



شبیه سازی عددی جوشکاری لیزری، بررسی تنش پسماند و توزیع دما در اتصال روی هم آلیاژهای آلومینیومی AA6061 و AA5086 در ضخامت‌های متفاوت

امیرغیاثوند*، سوران حسنی فرد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

خلاصه: در پژوهش حاضر با استفاده از کد اجزاء محدود آباکوس ۲۰۱۷ و بکارگیری زیر برنامه دی‌فلاکس به زبان فترن تحلیل عددی سه بعدی جوشکاری لیزری در حالت هندسی روی هم دو آلیاژ غیر هم جنس آلومینیومی AA6061 و AA5086 صورت گرفته است. تأثیر قرارگیری آلیاژ سخت‌تر و نرم‌تر در قسمت فوقانی و تحتانی جوش در ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متری دو قطعه بر مواردی همچون: توزیع حرارتی، وسعت مناطق مختلف جوش و تنش پسماند ناشی از جوشکاری لیزری مطالعه و بررسی شده است. در مجموع و براساس شرایط ورودی مسأله هشت وضعیت جهت شبیه‌سازی آماده شد. براساس نتایج بدست آمده نمونه A4 پایین‌ترین اختلاف دما بیشینه بین قسمت فوقانی و تحتانی را در بین همه حالات داراست که این اختلاف کم‌تر به دلیل قرارگیری فلز سخت‌تر و با ضخامت کم‌تر در قسمت فوقانی اتصال می‌باشد. در همه حالات مورد بررسی فارغ از موقعیت قرارگیری در بخش فوقانی و یا تحتانی، تنش پسماند طولی بزرگ‌تر در بخش آلیاژ سخت‌تر، آلیاژ AA6061 روی خواهد داد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، در همه حالات بیشینه تنش پسماند طولی ایجاد شده در حدود مقدار تنش تسلیم آلیاژ سخت‌تر می‌باشد. بهترین حالت از نظر سطح تنش پسماند طولی σ_{zz} در قطعه کار به ترتیب مربوط به وضعیت‌های A1 و B1 است زیرا هم سطح تنش پسماند کششی پایین‌تری را تجربه می‌نمایند و هم میزان اختلاف تنش در دو ناحیه فوقانی و تحتانی این نمونه‌ها اختلاف پایین‌تری با یکدیگر دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۱۶
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۲۰
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۲۵

کلمات کلیدی:
جوشکاری لیزر
آلیاژ آلومینیوم
مدل‌سازی عددی جوش
توزیع دما
تنش پسماند جوش

۱- مقدمه

از اشعه و حرارت لیزر در یک سو از خط جوش و یا نقطه اتصال دارد و همین موضوع سبب می‌شود که نیاز به تکیه‌گاه داخلی در محدوده اتصال از بین برود [۳-۵]. در کاربردهای صنعتی که در آن‌ها از جوش لیزری استفاده می‌شود، عمدتاً هندسه جوش در حالت آرایش قطعات به صورت روی هم^۲ شکل می‌گیرد و دو یا چند قطعه به یکدیگر متصل می‌گردند [۶]. اتصالات و جوش‌های لیزری با آرایش هندسی روی هم در مقایسه با سایر آرایش‌های هندسی استفاده شده مانند جوش لب به لب^۳ و جوش گوشه‌ای دارای راندمان تولید بالاتر، خواص مکانیکی بهتر اتصال نهایی و انعطاف‌پذیری بالاتر در استفاده در مکان‌های مختلف خط تولید است، همچنین استفاده از هندسه اتصال روی هم در جوشکاری لیزری هنگام اتصال قطعات با ضخامت بالاتر اهمیت و ارجحیت خود را بیشتر نمایان می‌سازد [۷ و ۸]. بارزترین محدودیت

جوشکاری با استفاده از توان و منبع حرارتی لیزر در صنایع مختلف مانند خوردروسازی جهت ایجاد اتصال بین قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای گسترده این روش اتصال جوشی می‌توان به مواردی همچون: اثر و تأثیر حرارتی کم بر مواد اتصال داده شده، افزایش سرعت جوشکاری و بازده ایجاد اتصال، کیفیت بالاتر جوش ایجاد شده، عدم وجود محدودیت در موقعیت و مکان‌های هندسی مورد استفاده، انعطاف‌پذیری این روش برای حالات متفاوت هندسی جوش و اتوماتیک بودن شرایط و روند اتصال اشاره داشت [۱ و ۲] با استفاده از تکنیک جوشکاری با لیزر توانایی و امکان اتصال قطعات و موادی که در گذشته جوش‌ناپذیر بوده‌اند ایجاد شده است. جوشکاری لیزری نقطه‌ای و خطی در حالت هندسی گوشه‌ای^۱ نیازمند استفاده

2 Lap joint
3 Butt joint

1 Fillet joint

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amir.ghiasvand@tabrizu.ac.ir



صورت گرفته استفاده از مدل منبع حرارتی گوسی اصلاح شده می‌تواند به خوبی الگوی حرارت اعمالی لیزر به قطعه کار را مدل نماید [۱۶-۱۸].

با توجه به اینکه در رویکردهای صنعتی، قطعاتی که نیاز به اتصال دارند اکثراً از جنس و آلیاژهای متفاوت می‌باشند، بدین جهت نیاز به مطالعات و پژوهش در زمینه اتصال فلزات و مواد غیر هم جنس در آرایش‌های هندسی متفاوت احساس می‌گردد. بررسی و تحلیل عددی جوشکاری لیزری با هندسه اتصال روی هم در حالت جوش فلزاتی غیر هم جنس و با ضخامت‌های متفاوت تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. با توجه به مطالب ذکر شده، در پژوهش حاضر با استفاده از کد اجزاء محدود آباکوس ۲۰۱۷ تحلیل عددی سه بعدی جوشکاری لیزری در حالت هندسی روی هم دو آلیاژ غیر هم جنس آلومینیومی AA6061 و AA5086 در ضخامت‌های متفاوت صورت گرفته است و مواردی همچون: توزیع حرارت، پیش‌بینی وسعت مناطق مختلف جوش و تنش پسماند ناشی از جوشکاری لیزری در اتصال مورد بررسی قرار گرفته است، به منظور مدل‌سازی منبع حرارتی متحرک، از مدل گوسی اصلاح شده با کمک کدنویسی به زبان فرترن^۱ با استفاده از زیربرنامه دی‌فلاکس^۲ استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی اجزاء محدود

۲-۱- هندسه مدل و خواص مواد

شبیه‌سازی عددی هر فرایند، مستلزم پیاده‌سازی و ساده‌سازی هندسی قطعات در نرم افزار مورد استفاده می‌باشد. در پژوهش حاضر تحلیل جوشکاری در حالت هندسه روی هم مورد بررسی قرار گرفته است، در این حالت از جوشکاری دو قطعه با ضخامت‌های یکسان یا متفاوت بر روی یکدیگر قرار گرفته و پس از ثابت کردن دو قطعه، با استفاده از یک منبع حرارتی از یک جهت عمل مذاب‌سازی قطعه فوقانی شروع شده و با نفوذ در عمق، بخش‌هایی از قطعه تحتانی در زیر خط جوش نیز با توجه به حرارت اعمال شده به حالت مذاب درآمده و سبب می‌شود که دو قطعه در ناحیه مرزی در یکدیگر آمیخته شده و اتصالی متالورژیکی در آن ناحیه به وجود آید. در شکل ۱ شماتیکی از این نوع اتصال نمایش داده شده است.

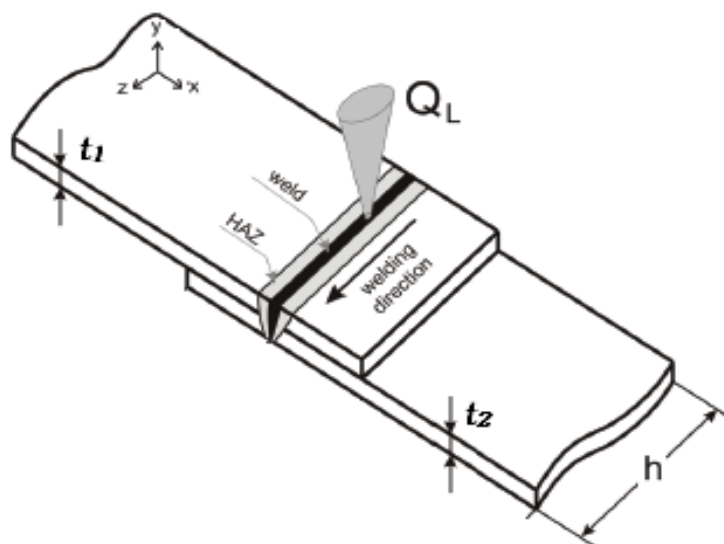
در پژوهش حاضر شبیه‌سازی عددی جوشکاری لیزری دو آلیاژ

استفاده از آرایش هندسی روی هم، وجود درز بین دو قطعه مجاور جهت اتصال می‌باشد که در صورت عدم کنترل این فاصله و وجود لقی، افت دقت و کیفیت جوش در ناحیه مرزی دو قطعه در حال اتصال به وجود خواهد آمد و این موضوع به دلیل پدیده سوزش داخلی در محدوده و صفحات مرزی دو قطعه می‌باشد [۹]. اتصال مواد با استفاده از ایجاد یک تمرکز حرارتی با استفاده از یک منبع با توان بالا در روش‌های مانند جوشکاری لیزری سبب وقوع و بروز موارد و وقایعی مکانیکی و متالورژیکی در قطعات خواهد شد که این رویدادها در سایر تکنیک‌های سنتی بدین شدت وجود نداشته است، به طور مثال در طی استفاده از جوشکاری لیزری دما به شدت افزایش می‌یابد و در برخی موارد حتی از دمای بخار فولاد نیز بالاتر می‌رود [۱۰]. از این رو بررسی دما و توزیع حرارت در جریان جوشکاری لیزری از اهمیت بالایی برای درک و بهینه‌سازی این فرایند برخوردار است، هرچند استفاده از رویکرد آزمایشگاهی و رویکرد تحلیلی می‌تواند تا حدودی این نیاز را برآورده سازد اما باید توجه داشت که استفاده از دو تکنیک مزبور مستلزم هزینه، زمان و مشکلات خاص خود می‌باشد که در بسیاری از موارد به دلیل همین محدودیت‌ها نتایج گسترده‌ای حاصل نمی‌شود. با استفاده از تکنیک‌های عددی و شبیه‌سازی و ایجاد اطمینان از صحت و دقت این روش‌ها می‌توان با تحلیل‌های مکانیکی و حرارتی جوشکاری لیزری بر عوامل محدودیت یعنی دو پارامتر زمان و هزینه غلبه کرد و تحلیلی مناسب از فرایند و روند آن را حاصل نمود تا بتوان با استفاده از اطلاعات بدست آمده اتصالی با شرایط بهینه ایجاد کرد [۱۱].

