

بررسی تنش‌های پسماند در ناحیه تحت تأثیر حرارت اتصال جوشی به روش اجزاء محدود در اتصالات تیر به ستون گیردار

امیرعلی رستگاری^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳۱۲-۱۱۱۵۵، m.ghassemieh@ut.ac.ir

چکیده

در اتصالات جوشی تنش‌های پسماند پس از چرخه گرمایش و سرمایش جوشکاری در نواحی اطراف حوضچه مذاب و مناطقی که تحت تأثیر حرارت جوشکاری قرار دارند ظاهر می‌شوند و باعث کاهش یکپارچگی خواص مکانیکی فلز می‌شوند که می‌تواند به عنوان یک عامل در کاهش کارایی و خدمت‌پذیری قطعات ساخته شده، موثر باشد. در عمل، شناسایی و بررسی این تنش‌ها فرآیندی دشوار و پرهزینه‌ای است. برای حل این مشکل می‌توان از روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود برای شناسایی و بررسی تنش‌ها و تغییر شکل‌های ناخواسته جوشکاری استفاده کرد. در این پژوهش با توجه به اهمیت تنش‌های پسماند در اتصالات ساختمانی، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی و تحلیل عددی آن‌ها در یک اتصال جوشی پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا برای منبع حرارتی مدل دوبیضی‌گون گلداک در نظر گرفته شده است و برای اطمینان از درستی روش تحلیل به کمک این شیوه، نتایج این مدل با نتایج یکی از تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است و سپس، اثر شار حرارتی به کمک زیربرنامه DFLUX در محیط برنامه‌نویسی فرترن بر مدل اصلی اعمال گردیده است. پس از به دست آوردن تاریخچه دمایی تمامی گره‌های تحلیل حرارتی، از آن‌ها به عنوان شرایط اولیه تحلیل مکانیکی برای شناسایی تنش‌های پسماند در قطعه استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل مکانیکی نشان‌دهنده مقادیر بزرگی از تنش‌های پسماند در محل اتصالات بوده که مقدار این تنش‌ها در برخی از نواحی جوش و اطراف آن با تنش تسلیم فلز برابر بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اثر جوشکاری در اطراف اتصال، فلز مینا به ناحیه پلاستیک وارد شده است و وجود تغییر شکل‌های باقیمانده پس از سرد شدن ناحیه جوشکاری در این منطقه گواه این ادعا می‌باشد.

واژگان کلیدی

اتصالات جوشی، تنش‌های پسماند، تغییر شکل پلاستیک، مدل‌سازی اجزای محدود

Investigation of the residual stresses in HAZ of welded joints in the rigid beam to column connection by finite element method

A. Rastegari, M. Ghassemieh

Abstract

In the welded joints, residual stresses appear in the areas around the melting pool and the areas that are affected themselves by the welding heat after the completion of heating and cooling welding cycle. The residual stresses reduce the integrity of the metal's mechanical properties and also the serviceability of the made parts. Recognition and investigation of these stresses is a complicated and pricey process in operation. One can use numerical methods such as finite element for recognizing and investigating the tensions and unwanted welding deformations in order to solve the problem. In this research, regarding the importance of these stresses in construction fittings, a thorough numeric research on the stresses in welding joints has been conducted using Abaqus software. To this purpose, GOLDAK double ellipsoid model has been considered for heating source primitively to ensure the reliability of this evaluating method. Using this technique, the outcome of this model has been compared with the existing technical literature. The heat flux has been encoded in Fortran programming environment with the help of DFLUX subroutine and applied to the original model. Once the temperature history of all thermal analysis groups obtained, mechanical loading analysis will start to identify the residual stress in the fragment. The results demonstrated large amounts of residual stress at the joint site. The amounts of these stresses in some parts of the joint were as much as the yield stress of metal; i.e. to say the metal was formed as plastic at the end of the welding process.

