علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، پاییز و زمستان 1396، صفحه 48-33

بکارگیری مدل جدید مقاومت تماسی جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال ورق Hastelloy X در جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک

مهدی آتش پروا ، محسن حامدی

گروه دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت مقاله: 1395/10/23 ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: 1396/04/07)

چکیده

امروزه به دلیل نیاز به کوچک سازی، جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک مورد علاقه قرار گرفته است. فاکتور تعیین کننده در اندازه دکمه جوش مقاومت تماسی می باشد. در این مقاله یک رابطه ی جدید برای محاسبه ی مقاومت تماسی الکتریکی ارائه شده است. مدل حاضر می تواند محدوده های دمایی و اندازه ی دکمه جوش را پیش بینی نماید. جهت تصدیق مدل، Set up جوشکاری ساخته شد و آزمایش ها با استفاده از ورق های Hastelloy X انجام گردید. تحلیل DOE جهت بررسی تأثیر متغیرها بر قطر، بیشترین نیروی کششی و ارتفاع جوش انجام شد. مشخص گردید که افزایش جریان و زمان تا مقدار مشخصی باعث افزایش رشد دکمه جوش می شوند، اما افزایش نیرو باعث کاهش قطر خواهد شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک، مقاومت تماسی الکتریکی، قطر ناگت، طراحی آزمایش ها، سوپر آلیاژ پایه نیکل.

Using a New Contact Resistance Model for Investigating Mechanical Properties of Hastelloy X Welded Joints in Small Scale Resistance Spot Welding

M. Atashparva* , M. Hamedi

School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received 12 January 2017 ; Accepted 28 June 2017)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m_atashparva@ut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

Abstract
Nowadays, due to the need for miniaturization, small scale resistance spot welding is of interest. The key factor that determines the nugget size is contact resistance. In this paper a new equation is provided to calculate the electrical contact resistance. The model can predict the high temperature contours and the nugget configuration efficiently. Also, a set-up was constructed to verify the model and investigate the effects of parameters on the mechanical properties of Hastelloy X welded joints. DOE analysis is done to recognize the effect of parameters on the nugget diameter, maximum load, and nugget height. It was concluded that the size of the nugget enlarges by increasing welding current and time. The nugget diameter decreases with increase of force.

Keywords: Small scale resistance spot welding; Electrical contact resistance; Nugget diameter; Design of experiments; Hastelloy X

فهرست علامت ها

نماد	متغیر	شماره رابطه	واحد
a	شعاع نقطه ی تماسی	(۵)	متر *(m)*
A_b	سطح تحمل کننده ی بار	(۷)	متر مربع *(m^2)*
c	ظرفیت گرمایی ویژه	(۱۳)	ژول بر کیلوگرم درجه کلوین *(J/kgK)*
F	نیرو (بار)	(۳)	نیوتن*(N)*
H	سختی	(۳)	نیوتن بر متر مربع *(N/m^2)*
I	جریان الکتریکی	(۱)	آمپر *(A)*
k	رسانایی (هدایت) حرارتی	(۱۳)	وات بر متر درجه کلوین *(W/mK)*
n	تعداد نقاط تماسی	(۳)	بدون بعد
q	نرخ تولید حرارت ژول به ازای حجم واحد	(۱۳)	وات بر متر مکعب *(W/m^3)*
Q	حرارت	(۱)	ژول *(J)*
r	مؤلفه ی شعاعی مختصات	(۱۲)	بدون بعد
R	مقاومت الکتریکی	(۱)	اهم*(Ω)*
R_B	مقاومت جسمی	(۲)	اهم*(Ω)*
R_C	مقاومت تماسی	(۳)	اهم*(Ω)*
R_F	مقاومت فیلم	(۲)	اهم*(Ω)*
R_s	مقاومت Constriction	(۲)	اهم*(Ω)*
t	زمان	(۱)	ثانیه*(s)*
T	دما	(۹)	کلوین *(K)*
V	پتانسیل الکتریکی (ولتاژ)	(۱۲)	ولت *(V)*
z	مؤلفه ی محوری مختصات	(۱۲)	بدون بعد
ξ	فاکتور فشار	(۳)	بدون بعد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

ρ	مقاومت ویژه ی الکتریکی	(۳)	اهم متر (Ωm)
ρ^*	مقاومت الکتریکی وابسته به دما	(۱۲)	اهم متر (Ωm)
ρ'	چگالی ماده	(۱۳)	کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3)
ρ_f	مقاومت ویژه ی فیلم	(۱۱)	اهم متر (Ωm)
ρ_t	مقاومت فیلم به ازای سطح واحد (مقاومت ویژه ی تونلی)	(۴)	اهم متر مربع (Ωm^2)
σ_y	استحکام تسلیم	(۸)	نیوتن بر متر مربع (N/m^2)
τ	شعاع هالم	(۵)	متر (m)

1- مقدمه

جوشکاری مقاومتی شاخه ای از صنعت جوشکاری است که در آن حرارت توسط مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی به وجود می آید [1]. علاوه بر کاربردهای جوشکاری مقاومتی نقطه ای در مقیاس بزرگ، علاقه به جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک برای اتصال ورق های فلزی نازک نیز به دلیل نیاز به کوچک سازی در صنایع شدت گرفته است. کاربرد این نوع از جوشکاری در وسایل الکترونیکی خودرو، اجزاء ارتباط از راه دور و محصولات پزشکی می باشد. قانون حرارت ژول اصلی ترین منبع تولید حرارت در جوشکاری مقاومتی است:

$$Q = \int_0^t R(t).I^2(t).dt \qquad (1)$$

مقاومت کل در جوشکاری مقاومتی نقطه ای که مقاومت دینامیک نیز نامیده می شود شامل مقاومت جسمی و مقاومت تماسی است. مقاومت تماسی خود از دو مقاومت تشکیل شده است: مقاومت Constriction و مقاومت فیلم سطحی. بنابراین می توان برای مقاومت کل رابطه ی زیر را بیان نمود:

$$R = R_S + R_F + R_B \qquad (2)$$

مقاومت جسمی با استفاده از رابطه ی معروف $\rho l/A$ محاسبه می شود. برای محاسبه ی مقاومت تماسی تاکنون حدود پانزده مدل گوناگون ارائه شده است. حامدی و آتش پروا [2] در مقاله ای که در سال 2017 به چاپ رسید به مرور کلیه ی مدل‌های موجود برای محاسبه ی مقاومت تماسی الکتریکی در جوشکاری مقاومتی نقطه ای پرداختند. آنها همچنین یک مقایسه کامل و جامع بین این مدل ها انجام داده و نقاط ضعف و قوت مدل های گوناگون را بررسی کردند.

در فلزهایی با سطوح تمیز مقاومت تماسی که با مقاومت Constriction برابر است [1 و 3] از رابطه ی زیر تبعیت می کند [4]:

$$R_C = 0.89\,\rho(\xi H / nF)^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

برای فلزات با فیلم یا آلودگی سطحی، مقاومت تماسی برابر با مقاومت Constriction به اضافه ی مقاومت فیلم است. مقاومت فیلم می تواند به صورت زیر نوشته شود [3 و 4]:

$$R_F = \rho_t \xi H / F \qquad (4)$$

ژائو و همکاران [5] تأثیر متغیرهای جوشکاری روی کیفیت جوش و بهینه سازی آنها در جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک را مورد بررسی قرار دادند. همچنین تأثیر پارامترهای کلیدی جوشکاری شامل زمان رمپ، زمان نگه داشتن، زمان جوشکاری، جریان جوشکاری و نیروی الکترود در جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک بر روی جوش پذیری فویل های نازک Ti-1Al-1Mn با ضخامت 0.05 mm توسط چن و همکاران [6] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در این تحقیق یک اتصال تکی لبه روی هم انجام شد تا ویژگی های مکانیکی اتصال جوش توسط تست

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

کشش- برش به همراه شناسایی شکل جوش، میکروساختار، میکروسختی و توزیع عناصر برآورد شود. نتایج بررسی مشخص کرد تغییرات شکل جوش با پارامترهای جوشکاری نسبت به جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس بزرگ کاملاً متفاوت است. در مطالعه ای که توسط لوئو و همکاران [7] انجام شد تغییرات جریان جوشکاری و ولتاژ الکترود به صورت بلادرنگ کنترل گردید. مطابق با آن، تغییرات مقاومت دینامیک بین الکترودها به دست آمده و در طول فرآیند جوشکاری تحلیل شد تا نحوه ی رشد ناگت شناسایی شود. انواع مختلف رشد ناگت منحنی های گوناگونی از مقاومت دینامیک را نشان دادند، که وسیله ی مفیدی برای برآورد رشد ناگت و کیفیت آن است. همچنین لوئو و همکاران [8] مطابق با جریان جوشکاری و ولتاژ الکترود، مقاومت دینامیک را محاسبه کرده و اثر حرارت رشد ناگت در فرآیند شکل گیری ناگت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که جریان جوشکاری که انرژی لازم برای رشد ناگت را فراهم می کند، یک رابطه ی خطی با مقاومت دینامیک میانگین و از آن مهم تر یک رابطه ی چند جمله ای با حرارت مقاومت دینامیک دارد. مشخص شد هنگامی که حرارت مقاومت دینامیک افزایش یابد، قطر ناگت و استحکام کششی- برشی جوش نقطه ای بالا می رود.

