



## شبیه‌سازی اجزاء محدود تأثیر منبع سردکننده دنباله‌رو بر اعوجاج ناشی از جوشکاری آلومینیوم ۳۱۰۵

فرشاد جعفری ویدوجی، اسلام رنجبر نوده\*، سید احسان میرصالحی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

### کلمات کلیدی:

روش اجزاء محدود  
منبع سردکننده دنباله‌رو  
اعوجاج  
آلومینیوم ۳۱۰۵

**خلاصه:** راه‌های مختلفی برای کاهش اعوجاج ناشی از جوشکاری وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از روش جدیدی به نام منبع سردکننده دنباله‌رو است. در این پژوهش به بررسی تأثیر منبع سردکننده دنباله‌رو بر کاهش اعوجاج ناشی از جوشکاری پرداخته شده است. در این بررسی، ابتدا آلیاژ آلومینیوم کار شده ۳۱۰۵ به ضخامت ۲ میلی‌متر، با روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز محافظ بدون منبع سردکننده دنباله‌رو، جوشکاری شد. در گام بعد، یک منبع سردکننده از گاز آرگون برای سردکردن سریع خط جوش تعبیه و مورد استفاده قرار گرفت. سپس انتقال حرارت و تنش‌های حرارتی ناشی از جوشکاری با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی با و بدون در نظر گرفتن تأثیر منبع سردکننده اعمال شده شبیه‌سازی شد. در مرحله بعد تأثیر قطر و دبی گاز سردکننده بر توزیع دما و اعوجاج ناشی از جوشکاری، تحلیل شد. مشخص شد که استفاده از منبع سردکننده دنباله‌رو سبب با ایجاد تنش‌های کششی، کرنش‌های پلاستیکی کششی ایجاد کرده و کرنش‌های فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران می‌نماید. منبع سردکننده دنباله‌رو مقدار اعوجاج ناشی از جوشکاری را حدود ۳۰ درصد کاهش داد و باعث افزایش سختی در منطقه متأثر از حرارت به مقدار ۱۰٪ شد.

### ۱- مقدمه

استفاده از قیدوبند در مرحله ساخت است [۴]. روش‌های از قبیل عملیات حرارتی، عملیات مغناطیس پالسی، عملیات ساچمه‌زنی و... برای کاهش تنش و یا تبدیل تنش به تنش فشاری رایج است. به‌عنوان مثال، ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران اثر ارتعاش حین جوشکاری را بر تنش پسماند و اعوجاج در جوش سربه‌سر چند پاسه بررسی کردند [۵]. در سال‌های اخیر روشی جدید با نام جوشکاری با منبع سردکننده دنباله‌رو ابداع شده است. در این روش، از یک منبع سردکننده مثل آب، گاز آرگون، نیتروژن مایع و غیره استفاده می‌شود و محل جوش بلافاصله پس از اتصال، خنک می‌شود که این امر باعث کاهش تنش پسماند در قطعه می‌شود [۵-۸]. این تکنیک جهت کاهش تنش و حذف اعوجاج در جوش، توسط لوان<sup>۲</sup> و همکاران اختراع شد. این تکنولوژی جدید بر اساس تأثیر فروکش حرارتی موضعی بوده و می‌تواند میدان حرارتی شبه ایستا قابل کنترل و تنش الاستیک- پلاستیکی در منطقه جوش ایجاد کند که سبب کاهش تنش باقیمانده و حذف اعوجاج در منطقه جوش شود [۶]. لی<sup>۳</sup> و همکاران [۹] برای کنترل اعوجاج و تنش پسماند ایجاد شده در

آلومینیوم فلز سبکی است که نسبت استحکام به وزن بالایی دارد. قابلیت شکل‌پذیری استثنایی، مقاومت به خوردگی مطلوب در محیط‌های شیمیایی و قابلیت جوشکاری عالی تا ضعیف (بسته به سری آلیاژ) باعث شده است تا کاربرد آن در صنایع هوافضا و مسکونی روند روبه‌رشد و روزافزونی به خود بگیرد. استحکام نهایی این فلز در حالت خالص حدوداً ۹۰ مگاپاسکال است که با آلیاژسازی، کرنش سختی یا عملیات حرارتی تا حدود هشت برابر یعنی حدوداً ۷۰۰ مگاپاسکال قابل ارتقا است [۱]. تنها سه خانواده XXX۱، XXX۳ و XXX۵ از آلیاژهای آلومینیوم، قابلیت جوش‌پذیری مناسبی دارند [۲]. چالش‌های عمده در جوشکاری قوسی این سه سری عبارتند از: نیاز به قوسی با تمرکز حرارتی بالا، اعوجاج زیاد و نیز افت سختی و استحکام به‌صورت موضعی در نواحی در معرض حرارت قوس [۳]. از این‌رو، لازم است تا در مرحله طراحی، مقدار اعوجاج و همچنین تنش‌های پسماند را پیش‌بینی کرده و آن‌ها را تا حد امکان کاهش داد. محققین در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری برای این منظور انجام دادند. یکی از روش‌های کاهش اعوجاج،

- 1 Xuang
- 2 Luan
- 3 Li

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



### جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۳۱۰۵AA

Table 1. Chemical composition of 3105 AA alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other
<۰/۶	<۰/۷	<۰/۳	۰/۰-۲/۸	۰/۰-۲/۸	<۰/۲	<۰/۴	<۰/۱	<۰/۱۵

ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آمده است. نمونه‌هایی به ابعاد به طول ۲۵۰، عرض ۴۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر آماده و قبل از جوشکاری نمونه‌ها تمیزکاری و سمباده زنی شدند تا آلودگی‌های سطحی رفع شوند. فرآیند مورد استفاده روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز محافظ بدون فلز پرکننده بود و نمونه‌ها بدون پخ‌زنی و با استفاده از قیدوبند طراحی شده، به‌صورت تک پاسه با جریان متناوب و به صورت یک جهته و بدون اعمال توالی خاص برای جوشکاری، ایجاد شدند. شمایی از آزمایش عملی در شکل ۱ نشان داده شده است. الکتروود تنگستن با قطر ۲/۴ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. یک منبع سردکننده دنباله‌رو از گاز آرگون با دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد در فاصله معینی در پشت قوس جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که این منبع سردکننده توسط یک شلنگ گاز متصل به کپسول گاز آرگون اعمال شد. اطلاعات و متغیرهای مورد استفاده آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. روش کلی کار به این صورت است که ابتدا نمونه‌ای بدون استفاده از منبع سردکننده جوشکاری شد و اطلاعات بدست آمده، به عنوان مرجع مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نمونه‌های بعدی با اعمال منبع سردکننده و تغییر متغیرهای مربوطه جوشکاری و میزان اعوجاج ایجاد شده اندازه‌گیری و با نمونه مرجع، مقایسه شدند. لازم به ذکر است که برای همه آزمایش‌ها ولتاژ، جریان، سرعت جوشکاری و فاصله نازل تا نمونه به‌ترتیب ۴۰ ولت، ۷۰ آمپر، ۶ میلی‌متر بر ثانیه و ۵ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری اعوجاج، ابتدا یک سمت قطعه روی یک سطح صاف، ثابت و حداکثر اعوجاج در لبه آزاد مورد سنجش قرار گرفت.

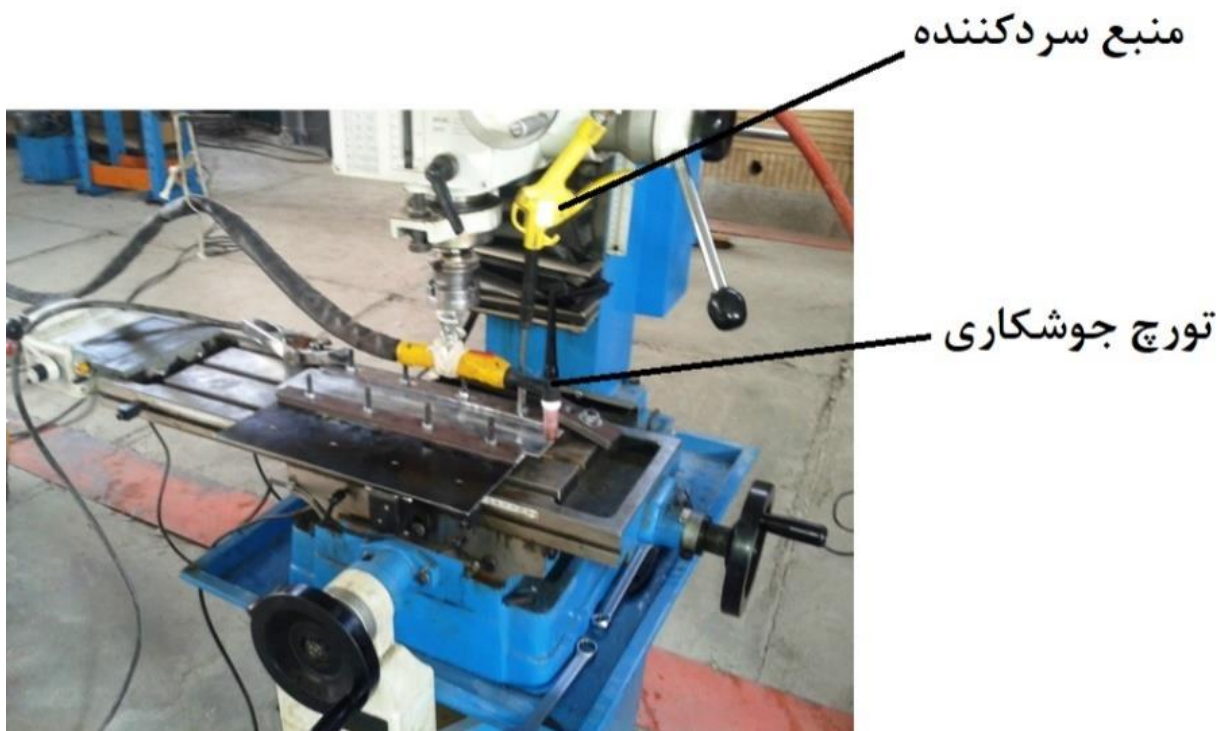
نمونه‌های جوشکاری از وسط و عمود بر خط جوش برش داده شده و پس از مانع کردن، توسط سمباده شماره ۸۰ تا ۲۵۰۰، متالوگرافی ماکرو شد تا اندازه حوضچه به دست آید. اچ ماکرو توسط محلول سوب و به مدت ۲۰ الی ۲۵ ثانیه انجام شد [۱۷]. ترکیب محلول اچ در جدول ۳ ارائه شده است. پس از اندازه‌گیری پهنای حوضچه نمونه‌های متالوگرافی شده، سه نمونه

جوشکاری، از روش منبع سردکننده دنباله‌رو استفاده نموده و نشان دادند که توزیع دمایی در این حالت، با حالت جوشکاری عادی بسیار متفاوت است. در پژوهشی دیگر، جیانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] همین تکنیک را جهت کاهش تنش پسماند ۱۳۱۶ مورد استفاده قرار دادند. تیان<sup>۲</sup> و شی [۱۱] تأثیر منبع سردکننده دنباله‌رو را بر ترک گرم در جوشکاری مورد بررسی قرار دادند. گو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲] یک مدل سه‌بعدی المان محدود ساختند تا اثر منبع سردکننده دنباله‌رو را بر خواص مکانیکی جوش لیزر پالسی و اعوجاج ناشی از آن بررسی کنند. کالا<sup>۴</sup> و همکاران [۱۳] نیز اثر روش یاد شده بر تغییرات فازی ایجاد شده در فولاد کم‌کربن را مطالعه کردند. باجیپ<sup>۵</sup> و همکاران [۱۴] سعی کردند تا با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود چندین مدل منبع سرد دنباله‌رو را مدل‌سازی کرده و تنش پسماند ایجاد شده در جوش سربه‌سر آلیاژ آلومینیوم را به حداقل برسانند. از آنجاکه در پژوهش‌های صورت گرفته پژوهش جامعی در مورد تأثیر متغیرهای منبع سردکننده در جوشکاری آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ صورت نگرفته است، بنابراین در این پژوهش تأثیر استفاده از منبع سردکننده دنباله‌رو بر اعوجاج حاصل از جوشکاری و به‌دنبال آن تأثیر متغیرهای شعاع مؤثر منبع سردکننده، دبی سیال سردکننده بر اعوجاج ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت و سپس تأثیر منبع سردکننده دنباله‌رو بر افت سختی حاصل از جوشکاری مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۲- آزمایش‌های تجربی

آزمایش تجربی روی نمونه‌های یکسانی از آلیاژ ۳۱۰۵ آلومینیوم صورت گرفت. آلومینیوم ۳۱۰۵ AA دارای تقریباً ۹۸٪ آلومینیوم است و آلیاژی غیر قابل سخت‌کاری به‌وسیله عملیات حرارتی به حساب می‌آید که دارای قابلیت شکل‌پذیری، مقاومت به خوردگی و جوش‌پذیری عالی است [۱۵ و ۱۶].

