



ارزیابی تجربی و عددی تأثیر فاصله زمانی بین نقطه جوش های مقاومتی متوالی بر کیفیت ساختاری اتصالات ورق AA2219

مهدی جعفری وردنجانى*، یعقوب دادگر اصل

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m-jafari@tvu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۵ مهر ۱۴۰۳

پذیرش: ۳ آذر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

فاصله بین جوشی

توزیع حرارت

تحلیل عددی

بازه زمانی بین جوش

کیفیت نهایی اتصالات جوش نقطه‌ای مقاومتی به طور عمده به پارامترهای جریان الکتریکی، نیروی الکترودها، زمان جوشکاری و ضخامت ورق وابسته است. این موارد در صورت ایجاد نقطه جوش‌های متوالی، بسته به نوع جوش، افزایش می‌یابند. پارامترهای جدید شامل فاصله، تعداد نقطه جوش قبلی و زمان بین دو جوش به دلیل تأثیرات تعاملی الکتریکی، حرارتی و مکانیکی نقاط مجاور بر روی یکدیگر ایجاد می‌شوند. در این مقاله تأثیر فاصله زمانی بین دو نقطه جوش بر روی اتصالات نقطه جوش مقاومتی ورق‌های AA-2219 ارزیابی شده است. در همین راستا رفتار متالورژیکی و مکانیکی اتصال نهایی به صورت تجربی و عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل المان محدود برای بررسی جنبه‌های الکتریکی و حرارتی این پدیده برای به دست آوردن تاریخچه و توزیع دمای نقطه جوش نهایی، جهت اعتبارسنجی تجربی استفاده شده است. فاصله زمانی به عنوان متغیر اصلی برای دو قطعه متوالی با فاصله جوش ۵ میلی متر با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ ثانیه انتخاب شده است. بنابراین ریزساختار و استحکام کششی - برشی نقطه جوش نهایی ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که فاصله طولانی‌تر منجر به تغییرات دمای پیش‌گرم، سرعت خنک‌سازی کمی سریع‌تر، استحکام برشی کششی کمتر (۰/۶ درصد)، توزیع نامتقارن منطقه متأثر از حرارت (۱۵ درصد) به دلیل تشدید اثر شار فرعی، قطر و ارتفاع کوچک‌تر دکمه جوش (به ترتیب ۲ و ۳ درصد) شده است؛ در حالی که فاصله زمانی کوتاه‌تر منجر به کاهش اثر شار فرعی، پیش‌گرم نسبی، استحکام کششی بیشتر، پخش متقارن‌تر منطقه متأثر از حرارت و دکمه جوشی بزرگ‌تر شده است.

Experimental and numerical evaluation of the off-time interval effect on the joint quality of AA2219 sheets in successive resistance spot welding

Mehdi Jafari Vardanjani*, Yaghoob Dadgar Asl

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m-jafari@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 6 October 2024

Accepted: 23 November 2024

Keywords:

Weld Spacing

Heat Distribution

Inter-Welding Time Interval

Numerical Analysis

Abstract

The final quality of resistance spot welding joints mainly depends on the electric current, electrode force, welding time and sheet thickness. These parameters will be added in the case of successive spot welds, depending on the weld type. Other parameters including welding distance, number of previous weld spots and time interval between the two spots appear due to electrical, thermal and mechanical interactive effects of adjacent weld nuggets. In this article, the effect of welding time interval has been evaluated on the resistance spot welded joints on AA-2219 sheets. In this regard, the metallurgical and mechanical behavior of the final spot has been analyzed experimentally and numerically. The results of finite element analysis have been considered to investigate the electrical and thermal aspects of this phenomenon to obtain the history and distribution of the final spot temperature, for experimental verification. The welding time interval has been chosen as the main variable for two consecutive spots with a welding distance of 5 mm with values of 0.5, 1 and 1.5 seconds. Therefore, the microstructure and tensile-shear strength of the final weld spot have been evaluated. The results showed that a longer distance leads to changes in preheat temperature, slightly faster cooling rate, lower shear-tensile strength (0.6%), asymmetric distribution of the heat affected zone (15%) due to the intensification of the shunting current, smaller diameter and height of the weld nugget (2% and 3% respectively); while shorter time interval has resulted in reduced shunting current, slight preheat, higher tensile strength, more symmetrical distribution of heat affected zone and larger weld nugget.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Jafari Vardanjani M, Dadgar Asl Y. Experimental and numerical evaluation of the off-time interval effect on the joint quality of AA2219 sheets in successive resistance spot welding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Nov 21;11(9):60-80. doi: 10.22034/ijme.2024.482084.2015 [In Persian]

۱- مقدمه

هنگامی که یک مدار الکتریکی فرعی در کنار جریان اصلی جوشکاری مقاومتی وجود داشته باشد، جریان (شار) فرعی در طول فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی^۱ ظاهر می‌شود. معمولاً این مدار به واسطه وجود نقطه جوش‌های قبلی تشکیل می‌شود. از این رو بخشی از جریان الکتریکی جوشکاری از نقطه جوش‌های قبلی عبور می‌کند. این پدیده به دلیل ایجاد تغییرات در توزیع شدت جریان الکتریکی و دما، کیفیت، متالورژیکی و مکانیکی نقطه جوش فعلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از دلایل عمده این امر کاهش مقدار جریان الکتریکی اصلی، و در نتیجه کاهش حرارت ژولی و ذوب منطقه جوشی می‌شود. فاصله جوش (فاصله)، تعداد و اندازه قطعات قبلی، زبری سطح و نیروی الکتروود پارامترهای غالب در این پدیده هستند. این اثر در بسیاری از صنایع که به اتصالات متناوب نقطه جوش نیاز دارند، رخ می‌دهد.

اگرچه پارامترهای فوق در برخی مطالعات مربوط به جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی متوالی مورد توجه قرار گرفته است، فاصله زمانی بین دو نقطه جوش به ندرت ارزیابی شده است. با توجه به دمای اولیه و سرعت پیش گرمایش و پیش سرمایش، زمان بین جوشکاری دو نقطه مجاور باید با توجه به خواص حرارتی مواد جوش مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از آنجایی که جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی با پدیده‌های حرارتی حین فرایند ارتباط متقابل دارد، ضرورت ارزیابی فاصله زمانی همراه با پارامترهای شار فرعی به عنوان پارامترهای تاثیرگذار مشخص می‌شود.

در میان کاربردهای گسترده فرایند جوش نقطه‌ای مقاومتی، اتصال آلیاژهای آلومینیوم از مهمترین و حیاتی‌ترین کاربردها می‌باشد. استفاده متداول از چنین آلیاژهایی در سازه‌های مختلف هوانوردی، به عنوان بخشی ضروری از محصول، نشان داده است که کیفیت بالا و استحکام این اتصالات در شرایط سخت کاری اجتناب ناپذیر است. علاوه بر این، مطالعات محدودی در مورد اهمیت فاصله زمانی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متوالی انجام شده است. به علاوه، عملکرد مناسب اتصالات جوش نقطه‌ای مقاومتی متوالی تنها با اطمینان دقیق از کیفیت مطلوب آنها حاصل می‌شود. این موضوع نیاز به بررسی تجربی و تحلیلی جریان فرعی را روی قطعات جوشکاری نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان جهت جلوگیری از اثرات ناخواسته، مقادیر پارامترها را بهینه‌سازی نمود.

یکی از قدیمی‌ترین مطالعات تجربی در مورد اثر شار فرعی توسط هارد و همکاران انجام شد [۱] که در آن روشی جهت تشخیص مسیر شار فرعی ارائه شد. در مطالعه بعدی پارامترهای اندازه ورق، فاصله جوش، هندسه الکتروود و نیروی الکتروود نیز به منظور یافتن حداقل فاصله مورد نیاز برای غلبه بر این اثر در نظر گرفته شد [۲].

اثر جریان شار فرعی بر احتمال تولید ترک نیز در جوش مقاومتی نقطه‌ای AA5754 به عنوان آثار جانبی شار فرعی مورد بررسی قرار گرفت [۳،۴] و به این ترتیب ضرورت بررسی عمیق‌تر اثر شار فرعی بر جنبه‌های مکانیکی نقطه جوش‌های متوالی اثبات شد. در این راستا، تأثیر کیفیت سطح نیز توسط وانگ و همکاران بررسی شد [۵]. همچنین تلاش‌هایی برای نظارت بر میزان اثر شار فرعی با استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند بررسی میزان جابجایی الکتروود برای کنترل کیفیت جوش نقطه‌ای انجام شده است [۶]. از آنجایی که احتمال آن وجود دارد که این روش‌ها نتایج متفاوتی را برای جنس‌های مختلف قطعه کار ارائه دهند، تأیید آن‌ها احتیاج به بررسی و واکاوی بیشتری دارد.

از آنجایی که جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متوالی صنعتی معمولاً با سرعت و فواصل کوتاه انجام می‌شود تا ضمن حفظ استحکام مورد نیاز اتصالات، بهره‌وری افزایش یابد. بنابراین فاصله جوشکاری و فاصله زمانی بین ایجاد دو نقطه جوش دو پارامتر تاثیرگذار هستند. با توجه به تحقیقات گذشته، توضیح یا تشریح خاصی در زمینه اثر زمان‌بندی بین نقطه جوش‌های مجاور با لحاظ نمودن مستقیم تأثیر دمای اولیه یا سهم پیش گرمایش مشاهده نمی‌شود. البته، ارزیابی اثرات مکانیکی و ریزساختاری پیش گرمایش بر روی نقطه جوش منفرد در آلیاژ آلومینیوم دیده می‌شود [۷]. طبق این مطالعه، رسوب‌دهی، توزیع عناصر و انحلال فازهای مختلف در ناحیه همجوشی و حتی ناحیه متأثر از حرارت^۲ به دلیل اثر پیش گرمایش جزئی باعث ایجاد رفتار ترکیبی شکل‌پذیر-شکننده شده‌اند. تأثیر پیش گرمایش نیز توسط راج و همکاران [۸] بررسی شده است. در این مطالعه دیگر اثر مثبت پیش گرمایش به صورت مستقل مشاهده شده است. طبق ادعای نویسندگان، پیش گرمایش موجب ارتقای خواص مکانیکی اتصال در آلیاژهای Inconel 718 و SS316L شده است.

¹ Resistance Spot Welding (RSW)

² Heat Affected Zone (HAZ)

می‌توان گفت که پیش گرمایش پیامد غیرمستقیم تغییرات زمان‌بندی جوشکاری مقاومتی است. بنابراین می‌توان برنامه زمانی جریان جوشکاری یا نیروی الکتروود را با توجه به نیاز مواد یا اهداف دیگر برای بهبود کیفیت نهایی نقطه جوش بهینه‌سازی نمود [۹]. اگرچه اصلاح زمان‌بندی جریان جوشکاری مستقیماً هدف مطالعه مذکور نبوده است، لیکن طبق نتایج، فاصله زمانی بین نقطه جوش‌های متوالی می‌تواند به نوعی به عنوان یک روش بهینه‌سازی برای کیفیت جوش عمل کند. بنابراین، گرما، تغییر شکل‌ها، رسانایی و حتی ریزساختار نقطه جوش‌های بعدی یا قبلی می‌توانند به ترتیب بر روی نقطه جوش قبلی یا بعدی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم تأثیرگذار باشند. این بدان معنا است که اعمال تغییرات زمان‌بندی روی جریان جوشکاری یا نیروی الکتروود لزوماً فقط بر روی نقطه فعلی تأثیرگذار نیست [۱۰].

مدل‌سازی و رویکردهای تئوری جهت ارزیابی اثرات شار فرعی به دلیل دشواری تحلیل ناشی از پیکربندی نامتقارن مدل متأثر از شار فرعی، و نیاز به فرض خواص مناسب برای دکمه جوش‌های قبلی، تا به حال بسیار محدود بوده است. البته در تمام تحلیل‌های صورت گرفته در زمینه تحلیل تئوری نقطه جوش‌های منفرد و متوالی، اصول الکتریکی، حرارتی، و مکانیکی مشابه بوده‌اند. قدیمی‌ترین مطالعه عددی، تجزیه و تحلیل المان محدود سه بعدی توسط چانگ بوده است [۲] که در آن پارامترهای الکتریکی و حرارتی در یک قطعه کار متأثر از اثر شار فرعی شده پیش‌بینی شده است. تحقیق مشابه دیگری نیز توسط لی و همکاران [۱۱] با توسعه یک مدل نظری انجام شده است که هدف اصلی آن یافتن حداقل فاصله مناسب جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بوده است. در این مطالعه فرضیات ساده‌کننده هندسی متعددی مشاهده می‌شود.