مهمترین فاکتور و پارامتر در جوش لیزری دما و توزیع حرارت در ناحیه جوش می‌باشد؛ زیرا این عامل باعث ایجاد تغییرات ریز ساختاری و در نهایت تغییر در خواص مکانیکی ناحیه اتصال خواهد شد. انتقال حرارت در ناحیه جوش و اطراف آن متأثر از حجم حرارت اعمالی به قطعه و نحوه توزیع آن در دو قطعه درگیر جوشکاری می‌باشد [۱۲-۱۵]. لازمه یک تحلیل حرارتی اجزاء محدود انتخاب و استفاده از یک مدل مناسب جهت ارائه روابط منبع حرارتی می‌باشد، در جوشکاری لیزری باید از مدلی استفاده نمود که این مدل توانایی شبیه‌سازی حجم حرارتی اعمالی بر ناحیه اتصال را به گونه‌ای داشته باشد که با دور شدن از سطح قطعه در معرض حرارت و اشعه لیزر چگالی توان و میزان جذب انرژی تغییر نماید. بر اساس مطالعات

1 Fortran

2 DFLUX



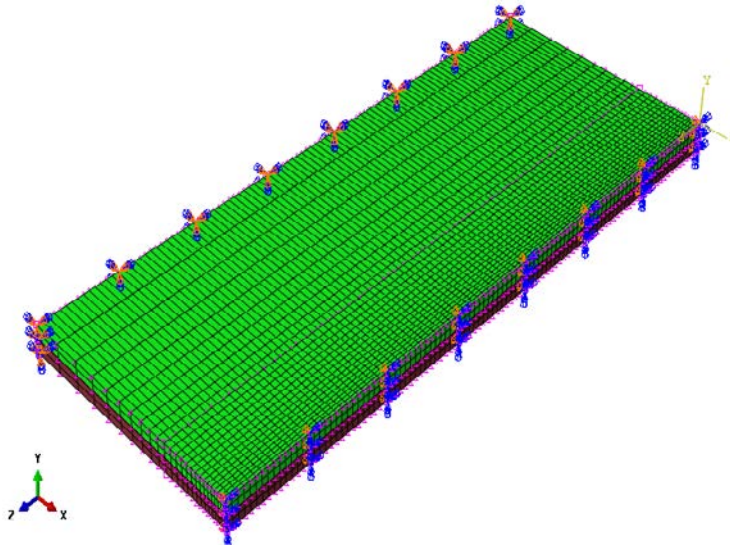
شکل ۱: شماتیک فرایند جوشکاری لیزری روی هم [۱۴]
Fig. 1. Schematic of the laser welding process [14]

شد، روند کار بدین صورت بوده است که نخست نتایج دو گام اول به صورت متناوب حاصل شد سپس این نتایج در یک مدل جدید به عنوان ورودی دما (شرایط مرزی اولیه) به نرم افزار جهت استفاده در گام سوم حل معرفی شد، از این رو قابلیت تغییر نوع المان در مرحله تغییر گام حل مسأله (گام دوم به سوم) ایجاد شد. در همه حالات مورد بررسی توزیع دانه‌بندی مدل در ناحیه خط جوش از چگالی بالاتری برخوردار است. در شکل ۲ حالت نهایی قرارگیری دو ورق با جنس متفاوت و شرایط مرزی مکانیکی همراه با نحوه مش‌بندی نمونه نمایش داده شده است.

شرایط و روند شبیه‌سازی بدین صورت خواهد بود که هر فلز در طول بررسی، دو ضخامت و دو موقعیت مکانی را تجربه می‌نماید که جمعاً با توجه به موارد ذکر شده ۸ حالت شبیه‌سازی بررسی خواهد شد. به منظور پرهیز از سردرگمی در حالات شبیه‌سازی، این حالات مورد بررسی با نماد و نام مختص آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

با توجه به این مسأله که فرایند جوشکاری لیزری در دمای بالا روی می‌دهد و ماده هر دو قطعه در حال اتصال چرخه‌های حرارتی وسیعی را تجربه می‌نمایند باید از خواص مکانیکی و حرارتی وابسته به دما در شبیه‌سازی مکانیکی در گام سوم حل مسأله استفاده کرد. با توجه به وابستگی تنش تسلیم به دما و نرخ کرنش در شبیه‌سازی‌های فرایندهای شکل‌دهی به طور عمده از معادله ویسکوپلاستیک جانسون-کوک

آلومینیومی AA5086 و AA6061 در ضخامت‌های متفاوت صورت گرفته است بدین منظور از ورق‌هایی با ابعاد 50×20 سانتی‌متر و با ضخامت‌های $1/5$ و 1 میلی‌متری برای هر دو فلز آلیاژی استفاده شده است، همچنین موقعیت قرارگیری دو فلز به ترتیب فلز بالا-پایین نیز در دو حالت AA5086-AA6061 و AA6061-AA5086 مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل تقارن شرایط توزیع دمایی در حین جوشکاری در دو سوی خط جوش و کاهش در هزینه شبیه‌سازی از مدل‌سازی یک دوم مدل قطعات استفاده شده است. شرایط مرزی حرارتی اعمالی بر مسأله به دو صورت انتقال حرارت جابجایی و تابشی می‌باشد که در ماژول برهم‌کنش نرم افزار تعریف شده است. شرایط مرزی مکانیکی ورق‌ها تحت جوش نیز در یک سو گیردار و در سوی دیگر به دلیل مدل‌سازی نیمی از مدل کلی تحت قید تقارن در راستای محور عرضی (محور x) نمونه‌ها می‌باشند. از سه گام حل مجزای جهت حل مسأله استفاده شده است، در دو گام حل حرارتی نخست که به ترتیب زمان ۵ و ۳۰ ثانیه را به خود اختصاص داده‌اند به ترتیب فرایند جوشکاری و خنک‌کاری قطعات صورت می‌پذیرد و در گام حل سوم که یک گام استاتیکی می‌باشد با استفاده از نتایج دمایی دو گام قبل به محاسبه تنش پسماند قطعات پرداخته شده است. نوع المان‌ها در دو گام حل نخست از نوع المان‌های حرارتی DC3D8 و در گام حل استاتیکی از نوع C3D8R می‌باشد، با توجه به اینکه از روش غیر مستقیم در شبیه‌سازی عددی در سه گام حل متفاوت استفاده



شکل ۲: شبکه بندی مدل و شرایط مرزی مکانیک مسأله.

Fig. 2. Meshing and mechanical boundary conditions of problem

جدول ۱: مشخصات حالات مورد بررسی در شبیه سازی.

Table 1. Specifications of the studied states in simulation

نمونه	ورق فوقانی	ورق تحتانی	ضخامت ورق فوقانی بر حسب میلی متر	ضخامت ورق تحتانی بر حسب میلی متر
A1	A16061	A15086	۱/۵	۱/۵
A2	A16061	A15086	۱/۵	۱
A3	A16061	A15086	۱	۱
A4	A16061	A15086	۱	۱/۵
B1	A15086	A16061	۱/۵	۱/۵
B2	A15086	A16061	۱/۵	۱
B3	A15086	A16061	۱	۱
B4	A15086	A16061	۱	۱/۵

مشخص بودن موارد فوق می توان به درستی شرایط بارگذاری در فاز پلاستیک ماده را محاسبه نمود. ثوابت معادله جانسون کوک برای دو آلیاژ مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۲ نمایش داده شده است [۲۰ و ۲۱].

سایر خواص مکانیکی و حرارتی دو آلیاژ اعم از مدول الاستیسیته، ضریب انتقال حرارت، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه مربوط به دو آلیاژ مطابق با داده های ارائه شده در پژوهش صورت گرفته توسط جمشیدی اول و همکاران به نرم افزار معرفی شد، این خواص در جدول ۳ نمایش داده شده است [۲۲]. در هر مرحله از شبیه سازی

استفاده می شود. در این مدل تنش به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می شود و میزان تنش و کارسختی در هر لحظه از فرایند با تقریب و دقت بالایی محاسبه می گردد، رابطه مربوط به معادله جانسون-کوک به صورت رابطه (۱) می باشد [۱۹].