- 1 Jiang
- 2 Tian
- 3 Guo
- 4 Kala
- 5 Bajpei



شکل ۱. شمایی از آزمون‌های عملی

Fig. 1. Schematic of experimental tests

جدول ۲. متغیرهای تجربی مورد استفاده شده در جوشکاری نمونه‌ها

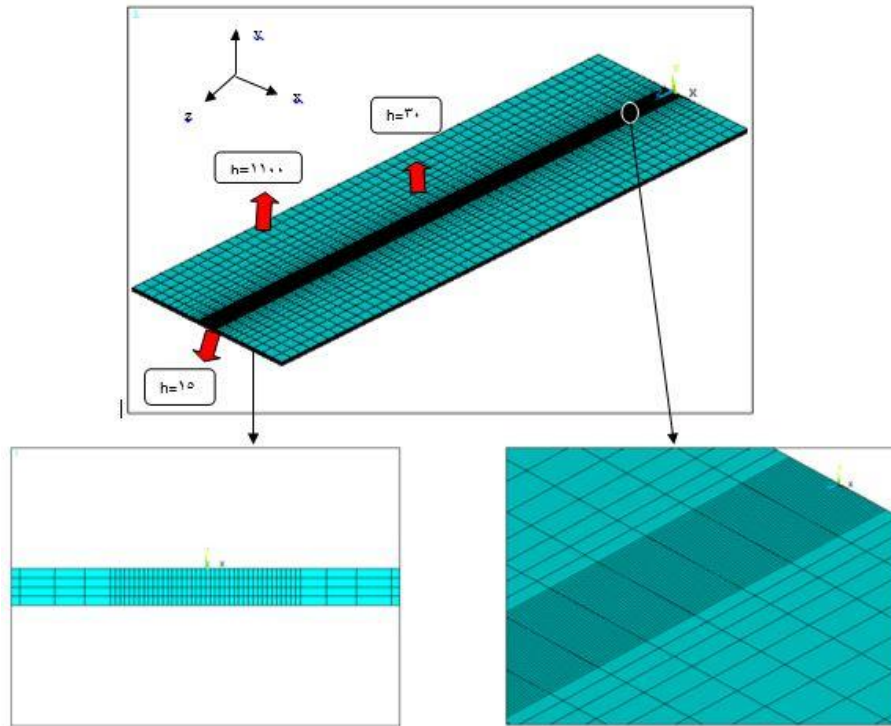
Table 2. Experimental variables used in welding of samples

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴
شعاع مؤثر منبع سردکننده (میلی‌متر)	---	۲۹	۲۰	۲۹
فاصله قوس و منبع سردکننده (میلی‌متر)	---	۳۵	۳۵	۳۵
قطر نازل سردکننده (میلی‌متر)	---	۴	۴	۴
دبی دمش منبع سردکننده (لیتر بر دقیقه)	---	۱۲	۱۲	۸

جدول ۳. ترکیب محلول اچ [۱۷]

Table 3. The etchant composition [17]

ترکیب	H <sub>2</sub> O	HF	HNO <sub>3</sub>	HCl
مقدار (میلی لیتر)	۱۰۰	۲۵	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۲. هندسه و مش بندی مورد استفاده در شبیه سازی

Fig. 2. The geometry and meshing used in the simulation

چون در جوشکاری آلومینیم دما خیلی بالا نیست و در آلیاژهای آلومینیم، سطوح از اکسید پوشیده شده است، می توان از تابش صرف نظر کرد و تنها همرفت را در نظر گرفت [۱۹]. در این پژوهش، سه مقدار برای ضریب انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. برای ۵ میلی متری که قطعه در زیر قیدوبند قرار دارد، مقدار ۱۱۰۰ وات بر مترمربع بر کلون و برای سطح بالایی که با هوای آزاد بیشتر در تماس است، مقدار ۳۰ وات بر مترمربع بر کلون و برای سطح پایینی قطعه که جریان هوای آزاد کمتر است، مقدار ۱۵ وات بر مترمربع بر کلون و دمای محیط قطعه نیز ۲۷ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد [۲۰]. نحوه توزیع قوس روی سطح قطعه کار، در واقع شیب دمایی موضعی و آهنگ خنک شدن نقاط مختلف جوش و منطقه متأثر از حرارت را تغییر می دهد. سه متغیر لازم برای مشخص کردن منبع گرما در مدل، عبارتند از: حرارت ورودی قوس، نحوه توزیع حرارت و سرعت حرکت منبع حرارتی. مطابق معادله (۱) میزان حرارت ورودی به قطعه کار در واحد زمان برابر با حاصل ضرب ولتاژ و جریان در مقدار راندمان قوس است:

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

جهت سختی سنجی ویکرز آماده شدند و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. سختی سنجی با نیروی اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان اعمال بار برابر ۲۰ ثانیه انجام شد.

### ۳- شبیه سازی المان محدود

شبیه سازی اجرای محدود سه بعدی در دو مرحله حرارتی و مکانیکی انجام گرفت. تحلیل حرارتی سه بعدی از المان Solid ۷۰ و برای اعمال حرارت بر روی این المان از المان سطحی Surf ۵۲ و برای تحلیل مکانیکی نیز از المان Solid ۴۵ و Solid ۵۲ استفاده شد. چون در نزدیکی خط جوش، شیب حرارتی بالایی وجود دارد، مطابق شکل ۲ از مش بندی ریزتری در آن ناحیه استفاده شد. در مدل نهایی از ۱۶۰۶۵ گره و ۱۳۳۸۰ المان مورد استفاده قرار گرفت. شرایط مرزی حاکم حین جوشکاری معمولاً به صورت تابش و همرفت در نظر گرفته می شود. دمای کاتد بالاتر از اتمسفر احاطه کننده آن است، در نتیجه انتقال انرژی تابشی از سطح در معرض اتمسفر منجر به ازدست دادن انرژی از طریق تابش می شود و در ضمن، عبور جریان گاز سرد از کاتد گرم نیز باعث انتقال حرارت همرفتی می شود [۱۸].

$$F(\text{Re}) = 2 \left[ \text{Re} \left( 1 + \frac{\text{Re}}{200} \right)^{0.55} \right]^{0.5} \quad (۶)$$

که در این روابط  $G$  تابعی از هندسه ابعادی نازل،  $D$  قطر نازل سردکننده بر حسب متر،  $\Gamma_s$  شعاع مؤثر دایره‌ای که روی سطح به واسطه انتقال حرارت منبع سردکننده ایجاد می‌شود که واحد آن متر است. لازم به ذکر است که جهت ساده‌سازی فرض شد که شعاع مؤثر منطقه تحت سرمایش برابر با قطر نازل است.  $H$  فاصله سر نازل تا سطح بر حسب متر و  $P_r$  عدد پراتل و  $\text{Re}$  عدد رینولدز هستند. در قدم بعدی، اعداد رینولدز و پراتل از معادلات (۷) و (۸) محاسبه شدند که در این روابط  $D$  قطر نازل سردکننده با واحد متر،  $V$  سرعت دمش سیال با واحد متر بر ثانیه،  $\rho$  دانسیته با واحد کیلوگرم بر متر مکعب،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال با واحد کیلوگرم بر متر بر ثانیه،  $\nu$  لزجت سینماتیکی (نسبت لزجت دینامیکی به چگالی) با واحد مترمربع بر ثانیه است. در ضمن  $V$  را می‌توان از تقسیم دبی گاز بر مقدار سطح مقطع خروجی نازل سردکننده بدست آورد [۲۱ و ۲۲].

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (۷)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu}{\rho \alpha} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۸)$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط ارائه‌شده، مقدار ضریب انتقال همرفت ناشی از منبع سردکننده دنباله‌رو به دست می‌آید. شکل ۳ چگونگی اعمال منبع سردکننده در شبیه‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. از آنجایی که خواص مواد برای آلیاژ ۳۱۰۵ در دسترس نبود، از خواص آلیاژ ۳۰۴ که دارای بیشترین شباهت در ترکیب عناصر با آلیاژ ۳۱۰۵ است، استفاده شد. جداول ۴ و ۵ نشان‌دهنده خواص مواد وابسته به دمای این آلیاژ هستند [۲۳]. در مورد شرایط مرزی مکانیکی شایان ذکر است که هنگام انجام جوشکاری، مناطق تحت قید کاملاً مقید بودند و پس از رفع قید، جهت جلوگیری از حرکت جسم صلب تنها نقطه مرجع مختصات در سه جهت مقید شد.

در این پژوهش، مقدار  $0.6$  برای  $\eta$  در نظر گرفته شده است [۲۰]. از معادله (۲) نیز می‌توان برای توزیع انرژی حرارتی قوس الکتریکی به صورت شار حرارتی سطحی استفاده کرد. این انرژی دارای تقارن شعاعی است و در ضمن شار حرارتی سطحی  $q_s$  مطابق معادله (۲) با توزیع گاوسی تقریب زده شد. در این رابطه  $Q$  انرژی حرارتی در واحد زمان و  $r$  فاصله از مرکز منبع حرارتی است.  $r'$  نیز پارامتر توزیع گاوسی است که شعاعی از قطعه است که حول  $95\%$  قوس به آن وارد می‌شود یعنی در این فاصله از مرکز قوس، شدت حرارت ورودی نسبت به مرکز قوس به  $5$  درصد کاهش یافته است. در این پژوهش، مقدار پارامتر توزیع گاوسی، برابر  $3/1$  میلی‌متر و سرعت حرکت قوس برابر  $6$  میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این پژوهش، یک منبع سردکننده پشت سر منبع حرارتی گرم با سرعت یکسان حرکت می‌کند و باعث سرد شدن سریع قطعه می‌شود. این منبع، یک جت سردکننده از گاز آرگون است که در آن، گاز آرگون با دبی خروجی  $10$  لیتر بر دقیقه و  $12$  لیتر بر دقیقه از سر نازل خارج می‌شود. ضریب انتقال حرارت همرفتی ناشی از جت سیال یعنی  $h$  از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۲۱]:

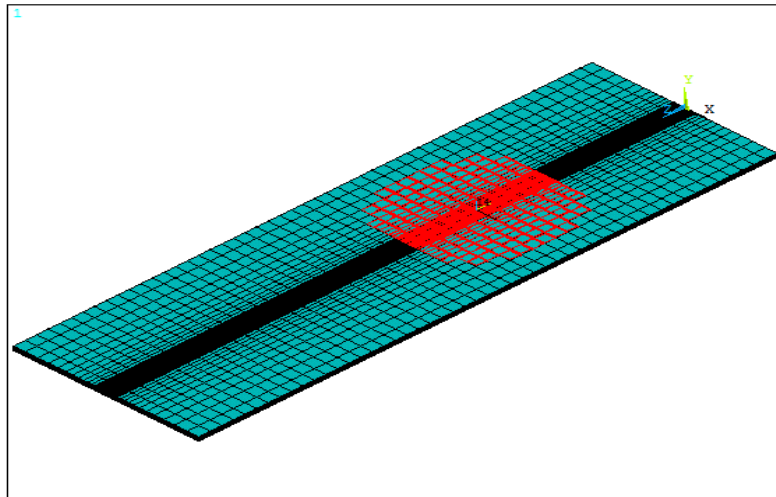
$$q_s = \frac{Q}{2\pi(r')^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{r'}\right)^2\right] \quad (۲)$$

$$h = k \frac{\overline{Nu}}{D} \quad (۳)$$

که در این رابطه  $\overline{Nu}$  عدد ناسلت،  $k$  هدایت حرارتی سیال مورد استفاده با واحد وات بر متر بر کلومین و  $D$  قطر نازل سردکننده با واحد متر است. عدد  $\overline{Nu}$  نیز تابع متغیرهایی است که در معادلات (۴) تا (۸) ارائه شده است.

