



## شبیه‌سازی المان محدود و صحت‌سنجی تجربی رفتار نرم‌شوندگی منطقه متأثر از حرارت آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در جوش الکترو تنگستن

محمدجواد پیرپرچسته<sup>۱</sup>، مهدی ایرانمنش<sup>۱</sup>، اسلام رنجبرنوده<sup>۲\*</sup>، عماد چراغی ریزی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

### کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی اجزاء محدود  
جوشکاری الکترو تنگستن  
رسوب سختی  
نرم‌شوندگی  
منطقه متأثر از حرارت  
سینتیک فرایبری

**خلاصه:** خواص منحصر به فرد آلیاژهای سری ۷۰۰۰ آلومینیوم نظیر استحکام بالا، چگالی کم، شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی تشیی باعث شده است که در صنایع هوایی، خودروسازی و کشتی‌سازی مورد توجه قرار گیرند. در این پژوهش ابتدا با استفاده از یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار انسیس، انتقال حرارت حین جوشکاری الکترو تنگستن یک ورق آلومینیومی از جنس ۷۰۷۵ با ضخامت ۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مدل با آزمایش‌های تجربی، صحت‌گذاری گردید و سپس افت سختی در منطقه متأثر از حرارت قطعاً آلومینیومی با دقت بالا پیش‌بینی شد. برای بررسی تاثیر جوشکاری بر میزان افت سختی در منطقه متأثر از حرارت، نمونه‌های جوش داده شده مورد آزمایش میکرو سختی‌سنجی قرار گرفتند. با استفاده از نتایج مدل اجزاء محدود سینتیک فرایبری در نمونه‌های مختلف بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مکانیزم‌های استحکام‌دهی این آلیاژ پیرسختی و کارسختی ناشی از نورد است. اینجا از پیرسازی طبیعی استفاده شد که نتیجه آن بازیابی سختی آلیاژ تا حدود ۹۷ درصد سختی اولیه آلیاژ بود. به نظر می‌رسد که جوشکاری تاثیر پیری را از بین برده اما تاثیر چندانی روی کارسختی نداشته است. همچنین افت سختی در منطقه آیل محلولی شده با عملیات حرارتی مناسب قابل جبران است، ولی در منطقه فرایبر شده قابل بازگردانی نیست.

### ۱- مقدمه

پیر می‌شوند تا رسوب دهند. در اثر پیر شدن، ذرات میکروسکوپی تشکیل می‌گردند که به‌عنوان مانع در دانه‌ها و مرز دانه‌ها عمل می‌کنند [۲]. پیر سازی مصنوعی آلیاژهای آلومینیوم عموماً در درجه حرارتی بین ۹۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. به هنگام پیرسازی تنش تسلیم<sup>۲</sup> به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و بعد از آن با ادامه فرایند پیری، ماده فرایبر شده و مقدار آن افت خواهد کرد. قبل از پیک سختی<sup>۳</sup>، پیر نشده<sup>۴</sup> و بعد از آن فرایبر نامیده می‌شود. فوق و همکارانش [۳] برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر بازگردانی سختی از دست‌رفته آلیاژ ۷۰۰۵ از سه روش پیرسازی استفاده کردند؛ یکی پیرسازی طبیعی به مدت ۴ ماه در دمای اتاق، پیرسازی مصنوعی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و دیگری پیرسازی مرحله‌ای<sup>۷</sup> ۸ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سپس ۲۴ ساعت در

استحکام بالا، چگالی کم، شکل‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی تشیی<sup>۱</sup> باعث شده تا آلیاژهای سری ۷۰۰۰ آلومینیوم در صنایع هوایی، اتومبیل‌سازی و کشتی‌سازی مورد توجه قرار گیرند [۱]. استحکام این گروه آلیاژی به نسبت دیگر گروه‌های آلیاژی آلومینیوم بالاتر است. این گروه آلیاژی می‌تواند ترکیب سه‌تایی آلومینیم-روی-منیزیم و یا ترکیب چهارتایی آلومینیم-روی-منیزیم-مس باشد. آلیاژ ۷۰۷۵ با داشتن استحکام بالاتر از سری‌های ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰، مقاومت به خوردگی مورد قبول و مقاومت به خوردگی تشیی بالاتر از دو سری مذکور، می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع دریایی باشد. در حال حاضر در صنایع نظامی از این آلیاژ استفاده می‌شود.

آلیاژهای آلومینیوم پس از عملیات حرارتی انحلال و سریع سرد کردن

- 2 Yield Stress
- 3 Hardness Peak
- 4 Under-age
- 5 Over-age
- 6 Fu
- 7 Step ageing

### 1 Stress corrosion cracking

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: islam\_ranjbar@aut.ac.ir



## ۲- روش تحقیق المان محدود

شبهه‌سازی اجزاء محدود فرایند جوشکاری، توانایی پیش‌بینی توزیع دما و میدان‌های تنش ناشی از آن را دارا است. در این پژوهش به یک مدل حرارتی نیاز است. نحوه‌ی مش‌بندی نمونه نیز به این صورت است که با نزدیک‌تر شدن به خط جوش، به علت افزایش گرادیان‌های حرارتی، به‌دقت بالاتر و استفاده از المان‌های کوچک‌تر نیاز است.

سه فاکتور لازم برای مشخص کردن منبع گرما در مدل عبارت‌اند از: حرارت ورودی قوس، نحوه گسترده‌ی این گرما و سرعت حرکت منبع گرمایی. میزان گرمایی که قطعه کار در واحد زمان دریافت می‌کند برابر است با حاصل ضرب ولتاژ ( $V$ ) و شدت جریان قوس ( $I$ ) در مقدار راندمان قوس ( $\eta$ ) و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۴].

$$Q = \eta VI \quad (1)$$

تغییرات در متغیرهای جوشکاری مانند گاز محافظ، هندسه الکتروود، طول قوس، جنس فلز پایه و قطبیت می‌تواند روی بازده جوشکاری مؤثر باشد. منابع مختلف برای بازده جوش مقادیر متفاوتی از ۰٫۵ الی ۰٫۸ پیشنهاد کرده‌اند [۸].