مقاله ی چن و همکاران [9] یک روش جمع آوری و ارزیابی اطلاعات بر اساس کنترل لحظه ای را برای کیفیت جوش در آلیاژهای جوشکاری نقطه ای شده ی تیتانیم مطرح کرد. در این مطالعه از طریق کسب اطلاعات به صورت بلادرنگ و تحلیل پارامترهای جوشکاری، ویژگی های سیگنال به دست آمده استخراج گردید تا امکان دستیابی کیفیت قابل اعتماد در فرآیند جوشکاری فراهم گردد. وان و همکاران [10] مطالعه ای با هدف توسعه ی یک سیستم کنترل کیفیت مؤثر در جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک بر اساس مقاومت دینامیک انجام دادند و متوجه شدند که تغییرات مقاومت دینامیک با فرآیند شکل گیری ناگت مرتبط است.

علیرغم این که پارامترهای زیادی در کیفیت جوش های مقاومتی نقطه ای تأثیرگذارند اما تغییرات مقاومت الکتریکی دینامیک باید به صورت کامل شناخته شود زیرا اغلب از آن برای کنترل فرآیند جهت دستیابی به کیفیت جوش خوب استفاده می شود. مدل های قبلی ارائه شده جهت محاسبه ی مقاومت، هر یک به بررسی یک یا چند عامل از پارامترهای مختلف پرداخته اند که اکثر این تحقیقات بر روی ورق های فولادی و یا آلومینیومی و در مقیاس بزرگ بوده اند. برخی از مدل ها از فرض های بیش از حد ساده سازی شده استفاده کرده اند. در گذشته از مدل های تفاضل محدود استفاده می شد اما مشخص شد که معایب روش تفاضل محدود از شبیه سازی دقیق فرآیند جلوگیری می نماید. در حالی که روش های اجزاء محدود می توانند پدیده های فیزیکی موجود در فرآیند و اثر متقابل آنها را به شکلی واقعی تر مدل نمایند. در برخی از مطالعات قبلی فرآیند جوشکاری به عنوان یک فرآیند الکتریکی- حرارتی در نظر گرفته شده است، اما تأثیر تغییرشکل مکانیکی نقش کلیدی در فرآیند جوشکاری دارد. برخی دیگر از کارها خصوصیات مواد را ثابت در نظر گرفته و فقط فرآیند جوشکاری را به عنوان یک مسئله ی انتقال حرارت تعریف کرده اند. این در حالیست که تقریباً تمامی خصوصیات مواد به صورت تابعی از دما تغییر می کنند. در مجموع در مطالعات گذشته مقاومت تماسی در سطح مشترک به خوبی تعریف نشده است، هرچند چندین مدل در ارتباط با مقاومت تماسی نیز توسعه داده شده اند ولی تقریباً تمامی نگرش ها با استفاده از سعی و خطا به دست آمده اند و روابط به دست آمده تجربی می باشند.

برخی از مدل ها اصلاً از مقاومت تماسی در تحلیل های خود استفاده نکرده اند و برخی دیگر با صرف نظر کردن از مقاومت فیلم فقط به مدلسازی مقاومت Constriction بسنده کرده اند. در ضمن بسیاری از مدل های ارائه شده برای محاسبه ی مقاومت تماسی نیاز به تعداد و اندازه ی نقاط تماسی دارند، حال آن که در واقعیت به دست آوردن اطلاعات در مورد اندازه، تعداد و توزیع برجستگی های تماسی خیلی مشکل است. اگرچه مدت هاست که بررسی های تئوری انجام می شود، یک مدل مقاومت دینامیک مفید هنوز ارائه نشده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

به دلیل پیچیدگی مطالب، متغیر بودن نتایج آزمایش ها و در دسترس نبودن تجهیزات جوشکاری مقاومتی مقیاس کوچک، کمبود تحقیقات به خصوص در زمینه ی مقاومت تماسی بسیار مشهود است. در مجموع کارهای تجربی قبلی اگرچه دانش مقاومت تماسی در جوشکاری مقاومتی را مهیا می کنند اما جهت ایجاد یک مدل ریاضی که بتواند در شبیه سازی عددی استفاده شود کافی نیستند. با توجه به توضیحات فوق، انگیزه ی لازم جهت مطالعه ی مقاومت های فیلم و Constriction در جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک ایجاد گردید. به همین دلیل ابتدا روابط تحلیلی برای محاسبه ی مقاومت تماسی ارائه شده و سپس شبیه سازی سه بعدی فرآیند با استفاده از روابط جدید انجام می شود. از آنجا که دستگاه های SSRSW در کشور وجود نداشته و بسیار گران قیمت می باشند، طراحی و ساخت یک Set up جهت انجام آزمایش های تجربی نیز ضروری می باشد. با توجه به اهمیت آلیاژ Hastelloy X در صنعت از این سوپرآلیاژ جهت انجام آزمایش ها استفاده خواهد شد.

2-تحلیل تئوری

با در نظر گرفتن تعداد زیادی نقطه ی دایره ای با شعاع مساوی که به صورت یکنواخت در سرتاسر یک ناحیه ی دایره ای با شعاع τ توزیع شده اند مقاومت Constriction توسط هالم به صورت زیر بیان گردید که a شعاع نقاط می باشد:

$$R_S = \rho(\frac{1}{2na} + \frac{1}{2\tau}) \quad (5)$$

در این معادله دو ترم وجود دارد. ترم اول ناشی از مقاومت Constriction تمامی نقاط به صورت موازی می باشد در حالی که ترم دوم به واسطه ی اثر متقابل نقاط است. رابطه ی (5) به ندرت استفاده می شد تا این که گرینوود [11] درستی آن را مشخص نمود.

همچنین اثبات شد این فرمول می تواند با تقریب خوبی به نقاط نابرابر که در یک گروه تکی قرار دارند تعمیم داده شود و a میانگین شعاع نقاط به صورت $\sum a_i/n$ تعریف گردید. همچنین τ به عنوان شعاع هالم نامگذاری شد. این تأکید می کند که تعداد و توزیع فضایی نقاط جهت ارزیابی مقاومت Constriction در بسیاری از کاربردهای مهندسی که تماس الکتریکی به صورت قابل قبولی در کل ناحیه ی ظاهری یکنواخت است، خیلی مهم نیست.

بعدها بسیاری از محققان دیگر نیز به صورت تجربی دریافتند که مقاومت تماسی توسط محل نقاط به شکل مهمی تحت تأثیر قرار نمی گیرد و توزیع نقاط، مقاومت Constriction را خیلی تحت تأثیر قرار نمی دهد. برای تعداد زیادی از نقاط که در شعاع هالم τ توزیع شده اند فرمول (5) می تواند به صورت زیر تقریب زده شود [11]:

$$R_S = \rho / 2\tau \quad (6)$$

در این مورد شعاع هالم برای ارزیابی مقاومت تماسی کافی است. مقدار τ می تواند با استفاده از سطحی که بار را تحمل می کند به دست آید:

$$A_b = \pi\tau^2 \rightarrow \tau = \sqrt{A_b/\pi} \quad (7)$$

این فرض صحیح است زیرا هنگامی که بار تا حد نهایی خود افزایش می یابد تعداد نقاط تماسی زیاد خواهند شد تا این که سرانجام به یکدیگر پیوسته و یک ناحیه ی واحد را به وجود می آورند.

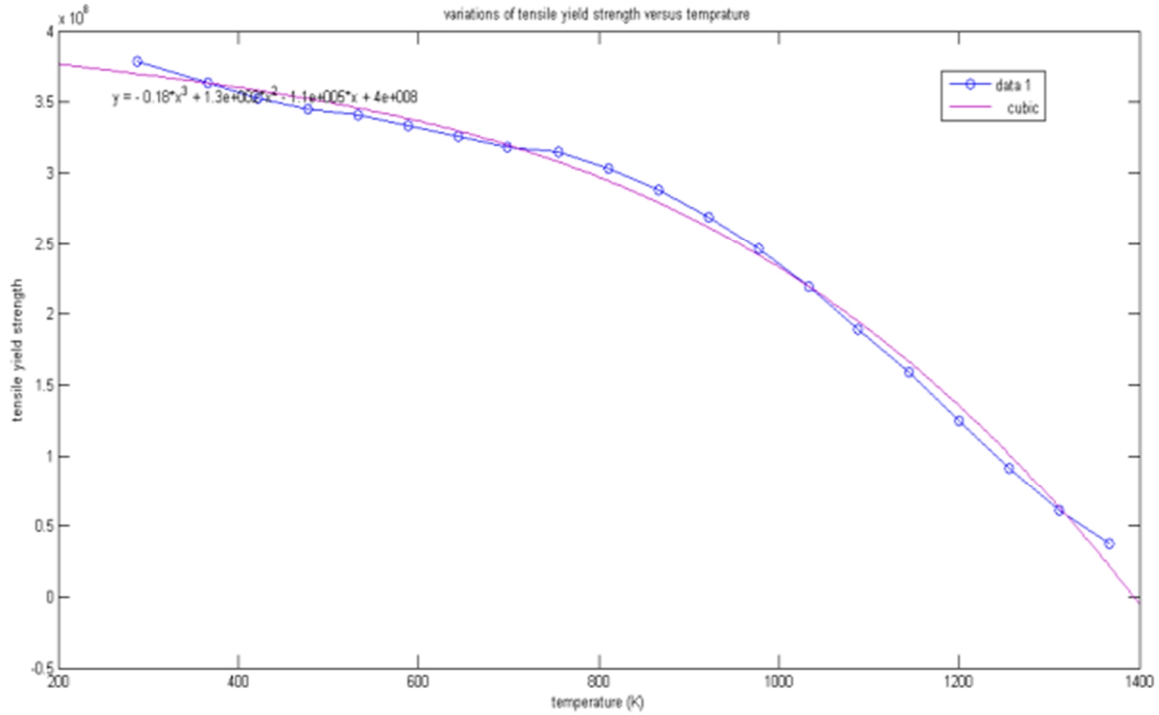
همچنین در این حالت در برجستگی های تماسی تسلیم رخ خواهد داد. ناحیه ی تحمل کننده ی بار توسط رابطه زیر به مقدار بار اعمالی در سطح تداخل و تنش تسلیم ماده مرتبط خواهد شد.