تحقیقات تئوری بیشتری در زمینه پیش‌بینی رفتار نقطه جوش منفرد جهت ارزیابی دما و توزیع پتانسیل الکتریکی، پیش‌بینی شعاع تماس [۱۲]، شکل‌گیری قطعه و تغییر شکل‌ها [۱۳]، و تجزیه و تحلیل هم‌زمان الکتریکی و حرارتی [۱۴] مشاهده می‌شود. وسعت این مطالعات اخیراً به حوزه روش‌های هوش مصنوعی نیز رسیده است که در آن عمل بازرسی کیفیت جوش در صنعت خودروسازی با اصلاح هوشمند برنامه زمان‌بندی شدت جریان الکتریکی مورد پژوهش قرار گرفته است و پیاده‌سازی کامل آن نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد [۱۵].

تا کنون بهینه‌سازی فاصله جوش نقطه‌ای مقاومتی سوال بسیاری از مطالعات بوده است. در اینجا فاصله بهینه به معنای فاصله بین نقطه جوشی است که اثر شار فرعی کیفیت اتصال را با توجه به جنس قطعه کار نداشته باشد. بدیهی است که انتخاب فاصله بین نقطه جوشی طویل اثر شار فرعی را کاهش می‌دهد اما از سوی دیگر استحکام مجموع اتصال را به دلیل کاهش تعداد نقطه جوش کاهش می‌دهد. تا اینجا طبق مطالعات قبلی [۱۶-۲۱] فاصله جوشکاری بهینه برای بخشی از آلیاژهای آلومینیوم به دست آمده است که در آن ضمن حفظ الزامات فنی، کیفیت اتصال پایدار باقی بماند، مقدار ۵ میلی‌متر بوده است.

از سوی دیگر، طبق اصول فیزیکی مشخص می‌شود که پارامتر فاصله زمانی بین نقطه جوشی، رابطه مستقیمی با تغییرات دما دارد. اگرچه ممکن است به نظر برسد که دمای جاری پائین‌تر، شرایط اولیه بهتری را برای ایجاد نقطه جوش جدید فراهم آورد، لیکن گذشت زمان طولانی بین فرایند ایجاد دو نقطه جوش مجاور، تأثیر منفی روی بهره‌وری خواهد داشت. بنابراین، یک بازه زمانی بحرانی یا بهینه جهت حفظ کیفیت اتصال و بهره‌وری مطلوب نیاز می‌باشد. اهمیت این موضوع در مطالعات اخیر انجام شده در زمینه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی متوالی روی آلیاژهای متفاوت قابل مشاهده است [۲۲-۲۴]. در این مطالعات مسائل مربوط به پیش‌گرم و تغییرات ساختاری نقطه جوش به واسطه دمای اولیه مورد اشاره قرار گرفته است و ضمن اشاره ضمنی به موضوع تداخل زمانی نقطه‌جوش‌ها و نیاز به بهینه‌سازی این مدت زمان، بر اهمیت کاهش اثر شار فرعی تأکید شده است.

در این مطالعه تأثیر فاصله زمانی بین دو نقطه جوش بر روی اتصالات نقطه جوش مقاومتی AA-2219 مورد تحلیل قرار گرفته است ضمن این که رفتار متالورژیکی و مکانیکی نقطه جوش پایانی به صورت تجربی و عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل المان محدود برای بررسی جنبه‌های الکتریکی و حرارتی پدیده جهت پیش‌بینی تاریخچه و توزیع دما در نقطه جوش نهایی استفاده شده است. فاصله زمانی به عنوان متغیر اصلی برای دو نقطه جوش متوالی با فاصله جوش ۵ میلی‌متر با مقادیر ۰/۵، ۱، و ۱/۵ ثانیه انتخاب شده است. زمان حداقل با توجه قابلیت دستگاه نقطه جوش و الزامات عملیاتی انتخاب شده است. ریزساختار و استحکام کششی - برشی نقطه جوش نهایی نیز ارزیابی شده است.

۲- روش تحقیق

روند آزمایش‌های تجربی و عددی برای انجام جوش مقاومتی نقطه‌ای با فاصله زمانی متفاوت (t_1) بین دو نقطه جوش مجاور با فاصله جوش ۵ میلی‌متر در اینجا به تفصیل توضیح داده شده است. جریان الکتریکی، نیروی الکتروود و مدت زمان ثابت فرض شده‌اند در حالی که t_1 به عنوان پارامتر متغیر بین کوتاه‌ترین مقدار (t_{11}) تا طولانی‌ترین مقدار (t_{14}) تنظیم شده است.

۲-۱- تحلیل عددی

حل عددی اجزا محدود فرایند در نرم‌افزار تحلیل COMSOL Multiphysics انجام شده است. معادلات ریاضی اعمال شده برای جنبه‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی اجزا محدود در اینجا توضیح داده شده است.

۲-۱-۱- تحلیل المان محدود

رابطه پتانسیل الکتریکی (شبه لاپلاس) مورد استفاده به صورت زیر استفاده شده است [۲۵]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

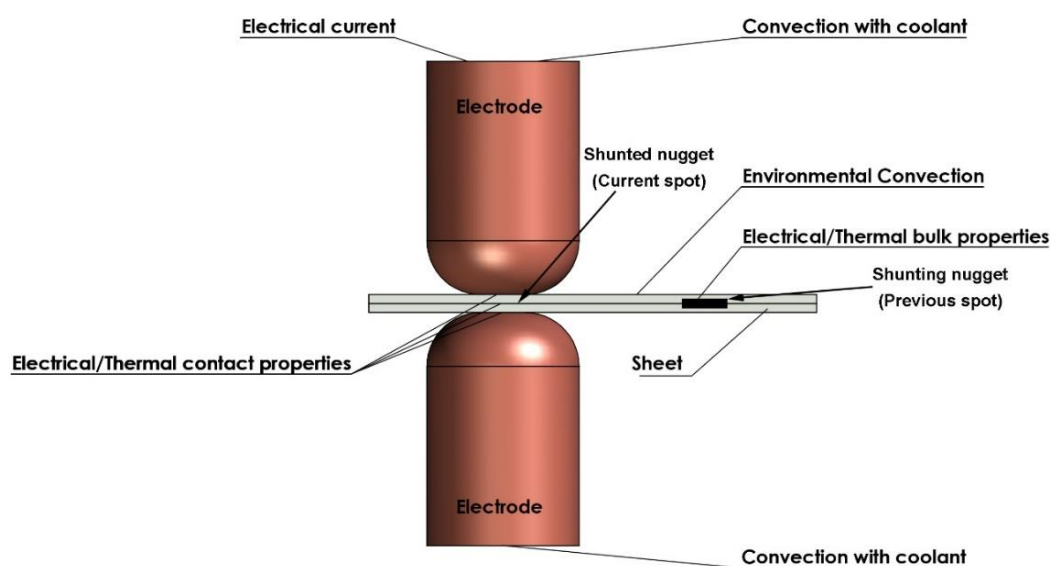
که در آن ϕ پتانسیل ولتاژ و ρ مقاومت الکتریکی توده‌ای است. شرایط مرزی الکتریکی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اعمال جریان الکتریکی متناوب از رابطه زیر استفاده شده است [۲۶]:

$$I_e = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

که در آن I_e جریان الکتریکی اعمال شده از طریق الکتروود و I_p حداکثر جریان الکتریکی قابل استفاده دستگاه جوش است. برای محاسبه مقاومت تماسی الکتریکی از رابطه زیر استفاده شده است [۲۶].

$$\rho_c(T) = R_c(20^\circ C) \cdot \frac{A_c}{L_c} \sqrt{\frac{\sigma_{e,ave}(T)}{\sigma_{e,ave}(20^\circ C)}} \quad (3)$$

که در آن $R_c(20^\circ C)$ مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده (ECR) سطح الکتروود-ورق در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تحت فشار مکانیکی ثابت، L_c ضخامت مشخصه سطوح تماس برابر ۰/۰۰۰۱ برای برخی از گروه‌های آلیاژ آلومینیوم [۲۷، ۲۸]، A_c سطح تماس اسمی، و $\sigma_{e,ave}(20^\circ C)$ و $\sigma_{e,ave}(T)$ مقدار متوسط تنش تسلیم سطوح تماس به ترتیب در دمای T و ۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند. شرایط مرزی الکتریکی با توجه به شکل ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ طرح‌واره شرایط مرزی و دامنه‌های مهم

رابطه مورد استفاده جهت تحلیل بخش حرارتی [۲] فرایند به صورت زیر است:

$$D \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (۴)$$

که در آن ϕ ولتاژ، T دما، D چگالی جرم، k ضریب هدایت حرارتی و c ظرفیت گرمایی ویژه است. ضرایب هدایت تماس حرارتی^۱ (TCC) با استفاده از رابطه زیر [۲۹] محاسبه شده است:

$$k_c = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma}{\sigma_e} \right) \left(\frac{k_1 + k_2}{2} \right) \quad (۵)$$

که در آن k_c ضریب TCC بوده است، k_1 و k_2 ضرایب TCC قطعات مماس، σ تنش نرمال و σ_e تنش تسلیم بوده است. شرایط مرزی حرارتی مطابق شکل ۱ و مطالعه قبلی [۱۶] در نظر گرفته شده است. برای ظرفیت گرمایی ویژه در دمای ذوب رابطه زیر [۱۶] در نظر گرفته شده است:

$$c' = c_{T_s} + \frac{H_m}{T_s} \quad (۶)$$

که در آن H_m گرمای نهان جوش بوده، T_s حداقل دمای ذوب، c_{T_s} گرمای ویژه در T_s و c' ظرفیت گرمایی ویژه پس از تبدیل فاز بوده است.

شرایط مرزی مکانیکی بر اساس مطالعه قبلی [۱۷] (شکل ۱) تنظیم شده است در حالی که نقطه جوش قبلی و ناحیه جوش به عنوان دامنه‌های مکانیکی مقید [۳۰] در نظر گرفته شده‌اند. جهت شمول وضعیت الاستیک-پلاستیک و تعادل تنش، به ترتیب رابطه (۷) و (۸) [۳۱] لحاظ شده است:

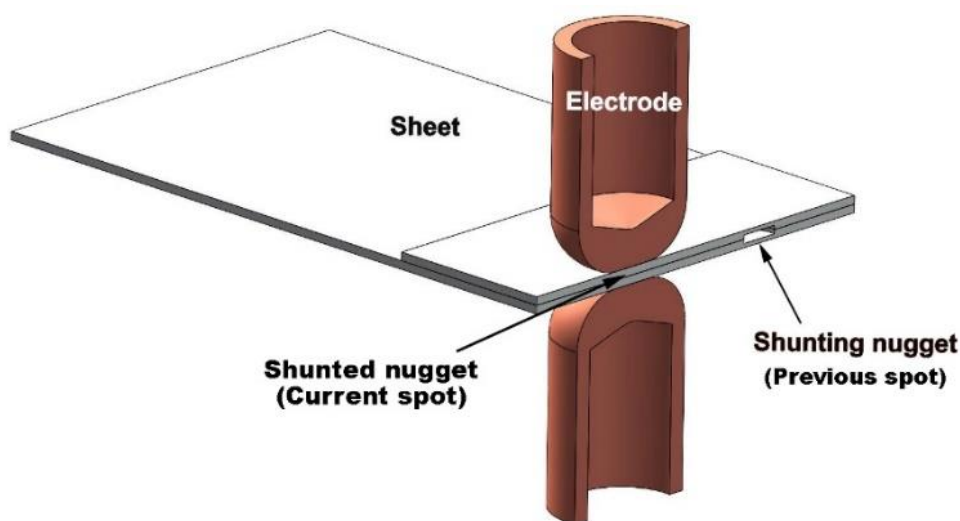
$$d\{\sigma\} = [C]d\{\epsilon\} - \{C_T\}dT \quad (۷)$$

$$\nabla\{\sigma\}_{xyz} + D \cdot \{b\} = D \cdot \{a\} \quad (۸)$$

که در آن $d\{\sigma\}$ و $d\{\epsilon\}$ به ترتیب اختلاف بردار تنش و کرنش، $\{C_T\}$ بردار ضریب حرارتی، $[C]$ ماتریس الاستیک-پلاستیک، و dT اختلاف دما بوده است. بردار نیرو و شتاب به ترتیب $\{b\}$ و $\{a\}$ بوده است.

۲-۱-۲- پیکربندی مدل

پیکربندی مدل جهت تحلیل عددی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای نقطه جوش قبلی یک قید مکانیکی تعریف شده است. قطر این نقطه جوش بر اساس مقادیر تجربی به دست آمده در آزمایشات قبلی [۱۸] جهت ایجاد یک نقطه جوش منفرد فرض شده است. قطر تعیین شده برای این نقطه جوش ۴/۲ میلی‌متر تعیین شده است.