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

در این رابطه σ تنش تسلیم در هر لحظه از فرایند است و A ، B ، C ، m و n ثابت های ماده هستند که با تست بدست می آیند، T دمای لحظه ای فرایند، T_r دمای انتقال و T_m دمای ذوب ماده است. با

جدول ۲: ثابت‌های معادله جانسون-کوک دو آلیاژ [۲۰ و ۲۱]

Table 2. Constants of the Johnson-Cook Equation [20, 21]

	A , MPa	B , MPa	n	m	C	T_{melt} , K
AA6061	۳۲۴	۱۱۴	۰/۴۲	۱/۳۴	۰/۰۰۲	۸۵۶
AA5056	۱۷۰	۴۲۵	۰/۴۲	۱/۲۲۵	۰/۰۳۳۵	۹۱۳

جدول ۳: خواص مکانیکی و حرارتی دو آلیاژ مورد استفاده [۲۲]

Table 3. Mechanical and thermal properties used of the two alloys [22]

چگالی جرمی، kg/m ³	ضریب انبساط حرارتی، °C/10 ⁻⁶	ضریب هدایت حرارتی، W/m °C	ظرفیت گرمایی، J/kg °C	مدول الاستیسیته، GPa	دما، C	آلیاژ آلومینیوم
۲۶۵۷	۲۳/۸	۱۲۷	۹۰۰	۷۰	۲۵	AA5086
	۲۵/۵	۱۵۱	۹۶۰	۶۷/۸	۲۰۰	
	۲۶/۸	۱۵۴	۹۸۰	۶۰/۷	۳۰۰	
	۲۸/۹	۱۵۸	۱۰۲۰	۵۱	۴۰۰	
	۳۱/۵	۱۶۹	۱۱۱۳	۳۷/۴	۵۰۰	
۲۷۰۰	۲۳/۴	۱۶۷	۸۹۶	۶۸/۵	۲۵	AA6061
	۲۴/۶	۱۸۰	۹۷۸	۶۶/۱	۱۰۰	
	۲۵/۶	۱۸۴	۱۰۰۴	۶۳/۱	۱۵۰	
	۲۶/۶	۱۹۲	۱۰۲۸	۵۹/۱	۲۰۰	
	۲۷/۵	۲۰۱	۱۰۵۲	۵۴	۲۵۰	
	۲۸/۵	۲۰۷	۱۰۷۸	۴۶/۴	۳۰۰	
	۳۰/۷	۲۳۰	۱۱۳۳	۳۱/۷	۴۵۰	

برخورداری می‌گردد و پیاده‌سازی صحیح این موارد ضامن صحت و دقت نتایج حاصله می‌باشد. تحلیل انتقال حرارت در حل گر استاندارد نرم افزار آباکوس بر اساس معادله بقای انرژی و قانون فوریه بنا نهاده شده است. میدان دما $T = T(x_a, t)$ در فرمولاسیون تغییراتی به صورت رابطه (۲) بیان می‌گردد [۲۳]:

$$\int_V \rho \dot{U} \delta T dv + \int_V \frac{\partial \delta T}{\partial x_a} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_a} \right) dv = \int_V \delta T q_v dv + \int_S \delta T q_s ds \quad (2)$$

که در این رابطه λ ضریب انتقال حرارت رسانشی، U انرژی داخلی سیستم، q_v منبع حرارتی اعمالی نماینده حرارت لیزر، فلاکس حرارتی اعمالی به المان‌ها و δT تابع تغییراتی دما می‌باشد. حل این معادله با اعمال شروط مرزی اولیه یعنی $t = 0: T = T_0$

ابتدا دو ورق به صورت مجزا مدل شده و سپس در ماژول مونتاژ در موقعیت مناسب به صورت کاملاً گوشه به گوشه و با هم پوشانی کامل روی یکدیگر قرار گرفتند، شرایط تماسی مناسب بر مسأله لحاظ گردید، به طوری که از جابجایی دو مدل بر روی یکدیگر در طول فرایند و در گام حل مکانیکی ممانعت به عمل آید.

۲-۲- مدل انتقال حرارت

مدل‌سازی فرایندهای جوشکاری با استفاده از تکنیک‌های عددی در صورت استفاده از هندسه‌های متفاوت جوش و استفاده از مواد با جنس متفاوت کار دشواری می‌باشد به دلیل این‌که در چنین شرایطی، تعریف مدل مادی استفاده شده جهت مواد و مدل حرارتی انتخاب شده جهت اعمال حرارت منبع حرارتی از اهمیت ویژه‌ای

جدول ۴: شرایط اعمالی گرمای نهان دو آلیاژ مورد استفاده [۲۶]
Table 4. Applicable conditions for the latent heat used of the two alloys [26]

T_S , °C	T_L , °C	گرمای نهان، kJ/kg	آلیاژ آلومینیوم
۵۸۲	۶۵۱	۳۹۸	AA6061
۵۴۵	۵۶۰	۳۹۸	AA5086

۲-۳- مدل سازی منبع حرارت

مدل های متفاوتی جهت شبیه سازی منبع حرارتی در فرایندهای جوشکاری مورد استفاده قرار می گیرد اما به طور عمده در شبیه سازی جوش لیزری به دلیل تقارن هندسی منبع حرارت در سطح قطعه و متقارن محوری بودن آن از توزیع حرارت گوسی استفاده می شود که در این نوع توزیع حرارتی مقدار حرارت اعمالی در راستای شعاعی تغییر خواهد نمود، نکته کلیدی و متمایز کننده استفاده از هر مدل حرارتی گوسی نحوه توزیع حرارت در راستای عمق قطعه می باشد که بدین منظور مدل های توزیع حرارت متفاوتی بر پایه مدل گوسی ایجاد شده است. آنالیز و تحلیل جوشکاری لیزری نشان می دهد که توان اشعه لیزر با نفوذ در قطعه دچار کاهش می شود که این مطلب باید در رابطه مورد استفاده در شبیه سازی حرارت ناشی از لیزر در مسایل مختلف لحاظ شود. در پژوهش حاضر از مدل معروف C-I-N استفاده شده است [۱۶]، در این مدل حرارت اعمالی به صورت یک فلاکس حرارتی حجمی که به شکل یک مخروط با ارتفاع و قاعده ای مشخص، که قاعده آن در لحظه نخست بر سطح فوقانی قطعه در مواجهه با پرتو لیزر تصویر می شود، اعمال می گردد و به صورت رابطه (۵) می باشد:

$$q_v(r, z) = \frac{kK_y Q_L}{\pi(1 - e^{-(K_y s)})} e^{-(kr^2 + K_y y)} [1 - u(y - s)] \quad (5)$$

که در این رابطه Q_L برابر با توان منبع حرارت، $K_y = 3/s$ ، $k = 3/r_0^2$ ضریب تمرکز اشعه لیزر است که در آن r_0 برابر با شعاع پرتو لیزر است، s نیز عمق نفوذ لیزر و $u(y - s)$ نیز تابع هوی ساید می باشد. در پژوهش حاضر عمق نفوذ لیزر برابر با ۳ میلی متر، توان لیزر برابر با ۶۰۰ وات و شعاع باریکه لیزر برابر با ۱ میلی متر لحاظ شده و این اعداد در شبیه سازی همه حالات ثابت در نظر گرفته شده است. الگوی توزیع حرارتی منبع لیزری که توسط رابطه مورد

همراه با استفاده از تماس حرارتی سطوح درگیر کامل می گردد [۹]. در طول آنالیز هدر رفت حرارت بر اساس انتقال حرارت جابجایی و تابشی و همچنین اعمال فلاکس حرارتی به سطوح حرارتی بر اساس رابطه (۳) محاسبه خواهد شد [۲۴]:

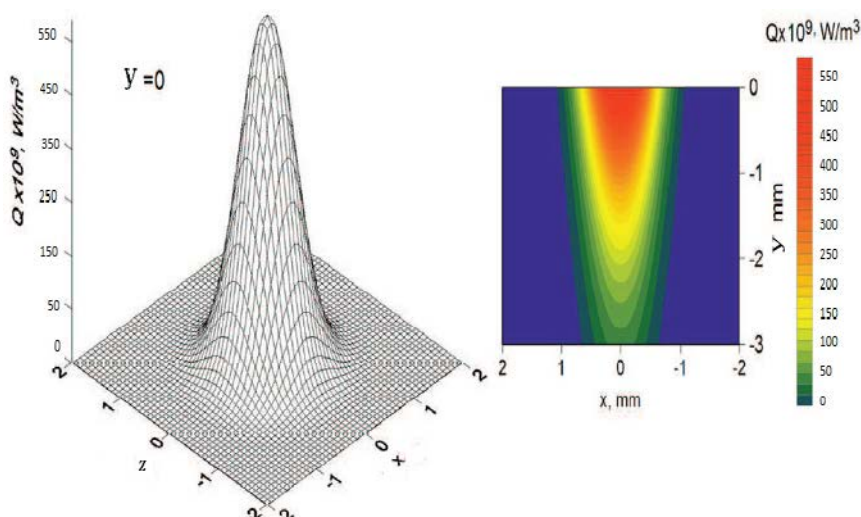
$$q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q(r, 0) + \alpha_k (T|_r - T_0) + \varepsilon \sigma (T|_r^4 - T_0^4) \quad (3)$$

که در این رابطه α_k ضریب انتقال حرارت جابجایی، ε ضریب گسیل در انتقال حرارت تابشی می باشد که در این پژوهش برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شد، σ ثابت استفان بولتزمن است و $q(r, 0)$ فلاکس حرارتی اعمالی به سطح فوقانی در معرض حرارت لیزر می باشد ($y = 0$) و r فاصله شعاعی از نقطه مرکزی اعمال لیزر می باشد.

با توجه به اینکه در حوضچه مذاب به دلیل توانایی جابجایی مواد سیال مذاب در این بخش انتقال حرارت رسانش بالاتری صورت می پذیرد باید ضریب انتقال حرارت رسانش وابسته به دما تعریف گردد که با افزایش دما میزان این ضریب نیز افزایش یابد. چگالی جرمی و گرمای ویژه جسم نیز با افزایش دما افزایش خواهد یافت [۲۵]. در رابطه (۱) پارامتر انرژی داخلی وابسته به گرمای نهان گداخت ماده H_L در منطقه خمیری شکل (منطقه میان دو دمای انجماد T_S و دمای مذاب T_L) است. تغییرات در گرمای ویژه $c(T) = dU/dT$ به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد [۲۴]:

$$c(T) = \begin{cases} c_s & \text{for } T \leq T_S \\ \frac{c_s + c_L}{2} + \frac{H_L}{(T_L - T_S)} & \text{for } T_S \leq T \leq T_L \\ c_L & \text{for } T \geq T_L \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه فوق c_s و c_L به ترتیب گرمای ویژه در حالت جامد و گرمای ویژه در حالت مایع قطعه در طول فرایند می باشد، این دو پارامتر بر اساس داده های گرمای ویژه وابسته به دما معرفی شده به نرم افزار (جدول ۴) توسط نرم افزار محاسبه شده و بکار گرفته می شود. پارامترهای مورد استفاده جهت دمای ذوب، دمای انجماد و گرمای نهان در شبیه سازی عددی حاضر برای دو آلیاژ آلومینیومی در جدول ۴ نمایش داده شده است [۲۶].