رابطه انرژی در یک سیستم مختصات متحرک از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$q(z, y, t) = \frac{\gamma Q}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{r^2}[(z + vt)^2 + y^2]\right) \quad (2)$$

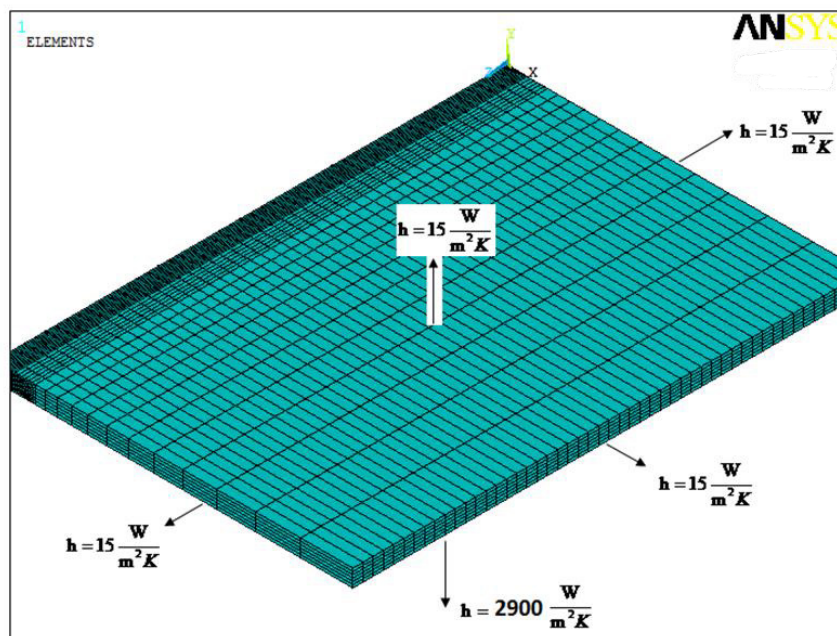
$\dot{T}$  متغیر توزیع گوسی است که آن را به‌صورت شعاع ناحیه‌ای از سطح قطعه کار که ۹۵٪ انرژی قوس وارد آن می‌شود در نظر می‌گیرند.  $z$  جهت جوشکاری و  $y$  جهت عمود بر آن و  $v$  سرعت حرکت قوس جوشکاری است. در این مدل فرض می‌شود منبع انرژی در  $t = 0$  در مبدأ مختصات قرار دارد. ضریب  $\gamma$  در رابطه (۲)، در منابع مختلف اعداد گوناگونی گزارش شده است. رنجبر و همکاران [۹] مقدار این ضریب را ۰٫۵ گزارش کرده‌اند. اکبری موسوی [۱۰] و گلداک [۱۱] مقدار ضریب را ۳ گزارش کرده‌اند. بنابر قرابت بیشتر موضوع حاضر با تحقیقات اکبری موسوی و گلداک، مقدار این ضریب

دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده برای ۳ حالت مشخص شد که پیرسازی مصنوعی از جهت بازگردانی سختی از دست‌رفته به هنگام جوشکاری بهتر از دو حالت دیگر است.

فرایند جوشکاری با گاز محافظ و الکتروود تنگستنی برای جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مشکلات معمول در جوشکاری آلیاژهای کارسخت شده و عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم، مثل سری ۷۰۰۰، می‌توان به افت استحکام در منطقه متأثر از حرارت اشاره کرد. راه‌حل این مشکل استفاده از حرارت ورودی کم و انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری است. در نهایت افت استحکام در منطقه متأثر از حرارت را می‌توان با عملیات حرارتی پیرسازی طبیعی پس از جوشکاری تقریباً به‌طور کامل بازبایی کرد [۴]. ریچاردسون<sup>۱</sup> و همکاران [۵] پروفیل سختی را برای آلیاژ ۷۰۷۵ جوشکاری شده در یک روز و ۳۰ روز پس از جوشکاری رسم کردند. به هنگام جوشکاری سختی تا حدود ۸۰ افت کرده ولی آلیاژ پیرشونده ۷۰۷۵ بعد از گذشت ۳۰ روز (پیرسازی طبیعی) افت سختی خود را ترمیم و سختی تا حدود ۱۰۰ بالا رفته است.

شبهه‌سازی جوشکاری به روش المان محدود برای بررسی و تحلیل مسائلی چون انتقال حرارت، تغییرات فازی در حین فرایند، تنش‌های پسماند و آثار آنها استفاده شده است. این روش در دهه‌های اخیر با گسترش و پیشرفت نرم‌افزارهای کامپیوتری به‌ویژه نرم‌افزارهای المان محدود مرسوم شده است [۶]. در اوایل دهه اخیر محققان با استفاده از روش المان محدود و با انجام تحلیل‌های ترموالاستیک، به محاسبه میدان حرارتی پرداخته‌اند [۷]. در این پژوهش برای تبیین مدل توزیع جریان منبع حرارت از روش گوسین که متداول‌ترین روش تعیین توزیع دماست، استفاده شده است.

با وجود بحث‌های گوناگون بر روند افت استحکام ناشی از جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم، مطالعات کمی برای پیش‌بینی رفتار نرم‌شوندگی آلیاژ سری ۷۰۰۰ شده است. به همین منظور از یکی از آلیاژهای این سری که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای استحکام بالا و پیرسخت شونده است برای این پژوهش استفاده شده است. آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم در بین آلیاژهای آلومینیوم جزء آلیاژهایی است که دارای بیشترین میزان استحکام است. در این پژوهش سعی شده تا تأثیر میزان حرارت ورودی جوشکاری بر افت استحکام این آلیاژ مورد بحث قرار گیرد و روابطی برای پیش‌بینی میزان افت استحکام آن پیشنهاد شود.