شکل ۲ پیکربندی مدل مورد نظر جهت جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی

^۱ Thermal Conduction Coefficient

۲-۱-۳- ویژگی‌های مواد

آلیاژ AA2219 به عنوان جنس مورد نظر برای ورق تعریف شده است. پارامترهای وابسته به دما طبق جدول ۱ فرض شده است. مقادیر ثابت شامل گرمای نهان ذوب (۳۸۹ کیلوژول بر کیلوگرم) [۱۶] و محدوده دمایی جامد-مایع (۵۴۳ تا ۶۴۳ درجه سانتی‌گراد) [۳۲] بوده است. جنس تعریف شده برای الکترودها C15000 با خواص استخراج شده بر اساس مطالعه قبلی در نظر گرفته شده است [۱۶]. لازم به ذکر است که این مقادیر و روابط جهت بررسی رفتار مواد در تحلیل نرم‌افزاری و شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به این ترتیب تغییرات ویژگی‌های مواد به صورت تابعی از دما در تحلیل وارد شده است.

جدول ۱ خواص جنس ورق AA2219-T6 به صورت تابعی از دما [۳۲، ۳۳]

پارامتر	تابع
چگالی (kg/m^3)	(۹) $D(T) \cong 0.0002 \times T^2 - 0.17 \times T + 2858.3$
مقاومت الکتریکی ($\Omega \cdot \text{m}$)	(۱۰) $\rho(T) = 5.7 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0017 \times (T - 293))$
ضریب انبساط حرارتی خطی ($1/\text{K}$)	(۱۱) $\alpha(T) \cong (0.0063 \times T + 19.708) \times 10^{-6}$
ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)	(۱۲) $c(T) \cong -0.0016T^2 + 1.3521T + 567.72$
ضریب رسانش حرارتی ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	(۱۳) $k(T) \cong 0.1836T + 71.847$
مدول الاستیسیته (GPa)	(۱۴) $E(T) \cong 2 \times 10^{-7}T^3 - 0.0005T^2 + 0.2253T + 43.386$
استحکام تسلیم (MPa)	(۱۵) $\sigma_e(T) \cong 7 \times 10^{-6}T^3 - 0.0102T^2 + 4.0876T - 129.96$

به دلیل تولید گرمای جزئی در داخل نقطه جوش قبلی، تغییرات دمای آن صرف نظر شده، دمای متوسط برای ویژگی‌های حرارتی آن فرض شده است. ویژگی‌های الکتریکی اعمال شده برای تحلیل عددی در جدول ۲ ارائه شده است. خواص مکانیکی شامل استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته به ترتیب ۳۴۲ مگاپاسکال و ۷۵ گیگاپاسکال با استفاده از روش (آزمون میکرو سختی) که توسط جعفری و همکاران توضیح داده شده، اندازه‌گیری و تعریف شده است [۳۴]. ترکیب شیمیایی ورق‌ها در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۲ خواص الکتریکی مورد استفاده در مدل عددی [۳۵].

پارامتر	مقدار
مقاومت الکتریکی ($\Omega \cdot \text{m}$)	7.11×10^{-8}
مقاومت الکتریکی تماسی ورق و ورق ($\Omega \cdot \text{m}$)	6.78×10^{-5}
مقاومت الکتریکی تماسی ورق و الکتروده ($\Omega \cdot \text{m}$)	8.1×10^{-7}

جدول ۳ ترکیب شیمیایی AA2219

عنصر	Wt. %	عنصر	Wt. %
Al	91.5 - 93.8	Mn	0.2 - 0.4
Cu	5.8 - 6.8	Ti	0.02 - 0.1
Fe	Max 0.3	V	0.05 - 0.15
Mg	Max 0.02	Si	Max 0.2
Zn	Max 0.1	Zr	0.1 - 0.25

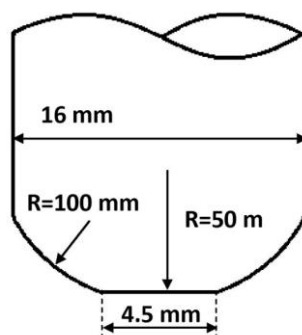
۲-۲- آزمایشات تجربی

پارامترهای جوشکاری در جدول ۴ ارائه شده است. نوع الکتروده طبق شکل ۳ انتخاب شده است. روش تهیه نمونه آزمایشی، ارزیابی نتایج و تعیین پارامترهای جوشکاری با الهام از مطالعه قبلی [۲۱] انجام شده است. انتخاب پارامترهای جوشکاری بر اساس آزمایش‌های جوش‌پذیری به تفصیل در بخش بعدی توضیح داده شده است. فرایند آماده‌سازی نمونه با توجه به دستورالعمل‌ها و استانداردهای جوشکاری [۳۶، ۳۷] شامل تمیز کردن آلودگی‌ها با کاغذ سنباده و پاکسازی لایه اکسیدی به کمک محلول بازی پیش از آغاز عملیات جوشکاری صورت گرفته است.

جدول ۴ پارامترهای دستگاه جوشکاری

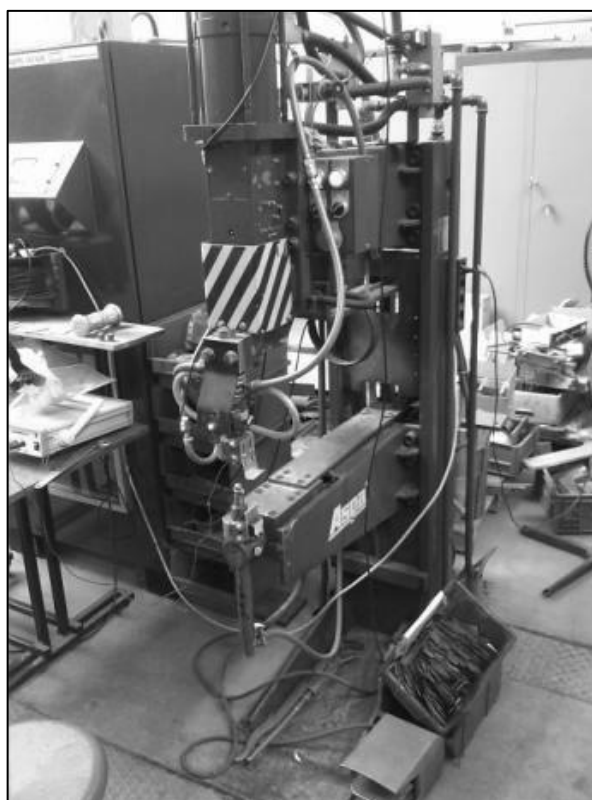
مقدار	پارامتر
2	نیروی فشردگی (kN)
3.2	نیروی نگهداری (kN)
22 – 26	محدوده جریان جوشکاری (kA)
2 – 10	محدوده زمان جوشکاری* (cycle)
2.5 – 3.2	محدوده نیروی الکتروود (kN)
گنبدی	نوع الکتروود

* از آنجائیکه جریان متناوب ۵۰ هرتز استفاده شده است، هر سیکل برابر ۰/۰۲ ثانیه است.



شکل ۳ هندسه الکتروود

دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای PFP-231 (شکل ۴) با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ برای فرایند جوشکاری استفاده شده است.



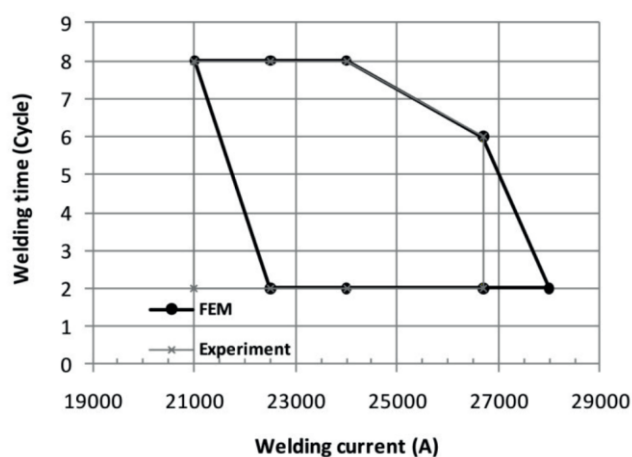
شکل ۴ ماشین جوشکاری مورد استفاده برای آزمایشات

جدول ۵ ویژگی‌های ماشین جوشکاری PFP-231، مورد استفاده در جوشکاری

پارامتر	مقدار
توان بیشینه (kVA)	130
شدت جریان جوشکاری بیشینه (kA)	28
بسامد (kHz)	60
نیروی الکتروود بیشینه (kN)	3.3

۲-۳-آزمون‌های جوش‌پذیری

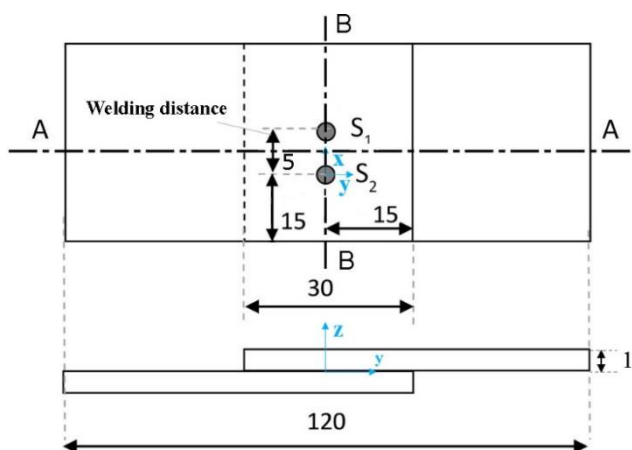
محدوده مناسب برای پارامتر نیروی الکتروود به منظور دستیابی به دکمه جوشی عاری از پاشش مذاب با قطری بین $3.5\sqrt{t_s}$ تا $5\sqrt{t_s}$ [۲۷] (ضخامت ورق) به دست آمده است. این محدوده در شکل ۵ نشان داده شده است. آزمایش‌های جوش‌پذیری انجام‌شده نشان داد که استفاده از جریان‌های جوشکاری بالاتر یا زمان طولانی‌تر (فراتر از محدوده نشان‌داده‌شده در شکل ۵) منجر به پاشش مذاب می‌شود. مقادیر کمتر نیز منجر به ایجاد اتصالات غیر استاندارد و ضعیف برای جنس مورد نظر شده است.



شکل ۵ محدوده جوش‌پذیری بدست آمده توسط نتایج عددی و تجربی [۲۱]

۲-۳-۱- روند جوشکاری

شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب طرح‌واره و نمونه آزمایشی واقعی را نشان می‌دهند. هر نمونه با استفاده از پارامترهای متوسط ارائه شده در جدول ۷، جوش داده شده است.

شکل ۶ چیدمان نقاط جوشکاری جهت طراحی آزمایش S_2 و S_1 نقاط جوشکاری مورد نظر هستند. (ابعاد بر حسب میلی‌متر)



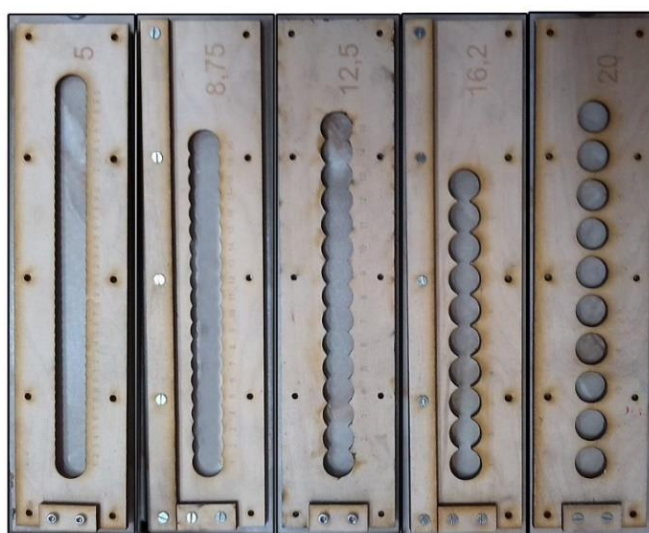
شکل ۷ نمونه‌های جوشکاری شده

جدول ۶ پارامترهای جوشکاری متوسط برای نقطه جوش‌ها به علاوه بازه زمانی بین جوشی مورد استفاده روی S₂

جریان الکتریکی (kA)	زمان جوشکاری (Cycle)	فاصله بین جوشی (mm)	نیروی الکتروود (kN)	بازه زمانی بین جوشی (s)
25.3	6	5	2.9	0.5, 1, 1.5, ∞*

*∞: زمان مورد نیاز جهت تعادل دمایی قطعه کار با دمای محیط

ابزار مورد استفاده جهت تعیین و حفظ فاصله بین نقطه جوش‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ ابزارهای موقعیت‌دهی مورد استفاده برای الکتروودها جهت تنظیم فاصله بین دو نقطه جوش

پس از انجام فرایند جوشکاری، نمونه‌ها در امتداد خطوط A-A و B-B (شکل ۶) به ترتیب برای ارزیابی‌های مکانیکی و متالورژیکی به کمک گیوتین برش داده شدند:

- خط A-A: نمونه جوش داده شده در امتداد خط A-A برش داده شده است تا آثار پارامترهای جوشکاری روی ویژگی‌های مکانیکی و استحکام دکمه تحت اثر شار فرعی به صورت مجزا بررسی شود.
- خط B-B: دکمه‌های جوش نیز جهت انجام بررسی‌های هندسی و متالورژیکی از بین خط B-B برش داده شده‌اند.

