

# کمینه‌سازی اعوجاج در اتصال نامتجانس جوشی فولاد کربنی CK4(1.1005) به فولاد زنگ‌نزن AISI409(1.4512) به روش المان محدود

میرجواد میرنجد گرامی<sup>۱\*</sup>، اسلام رنجبر نوده<sup>۲</sup>، مهدی فرچپور<sup>۳</sup>

۱- مربی، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، باشگاه پژوهشگران جوان، تهران، ایران

۳- مربی، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، تهران، ایران

\*jmgerami@alum.sharif.edu

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۴/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۰۷)

## چکیده

در پژوهش حاضر بر اساس یک مدل اجزاء محدود صحه‌گذاری شده، ابتدا تاثیر متغیرهای طول، ضخامت، شدت جریان، تجانس اتصال، توالی و مدت زمان تقید، بر میزان تغییرشکل پسماند در اتصال نامتجانس جوشی بین فولاد کربنی CK4(1.1005) و فولاد زنگ‌نزن AISI409(1.4512) بررسی و سپس میزان اعوجاج جوش در اتصال مذکور با لحاظ کردن زمان تقید، شدت جریان و توالی مورد استفاده، کمینه گردید. نتایج نشان داد که در اتصال نامتجانس مورد بررسی، حداقل اعوجاج پسماند زمانی روی می‌دهد که شدت جریان ۹۵ آمپر، توالی متقارن و زمان تقید در فیکسچر، ۱۲۰ ثانیه مورد استفاده قرار گیرند.

## واژه‌های کلیدی:

اتصال نامتجانس، اعوجاج جوشی، طول جوش، شدت جریان جوشکاری، توالی جوشکاری

## ۱- مقدمه

وسيله فرايندهای جوشکاری ذوبی مانند TIG یا جوشکاری لیزر، آلیاژسازی بین دو فلز پایه و فلز پرکننده (اگر استفاده شود) مسأله قابل توجه و مهمی است. فلز جوش حاصل می‌تواند در حین سرویس دهی بعد اتصال، رفتاری کاملاً متفاوت با یک یا هر دو فلز پایه از خود نشان دهد. بنابراین طراحی متالورژیکی این اتصالات و فرايند جوشکاری فلزات و آلیاژهای نامتجانس امری دشوار و پیچیده است [۲]. تخمین و ارزیابی تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند جوشی همواره از موضوعات مورد توجه

بعد از فرآیند جوشکاری به دلیل توزیع غیریکنواخت دما، تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند در فلز جوشکاری شده توسعه می‌یابند که می‌توانند باعث ایجاد یا تسریع شکست ترد، کاهش عمر خستگی و خوردگی تنش‌ی گردند [۱]. اتصالات غیرهمجنس به اتصالاتی گفته می‌شوند که بین دو ماده با تفاوت عمده خواص شیمیایی یا متالورژیکی برقرار گردد. این اتصال می‌تواند بین دو فلز متفاوت یا اتصال دو فلز همجنس با فلز پرکننده غیرهمجنس برقرار گردد. هنگام اتصال فلزات نامتجانس به

به بررسی تنش‌های پسماند اتصالات هم جنس و غیر هم جنس بین فولادهای ساختمانی با استحکام تسلیم مختلف پرداختند. آنان دریافتند که در اتصالات هم جنس با افزایش تنش تسلیم، حداکثر تنش پسماند افزایش می‌یابد و نیز در اتصالات غیرهمجنس، تنش پسماند فولاد با استحکام بیشتر بالاتر است و این اختلاف با افزایش اختلاف تنش تسلیم فولادهای متصل شونده، افزایش می‌یابد. Nadimi و همکاران [۹] اتصال غیرهمجنس 304L به A36 با فلز پرکننده 309L را شبیه‌سازی نمودند. نتایج آنان نیز نشان داد که توزیع تنش در این اتصالات نامتقارن بوده و در سمت با استحکام بالاتر، بیشتر است. Tsirkas و همکاران [۱۰] تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند جوشی در اتصالات سر به سر به روش لیزر را بررسی نمودند. آنان در آزمایش‌های عملی خود از فولاد کشتی سازی AH36 و جهت شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود و نرم افزار SYSWELD استفاده کردند. از اهم نتایج آنان می‌توان به تاثیر سرعت جوشکاری بر میزان تغییر شکل پسماند جوشکاری اشاره کرد. بررسی نشان داد که با افزایش سه برابری سرعت جوشکاری، تغییر شکل پسماند بیش از ۵ برابر می‌شود.

با توجه به اهمیت تغییر شکل‌های پسماند جوشی و اینکه طبق اطلاع نویسنده‌گان در مورد تأثیر پارامترهای جوشی بر تغییرشکل‌های پسماند اتصالات غیرهمجنس و کمینه‌سازی آن کارشاخصی صورت نگرفته است، بنابراین در پژوهش حاضر بر اساس یک مدل اجزاء محدود صحنه‌گذاری شده [۱۱]، تأثیر پارامترهای طول، ضخامت، تجانس، شدت جریان، توالی و زمان تقید بر تغییر شکل پسماند مورد بررسی قرار گرفت و سپس با توجه به نتایج حاصل میزان تغییر شکل جوشی کمینه گردید.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- جزئیات ریاضی مدل

هندسه مدل، مش مورد استفاده و شرایط مرزی حرارتی و مکانیکی مورد استفاده در شکل شماره (۱) آمده است. ابعاد مورد استفاده در این پژوهش به دو صورت نمونه