شکل ۱. مش بندی و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی

Fig. 1. Meshing and boundary conditions of the model

برای شرایط غیر هم‌دما<sup>۱</sup>، برای پیش‌بینی افت سختی از رابطه آرومی کمک گرفت. این رابطه برای مسائل مختلف از قبیل تغییر فازها، اندازه رشد دانه‌ها و... به کار گرفته می‌شود. پاپازیان با ساده‌سازی رابطه آن را به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد:

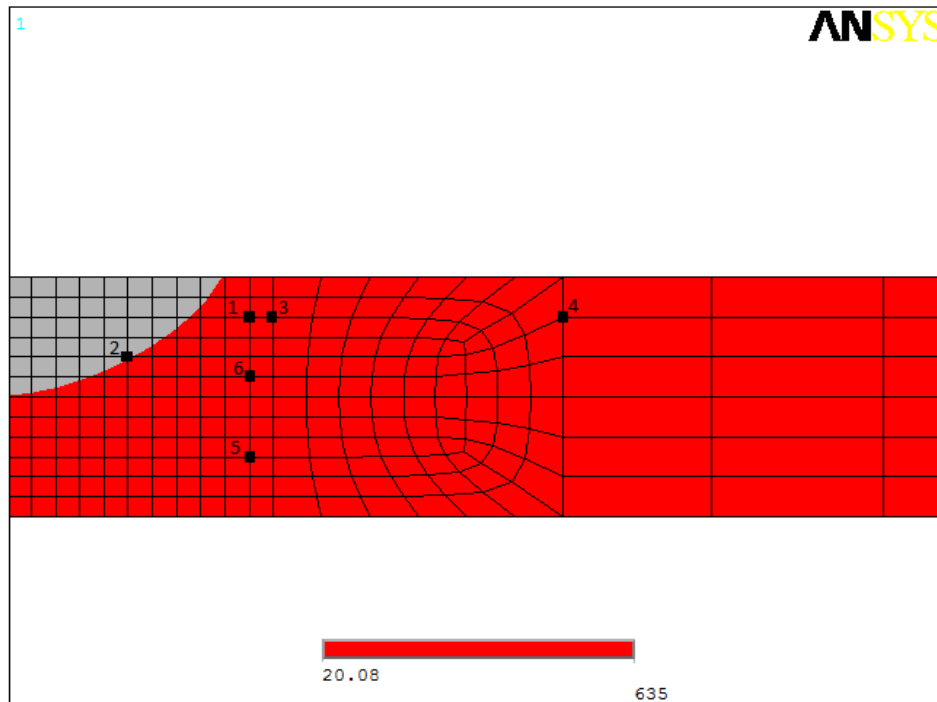
$$\begin{cases} y = 1 - \exp(-k^n \cdot t^n) \\ k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $Q$  انرژی اکتیواسیون،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دما برحسب کلوین،  $t$  زمان،  $n$  و  $k_0$  نیز ضرایب ثابتی هستند که برای هر ماده متفاوت است. خروجی این معادله درصد فرآیند است که می‌تواند میزان افت سختی را با توجه به دما و زمان مربوطه به دست آورد. پاپازیان برای مقادیر ثابت این معادله برای آلیاژ ۷۰۷۵ مقادیر زیر را محاسبه کرد:

برای این پژوهش برابر ۳ در نظر گرفته شد. انتقال حرارت به دست آمده برای تبادل حرارت جوش با هوای آزاد و گاز محافظ در اندازه‌گیری‌های مختلف مقادیری بین  $15 \text{ W / m}^2 \text{ K}$  الی ۵۰ گزارش شده است. به دلیل تقارن موجود در مدل نصف مدل در نرم‌افزار المان محدود انسیس<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شد. برای تحلیل حرارتی سه‌بعدی، المان سالیید ۷۰<sup>۲</sup> بکار گرفته شد. در ادامه از آنجاکه امکان اعمال مستقیم شار حرارتی گوسین بر روی المان سالیید ۷۰ وجود ندارد، بعد از شبکه‌بندی سه‌بعدی، سطوح خارجی این المان‌ها انتخاب و بر روی آن‌ها المان‌های سطحی سرف ۱۵۳<sup>۳</sup> ایجاد گردید.

### ۳- پیش‌بینی سختی

مدل‌های مختلفی برای این منظور پیشنهاد شده است. پاپازیان<sup>۴</sup> [۱۲]



شکل ۲. گره‌های انتخابی برای نمونه سوم

Fig. 2. selected nodes in sample no. 3

۱۵×۲۱ سانتی‌متر تهیه شد. سطح نمونه‌ها برای جوشکاری با برس سیمی و سنباده تمیز شدند.

بعد از آزمایش‌های اولیه با به‌دست‌آوردن شرایط ایده‌آل جوشکاری (سرعت بهینه، دبی گاز مناسب، قطر الکتروود، طول قوس مناسب و...) جوشکاری روی نمونه‌های اصلی با متغیرهای جدول ۲ انجام شد.

بعد از اتمام جوشکاری تمامی نمونه‌ها برای مقطع زدن آماده شدند. مقاطع هر نمونه باید در مکانی یکسان باشد تا نتایج قابل‌مقایسه با یکدیگر باشند. برای مقطع زدن بهتر است از روش‌های فیزیکی مانند گیوتین و قیچی استفاده شود چراکه در روش‌هایی که با گرما ورق بریده می‌شود مقداری گرمای اضافه به ورق وارد می‌شود که ناخواسته روی نتایج تأثیر می‌گذارد. نمونه‌ها بعد از مقطع زنی (از دو مکان ورق جوشکاری شده) و آماده متالوگرافی شدند. دو مقطع در فاصله‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری ابتدای جوش زده شد. مقاطع اول بعد از ۷ ماه متالوگرافی و سختی‌سنجی شدند. فرایند پیرسازی به‌صورت طبیعی و در دمای اتاق و اتمسفر هوا انجام شد. مقاطع دوم بعد از ۷ روز آماده متالوگرافی شدند.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = 123 \left( \frac{Kj}{mol} \right) \\ k_0 = 1.55 \times 10^{14} (s^{-1}) \\ n = 1.5 \end{array} \right.$$

نمودار دما - زمان برای گره‌های مشخص شده در شکل ۲ برای نمونه سوم استخراج شدند. گره‌های انتخاب شده از مکان‌های مختلف با سابقه دمایی متفاوت انتخاب شدند.