۲-۳-۲-آزمون‌های ریزساختار

پس از برش جوش‌ها روی سطح مقطع دکمه جوش، نمونه‌های آزمایشی به صورت گرم در پودر رزین ذوب و انجماد شده، سپس به صورت مکانیکی صیقل داده شدند. سپس نمونه‌های آزمایشی با استفاده از محلول کلر ۱ (۱۰۰ میلی لیتر آب، ۴ میلی لیتر HNO₃، ۴ میلی لیتر HCl و ۲ میلی لیتر HF) [۳۸] اچ شدند. سپس از آب و اتانول برای خنثی‌سازی نمونه‌ها پس از اچ استفاده شده است. برای به دست آوردن ریزنگارها از میکروسکوپ نوری Olympus SZX9 با بزرگنمایی حداکثر ۳۴۲ برابر استفاده شد.

¹ Keller

۲-۳-۳- آزمون‌های کشش-برش

پس از طراحی آزمایش‌ها بر اساس پارامترهای جریان، زمان و فاصله جوش، آزمایش‌های کشش-برش در محدوده جوش‌پذیری با ۳ تکرار انجام شد. نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۶ ابتدا در امتداد خط A-A برش داده شده، سپس جهت بررسی استحکام شکست دکمه جوش تحت اثر شار فرعی، در دستگاه تست کشش مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش کشش بر اساس ASTM E8/E8M-22 با استفاده از دستگاه تست کشش STM-30 (Zwick/Roell-Z250) با مشخصات ارائه شده در جدول ۷ روی نمونه‌ها انجام شده است.

جدول ۷ مشخصات فنی دستگاه آزمون کشش مورد استفاده (STM-30)

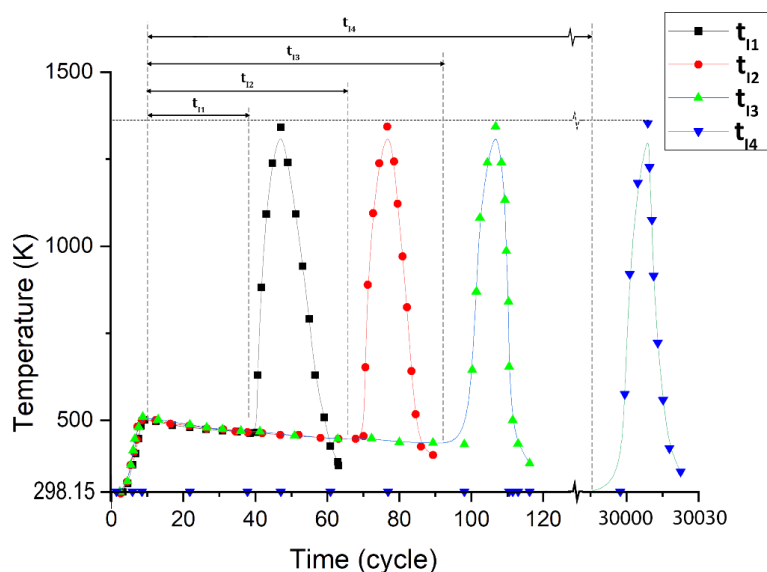
پارامتر	مقدار
نیروی بیشینه آزمایش (F_N) (کشش یا فشار)	250 kN
بازه اندازه‌گیری نیرو	$1.65F_N$
نرخ انجام آزمایش در بازه بارگذاری ($0 - F_N$)	0.0001 - 600 mm/min
طول نمونه (تخت)	0.1 mm
بازه بیشینه اکستنسومتر	30 mm
صحت و تکرارپذیری موقعیت‌دهی	$\pm 2 \mu\text{m}$

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده عملکرد مؤثر بهینه‌سازی بازه زمانی بین جوشی را روی هندسه دکمه جوش، توزیع دما، و جنبه‌های متالورژیکی نقطه جوش متأثر از شار فرعی نشان می‌دهد که در اینجا به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. این مسأله قابل مشاهده است که بهینه‌سازی بازه زمانی اثر مخرب پدیده شار فرعی را از نظر توزیع یکنواخت خواص متالورژیکی و مکانیکی در امتداد نقطه جوش نسبت به نقطه جوش قبلی تا حدودی اصلاح نموده است. این موضوع در قسمت‌های بعدی بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱- تاریخچه تغییرات دما

همان‌طور که در نتایج عددی ارائه شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود، اثر فاصله زمانی بر روی توزیع دما قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که عملیات جوشکاری برای بازه زمانی t_{I4} ، پس از مدت زمان لازم جهت تعادل دمایی قطعه‌کار در محیط انجام شده است. این موضوع در شکست خط محدوده زمانی نشان داده شده است.



شکل ۹ تاریخچه دمایی پیش‌بینی شده در مرکز نقطه جوش با فاصله جوشکاری ۵ میلیمتر و بازه زمانی t_{I1} تا t_{I4}

اگرچه افزایش دما قبل از جوشکاری به عنوان یک پیش‌گرم عمل می‌کند و ممکن است به بهبود فرایند جوشکاری کمک کند، لیکن در صورتی که دمای پیش‌گرم بالا، و زمان آن طولانی باشد، می‌تواند منجر به رشد دانه و از بین رفتن خواص مکانیکی و متالورژیکی اطراف جوش یا خود نقطه جوش شود. طبق شکل ۹ دمای پیش‌گرم حدود ۵۰۰ کلوین برای تمام فواصل زمانی قبل از جوشکاری نقطه جوش جدید رخ داده است. اگرچه دمای پیش‌گرم از نظر جنبه‌های متالورژیکی تقریباً قابل توجه بوده است، مدت کوتاه آن اثربخشی فرایند پیش‌گرم را که منجر به تغییر ریزساختار یا گسترش مساحت منطقه حرارت دیده می‌شود کاهش داده است. با این وجود، با مقایسه بازه‌های زمانی، کوتاه‌ترین بازه زمانی (t_{11}) از این نظر وضعیت بهتری داشته، از لحاظ حرارتی کمتر تحت تأثیر قرار گرفته است. این موضوع همچنین برای پیش‌گرمایش نامتقارن همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است صادق است. اگرچه برای بازه‌های زمانی کوتاه، پیش‌گرمایش به صورت نامتقارن در اطراف نقطه جوش رخ داده است، لیکن به دلیل کوتاه بودن مدت پیش‌گرم و مقدار دما که از جهت تغییرات متالورژیکی قابل توجه نیست [۳۹]، این موضوع نمی‌تواند اثرات مخربی داشته باشد. تشکیل منطقه متأثر از حرارت به جریان شار فرعی در طول فرایند جوشکاری مرتبط شده است که در قسمت بعدی بیشتر مورد بحث قرار گرفته است.

همچنین لازم به ذکر است که توزیع دما برای t_{14} طبق شکل ۱۱ برابر با دمای اتاق است. $t_{14} = \infty$ به معنای زمان لازم برای رسیدن قطعه کار به دمای محیط است.

در مقابل، اگر سطح دما همراه با مدت پیش‌گرمایش از نظر متالورژیکی تخریب‌کننده نباشد، سطح دمای پیش‌گرم و مدت زمان مناسب می‌تواند شرایط جوشکاری را برای ایجاد دکمه جوش جدید تسهیل نماید و به عنوان یک پارامتر مثبت در نظر گرفته شود. با توجه به آزمایشات قبلی انجام شده، عملیات حرارتی مهم برای آلیاژ آلومینیوم شامل عملیات انحلال و رسوب‌سختی می‌شود که به ترتیب به دمای ۵۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۶۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارند [۴۰]. اگرچه محدوده دمای رسوب‌سختی کمتر از دمای پیش‌گرمایش ایجاد شده در شکل ۹ است، این عملیات حرارتی به مدت زمان ۱۸ تا ۳۶ ساعت نیاز دارد که بسیار بیشتر از مدت زمان مشاهده شده در شکل ۹ است. با این حال، با وجود مدت زمان بسیار کوتاه دوره پیش‌گرمایش مذکور، همچنان احتمال تأثیرپذیری منطقه متأثر از حرارت به واسطه فواصل زمانی وجود دارد.

همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، نرخ‌های کاهش دما نیز برای هر بازه متفاوت است. حداکثر مقدار نرخ‌های کاهش دما متعلق به t_{14} و حداقل آن متعلق به t_{11} است. این موضوع به دلیل اثر پیش‌گرمایش است که نرخ خنک‌سازی را برای بازه زمانی کوتاه‌تر (t_{11}) کاهش داده است در حالی که نرخ خنک‌سازی مربوط به طولانی‌ترین بازه (t_{14}) به دلیل عدم وجود پیش‌گرم افزایش یافته است. اگرچه سرمایش در محیط هوا رخ داده است، لیکن سرعت سرد شدن سریع ممکن است به تشکیل فاز تردتری منجر شود [۲۱] که مطلوب نیست. به طور کلی با مقایسه تمامی فواصل زمانی، t_{11} شرایط بهتری داشته است.

همچنین این احتمال وجود دارد که یک رابطه غیرخطی غیرمستقیم بین دمای نهایی پیش‌گرم (T_{FP}) (دمای ابتدایی پیش‌گرم انجام جوشکاری بعدی) و فاصله زمانی (t_1) وجود داشته باشد. همانطور که نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن دماهای به دست آمده برای هر t_1 ، این امر شهودی‌تر نیز خواهد بود. رابطه زیر را می‌توان با برازش تابع به داده‌های جدول ۸ به دست آورد. دلیل انتخاب تابع نمایی برای رابطه (۱۶)، دقت لازم آن در برازش بوده است.

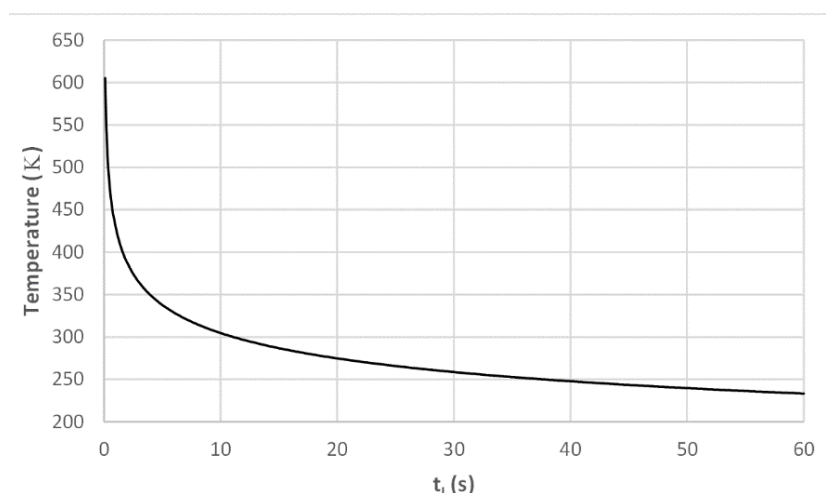
$$T_{FP} = 429,43t_1^{-0,149} \quad (16)$$

جدول ۸ بازه زمانی در مقابل دمای نهایی پیش‌گرم از جوشکاری

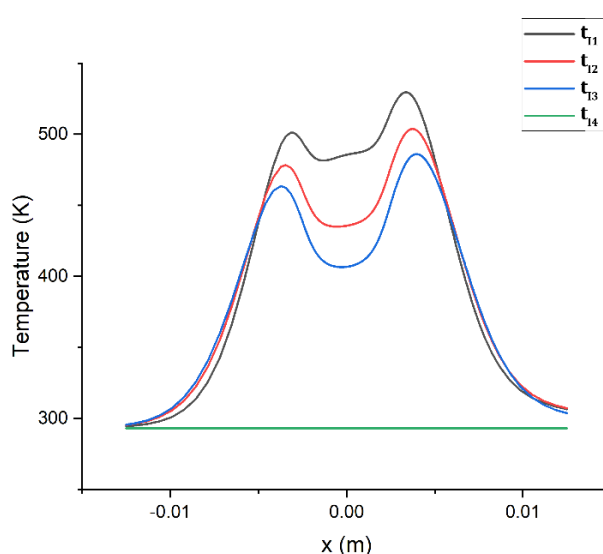
دمای نهایی پیش‌گرم (T_{FP}) (K)	بازه زمانی بین جوشی (t_1)
480	$t_{11} = 0.5$ s
420	$t_{12} = 1$ s
410	$t_{13} = 1.5$ s

تخمین محاسبه شده برای T_{FP} در مقابل t_1 بر اساس رابطه (۱۶) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، اثر قابل توجه T_{FP} قبل از ۱۰ ثانیه و به طور دقیق‌تر، قبل از ۵ ثانیه اتفاق می‌افتد. اگرچه این پیش‌گرم اثر فرایند پیش‌گرمایش کامل را ندارد، این امر ممکن است برآورد قابل قبولی را برای انتخاب فاصله زمانی مناسب در راستای نیازهای مکانیکی و

متالورژیکی پیش گرمایش ارائه دهد که در آن صورت گزینه‌ها به پیش گرمایش سریع محدود می‌شوند. در واقع، تأثیر هر دمای پیش گرم باید ابتدا روی کیفیت نقطه جوش بررسی گردد تا در مورد بهترین دمای پیش گرمایش سریع تصمیم‌گیری شود. دلیل ترسیم نمودار در شکل ۱۰ برای مدت زمان طولانی‌تر (۶۰ ثانیه) صرفاً نشان دادن قابلیت اطمینان رابطه (۱۶) در تخمین دمای پیش گرم بوده است. اگرچه t_{14} طولانی‌تر از ۶۰ ثانیه است، لزوماً در اینجا روی جنس تأثیری نداشته است، زیرا روند منحنی به سمت مجانب افقی بوده است؛ به این معنی که مقدار تخمین، نزدیک به مقدار دمای پیش‌گرم است. بنابراین، دقت تخمین می‌تواند به طور خاص برای مقادیر کوتاه‌تر با استفاده از رابطه (۱۶) معقول باشد.



