



انجمن جوشکاری آزمایشهای غیرمخرب ایران

دوازدهمین کنفرانس ملی جوش و بازاری

اصفهان - ۷ و ۶ دی ماه ۱۳۹۰

## تأثیرات (نامطلوب) جوش ترمیمی بر استحکام و میدان تنشهای پسماند خطوط لوله انتقال نفت و گاز

صادق ارنواز یامچی<sup>۱</sup>، مصطفی زین الدینی<sup>۲</sup>، سیامک کاظم بخشی<sup>۳</sup>  
<sup>۱،۲</sup> دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی  
<sup>۳</sup> شرکت مهندسی و ساخت تاسیسات دریایی

### چکیده

موضوعات مرتبط با استحکام و دوام سازه‌هایی مانند سکوها و فراساحلی، پایانه‌های نفتی یا لوله‌های انتقال در دریا از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به ویژگی‌های خاص این سازه‌ها از جمله در طراحی، اجرا و نصب و نگهداری آنها و همچنین انواع بارهای وارده، همواره امکان آسیب دیدگی در آنها وجود خواهد داشت. انجام جوش ترمیمی یکی از راه‌های بسیار موثر و رایج برای رفع نقایص ناشی از این آسیب‌ها و ارتقای مقاومت، عمر و استحکام آنها می‌باشد. در این مطالعه ساخت مدل عددی مناسب و تحلیل درگیر مکانیکی حرارتی اجزای محدود برای شبیه سازی فرایند جوش ترمیمی در نرم-افزار ABAQUS صورت پذیرفته است. از نتایج تحلیل‌ها مشخص می‌شود که جوش ترمیمی در نحوه توزیع و مقادیر تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی اعضای سازه‌های فراساحلی بویژه اتصالات خطوط لوله انتقال نفت و گاز دارای تأثیرات متنوعی است که خود منجر به تغییرات پیش‌بینی نشده در استحکام این اتصالات خواهد شد.

**کلمات کلیدی:** جوش ترمیمی، تنش پسماند، استحکام، خطوط لوله.

<sup>1</sup> [Sadegh\\_Arnavez@yahoo.com](mailto:Sadegh_Arnavez@yahoo.com)

<sup>2</sup> [Zenoddini@kntu.ac.ir](mailto:Zenoddini@kntu.ac.ir)

<sup>3</sup> [Siamak.kazembakhshi@gmail.com](mailto:Siamak.kazembakhshi@gmail.com)

## مقدمه

اقتصاد کشور ما به نحو گسترده‌ای با صنعت نفت و استحصال مخازن هیدروکربوری پیوند خورده است. ایران با حدود ۸/۱۹ تریلیون متر مکعب مخازن شناخته شده گاز، رتبه دوم را در سطح جهان داراست و با حدود ۷/۱۲ میلیارد تن تقریباً ۱۲ درصد مخازن شناخته شده نفت خام را در اختیار دارد [۱]. تاکنون عمده برداشت از منابع خشکی انجام پذیرفته است. به دلیل محدود بودن منابع خشکی مدتهاست که چشم‌ها به مخازن دریایی دوخته شده است. در سال ۱۹۸۸ سهم سکوه‌های دریایی در تولید نفت ۹٪ مصرف جهانی و در سال ۲۰۰۸ معادل ۳۲٪ تخمین زده می‌شود [۲]. این ارقام نمایانگر رشد روزافزون سهم سکوه‌های دریایی در تولید نفت و گاز می‌باشند. لذا موضوعات مرتبط با استحکام و دوام این سازه‌ها و خطوط لوله‌ای که نفت و گاز استحصال شده از آنها را به نقاط مختلف انتقال می‌دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. جوش ترمیمی یکی از روش‌های رایج برای رفع نقایص ناشی از آسیب‌ها و ارتقای مقاومت، عمر و استحکام آنها می‌باشد. لیکن بررسی‌ها نشان می‌دهد که جوش ترمیمی متأسفانه و عموماً آثار مهم و نامطلوبی را بر میدان تنش‌های پسماند و استحکام آنها بر جا خواهد گذاشت [۳]. جوش ترمیمی می‌تواند به افت در مشخصات مکانیکی مصالح فولادی، تغییر در ریزساختار مواد در ناحیه حرارت‌دیده (HAZ)<sup>۴</sup>، ایجاد تابیدگی و اعوجاج در قطعه و باز توزیع تنش‌های پسماند در عضو جوش شده، منجر شود [۴]. پیش از این روش‌های مدل‌سازی متعددی برای مدل‌سازی فرایند جوشکاری بکار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها مبنی بر ارزیابی نیم‌رخ حرارتی گذرا<sup>۵</sup> در حین فرایند جوشکاری بر اساس رابطه منبع حرارتی بیضوی مضاعف است [۵ و ۶]. روش تولد المان<sup>۶</sup>، روشی است که برای شبیه‌سازی انباشت فلز جوش حین فرایند جوشکاری بسط داده شده است [۷]. در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی جوش‌های اصلی و ترمیمی همان روش تولد المان در یک مدل سه بعدی کامل به کار گرفته شده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای این منظور ABAQUS که یک نرم‌افزار تجاری استاندارد بوده و در مطالعات اخیر توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه و مقادیر بارگذاری حرارتی برای جوش اصلی از مطالعه انجام شده در یکی از مراجع [۸] جهت صحت سنجی اقتباس می‌شود.