#### ۴- مواد و روش‌ها

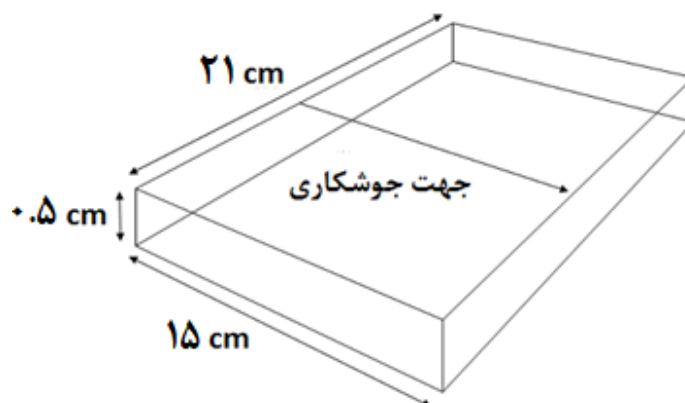
آلیاژ مورد استفاده در این مقاله آلومینیم ۷۰۷۵ به ضخامت ۵ میلی‌متر است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ به‌صورت جدول ۱ است:

سختی‌سنجی آلیاژ پیش از جوشکاری با دستگاه میکرو سختی ویکرز انجام شد و ۱۳۳ ویکرز به دست آمد. از ورق اصلی نمونه‌هایی به ابعاد

جدول ۱. ترکیب آلیاژ ۷۰۷۵ به دست آمده با آزمایش کوانتومتری

Table 1. Chemical composition of 7075 aluminum obtained by spark emission spectroscopy

منگنز	کرم	نیکل	مس	منیزیم	روی	آلومینیم
۰٫۱۷۴	۰٫۱۹۷	۰٫۰۰۶۴	۱٫۵۲	۲٫۱۹	۵٫۲۹	مابقی
قلع	آنتیموان	سرب	برلیوم	تیتانیوم	سیلیسیم	زیرکونیم
<۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۲۸	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۱۹	۰٫۰۱۳۶	۰٫۰۵۹۸	۰٫۰۰۵۱
وانادیم	۰٫۰۰۴۴					



شکل ۳. مدل ورق آلومینیومی جوشکاری شده

Fig. 3. Schematic of the welded aluminum sheet

جدول ۲. متغیرهای جوشکاری نمونه‌های مختلف

Table 2. Welding variables of the samples

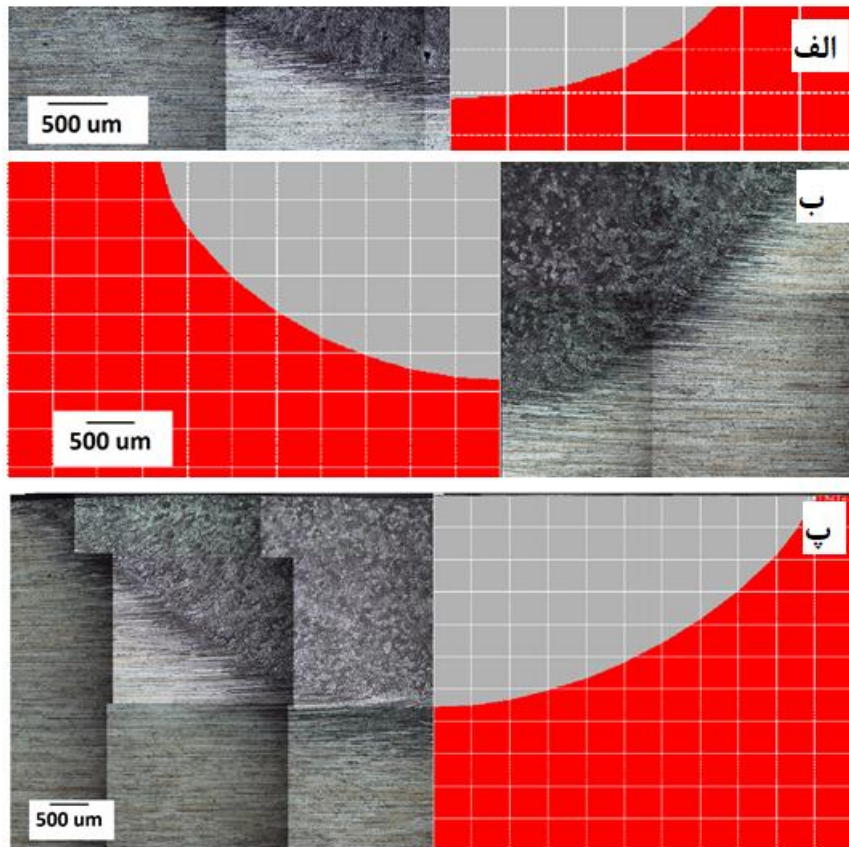
نمونه	جریان جوشکاری (A)	ولتاژ جوشکاری (V)	دبی گاز (Lit/min)	سرعت (mm/s)
۱	۱۶۰	۱۵	۵	۲
۲	۱۷۰	۱۵	۵	۲
۳	۱۹۰	۱۵	۵	۲

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- صحنه‌گذاری مدل شبیه‌سازی شده با شرایط تجربی

اختلاف بین مدل‌های تجربی و شبیه‌سازی را می‌توان نتیجه دسترسی به خواص ترموفیزیکی دقیق ماده در دماهای بالا و وابستگی آن‌ها به دما دانست. عدم شبیه‌سازی حرکت سیال نیز می‌تواند مورد دیگری بر اختلاف این دو مقدار باشد. کالیبره نبودن دستگاه‌های مورد استفاده در جوشکاری و عدم نشان دادن صحیح متغیرهای جوشکاری نیز دلیل دیگری برای این اختلاف است. با توجه به مسائل گفته شده و درصد خطای زیر ده درصد بین مدل واقعی و نمونه شبیه‌سازی شده آن صحت مدل تأیید می‌شود.

