوش از حالت‌های مشابه برای نمونه‌های بدون فیلم بیشتر است. تأثیر کلی پارامترها همانند قبل است، یعنی افزایش زمان و جریان باعث افزایش قطر دکمه جوش می‌شود و افزایش نیرو قطر دکمه جوش را کاهش می‌دهد. در برخی موارد پدیده بیرون‌زدگی باعث تغییر روند نمودارهای مرتبط با آزمایش‌ها می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای قطر دکمه جوش با در نظر گرفتن لایه نازک فیلم و در جریان‌های گوناگون مشخص می‌کند که نتایج بسیار نزدیک است و بیرون‌زدگی در جریان  $282 \text{ A}$  و زمان  $30 \text{ ms}$  برای نیروهای  $23 \text{ N}$  و  $31 \text{ N}$  رخ می‌دهد. همچنین تأثیر تغییرات جریان و نیرو برای زمان‌های  $10$ ،  $20$  و  $30 \text{ ms}$  با وجود لایه فیلم  $1 \mu\text{m}$  بررسی می‌گردد. در کل بیشترین اختلاف در قطر دکمه جوش پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به نیروی  $23 \text{ N}$ ، جریان  $282 \text{ A}$  و زمان  $20 \text{ ms}$  می‌باشد که مقدار آن  $0.13 \text{ mm}$  است. بیشترین درصد خطا نیز مربوط به همین مورد و به مقدار  $6.6\%$  است که نشان می‌دهد مدل شبیه‌سازی جدید به خوبی قادر به پیش‌بینی قطر دکمه جوش با وجود لایه فیلم بر روی نمونه‌ها می‌باشد. میانگین درصد خطا برای حالت فیلم نازک  $2.7\%$  است که نسبت به حالت بدون فیلم  $1.6\%$  افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش خطا می‌تواند به دلیل تفاوت ترکیبات فیلم در شبیه‌سازی و آزمایش و همچنین عملکرد غیرقابل پیش‌بینی فیلم و عدم یکنواختی فیلم توزیع شده بر روی نمونه‌ها باشد.



شکل ۷ قطر دکمه جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی  $23 \text{ N}$  نیوتن با لایه فیلم به ضخامت  $1 \mu\text{m}$

شکل (۸) مربوط است به نتایج قطر دکمه جوش که از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی  $23 \text{ N}$  و با وجود لایه فیلم با ضخامت  $10 \mu\text{m}$  به دست آمده است. با توجه به نمودارهای مشابه در سایر نیروها می‌توان گفت تأثیر پارامترها و روند نمودارها همانند موارد قبلی است. نمودارهای مشابه برای جریان‌ها و زمان‌های گوناگون بیانگر وقوع بیرون‌زدگی در جریان  $282 \text{ A}$  و زمان  $30 \text{ ms}$  در نیروهای  $23 \text{ N}$  و  $31 \text{ N}$  می‌باشد.



شکل ۸ قطر دکمه جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی  $23 \text{ N}$  نیوتن با لایه فیلم به ضخامت  $10 \mu\text{m}$

در مجموع تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی در حالت وجود فیلم ضخیم نیز زیاد نیست و سازگاری خوبی قابل مشاهده است. به لحاظ آماری بیشترین تفاوت قطر دکمه جوش بین شبیه‌سازی و آزمایش‌ها

۹ مورد) قطر حاصل از لایه فیلم نازک دارای بیشترین مقدار می باشد.