شکل ۳: توزیع حرارتی گوسی در حالت سه بعدی.
Fig. 3. Gaussian heat distribution in 3D state

مشابه جهت ثبت نتایج دمایی بکار برده شده است، خواص مواد و نوع مدل گوسی منبع حرارتی استفاده شده جهت شبیه‌سازی کاملاً منطبق بر اطلاعات و داده‌های ذکر شده در مقاله مزبور در نظر گرفته شد، شبیه‌سازی یک حالت از حالت‌های تجربی انجام شده در پژوهش تجربی که دارای سرعت ۳ میلی‌متر بر ثانیه بود انجام و نتایج عددی تحلیل حرارتی حاصل گشت. به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی بدست آمده، در شکل ۴ مقایسه نتایج دمایی حاصل از مدل عددی و نتایج تجربی نمایش داده شده است [۲۷].

با توجه به شکل ۴، نتایج تاریخچه دمایی حاصل از شبیه‌سازی عددی فرایند جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیوم در قرابت مناسبی با نتایج حاصل از کار تجربی اکبری و همکاران قرار دارد و این مطلب می‌تواند دال بر صحت نتایج عددی بدست آمده از روش مورد استفاده در پژوهش حاضر خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع دما

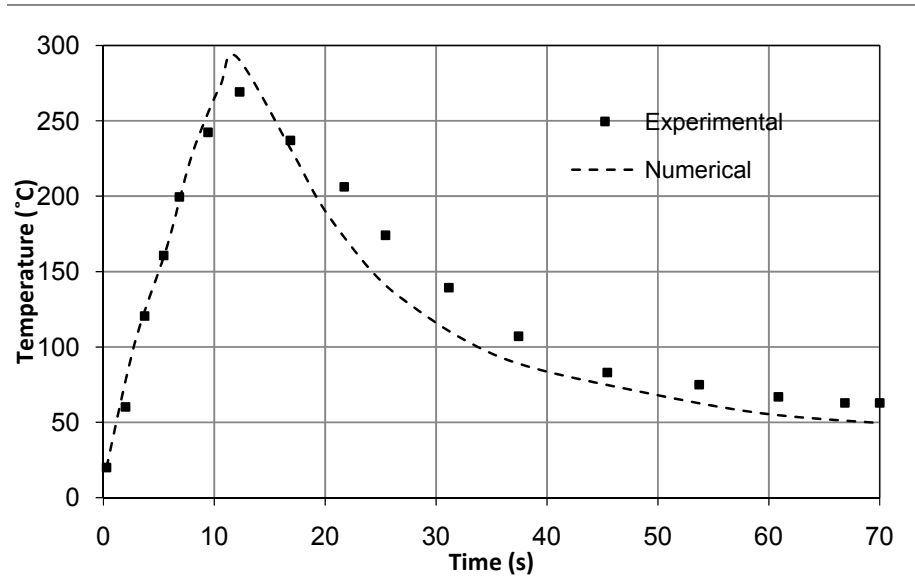
شبیه‌سازی جوشکاری لیزری برای همه حالات مورد بررسی قرار گرفت، دو گام حل حرارتی جوشکاری و خنک‌کاری در نظر گرفته شد و تغییرات و توزیع دمایی در نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت، بالاترین دمای حادث شده در کل قطعات در نمونه B3 روی داد که به عنوان نمونه تاریخچه زمانی تغییرات دما یک نقطه از خط جوش (نقطه‌ای از سطح قطعه فوقانی - عمق صفر - و در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از نقطه

استفاده در پژوهش حاضر اعمال شده است در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در شبیه‌سازی اجزاء محدود به منظور اعمال فلاکس متحرک منطبق بر رابطه (۵) از کد نویسی به زبان فرترن توسط زیر برنامه دی‌فلاکس استفاده شد. نقطه شروع حرکت لیزر در نقطه مرکز مختصات قرار گرفت و در همه حالات شبیه‌سازی سرعت حرکت لیزر در راستای خط جوش برابر با ۱ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته و لحاظ گردید.

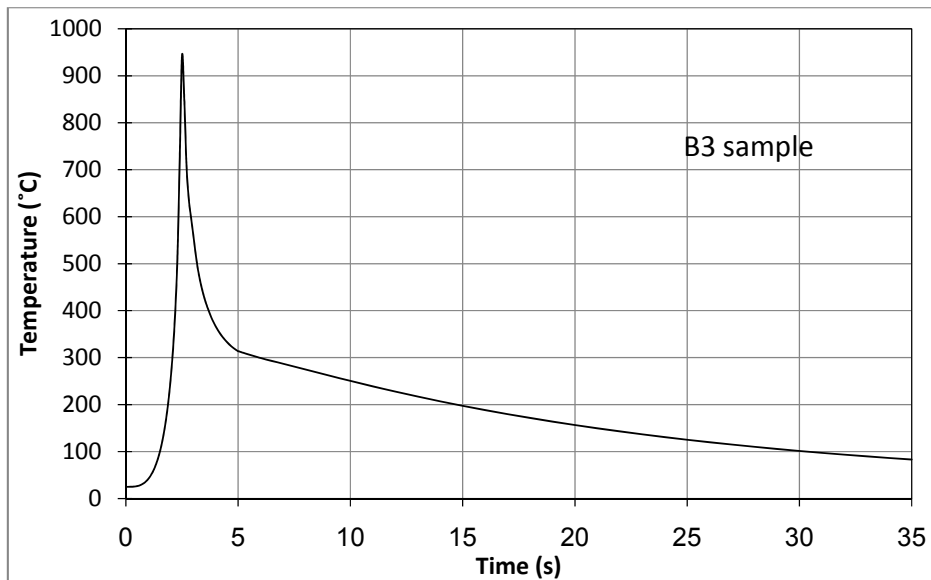
۴-۲- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

استناد به نتایج عددی در مرحله نخست نیازمند صحت‌سنجی می‌باشد، از این رو در متن حاضر از نتایج موجود در پیشینه پژوهش به عنوان ابزاری جهت صحت‌گذاری بر روش بکارگرفته شده در این پژوهش استفاده شده است تا درستی روند شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گیرد. بدین جهت از مقایسه نتایج تجربی برگرفته از مطالعه آزمایشگاهی اکبری و همکاران استفاده شد [۲۷] که در آن بررسی تجربی تأثیر سرعت جوشکاری جوش لیزری بر دما و شکل منطقه جوش آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V صورت پذیرفته است و دما در سرعت‌های متفاوت جوشکاری به وسیله ترموکوپل‌های مدل k در فاصله ۵ میلی‌متر از خط جوش در دو ناحیه متفاوت آغازی و پایانی خط سیر جوش اندازه‌گیری شده است [۲۷]. در پژوهش حاضر نیز جهت صحت‌سنجی، هندسه قطعه و نقطه‌ای با موقعیت مکانی کاملاً



شکل ۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی [۲۷] و عددی

Fig. 4. Comparison of experimental [27] and numerical results



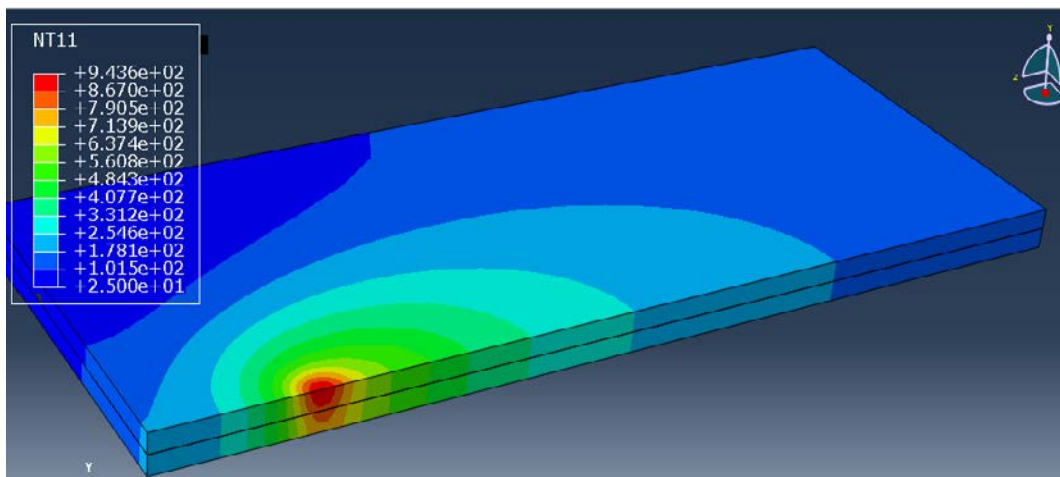
شکل ۵: تاریخچه زمانی دمای یک نقطه از خط جوش

Fig. 5. Temperature time history of a point in welding line

توزیع دمایی مشابه‌ای همانند با شکل ۶ مشاهده شد که تنها اختلاف آن‌ها دمای بیشینه متفاوت در نمونه‌های مختلف بود. با توجه به اینکه در جوشکاری لیزری روی هم با نفوذ در عمق قطعه کار میزان حرارت اعمالی و دمای بیشینه آن مکان هندسی از قطعه کاهش می‌یابد باید شرایط پارامتری منبع جوشکاری، سرعت جوشکاری و ضخامت قطعات به نحوی انتخاب و تنظیم شوند که در بخشی از قطعه تحتانی نیز دما به دمای ذوب آن ماده رسیده و عمل ذوب در این قسمت نیز صورت پذیرد، بنا به دلایل ذکر شده نحوه توزیع و اختلاف دما در

شروع جوش) در شکل ۵ نمایش داده شده است، همچنین در شکل ۶ کانتور توزیع دمایی کلی این نمونه در میان گام جوشکاری (۴ ثانیه پس از شروع گام جوشکاری) نمایش داده شده است.