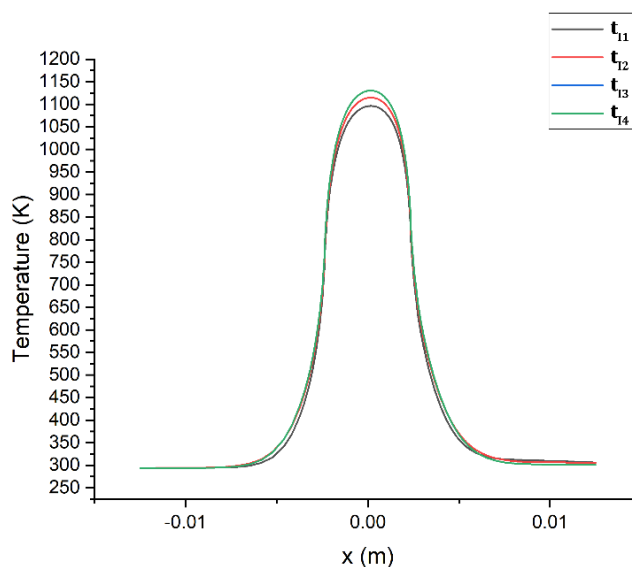
شکل ۱۰ بازه زمانی بین جوشی در مقابل دمای نهایی پیش از جوشکاری



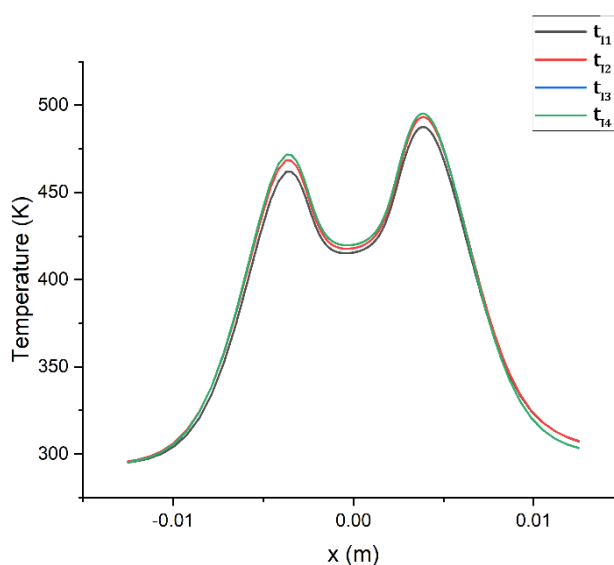
شکل ۱۱ توزیع دمای پیش‌بینی شده در مرکز نقطه جوش در طول محور x ، ۲ سیکل پیش از انجام جوشکاری با فاصله ۵ میلی‌متر و بازه زمانی بین جوشی t_{11} تا t_{14}

تفاوت دمای خط مرکزی پیش‌بینی شده برای هر بازه زمانی در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. حداکثر دما در این نمودار (شکل ۱۲) نیز مانند داده‌های ارائه شده در شکل ۹ است. توزیع دما در امتداد دکمه جوش نشان داده شده در شکل ۱۲ تفاوت بیشتر مقدار دما را برای فواصل زمانی طولانی‌تر نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، طولانی‌ترین فاصله زمانی (t_{14}) شیب تندتری را در دهانه بین دکمه جوش‌ها ایجاد نموده است ($0 < x < 0.01$ m) در حالی که این شیب برای کوتاه‌ترین فاصله زمانی (t_{11}) کمتر است. به عنوان یک نتیجه‌گیری اجمالی می‌توان گفت که گرادیان‌های شدیدتر دما ممکن است منجر به تنش‌های مکانیکی-حرارتی و پسماند بزرگتر، و در نتیجه، اعوجاج آشکارتر پس از آزادسازی تنش شود.

با نگاهی دقیق‌تر به توزیع دما در شکل ۱۳، می‌توان متوجه شد که بازه طولانی‌تر زمان (t_{14})، به توزیع نامتقارن‌تر گرما در اطراف نقطه جوش فعلی پس از جوشکاری منجر شده است. این امر ممکن است در نهایت منجر به تغییر ساختار متالورژیکی منطقه بین دکمه جوش‌ها شود، لیکن سطح دما و مدت زمان باقی ماندن در آن دما به اندازه کافی بالا نبوده است [۴۱]. به علاوه، تغییرات ساختاری عمدتاً ناشی از اثر شار فرعی بوده است که قبلاً بیشتر توضیح داده شد.



شکل ۱۲ توزیع دمای پیش‌بینی شده در مرکز نقطه جوش در طول محور x ، در حین جوشکاری با فاصله ۵ میلی‌متر و بازه زمانی بین جوشی t_{11} تا t_{14}

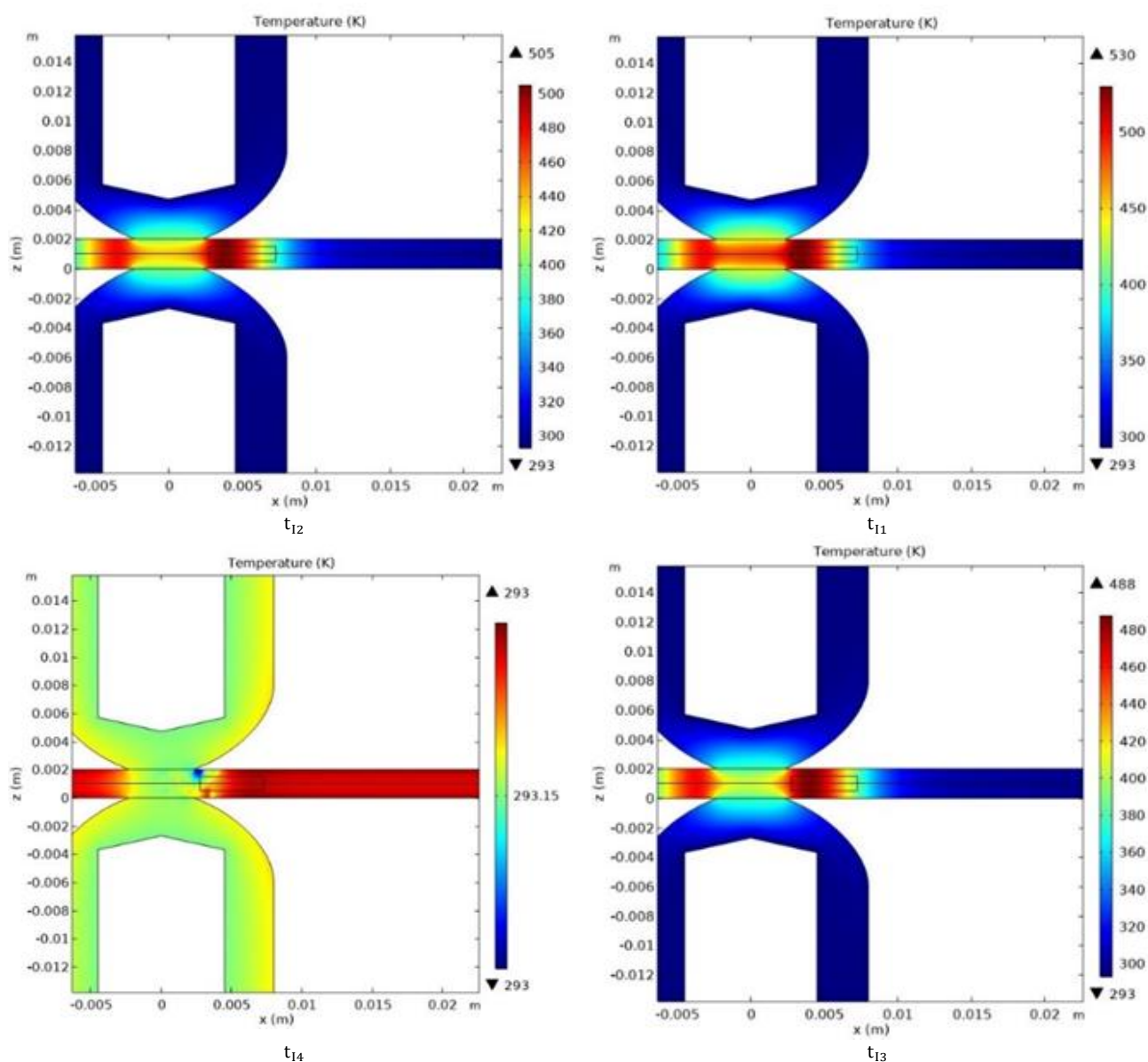


شکل ۱۳ توزیع دمای پیش‌بینی شده در مرکز نقطه جوش در طول محور x ، ۲ سیکل پس از انجام جوشکاری با فاصله ۵ میلی‌متر و بازه زمانی بین جوشی t_{11} تا t_{14}

۳-۲- توزیع دما

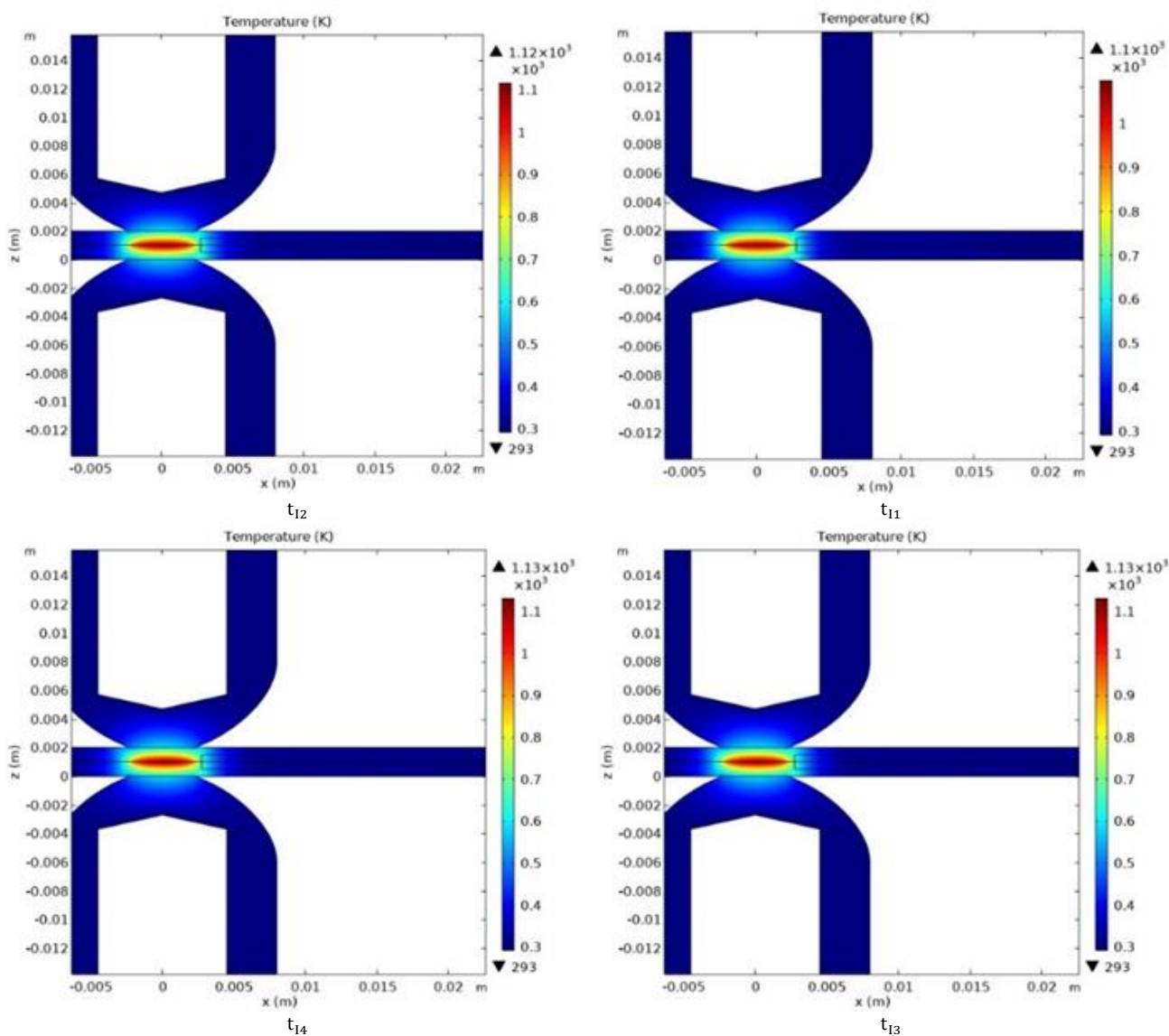
شکل ۱۴ تا شکل ۱۶، پیش‌بینی توزیع دمای نقطه جوش‌های متأثر از اثر شار فرعی را با فواصل زمانی مختلف، برای فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر، قبل، حین و بعد از جوش نشان می‌دهند. در این نمودارها (شکل ۱۴ تا شکل ۱۶) محدوده مستطیلی نشان داده شده با مرز مشکی در سمت راست، نقطه جوش قبلی (S_1 در شکل ۶) می‌باشد؛ و نقطه جوش فعلی همان نقطه S_2 در شکل ۶ است.