$$F = A_b\sigma_y \rightarrow A_b = F/\sigma_y \quad (8)$$

قابل ذکر است تنش تسلیم خود می تواند به صورت تابعی از دما، یا با استفاده از منحنی تنش- کرنش به صورت تابعی از بارگذاری بیان گردد. در کار حاضر با استفاده از نمودار تنش بر حسب دمای موجود در هندبوک ها یک رابطه ی درجه 3 برای σ_y جهت استفاده در روابط استخراج شده است که در رابطه (9) قابل مشاهده است (شکل (1)).

$$\sigma_y = -0.18 * T^3 + 1.3e^2 * T^2 - 1.1e^5 * T + 4e^8 \quad (9)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]



شکل1- تغییرات تنش تسلیم Hastelloy X برحسب دما به صورت تابع درجه 3

با ترکیب رابطه های (8) – (6) می توان مقاومت Constriction را به صورت زیر بیان نمود:

$$R_S = \frac{\rho}{2\tau} = \frac{\rho}{2\sqrt{A_b/\pi}} = \frac{\rho}{\sqrt{4F/\pi\sigma_y}} = \rho\sqrt{\pi\sigma_y/4F} \quad (10)$$

مزیت رابطه ی فوق این است که نیازی به اطلاعات در مورد تعداد نقاط تماسی، اندازه و شکل و همچنین نحوه ی توزیع آنها نخواهد بود. بدیهی است که F مقدار حداکثر بار است زیرا مقاومت Constriction زمانی به وجود می آید که جریان از قطعه ها عبور کند، که در این زمان مقدار نیرو به حداکثر مقدار خود رسیده است. برای یک سطح واقعی یک مقاومت دیگر نیز لازم است که ناشی از حضور فیلم می باشد. فرض می شود تأثیر فشار روی مقاومت فیلم همانند تأثیر آن بر مقاومت Constriction است.

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

این مدل کلی مقاومت تماسی بدون حضور تعداد نقاط و ضخامت لایه ی تماسی است. در مدل مقاومت تماسی در شبیه سازی مطلوب است که تعداد متغیرهای ورودی، در صورتی که بتوان دقت را در حد معقولی حفظ نمود، کم شود. این یکی از دلایلی است که در هر دو جزء مقاومت تماسی تأثیر متغیرها از قبیل فشار نرمال به صورت یکسان در نظر گرفته شده است، اگرچه این عمل نیاز به اعتبارسنجی دارد.

3- شبیه سازی کامپیوتری و اعتبارسنجی مدل

در شبیه سازی حاضر برخی فرضیات لحاظ شده اند که به بیان آنها می پردازیم:

- توزیع فشار در سطوح تداخل یکنواخت در نظر گرفته شده است.
- فرض شده است که الکترودها خصوصیات حرکتی کامل دارند به نحوی که یک نیروی الکترود گسترده ثابت و یکنواخت می تواند به عنوان شرایط مرزی مکانیکی استفاده شود.
- در تحلیل مکانیکی مواد آیزوتروپیک در نظر گرفته شده اند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

- سطح زیرین الکترود تحتانی از جابجایی در هر راستایی محدود شده است.
- تغییر فاز از حالت جامد به مایع فقط برای ورق ها در نظر گرفته شده است که این پدیده در صورتی که هر نقطه از ورق به دمای 1618 K که دمای ذوب Hastelloy X است برسد، رخ خواهد داد.
- جریان به صورت چگالی جریان نرمال (جریان تقسیم بر سطح) به سطح بالایی الکترود فوقانی اعمال می شود. نوع جریان الکتریکی اعمال شده جریان مستقیم (DC) می باشد.
- کلیه ی خصوصیات ورق و الکترود به صورت تابعی از دما تعریف شده و ثابت فرض نشده اند.
- تولید حرارت در سطوح تماس دارای منبع حرارتی حجمی می باشد.

سایر شرایط اولیه به صورت زیر می باشند:

- دمای اولیه ی کلیه ی سطوح 293.15 K در نظر گرفته شده و تمامی سطوح آزاد دارای انتقال حرارت جابجایی با هوا می باشند. ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا 10 W/m2.K و دمای محیط پیرامون 293.15 K لحاظ شده است.
- دمای نهان ذوب 310 kJ/kg در نظر گرفته شده است.
-ولتاژ در کف الکترود تحتانی صفر در نظر گرفته شده است.

معادله ی اصلی به دست آمده برای تحلیل میدان الکتریکی به صورت پتانسیل الکتریکی V به شکل زیر بیان می شود [12]:

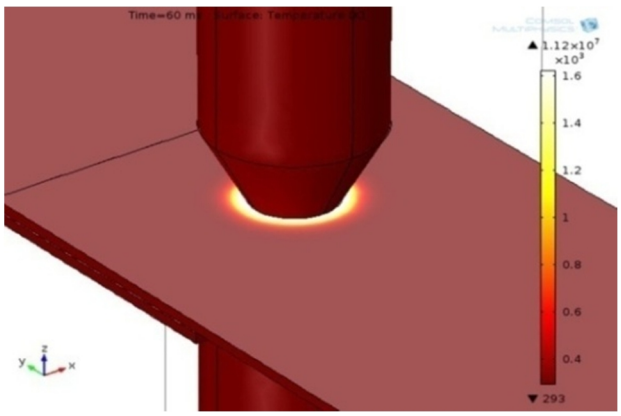
$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\rho^*}\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{1}{r\rho^*}\frac{\partial V}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\rho^*}\frac{\partial V}{\partial z}\right)=0 \qquad (12)$$

همچنین معادله ی به دست آمده برای توزیع میدان حرارت گذرا که گرمای مقاومت الکتریکی را در نظر می گیرد به صورت زیر نوشته می شود [13]:

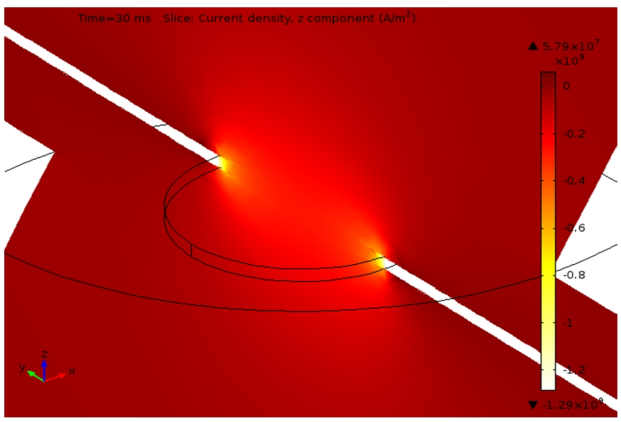
$$\rho' c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial r}\left(k\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{k}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q \qquad (13)$$

خصوصیات مواد یعنی c، k و ρ وابسته به حرارت در نظر گرفته می شوند. سایر معادلات استفاده شده در زمینه های مختلف شبیه سازی در "پیوست الف" قابل مشاهده است.

شبیه سازی با استفاده از یک مدل سه بعدی در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام شده است. ابعاد ورق 38×15 mm بوده و ضخامت آن 0.4 mm می باشد. اندازه و جنس الکترودهای نوک مخروطی مطابق با استاندارد RWMA Class 2 می باشد. فرآیند شبیه سازی حاضر تمامی متغیرهای مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و همچنین اثرات متقابل آنها از جمله انبساط حرارتی، گرمایش الکترومغناطیسی و اثرات ترموالکتریک را در نظر می گیرد. مقاومت تماسی بین دو ورق با استفاده از رابطه ی به دست آمده در بخش تحلیل تئوری اعمال شده است (مجموع روابط (10) و (11)) که ρ، ρ_f و σ_y هر یک به صورت تابعی از دما به مدل داده خواهند شد. شکل (2) توزیع حرارت ناحیه ی جوش را نشان می دهد. نحوه ی توزیع چگالی جریان در مقطع برش خورده ی وسط الکترودها به همراه مقدار این چگالی جریان در شکل (3) نشان داده شده است.



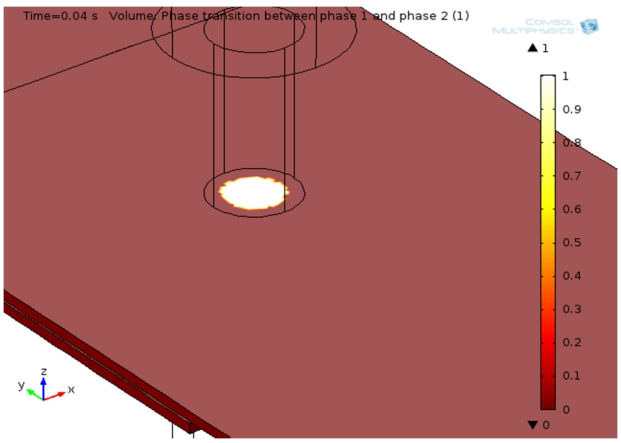
شکل2- توزیع حرارت ناحیه جوش (60ms، 372 A و15 N)



شکل3-توزیع چگالی جریان برای جریان A 372

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

پس از شبیه سازیِ مدل با استفاده از رابطه ی تماسی جدید، زمان اعتبارسنجی مدل توسط یک منبع دیگر است. به این خاطر با استفاده از اطلاعات موجود در [14] مدل را به شبیه سازی اعمال نموده و کارایی مدل جدید مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل جدید برای قطر جوش دارای سازگاری خوبی با نتایج چاپ شده در مقاله ی [14] بوده است. شکل (4) شبیه سازی مدل جدید را نشان می دهد.