## روش تحقیق

در این مطالعه منبع حرارتی متحرک به صورت یک شار حرارتی دایروی شکل متغیر در زمان، وارد بر سطح فوقانی پلیت که در راستای عرضی آن حرکت می‌کند، مدل‌سازی می‌گردد. برای این منظور در نرم‌افزار مذکور، از یک زیربرنامه<sup>۸</sup> الحاقی با عنوان DFLUX [۹] تحت زبان FORTRAN که بتواند شار

<sup>4</sup> Heat Affected Zone

<sup>5</sup> Transient Temperature Profile

<sup>6</sup> Double Ellipsoidal Heat Source

<sup>7</sup> Element Birth Technique

<sup>8</sup> Subroutine

حرارتی عبوری از هر نقطه را در زمانی خاص محاسبه نماید، استفاده شده است. مقادیر این شار از رابطه (۱) تعیین می شود.

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi r_0^2} e^{-3\left(\frac{r}{r_0}\right)^2} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه فوق در جدول (۱) معرفی شده است. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، برای نقاطی که  $r$  از  $r_0$  کوچکتر باشد، مقدار شار از رابطه (۱) محاسبه شده و در سایر نقاط برابر صفر فرض شده است. فرض بر آن است که اتلاف انرژی حرارتی از طریق تابش و همرفت با محیط اطراف از تمامی سطوح پلیت صورت می گیرد. بر این اساس مقدار انرژی حرارتی تلف شده از رابطه (۲) قابل محاسبه می باشد.

$$q = h_{\text{convection}}(T_i - T_a) + \varepsilon_{\text{em}} \sigma_{\text{bol}}(T_i^4 - T_a^4) \quad (2)$$

پارامترهای رابطه فوق در جدول (۲) معرفی شده است. بدین منظور زیربرنامه دیگری با عنوان FILM [۹] در ادامه زیربرنامه DFLUX، جهت محاسبه مقادیر اتلاف انرژی حرارتی استفاده شده است.

مدل شماره ۱ برای صحت سنجی زیربرنامه های مذکور و همچنین استفاده از روش تولد المان تهیه شده است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در این مدل هر صفحه دارای طول ۱۰۰ میلی متر (در راستای x) و عرض ۵۰ میلی متر (در راستای y) و ضخامت ۵ میلی متر می باشد که فرض شده با یک پاس به صورت نفوذی به یکدیگر متصل می شوند. مشخصات مصالح پلیت در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به تقارن می توان فقط یکی از این پلیت ها را مدل سازی کرد. لذا می بایست، مقدار شار حرارتی گذرا از صفحه تقارن برابر صفر و جابجایی در راستای y نیز برای صفحه مذکور برابر صفر در نظر گرفته شود. پارامترهای جوشکاری برای این مدل مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده در نرم افزار، المان ۸ گرهی Brick با خاصیت تحلیل های درگیر حرارتی - جابجایی<sup>۹</sup> است. در حقیقت این مدل می بایست فرایند جوشکاری در خط لوله با طول زیاد را که در نقاط دورتر نسبت به خط جوش امکان جابجایی بسیار اندک فاقد هرگونه چرخش حول محورهای مختصات را دارا می باشد، شبیه سازی نماید. لذا برای تعادل سازه ای مدل محاسباتی، شرایط تکیه گاهی بدین صورت تعریف شده که در آن درجات آزادی نقطه شماره ۱ در دو راستای x و z و برای نقطه شماره ۲ در راستای z بسته شده اند. موقعیت این نقاط در شکل (۲) مشاهده می شود. علاوه بر این، با تعریف یک نوع معادله سازگاری در نرم افزار، جابجایی تمامی گره های صفحه دور نیز با یکدیگر مساوی فرض می شوند.