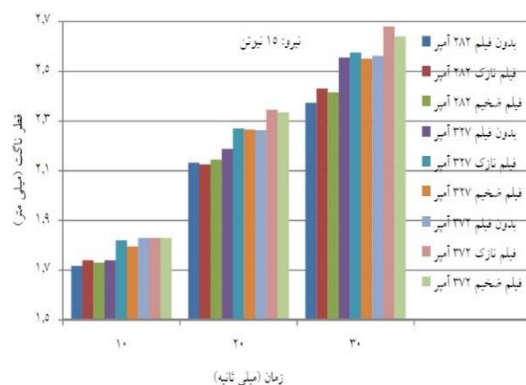
دلیل رفتار متفاوت لایه های فیلم را می توان به این صورت تفسیر نمود که در نیروی کم لایه فیلم نازک باعث ایجاد گرمای بیشتری می شود. در حالی که لایه ضخیم فیلم به دلیل خاصیت عایق بودن، در عبور جریان الکتریکی ممانعت به وجود می آورد؛ اما هنگامی که نیرو افزایش می یابد، فشار حاصل از افزایش نیرو باعث بیرون راندن لایه فیلم ضخیم از منطقه تماسی می شود و صرفاً لایه نازکی از فیلم در ناحیه ایجاد حرارت باقی خواهد ماند. در نتیجه لایه فیلم ضخیم دکمه های جوش بزرگ تری ایجاد می کند. سرانجام با رسیدن نیرو به مقدار حداکثر خود نتایج هر سه حالت بسیار به یکدیگر نزدیک می شوند؛ ولی در مجموع لایه نازک فیلم قطره های دکمه جوش بزرگ تری را ایجاد می کند.

تغییرات قطر دکمه جوش برای هر سه حالت مورد بحث در جریان های ثابت بررسی می شود و مشاهده می گردد که در جریان  $282\text{ A}$  در اکثر موارد لایه نازک فیلم بیشترین قطر دکمه جوش را به دست می دهد. در جریان  $327\text{ A}$  نیز به غیر از دو مورد که قطر دکمه جوش بیشینه در لایه ضخیم فیلم به وجود می آید، در هفت مورد دیگر بیشترین قطر با وجود لایه نازک فیلم به دست خواهد آمد؛ اما چنانچه حداکثر جریان مورد استفاده قرار گیرد، در نصف موارد بیشترین قطر با وجود لایه نازک به وجود می آید و در نصف دیگر موارد با وجود لایه ضخیم. احتمالاً جریان های کم و متوسط، قدرت و چگالی جریان لازم برای شکستن لایه های فیلم ضخیم را ندارد؛ ولی این اتفاق در جریان حداکثر رخ می دهد.

نمودار تغییرات قطر دکمه جوش در زمان های  $10$ ،  $20$  و  $30\text{ ms}$  نیز مورد تحلیل قرار می گیرد. در زمان  $10\text{ ms}$  در نصف موارد فیلم نازک و در نصف دیگر موارد فیلم ضخیم قطر دکمه جوش بیشتری به دست می دهد. در زمان  $20\text{ ms}$  در جریان های کم و متوسط،

$0.12\text{ mm}$  است که مربوط به به کارگیری نیروی  $15\text{ N}$ ، جریان  $372\text{ A}$  و زمان  $20\text{ ms}$  است. اما بیشترین درصد خطا به مقدار  $0.5/8\%$  مربوط به نیروی  $23\text{ N}$ ، جریان  $282\text{ A}$  و زمان  $10\text{ ms}$  می باشد. میانگین درصد خطای کل حالت ها برای لایه فیلم ضخیم  $2/5\%$  می باشد که نسبت به لایه فیلم نازک کمی کمتر است.

تغییرات قطر دکمه جوش حاصل از آزمایش در نیروی ثابت  $15\text{ N}$  برای زمان ها و جریان های گوناگون برای هر سه حالت نمونه های بدون فیلم، با فیلم نازک و با فیلم ضخیم در شکل (۹) قابل مشاهده است.



شکل ۹ تغییرات قطر دکمه جوش حاصل از آزمایش در نیروی  $15\text{ N}$  در زمان ها و جریان های گوناگون برای نمونه های بدون فیلم، با فیلم نازک و با فیلم ضخیم

نمودارهای مشابهی برای نیروهای  $23\text{ N}$  و  $31\text{ N}$ ، جریان های گوناگون و زمان های مختلف نیز ترسیم می گردد. در نیروی  $15\text{ N}$  برای یک جریان و زمان مشخص، بیشترین قطر دکمه جوش با وجود لایه نازک فیلم حاصل می شود. همچنین در حالت بدون فیلم کمترین قطر دکمه جوش را خواهیم داشت. در نیروی  $23\text{ N}$  لزوماً اتفاق نیروی  $15\text{ N}$  تکرار نمی شود و در پنج مورد قطر حاصل از لایه ضخیم بیشتر است، در حالی که در سه مورد نیز قطر حاصل از لایه نازک بیشتر می باشد. سرانجام با دقت در نمودار  $F=31\text{ N}$  متوجه می شویم که باز هم در اغلب موارد (۷ مورد از