$$\frac{\overline{Nu}}{\text{Pr}^{0.42}} = G\left(\frac{rs}{D}, \frac{H}{D}\right) F(\text{Re}) \quad (۴)$$

$$G\left(\frac{r_s}{D}, \frac{H}{D}\right) = \frac{D}{r_s} \times \frac{1 - 1.1\left(\frac{D}{r_s}\right)}{1 + 0.1\left[\frac{H}{D} - 6\right]\left(\frac{D}{r_s}\right)} \quad (۵)$$



شکل ۳. اعمال منبع سردکننده

Fig. 3. Application of the heat sink

جدول ۴. خواص حرارتی فلز پایه [۲۱ و ۲۳]

Table 4. Thermal properties of the base metal [21, 23]

۲۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	دما (°C)
۱۷۱	۱۷۷	۱۸۳	۱۸۹	۱۹۵	۲۰۱	۲۰۷	هدایت حرارتی (W/m°C)
۲۵	۱۸۰	۲۸۰	۳۸۰	۴۸۰	۵۸۰		دما (°C)
۸۹۷	۹۷۰	۱۰۵۰	۱۱۰۰	۱۱۴۰	۱۲۰۰		گرمای ویژه (J/kg °C)
۲۷۱۰							چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )

جدول ۵. خواص مکانیکی فلز پایه [۱۵]

Table 5. Mechanical properties of the base metal [15]

۲۵	۲۰۰	۶۶۰	دما (°C)
۷۰	۵۲	۵	مدول یانگ (GPa)
۵۵	۴۱	۵	تنش تسلیم (MPa)
۲۱/۸	۲۳/۶	۲۴/۵	ضریب انبساط حرارتی (μm/m°C)
۰/۳۳			ضریب پواسون



جدول ۶. مقایسه پهنای حوضچه جوش ( شبیه‌سازی و تجربی)

Table 6. Comparison of weld pool width (simulation and experimental).

پهنای بالایی حوضچه(میلی‌متر)		پهنای پایینی حوضچه(میلی‌متر)		نمونه آزمایش
شبیه‌سازی	تجربی	شبیه‌سازی	تجربی	
۱۱٫۶	۱۰٫۴	۱۱٫۴	۱۰٫۱	۱
۱۱	۱۰٫۳	۱۰٫۶۵	۹٫۹	۲
۱۱٫۳۶	۱۰٫۴	۱۱٫۲	۱۰٫۲	۳

جدول ۷. خطاهای مربوط به تخمین پهنای حوضچه جوش حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با مقادیر تجربی آن

Table 7. Errors for estimating the weld pool width obtained from the simulation compared to experimental values

درصد خطای پهنای بالایی حوضچه(میلی‌متر)	درصد خطای پهنای پایینی حوضچه(میلی‌متر)	نمونه آزمایش
۱۱٫۵	۱۲٫۸	۱
۶٫۷	۷٫۵	۲
۹٫۲	۹٫۸	۳

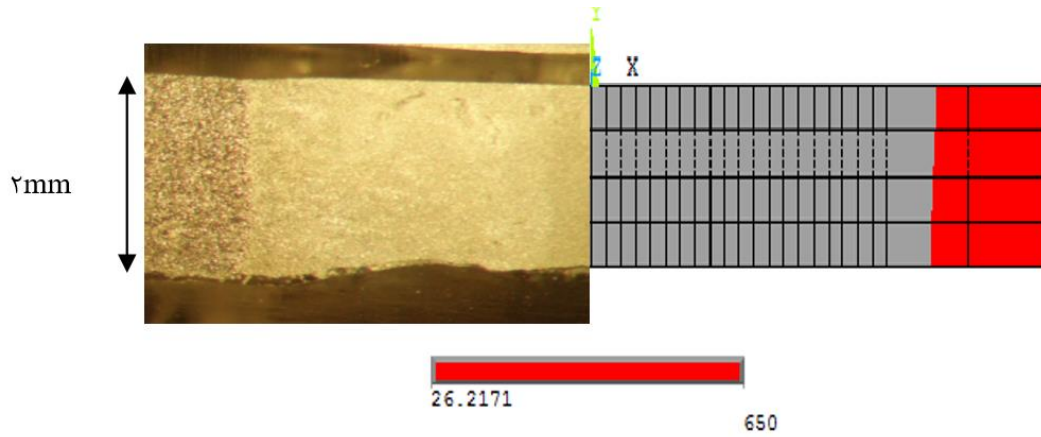
۴- نتایج و بحث

منطقه متأثر از حرارت مورد بررسی قرار گرفتند. در اعمال منبع سردکننده با دبی خروجی ۱۲ لیتر بر دقیقه، مقدار ضریب انتقال حرارت برابر ۳۰۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین در مورد حالتی که دبی خروجی برابر ۸ لیتر بر دقیقه است نیز برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شد [۱۰]. در شکل ۷ تأثیر منبع سردکننده بر توزیع دما قابل مشاهده است. در جایی که قوس در فاصله ۱۲۵ میلی‌متری از مبدأ مختصات است، با اعمال منبع سردکننده دنباله‌رو، کاهش ۲۰ درجه سانتی‌گرادی دما ایجاد می‌شود به طوری که ۹۷۴ درجه سانتی‌گراد در جوشکاری معمولی (بدون منبع سردکننده) به ۹۵۴ درجه سانتی‌گراد در جوشکاری با منبع سردکننده تقلیل می‌یابد. در شکل ۸ نیز توزیع دما مرحله آخر نشان داده شده است. اعمال گاز سردکننده در این مرحله باعث افت ماکزیمم دما، تا مقدار ۱۵۹۹ درجه سانتی‌گراد شده و کاهش ۲۶ درجه‌ای دما مشاهده می‌شود. علت وجود دمای بالا این است که در انتهای قطعه، سطح سرد جلوی قوس کم شده و سطوح قبل قوس، گرم است. نمودار شکل ۹ نیز نشان دهنده تغییرات دما با تغییر X در راستای Z های متفاوت است.

در این آزمایش، از آن جهت که معیاری برای مطابقت نتایج تجربی و شبیه‌سازی لازم است، اندازه حوضچه جوش، معیاری برای نزدیک بودن آزمایش تجربی و روند شبیه‌سازی قرار داده شد. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌های انجام شده، نفوذ کامل جوش مشاهده شد. در جدول ۶ نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مقایسه شده است.

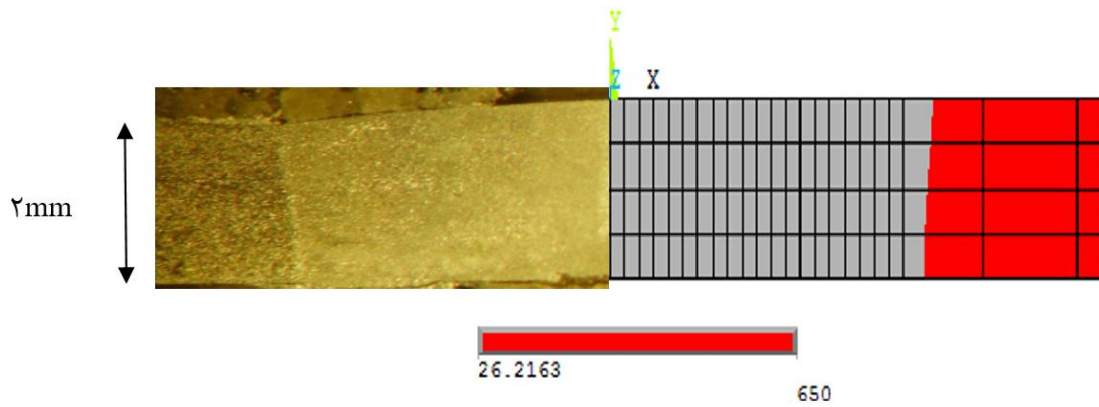
در شکل‌های ۴ تا ۶ مقایسه نتایج حاصل از ابعاد حوضچه حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی در نمونه‌های جوشکاری شده با روش عادی و با منبع خنک‌کننده دنباله‌رو ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل بکار رفته، نتایج خوبی در پیش‌بینی حوضچه جوش از خود نشان می‌دهد. جدول ۷ میزان خطای ابعاد حوضچه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف نتایج تئوری و تجربی حدود ۱۳٪ است که حاکی از صحت مدل مورد استفاده در پیش‌بینی رفتار حرارتی سیستم است. برای مقایسه روش عادی جوشکاری و جوشکاری با اعمال منبع سردکننده، سه متغیر دما، اعوجاج و سختی منطقه جوش و



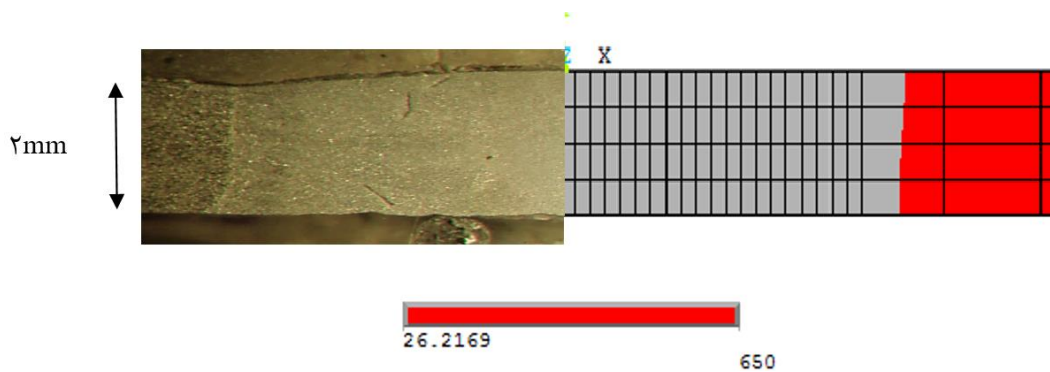
شکل ۴. مقایسه ابعاد تجربی و شبیه‌سازی شده حوضچه جوش برای نمونه جوشکاری شده با روش عادی

Fig. 4. Comparison of experimental and simulated dimensions of the weld pool for a welded specimen by the conventional method



شکل ۵. مقایسه ابعاد تجربی و شبیه‌سازی حوضچه جوش برای نمونه جوشکاری شده با منبع سردکننده دنباله‌رو با قطر مؤثر ۵۸ میلی‌متر

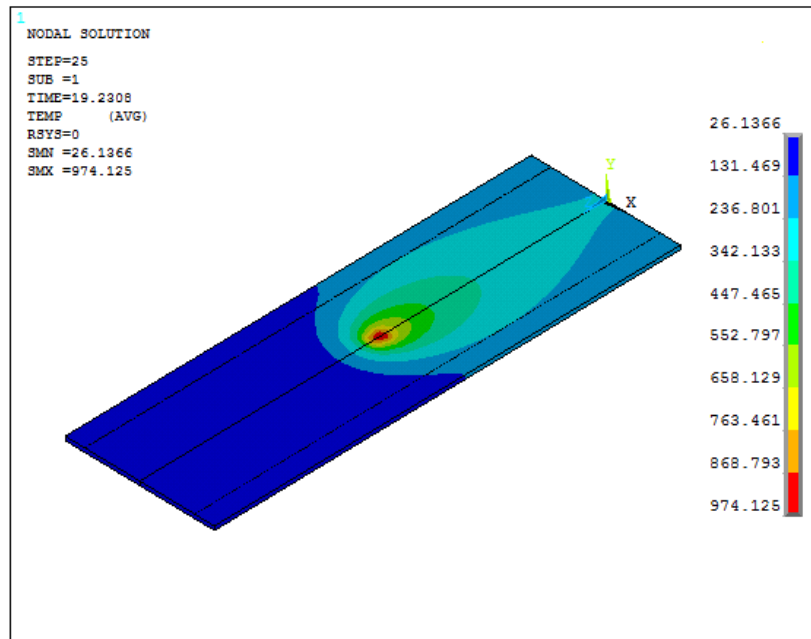
Fig. 5. Comparison of experimental and simulated dimensions of the weld pool for a welded specimen with a trailing heat sink with effective diameter 58 mm