محققین بوده است [۳]. بنابراین مدل‌سازی ریاضی و روش‌های عددی مانند FEM جهت پیش‌بینی میدان تنش و کرنشی حین و بعد از جوشکاری به طور عمده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. تنش‌ها و تغییر شکل پسماند جوشی به عوامل مختلفی مانند جنس قطعه کار (خواص ترموفیزیکی و مکانیکی)، هندسه قطعه کار، انرژی جوش (سرعت، ولتاژ و جریان)، ترتیب جوش‌ها (توالی) بستگی دارد. در زمینه بررسی تجربی و شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای جوشکاری بر تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند جوشی تاکنون پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. Teng و همکاران [۴] تأثیر پارامترهای سرعت، اندازه نمونه، مهار خارجی، و پیش گرم را روی تنش پسماند در اتصال جوشی سر به سر فولاد SAE1020 بررسی کردند. آنان جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS استفاده نمودند. به عنوان مثال آنان دریافتند که افزایش طول نمونه باعث کاهش تنش پسماند می‌گردد. Teng و همکاران در پژوهشی دیگر [۵] اثر توالی جوش بر تنش پسماند را مطالعه کردند. آنان با مقایسه سه حالت پیش‌رونده، یک گام به عقب و متقارن دریافتند که روش متقارن به دلیل کاهش نیروهای مهار روی جوش، دارای حداقل تنش پسماند خواهد بود. لازم به ذکر است که بحث شبیه‌سازی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در اتصالات غیرهمجنس نسبت به اتصالات هم جنس، بحث نوپایی است که به برخی پژوهش‌های انجام شده اشاره می‌شود. Katsareas و همکاران [۶] به بررسی تجربی و اجزاء محدود تنش‌های پسماند اتصال جوشی بین فولاد زنگ نزن 316L و کربنی A508 پرداختند. با توجه به اینکه آنان دو لوله را به یکدیگر متصل کرده بودند، بنابراین جهت ساده‌سازی فرایند از مدل ۲ بعدی با تقارن محوری استفاده نمودند. آنان جهت مدل سازی افزایش فلز پرکننده به درز جوش از تکنیک تولد و مرگ المان بهره بردند. Sahin و همکاران [۷] با استفاده از تکنیک اجزاء محدود، تنش‌های پسماند ناشی از اتصال لحیم سخت فولاد به برنج را شبیه‌سازی نمودند. نتایج آنان میزان تنش پسماند بالاتری را در بخش فولادی اتصال نشان داد که دلیل آن تنش تسلیم بالاتر این ماده بود. Lee و همکاران [۸]

میزان انرژی ورودی جوش Q طبق رابطه  $Q = \eta VI$  (V ولتاژ،  $\eta$  راندمان قوس و I شدت جریان) محاسبه و به صورت یک منبع حرارتی گاوسی اعمال شد. معادله اساسی حرارتی مطابق معادله ۱ می‌باشد:

$$K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

گرمای ویژه،  $\rho C$  هدایت حرارتی، K دمای کلونین، T که نرخ تولید حرارت داخلی در واحد حجم (که برای Q دانسیته و مثال حاضر صفر است) می‌باشند. شرایط اولیه، شرایط مرزی و منبع حرارتی گاوسی در معادلات ۲، ۳ و ۴ آمده است.

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty} (27^{\circ}C) \quad (2)$$

$$K \left( N_x \frac{\partial T}{\partial x} + N_y \frac{\partial T}{\partial y} + N_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_s(r) + h(T - T_{\infty}) = 0 \quad (3)$$

$$q_s(r) = \frac{\eta VI}{2\pi r^2} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{r}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

که  $N_x$ ،  $N_y$  و  $N_z$  به ترتیب کسینوس‌های جهتی نرمال‌های مرز بوده و h ضریب همرفت،  $q_s$  شار حرارتی،  $T_{\infty}$  دمای محیط می‌باشند. در معادله ۴، r فاصله از خط مرکز جوش و  $\sigma$  پارامتر توزیع گاوسی است. معادلات مکانیکی مطابق ذیل در دو دسته مورد توجه قرار گرفت:

(الف) معادلات تعادل

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (5)$$

که  $\sigma_{ij,j}$  تنشور تنش و  $b_i$  نیروی حجمی است.

(ب) معادلات پیوستگی برای یک ماده ترموالاستو-پلاستیک

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (6)$$

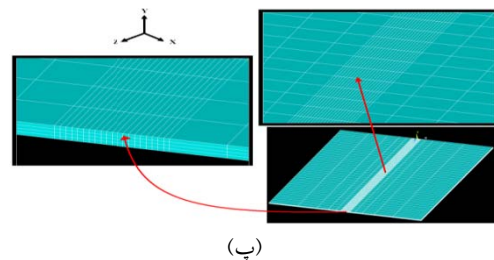
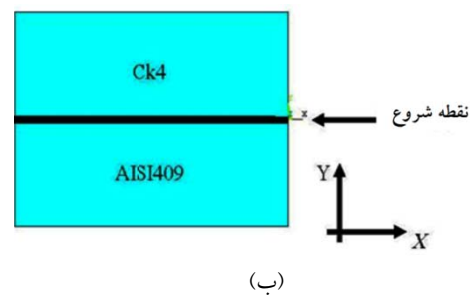
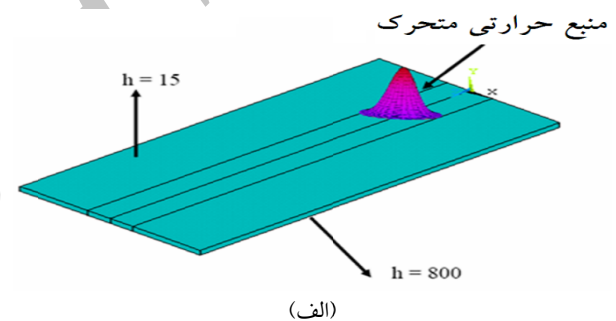
که معیار ماده مورد نظر فون میزر و قانون سخت‌شوندگی همسانگرد دو خطی در نظر گرفته شد. رابطه تنش و کرنش به طبق معادلات ۷ و ۸ می‌باشند:

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \quad (7)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] - [D^p] \quad (8)$$

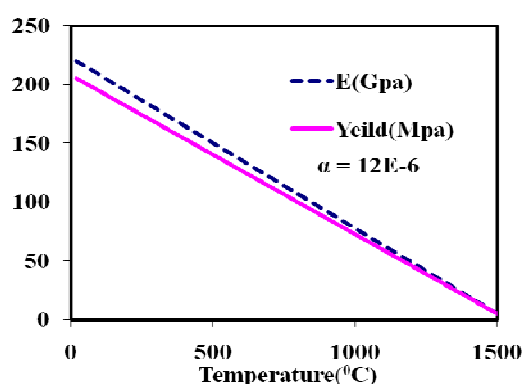
که  $[D^e]$  ماتریس سختی الاستیک،  $[D^p]$  ماتریس سختی پلاستیک و  $[C^{th}]$  ماتریس سختی حرارتی،  $d\varepsilon$  نمو تنش و  $dT$  نمو درجه حرارت است [۵]. از آنجایی که تحلیل ترموالاستوپلاستیک یک مسأله غیرخطی است، محاسبه افزایشی (incremental) مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر، افزایش تنش به وسیله روش نیوتن-رافسون بدست آمد.

بلند:  $2 \times 80 \times 450$  میلی‌متر و نمونه کوتاه  $2 \times 80 \times 225$  میلی‌متر می‌باشد. به دلیل شیب حرارتی شدید در نزدیکی منبع حرارتی، مناطق نزدیک منبع با مش ریز و مناطق دورتر با مش بندی درشت المان بندی شدند. مش مورد استفاده در تحلیل تنش با مش حرارتی یکسان بود. در فرایند شبیه‌سازی از المان‌های مکعبی SOLID70 و SOLID45 به ترتیب جهت تحلیل حرارتی و مکانیکی استفاده گردید. تعداد المان‌ها و گره‌ها در مدل نمونه بلند به ترتیب ۱۱۳۴۰ المان و ۱۴۱۰۵ گره و در نمونه کوتاه ۵۶۷۰ المان و ۷۱۳۰ گره بود. لازم به ذکر است که در تحلیل ۳ بعدی از المان‌های سطحی SURF152 جهت اعمال شار حرارتی و CONTACT52 به عنوان شرایط مرزی مکانیکی مورد استفاده واقع شدند.

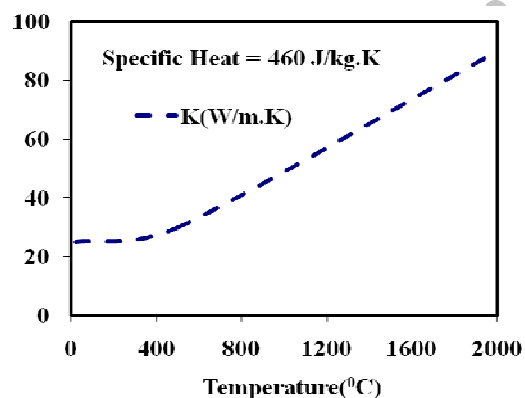


شکل (۱): (الف) هندسه مدل (ب) شرایط مرزی و (پ) و مش بندی.

لازم به ذکر است که از روش کوپل غیرمستقیم در این تحلیل استفاده شد و از پلاستیسیته ناشی از استحاله فازی حالت جامد چشم پوشی شد. سپس تنش‌ها و تغییرشکل‌های پسماند به ازای مقادیر مخالف طول، ضخامت، شدت جریان، توالی، زمان تقید، شبیه‌سازی و با موارد اتصال متجانس مقایسه گردیدند. در نهایت برای نمونه با طول بلند، با توجه به شدت جریان، توالی و زمان ماندگاری در قید، میزان کمینه اعوجاج جوشی بوسیله شبیه‌سازی بدست آمد.



(الف)



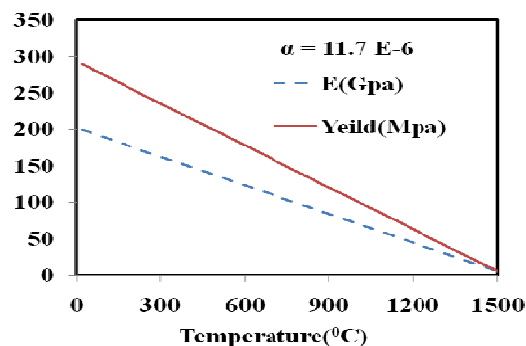
(ب)

شکل (۳): (الف) خواص مکانیکی و (ب) خواص فیزیکی فولاد AISI409(1.4512) [۱۱].

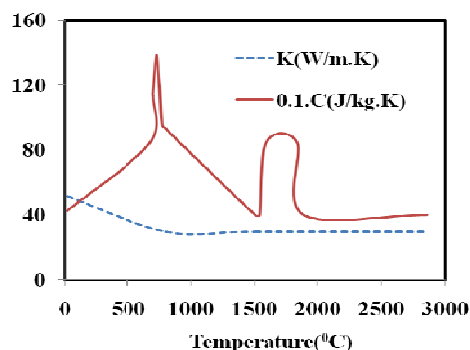
## ۲-۲- صحنه‌گذاری مدل مورد استفاده

صحنه‌گذاری مدل مورد استفاده قبلاً انجام گردیده است و در این پژوهش از نتایج پژوهش [۱۱] استفاده شده است. صرفاً جهت اطلاع، در جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزات پایه

خواص مواد مورد استفاده در اشکال (۲) و (۳) آمده است. برای  $h$  یعنی ضریب همرفت مقادیر متفاوتی از ۵-۲۵ اشاره شده است. اندازه‌گیری دقیق این مقدار بسیار سخت است چرا که تابع پارامترهای زیادی مانند سرعت حرکت سیال و کیفیت سطح است. در مطالعه حاضر این مقدار برابر  $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  فرض شد [۱۲]. پارامتر مهم و تأثیرگذار دیگر، جریان سیال درون حوضچه جوش است که جهت به حساب آوردن آن، ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ نزن بالای نقطه ذوب، در ۳ ضرب گردید [۱۳]. این پدیده در فولاد کربنی چندان مهم نیست [۱۴]. فرایند در مدت زمان  $tw = l/v$  (طول نمونه و  $v$  سرعت جوشکاری) به اضافه مدتی جهت سرد شدن در قید و سپس رسیدن تا دمای محیط، مورد تحلیل حرارتی قرار گرفت. نتایج تحلیل حرارتی به عنوان بار حجمی (body force) به المان‌های مدل مکانیکی اعمال گردید. در حین و بعد از جوشکاری مدل مورد استفاده مقید گردید تا از حرکت جسم صلب جلوگیری شود.