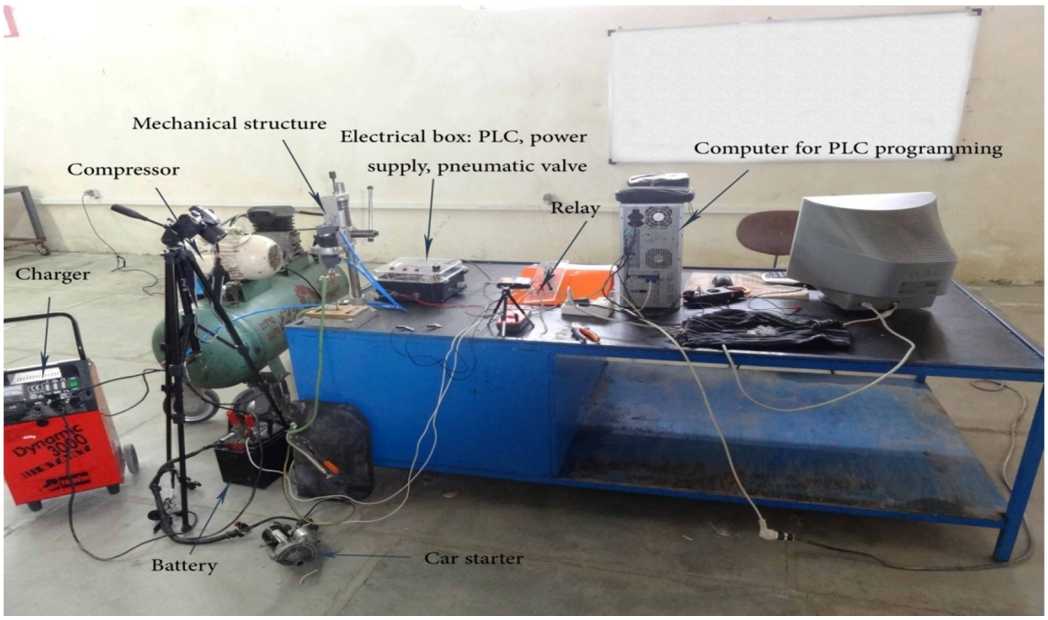
شکل4- شبیه سازی مدل جدید (40Ms، 1000Aو 100N)

4- آزمایش های تجربی و تصدیق مدل

به دلیل عدم وجود دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه ای مقیاس کوچک در کشور، طراحی Set up در سه بخش مکانیکی، پنوماتیکی و الکتریکی انجام گردید. اجزاء ساختار مکانیکی ساخته شده و روی یکدیگر مونتاژ شدند.

کنترل فشار (نیرو) توسط رگولاتور نصب شده در خروجی کمپرسور انجام می گیرد. مدار برقی مربوط به سیلندر پنوماتیک دارای اجزاء منبع تغذیه، PLC (جهت تنظیم زمان حرکت پیستون با دقت 1 ms و ایجاد تأخیر دلخواه در کورس باز سیلندر)، شیر برقی- پنوماتیک و پدال می باشد. جهت تأمین جریان مستقیم برای مدار جوشکاری از یک باتری خودرو استفاده گردید. برای رفع مشکل تخلیه ی باتری و همچنین کاهش جریان آن و جلوگیری از عدم توانایی کنترل جریان، باتری به یک شارژر متصل شد که یک جریان DC پشت باتری ایجاد می کند و دارای سه سطح جریان گوناگون می باشد. یک خروجی دیگر (غیر از خروجی شیر پنوماتیک) در برنامه نویسی PLC تعریف گردید که این خروجی توسط یک رله به یک استارتر خودرو فرمان داده و در زمان مشخص شده در برنامه ی PLC جریان الکتریکی را قطع می کند تا پس از قطع جریان، الکترود از قطعه جدا شود. تصویر Set up ساخته شده و اجزاء آن در شکل (5) قابل مشاهده است. شکل های (6) و (7) به ترتیب بخش های ساختار مکانیکی و جعبه ی الکتریکی را به همراه اجزاء آنها با بزرگنمایی مناسب نشان می دهند.

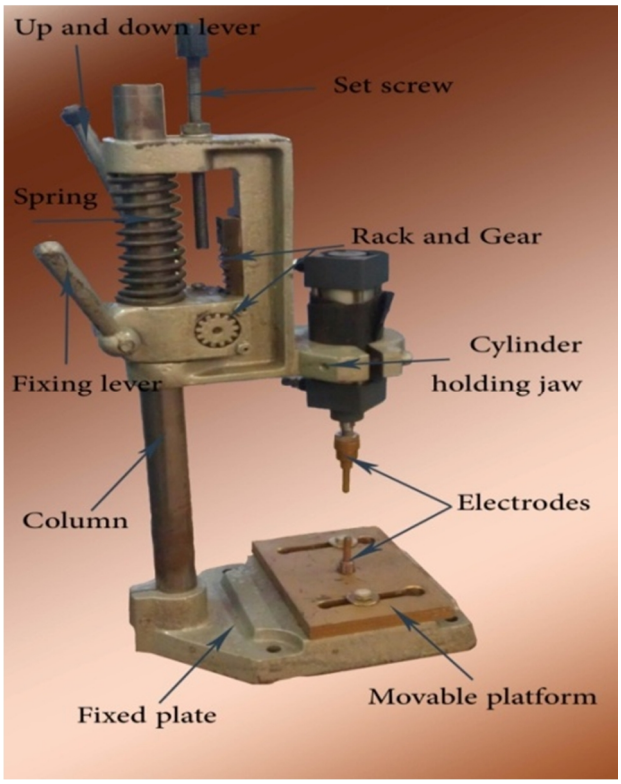
آلیاژ Hastelloy X که برای این مطالعه انتخاب شده است دارای ترکیبی استثنائی از مقاومت اکسیداسیون، قابلیت ساخت و مقاومت در دمای بالا می باشد. این آلیاژ کاربرد وسیعی در موتورهای توربین گازی برای اجزاء قسمت محفظه ی احتراق



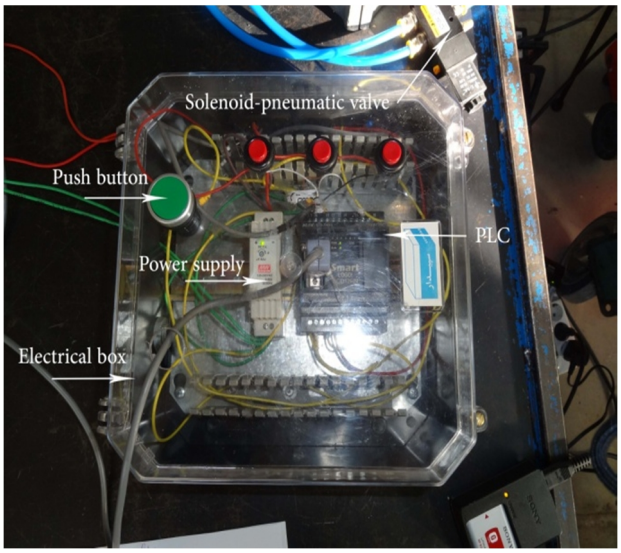
شکل5- Set up ساخته شده و اجزاء آن

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

دارد. در جدول (1) آنالیز شیمیایی Hastelloy X را مشاهده می نمایید. پس از انجام تمامی آزمایش ها قطر و ارتفاع ناگت اندازه گیری شد. تست کشش- برش جهت دستیابی به حداکثر باری که قطعه ها می توانند تحمل نمایند نیز با استفاده از دستگاه کشش Universal شرکت Gotech انجام پذیرفت.



شکل6- ساختار مکانیکی **Set up** و اجزاء آن



شکل7-جعبه ی الکتریکی **Set up** و اجزاء آن

قطر ناگت در هر دو حالت شبیه سازی (مدل پیش فرض برنامه COMSOL Multiphysics و مـــدل جـــدید ارائـه شده در این تحقیق) اندازه گیـری و با مقادیر به دست آمده از آزمایش های واقعی مقایسه گردید. نمودارها برای سه سطح نیرو، سه سطح جریان و سه سطح زمان ترسیم و تحلیل شدند که به عنوان نمونه حالت F=31 N در شکل (8) قابل مشاهده است. مشخص شد که روند تغییرات هر دو مدل تقریباً یکسان بوده و طبق نتایج شبیه سازی قطر ناگت با افزایش جریان و زمان افزایش یافته و با افزایش نیرو کاهش می یابد. نکته ی قابل ذکر این است که در اکثر موارد مدل جدید قطر ناگت را بیشتر از مدل پیش فرض برنامه پیش بینی می کند.

نتایج تجربی به نتایج شبیه سازی مدل جدید نزدیکتر است که نشاندهنده ی صحت و دقت مدل جدید نسبت به مدل پیش فرض برنامه می باشد. نتایج محاسبات خطا مشخص کرد که در بدترین مورد درصد خطا فقط 4/1% می باشد. این در حالیست که میانگین خطای مربوط به پیش بینی قطر ناگت فقط 1% بوده است. اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه سازی بسیار ناچیز است.

5- طراحی آزمایش ها و تحلیل نتایج

طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Minitab انجام گردید. سطوح مختلف متغیرهای اصلی مورد بررسی در جدول (2) مشخص شده اند. تعداد تکرارها دو در نظر گرفته شده است. اصول روش رگرسیون حداقل مربعات که در تحلیل واریانس استفاده می شود این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل رگرسیون کمترین انحراف را از مشاهدات نشان دهد. اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده را باقیمانده یا خطا گویند.