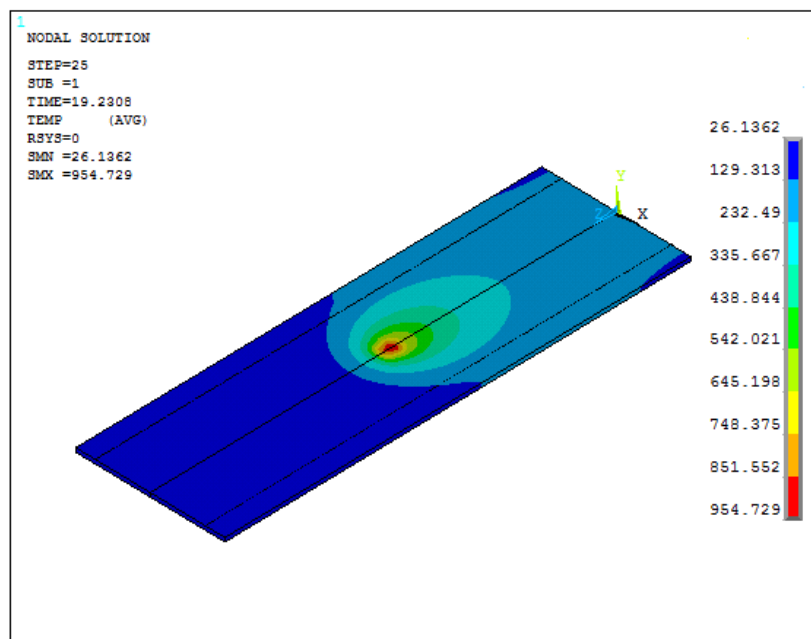
شکل ۶. مقایسه ابعاد تجربی و شبیه‌سازی حوضچه جوش برای نمونه جوشکاری شده با منبع سردکننده دنباله‌رو با قطر مؤثر ۴۰ میلی‌متر

Fig. 6. Comparison of experimental and simulated dimensions of a weld pool for a welded specimen with a trailing heat sink with effective diameter 40 mm





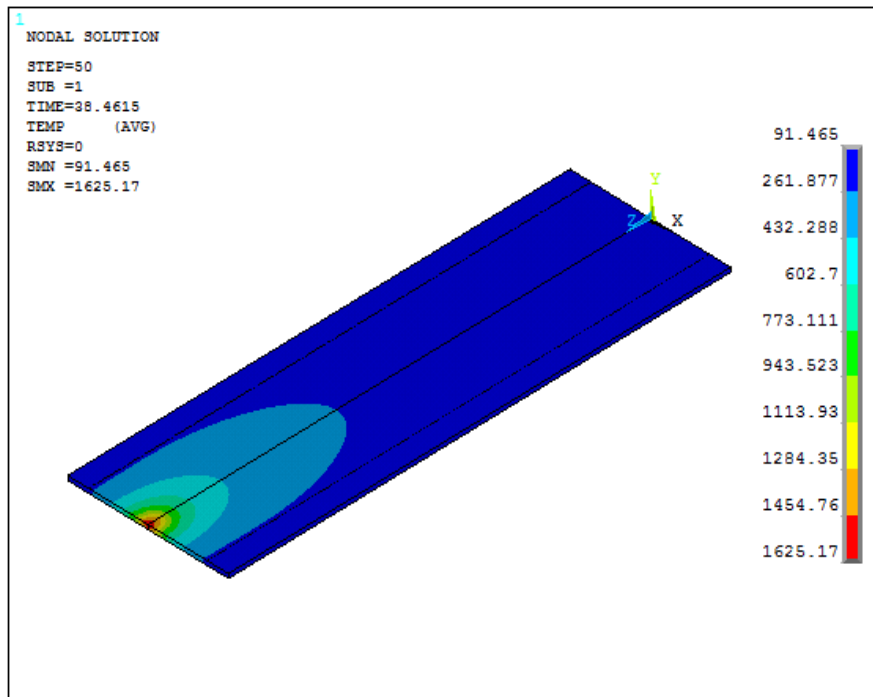
(الف)



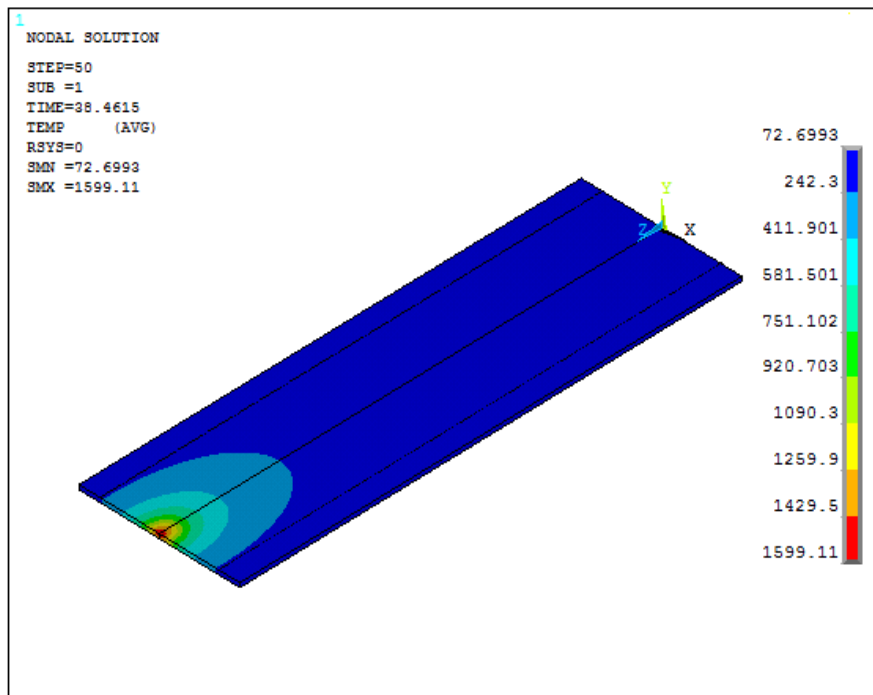
(ب)

شکل ۷. توزیع دما در مرحله ۲۵ جوشکاری: (الف) روش جوشکاری عادی (ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Fig. 7. Temperature distribution in stage 25 welding: a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with convection heat transfer coefficient  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$



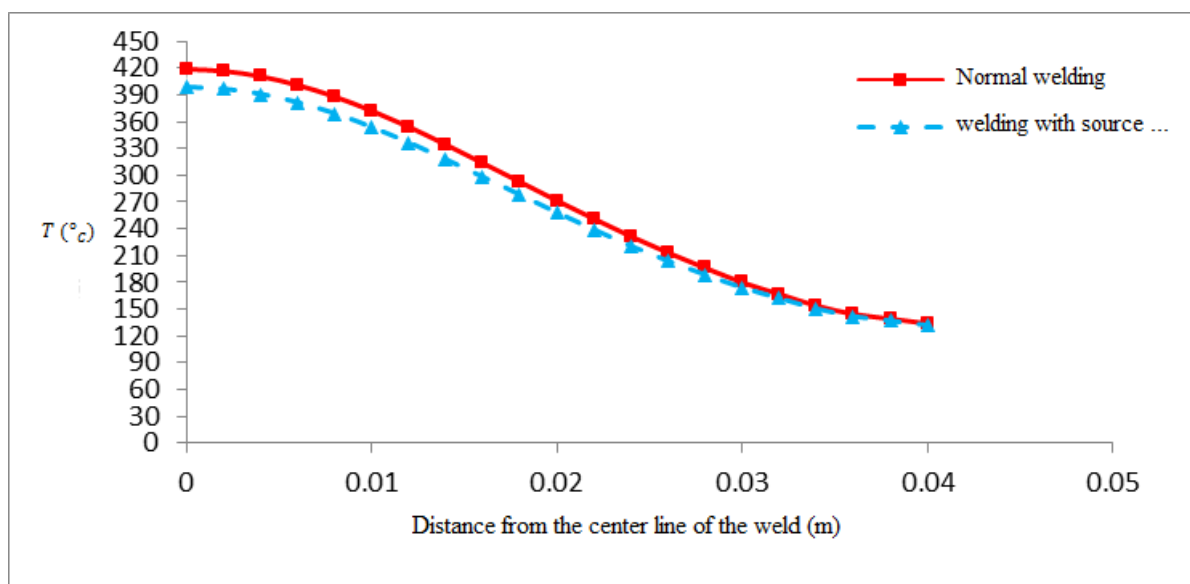
(الف)



(ب)

شکل ۸. توزیع دما در مرحله ۵۰ جوشکاری: (الف) روش جوشکاری عادی (ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Fig. 8. Temperature distribution in stage 50 welding: a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with heat transfer coefficient  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$



شکل ۹. منحنی دما - فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در  $y = 0$  میلی‌متر و  $z = 0$  میلی‌متر در مرحله ۷ جوشکاری

Fig. 9. Temperature-distance curve (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 0 mm" in stage 7 welding

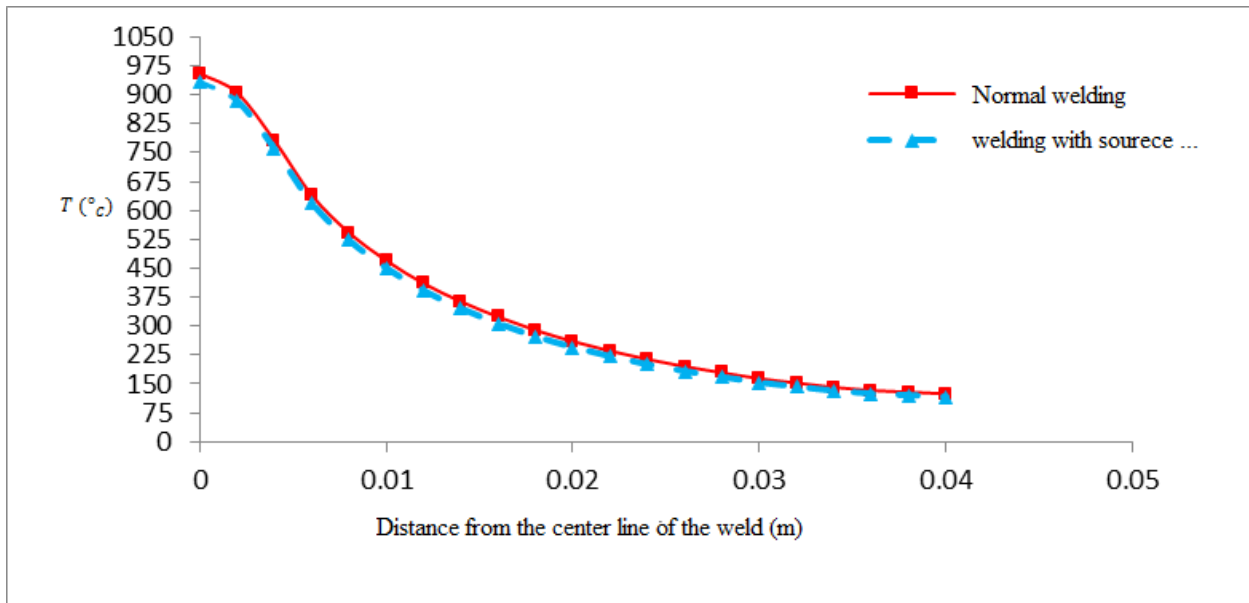
بالتر رفته که دلیل آن گرم شدن سطوح قبل از منبع است و ثانیاً با جلو رفتن الکتروود و پیشروی آن، تأثیر منبع سردکننده بیشتر می‌شود. در واقع هر چه دما بالاتر رود، تأثیر کاهش دمای منبع سردکننده دنباله‌رو در کاهش دما چشمگیرتر است. شکل ۱۱ چرخه دمایی در راستای  $Z=0$  میلی‌متر در عرض‌های ۰، ۳، ۵، ۱۴/۵ و ۳۵ میلی‌متری را در نمونه مورد تحلیل در جوشکاری عادی و با منبع خنک‌کننده نشان می‌دهد. در این نمودار تأثیر منبع سردکننده اعمالی بر توزیع دمای ناشی از جوشکاری نشان داده شده است. نکته بسیار مهمی که علاوه بر کاهش دما، در این نمودار قابل مشاهده است، شرایط مربوط به شیب دمایی است. در واقع منبع سردکننده، روی شیب دمایی تأثیر گذاشته و آن را تندتر می‌کند. در ضمن، با دور شدن از حداکثر دما، این شیب ملایم‌تر می‌شود، چراکه تأثیر منبع سردکننده کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲ بیانگر اعوجاج ایجاد شده در اثر گرادیان دمایی در اثر جوشکاری در راستای جهت  $y$  قطعه است. بیشترین اعوجاج حاصل در این راستا است که با اعمال یک منبع سرد در پشت سر قوس، مقدار اعوجاج از ۱۷/۵ میلی‌متر به ۱۱/۸ میلی‌متر رسیده است. محققان دیگر در جوشکاری لیزر، کاهش حدود ۳۲ درصد در اعوجاج به‌وسیله این روش را گزارش

در تمام نمودار دو نکته قابل توجه است، اول اینکه با اعمال منبع سردکننده حرارتی، کاهش دما قابل مشاهده است. این کاهش به موقعیت قوس و منبع سردکننده بستگی دارد؛ به‌طوری‌که هرچه قوس به انتهای قطعه نزدیک می‌شود، مقدار کاهش بیشتر می‌شود. دوم آنکه با افزایش فاصله از مرکز خط جوش، میزان کاهش کمتر شده و تأثیر منبع سرد کم می‌شود. لازم به ذکر است که در تمام نمودارها، فاصله قوس تا منبع سردکننده برابر ۳۵ میلی‌متر است.