(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) خواص مکانیکی و (ب) خواص فیزیکی فولاد CK4(1.1005) [۱۱].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحنه گذاری مدل مورد استفاده

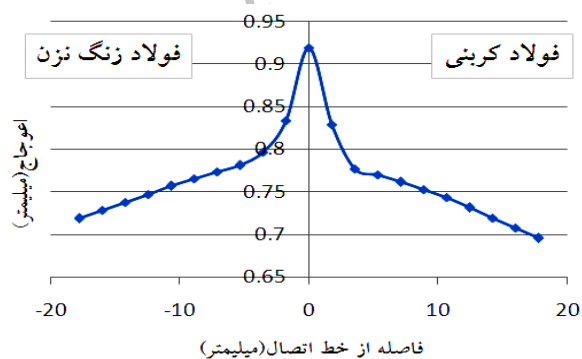
جهت حصول به اطمینان بیشتر از نتایج شبیه‌سازی، علاوه بر نتایج پژوهش [۱۱]، میزان اعوجاج در چند نمونه از اتصالات متجانس و نامتجانس به طور تجربی اندازه‌گیری و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شدند. میزان اعوجاج در ۵ نقطه متفاوت بوسیله ارتفاع سنج رومیزی به دست آمد و حداکثر این مقادیر تجربی، با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه شدند (جدول ۳).

جدول (۳): مقایسه میزان اعوجاجات پسماند تجربی و نتایج شبیه‌سازی

نمونه	حداکثر تاب تجربی (mm)	حداکثر تاب تئوری (mm)
105LPD	۱۸/۵۲	۱۷/۸
120SPD	۴/۱	۴/۴۳
120LPD	۲۴/۵	۲۲

#### ۳-۲- تاثیر هندسه

اولین نکته‌ای که در نتایج شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفت، تاثیر عدم تجانس بر میزان اعوجاج است. در شکل (۴) توزیع میزان اعوجاج بر جابجایی در جهت Y که مهم‌ترین جز جابجایی است، ارائه شده است. همان‌طوریکه در این شکل مشاهده می‌شود، میزان جابجایی برای فولاد زنگ‌نزن بیشتر است. این فولاد به دلیل هدایت حرارت کمتر، دمای بیشتری را حین جوشکاری تجربه می‌کند و به دلیل ضریب انبساط حرارتی بیشتر و تنش تسلیم کمتر، بیشتر دچار اعوجاج می‌گردد.



شکل (۴): توزیع جابجایی در جهت Y نمونه 120SPD در وسط ورق.

مورد استفاده، ارائه شده است. نامگذاری نمونه‌ها بر اساس پارامترهای مورد استفاده در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است که منظور از توالی در جدول (۲) آن است که کل جوش به چه شکل تکمیل می‌شود. این امر می‌تواند به ۳ روش پیشرونده (حرکت از ابتدا تا انتهای ورق)، متقارن (حرکت از وسط به انتها کناره‌های ورق) و یا یک گام به عقب (حرکت از وسط به انتها و سپس از ابتدا به وسط ورق) صورت گیرد. سرعت جوشکاری و ولتاژ در تمام نمونه‌ها به ترتیب ۳.۵۶ میلی‌متر بر ثانیه و ۱۳ ولت و روش جوشکاری مورد استفاده GTAW بود.

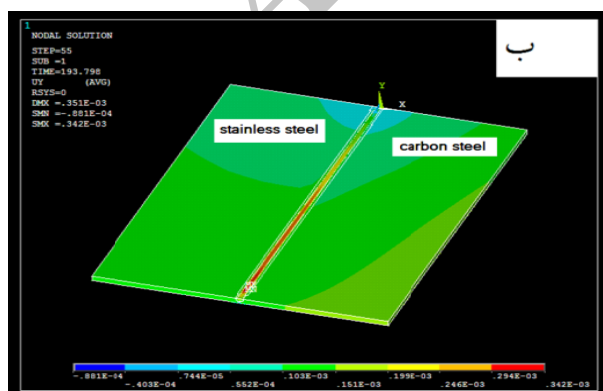
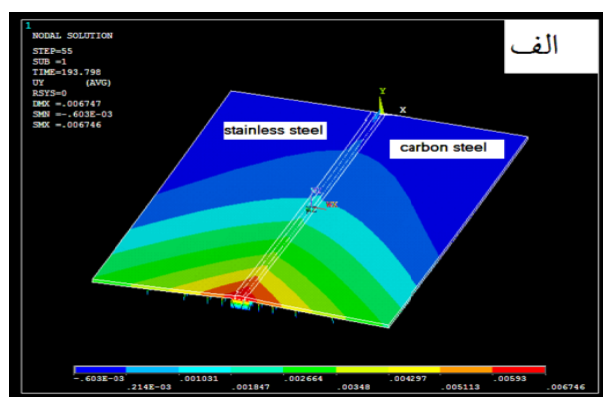
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورد استفاده