تمامی مدل‌های شبیه‌سازی شده با مدل‌های واقعی برای صحنه‌گذاری مدل شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۴ مقایسه حوضچه جوش برای هر مدل شبیه‌سازی با نمونه واقعی آن است. در این روش تجربی سعی شده تا تمام پارامترها، قیدها، شرایط مرزی و سایر عوامل موثر لحاظ گردد. خطا در ابعاد واقعی جوش با ابعاد حاصل از شبیه‌سازی برای تمامی نمونه‌های آزمایش در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴. صحنه‌گذاری مدل: الف) نمونه اول ( $I=160A$ )، ب) نمونه دوم ( $I=170A$ )، پ) نمونه سوم ( $I=190A$ )

Fig. 4. Validating the finite element models: a) sample no. 1 ( $I=160A$ ), b) sample no. 2 ( $I=170A$ ), c) sample no. 3 ( $I=190A$ )

جدول ۳. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

Table 3. Comparison of experimental and numerical results

اختلاف	مدل شبیه‌سازی		مدل تجربی		ردیف	
	عمق حوضچه (%)	عرض حوضچه (%)	عمق حوضچه (میلی‌متر)	عرض حوضچه (میلی‌متر)		
۹٫۲۱	۷٫۹۸	۰٫۸۳	۴٫۵۰	۰٫۷۶	۴٫۸۹	۱
۸٫۹۱	۸٫۷۰	۲٫۲۹	۷٫۵۰	۲٫۵۸	۶٫۹۰	۲
۷٫۰۶	۴٫۴۵	۲٫۵	۱۰٫۱۰	۲٫۶۹	۱۰٫۵۷	۳

جدول ۴. پروفیل سختی تمام نمونه‌ها

Table 4. Hardness profile of samples

نمونه	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	فلز جوش	منطقه متأثر از حرارت	فلز پایه
۱	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰	۳٫۳	۷
		۱۰۳	۹۴٫۵	۱۳۳
۲	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰	۴	۷
		۱۱۷	۹۸٫۷	۱۳۳
۳	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰	۵٫۳	۷
		۱۲۲	۹۴٫۹	۱۳۳

<sup>۱</sup> Hardness Vickers (HV)

جدول ۵. سختی نمونه‌ها با گذشت ۷ ماه از جوشکاری

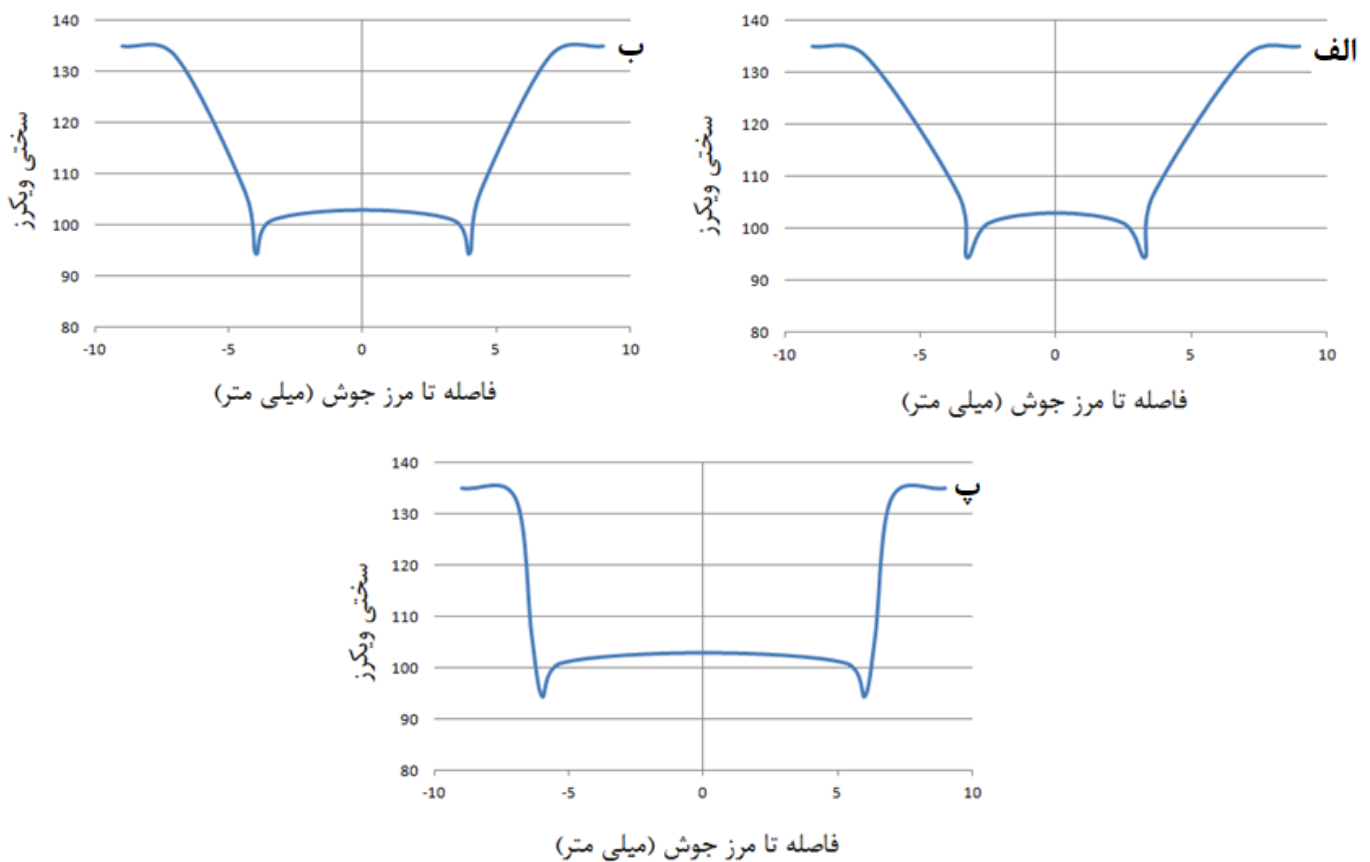
Table 5. Hardness of the samples 7 months after welding.

نمونه	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	سختی ویکرز
۱	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰
		۱۲۶
۲	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰
		۱۲۷
۳	فاصله عرضی از خط جوش (mm)	۰
		۱۳۰

محلولی شده و فلز پایه، منطقه فرایپر شده قرار دارد که سختی افت پیدا کرده در این ناحیه قابل بازیابی با عملیات حرارتی و پیرسازی نیست. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، با نزدیک شدن به خط جوش، سختی افت می‌کند که نشان دهنده رفتار نرم‌شوندگی منطقه متأثر از حرارت است. حرارت ناشی از جوشکاری باعث عملیات حرارتی در آلیاژ می‌شود و افت سختی را در پی دارد. با افزایش شدت جریان جوشکاری، حرارت ورودی به قطعه افزایش می‌یابد و عملیات حرارتی در منطقه وسیع‌تری اتفاق می‌افتد. اثر این پدیده با مقایسه شکل‌های ۵-الف (۱۶۰ آمپر) و ۵-ب (۱۹۰ آمپر) مبرهن می‌شود. سختی نمونه‌ها پس از گذشت ۷ ماه، نشان از این دارد که نرم‌شوندگی مجاور خط جوش تا حدی جبران شده است. اما هنوز از سختی فلز پایه (۱۳۳ ویکرز) کمی فاصله دارد. در حالی که با فاصله گرفتن از خط جوش، سختی نمونه افزایش یافته و به سختی فلز پایه نزدیک‌تر شده است. پس از هفت ماه دیگر نرم‌شوندگی شدید منطقه متأثر از حرارت دیده نمی‌شود. این پدیده