اما موقعیت مکانی قوس برای شکل ۱۰ برابر فاصله ۱۲۵ میلی‌متری از مبدأ برای قوس و برای گاز سردکننده ۹۰ میلی‌متری از مبدأ است. کاهش دما در این نقاط از ۲۱ تا ۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. علت اینکه کاهش دما نیز در این مختصات وجود دارد این است که منبع سردکننده ۳۵ میلی‌متر عقب‌تر از قوس است و نقطه موردنظر در نمودار در فاصله ۵ میلی‌متری قوس و ۳۰ میلی‌متری منبع سرد دنباله‌رو قرار دارد.

از نمودار دما - مکان آورده شده می‌توان دریافت که استفاده از منبع سردکننده دنباله‌رو، باعث کاهش دما در قطعه شده و این مقدار کاهش بستگی به مکان مورد بررسی دارد. هر چه قوس و به دنبال آن منبع سرد دنباله‌رو، به سمت جلو قطعه حرکت کند، اولاً دمای قطعه



شکل ۱۰. منحنی دما - فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در  $y = 0$  و  $z = 215$  میلی‌متر و  $z = 125$  میلی‌متر در مرحله ۲۵ جوشکاری

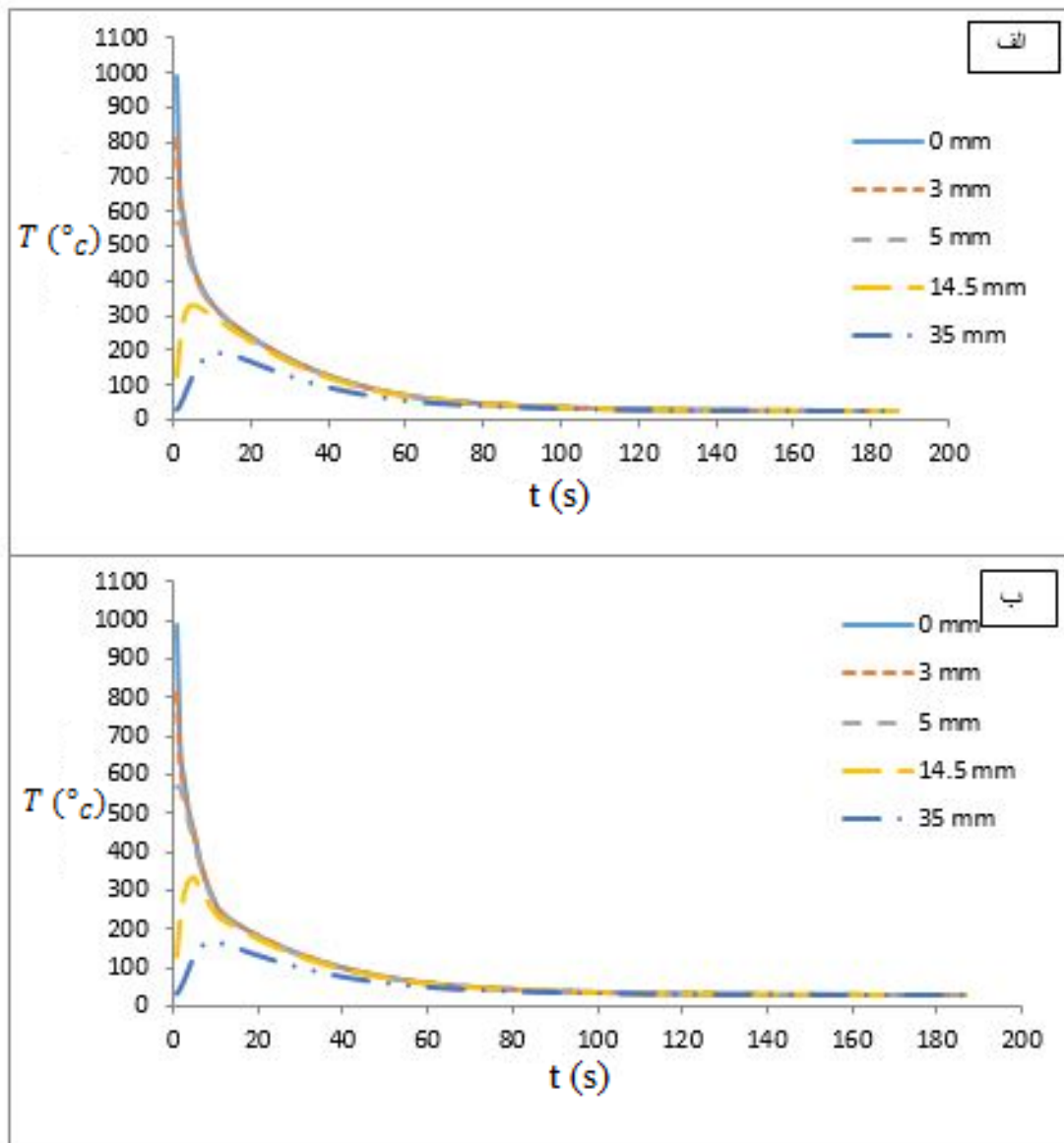
Fig. 10. Temperature-distance curve (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 0 mm" in stage 25 welding

در قدم بعد تأثیر قطر مؤثر منبع سردکننده روی سطح قطعه بر میزان اعوجاج بررسی شد. در این بخش قطر مؤثر از ۵۸ میلی‌متر به ۴۰۰ میلی‌متر تغییر پیدا کرده است. اشکال ۱۴ و ۱۵ نتایج حاصل از تغییر میزان این متغیر را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، کاهش قطر مؤثر منبع سردکننده، باعث افزایش دماها نسبت به حالتی که قطر مؤثر ۵۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، می‌شود. دما نسبت به حالتی که گاز سردکننده اعمال نمی‌شود، بین ۵ تا ۱۰ درجه کاهش یافته است. دو تصویر گویای آن است که افزایش قطر مؤثر منبع سردکننده، در کاهش دما مؤثرتر است و هنگامی که قطر مؤثر ۵۸ میلی‌متر است، ماکزیمم کاهش دما حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد بیشتر از حالتی است که قطر مؤثر برابر ۴۰ میلی‌متر است.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نیز مشخص است کاهش قطر مؤثر منبع سردکننده روی قطعه، برای انتقال حرارت، از ۵۸ به ۴۰ میلی‌متر باعث افزایش اعوجاج در راستای  $y$  به میزان ۲٫۲ میلی‌متر شده است.

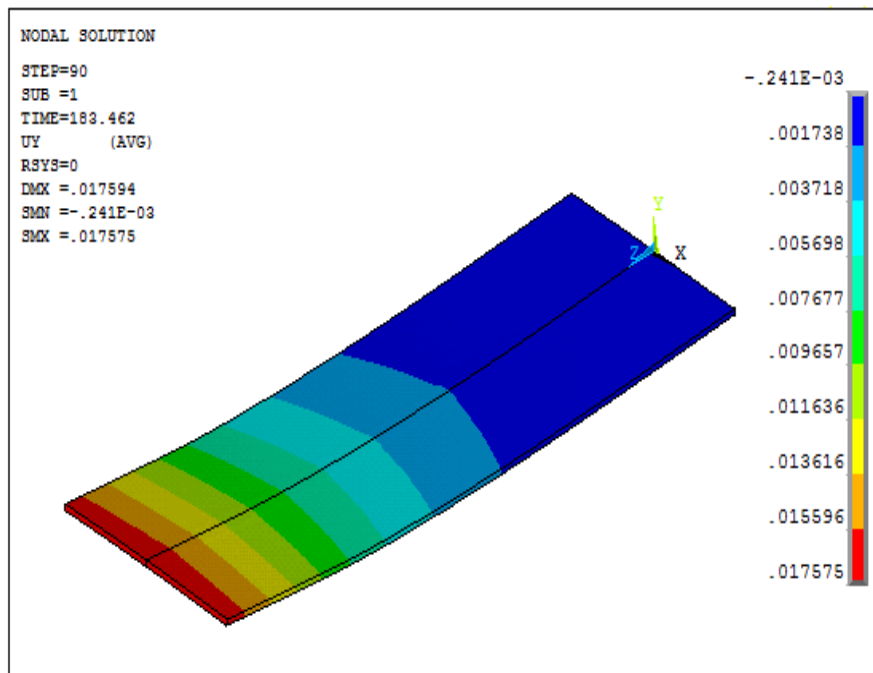
نموده‌اند [۲۴]. اساس این تأثیر زیاد، همان کاهش ناگهانی دمایی است که در منطقه سرمایش ناشی از منبع خنک کننده ایجاد می‌شود. این اثر خنک‌کنندگی موضعی، سبب انقباض بخش مذکور شده و یک تنش کششی بسیار قوی در ناحیه بین حوضچه ذوب و فروکش حرارتی ایجاد می‌کند. این تنش‌های کششی، کرنش‌های پلاستیکی کششی ایجاد کرده و کرنش‌های فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران می‌نمایند.

در شکل ۱۳ نتایج حاصل از جوشکاری عملی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، اعمال یک منبع سرد در پشت سر قوس باعث شده تا اعوجاج حاصل از جوشکاری کاهش یابد و روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی صحنه گذارد. تفاوت اعوجاج حاصل از جوشکاری دو حالت قابل‌رؤیت است. مقدار اعوجاج‌های عملی اندازه‌گیری شده در روش جوشکاری عادی برابر ۲۵٫۸ میلی‌متر به دست آمد، درحالی‌که در روش با منبع سردکننده دنباله‌رو با دبی دمش ۱۲ لیتر بر دقیقه و ۸ لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر ۱۲٫۱ و ۱۲٫۷ میلی‌متر، اعوجاج حاصل شد.