در نتیجه مقاومت تماسی و در پی آن مقاومت الکتریکی کل را افزایش می‌دهد. با افزایش مقاومت، حرارت ایجاد شده توسط قانون ژول افزایش می‌یابد و منطقه مذاب و در نتیجه قطر دکمه جوش ایجاد شده بزرگ‌تر می‌شود؛ اما با افزایش ضخامت لایه به دلیل مقاومت بالای فیلم عبور جریان از منطقه تماسی سخت‌تر می‌شود و در نتیجه چگالی جریان عبوری از ناحیه تماسی کاهش می‌یابد و حرارت ایجاد شده نسبت به حالت لایه نازک کاهش می‌یابد. در واقع باید گفت برای ضخامت لایه فیلم مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در آن ضخامت حداکثر حرارت تولید خواهد شد.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بار تحمل شده در فرایند کشش در نمونه‌های دارای فیلم، بیشتر از نمونه‌های بدون فیلم است. دلیل این امر افزایش حرارت تولید شده به سبب افزایش مقاومت الکتریکی در حضور فیلم می‌باشد که باعث امتزاج کامل فلز مذاب در ناحیه تماسی بین دو ورق می‌شود. بیشترین ارتفاع دکمه جوش در نمونه‌های دارای فیلم ضخیم مشاهده شده است. این پدیده می‌تواند به دلیل وقوع بیرون زدگی به جهت وجود مقاومت بسیار زیاد در هنگام عبور جریان به وجود آید. در حالتی که لایه فیلم دارای ضخامت کمی است، حرارت ایجاد شده به سبب مقاومت فیلم باعث ذوب سریع تر فلز می‌شود و اعمال نیرو ارتفاع دکمه جوش را کاهش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

پس از ارائه یک مدل جدید برای محاسبه مقاومت الکتریکی تماسی و انجام شبیه‌سازی‌ها، یک Set-up جدید ساخته شد و توسط آن جوش‌های بدون نقص بر روی سوپرآلیاژ Hastelloy X ایجاد گردید. نتایج مشخص کرد که افزایش زمان و جریان باعث افزایش قطر دکمه جوش می‌شود و افزایش نیرو قطر دکمه جوش را کاهش می‌دهد. میانگین درصد خطا برای حالت‌های بدون فیلم، فیلم نازک و فیلم ضخیم

فیلم نازک قطر دکمه جوش بیشتری تولید می‌کند، ولی چنانچه جریان حداکثر باشد، فیلم‌های ضخیم قطر بیشتری به وجود می‌آورند. در زمان طولانی‌تر (30 ms) در جریان کم رفتار نمونه‌ها متفاوت است؛ ولی در جریان‌های متوسط و بالا، حداکثر قطر برای لایه نازک فیلم و حداقل قطر دکمه جوش در نمونه‌های بدون فیلم ایجاد می‌شود.

نمودارهای تغییرات بیشترین بار تحمل شده در آزمایش کشش برای نمونه‌های بدون فیلم و با فیلم برای نیروهای ثابت، جریان‌های ثابت و زمان‌های مشخص تحلیل می‌گردد. در اکثر موارد برای نمونه‌های دارای فیلم، مقدار حداکثر بار بیشتر است. البته در برخی موارد استثناءهایی در زمان‌های طولانی وجود دارد. در مجموع مشخص می‌شود که اگرچه وجود فیلم در زمان‌های کم باعث افزایش استحکام جوش می‌شود؛ اما در زمان‌های طولانی چندان مطلوب نیست. تأثیر ضخامت فیلم بر ارتفاع دکمه جوش با تغییر سایر پارامترها نیز بررسی می‌گردد. به نظر می‌رسد تأثیر فیلم بر ارتفاع دکمه جوش بستگی به شرایط گوناگون دارد و رفتار خاصی قابل مشاهده و یا پیش‌بینی نیست. در برخی موارد افزایش‌های ناگهانی در ارتفاع دکمه جوش دیده می‌شود که عموماً مربوط به حالت لایه فیلم  $10 \mu\text{m}$  است و به دلیل رخداد بیرون زدگی می‌باشد.