۵-۲- سختی

پروفیل سختی برای تمامی نمونه‌ها به شرح جدول ۴ است: با به‌دست آوردن سختی نمونه‌ها می‌توان نمودار سختی بر حسب فاصله از خط جوش را برای نمونه‌ها رسم کرد. همان‌طور که گفته شد آلیاژ ۷۰۷۵ از سری آلیاژهای پیرسخت شونده آلومینیوم است. اشاره شد که به هنگام جوشکاری شاهد افت سختی در قطعه جوشکاری شده خواهیم بود. افت سختی در این آلیاژها به دو صورت رخ می‌دهد؛ در ناحیه نزدیک به مرز ذوب، افت سختی به دلیل آنیل محلولی داریم. این افت سختی با عملیات پیرسازی قابل جبران است و به سختی قبل قابل بازگشت است. برای بررسی صحت این موضوع بعد از گذشت ۷ ماه از جوشکاری، از نمونه‌ها آزمون سختی گرفته شد. در جدول ۵ نتایج آن مشاهده می‌شود. در فاصله ای مشخص از خط جوش همه نمونه‌ها، افت سختی شدت بیشتری دارد که افت سختی ناشی از آنیل محلولی است. بین ناحیه آنیل



شکل ۵. سختی برحسب فاصله از خط جوش: الف) نمونه اول (I=160A)، ب) نمونه دوم (I=170A)، پ) نمونه سوم (I=190A)

Fig. 5. Hardness according to the distance from the weld line: a) sample no. 1 (I=160A), b) sample no. 2 (I=170A), c) sample no. 3 (I=190A)

برای این منظور از نرم‌افزار متلب کمک گرفته شد. رابطه به‌دست‌آمده برای تقریب نمودارهای دما - زمان به‌صورت رابطه (۴) است:

$$T = a_1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-b_2}{c_2}\right)^2\right) + \dots + a_n \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-b_n}{c_n}\right)^2\right) \quad (4)$$

نشان می‌دهد که نرم‌شوندگی در منطقه متأثر از حرارت از نوع آنیل محلولی بوده و جبران شده است. اما نرم‌شوندگی در مجاورت خط جوش ترکیبی از دو مکانیزم آنیل محلولی و کارسختی است که نرم‌شوندگی کارسختی جبران نشده و باعث شده سختی این ناحیه از سختی فلز پایه فاصله بیشتری داشته باشد.

#### ۵-۳- پیش‌بینی افت سختی

پس از استخراج نمودار دما زمان برای گره‌های مختلف و رسم آن در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup>، رابطه‌ای برای تقریب‌زدن نمودار دما - زمان استخراج شد.

1 Matlab



نشده و می‌توان نتیجه گرفت تاثیر کار سرد از بین نرفته است. برای گره شماره ۳ (گره موجود در منطقه متأثر از حرارت) نمودار درصد سختی - دما در شکل ۶ آورده شده است. این نمودار بیان می‌کند که سختی آلیاژ بعد از جوشکاری در این منطقه به طور کامل از بین رفته و به سختی مقدار آنیل آلیاژ (۶۰ ویکرز) رسیده است. از نتایج سختی‌سنجی در جدول در منطقه متأثر از حرارت برای نمونه سوم سختی آلیاژ عدد ۹۴٫۹ ویکرز خوانده می‌شود. این سختی طبق محاسبات باید به مقدار ۶۰ می‌رسید. علت این اختلاف در از بین رفتن سختی حاصل از کار سرد آلیاژ می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت سختی حاصل از پیرسختی به طور کامل بعد از جوشکاری در این گره از بین رفته ولی سختی حاصل از کار سرد دچار افت نشده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش اجزای محدود به منظور شبیه‌سازی فرایند جوشکاری به صورت سه‌بعدی استفاده شد. نمودارهای دما - زمان برای نقاط مختلف نمونه‌ها استخراج شد و با استفاده از معادلات آورامی درصد فرایبری و مقدار سختی بعد از جوشکاری قابل‌پیش‌بینی است. همچنین تأثیر میزان حرارت ورودی جوشکاری بر افت استحکام آلیاژ سری ۷۰۰۰ مورد بحث قرار گرفت و روابطی برای پیش‌بینی میزان افت استحکام آن پیشنهاد شد. به هنگام جوشکاری شاهد افت سختی در منطقه متأثر از حرارت هستیم. این افت سختی با بالا رفتن حرارت ورودی بیشتر است و در منطقه متأثر از حرارت تمامی نمونه‌ها سختی ناشی از پیرسازی کاملاً از بین رفت. افت سختی در منطقه آنیل محلولی شده با عملیات حرارتی مناسب قابل‌جبران است، ولی در منطقه فرایبری شده قابل بازگردانی نیست. بهترین مدل پیرسازی برای این منظور پیرسازی مصنوعی است. در این پژوهش از پیرسازی طبیعی استفاده شد که نتیجه آن بازبایی سختی آلیاژ تا حدود ۹۷ درصد سختی اولیه آلیاژ بود.

با نزدیک شدن از مرز منطقه متأثر از حرارت به خط جوش، منطقه دمایی که در آن سختی تا سختی شرایط آنیل افت می‌کند، گسترده می‌شود. این منطقه دمایی برای گره شماره ۶ در مرز منطقه متأثر از حرارت از ۳۶۸ درجه سانتی‌گراد تا ۴۷۸ درجه سانتی‌گراد و برای گره ۲ در مرز حوضچه مذاب از ۳۸۰ تا ۵۲۳ درجه سانتی‌گراد است.

در رابطه ۴ مقادیر  $a, b, c$  توسط نرم‌افزار متلب برای هر گره به دست می‌آیند.