Keywords

Welded joints, Residual stresses, Plastic deformations, Finite element modeling

حرارت بالای ایجاد شده در فرایند جوشکاری منجر به پیدایش چرخه‌های حرارتی شدیدی در اطراف خط جوش می‌شود. این چرخه‌های حرارتی غیریکنواخت، سبب گرم و سرد شدن جوش و فلز پایه شده و باعث شکل‌گیری تنش‌های پسماند و به تبع آن شکل‌گیری اعوجاج در اتصال می‌شوند. این امر یکی از مشکلات اصلی در فرآیند جوشکاری محسوب می‌شود. ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه باعث مشکلاتی از جمله شکست ترد قطعه، کاهش استحکام، کاهش عمر خستگی، و کاهش مقاومت کمانشی می‌شوند. علاوه بر این ممکن است که به سبب وجود هیدروژن به دام افتاده در محل جوشکاری در سازه ترک هیدروژنی ایجاد شود که احتمال شکست سازه قبل از خدمت‌دهی را بالا می‌برد.

علت شکل‌گیری ترک در بعضی از اتصالات جوشی مورد مطالعه قرار گرفته است و میزان انقباض و انبساط ناشی از حرارت جوشکاری در اطراف حوضچه جوش، جوش‌های گوشه و نفوذی محاسبه گردیده [۱ و ۲]. در پژوهشی دیگر، تعیین میزان تنش‌های پسماند جوشکاری فولاد به طور عددی انجام پذیرفته است [۳]. نتایج این تحقیق با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی نداشتند که دلیل این اختلاف صرف‌نظر از برخی عوامل فیزیکی مهم گزارش شده است. به دست آوردن تنش‌های پسماند در سطوح بالا و پایین یک صفحه در اطراف خط جوش به کمک روش اجزای محدود در یک جوشکاری زیرپودری انجام شده است [۴]. در پژوهش دیگری، مدل‌سازی کل قطعه جوشکاری شده توسط محققین انجام گردید [۵ و ۶]. در این پژوهش‌های انجام شده علاوه بر مدل دو بعدی، مدل سه‌بعدی نیز تهیه شد که در این مدل‌ها اثرات الاستیک نواحی اطراف جوش برای اتصال یک حلقه بر روی سیلندر تحت شرایط مختلف جوشکاری بررسی شد.

علاوه بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند، بوجود آمدن تغییر شکل‌های ناخواسته در قطعات حین جوشکاری یکی دیگر از مشکلات جوشکاری است که این امر بیشتر در قطعات و صفحات نازک خود را نشان می‌دهد. مطالعه تغییرشکل‌های ایجاد شده در جوشکاری اتصالات و اثر آن بر مقاومت کمانشی قطعه با استفاده از یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. مطالعه اثر تغییر شکل‌ها و تنش‌های پسماند بر روی مقاومت نهایی و استحکام صفحات فلزی مستطیلی تحت فشار هستند توسط Cui و Mansour [۸] انجام پذیرفته است. در پژوهشی دیگر تاثیر ترتیب عملیات جوشکاری