روش تولد المان برای شبیه سازی انباشت فلز جوش بر مبنای غیر فعال و سپس فعال کردن مرحله به مرحله المان ها می باشد. المان هایی که در محدوده حوضچه جوش قرار می گیرند، با ابعاد یکسانی گروه بندی شده اند. در ابتدای تحلیل همه گروه ها غیر فعال می باشند. سپس گروه ها با شروع حرکت منبع حرارتی متحرک یک به یک فعال می شوند. گره های این المان ها به محض فعال شدن دمایی بالاتر از

دمای ذوب را تجربه می‌کنند. در شکل (۳) نمایی از مراحل مختلف تحلیل به روش تولد المان نشان داده شده است. پس از فعال شدن همه گروه‌ها و پایان عبور منبع حرارتی متحرک از روی آنها، یک گام دیگر جهت شبیه‌سازی مرحله خنک شدن با زمان فرضی ۴۰ دقیقه اضافه می‌شود. در پایان تحلیل در گام نهایی تمامی قيود تکیه‌گاهی صفحه دوردست برداشته شده تا بتوان مقادیر تنش‌های پسماند را کنترل نمود. علاوه بر مدل مربوط به صحت سنجی، مدل‌های دیگری برای مطالعه حاضر که جوش ترمیمی در آنها شبیه‌سازی خواهد شد، شامل ۴ مدل هستند که بسته به طول و عمق ترمیم مطابق جدول (۵) طبقه‌بندی می‌شوند. نمایی شماتیک از این مدل‌ها در شکل (۴) مشاهده می‌شود. در این مدل‌ها، پس از گام مربوط به خنک شدن در مدل شماره ۱، همه و یا تعدادی از گروه‌های تعریف شده برای حوضچه جوش، بسته به مقادیر ترمیم، مجدداً غیرفعال می‌شوند. سپس گروه‌های حوضچه جوش به ترتیب برای شبیه‌سازی ترمیم مجدداً فعال می‌شوند. برای جوش ترمیمی نیز جهت سهولت در مدل‌سازی همان مشخصات جوش اصلی در نظر گرفته شده است.

#### نتایج و بحث

شکل (۵) مقایسه تاریخچه حرارتی دو نقطه نشانه<sup>۱۰</sup> فوقانی و تحتانی را نشان می‌دهد. اختلاف ناچیز در مقادیر درجه حرارت منتج از این مطالعه و نتایج مرجع مذکور، به علت عدم مشخص کردن دقیق موقعیت نقاط نشانه در آن مرجع می‌باشد. لیکن مقادیر تنش طولی در راستای عرضی (در راستای محور  $y$ ) واقع بر خط ذوب<sup>۱۱</sup> نشان داده شده در شکل (۶) دارای انطباق قابل قبول جهت تصدیق روش مدل‌سازی می‌باشد.

در اشکال (۷) و (۸) مقادیر تنش‌های پسماند طولی و عرضی در طول خط ذوب ارائه شده است. همچنین در اشکال (۹) و (۱۰) تنش‌های طولی و عرضی در طول خط جوش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. توزیع و مقادیر این تنش‌ها روی این دو خط به علت نزدیک بودن آنها دارای مشابهت زیادی می‌باشند. مقدار تنش طولی به علت عدم وجود قيود تکیه‌گاهی در طرفین پلیت تقریباً برابر صفر بوده در حالیکه تنش عرضی فشاری در لبه‌های پلیت و کششی در میانه آن مشاهده می‌شود. با توجه به شکل منحنی‌ها، تنش عرضی تقریباً دارای حالت خود متعادلی است. حجم ترمیم در تغییرات تنش طولی نسبت به تنش عرضی تأثیر بیشتری را از خود نشان داده است. به قسمی که تنش طولی در مدل ۳ نسبت به مدل ۱، در برخی نقاط بیش از ۱۰٪ افزایش داشته است. موقعیت ترمیم نیز می‌تواند در توزیع تنش‌ها تأثیر داشته باشد، ولی این آثار قابل ملاحظه نیست. پیچیدگی نتایج در مدل‌هایی که دارای مقادیر ترمیم‌های موضعی هستند بیشتر از مدل‌هایی است که دارای ترمیم در کل طول آنها است. در اشکال (۱۱) و (۱۲) تنش‌های طولی و عرضی به ترتیب در صفحه میانی نسبت به فاصله از خط جوش مشاهده می‌شود. روی این صفحه

<sup>10</sup> Monitoring Point

<sup>11</sup> Fusion line

تنش‌های طولی بر خلاف تنش‌های عرضی خود متعادل است. تغییرات در نقاط نزدیک به موقعیت جوش و ترمیم بیشتر بوده و با دور شدن از خط جوش از میزان آنها کاسته می‌شود.

### نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان اشاره کرد که جوش ترمیمی تأثیرات متنوعی در مقادیر و توزیع تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی دارد. به طوریکه در این اتصالات ناشی از جوشکاری و ترمیم تنش‌های کششی و فشاری با مقادیر بزرگی وجود خواهد داشت که استحکام آنها را به صورت پیش‌بینی نشده تغییر خواهد داد. همچنین با افزایش حجم ترمیم، تنوع این تأثیرات افزایش پیدا می‌کند. لذا اکیداً توصیه می‌شود، استفاده از جوش ترمیمی در سازه‌هایی که تحت بارهای تناوبی قرار می‌گیرند و خرابی در آنها آثار سو و جبران ناپذیری خواهد داشت، با انجام تحلیل‌های مناسب حرارتی-مکانیکی همراه باشد.

### مراجع

- [1] مصطفی زین‌الدینی، "طراحی و اجرای سکوه‌های ثابت نفتی"، چاپ اول ۱۳۸۴، ESDEP پروژه اروپائی آموزش دانشگاهی طرح فولاد، چاپ مرکز اقیانوس‌شناسی
- [2] مصطفی زین‌الدینی، "مبانی طراحی سکوه‌های شناور نفتی"، ۱۳۸۷، دانشگاه خواجه نصیر طوسی
- [3] Leggett R.H., "Residual Stresses in Welded Structures", International Journal of Pressure Vessels and Piping 85, 2008, pp. 144–151.
- [4] Vega O.E, J.M. Hallen, A. Villagomez, A. Contreras. "Effect of Multiple Repairs in Girth Welds of Pipelines on the Mechanical Properties", Materials Characterization 59, 2008, pp. 1498 – 1507.
- [5] Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M., "A new finite element model for welding heat sources", Metall. Trans. B. 15B, 1984, pp. 299–305.
- [6] Nguyen, N. T., Ohta, A., Matsuoka, K., Suzuki, N., and Maeda, Y., "Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources," Weld. J., Aug. 1999, pp. 265–274.
- [7] Dong, P., "Residual Stress Analyses Multi-Pass Birth Weld: 3-D Special Shell versus Axisymmetric Models," ASME J. Pressure Vessel Technol., 123, May2001, pp. 207–213.
- [8] Fanous, I.F.Z., Younan, M.Y.A., Wifi, A.S., "3-D Finite Element Modeling of the Welding Process Using Element Birth and Element Movement Techniques", ASME Pressure Vessels and Piping Conf., Vancouver, BC, Canada, 2002, pp. 165-172
- [9] Fanous, I. F. Z., "3D Modeling of the Welding Process Using Finite Elements," M.Sc. thesis, The American University in Cairo, February 2002.

## جداول و شکل ها

جدول (۱) معرفی پارامترهای موجود در رابطه (۱)

پارامتر	تعریف	مقدار
Q	کل انرژی حرارتی ورودی	
r	فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز منبع حرارتی متحرک	$\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2}$
r <sub>b</sub>	شعاع ناحیه‌ای که کل انرژی حرارتی ورودی برابر ۹۵٪ مقدار واقعی است.	5 mm
x <sub>h</sub>	موقعیت منبع حرارتی متحرک نسبت به مبدأ	(t - t <sub>0</sub> )v
t <sub>0</sub>	زمان لازم برای رسیدن مرکز منبع حرارتی به اولین گره در مدل	$t_0 = \frac{r_b^2}{v} = 5$
t	زمان	-

جدول (۲) معرفی پارامترهای موجود در رابطه (۲)

پارامتر	تعریف	مقدار
$h_{convection}$	ضریب همرفت	8 W/m <sup>2</sup> °C
$\epsilon_{sur}$	ضریب تشعشع	0.5
$\alpha_{sur}$	ضریب استفان-بولتزمان	5.6693x10 <sup>28</sup> W/m <sup>2</sup> K
T <sub>1</sub>	دمای نقطه یا سطح مورد نظر	-
T <sub>2</sub>	دمای محیط	-