اگرچه تفاوت‌های ناچیزی در حداکثر دمای به دست آمده در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، لیکن این واقعیت وجود دارد که مقادیر دمایی مشابهی برای t_{13} و t_{14} به دست آمده است. این امر نشان می‌دهد که افزایش t_1 در صورت طولانی‌تر شدن از t_{13} اثر قابل توجهی ندارد زیرا در افزایش حداکثر دمای مرکز جوش تقریباً بی‌تأثیر بوده است. همچنین مشاهده شده است که قبل (شکل ۱۴) یا بعد (شکل ۱۶) از فرایند جوشکاری، دما برای طرفین نقطه فعلی نسبت به مرکز نقطه جوش افزایش بیشتری داشته است. دلیل این موضوع می‌تواند انتقال حرارت بیشتر در مرکز نسبت به اطراف باشد که به دلیل تماس و نزدیکی الکترودها به ورق‌ها در این منطقه رخ داده است.

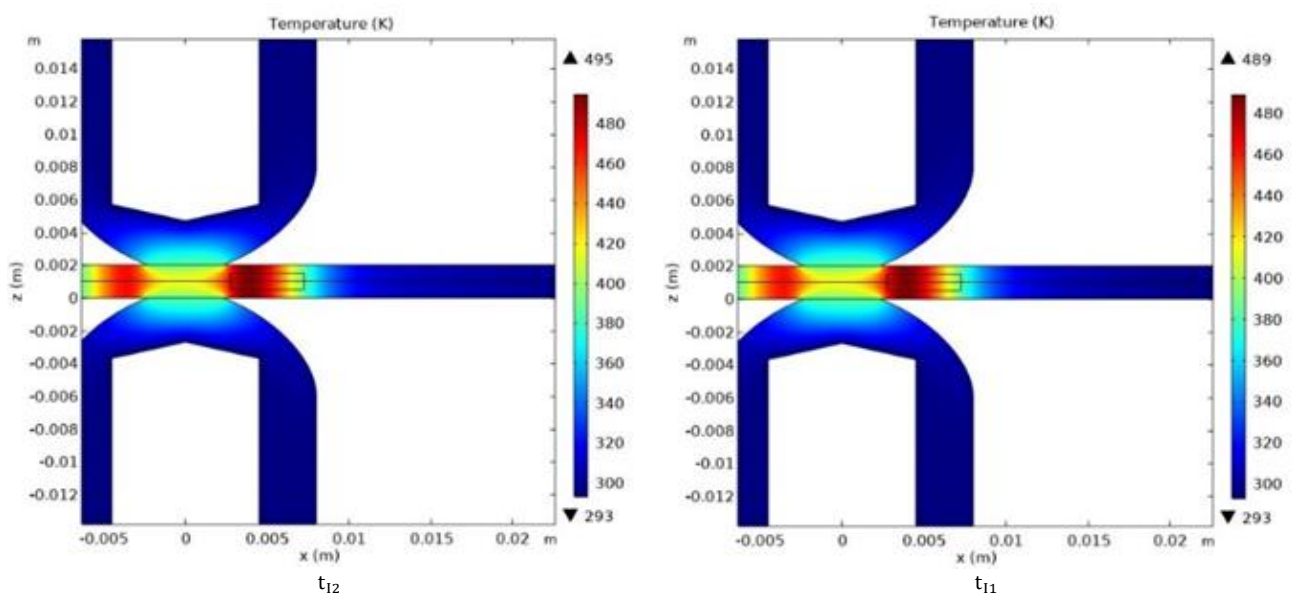


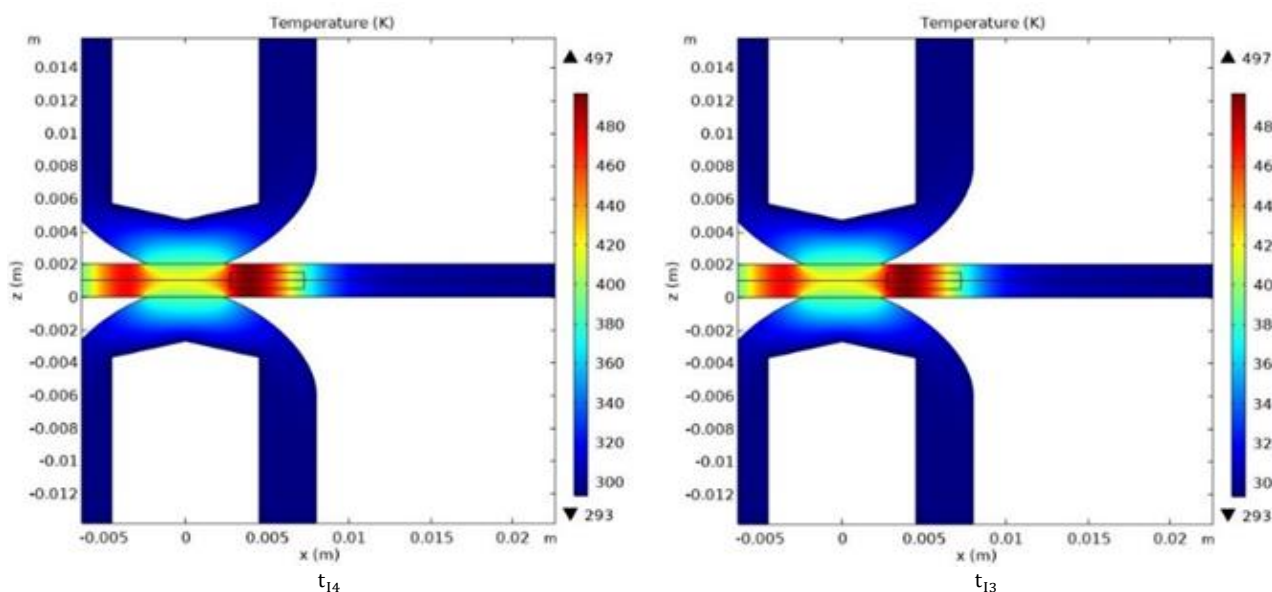
شکل ۱۴ توزیع دمای پیش‌بینی شده روی نقطه جوش تحت اثر شار فرعی با بازه‌های زمانی متفاوت برای فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر ۲ سیکل پیش از انجام جوشکاری

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، پس از فرایند جوشکاری همچنان یک افزایش دما بین دکمه جوش‌ها مشاهده می‌شود. اگرچه بیشینه دما به طور قابل توجهی برای فواصل مختلف قابل مقایسه نیست، دما و تأثیر آن در تشکیل منطقه متأثر از حرارت موضوعی است که باید به طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد. این قضیه به طور تجربی در بخش بعدی به کمک ریزنگارها بررسی شده است.



شکل ۱۵ توزیع دمای پیش بینی شده روی نقطه جوش تحت اثر شار فرعی با بازه‌های زمانی متفاوت برای فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر در حین انجام جوشکاری





شکل ۱۶ توزیع دمای پیش بینی شده روی نقطه جوش تحت اثر شار فرعی با بازه‌های زمانی متفاوت برای فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر ۲ سیکل پس از انجام جوشکاری

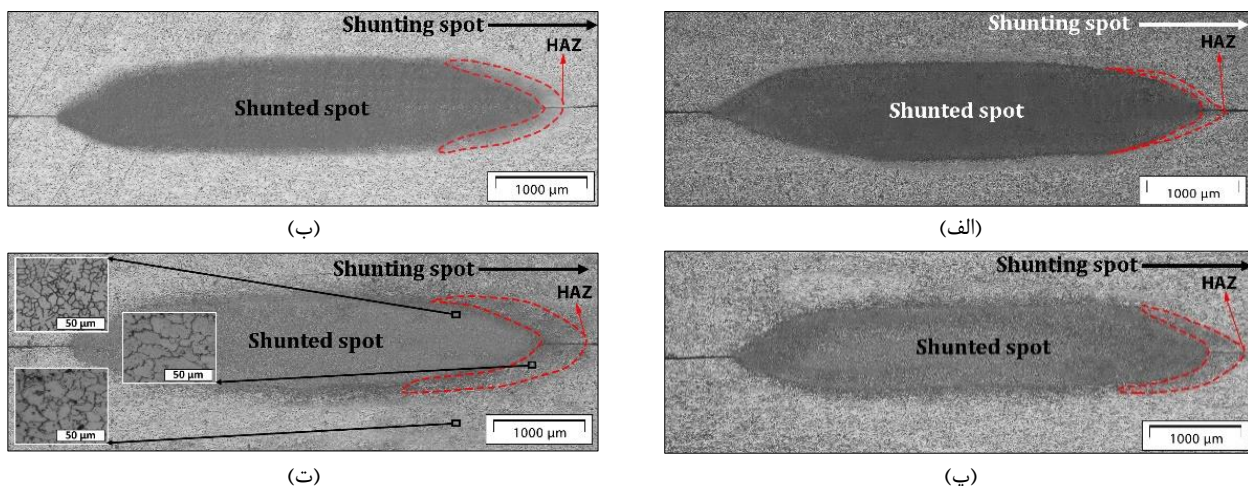
روی هم رفته می‌توان گفت که کوتاه کردن بازه زمانی به دو صورت بر مقدار شار فرعی تأثیر می‌گذارد:

- ۱- کوتاه کردن فاصله زمانی باعث افزایش دمای اولیه دکمه جوش بعدی شده، در نتیجه رسانایی الکتریکی مسیر کاهش می‌یابد. در نهایت به دلیل رسانایی کمتر در طول مسیر شار فرعی، از جریان شار فرعی جلوگیری می‌شود.
- ۲- مقادیر بالاتر دمای اولیه به دلیل کوتاه شدن فاصله زمانی، پیش‌گرم مختصری را برای دکمه جوش بعدی ایجاد می‌کند که به عنوان یک عامل کمکی، منجر به تامین حرارت جوش می‌شود.