بر تغییر شکل‌های ناشی از آن در صفحات نازک آلومینیومی جوشکاری شده به دو روش لب به لب و گوشه‌ای بررسی شده است [۹]. بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده در جوش گوشه به صورت جوشکاری خودکار توسط Deo و Michaleris [۱۰] برای انواع تغییر فرم‌ها از جمله کمانشی، خمشی و زاویه‌ای به صورت عددی و تجربی انجام شد. Yajiang و همکارانش [۱۱] توزیع تنش‌های پسماند در اتصال صفحات با استحکام بالا را که با جوشکاری قوسی به هم متصل شده بودند را در قالب یک مدل‌سازی اجزاء محدود تحلیل کردند. در یک مطالعه سه‌بعدی در رابطه با اتصال لوله‌ای جوش، علاوه بر مشخص شدن تاریخچه دمایی و تنش‌های پسماند و مقایسه این نتایج با نتایج تجربی، از این نتایج برای تحلیل یک چرخه بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد تا بتوان میزان اثر این مقادیر را در بارگذاری تعیین کرد [۱۲]. Wang و همکارانش [۱۳] با استفاده از روش آزمایشگاهی زیرساختار که یک روش عددی سه‌بعدی برای مسایل الاستوپلاستیک در محیط‌های حرارتی است به بررسی تغییر شکل‌های جوشکاری پرداختند. آن‌ها در این پژوهش مقادیر دقیق تغییر شکل‌ها در ورق‌هایی از جنس فولادهای ضدزنگ و کربنی را محاسبه نمودند. در مطالعه‌ای دیگر که در آن برای در نظر گرفتن اثر پر شونده‌گی فلز جوش در اتصال جوشی گوشه‌ای از شیوه تولد و مرگ (Birth and Death) استفاده شده است، تاریخچه دمایی و تغییر شکل‌های پسماند ناشی از جوشکاری با دقت بسیار بالایی گزارش شده‌اند [۱۴]. برای ارزیابی تنش‌های پسماند و همچنین تغییر شکل‌ها در ورق‌های جوش شده با ضخامت زیاد با کمک روش اجزای محدود، چاند و همکارانش از شبیه‌سازی دو بعدی به کمک نرم‌افزار ANSYS استفاده کردند [۱۵]. در این تحقیق تاثیر پارامترهای جوشکاری به همراه تاثیر سرعت سرد شدن جوش بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌ها پرداخته شده است.

با توجه به پیشینه پژوهش‌های اشاره شده، می‌توان دریافت که تاکنون با دقت از نرم‌افزار اجزاء محدود برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری در اتصالات ساختمانی با مدل‌سازی منبع حرارتی به صورت متحرک در اکثر پژوهش‌ها استفاده نشده است. به بیانی دیگر، استفاده از جوش متحرک به کمک کدنویسی و پیوند آن با برنامه‌های متداول اجزاء محدود برای این گونه اتصالات و هندسه مربوطه تا به امروز در هیچ کار تحقیقاتی انجام پذیرفته است. به علاوه، در این مقاله مورد از شیوه تولد و مرگ اجزا در برخی از گذرهای جوشکاری



استفاده شده است. با توجه به اینکه استفاده از این شیوه باعث افزوده شدن به هزینه محاسبات می‌گردد، در این تحقیق از این شیوه برای خطوط جوش کوتاه استفاده شده و هنگام مطالعه خطوط جوش بلند از روشی ترکیبی میان شیوه تولد و مرگ و روش رسوبی استفاده شده است.

۲- شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری

به دلیل فقدان اطلاعات بر پایه محاسبات دقیق ریاضی در زمینه فرآیند جوشکاری و همچنین داده‌هایی بر پایه آزمایشات تجربی و روش‌های آزمون و خطا، با وجود پیشرفت چشمگیر پردازش‌های رایانه‌ای، استفاده از روش‌های عددی (اجزاء محدود) همچنان برای تحلیل مسایل جوشکاری محدود است. از طرف دیگر تحلیل دقیق و تحلیلی فرآیندهای جوش به دلیل بالا بودن تعداد پارامترهای موثر بر روی فرآیند و ناشناخته بودن آن‌ها امکان پذیر نیست. از طرف دیگر، برای مدل‌سازی فرآیند جوشکاری، باید مدل را به صورت نزدیک به واقعیت شبیه‌سازی کرد ولی برای آنکه تحلیل از نظر هزینه زمانی و اقتصادی بهینه و توجیه پذیر باشد باید از جزئیاتی که در تحلیل اثر کمتری دارند صرف نظر کرد.

با در نظر گرفتن تمامی موارد یاد شده در انتخاب روش تحلیل، در این مقاله تحلیل حرارتی و مکانیکی فرآیند جوشکاری به روش غیر مستقیم صورت گرفته که باعث کاهش چشمگیری در هزینه و زمان تحلیل این فرآیندها گشته و در مقابل از دقت بسیار قابل قبولی برخوردار است.