بر اساس شرایط دمایی ارائه شده در شکل ۵ و ۶ قطعه کار در ناحیه معرض حرارت ناشی از اشعه لیزر در زمانی کوتاه دمایی بالاتر از دمای ذوب خود را تجربه نموده و پس از گذشت منبع حرارتی از این بخش در مدت زمان کوتاهی دما افت نموده و در نهایت دمای نمونه به دمای محیط باز می‌گردد. در همه نمونه‌های مورد بررسی الگوی



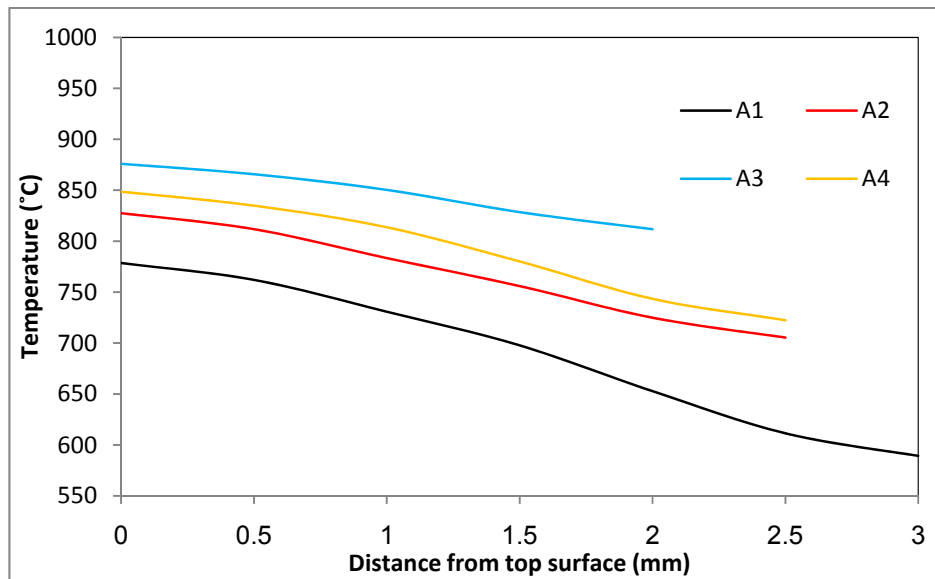
شکل ۶: توزیع دمایی نمونه B3 در حین جوشکاری لیزری
 Fig. 6. Sample B3 temperature distribution during laser welding

عمق نمونه‌ها برای حالات *A* و *B* هم شماره به طور تقریبی یکسان می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر این مسئله است که در همه حالات دسته *B* که آلیاژ نرم‌تر در بخش فوقانی قرار گرفته است نسبت به حالت هم شماره دسته *A* بیشینه دمایی بزرگ‌تری حاصل شده است که این امر به دلیل خواص حرارتی متفاوت (گرمای ویژه کوچکتر) این آلیاژ نسبت به آلیاژ سخت‌تر است که موجب شده است این بخش آلیاژی در تماس مستقیم با منبع حرارت لیزری حرارت بالاتری را جذب نموده و به همین دلیل دمایی بالاتری را تجربه نماید.

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ و مقایسه توزیع دما در طول ضخامت نمونه‌های *B2* و *B4* با یکدیگر و همچنین دو نمونه *A2* و *A4* با یکدیگر که همگی این چهار حالت دارای ضخامت کلی (مجموع ضخامت ورق فوقانی بعلاوه ضخامت ورق تحتانی) ۳ میلی‌متر می‌باشند، می‌توان دریافت در شرایطی که مجموع ضخامت دو قطعه یکسان باشد چنانچه قطعه فوقانی از قطعه تحتانی ضخیم‌تر باشد توزیع دمایی به نسبت بزرگ‌تری در کل حاصل خواهد شد که این مسئله به دلیل تأثیر فاصله فصل مشترک دو بخش در تماس با یکدیگر از سطح در تماس منبع حرارت لیزر (سطح بالایی قطعه فوقانی $y = 0$) می‌باشد، هر چه این فاصله در ضخامت کلی ثابت بزرگ‌تر باشد توزیع کلی دما و دمایی بیشینه در نمونه‌ها بزرگ‌تر خواهد بود زیرا با رسیدن منبع حرارت به بخش فصل مشترک دو قطعه از تمرکز انتقال و نفوذ حرارت کاسته می‌گردد و مقداری از حرارت اعمالی در سطوح این فصل مشترک شروع به شارش می‌کند و موجب کاسته شدن بیشینه دمایی کلی حادث شده خواهد شد. در جدول ۵ نتایج دمایی بیشینه

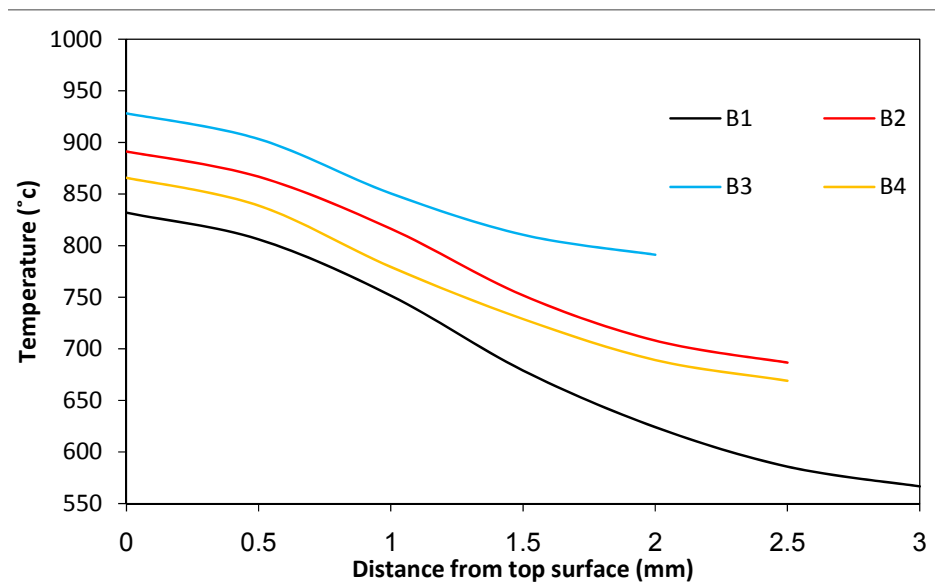
راستای ضخامت قطعه از اهمیت بالایی برخوردار است و بهینه بودن این اختلاف و توزیع دمایی ضامن شکل‌گیری اتصالاتی مناسب است، با توجه به اینکه در پژوهش حاضر از دو جنس آلیاژ متفاوت آلومینیومی استفاده شده که از لحاظ خواص حرارتی و خواص مکانیکی تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند پس قرارگیری هر کدام از این آلیاژها در قسمت فوقانی و یا تحتانی و تغییر ضخامت هر بخش در طول فرایند بر توزیع دما در قطعه و حرارت توزیع شده در ناحیه جوش تأثیر بسزایی خواهد داشت. در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار تغییرات دما در راستای ضخامت برای دسته‌های *A* و *B* نمایش داده شده است. مجدداً لازم به ذکر است که نمونه‌هایی که نام آن‌ها با حرف *A* آغاز می‌شود قسمت فوقانی آن‌ها از آلیاژ سخت‌تر AA6061 و قسمت تحتانی آن‌ها از آلیاژ نرم‌تر AA5086 تشکیل شده است و در نمونه‌هایی که نام آن با حرف *B* آغاز می‌شود شرایط معکوس اعمال شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در شکل‌های ۷ و ۸ در همه حالات با افزایش ضخامت در بخش تحتانی و فوقانی، بیشینه دمایی حادث در کل نمونه کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل قرار گرفتن حجم بزرگ‌تری از ماده در مقابل منبع حرارتی لیزر است که در نهایت باعث می‌شود حرارت اعمال شده در منطقه بزرگ‌تری در راستای ضخامت توزیع یابد و به همین دلیل بیشینه دمایی به میزان قابل توجهی در قطعه کاهش یابد. روند تغییرات و کاهش دمایی بیشینه در فرایند با تغییر در جانمایی آلیاژ سخت‌تر و نرم‌تر در دو موقعیت مکانی متفاوت (بالا و پایین) تغییر چندانی نمی‌کند و شیب کاهش دما با نفوذ در



شکل ۷: تغییرات دما در راستای ضخامت در ناحیه جوش نمونه‌های A

Fig. 7. Temperature variations along the thickness in the welding region of a samples



شکل ۸: تغییرات دما در راستای ضخامت در ناحیه جوش نمونه‌های B

Fig. 8. Temperature variations along the thickness in the welding region of B samples

بیشتر می‌شود و بالعکس. حالت A4 پایین‌ترین اختلاف دما بین همه حالت را داراست که این وضعیت به دلیل قرارگیری فلز سخت‌تر و با ضخامت کم‌تر در قسمت فوقانی می‌باشد. باید توجه داشت که اختلاف بزرگ در توزیع دما بین دو قطعه در هندسه اتصال روی هم سبب ایجاد توزیع کرنش نامنظم در راستای ضخامت و در فصل مشترک دو قطعه در تماس باهم خواهد شد و در نتیجه تمرکز تنش‌های حرارتی