فولاد	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti
AISI409(1.4512)	0.015	0.59	0.27	0.13	11.28	0.17
CK4(1.1005)	0.025	0.013	0.19	0.04	0.01	-

جدول (۲): نحوه نامگذاری نمونه‌ها

نوع اتصال	توالی	شدت جریان (آمپر)	ضخامت (میلیمتر)	طول (میلیمتر)	نمونه
نامتجانس	پیشرونده	۱۲۰	۲	۴۵۰	120LPD
نامتجانس	پیشرونده	۱۲۰	۲	۲۲۵	120SPD
نامتجانس	پیشرونده	۱۵۰	۳	۲۲۵	150Thick
نامتجانس	پیشرونده	۱۵۰	۲	۲۲۵	150Thin
نامتجانس	پیشرونده	۱۰۵	۲	۴۵۰	105LPD
نامتجانس	پیشرونده	۱۳۵	۲	۴۵۰	135LPD
نامتجانس	پیشرونده	۹۵	۲	۴۵۰	95LPD
نامتجانس	مقارن	۹۵	۲	۴۵۰	95LSD
متجانس	پیشرونده	۱۲۰	۲	۲۲۵	120SS-SS
متجانس	پیشرونده	۱۲۰	۲	۲۲۵	120CS-CS
نامتجانس	یک گام به عقب	۱۲۰	۲	۲۲۵	120SBD
نامتجانس	مقارن	۱۲۰	۲	۲۲۵	120SSD

نکته بعدی اثر ضخامت ورق بر توزیع تغییر شکل های پسماند جوشی است. جهت بررسی این امر در شدت جریان ۱۵۰ آمپر و سرعت ۳/۵۶ میلی متر بر ثانیه، میزان تغییر شکل شبیه سازی گردید که در شکل (۶) آمده است. با افزایش ضخامت مقدار صلیبیت ورق افزایش می یابد و همین امر سبب می گردد که سازه مقاومت بیشتری به خمش و تغییر شکل از خود نشان دهد و بنابراین مقدار تغییر شکل کاهش یافته است. همان گونه که دیده می شود با افزایش ضخامت از ۲ به ۳ میلی متر، میزان تغییر شکل از ۶/۷ به ۰/۳ میلی متر کاهش یافته است. در ضخامت پایین به دلیل صلیبیت کم، هر دو فولاد اعوجاج تقریباً یکسانی از خود نشان می دهند، اما در ضخامت بالا (۳ میلی متر) اثر تفاوت استحکام تسلیم به خوبی نمایان می شود و فولاد زنگ نزن به دلیل استحکام تسلیم پایین تر، بیشتر دچار اعوجاج می گردد که این امر در شکل (۶) دیده می شود.

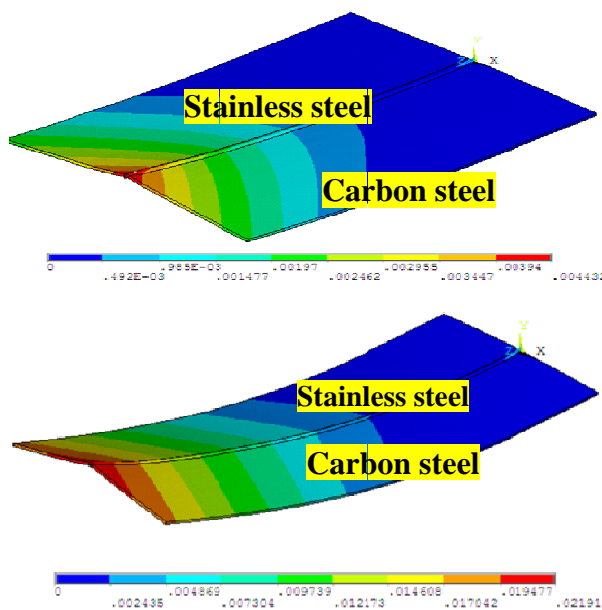


شکل (۶): تأثیر ضخامت بر توزیع تغییر شکل های پسماند: الف) ضخامت ۲ میلی متر، ب) ضخامت ۳ میلی متر.

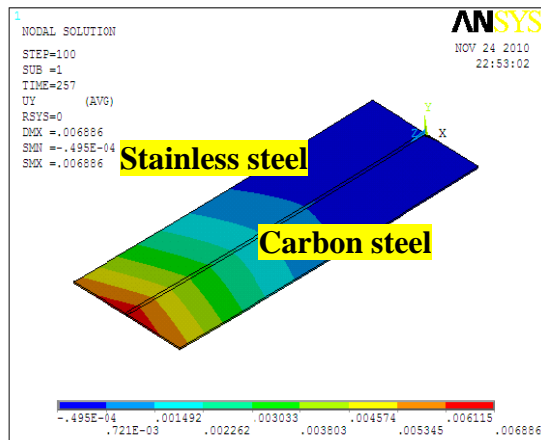
تأثیر طول ورق مورد اتصال، با شبیه سازی تغییر شکل های جوشی در دو طول متفاوت ۲۲۵ و ۴۵۰ میلی متری بررسی گردید، که در شکل (۵) میزان اعوجاج جوشی دو نمونه 120SPD و 120LPD مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می گردد، میزان افزایش اعوجاج ناشی از ۲ برابر شدن طول، بیش از ۵ برابر می باشد. دلیل این پدیده رامی توان در اختلاف صلیبیت این دو سازه جستجو کرد. می توان صلیبیت را معیاری از مشخصات سازه معرفی کرد که مقاومت آن را به خمش و کماتش نشان می دهد. صلیبیت بر خلاف مدول یانگ، یک خاصیت ذاتی ماده نیست بلکه علاوه بر خواص مواد به هندسه آن نیز بستگی دارد. به عنوان مثال اگر المانی تحت کشش یا فشار باشد میزان صلابت آن به صورت معادله ۹ تعریف می شود:

$$K = \frac{AE}{L} = \frac{t \times W \times E}{L} \quad (9)$$

که A سطح مقطع، L طول، E مدول یانگ، t ضخامت و W عرض ورق می باشد. بنابراین وقتی که طول قطعه دو برابر می شود صلیبیت آن نصف می گردد و مطابق شکل (۵) میزان خمش و اعوجاج آن به شدت زیاد می شود که به دلیل افت مقاومت سازه به خمش می باشد.