جدول (۳) مشخصات مصالح مورد استفاده اقتباس شده از مرجع [۸]

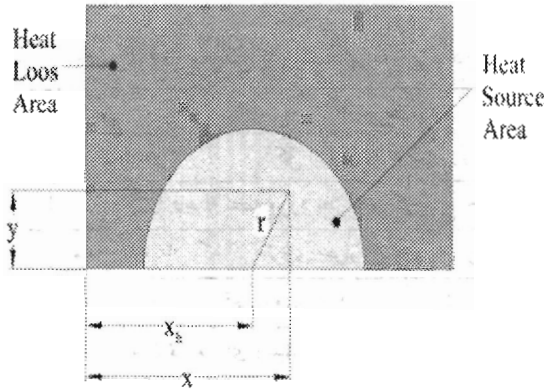
Parameter	Unit	Temp.			
		20	1550	1650	2000
Young's modulus	GPa	200	0.2	2x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>
Poisson ratio	-	0.25	0.25	0.25	0.25
Yield strength	MPa	290	1	0.01	0.01
Yield strength at strain	MPa	314	1	0.01	0.01
Thermal expansion	1/°Cx10 <sup>-6</sup>	10	15	15	15
Thermal conductivity	W/m.°C	50	30	30	30
Specific heat	J/kg.°C	450	400	400	400
Latent heat	J/kg	260,000			

جدول (۴) پارامترهای جوشکاری برای مدل ۱ اقتباس شده از مرجع [۸]

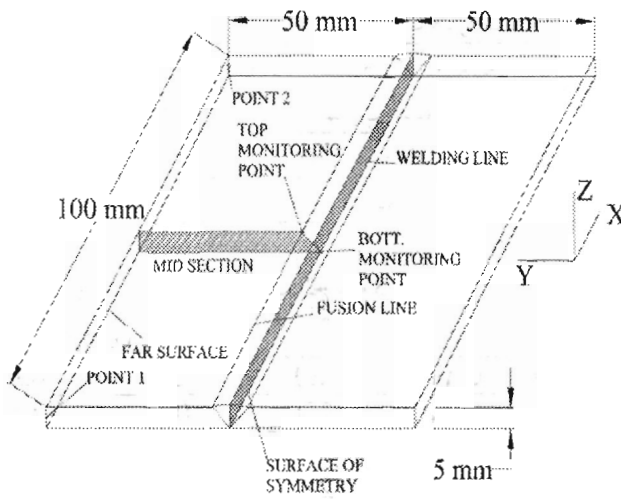
سرعت جوشکاری (v)	آمپراژ (I)	ولتاژ (V)	ضریب بازده (η)
1 mm/sec	30 amps.	24 v.	0.9

جدول (۵) مشخصات مدل‌های تهیه شده در مطالعه حاضر از نظر طول و عمق ترمیم

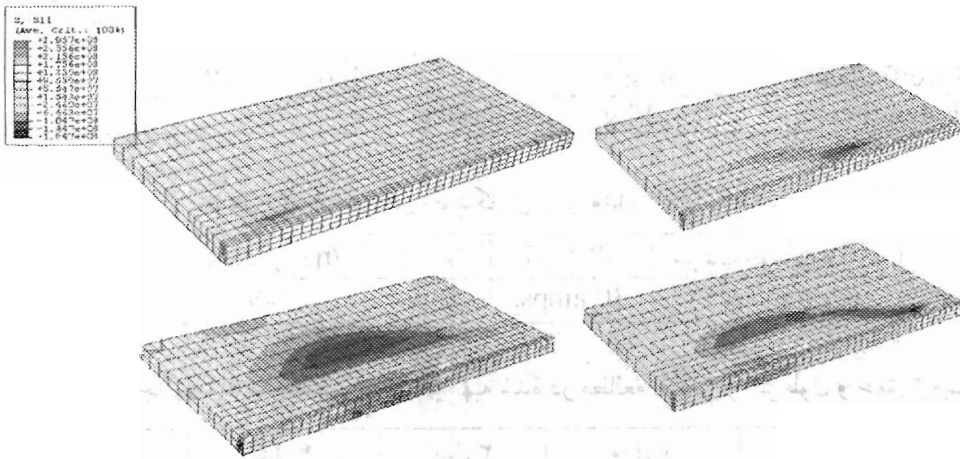
	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵
طول ترمیم	بدون ترمیم	کل طول	نصف طول	کل طول	نصف طول
عمق ترمیم		کل ضخامت	کل ضخامت	نصف ضخامت	نصف ضخامت