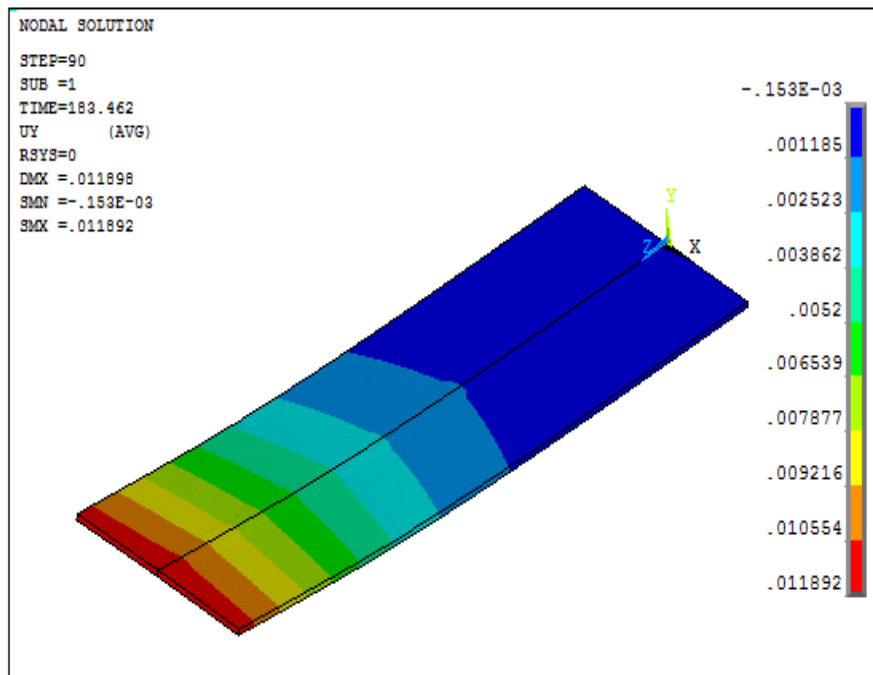


شکل ۱۱. منحنی دما - زمان نقاط مربوط به "y = ۰ میلی‌متر و z = ۰ میلی‌متر در مقادیر x های متفاوت الف) جوشکاری عادی ب) با منبع سردکننده متحرک

Fig. 11. Temperature-time curve of points related to "y = 0 mm" and "z = 0 mm" at different values of x a) Conventional welding b) With trailing heat sink



(الف)

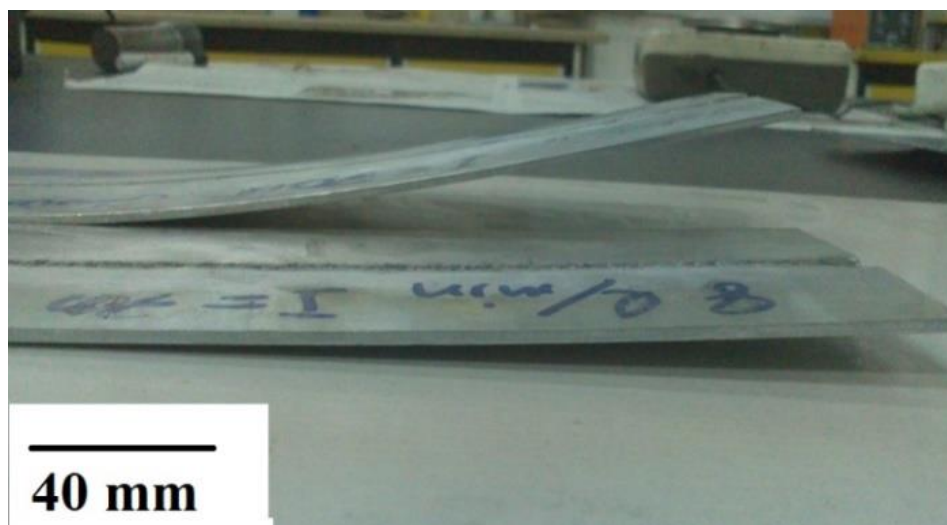


(ب)

شکل ۱۲. اعوجاج به دست آمده در راستای y حاصل از جوشکاری (الف) روش عادی جوشکاری (ب) جوشکاری با منبع سردکننده متحرک با ضریب انتقال حرارت همرفتی  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Fig. 12. Distortion obtained in y direction from welding a) Conventional welding method b) Welding with trailing heat sink with heat transfer coefficient  $3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$





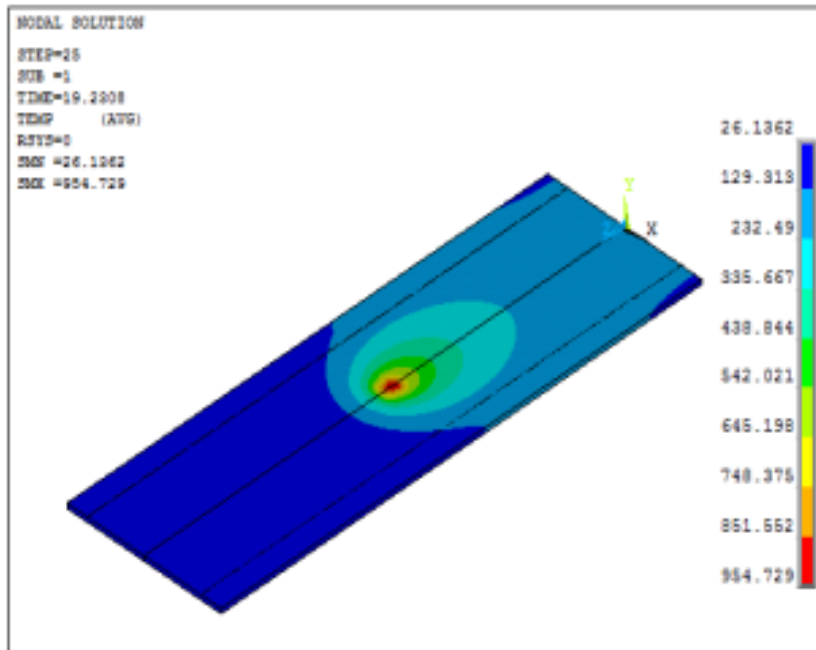
شکل ۱۳. مقایسه اعوجاج حاصل از جوشکاری در دو حالت عادی و با منبع سردکننده

Fig. 13. Comparison of distortion resulting from welding in conventional method and with trailing heat sink

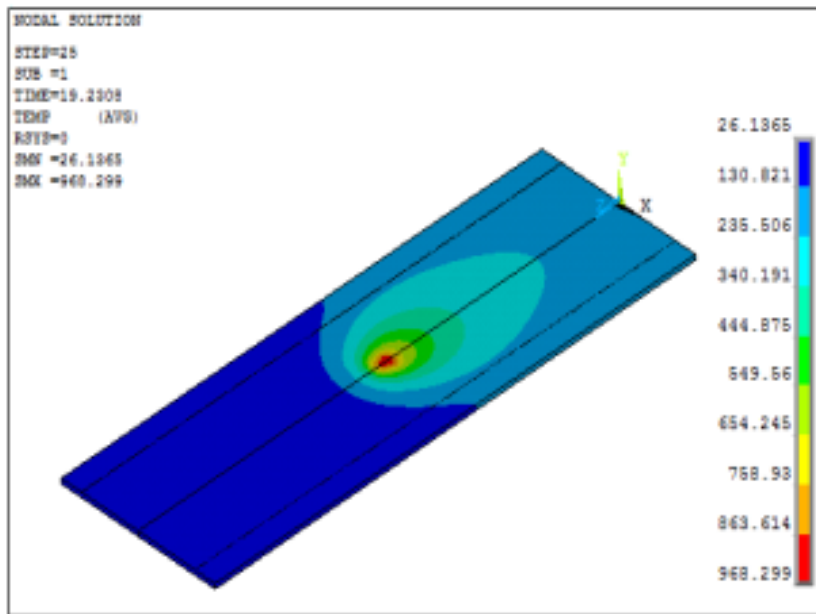
شکل ۱۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تغییر دبی دمش گاز سردکننده را برای حالتی که قطر مؤثر برای هر دو حالت، ۵۸ میلی‌متر است را نشان می‌دهد. کاهش دبی خروجی از ۱۲ لیتر بر دقیقه به ۸ لیتر بر دقیقه باعث می‌شود تا سرعت گاز سردکننده کمتر شده و این کاهش سرعت روی ضریب انتقال حرارت ( $h$ ) تأثیر گذاشته و آن را کاهش دهد و این باعث افزایش ۶ درجه‌ای ماکزیمم دما و رسیدن آن تا مقدار ۹۶۰ درجه سانتی‌گراد و در پی آن افزایش اعوجاج به مقدار ۲ تا ۳ میلی‌متر شده است. شکل ۱۸ نمودار دما- مکان را برای طول ۲۱۵ میلی‌متر در زمانی که قوس در انتهای قطعه قرار دارد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف دمای ۹ تا ۲۴ درجه‌ای در راستای عرض قطعه رخ داده است. مطابق شکل ۱۹ اعوجاج راستای  $Y$  نیز به دنبال افزایش دمای جوشکاری ۲٫۳ میلی‌متر افزایش یافته است.

حرارت جوشکاری قطعه در منطقه متأثر از حرارت دچار افت سختی می‌شود. مطابق شکل ۲۰ سه قسمت فلز پایه، متأثر از حرارت و فلز جوش در نمودار سختی بر حسب فاصله قابل مشاهده هستند. استفاده از یک منبع سردکننده دنباله‌رو باعث شده تا سختی در منطقه متأثر از حرارت اندکی نسبت به روش معمولی افزایش یابد. این مسئله به دلیل افت دمای ناشی از اعمال این منبع است که می‌تواند وقوع پدیده‌هایی مانند تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت و به تبع آنها افت سختی را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش دبی منبع سردکننده از ۸ لیتر بر دقیقه به ۱۲ لیتر بر دقیقه، باعث افزایش سختی در فلز جوش شده است. در واقع اعمال منبع سردکننده باعث افزایش ۱۰٪ تا ۱۲٪ سختی در ناحیه متأثر از حرارت جوش شده است. علت این پدیده افزایش سرعت سرمایش ناشی از دمش گاز محافظ با سرعت بیشتر و در نتیجه ریزدانه‌گی بیشتر در فلز جوش است.

شکل ۲۰ نتایج حاصل از سختی‌سنجی قطعات جوشکاری شده را نشان می‌دهد. در فرایند جوشکاری آلیاژهای کارشده به دلیل تبلور مجدد ناشی از



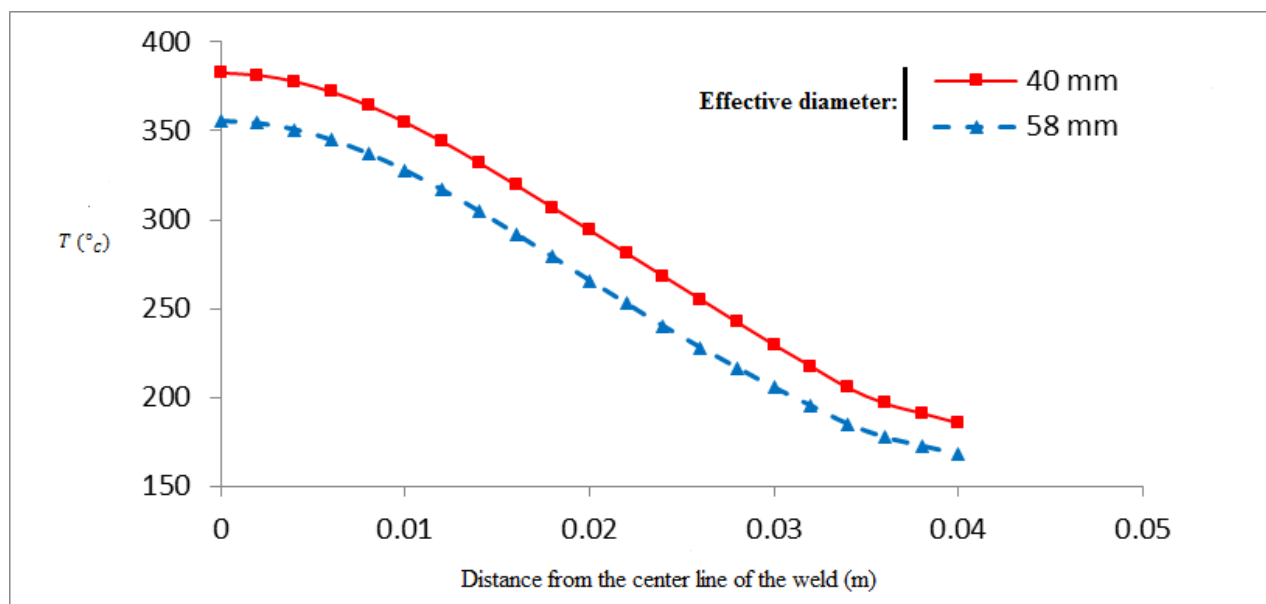
(الف)



(ب)

شکل ۱۴. توزیع دما در جوشکاری با منبع سردکننده (الف) قطر مؤثر ۵۸ میلی‌متر (ب) قطر مؤثر ۴۰ میلی‌متر

Fig. 14. Temperature distribution in welding with trailing heat sink a) effective diameter 58 mm  
b) effective diameter 40 mm



شکل ۱۵. دما - فاصله (از مرکز جوش) برای نقاط واقع در  $y = 0$  میلی‌متر و  $z = 215$  میلی‌متر با منبع سردکننده متحرک

Fig. 15. Temperature – distance (from the center of the weld) for points located in "y = 0 mm" and "z = 215 mm" with a trailing heat sink