۲-۱- روش غیر مستقیم یا غیر کوپل

روش غیر مستقیم (Uncouple OR Indirect Coupling) برای تحلیل یک فرآیند جوشکاری دارای دو مرحله است. مرحله اول، مرحله تحلیل حرارتی و اعمال حرارت ناشی از جوشکاری به قطعه می‌باشد. در این مرحله از تحلیل، میزان شار ورودی و دیگر پارامترهای موثر بر تحلیل اعمال می‌شود و در ادامه معادلات حاکم بر این تحلیل حرارتی گذرا حل می‌شوند و با اعمال شرایط مرزی حرارتی مقدار دمای هر گره در هر لحظه به دست خواهد آمد. میدان دمایی به دست آمده که وابسته به زمان می‌باشد در مرحله بعدی تحلیل که تحلیل مکانیکی تحلیل می‌باشد به عنوان یکی از بارگذاری‌های سازه به مدل اعمال می‌شود. در تحلیل مکانیکی معادلات حاکم بر مساله، معادلات اساسی مومسانی می‌باشد. پس از اعمال شرایط مرزی مکانیکی بر مدل، در هر گام زمانی بارگذاری حرارتی بدست آمده از

تحلیل اول به گره‌ها اعمال می‌شود و معادلات حاکم بر مساله که همان معادلات مومسانی می‌باشند حل می‌شوند و تنش‌ها و کرنش‌های کلی سازه به دست می‌آیند و تنش‌های پسماند ناشی از حرارت نیز در هر مرحله محاسبه می‌شوند و به تنش‌های موجود اضافه می‌گردند تا در هر لحظه رفتار مدل به روز شود.

۲-۲- تحلیل حرارتی فرآیند جوشکاری

برای تحلیل یک فرآیند جوشکاری به روش غیر مستقیم اولین گام برای شبیه‌سازی فرآیند، تحلیل حرارتی است. اولین مرحله در روند شبیه‌سازی، اعمال ورودی‌های حرارتی به قطعه است. در فرآیند جوشکاری اعمال شار حرارتی ناشی از منبع جوشکاری به عنوان ورودی مورد نظر یا همان بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. معادله انتقال حرارت گذرای حاکم بر این مساله در فرم ماتریسی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود.

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T \{D\} \{L\} T + \bar{q} \quad (1)$$

در این معادله ρ چگالی ماده، c گرمای ویژه، t زمان، $T(x, y, z, t)$ دمای موجود در هر لحظه و \bar{q} نرخ تولید حرارت در واحد حجم است. V بردار سرعت انتقال جرم است که به صورت معادله (۲) تعریف می‌گردد، D ماتریس ضریب هدایت حرارتی مطابق معادله (۳) و L یک عملگر برداری است که به صورت معادله (۴) بیان می‌شود.

$$\{V\} = \{v_x \quad v_y \quad v_z\}^T \quad (2)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T \quad (4)$$

شرایط اولیه در مسایل انتقال حرارت معمولاً به صورت توزیع دمای اولیه در جسم بیان می‌شود؛ از این رو شرط اولیه مساله انتقال حرارت به فرم معادله (۵) برقرار است.

$$T(x, y, z) = T_0(x, y, z) \quad (5)$$

در این معادله T_0 دمای اولیه جسم است.

شرایط مرزی نیز به صورت انتقال حرارت همرفتی (جابه‌جایی) و انتقال حرارت تشعشعی (تابشی) مطابق معادلات (۶) و (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$[D^{eq}] = [D^e] + [D^p] \quad (10)$$

در این معادلات $[D^e]$ مشخص کننده ماتریس سختی الاستیک است. $[D^p]$ ماتریس سختی پلاستیک می‌باشد و $[C^{th}]$ ماتریس سختی حرارتی را نشان می‌دهد. $d\sigma$ جزء تنش‌های پسماند، $d\varepsilon$ جزء کرنش و dT نشان دهنده جزء دما است.