شکل (۱) نمایش شماتیک موقعیت منبع حرارتی متحرک [۸]

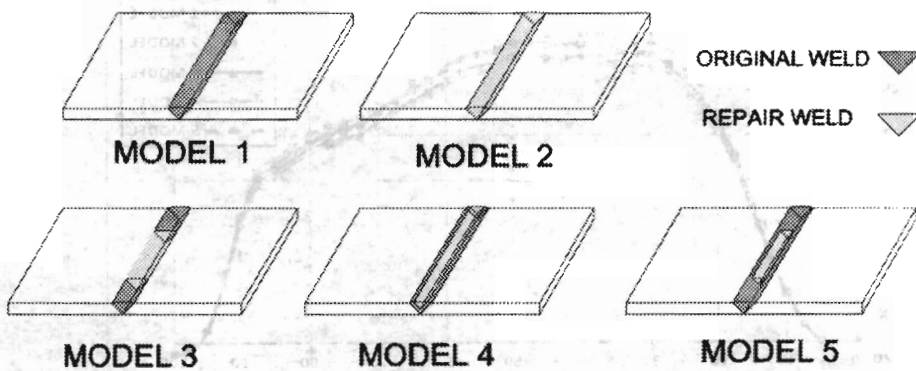


شکل (۲) هندسه پلیت مورد مطالعه

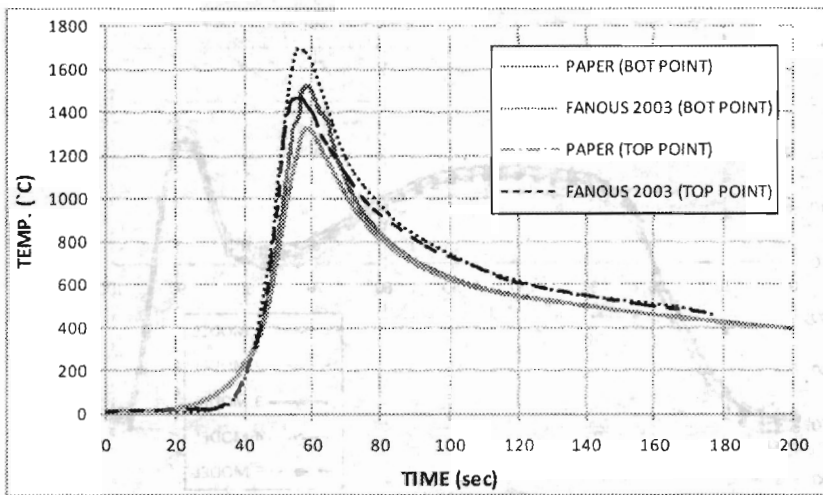


شکل (۳) نمایی از توزیع مقادیر تنش طولی در مراحل ۱، ۴، ۸ و ۱۱ از تحلیل پلیت مورد مطالعه