قطعات فوقانی و تحتانی برای همه حالات مورد بررسی در دو وضعیت حین جوشکاری و پس از خنک‌کاری قطعه آورده شده است. مطابق با نتایج ارائه شده در این جدول در شرایط قرارگیری فلز نرم‌تر در بخش فوقانی اختلاف دمای بزرگ‌تری بین دو بخش بالا و پایین اتصال ایجاد خواهد شد و همچنین بنا بر دلایل ذکر شده در ابتدای این پاراگراف در شرایط استفاده از ورق ضخیم‌تر در بخش فوقانی نیز این اختلاف

جدول ۵: نتایج دمای نمونه‌های مختلف

Table 5. Temperature results of different samples

وضعیت	دما، درجه سانتی‌گراد				ماکزیمم اختلاف بین دمای دو ورق حین جوشکاری
	در حین جوشکاری		خنک‌سازی (پس از ۳۰ ثانیه)		
	ماکزیمم در ورق فوقانی	ماکزیمم در ورق تحتانی	ماکزیمم در ورق فوقانی	ماکزیمم در ورق تحتانی	
A1	۷۷۲	۶۸۰	۱۰۵	۱۰۴	۹۲
A2	۸۱۶	۷۳۶	۱۰۱	۹۹	۸۰
A3	۸۸۷	۸۵۳	۸۵	۸۳	۳۴
A4	۸۴۰	۷۹۹	۹۷	۹۷	۴۱
B1	۸۵۰	۶۷۸	۱۰۴	۱۰۳	۱۷۲
B2	۹۰۷	۷۵۱	۹۹	۹۷	۱۵۶
B3	۹۴۳	۸۵۳	۸۴	۸۳	۹۰
B4	۸۸۲	۷۸۳	۹۷	۹۷	۹۹

بر اساس شکل‌های ۹ و ۱۰ با قرارگیری فلز نرم‌تر در قسمت فوقانی در هنگام جوشکاری، عرض و عمق ناحیه حوضچه مذاب و ناحیه متأثر به صورت ترموینامیکی^۱ و ناحیه متأثر از حرارت^۲ نسبت به حالت عکس این وضعیت افزایش قابل توجهی را تجربه می‌نماید. در شش حالت از هشت حالت مورد بررسی عمق حوضچه مذاب به سوی دیگر قطعه کار رسیده است که در این حالات، در دو وضعیت B3 و A3 به دلیل ضخامت کلی کوچک‌تر نسبت به سایر حالات به طور شدیدتری روی داده است و مساحت حوضچه مذاب این نمونه‌ها نسبت به سایر حالات نسبتاً بزرگ‌تر می‌باشد که این حجم از وسعت منطقه مذاب سبب ایجاد مشکلاتی در کنترل ماده مذاب در ناحیه جوش و در نهایت کیفیت اتصال خواهد شد. از میان هشت حالت مورد بررسی وضعیت A1 و B1 به دلیل داشتن ضخامت بزرگ‌تر، وسعت مناسب‌تری را در نواحی مختلف جوش تجربه می‌نمایند.

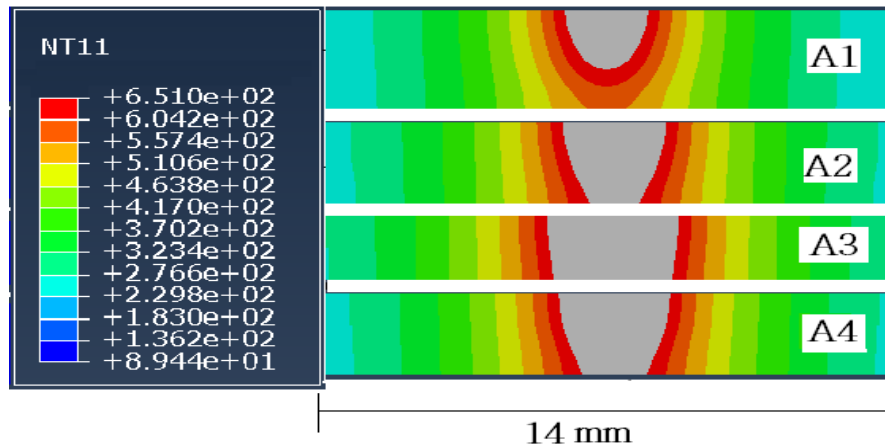
بر اساس نتایج حاصل از توزیع دما و بررسی وسعت حوضچه مذاب همه نمونه‌ها، می‌توان نمونه A1 را به عنوان حالت بهینه در این سرعت و توان ثابت جوشکاری برگزید زیرا در این حالت دما با اختلافی مناسب نسبت به دمای ذوب دو آلیاژ (۱۰۰ درجه بزرگ‌تر از دمای ذوب) رسیده و توزیع دما در راستای ضخامت در دو قطعه یکنواخت‌تر می‌باشد و همچنین محدوده و مساحت حوضچه مذاب در

بزرگ‌تری در فصل مشترک دو قطعه به وجود خواهد آمد که این تمرکز تنش‌های حرارتی می‌توانند موجب بروز و شکل‌گیری عیوب در این ناحیه از اتصال شود و در نهایت کیفیت و عمر اتصال ایجاد شده را کاهش دهد.

در جوشکاری لیزری با هندسه جوش روی هم، دمای فرایند باید به گونه‌ای تنظیم شود که سرتاسر مقطع جوش، درگیر فرایند ذوب نشود زیرا ذوب سرتاسری دو قطعه روی هم قرار گرفته در راستای شارش حرارت توسط منبع حرارتی، موجب خروج مواد از کف قطعه تحتانی شده و امکان اتصال و کیفیت جوش نهایی را به شدت دچار افت می‌نماید [۲۸]. بدین جهت حوضچه مذاب در جوشکاری لپ باید به گونه‌ای به وجود آید که فقط بخشی از قطعه زیرین ذوب شده و در تشکیل اتصال شرکت نماید، از این رو افزایش بیش از حد دما مخصوصاً در بخش تحتانی سبب عدم اتصال و یا افت کیفی در اتصال نهایی دو قطعه خواهد شد. در پژوهش حاضر وسعت منطقه حوضچه مذاب برای همه حالات مورد شبیه‌سازی، بررسی شد و با استفاده از قابلیت حدگذاری نتایج در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس نتایج دمایی و حدود سطح مقطع جوش و محدوده حوضچه مذاب برای همه حالات حاصل گشت. در شکل‌های ۹ و ۱۰ سطوح مقطع جوش نمونه‌ها همراه با حوضچه مذاب آن‌ها برای نمونه‌های دسته A و دسته B نمایش داده شده است.

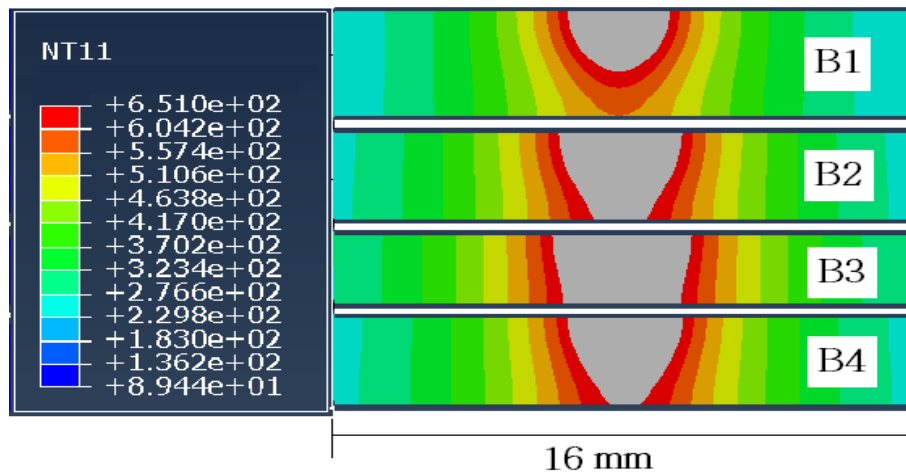
1 Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

2 Heat-Affected Zone (HAZ)



شکل ۹: وسعت حوضچه مذاب و نواحی مختلف جوشکاری در نمونه‌های دسته A

Fig. 9. The extent of the molten pond and the different welding areas in the A samples



شکل ۱۰: وسعت حوضچه مذاب و نواحی مختلف جوشکاری در نمونه‌های دسته B

Fig. 10. The extent of the molten pond and the different welding areas in the B samples

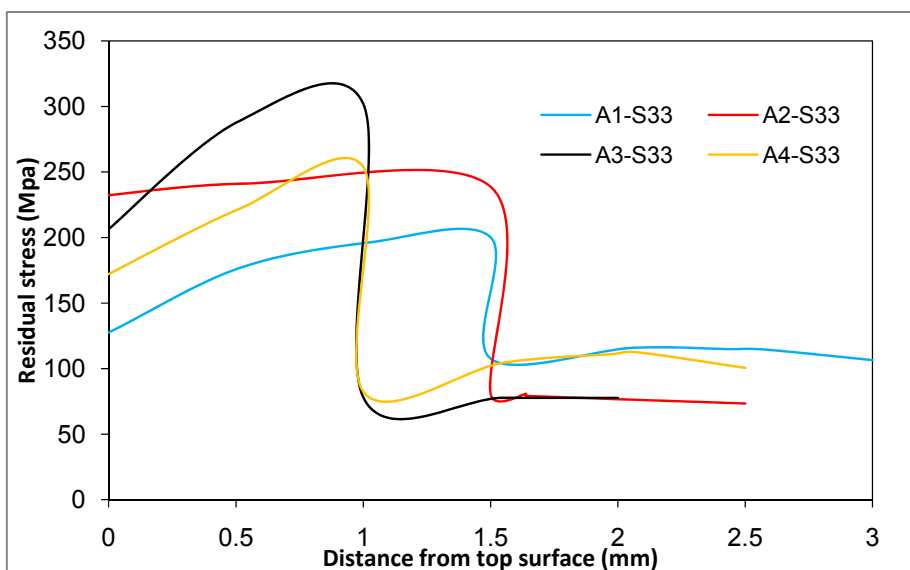
پسماند طولی σ_{zz} به ترتیب در نمونه‌های دسته A و نمونه‌های دسته B در راستای ضخامت قطعات نمایش داده شده است.