سه فرض اصلی در تحلیل واریانس وجود دارد: نرمال بودن، واریانس ثابت و مستقل بودن. نرمال بودن می تواند با نمودار توزیع احتمال بررسی شود. اگر توزیع نمونه ها نرمال باشد نمودار به شکل یک خط مستقیم خواهد بود. فرض واریانس ثابت می تواند با نمودار باقیمانده ها در مقابل برازندگی چک شود. این نمودار باید یک الگوی تصادفی را در هر دو طرف صفر نشان دهد و نباید هیچ گونه الگوی قابل تشخیصی را مشخص نماید.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول1- ترکیب شیمیایی **Hastelloy X** (درصد وزنی)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
47[a]	22	18	9	1.5	0.6	0.1	1*	1*	0.008*

[a] As balance *Maximum

جدول2- متغیرهای جوشکاری در سطوح مختلف

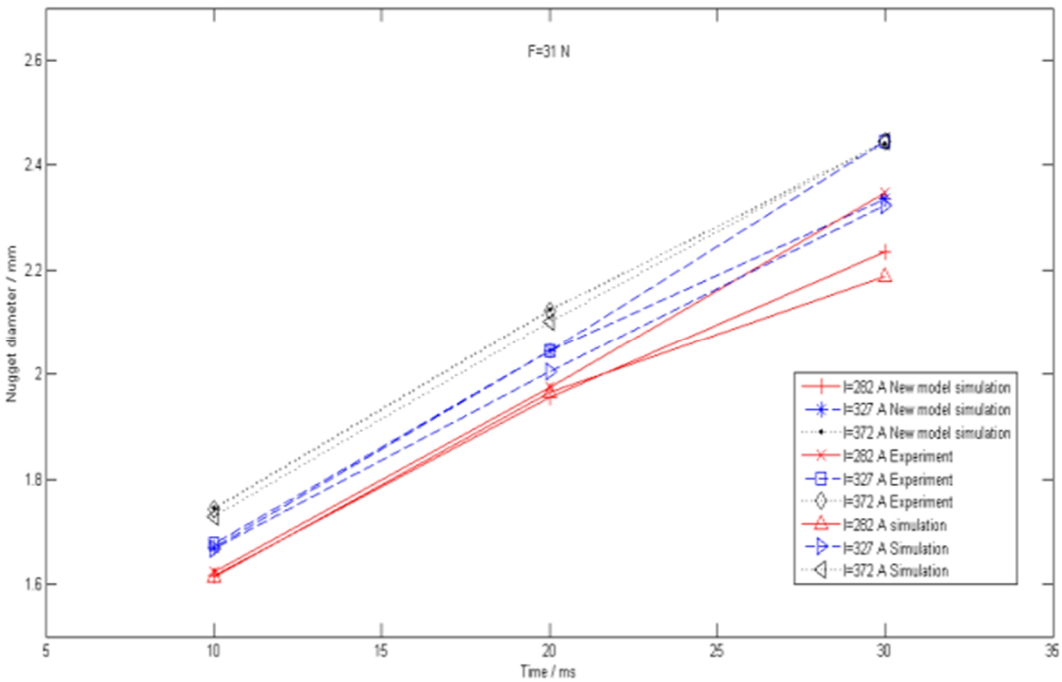
نشانه	متغیر	واحد	سطح ۱-	سطح ۰	سطح ۱+
F	نیروی الکترود	N	۱۵/۴۱	۲۳/۱۱	۳۰/۸۲
I	جریان الکتریکی	A	۲۸۲	۳۲۷	۳۷۲
t	زمان جوشکاری	ms	۱۰	۲۰	۳۰

مستقل بودن به خصوص در مورد عوامل متأثر از زمان، می تواند با نمودار باقیمانده ها در مقابل ترتیب، چک شود. اگر این نمودار هیچ الگویی را نشان ندهد فرض مستقل بودن ارضاء می شود.

نمودار توزیع احتمال قطر ناگت در شکل (9) مشاهده می شود که با توجه به این که نقاط تقریباً بر روی یک خط راست واقع شده اند می توان نتیجه گرفت که توزیع آنها نرمال می باشد. شکل (10) نمودار باقیمانده ها در مقابل مقادیر برازندگی و شکل (11) نمودار باقیمانده ها را بر حسب ترتیب اجرا نمایش می دهد. هر دو نمودار باقیمانده ها در مقابل مقادیر برازندگی و باقیمانده ها در مقابل ترتیب اجرا هیچ الگویی را نشان نمی دهند.

بنابراین هر دو فرض واریانس ثابت و مستقل بودن ارضاء شده است. نمودار قطر ناگت های حاصل بر اساس ترتیب انجام آزمایش ها نیز در شکل (12) دیده می شود که نشان دهنده ی روند تصادفی به وجود آمدن قطر ناگت بوده و مشخص می کند که شرایط آزمایش تأثیری روی روند به دست آمدن قطر ناگت نداشته است. در تحلیل واریانس برای حداکثر بار و ارتفاع ناگت نیز نمودارهای مشابه شکل های (9) الی (12) ترسیم و تحلیل شدند که به دلیل تشابه در اینجا از ذکر توضیحات آنها صرفنظر می شود.

از نمودار پارتو شکل (13) مشخص است که برای قطر ناگت به ترتیب زمان، جریان، نیرو و همچنین برهم کنش جریان و زمان مؤثرترین متغیرها می باشند. همچنین مشخص گردید که



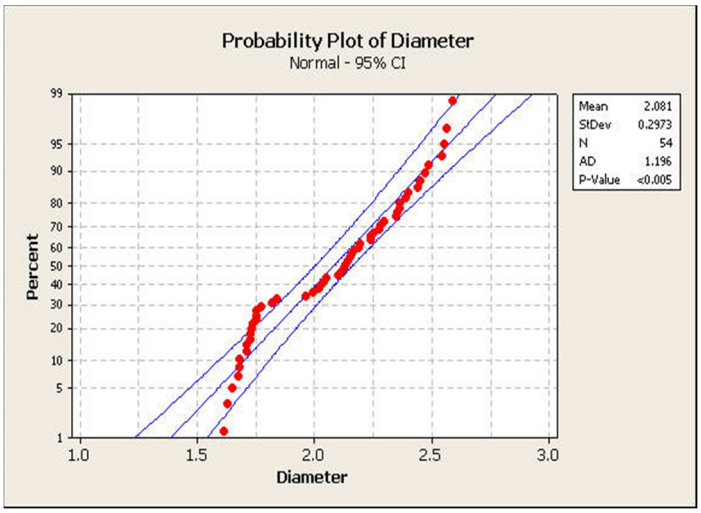
شکل8-مقایسه قطر ناگت حاصل از شبیه سازی با مدل پیش فرضِ نرم افزار و مدل جدید با نتایج تجربی (F=31 N)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

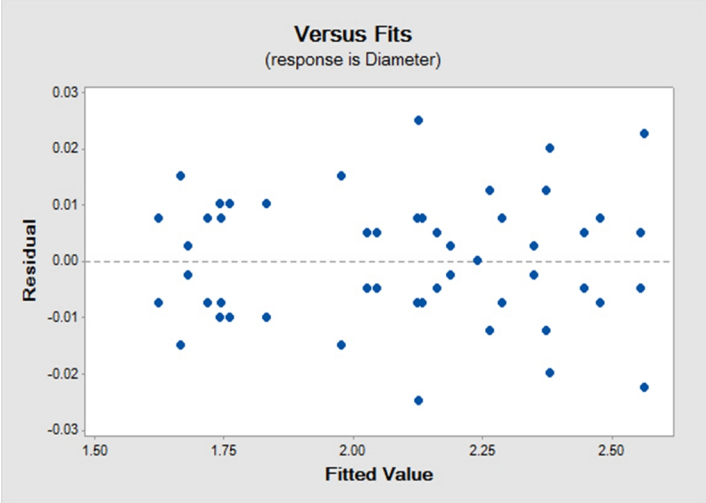
برای بار برشی، نیرو و برهم کنش نیرو- جریان- زمان دارای بیشترین اهمیت می باشند ولی برای ارتفاع ناگت هیچ یک از این متغیرها تأثیرگذار نیستند.

جدول (3) نتایج آنالیز واریانس حاصل از نرم افزار را برای قطر ناگت نشان می دهد. در این جدول DF تعداد درجات آزادی، Adj SS مجموع مربعات تنظیم شده، Adj MS میانگین مجموع مربعات تنظیم شده و SD انحراف استاندارد می باشند. ضریب تعیین (R^2) میزان درصد واریانس متغیر وابسته (خروجی) که توسط متغیرهای مستقل (ورودی) تبیین می شود را بیان می کند. به عبارت دیگر با محاسبه ی این ضریب می توان گفت که چند درصد از کل واریانس پاسخ توسط متغیرهای ورودی بیان می شود. مقدار عددی این ضریب از صفر تا یک تغییر می کند. مقدار صفر یعنی استفاده از متغیرهای مستقل در برآورد متغیر وابسته هیچ نقشی ندارد و مقدار یک بیانگر تخمین 100% واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل می باشد. معمولاً مقادیر بالاتر از 0/5 قابل قبول است. همچنین R^2 (Adj) همان R^2 است که برای سایز نمونه ها تنظیم شده است.