شکل (۵): تأثیر طول بر میزان تغییر شکل پسماند جوشی: الف) نمونه با طول ۲۲۵ میلی متر، ب) نمونه با طول ۴۵۰ میلی متر.



شکل (۸): تغییر شکل پسماند نمونه 95 LPD.

### ۳-۳- تاثیر شدت جریان

در جدول (۴) میزان حداکثر تغییر شکل پسماند در نمونه های مختلف بر حسب شدت جریان آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش شدت جریان به دلیل افزایش میزان حرارت ورودی، میزان تغییر شکل پسماند افزایش یافته است. بنابراین منطقی است که حداقل اعوجاج در حداقل شدت جریان لازم جهت حصول به نفوذ کامل مشاهده خواهد شد. این حداقل میزان شدت جریان مطابق شکل ۷ حدود ۹۵ آمپر بدست آمد. نتیجه شبیه سازی با این حداقل شدت جریان، نشان داد که می‌توان میزان اعوجاج جوشی را از ۲۳/۷۳ میلی‌متر (برای شدت جریان ۱۳۵ آمپر) تا حدود ۶/۸ میلی‌متر کاهش داد (شکل ۸).

### ۳-۴- تاثیر توالی جوشکاری

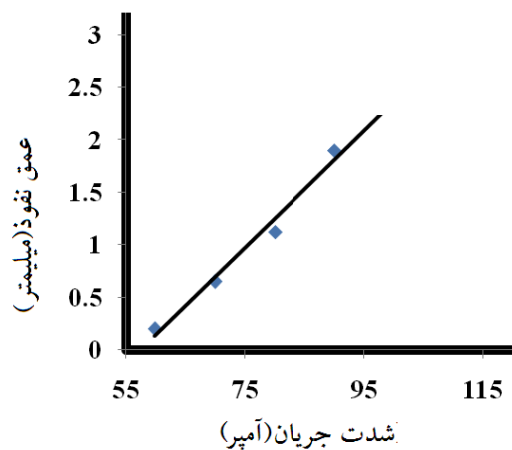
در شکل (۹) تاثیر توالی جوشکاری بر تغییر شکل پسماند جوشی آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود توالی عملیات متقارن دارای حداقل میزان تغییر شکل پسماند است. دلیل این مطلب آن است که در روش متقارن، حرکت منبع حرارتی از وسط قطعه با حداقل درجه آزادی شروع و به سمت نقطه انتهایی یعنی نقطه با حداکثر درجه آزادی پیش می‌رود. لازم به ذکر است که نتیجه بدست آمده در توافق با نتایج سایر محققان می‌باشد [۶ و ۱۵].

### ۳-۵- تاثیر زمان مقید بودن

این متغیر از مواردی است که کمتر مورد توجه در تحقیقات شبیه‌سازی جوش قرار گرفته است. سوال اینجاست که اگر سازه‌ای تحت قید جوشکاری شود، مدت زمان بین اتمام عملیات جوشکاری و قید برداری چه تأثیری روی توزیع تشنه‌ها و تغییر شکل‌های پسماند جوشی خواهد داشت. جهت پاسخ به این سوال، سازه مورد نظر در این مسأله با شدت جریان ۹۵ آمپر و سرعت ۳/۵۶ میلی‌متر بر ثانیه، با زمان‌های مختلف بعد از جوشکاری باربرداری گردید.

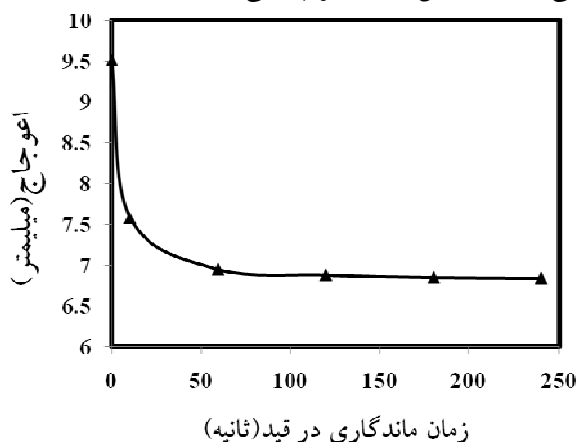
جدول (۴): تاثیر شدت جریان بر حداکثر اعوجاج.

شدت جریان (آمپر)	۱۰۵	۱۲۰	۱۳۵
تاب (میلی‌متر)	۱۷/۸	۲۲	۲۳/۷۳



شکل (۷): رابطه شدت جریان و عمق نفوذ.

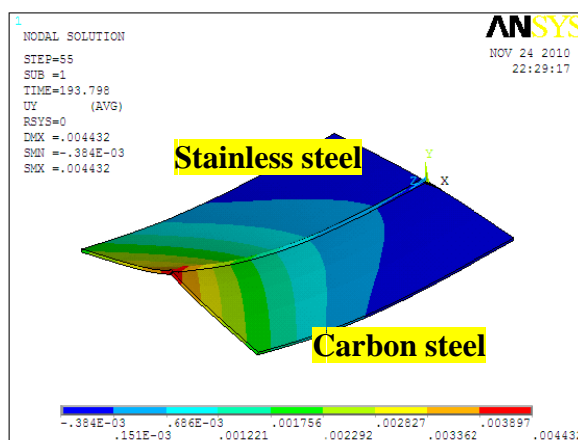
تأثیر این متغیر روی حداکثر میزان تغییر شکل پسماند در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان ماندگاری قطعه در فیکسچر (بعد اتمام فرایند)، میزان تغییر شکل‌های پسماند کاهش می‌یابد، چون آزادی تغییر شکل در قطعه محدود می‌شود. بعد از زمان ۱۲۰ ثانیه تغییر چندانی روی نمی‌دهد که علت آن این است که قطعه جوشکاری‌شونده آنقدر سرد شده است که افزایش زمان ماندگاری تغییر چندانی در توزیع دما و در نتیجه تغییر شکل آن ندارد. البته در این مورد به نظر می‌رسد که جنس قطعه تأثیر چندانی نداشته است.