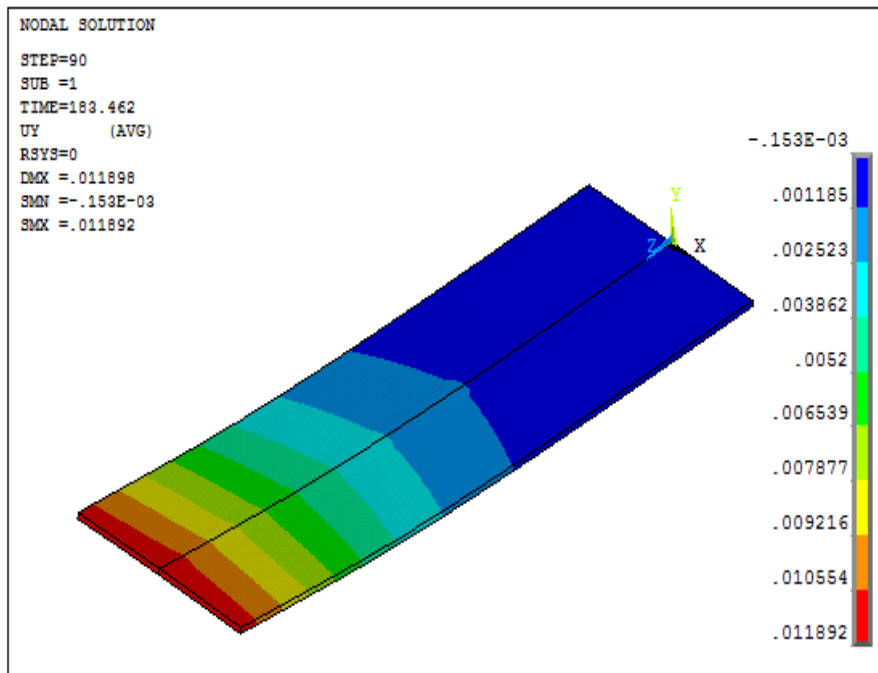
سانتی‌گراد می‌شود و به طبع آن باعث افزایش اعوجاج حاصل از جوشکاری از  $11/8$  میلی‌متر به  $14$  میلی‌متر می‌شود. این تغییر باعث افزایش  $19$  درصدی اعوجاج می‌شود.

۴- افزایش دبی خروجی منبع سردکننده دنباله‌رو از  $8$  لیتر بر دقیقه به  $12$  لیتر بر دقیقه، به دلیل افزایش قدرت سردکنندگی منبع سردکننده دنباله‌رو، باعث کاهش دمای حاصل از جوشکاری از  $960$  درجه سانتی‌گراد به  $954$  درجه سانتی‌گراد می‌شود که این موضوع باعث کاهش اعوجاج حاصل از جوشکاری از  $13/9$  میلی‌متر به  $11/8$  میلی‌متر می‌شود.

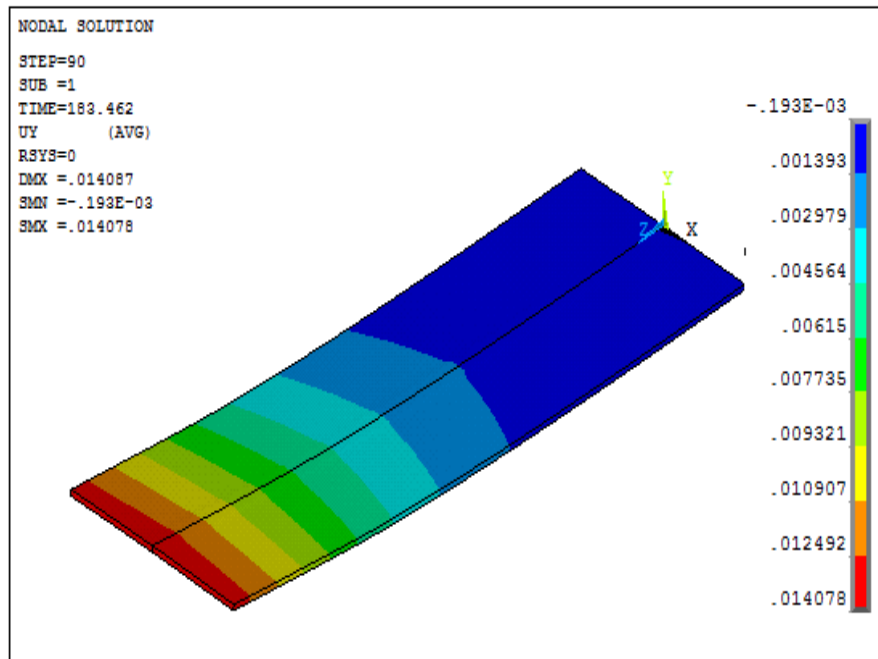
۵- استفاده از منبع سردکننده دنباله‌رو می‌تواند وقوع پدیده‌هایی کاهنده سختی مانند تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت را کاهش و باعث افزایش سختی در منطقه متأثر از حرارت جوش به مقدار  $10\%$  تا  $12\%$  می‌شود و سختی را از  $50$  ویکرز به  $56$  ویکرز می‌رساند.

## ۵- نتیجه‌گیری

- ۱- در این پژوهش از روش المان محدود برای تخمین اعوجاج ناشی از جوشکاری آلیاژ آلومینیوم  $3105$  در دو حالت عادی و با استفاده از یک منبع سردکننده دنباله‌رو بر اعوجاج ناشی از جوشکاری آلومینیوم  $3105$  استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج تجربی، اعتبار مدل مورد استفاده را ثابت نمود. بر مبنای این مطالعه می‌توان به نتایج زیر، دست یافت:
  - ۲- استفاده از یک منبع سردکننده از جنس گاز آرگون در پشت سر قوس به دلیل ایجاد انقباض بخش، یک تنش کششی بسیار قوی در ناحیه بین حوضچه ذوب و فروکش حرارتی، کرنش‌های فشاری منطقه تحت گرمایش را جبران و به طبع آن باعث کاهش اعوجاج از  $17/5$  میلی‌متر به  $11/8$  میلی‌متر می‌شود که کاهش حدود  $33$  درصدی اعوجاج را به دنبال دارد.
  - ۳- کاهش قطر مؤثر منبع سردکننده از  $58$  به  $40$  میلی‌متر، باعث افزایش دمای حاصل از جوشکاری از  $954$  درجه سانتی‌گراد به  $968$  درجه



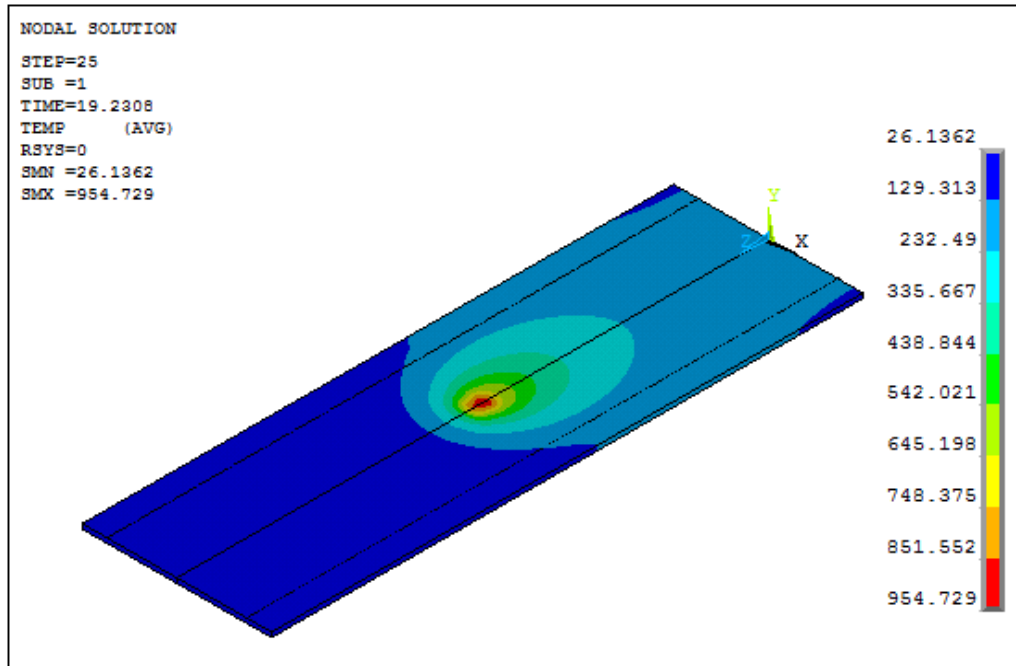
(الف)



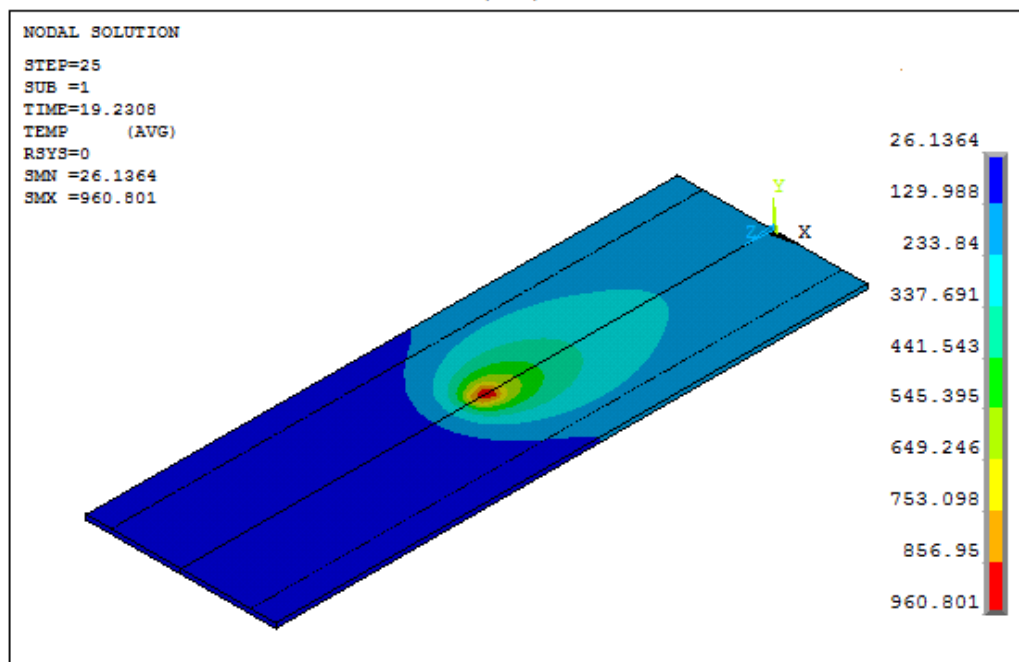
(ب)

شکل ۱۶. اعوجاج در راستای y (الف) قطر مؤثر ۵۸ میلی‌متر (ب) قطر مؤثر ۴۰ میلی‌متر

Fig. 16. Distortion in y direction a) effective diameter 58mm b) effective diameter) 40 mm



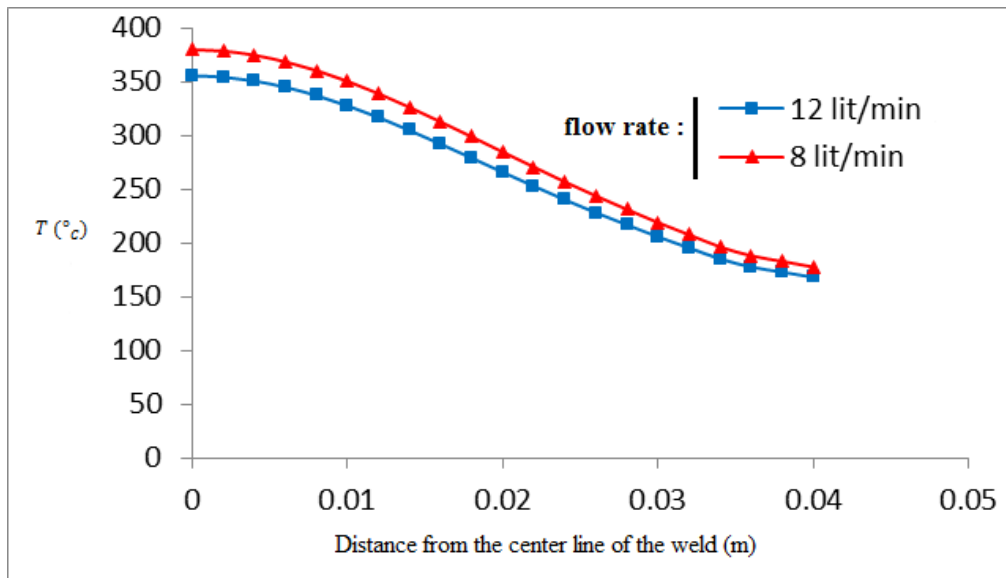
(الف)