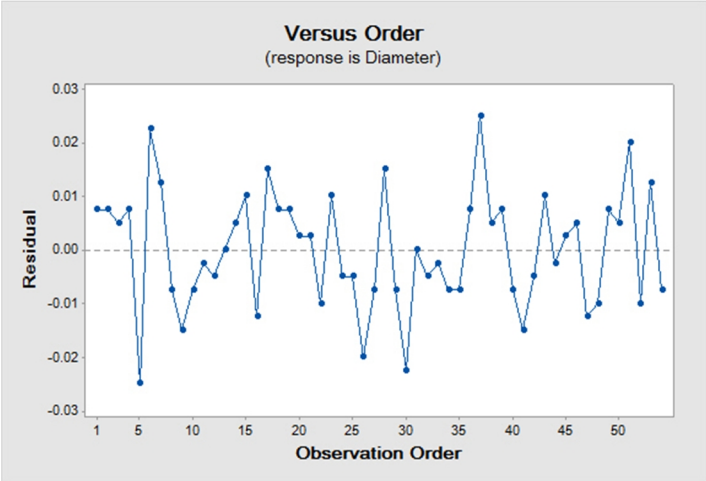
در تحلیل حاضر مقدار فقدان برازندگی یا F به اندازه ی کافی بزرگ است که تأکید می کند نبود برازندگی نسبت به خطای مطلق مهم نیست. عدم اهمیت فقدان برازندگی مطلوب است زیرا متناسب بودن مدل، مورد نظر ماست. برای یک مدل آماری خوب، مقدار R^2 باید به 1 نزدیک باشد. مقدار R^2 (Adj) نیز به قدر کافی بزرگ است تا اهمیت بالای مدل را حمایت نماید. مقدار R^2=0.9986 و R^2 (Adj) =0.9972 می باشد که بسیار نزدیک به عدد 1 می باشند. در مبحث طراحی آزمایش و تحلیل واریانس مقدار F بالاتر بر این مسئله تأکید می کند که فاکتور مربوطه مهمتر از بقیه فاکتورها است و بالعکس. از مقادیر F که در جدول (3) لیست شده است می توان نتیجه گرفت که برهم کنش بین جریان جوشکاری و نیروی الکترود تأثیر کمتری بر کیفیت جوشکاری در مقایسه با برهم کنش های بین جریان جوشکاری و زمان جوش و همچنین نیروی جوشکاری و زمان جوشکاری دارد.



شکل9- نمودار توزیع احتمال قطر ناگت



شکل 10- نمودار باقیمانده ها در مقابل مقادیر برازندگی



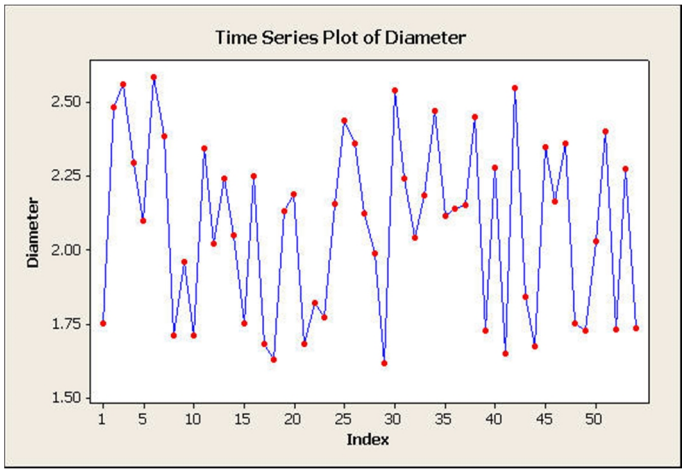
شکل11-نمودار باقیمانده ها برحسب ترتیب اجرا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جدول3-نتایج تحلیل واریانس طراحی آزمایش قطر ناگت با استفاده از نرم افزار **Minitab**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	0.00000	0.00000	0.00	1.000
Force	2	0.15045	0.7523	306.81	<0.001
Current	2	0.19590	0.09795	399.49	<0.001
Time	2	4.29626	2.14813	8761.00	<0.001
Force*Current	4	0.00107	0.00027	1.09	0.382
Force*Time	4	0.01131	0.00283	11.54	<0.001
Current*Time	4	0.01491	0.00373	15.20	<0.001
Force*Current*Time	8	0.00871	0.00109	4.44	0.002
Error	26	0.00638	0.00025		
SD = 0.0156586		R-Sq = 99.86%		R-Sq(Adj) = 99.72%	

تحلیل واریانس مشخص کرد که نیرو، جریان، زمان و اثرات متقابل آنها به جز اثر متقابل نیرو- جریان همگی فاکتورهای مهمی هستند زیرا مقادیر P به دست آمده برای آنها خیلی کوچکتر از 0/05 است.



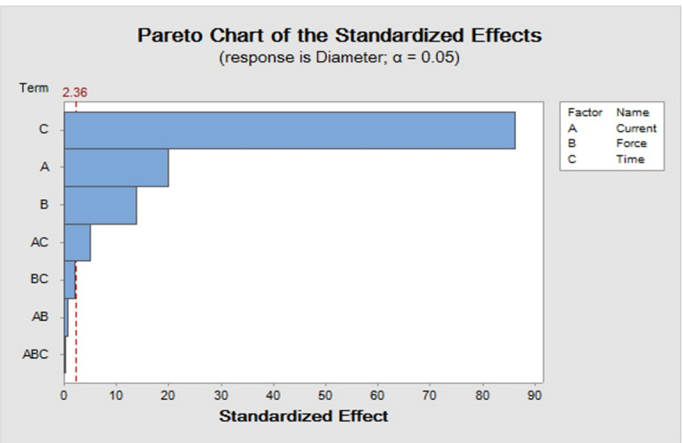
شکل 12- قطر ناگت بر اساس ترتیب انجام آزمایش ها

اثر متغیرهای اصلی در شکل (14) مشخص شده است. آنچه مشخص است افزایش قطر ناگت با افزایش زمان و جریان و کاهش قطر آن با افزایش نیرو است.

شکل (15) کانتورهای قطر ناگت را براساس نیرو و زمان نشان می دهد. از نمودارهای مشابه می توان دریافت که بیشترین قطر با استفاده از کمترین نیرو، بیشترین زمان و بیشترین جریان به دست می آید. معادله رگرسیون برای قطر ناگت بر اساس رابطه (14) می باشد.

$$Diameter = 2.08 + 0.0736\ Current - 0.0635\ Force + 0.344\ Time \quad (14)$$

هنگامی که جریان افزایش می یابد حرارت در سطح تماس ورق ها افزایش یافته و در نتیجه قطر جوش بیشتر می شود. زمانی که حرارت ورودی از مقدار مشخصی بیشتر شود احتمال بیرون زدگی وجود دارد. زمان جوشکاری طولانی باعث ایجاد حرارت ورودی بیشتر می شود که معنای آن رشد کافی دکمه ی جوش است. هنگامی که نیروی الکترود افزایش می یابد باعث فرو ریختن زبری های سطح تماس شده و ناحیه ی تماس فلز بزرگتری ایجاد خواهد شد که منجر به کمتر شدن چگالی جریان و همچنین کاهش مقاومت تماسی می شود. در نتیجه تولید حرارت کمتر شده و شروع و رشد ناگت کند می شود و قطر دکمه ی جوش نهایی در مقایسه با نیروی الکترود کمتر، کوچکتر می شود.

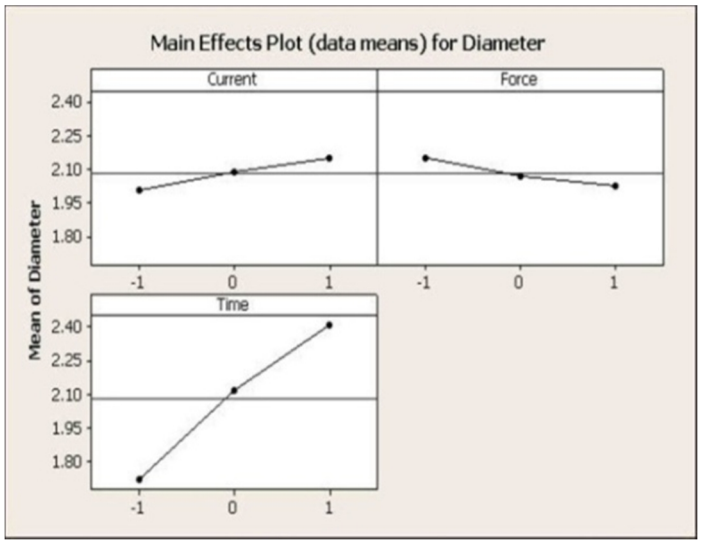


شکل13- نمودار پارتو برای قطر ناگت

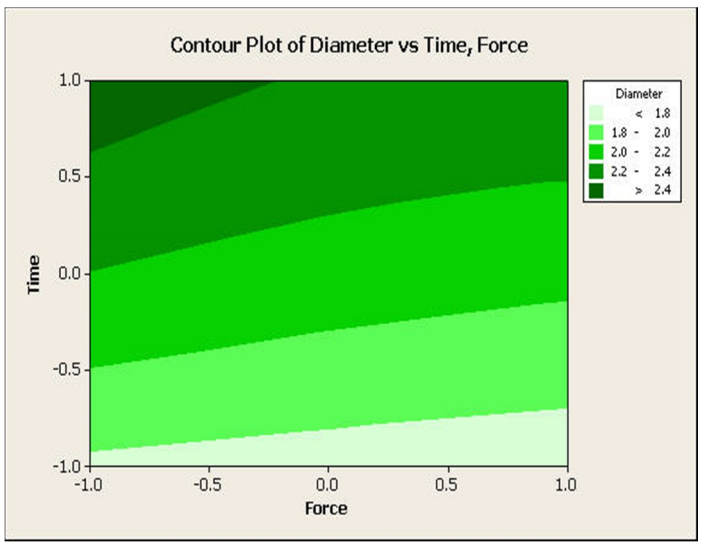
اما در نیروی الکترود پایین تر، دما با سرعت بیشتری افزایش می یابد. هنگامی که نیروی الکترود کاهش یابد، زمان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

جوشکاری کوتاه تر و یا جریان جوشکاری پایین تر برای شروع دکمه ی جوش مورد نیاز است. البته باید اشاره کرد که نیروی الکترود باید به اندازه ی کافی زیاد باشد تا یک جوش قابل قبول ایجاد شود. چرا که نیروی الکترود، جوش را سالم نگه می دارد تا منجمد شده، خنک شده و ناگت جوش به حداکثر استحکام خود برسد که مهمترین مزیت آن جلوگیری از به وجود آمدن پدیده ی بیرون زدگی است.