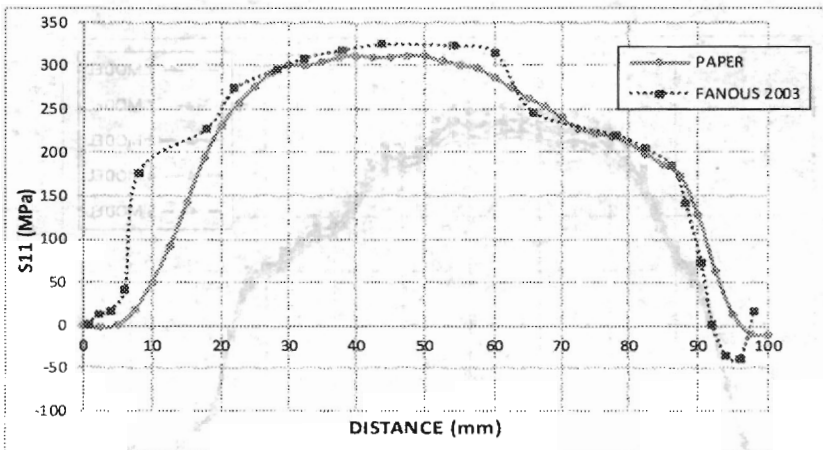




شکل (۴) مدل‌های مربوط به جوش ترمیمی و موقعیت ترمیم در آنها

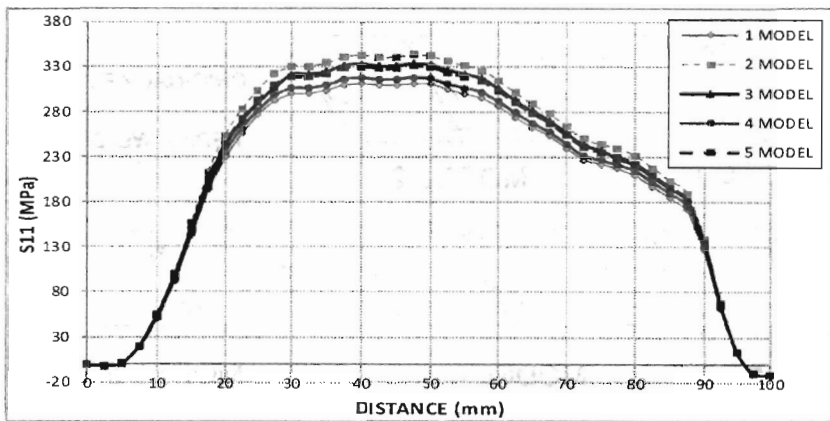


شکل (۵) تاریخچه حرارتی نقاط نشانه و مقایسه با نتایج موجود در مرجع [۸]

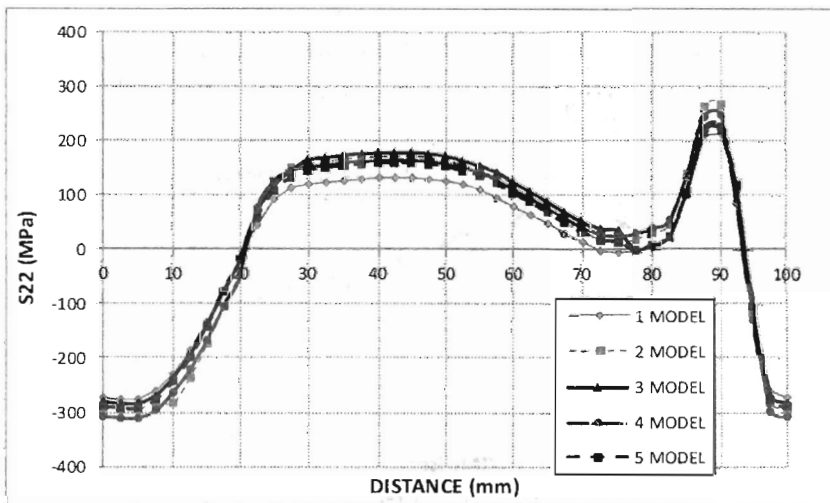


شکل (۶) تغییرات تنش طولی در طول خط ذوب و مقایسه با نتایج موجود در مرجع [۸]