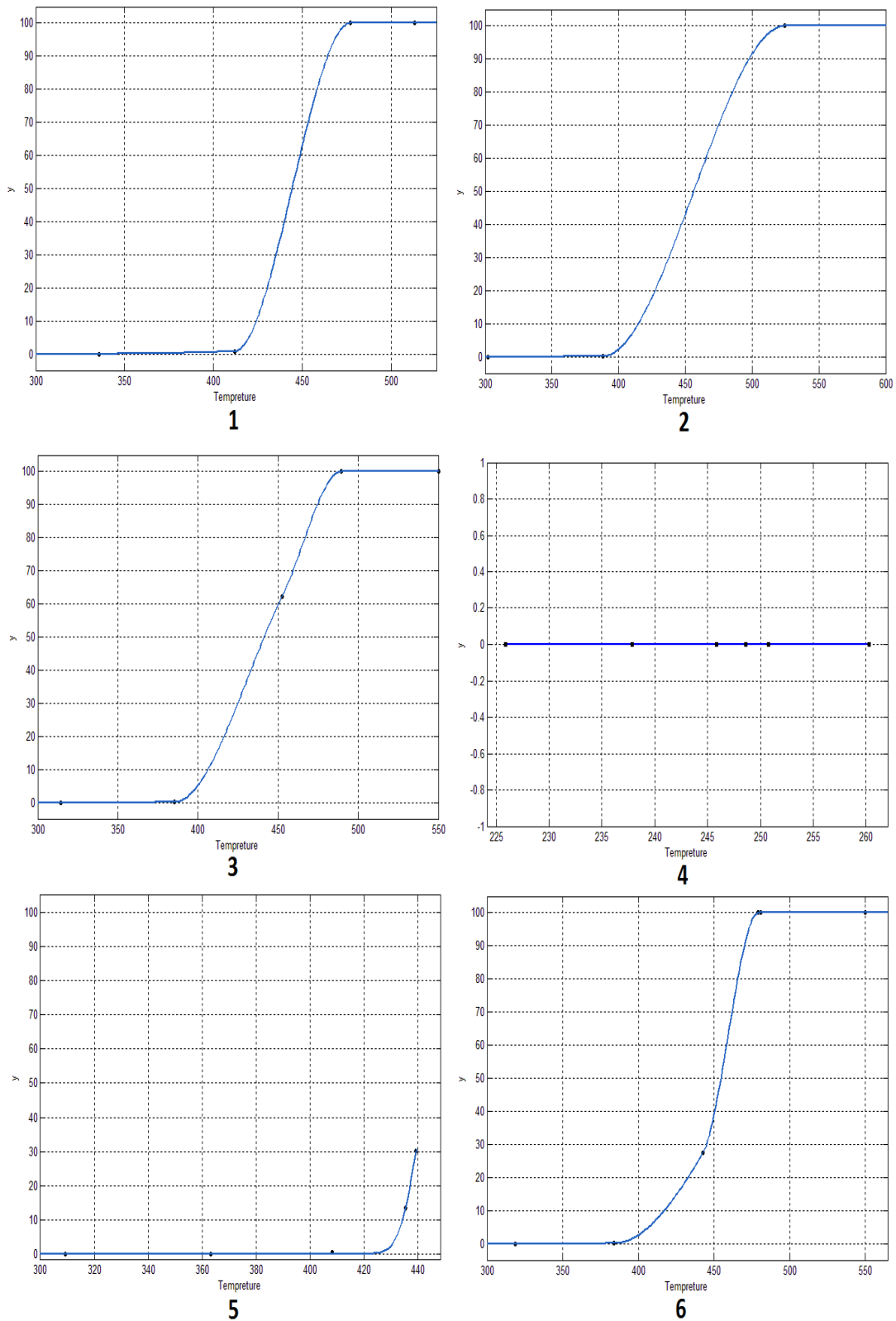
نمودار دما - زمان برای گره‌هایی منتخب از شبیه‌سازی نمونه سوم استخراج شدند. گره‌های انتخاب شده از مکان‌های مختلف با سابقه دمایی متفاوت انتخاب شدند. به عنوان مثال گره شماره ۲ در مرز جوش و گره‌های ۱ و ۳ در منطقه متأثر از حرارت و گره ۴ در فلز پایه انتخاب شده‌اند. درصد فرایبری در هر دما برابر مقدار به دست آمده از رابطه (۵) است:

$$y = y_1 + y_2 \times (1 - y_1) \quad (5)$$

که در آن  $y_1$  فرایبری اولیه و  $y_2$  مقدار مجموع درصد فرایبری در دمایی مربوطه است. باید به این نکته توجه کرد که درصد فرایبری در مرحله دوم ( $y_2$ ) باید از درصد فرایبری مرحله اول به دست آید. اگر  $y = 0$  باشد، به این معناست که مقدار سختی آلیاژ افت نکرده و برابر مقدار آن برای فلز پایه است. اگر  $y = 100$  باشد، به این معناست که سختی آلیاژ ۱۰۰ درصد افت کرده و برابر مقدار سختی آلیاژ در شرایط آنیل است. برای آلیاژ مورد آزمایش میزان سختی شرایط اولیه برابر ۱۳۳ ویکرز و مقدار سختی آلیاژ ۷۰۷۵ در شرایط آنیل برابر ۶۰ ویکرز است.