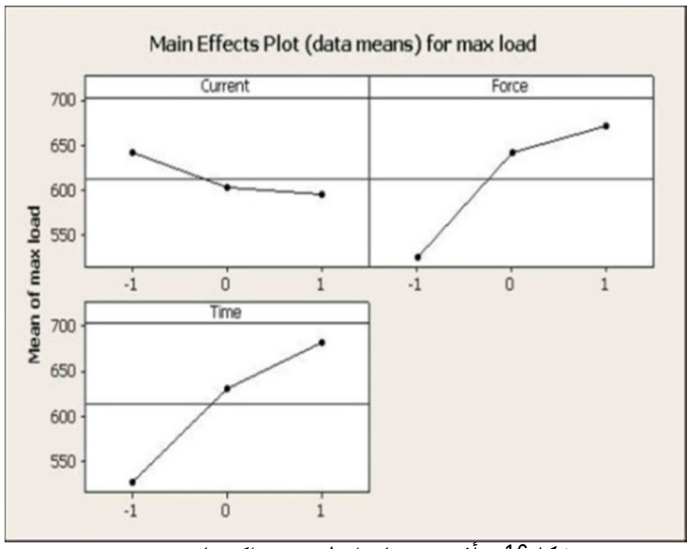
شکل 14-اثر متغیرهای اصلی بر قطر ناگت



شکل 15- کانتورهای قطر ناگت براساس نیرو و زمان

بیرون زدگی می تواند به دلیل مقادیر بالای مقاومت تماسی اتفاق بیفتد که باعث کاهش قطر واقعی ناگت می شود. با افزایش نیرو احتمال رخداد بیرون زدگی کاهش می یابد.

جهت جلوگیری از طولانی شدن مبحث آنالیز واریانس از درج جداول مربوط به حداکثر بار برشی و ارتفاع ناگت اجتناب کرده و فقط به بیان نتایج مهم حاصل از تحلیل واریانس آنها می پردازیم. مطابق با تحلیل های DOE برای حداکثر بار، نیرو، زمان و برهم کنش زمان و جریان مهمترین متغیرها هستند. تأثیر متغیرها بر حداکثر بار در شکل (16) نشان داده شده است. افزایش زمان و نیرو هر دو باعث افزایش حداکثر بار می شوند اما تأثیر جریان ناچیز است. نیروی بیشتر باعث امتزاج کامل فلز مذاب شده و از بیرون زدگی جلوگیری می کند. در واقعیت افزایش قطر ناگت در نیروهای کم می تواند به دلیل بیرون زدگی باشد. این افزایش قطر منجر به افزایش استحکام نهایی اتصال نمی شود. تفسیر مشابهی برای جریان الکتریکی وجود دارد اما با شدت کمتر. تأثیر جریان در زمان ها و نیروهای مختلف متفاوت است و الگوی مشخصی را نشان نمی دهد.



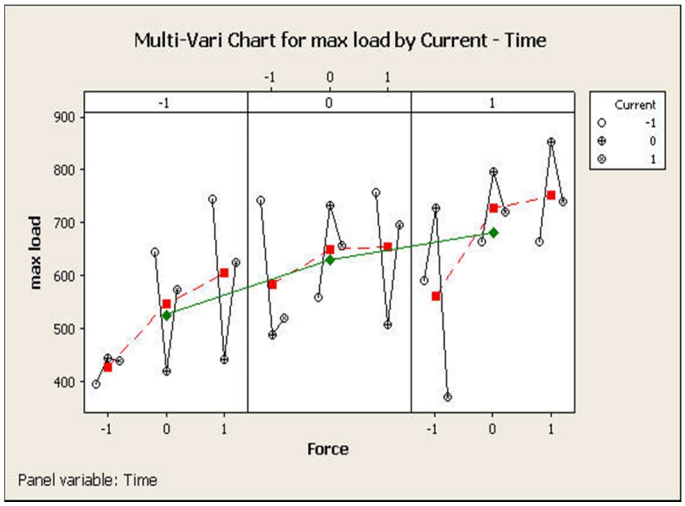
شکل16- تأثیر متغیرهای اصلی بر حداکثر بار

تحلیل کانتورها مشخص کرد که بیشترین استحکام با استفاده از حداکثر نیرو، بیشترین زمان و جریان کم تا متوسط به دست می آید. بدترین حالت از نقطه نظر استحکام استفاده ی همزمان از حداکثر جریان و حداقل نیرو است که می تواند بیرون زدگی ایجاد کرده و خصوصیات مکانیکی جوش را تضعیف نماید. نمودار چند متغیره ی حداکثر بار در شکل (17) نمایش داده شده است. برای زمان جوشکاری طولانی تر جریان متوسط

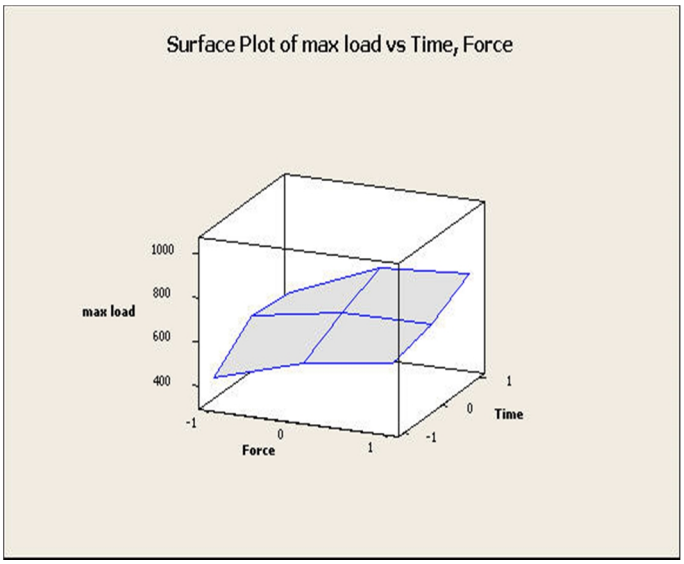
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

بهتر است. برای زمان های کوتاه جریان کمینه پیشنهاد می شود. در زمان های متوسط رفتارها بسیار متنوع است. نمودار سطحی سه بعدی برای حداکثر بار در شکل (18) نشان داده شده است. این نمودار و نمودارهای مشابه مشخص کردند که حداکثر بار با استفاده از بیشترین نیرو و حداکثر زمان یا جریان متوسط و حداکثر زمان به دست می آید. معادله رگرسیون برای حداکثر بار به صورت زیر است:

$$Max\ load = 613 - 23.4\ Current + 73.2\ Force + 77.3\ Time \quad (15)$$

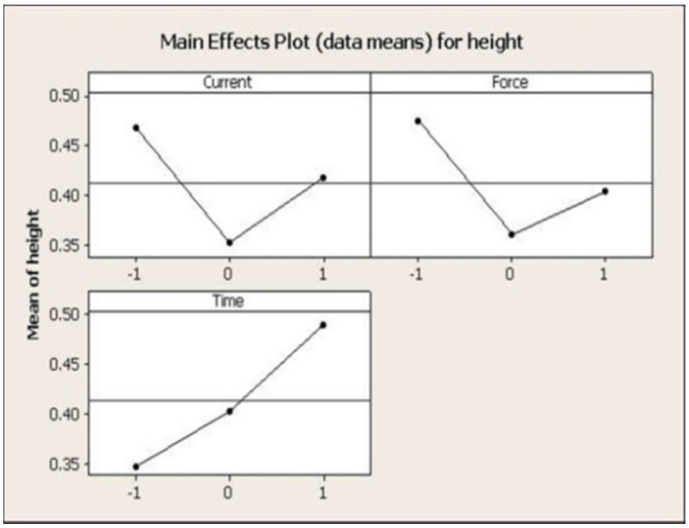


شکل17-نمودار چند متغیره ی حداکثر بار



شکل 18- نمودار سطحی برای حداکثر بار بر حسب زمان و نیرو

بر اساس نتایج آنالیز واریانس هیچ یک از متغیرهای مورد مطالعه ارتفاع ناگت را به طرز مهمی تحت تأثیر قرار نمی دهند، هرچند مهمترین متغیر زمان است. تأثیر فاکتورهای اصلی بر ارتفاع ناگت در شکل (19) مشخص شده است.