(ب)

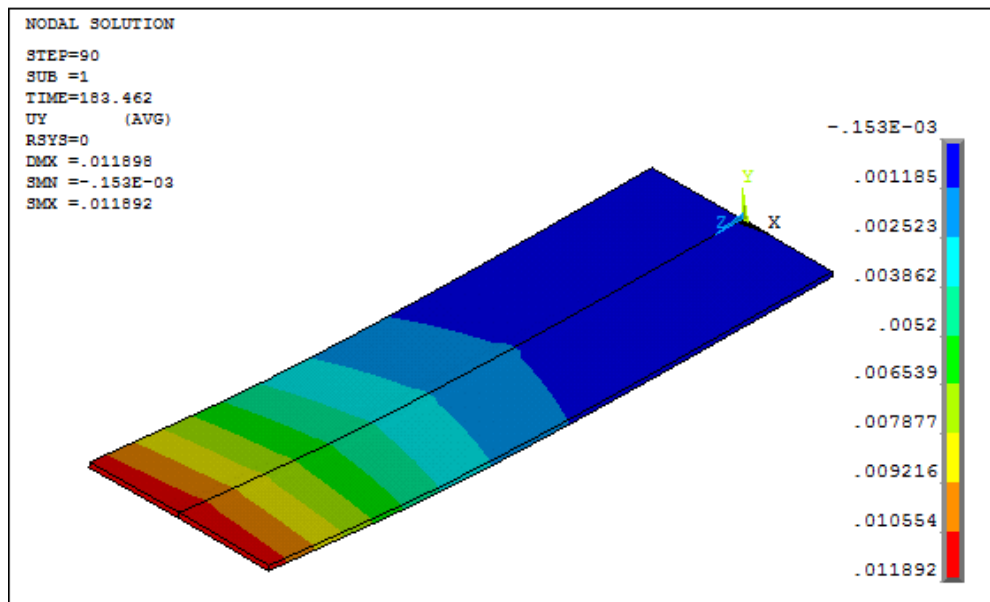
شکل ۱۷. تأثیر دبی منبع سردکننده بر توزیع دما الف) دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه ب) دبی ۸ لیتر بر دقیقه

Fig. 17. The effect of heat sink flow rate on temperature distribution a) flow rate of 12 l/m b) flow rate of 8 l/m



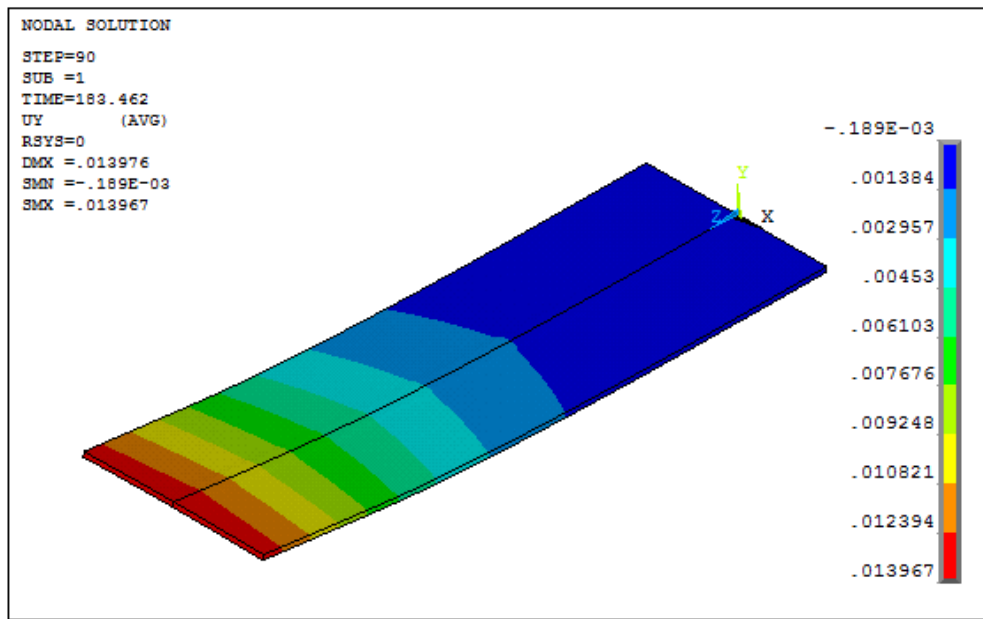
شکل ۱۸. منحنی دما - فاصله برای نقاط واقع در  $y = 0$  میلی‌متر و  $z = 215$  میلی‌متر با منبع سردکننده متحرک

Fig. 18. Temperature-distance curve for points located "y = 0 mm" and "z = 215 mm" with a trailing heat sink



(الف)

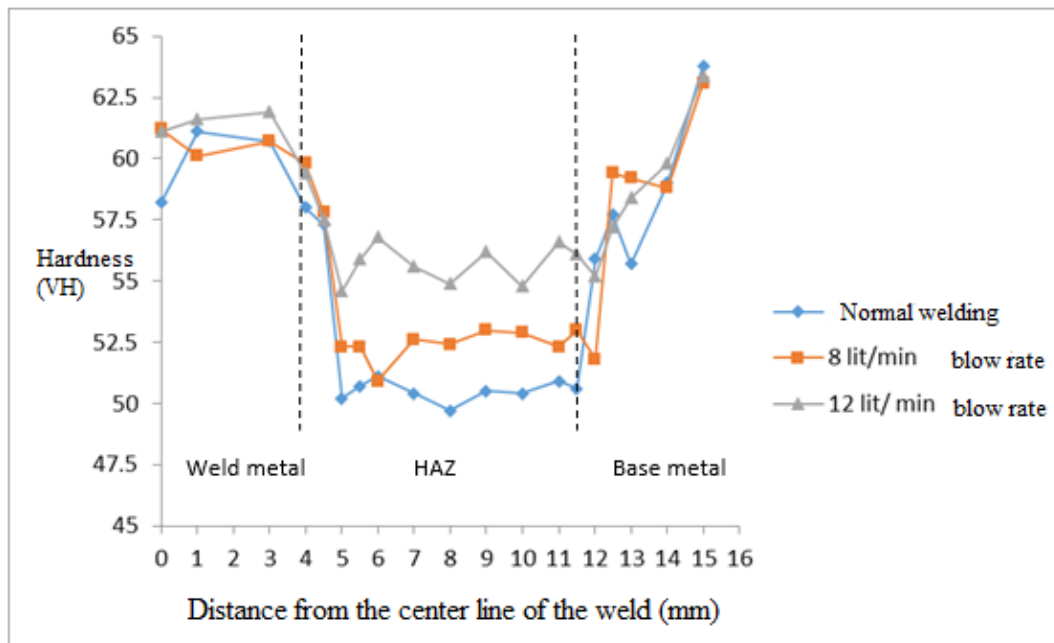




(ب)

شکل ۱۹. اعوجاج در راستای y (الف) منبع سردکننده با دبی ۱۲ لیتر بر دقیقه (ب) منبع سردکننده با دبی ۸ لیتر بر دقیقه

Fig. 19. The effect of heat sink flow rate on distortion in the y direction a) flow rate of 12 l/m b) flow rate of 8 l/m



شکل ۲۰. توزیع سختی در نمونه‌های جوشکاری شده

Fig. 20. Hardness distribution in the welded samples

- on residual stress and distortion of pulsed laser welded Hastelloy C-276 thin sheets, *J. Mater. Process. Technol.*, 214(12) (2014) 2891-2899.
- [13] S.R. Kala, N.S. Prasad, G. Phanikumar, Studies on multipass welding with trailing heat sink considering phase transformation, *J. Mater. Process. Technol.*, 214(6) (2014) 1228-1235.
- [14] T. Bajpei, H. Chelladurai, M.Z. Ansari, Mitigation of residual stresses and distortions in thin aluminium alloy GMAW plates using different heat sink models, *Journal of Manufacturing Processes*, 22 (2016) 199-210.
- [15] A.S.o. Metals, *ASM Metals Handbook, Vol 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, in: E.L.R.a.J.H.L. Linden (Ed.), *ASM Met. Park. Ohio*, 1990.
- [16] A. Int., *ASM Handbook, Vol. 6 , Welding, Brazing, and Soldering*, in, *Met. Park. Ohio, USA.*, 1993.
- [17] G.F.V. Voort, *Metallography, Principles and Practice*, Fourth ed., 2007.
- [18] K. Biswas, A numerical prediction of the temperature distribution in the thermionic cathode of a welding arc, *J. Mater. Process. Technol.*, 40(1-2) (1994) 219-237.
- [19] A. Farzadi, S. Serajzadeh, A. Kokabi, Modeling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc welding of commercial pure aluminum, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 38(3) (2008) 258-267.
- [20] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A. Kokabi, A. Fischer, Prediction of temperature distribution in dissimilar arc welding of stainless steel to carbon steel, *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, 226(1) (2012) 117-125.
- [21] J.P. Hartnett, T.F. Irvine, Y.I. Cho, G.A. Greene, H. Taniguchi, W.-J. Yang, K. Kudo, *Advances in Heat Transfer: Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method*, Academic Press, 1995.
- [22] T.L. Bergman, T.L. Bergman, F.P. Incropera, D.P. Dewitt, A.S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, 2011.
- [1] A.H. Kokabi, M.M.Ghaznavi, *Welding Technology (Processes)*, First ed., Sharif University, 2005 (in Persian).
- [2] M. Moenian, *The Key to Welding*, Second Edi, Azadeh 2012 (in Persian).
- [3] T.N. S. Aoki, and T. Hiroi, Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration, *Nucl. Eng. Des.*, 235(14) (2005) 1441–1445.
- [4] H.R.S. R. V Preston, P. J. Withers, and S. D. Smith, Finite element modelling of tungsten inert gas welding of aluminium alloy 2024, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 8(1) (2003) 10-18.
- [5] L.C. J. Xu, and C. Ni, Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 84(5) (2007) 298–303.
- [6] G.L. G.Luan, C.Li, C. Dong, DC-LSND friction stir welding, *China FSW Center Beijing FSW Technol. Co*, 2005.
- [7] X. Huang, Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current, *Mater. Sci. Eng. A*, 528(19) (2011) 6287–6292.
- [8] L.P.C. J. A. Martins, J. A. Fraymann, and S. T. Button, Analyses of residual stresses on stamped valves by X-ray diffraction and finite elements method, *J. Mater. Process. Technol.*, 179 (2006) 30-35.
- [9] Q.G. J. Li, Y. Shi, D. Guo, Y. Du, and Y. Sun, Studies on characteristics of temperature field during GTAW with a trailing heat sink for titanium sheet, *J. Mater. Process. Technol.*, 147(3) (2004) 328–335.
- [10] W. Jiang, Y. Zhang, W. Woo, Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 92 (2012) 56-62.
- [11] X. Tian, Q. Shi, Preventing welding hot cracking by welding with an intensive trailing cooler, *J. Mater. Process. Technol.*, 97(1-3) (2000) 30-34.
- [12] Y. Guo, D. Wu, G. Ma, D. Guo, Trailing heat sink effects

and experimental investigation on the mechanism of synchronous trailing cold air heat sink in eliminating the deformation during laser welding SUS301L thin sheet, Opt Laser Technol, 153 (2022) 108258.

[23] A. BOILER, P.V. CODE, MATERIALS Part D-, American Society of Mechanical Engineers, 1992(1995) (1989) 1998-2001.

[24] Z. Liu, X. Jin, J. Zhang, Z. Hao, J. Li, H. Chen, Numerical

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Jafari Vidoji, E. Ranjbarnodeh, S. E. Mirsalehi, Finite Element Simulation of the Trailing Heat Sink's Effect on Welding-Induced Distortion of Al 3105, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 1945-1968.*

DOI: [10.22060/mej.2022.21197.7399](https://doi.org/10.22060/mej.2022.21197.7399)