با توجه به دو نمودار ارائه شده در همه حالات فارغ از موقعیت قرارگیری هر آلیاژ در بخش فوقانی و یا تحتانی، تنش پسماند طولی بزرگ‌تر در بخش آلیاژ سخت‌تر یعنی آلیاژ AA6061 روی داده است که این موضوع به دلیل تمرکز بیشتر تنش‌های حرارتی در این قطعه می‌باشد و در همه حالات بیشینه تنش پسماند طولی به وجود آمده در حدود تنش تسلیم آلیاژ سخت‌تر می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ در همه حالات مورد بررسی در فصل مشترک دو ورق در حال اتصال یک گسستگی در مقدار تنش پسماند ایجاد می‌شود و تنش به صورت پله‌ای و آنی در این ناحیه کاهش یا افزایش می‌یابد، این مسأله به دلیل توزیع حرارت نامتقارن در فصل مشترک دو قطعه

حد قابل قبولی جهت ایجاد اتصالی مناسب ایجاد شده است.

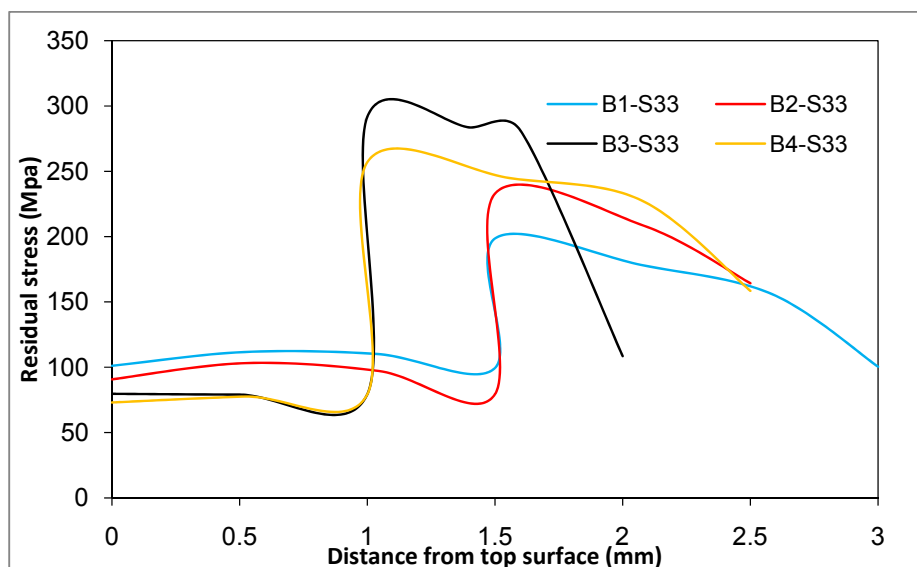
۲-۳- تنش پسماند

تنش‌های پسماند در فرایندهای مختلف جوشکاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، در بین این تنش‌ها تنش‌های پسماند کششی به شدت بر عمر خستگی نمونه‌های جوشکاری اثر منفی گذاشته و عمر قطعه را کاهش می‌دهند از این رو کنترل این تنش‌ها در قطعه و به خصوص در نواحی جوشکاری در نمونه‌های مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۹]. در پژوهش حاضر نیز میزان تنش پسماند طولی (تنش در راستای خط جوش) و تنش پسماند عرضی (تنش در راستای عرض ورق و عمود بر خط جوش) در مسیر ضخامت اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تنش‌های



شکل ۱۱: تنش پسماند طولی σ_{zz} در راستای ضخامت در منطقه اتصال در نمونه‌های دسته A

Fig. 11. The longitudinal residual stress σ_{zz} along the thickness in the joint region in the A samples



شکل ۱۲: تنش پسماند طولی σ_{zz} در راستای ضخامت در منطقه اتصال در نمونه‌های دسته B

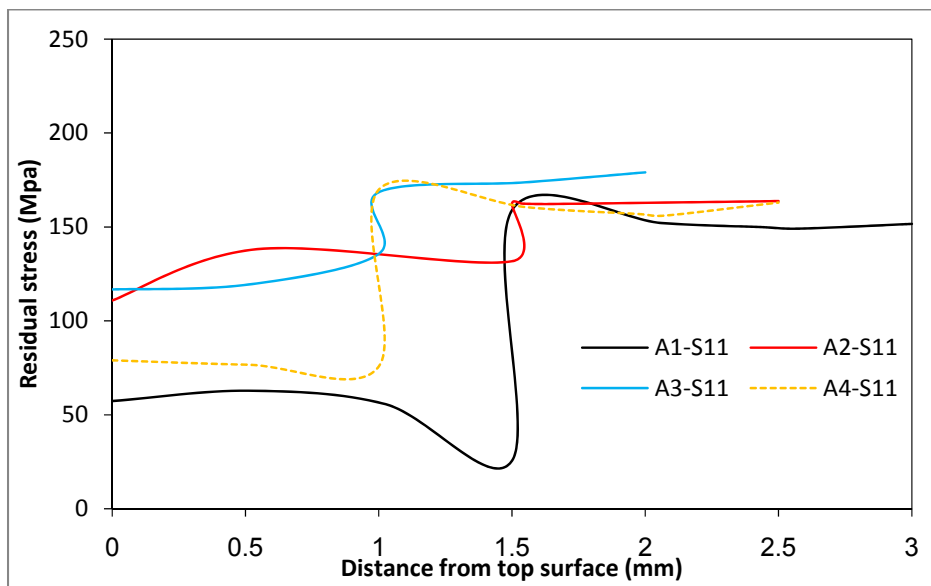
Fig. 12. The longitudinal residual stress σ_{zz} along the thickness in the joint region in the B samples

با ضخامت کلی بالاتر روی داده است که این موضوع بدین دلیل می‌باشد که در یک ضخامت کلی (مجموع ضخامت دو قطعه فوقانی و تحتانی) بزرگ‌تر و ثابت بودن حجم حرارت اعمالی به دو قطعه در طول فرایند جوشکاری لیزری تنش‌های حرارتی و مکانیکی به وجود آمده در ناحیه وسیع‌تری گسترش می‌یابند که این گسترش تنش در ناحیه بزرگ‌تر سبب کاهش در سطح و اندازه تنش‌های پسماند نهایی دو قطعه خواهد شد و میزان و برآیند تنش پسماند کلی دو قطعه در راستای ضخامت جوش کاهش می‌یابد، بنا بر توضیحات ارائه شده

در هنگام شارش حرارت در این فصل مشترک است و سبب می‌شود که توزیع تنش پسماند نیز به صورت گسسته در این ناحیه روی دهد و اختلاف آنی قابل توجهی در تنش پسماند در دو قطعه فوقانی و تحتانی در این ناحیه به وجود آید. این گسسته بودن میزان تنش در این نواحی سبب ایجاد تمرکز وقوع آسیب و پیدایش ترک خستگی در بارگذاری‌های سیکلیک خواهد شد و تا حد قابل توجهی عمر خستگی نهایی قطعه را کاهش می‌دهد. در هر دو دسته مورد بررسی A و B کمترین میزان اختلاف در این ناحیه پله‌ای در نمونه‌هایی

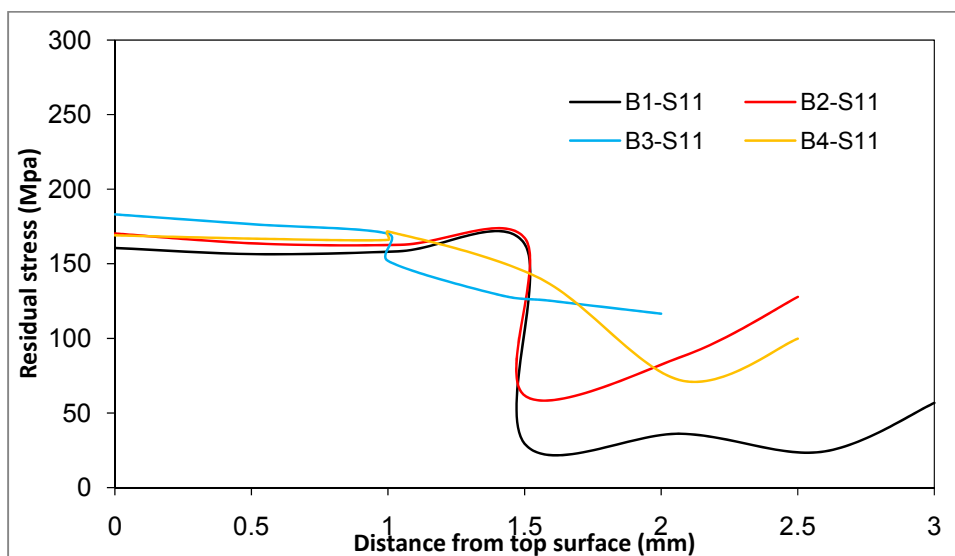
مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ بیشینه تنش پسماند عرضی σ_{xx} در همه نمونه‌ها در بخش آلیاژ نرم‌تر یعنی آلیاژ AA5086 روی می‌دهد که این مطلب عکس وضعیت است که در زمینه تنش‌های طولی اتفاق افتاده بود، نکته قابل ذکر دیگر این مسأله می‌باشد که در همه حالات مورد بررسی، تنش پسماند عرضی همواره در سطحی پایین‌تری (حدوداً ۳۰ درصد) از تنش‌های پسماند طولی است. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مجدداً مشخص گردید که گسستگی و تغییر آنی میزان تنش پسماند در هنگام عبور از موقعیت مکانی در

می‌توان بهترین حالت را از نظر سطح تنش پسماند کششی طولی در σ_{zz} در قطعه کار به ترتیب حالات $A1$ و $B1$ در نظر گرفت زیرا هم سطح تنش پسماند کششی را در حد پایین‌تری تجربه می‌نمایند و هم میزان اختلاف تنش در دو ناحیه فوقانی و تحتانی این نمونه‌ها اختلاف پایین‌تری با یکدیگر دارد که این اختلاف پایین در نهایت موجب خواهد شد که احتمال بروز ترک خستگی در این نواحی کاهش یابد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تنش پسماند عرضی σ_{xx} دسته‌های A و B در راستای عمق قطعه کار نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: تنش پسماند عرضی σ_{xx} در راستای ضخامت در منطقه اتصال در نمونه‌های دسته A.