شکل19- تأثیر فاکتورهای اصلی بر ارتفاع ناگت

با توجه به نمودار به نظر می رسد که افزایش ارتفاع ناگت در نیروهای کم و جریان های زیاد هردو کاذب هستند. به این معنی که افزایش ارتفاع به واسطه ی پاشش مواد مذاب رخ داده است و نه رشد واقعی ناگت. بنابراین روند واقعی نمودار ارتفاع ناگت بر حسب جریان در اصل نزولی و بر حسب نیرو در اصل صعودی خواهد بود. از تحلیل کانتورها مشخص شد که حداکثر ارتفاع ناگت با استفاده از حداقل نیرو و حداکثر زمان به دست می آید. معادله ارتفاع ناگت بر حسب جریان، نیرو و زمان به صورت زیر می باشد:

$$Height = 0.413 - 0.0250\ Current - 0.0358\ Force + 0.0714\ Time \quad (16)$$

6- نتیجه گیری

جوشکاری نقطه ای مقاومتی مقیاس کوچک ورق Hastelloy X با استفاده از Set up ساخته شده در این مطالعه با موفقیت انجام شد. نتایج زیر از این تحقیق قابل برداشت است:

- مدل عددی توسعه داده شده به شکلی مؤثر منحنی های دمایی در اطراف جوش را پیش بینی می نماید.
- نتایج تجربی سازگاری خوبی با نتایج حاصل از شبیه سازی توسط مدل تحلیلی جدید داشته است. البته تحلیل های شبیه سازی قطر ناگت را کمی کمتر از قطر واقعی آن که از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

آزمایش ها به دست آمده است پیش بینی می کند. این پدیده می تواند به دلیل گرم شدن الکترودها و در نتیجه کاهش هدررفت حرارت در اثر آزمایش های متوالی باشد. در مجموع مشخص شد که در نیروهای بالاتر نمودارهای شبیه سازی و تجربی بیشتر بر یکدیگر منطبق هستند.

- تحلیل DOE انجام گردید و مشخص شد که افزایش زمان و جریان موجب افزایش اندازه ی ناگت و افزایش نیرو موجب کاهش آن می شود.

- زمان طولانی باعث ایجاد حرارت بیشتر می شود که مؤکد این نکته است که جوش به اندازه ی کافی رشد خواهد کرد و خواص مکانیکی اتصال بهبود خواهد یافت.

- نیرو، زمان و برهم کنش زمان و جریان متغیرهایی هستند که حداکثر بار تحمل شده را تحت تأثیر قرار می دهند. افزایش نیرو و زمان باعث افزایش ظرفیت تحمل بار می شوند.

- در جریان های کمتر بیرون زدگی وجود ندارد، در نتیجه استحکام جوش افزایش می یابد، اگرچه قطر جوش در جریان های بالا بزرگتر است. حداکثر استحکام با بکارگیری حداکثر نیرو، بیشترین زمان و حداقل جریان به دست می آید.

- هیچ یک از متغیرها ارتفاع ناگت را به شکل قابل ملاحظه تحت تأثیر قرار نمی دهند.

- با در نظر گرفتن اختلاف قطر ناگت حاصل از آزمایش و شبیه سازی مشخص شد که در بین تمامی حالت ها بیشترین درصد خطا 4/1% است. همچنین در این شرایط میانگین قطر ناگت کل حالت ها 2.0806 mm و میانگین درصد خطای کل 1 % است که بسیار ناچیز بوده و تصدیقی بر صحت و دقت مدل شبیه سازی می-باشد.

منابع

1- RWMA, "Resistance Welding Manual", Philadelphia, Resistance Welder Manufacturer's Association, 1989.

2- Hamedi, M., Atashparva, M., "A Review of Electrical Contact Resistance Modeling in Resistance Spot Welding", Welding in the World, 61(2), pp. 269-290, 017, DOI: 10.1007/s40194-016-0419-4.

3- Wagar, H. N., "Integrated Device and Connection Technology", Baker, D., et al. (Eds.), "Physical Design of Electronic System", Vol. 3. NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 439-499, 1971.

4- Holm, R., "Electric Contacts, Theory and Application", Berlin, Springer-Verlag, 1967.

5- Zhao, D., Wang, Y., Sheng, S., Lin, Z., "Multi-Objective Optimal Design of Small Scale Resistance Spot Welding Process with Principal Component Analysis and Response Surface Methodology", Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, DOI 10.1007/s10845-013-0733-2.

6- Chen, F., Tong, G. Q., Ma, Z., Yue, X. K., "The Effects of Welding Parameters on the Small Scale Resistance Spot Weldability of Ti-1Al-1Mn Thin Foils", Materials and Design, 102, pp. 174-185, 2016.

7- Luo, Y., Rui, W., Xie, X., Zhu, Y., "Study on the Nugget Growth in Single-Phase AC Resistance Spot Welding Based on the Calculation of Dynamic Resistance", Journal of Materials Processing Technology, 229, pp. 492-500, 2016.

8- Luo, Y., Wan, R., Yang, Z., Xie, X., "Study on the Thermo-Effect of Nugget Growing in Single-Phase AC Resistance Spot Welding Based on the Calculation of Dynamic Resistance", Measurement, 78, pp. 18-28, 016.

9- Chen, S., Sun, T., Jiang, X. Qi, J., Zeng, R., "Online Monitoring and Evaluation of the Weld Quality of Resistance Spot Welded Titanium Alloy", Journal of Manufacturing Processes, 23, pp. 183-191, 2016.

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, 99, pp. 120-127, 2017.

11- Greenwood, J. A., "Constriction Resistance and the Real Area of Contact", British Journal of Applied Physics, pp. 1621-1632, 1966.

12- Kraus, A. D., Bar-Cohen, A., "A Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment", New York McGraw-Hill, 1983.

13- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., "Introduction to Heat Transfer", 2nd Edition, New York, John Wiley & Sons, 1990.

14- Chang, B. H., 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]

پیوست الف-معادلات و شرایط مرزی استفاده شده در شبیه سازی

زمینه	ماژول شبیه سازی	معادلات	شماره ی معادله	شرایط مرزی
Solid mechanics	Linear elastic material	$-\nabla.\sigma = F_v \ , \quad \sigma = s$ $S - S_0 = C:(\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_{inel})$ $\epsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u]$	(الف-۱)	$u_x = u_y = u_z = 0$ $(\partial u/\partial t)_x = (\partial u/\partial t)_y = (\partial u/\partial t)_z = 0$
	Body load	$F_V = F_{tot}/V$	(الف-۲)	$F_{tot} = -F\vec{k}$
Heat transfer in solids	Heat Transfer in solids	$\rho C_p \partial T/\partial t + \rho C_p u.\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + Q$	(الف-۳)	
	Thermal Insulation	$-n.(-k\nabla T) = 0$	(الف-۴)	
	Heat Transfer with phase change	$\rho C_p \partial T/\partial t + \rho C_p u.\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p$ $k = \theta k_{phase1} + (1-\theta)k_{phase2}$ $C_p = \theta C_{p,phase1} + (1-\theta)C_{p,phase2} + L\frac{d\alpha}{dT}$ $\rho = \frac{\theta\rho_{phase1}C_{p,phase1} + (1-\theta)\rho_{phase2}C_{p,phase2}}{\theta C_{p,phase1} + (1-\theta)C_{p,phase2}}$	(الف-۵)	$T_{pc,1\to2} = 1618\ K$ $L_{1\to2} = 310\ kJ/kg$ $\Delta T_{1\to2} = 10\ K$
	Convective heat flux	$-n.(-k\nabla T) = h.(T_{ext} - T)$	(الف-۶)	$h = 10\ w/m^2.K$, $T_{ext} = 293.15\ K$
	Thermal contact	$-n_d.(-k_d\nabla T_d) = -h.(T_u - T_d) + rQ_{fric}$ $-n_u.(-k_u\nabla T_u) = -h.(T_d - T_u) + (1-r)Q_{fric}$ $r = 1/1+\xi \quad \xi = \sqrt{\frac{\rho_u C_{p,u}(k_u n_u).n_u}{\rho_d C_{p,d}(k_d n_d).n_d}}$ $h = h_c + h_g$ $h_c = 1.25\ k_{contact}\frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}}(P/H_c)^{0.95}$ $\frac{2}{k_{contact}} = \frac{1}{(k_u n_u).n_u} + \frac{1}{(k_d n_d).n_d}$	(الف-۷)	$Q_{fric} = 0\ w/m^2$ $h_g = 0\ w/m^2.K$ $\sigma_{asp} = 1\ um$ $m_{asp} = 0.4$ $p = 100\ kPa$ $H_c = 3\ GPa$
	Heat source	$\rho C_p \partial T/\partial t + \rho C_p u.\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + Q + Q_{vh} + W_p$	(الف-۸)	$Q = RI^2/V$
Electric currents	Current conservation	$\nabla J = Q_i$ $J = (\sigma + \epsilon_0\epsilon_r \partial/\partial t)E + J_e$ $E = -\nabla V$	(الف-۹)	
	Electric insulation	$n.J = 0$	(الف-۱۰)	
	Electrical contact	$n.J_1 = h_c(V_1 - V_2)$ $n.J_2 = h_c(V_2 - V_1)$	(الف-۱۱)	New model formulation
	Electrical contact	$n.J_1 = h_c(V_1 - V_2)$ $n.J_2 = h_c(V_2 - V_1)$ $h_c = 1.25\sigma_{contact}\frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}}(P/H_c)^{0.95}$ $\frac{2}{\sigma_{contact}} = \frac{1}{(\sigma_1 n_d).n_d} + \frac{1}{(\sigma_2 n_d).n_d}$	(الف-۱۲)	$\sigma_{asp} = 1\ um$ $m_{asp} = 0.4$ $P = 100\ kPa$ $H_c = 3\ GPa$
	Normal current density	$-n.J = J_n$	(الف-۱۳)	
	Thermal expansion	$\epsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$ $S_{th} = \left(1 + \alpha(T - T_{ref})\right)^3 \ , \quad F_e = FS_{th}^{-1/3}$	(الف-۱۴)	$T_{ref} = 293.15\ K$
	Electromagnetic heat source	$\rho C_p \partial T/\partial t + \rho C_p u.\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + Q$	(الف-۱۵)	
	Boundary electromagnetic heat source	$-n.(-k\nabla T) = Q_b$	(الف-۱۶)	

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-28]