۳-۳- ریزساختار دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت

با توجه به توزیع دمای به‌دست‌آمده در شکل ۱۵ و شکل ۱۶، حداکثر مقدار دما برای t_1 طولانی‌تر، کمی بالاتر است که ممکن است باعث ایجاد منطقه حرارت دیده نسبتاً گسترده‌تر شود. شکل ۱۷ یک ناحیه تقریباً مشابه حرارت دیده را برای تمام مقادیر t_1 نشان می‌دهد که در آن تفاوت قابل مشاهده به تقارن این منطقه در اطراف دکمه جوش مربوط می‌شود. t_1 کوتاه‌تر در مقایسه با t_1 طولانی‌تر به افزایش تقارن منطقه متأثر از حرارت منجر شده است. شکل ۱۷ توسعه منطقه حرارت دیده را به سمت نقطه جوش قبلی نشان می‌دهد. برای مثال، ریزساختار قطعه، منطقه متأثر از حرارت، و فلز پایه برای t_{14} بزرگ‌نمایی شده است تا تفاوت بین هر ناحیه را به عنوان معیاری برای تشخیص مرز بین مناطق نشان دهد. اگر چه دمای بالاتر برای t_1 کوتاه‌تر قبل از جوشکاری مشاهده شده است (شکل ۱۴)، لیکن تشکیل منطقه حرارت دیده در اینجا به طور خاص به واسطه اثر شار فرعی استنباط شده است. این پدیده به وضوح برای اکثر آلیاژهای فلزی با در نظر گرفتن رابطه معکوس بین هدایت الکتریکی و دما قابل درک است. فاصله زمانی طولانی‌تر، دمای اولیه دکمه جوش بعدی را کاهش داده است که در نتیجه آن هدایت الکتریکی مسیر جریان الکتریکی افزایش یافته است. در نهایت اثر شار فرعی تسهیل شده، منطقه تحت تأثیر حرارت به سمت راست نشر پیدا کرده است.

علاوه بر این، رسانایی الکتریکی تماسی نیز به دلیل کاهش دما برای مدت طولانی‌تر t_1 تا حدی افزایش یافته است. این امر باعث شده است که مسیر شار فرعی به دلیل رسانایی الکتریکی بیشتر تحت تأثیر جریان الکتریکی قرار گیرد. بنابراین انرژی بیشتری در حین جوشکاری دکمه فعلی در طول مسیر شار فرعی تلف می‌شود. در نتیجه، مسیر شار فرعی مستعد تشکیل یک منطقه متأثر از حرارت گسترده در سمت راست (بین دکمه‌های جوش) خواهد بود.

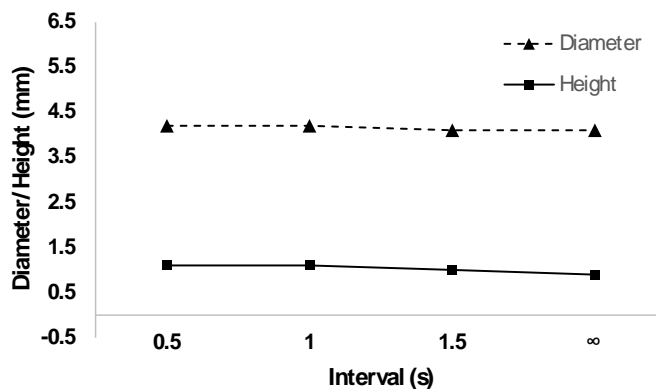


شکل ۱۷ ریزنگارهای سطح مقطع نقطه جوش متأثر از شار الکتریکی فرعی ایجاد شده با الف) t_{11} ، ب) t_{12} ، پ) t_{13} ، و ت) t_{14} (نقطه جوش قبلی در سمت راست قرار گرفته است) (ریزساختار به جهت تشابه بین موارد الف) تا ت) صرفاً برای t_{14} نمایش داده شده است)

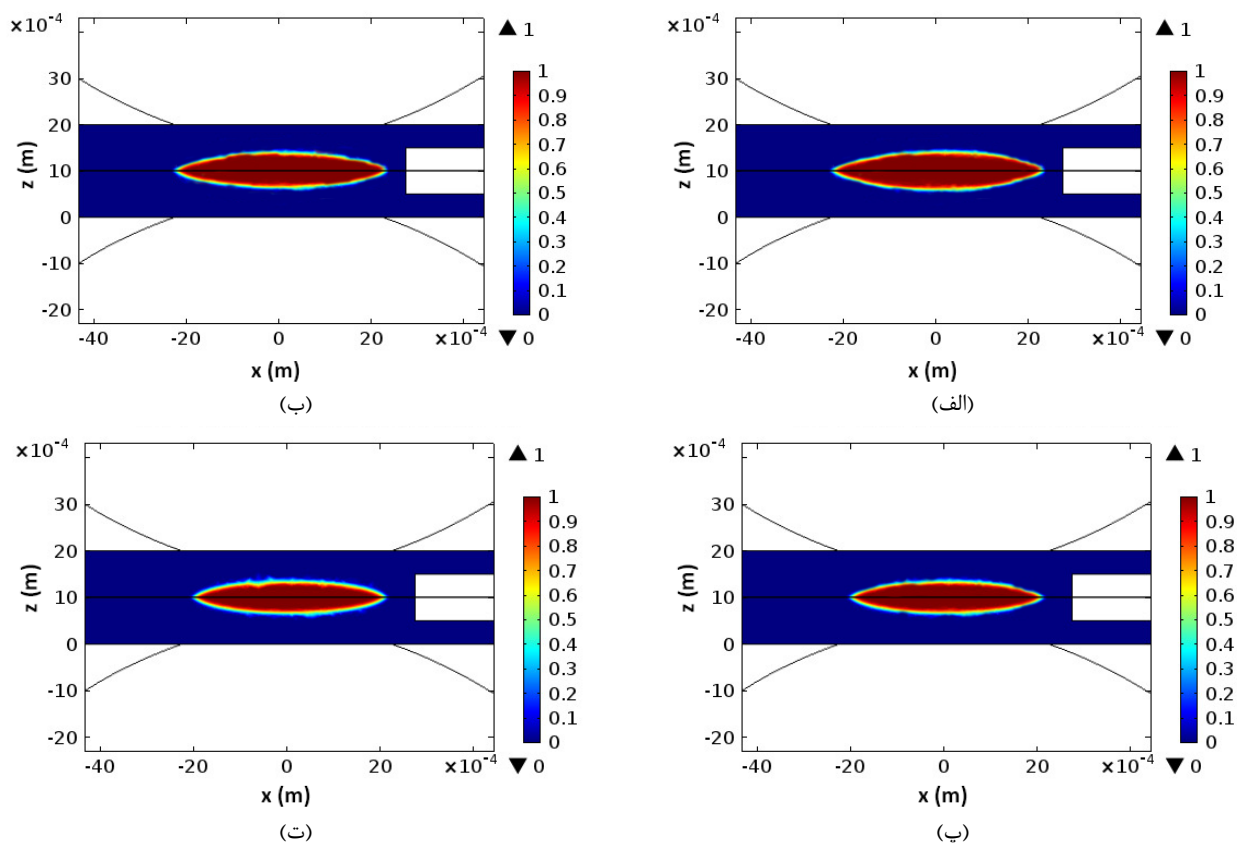
۳-۴- تأثیر بازه زمانی بین جوش بر هندسه دکمه جوش

طبق شکل ۱۸ و شکل ۱۹، کاهش t_1 تأثیر ناچیزی بر هندسه قطعه داشته است. اگرچه تفاوت جزئی بین قطرهای تشکیل شده توسط هر t_1 وجود دارد، بازه کوتاه‌تر به دکمه جوش بزرگ‌تری منجر شده است. تفاوت جزئی در هندسه نیز در ریزنگارها قابل مشاهده است (شکل ۱۷). ممکن است دلیل این موضوع مجدداً به اثر ضعیف‌تر شار فرعی برای بازه کوتاه‌تر مرتبط باشد. اگرچه فاصله کوتاه جوش ممکن است باعث تقویت اثر شار فرعی شود، لیکن انتخاب مناسب پارامترهای جوش بر اساس طراحی آزمایش در مطالعه قبلی [۲۰] شرایط را برای کاهش شنیتینگ بهینه کرده است. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کوتاه شدن فاصله زمانی اثر قابل توجهی بر هندسه قطعه نداشته است.

جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، از پارامتر بدون بعد نسبت قطر (R_D) نیز استفاده شده است. این نسبت نمایش‌دهنده نسبت قطر دکمه جوش برای هر زمان بین جوشی، بر قطر بیشترین زمان بین جوشی (t_{14}) می‌باشد. این مقادیر به همراه مقادیر کمی قطر دکمه جوش در جدول ۹ اشاره شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، طبق آنچه که گفته شد، بیشترین R_D به کوچک‌ترین زمان بین جوشی مربوط می‌شود، در حالیکه این مقدار برای t_{13} به مقدار نزدیک زیر ۱ رسیده است و بیان‌کننده این موضوع است که تأثیر کاهش زمان بین جوشی بر قطر تا پیش از t_{13} می‌باشد. به بیان دیگر، افزایش زمان بین جوشی بیشتر از t_{13} تأثیر مثبت این زمان را بر کیفیت و استحکام نقطه جوش کاهش می‌دهد. همانطور که در جدول ۹ نیز مشاهده می‌شود، تأثیر زمان بین جوشی بر افزایش استحکام نقطه جوش اندک بوده است که این موضوع به مواردی مانند جنس قطعه‌کار، جریان الکتریکی مورد استفاده، و مدت زمان جوشکاری نیز وابسته بوده است و نمی‌توان تنها عامل مؤثر را زمان بین جوشی دانست. در واقع ترکیب صحیح پارامترهای اصلی جوشکاری به همراه زمان بین جوشی، نتایج قوی‌تری را در این زمینه ارائه خواهد داد.



شکل ۱۸ قطر و ارتفاع دکمه جوش تحت اثر شار فرعی برای هر بازه زمان



شکل ۱۹ کسر حداکثر فاز مذاب، پیش از قطع جریان الکتریکی جوشکاری، با فاصله جوشکاری ۵ میلی‌متر و بازه زمانی بین جوشی الف) t_1 ، ب) t_2 ، پ) t_3 ، ت) t_4

جدول ۹ تأثیر زمان بین جوشی بر نسبت قطر دکمه جوش

نسبت قطر دکمه جوش (R_D)	قطر دکمه جوش (mm)	زمان بین جوشی
1.010	4.23	t_{11}
1.005	4.21	t_{12}
1	4.19	t_{13}
1	4.19	t_{14}

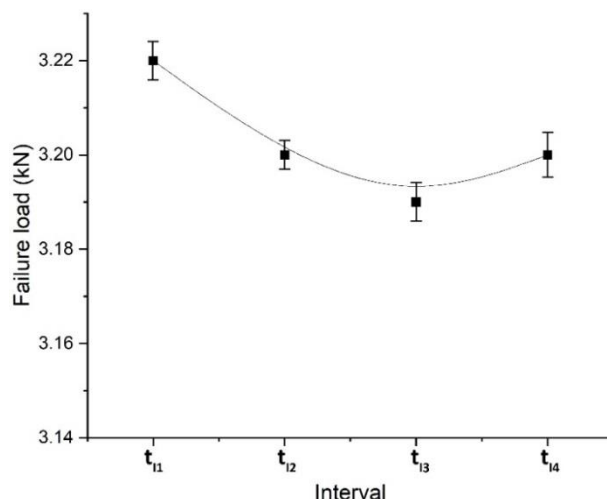
۳-۵- نتایج آزمون کشش-برش

همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده شد، اثر شار در کاهش استحکام کششی-برشی نیز موثر بوده است. در تحلیل ریزساختار دکمه جوش و منطقه متأثر از حرارت (شکل ۱۷) نیز گفته شد که کاهش دما رسانایی الکتریکی را هم در قطعه کار و هم در سطح تماس افزایش داده است. رسانایی الکتریکی تماسی بالاتر، اثر گرمایش ژول را کاهش داده، در نتیجه احتمال کاهش استحکام اتصال را افزایش داده است، زیرا انرژی حرارتی کمتری برای تشکیل جوش نقطه‌ای استفاده شده است. علاوه بر این، ابعاد قطعه (شکل ۱۸ و شکل ۱۹) اندکی تحت تأثیر این اثر قرار گرفته است. اگرچه تفاوت در ابعاد دکمه جوش قابل توجه نیست، با این ادعا مطابقت دارد. منبع عدم قطعیت برای اندازه‌گیری نیروی شکست می‌تواند به مقدار کوچک این نیرو در مقابل ظرفیت باری دستگاه آزمون کشش (۲۵۰ کیلو نیوتن) مرتبط باشد که تا حدودی بر تکرارپذیری دستگاه آزمایش تأثیر گذاشته است.

جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، از پارامتر بدون بعد نسبت گسیختگی بار (R_F) نیز استفاده شده است. این نسبت نمایش‌دهنده نسبت گسیختگی بار برای هر زمان بین جوشی، بر بیشترین زمان بین جوشی (t_{14}) می‌باشد. این مقادیر به همراه مقادیر کمی بار گسیختگی در جدول ۱۰ اشاره شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، طبق آنچه که گفته شد، بیشترین R_F به کوچک‌ترین زمان بین جوشی مربوط می‌شود، در حالیکه این مقدار برای t_{13} به مقدار نزدیک زیر ۱ رسیده است و بیان‌کننده این موضوع است که تأثیر

کاهش زمان بین جوشی بر بار گسیختگی تا پیش از t_{13} می‌باشد. به بیان دیگر، افزایش زمان بین جوشی بیشتر از t_{13} تأثیر مثبت این زمان را بر کیفیت و استحکام نقطه جوش کاهش می‌دهد.