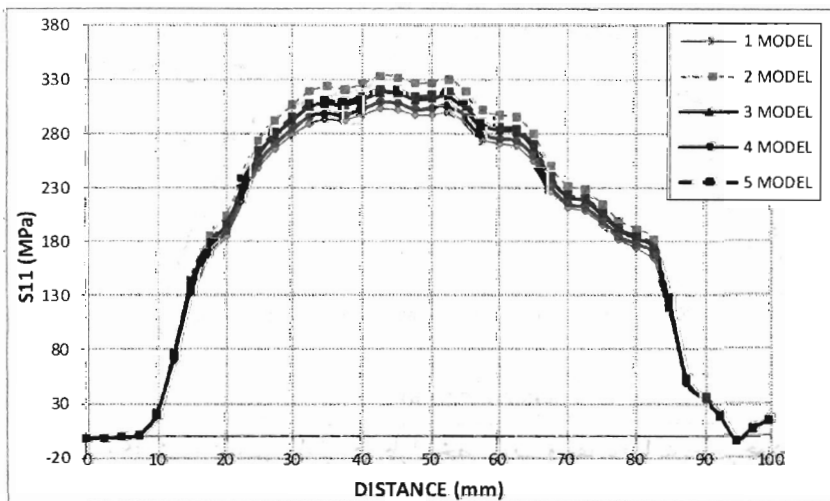




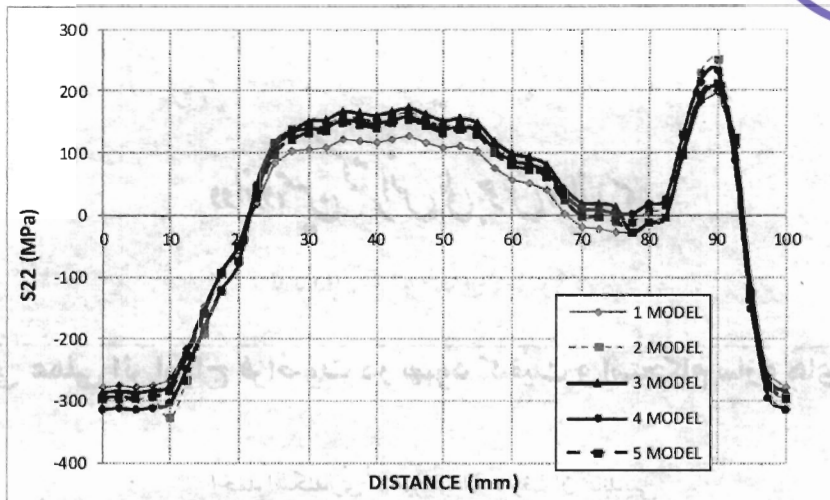
شکل (۷) تغییرات تنش طولی در طول خط ذوب



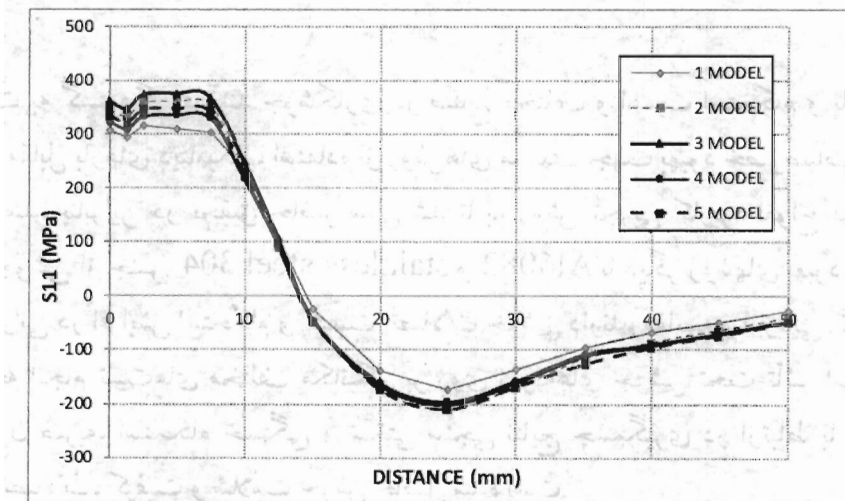
شکل (۸) تغییرات تنش عرضی در طول خط ذوب (Fusion Line)



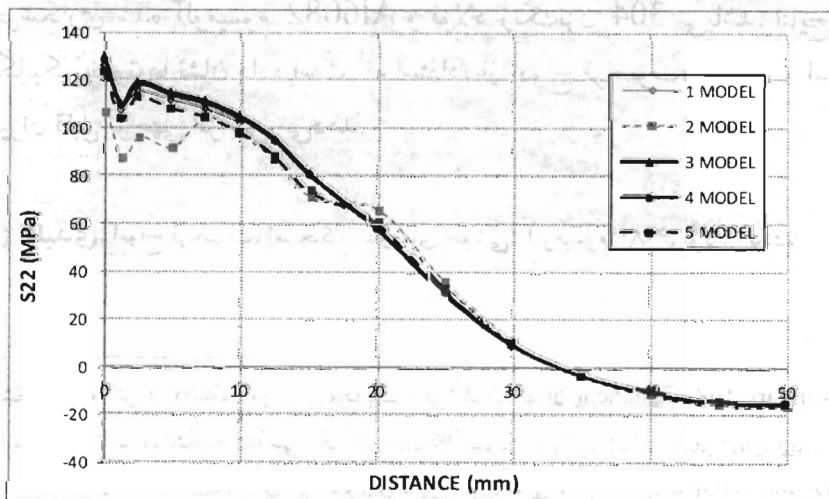
شکل (۹) تغییرات تنش طولی در طول خط جوش



شکل (۱۰) تغییرات تنش عرضی در طول خط جوش



شکل ۱۱- تغییرات تنش طولی در صفحه میانی نسبت به فاصله از خط جوش



شکل (۱۲) تغییرات تنش عرضی در صفحه میانی نسبت به فاصله از خط جوش