Fig. 13. Transverse residual stress σ_{xx} along the thickness of the joint region in the A samples



شکل ۱۴: تنش پسماند عرضی σ_{xx} در راستای ضخامت در منطقه اتصال در نمونه‌های دسته B.

Fig. 14. Transverse residual stress σ_{xx} along the thickness of the joint region in the B samples

که این وضعیت به دلیل قرارگیری فلز سخت تر و با ضخامت کم تر در قسمت فوقانی می باشد.

- با قرارگیری فلز نرم تر در قسمت فوقانی در هنگام جوشکاری، عرض و عمق حوضچه مذاب و ناحیه متأثر به صورت ترموینامیکی و ناحیه متأثر از حرارت نسبت به حالت عکس این وضعیت افزایش قابل توجهی را تجربه می نماید، در میان همه حالات مورد بررسی وضعیت $A1$ و $B1$ به دلیل داشتن ضخامت بزرگ تر، وسعت مناسب تری را در نواحی مختلف جوش تجربه می نمایند.

- بیشینه تنش پسماند عرضی σ_{xx} در همه نمونه ها در بخش آلیاژ نرم تر یعنی آلیاژ AA5086 روی می دهد که این مطلب عکس اتفاقی است که در زمینه تنش های طولی روی داد، در همه نمونه ها مورد بررسی تنش پسماند عرضی همواره در سطحی پایین تری (حدوداً ۳۰ درصد) از تنش های پسماند طولی حاصل شد.
- بهترین حالت از نظر سطح تنش پسماند طولی σ_{zz} در قطعه کار را می توان به ترتیب حالات $A1$ و $B1$ است زیرا هم سطح تنش پسماند کششی پایین تری را تجربه می نمایند و هم میزان اختلاف تنش در دو ناحیه فوقانی و تحتانی این نمونه ها اختلاف پایین تری با یکدیگر دارد.

مراجع

- [1] J. Baysore, M. Williamson, Y. Adonyi, J. Milian, Laser beam welding and formability of tailored banks, *Welding journal*, 74(10) (1995) 345. s-352. s.
- [2] W.W. Duley, W.W. Duley, W.W. Duley, *Laser welding*, Wiley New York, 1999.
- [3] M. Gilloon, A. Wexler, *Laser welding process*, in, Google Patents, 2017.
- [4] C. Bagger, F.O. Olsen, Review of laser hybrid welding, *Journal of laser applications*, 17(1) (2005) 2-14.
- [5] I. Tomashchuk, D. Grevey, P. Sallamand, Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6–Al4–6V alloy via pure vanadium interlayer, *Materials Science and Engineering: A*, 622 (2015) 37-45.
- [6] S.-K. Cho, Y.-S. Yang, K.-J. Son, J.-Y. Kim, Fatigue strength in laser welding of the lap joint, *Finite Elements in analysis and design*, 40(9-10) (2004) 1059-1070.

فصل مشترک دو بخش به وقوع می پیوندد، همچنین بر اساس نتایج حاصله و مشابه با حالت مربوط به تنش های پسماند طولی، اختلاف در مقدار تنش پسماند عرضی در نواحی پله ای نمودارها با افزایش ضخامت کلی نمونه ها کاهش می یابد که پیش تر دلیل این واقعه شرح داده شد. با توجه به اطلاعات ذکر شده دو حالت تنش پسماند طولی و عرضی وضعیت معکوسی را راجع به تغییر در موقعیت قرار گیری آلیاژها و ضخامت نمونه ها تجربه می نمایند.

۸- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از کد اجزا محدود آباکوس ۲۰۱۷ و بکارگیری زیر برنامه دی فلاکس به زبان برنامه نویسی فرترن تحلیل عددی سه بعدی جوشکاری لیزری در حالت هندسی روی هم دو آلیاژ غیر هم جنس آلومینیومی AA5086 و AA6061 صورت گرفته است و تأثیر قرارگیری آلیاژ سخت تر و نرم تر در قسمت فوقانی و تحتانی جوش در ضخامت های ۱ و 5/1 میلی متری دو آلیاژ در هشت حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته و و تأثیر این پارامترها بر مواردی همچون: توزیع حرارتی، پیش بینی وسعت مناطق مختلف جوش و تنش پسماند ناشی از جوشکاری لیزری مطالعه شده است.

- در همه نمونه های دسته B که آلیاژ نرم تر در بخش فوقانی قرار گرفته است نسبت به حالت هم شماره دسته A بیشینه دمایی بزرگ تری حاصل شده است که این وضعیت به دلیل خواص حرارتی متفاوت (گرمای ویژه کوچکتر) این آلیاژ نسبت به آلیاژ سخت تر است.
- در شرایطی که مجموع ضخامت دو قطعه یکسان باشد چنانچه قطعه فوقانی از قطعه تحتانی ضخیم تر باشد توزیع دمایی به نسبت بزرگ تری در کل حاصل خواهد شد که این مسأله به دلیل تأثیر فاصله فصل مشترک دو بخش در تماس با یکدیگر از سطح در تماس مستقیم با منبع حرارت لیزر (سطح بالایی قطعه فوقانی $y = 0$) می باشد، هرچه این فاصله در ضخامت کلی ثابت، بزرگ تر باشد توزیع کلی دما و دمایی بیشینه در نمونه ها بزرگ تر خواهد بود زیرا با رسیدن منبع حرارت به بخش فصل مشترک دو قطعه از تمرکز انتقال و نفوذ حرارت کاسته می گردد و مقداری از حرارت اعمالی در سطوح این فصل مشترک شروع به شارش می کند و سبب کاسته شدن بیشینه دمای کلی حادث شده خواهد شد.

- بر اساس نتایج حاصله نمونه $A4$ پایین ترین اختلاف دما بیشینه بین قسمت فوقانی و تحتانی را در بین همه حالات داراست

- Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *Modares Mechanical Engineering*, 15(20) (2016) 416-420.
- [18] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Rahmani, Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 5(2) (2016) 21-31.
- [19] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21(1) (1985) 31-48.
- [20] T. Srikanth, S. Surendran, G. Balaganesan, G. Manjunath, Response of welded aluminium alloy plates for ballistic loads, *Ships and Offshore Structures*, (2018) 1-7.
- [21] C. Hamilton, A. Sommers, S. Dymek, A thermal model of friction stir welding applied to Sc-modified Al-Zn-Mg-Cu alloy extrusions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3-4) (2009) 230-238.
- [22] H.J. Aval, S. Serajzadeh, A. Kokabi, Evolution of microstructures and mechanical properties in similar and dissimilar friction stir welding of AA5086 and AA6061, *Materials Science and Engineering: A*, 528(28) (2011) 8071-8083.
- [23] Hibbitt, Karlsson, Sorensen, *ABAQUS/standard User's Manual*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, 2001.
- [24] H. Hibbit, B. Karlsson, E. Sorensen, *ABAQUS user manual*, version 6.12, Simulia, Providence, RI, (2012)
- [25] S. Kumar, S. Bhaduri, Three-dimensional finite element modeling of gas metal-arc welding, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 25(3) (1994) 435-441.
- [26] N. Sonti, M. Amateau, Finite-element modeling of heat flow in deep-penetration laser welds in aluminum alloys, *Numerical heat transfer*, 16(3) (1989) 351-370.
- [27] M. Akbari, S. Saedodin, D. Toghraie, R. Shoja
- [7] C. Dawes, *Laser welding: a practical guide*, Woodhead Publishing, 1992.
- [8] J. Ma, M. Harooni, B. Carlson, R. Kovacevic, Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding, *Materials & Design*, 58 (2014) 390-401.
- [9] F. Kong, R. Kovacevic, 3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(6-7) (2010) 941-950.
- [10] M. Harooni, B. Carlson, R. Kovacevic, Detection of defects in laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration by a real-time spectroscopic analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, 56 (2014) 54-66.
- [11] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, *The finite element method for solid and structural mechanics*, Elsevier, 2005.
- [12] S. Tsirkas, P. Papanikos, T. Kermanidis, Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, *Journal of materials processing technology*, 134(1) (2003) 59-69.
- [13] M. Frewin, D. Scott, Finite element model of pulsed laser welding, *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 78 (1999) 15-s.
- [14] W. Piekarska, M. Kubiak, A. Bokota, Numerical simulation of thermal phenomena and phase transformations in laser-arc hybrid welded joints, *Archives of Metallurgy and Materials*, 56(2) (2011) 409-421.
- [15] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(3) (2017) 464-484.
- [16] E. Ranatowski, Thermal modelling of laser welding Part I: The physical basis of laser welding, *Advances in Materials Science*, 3(1 (3)) (2003) 34-40.
- [17] E. Golchin Bidgoli, M. Moradi, S. Shamsaei,

- aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique, *Materials & Design*, 33 (2012) 436-443
- [29] G. Webster, A. Ezeilo, Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23 (2001) 375-383.
- Razavi, F. Kowsari, Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy, *Optics & Laser Technology*, 59 (2014) 52-59.
- [28] X.-d. Qi, L.-m. Liu, Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061