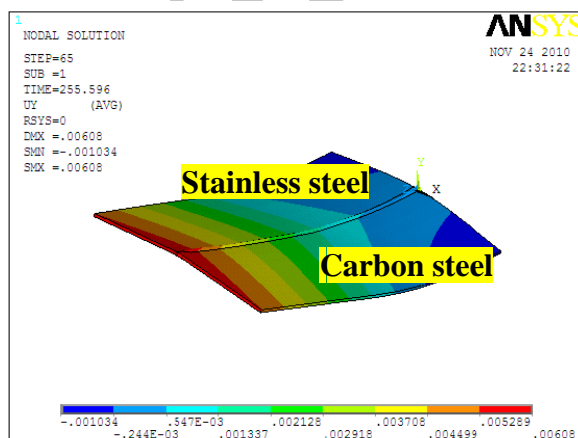
شکل (۱۰): تأثیر زمان ماندگاری در قید بر تنش‌ها و تغییر شکل‌های پسماند.

### ۳-۶- مقایسه اتصالات متجانس و نامتجانس

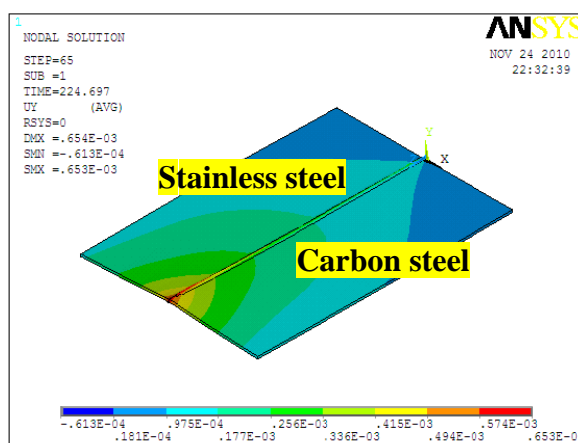
در شکل (۱۱) میزان تغییر شکل پسماند اتصال نامتجانس با اتصال متجانس فولاد زنگ‌نزن به خود مقایسه شده است. این اشکال نشان می‌دهند که اتصال هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن دچار میزان بیشتری، اعوجاج می‌گردد. دو دلیل می‌تواند دلیل این مساله باشد: نخست آنکه به دلیل حذف فولاد کربنی در اتصال هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن، اثر فروکش حرارتی بوسیله فولاد کربنی حذف می‌شود و در نتیجه این اتصال دمای بالاتری را در مقایسه با اتصال نامتجانس تجربه می‌کند و نکته دوم اینکه فولاد زنگ‌نزن تنش تسلیم کمتری دارد، بنابراین تحت یک دمای ثابت، کرنش بیشتری خواهد داشت.



(الف)



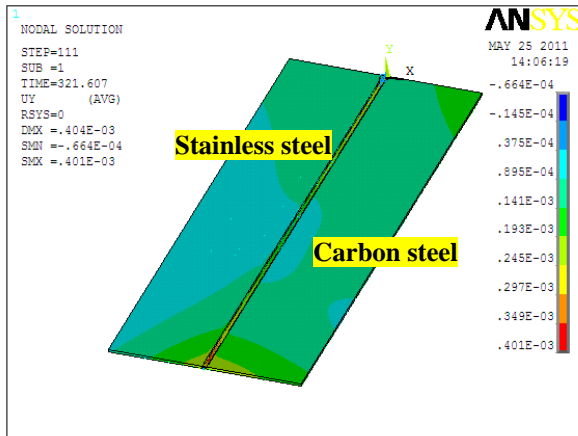
(ب)



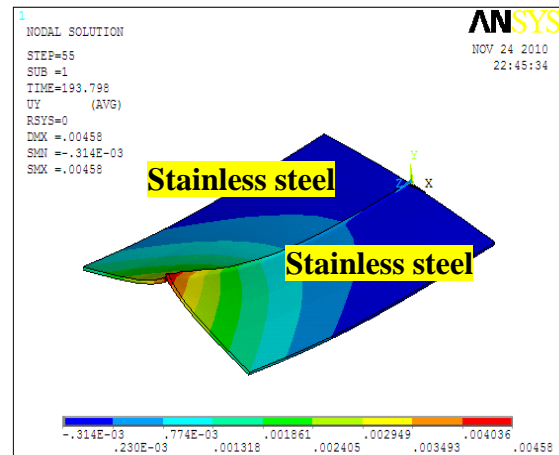
(ج)

شکل (۹): تأثیر توالی بر تغییر شکل‌های پسماند جوشی: الف) پیش‌رونده، ب) یک گام به عقب و ج) مقارن.

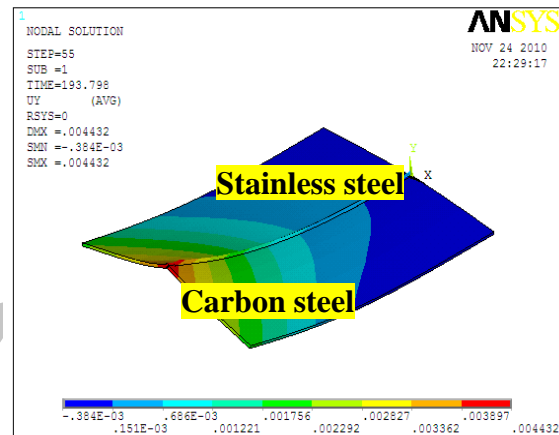




شکل (۱۲): تغییر شکل پسماند نمونه 95 LSD.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): مقایسه میزان تغییر شکل پسماند اتصالات متجانس: (الف) اتصال نامتجانس فولاد زنگ‌نزن و (ب) اتصال نامتجانس.