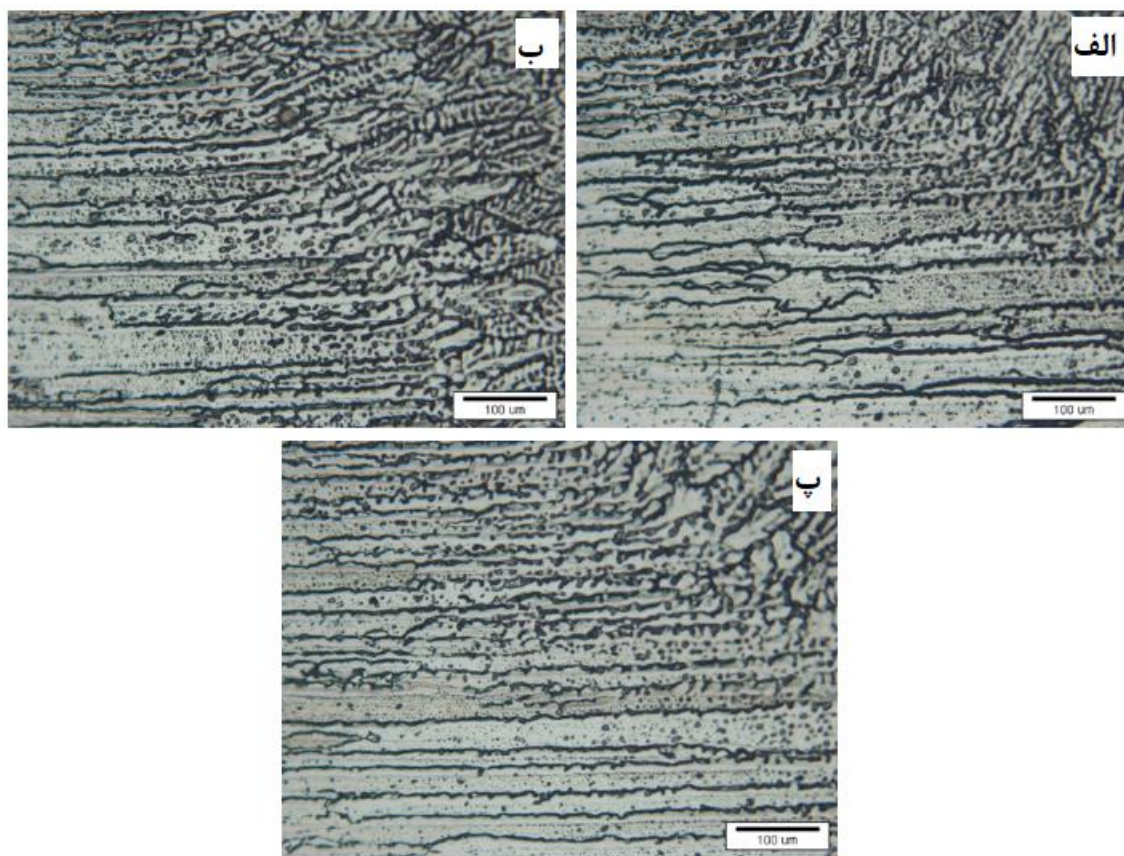
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، گره ۴ دچار افت سختی نشده است. علت این امر دور بودن گره ۴ نسبت به منبع حرارت جوشکاری می‌باشد. گره ۵ به میزان ۳۰ درصد فرایبری شده است. این گره در محدوده‌ای قرار دارد که دمایی منبع حرارتی روی آن تأثیر می‌گذارد ولی به اندازه‌ای نیست که سختی آن به طور کامل افت پیدا کند. بقیه گره‌ها به طور کامل فرایبری شده‌اند (درصد فرایبری در نمودار ۱۰۰ درصد می‌باشد) و سختی ناشی از پیرسازی آنها به طور کامل از بین رفته است.

سختی آلیاژ می‌تواند ناشی از پیرسختی و کار سرد باشد. به هنگام جوشکاری و تحت تاثیر حرارت ناشی از منبع حرارتی، سختی می‌تواند افت پیدا کند. تاثیر این امر بر پیرسختی به صورت فرایبری و بر سختی ناشی از کار سرد به صورت تبلور مجدد خواهد بود. تبلور مجدد را می‌توان با عکس‌های متالوگرافی تشخیص داد. شکل ۷ الف-پ با میکروسکوپ نوری تهیه شده‌اند. در شکل منطقه متأثر از حرارت تمامی نمونه‌ها آورده شده است و همان‌طور که دیده می‌شود پس از جوشکاری قطعه دچار تبلور مجدد



شکل ۶. نمودار درصد فرایبری - دما برای گره‌های انتخابی نمونه سوم (I=190A)

Fig. 6. Overaging percentage according to the temperature for the selected nodes in sample no. 3 (I=190A)



شکل ۷. منطقه متأثر از حرارت: الف) نمونه اول (I=160A)، ب) نمونه دوم (I=170A)، پ) نمونه سوم (I=190A)

Fig. 7. Heat-affected zone in samples: a) sample no. 1 (I=160A), b) sample no. 2 (I=170A), c) sample no. 3 (I=190A)

Jersey, USA, (2003).

- [5] B. Hu, I. Richardson, Hybrid laser/GMA welding aluminium alloy 7075, *Welding in the World*, 50(7-8) (2006) 51-57.
- [6] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical transactions B*, 15(2) (1984) 299-305.
- [7] S. Bate, R. Charles, A. Warren, Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD, *International Journal of Pressure Vessels Piping*, 86(1) (2009) 73-78.
- [8] A. Farzadi, S. Serajzadeh, A. Kokabi, Modeling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc welding

## منابع

- [1] W. Jurczak, L. Kyzioł, Dynamic properties of 7000-series aluminum alloys at large strain rates, *Polish Maritime Research*, 19(1) (2012) 38-43.
- [2] G. Fribourg, Precipitation and plasticity couplings in a 7xxx aluminium alloy: application to thermomechanical treatments for distortion correction of aerospace component, *institute polytechnique de Grenoble*, (2010).
- [3] G. Fu, F. Tian, H. Wang, Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3) (2006) 216-220.
- [4] S. Kou, *Welding metallurgy*, A John Wiley & Sons, New

- numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3) (2008) 383-394.
- [11] G.J. A., A. M., *Computational Welding Mechanics*, Springer Science, New York, USA, 2005.
- [12] J.M. Papazian, Calorimetric studies of precipitation and dissolution kinetics in aluminum alloys 2219 and 7075, *Metallurgical Transactions A*, 13(5) (1982) 761-769.
- of commercial pure aluminum, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(3-4) (2008) 258-267.
- [9] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, S. Hanke, A. Fischer, Finite element modeling of the effect of heat input on residual stresses in dissimilar joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5-8) (2011) 649-656.
- [10] S.A. Mousavi, R. Miresmaeili, *Experimental and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. J. Pirbarjasteh, M. Iranmanesh, E. Ranjbarnodeh, E. Cheraghi Rizi, *Finite Element Simulation and Experimental Verification of HAZ Softening during Welding of Aluminum alloy 7075*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(8) (2023) 1009-1020.

DOI: 10.22060/mej.2023.21436.7582