میانگین قطر دکمه جوش به دست آمده از آزمایش‌ها در تمامی حالت‌ها (۳ سطح برای هر یک از پارامترهای نیرو، جریان و زمان) برای هر یک از سه حالت بدون فیلم، فیلم نازک و فیلم ضخیم در نمودار شکل (۵) ترسیم شده است. بیشترین قطر دکمه جوش در هنگام استفاده از نمونه‌های دارای لایه فیلم نازک به دست آمده است. قطر دکمه جوش در حالت استفاده از نمونه‌های بدون فیلم کمینه است. دلیل این پدیده قطعاً به علت افزایش حرارت تولید شده ناشی از حضور لایه فیلم است که باعث ایجاد مقاومت فیلم می‌شود و

کمینه است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که برای ضخامت فیلم مقدار بهینه ای وجود دارد که در آن حداکثر حرارت تولید خواهد شد. در زمان های کم وجود فیلم باعث افزایش استحکام جوش می شود؛ اما وجود فیلم در زمان های طولانی چندان مطلوب نیست. بیشترین ارتفاع دکمه جوش در نمونه های دارای لایه فیلم ضخیم مشاهده شده است.

به ترتیب ۱/۱٪، ۲/۷٪ و ۲/۵٪ می باشد که نشان دهنده سازگاری مناسب بین نتایج شبیه سازی و آزمایش ها است. اختلاف ها می تواند به دلیل تفاوت ترکیب فیلم در شبیه سازی و آزمایش و همچنین عملکرد غیر قابل پیش بینی فیلم و عدم یکنواختی فیلم توزیع شده باشد. بیشترین قطر دکمه جوش در هنگام استفاده از نمونه های دارای لایه فیلم نازک به دست می آید. قطر دکمه جوش در حالت استفاده از نمونه های بدون فیلم

### مراجع

1. Kraus, A.D. and Bar-Cohen, A., "A Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment", McGraw-Hill, New York, (1983).
2. Hamed, M. and Atashparva, M., "A Review of Electrical Contact Resistance Modeling in Resistance Spot Welding", *Welding in the World*, Vol. 61(2), pp. 269-290, (2017).
3. Holm, R., "Electric Contacts, Theory and Application", Springer-Verlag, Berlin, 4<sup>th</sup> Edition, (1967).
4. Wagar, H.N., In: "Integrated Device and Connection Technology", Baker, D., et al. (Eds.), *Physical Design of Electronic System*, Vol. 3, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp. 439-499, (1971).
5. Greenwood, I.A., "Temperatures in Spot Welding", *British Welding Journal*, Vol. 8(6), pp. 316-322, (1961).
6. Na, S.J. and Park, S.W., "A Theoretical Study on Electrical and Thermal Response in Resistance Spot Welding", *Welding Journal*, pp. 233-241, (1996).
7. Crinon, E. and Evans, J.T., "The Effect of Surface Roughness, Oxide Film Thickness and Interfacial Sliding on the Electrical Contact Resistance of Aluminium", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 242, pp. 121-128, (1998).
8. Wei, P.S. and Wu, T.H., "Electrical Contact Resistance Effect on Resistance Spot Welding", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 3316-3324, (2012).
9. Li, M.V., Dong, P. and Kimchi, M., "Modeling of Contact Resistance during Resistance Spot Welding", *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Technology in Welding*, pp. 423-434, San Francisco, CA, NIST, (1997).
10. Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., Huang, Y. and Yin, Z., "Weld Quality Monitoring Research in Small Scale Resistance Spot Welding by Dynamic Resistance and Neural Network", *Measurement*, Vol. 99, pp. 120-127, (2017).
11. Chang, B.H. and Zhou, Y., "Numerical Study on the Effect of Electrode Force in Small-scale Resistance Spot Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, pp. 635-641, (2003).
12. Williams, N.T. and Parker, J.D., "Review of Resistance Spot Welding of Steel sheets. Part 1: Modelling and Control of Weld Nugget Formation", *International Materials Reviews*, Vol. 49(2), pp. 45-75, (2004).