### ۳-۷- کمینه‌سازی اعوجاج

با توجه به نتایج به دست آمده از تاثیر شدت جریان، توالی و مدت زمان ماندگاری در قید، میزان اعوجاج جوشی در نمونه بزرگ به طول ۴۵۰ میلی‌متر برای حالت بهینه (نمونه 95LSD) شبیه‌سازی گردید تا حداقل تاب جوشکاری به دست آید. نتیجه این شبیه‌سازی در شکل (۱۲) آمده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود با استفاده از متغیرهای بهینه میزان اعوجاج جوشی از بیش از ۲۳ میلیمتر برای نمونه 135LPD به حدود ۰/۴ میلی‌متر قابل کاهش است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر متغیرهای اساسی جوشکاری بر میزان اعوجاج ناشی از جوشکاری نامتجانس بین فولاد ساده کربنی (CK4(1.1005 و AISI409(1.4512 به روش اجزاء بررسی شد

و نتایج زیر به دست آمد:

۱- با افزایش طول و کاهش ضخامت، به دلیل افت صلیبیت سازه، میزان تغییر شکل پسماند جوشی افزایش می‌یابد.

۲- افزایش شدت جریان به دلیل افزایش میزان حرارت ورودی، سبب افزایش میزان تغییر شکل پسماند می‌شود.

۳- به دلیل هدایت حرارتی کمتر، ضریب انبساط حرارتی بیشتر و تنش تسلیم پایین‌تر، فولاد زنگ‌نزن میزان تغییر شکل پسماند بیشتری نسبت به فولاد کربنی دارد.

۴- توالی عملیات متقارن به دلیل حرکت به سمت نقطه انتهایی یعنی نقطه با حداکثر درجه آزادی دارای حداقل میزان تغییر شکل پسماند است.

۶- با افزایش زمان تقید، ابتدا تغییر شکل کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند.

۷- اعوجاج در اتصال هم جنس فولاد زنگ‌نزن به دلیل تنش تسلیم پایین، میزان بیشتری اعوجاج پسماند نسبت به اتصال نامتجانس مشاهده می‌گردد.

۸- حالت کمینه اعوجاج جوشی در نمونه بلند اتصال نامتجانس

- [8] Lee C, Chang K, "Numerical Analysis of Residual Stresses in welds of Similar or Dissimilar Steel Weldments under Superimposed Tensile Loads", Computational Materials Science, Vol. 40, pp. 548-556, 2007.
- [9] S. Nadimi, R.J. Khoushhehmehr, B. Rohani, and A. Mostafapour, "Investigation and Analysis of Weld Induced Residual Stresses in Two Dissimilar Pipes by Finite Element Method", Journal of Applied Sciences, Vol.8, pp.1014-1020, 2008.
- [10] S.A.Tsirkas, P.Papanikos, and Th.Kermanidis, "Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-Joint Specimens", Journal of Materials Processing Technology, Vol.134, pp.59-69, 2003.
- [11] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, and A. Fisher, "Effect of Welding Parameters on Residual Stresses in Dissimilar Joint of Stainless Steel to Carbon Steel", Journal of Materials Science, Vol.46, pp.3225-3232, 2011.
- [12] M. Abid, and M. Siddique, "Numerical Simulation to Study the Effect of Tack Welds and Root Gap on Welding Deformations and Residual Stresses of a Pipe-Flange Joint", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.82, pp.860-87, 2005.
- [13] B. Taljat, B. Radhakrishnan, and B. Zacharia, "Numerical Analysis of GTA Welding Process with Emphasis on Post-Solidification Phase Transformation Effects on Residual Stresses", Materials Science and Engineering A, Vol.246, pp.45-54, 1998.
- [14] A. De, and T. DebRoy, "A Smart Model to Estimate Effective Thermal Conductivity and Viscosity in the Weld Pool", Journal of Applied Physics, Vol.95, pp.5230-5239, 2004.
- [15] L.Gannon, Y.Liu, N.Pegg, and M.Smith, "Effect of Welding Sequence on Residual Stress and Distortion in Flat-Bar Stiffened Plates", Marine Structures, Vol.23, pp.385-404, 2010.

با استفاده از توالی متقارن، زمان تقید ۱۲۰ ثانیه و شدت جریان ۹۵ آمپر به دست می آید.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند که از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قیامدشت، به خاطر فراهم آوردن کلیه امکانات انجام این تحقیق، تشکر کنند.

## ۶- مراجع

- [1] Kou S, "Welding Metallurgy", John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- [2] AWS Welding Handbook, Vol.4, Ch12, 1997.
- [3] Cullity B.D, "Elements of X-ray Diffraction", Addison-Wesley, 1956.
- [4] T. Teng, and C. Lin, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.75, pp.857-864, 1998.
- [5] T. Teng T, T. Chang, and W. Tseng, "Effect of Welding Sequences on Residual Stresses", Computers and Structures, Vol.81, pp.273-286, 2003.
- [6] D.E.Katsareas, A.G. Yostous, "Residual Stress Prediction in Dissimilar Metal Weld Pipe Joints Using the Finite Element Method", Material Science Forum, Vol. 490-491, pp. 53-61, 2005.
- [7] S. Sahin, M. Toparli, L. Ozdemir, and S. Sasaki, "Modeled and Measured Residual Stresses in a Bimaterial Joint", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, pp. 235-241, 2003.