همانطور که در جدول ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، تأثیر زمان بین جوشی بر افزایش استحکام نقطه جوش اندک بوده است که این موضوع به مواردی مانند جنس قطعه کار، جریان الکتریکی مورد استفاده، و مدت زمان جوشکاری نیز وابسته بوده است و نمی‌توان تنها عامل مؤثر را زمان بین جوشی دانست. در واقع ترکیب صحیح پارامترهای اصلی جوشکاری به همراه زمان بین جوشی، نتایج قوی‌تری را در این زمینه ارائه خواهد داد.



شکل ۲۰ نیروی گسیختگی ر مقابل بازه زمانی بین جوشی به دست آمده بر اساس آزمون برش-کشش

جدول ۱۰ تأثیر زمان بین جوشی بر نسبت بار گسیختگی

نسبت بار گسیختگی (R_F)	بار گسیختگی (kN)	زمان بین جوشی
1.006	3.221	t_{11}
1	3.201	t_{12}
0.997	3.191	t_{13}
1	3.199	t_{14}

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر فاصله زمانی بین دو نقطه جوش بر روی اتصالات نقطه جوش مقاومته ورق‌های AA-2219 ارزیابی شده است. در همین راستا رفتار متالورژیکی و مکانیکی اتصال نهایی به صورت تجربی و عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل المان محدود برای بررسی جنبه‌های الکتریکی و حرارتی این پدیده برای به دست آوردن تاریخچه و توزیع دمای نقطه جوش نهایی، جهت اعتبارسنجی تجربی استفاده شده است. فاصله زمانی به عنوان متغیر اصلی برای دو قطعه متوالی با فاصله جوش ۵ میلی متر با مقادیر ۱/۵ و ۱/۵ ثانیه انتخاب شده است. بنابراین ریزساختار و استحکام کششی - برشی نقطه جوش نهایی ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که فاصله طولانی‌تر منجر به تغییرات دمای پیش‌گرم، سرعت خنک‌سازی کمی سریع‌تر، استحکام برشی کششی کمتر (۰/۶ درصد)، توزیع نامتقارن منطقه متأثر از حرارت (۱۵ درصد) به دلیل تشدید اثر شار فرعی، قطر و ارتفاع کوچک‌تر دکمه جوش (به ترتیب ۲ و ۳ درصد) شده است؛ در حالی که فاصله زمانی کوتاه‌تر منجر به کاهش اثر شار فرعی، پیش‌گرم نسبی، استحکام کششی بیشتر، پخش متقارن‌تر منطقه متأثر از حرارت و دکمه جوشی بزرگ‌تر شده است. موارد زیر نیز به عنوان سایر نتایج به دست آمده قابل ذکر است:

- کوتاه شدن فاصله زمانی باعث افزایش دمای اولیه نقطه جوش بعدی شده است که در نتیجه آن هدایت الکتریکی مسیر جریان الکتریکی را کاهش داد. این موضوع در نهایت به دلیل رسانایی پائین‌تر مسیر شار فرعی، جریان شار فرعی را کاهش شده است. مهم‌ترین نتیجه حاصل از این امر، ارتقای کیفیت اتصال به واسطه کاهش اثر شار فرعی و تمرکز بهتر انرژی حرارتی روی نقطه جوش نهایی بوده است.

- به دلیل تبادل حرارت بیشتر با الکترودها در محور مرکزی، دما برای طرفین نقطه جوش فعلی در مقایسه با مرکز نقطه جوش، بیشتر افزایش یافته است.
- مقادیر بالاتر دمای اولیه به دلیل کوتاه شدن فاصله زمانی، پیش گرم مختصری را برای نقطه جوش بعدی ایجاد نموده است که در نتیجه به عنوان یک عامل کمکی برای افزایش انرژی گرمایشی منجر به جوش عمل نموده است.
- با مقایسه تمام بازه‌های زمانی، t_{11} سرعت کاهش دمای کمتر داشته است که می‌تواند به عنوان پارامتر مناسبی در نظر گرفته شود.
- با در نظر گرفتن دماهای به‌دست‌آمده برای هر t_1 ، رابطه‌ای غیرخطی بین دمای پیش‌گرم نهایی (T_{FP}) و بازه زمانی (t_1) به دست آمده است که کاهش تأثیر بازه‌های زمانی طولانی‌تر از t_{13} را بر T_{FP} نشانده داده است.
- کوتاه نمودن بازه زمانی، تأثیر اندکی بر افزایش ابعاد نقطه جوش داشته است که ممکن است به دلیل کاهش اثر شار فرعی در زمان‌های کوتاه باشد.

References

- [1] Hard AR. „Preliminary test of spot weld shunting in 24ST Alclad”. *Welding Journal*. 1948;27(6):491-5.
- [2] Chang HS, Cho HS. A study on the shunt effect in resistance spot welding. *Welding Journal*. 1990 Aug 1;69(8):308-16.
- [3] Senkara JA, Zhang H. Cracking in spot welding aluminum alloy AA5754. *WELDING JOURNAL-NEW YORK*-. 2000 Jul 1;79(7):194-s.
- [4] Zhang H, Senkara J, Wu X. Suppressing cracking in resistance welding AA5754 by mechanical means. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2002 Feb 1;124(1):79-85.
- [5] Wang B, Lou M, Shen Q, Li YB, Zhang H. Shunting effect in resistance spot welding steels—part 1: experimental study. *Welding Journal*. 2013 Jun 1;92(6):182s-9s.
- [6] Xing B, Xiao Y, Qin QH. Characteristics of shunting effect in resistance spot welding in mild steel based on electrode displacement. *Measurement*. 2018 Feb 1;115:233-42. doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.049
- [7] Yang Y, Li Y, Bi J, Liu H, Ao S, Luo Z. Microstructure and mechanical properties of 2195/5A06 dissimilar joints made by resistance spot welding. *Materials Characterization*. 2022 Sep 1;191:112147. doi: 10.1016/j.matchar.2022.112147
- [8] Raj S, Biswas P. Effect of induction preheating on microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar material joints of Inconel 718 and SS316L. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023 Apr 1;41:160-79. doi: 10.1016/j.cirpj.2022.12.014
- [9] Bamberg P, Gintrowski G, Liang Z, Schiebahn A, Reisinger U, Precoma N, Geffers C. Development of a new approach to resistance spot weld AW-7075 aluminum alloys for structural applications: an experimental study—Part 1. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Nov 1;15:5569-81. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.10.142
- [10] Lv TL, Rao YZ, Zhang QX, Xia YJ, Lin Y, Wu F, Li YB, Yan DJ. Effect of storage time on the surface status and resistance spot weldability of TiZr pretreated 5182 aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022 Sep 1;81:166-76. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.06.058
- [11] Li YB, Wang B, Shen Q, Lou M, Zhang H. „Shunting effect in resistance spot welding steels—part 2: theoretical analysis”. *Welding Journal*. 2013 Aug;92(8):231s-8s.
- [12] Shen J, Zhang Y, Lai X, Wang PC. Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets. *Materials & Design*. 2011 Feb 1;32(2):550-60.
- [13] Nied H. The finite element modeling of the resistance spot welding process. *Weld. J.* 1984 Apr;63(4):123.
- [14] Zhang W. Design and implementation of software for resistance welding process simulations. *SAE transactions*. 2003 Jan 1:556-64.
- [15] Dai W, Li D, Zheng Y, Wang D, Tang D, Wang H, Peng Y. Online quality inspection of resistance spot welding for automotive production lines. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022 Apr 1;63:354-69. doi: 10.1016/j.jmsy.2022.04.008
- [16] Jafari Vardanjani M, Araee A, Senkara J, Jakubowski J, Godek J. Metallurgical effects of shunting current on resistance spot-welded joints of AA2219 sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016 Aug;25:3506-17.
- [17] Jafari Vardanjani M, Araee A, Senkara J, Jakubowski J, Godek J. Theoretical analysis of shunting effect in resistance spot welding (RSW) of AA2219. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2016 Nov 16;39(8):907-18.

- [18] Jafari Vardanjani M, Senkara J. Effect of multi-pulsed current mechanism on shunting current in resistance spot welding (RSW) of AA-2219 sheets. *Experimental Techniques*. 2021:1-5.
- [19] Jafari Vardanjani M, Senkara J. A theoretical analysis of vibrational stress relief in AISI 1008 as a mechanical treatment. *Archive of Mechanical Engineering*. 2021;64(4):353-74.
- [20] Jafari Vardanjani M, Araee A, Senkara J, Jakubowski J, Godek J. Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of Al2219 sheets. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2016;64(2):425-34.
- [21] Jafari Vardanjani M, Araee A, Senkara J, Sohrabian M, Zarandooz R. Influence of shunting current on the metallurgical and mechanical behaviour of resistance spot-welded joints in AA2219 joints. *Strojnicki vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. 2016;62(11):625-35.
- [22] Bahmani A, Feizollahi V, Ashiri R. Characterization of physical metallurgy of quenching and partitioning steel in pulsed resistance spot welding: A simulation-aided study. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2024 Nov 1;10:100264. doi: [10.1016/j.jajp.2024.100264](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100264)
- [23] Li M, Tao W, Zhang J, Wang Y, Yang S. Hybrid resistance-laser spot welding of aluminum to steel dissimilar materials: Microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 2022 Sep 1;221:111022. doi: [10.1016/j.matdes.2022.111022](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111022)
- [24] Mirzaloo M, Modabberifar M, Taheri M, Alighoorchi I, Karian A. Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Jul 23;8(5):23-9. [In Persian]
- [25] Jafarpour M, Jafari M, Shahriari B. Experimental study of the shunting effect on tensile-shear strength of resistance spot welds in AA2219 sheets. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Mar 16;8(12):44-50.
- [26] Hamed M, Eisazadeh H, Esmailzadeh M. Numerical simulation of tensile strength of upset welded joints with experimental verification. *Materials & Design (1980-2015)*. 2010 May 1;31(5):2296-304.
- [27] Mirzaahmadi S, Afshari D, Barsoum Z. Investigating the effect of material properties on simulation of Mg alloy resistance spot welding process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Apr 21;6(1):53-60. [In Persian]
- [28] Sun X, Dong P. Analysis of aluminum resistance spot welding processes using coupled finite element procedures. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*. 2000 Aug 1;79(8):215-S.
- [29] Zhang H, Senkara J. *Resistance welding: fundamentals and applications*. CRC press; 2011 Dec 13.
- [30] Afshari D, Ghaffari A, Barsoum Z. Optimization of welding parameters in resistance spot welding of AZ61 Mg alloy. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018 Nov 22;5(3):44-51. [In Persian]
- [31] Liu X, Wei Y. Direct finite element analysis of the stress evolution and interaction in resistance spot welding with multiple processes and multiple spots based on reverse engineering technology. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Aug;29:5490-502.
- [32] Sessler J, Weiss V. *Materials data handbook-aluminum alloy 2219*. 1966 Mar 1.
- [33] Committee AIH. *ASM Handbook: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. ASM International; 1990.
- [34] Jafari Vardanjani M, Ghayour M, Homami RM. Analysis of the vibrational stress relief for reducing the residual stresses caused by machining. *Experimental Techniques*. 2016 Apr;40:705-13.
- [35] Vogler M, Sheppard S. Electrical contact resistance under high loads and elevated temperatures. *surfaces*. 1993;9(10):11.
- [36] Weisman C, Kearns WH, editors. *Welding Handbook: Metals and their weldability*. American Welding Society; 1976.
- [37] Welding ACoR, Society AW, Committee AWSTA, Institute ANS. AWS C1. 1M/C1. 1-2000, Recommended Practices for Resistance Welding: American Welding Society; 2000.
- [38] Nadimi N, Pouranvari M. Understanding interfacial failure mechanisms of advanced high strength automotive steels resistance spot welds under opening-mode loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025 Jan 23;313:110627. doi: [10.1016/j.engfracmech.2024.110627](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110627)
- [39] Bharaj AS, Shukla S, Gedam S, Kukde R, Verulkar S. Study of resistant spot welding and its effect on the metallurgical and mechanical properties _ a review. *Materials Today: Proceedings*. 2023 May 16. doi: [10.1016/j.matpr.2023.04.650](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.650)
- [40] Lumley RN. *Heat Treatment of Aluminum Alloys*. In: Hetnarski RB, editor. *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2014.
- [41] Singh R, Choudhary A, Arora N. Employing the electrode of different diameters to join dissimilar Al-Cu thin sheets using resistance spot welding. *Manufacturing Letters*. 2024 Oct 1;41:457-61. doi: [10.1016/j.mfglet.2024.09.055](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.055)