۲-۴- پارامترهای شبیه‌سازی جوشکاری

مقدار انرژی یا شار حرارتی اعمالی به قطعه که توسط قوس الکتریکی به جسم وارد می‌شود مطابق معادله ذیل بیان می‌شود:

$$Q_w = \eta \cdot V \cdot I \quad (11)$$

در این رابطه Q_w مقدار کل انرژی الکتریکی یا حرارتی اعمالی به قطعه است که واحد آن بر حسب وات بیان می‌شود. V ولتاژ جوشکاری، I شدت جریان جوشکاری (آمپراژ) است. پارامتر η مقدار بازدهی قوس الکتریکی را نشان می‌دهد. این پارامتر به نوع جوشکاری وابسته است و برای هر یک از حالات جوشکاری مقداری متفاوت دارد. در جدول (۱) مقادیر مختلف η برای حالات مختلف جوشکاری آورده شده است.

جدول ۱- بازدهی قوس الکتریکی جوشکاری

روش جوشکاری	بازده حرارتی قوس الکتریکی (%)
جوشکاری زیر پودری	۹۱-۹۹
جوشکاری با الکتروود پوشش‌دار	۶۶-۸۵
جوشکاری تحت حفاظت گاز (CO_2)	۷۵-۹۳
جوشکاری تحت حفاظت گاز (Ar)	۶۶-۷۰

پس از آن که مقدار انرژی جوشکاری تعیین شد، باید نحوه اعمال آن به قطعه نیز مشخص شود. در این مقاله روش شبیه‌سازی فلاکس جوش که به واقعیت شباهت بیشتری دارد، برای اعمال حرارت به قطعه جوشکاری توسط مدل توزیع دو بیضوی چگالی توان یا مدل گلداک مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل نصف جلوی منبع حرارتی، یک منبع بیضوی و در نصف پشت منبع بیضوی مجزایی در نظر گرفته می‌شود. انرژی کل بوسیله پارامترهایی بین این دو منبع حرارتی تقسیم می‌شود. این پارامترها شامل f_r برای جلوی منبع حرارتی و f_p برای منبع عقبی در نظر گرفته می‌شود. این پارامترها میزان نرخ رسوب انرژی حرارتی در جلو و عقب منبع حرارتی گلداک را مشخص می‌کنند و توسط معادلات ذیل محاسبه می‌شوند.

$$q_{conv} = h(T - T_{amb}) \quad (6)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

در معادلات بالا h ضریب انتقال گرمایی به صورت جابه‌جایی، T دمای سطح جسم در هر لحظه، T_{amb} دمای محیط، σ ثابت استفان-بولتزمن و ε ضریب پخش موثر یا همان ضریب گسیل می‌باشد که به مقدار زیادی وابسته به جنس سطح و نحوه پرداخت آن است [۱۶]. معادله انتقال حرارت (۱) با استفاده از شرایط اولیه و مرزی معین (معادلات (۶) و (۷)) تحلیل می‌شود و نتایج آن به صورت میدان دمایی در مدل به دست می‌آید.

۲-۳- تحلیل مکانیکی فرآیند جوشکاری

پس از تحلیل حرارتی و بدست آمدن میدان‌های دمایی مدل در هر لحظه زمانی، تحلیل مکانیکی برای تعیین تنش‌ها و کرنش‌های پسماند ایجاد شده در قطعه آغاز می‌گردد. در این قسمت تاریخچه دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی به عنوان بارگذاری حرارتی برای تحلیل مکانیکی اعمال می‌شود. تنش‌ها و کرنش‌های پسماند نهایی، با انباشته شدن تنش‌ها و کرنش‌های بدست آمده در هر لحظه زمانی که ناشی از میدان دمایی بدست آمده از تحلیل حرارتی هستند، حاصل می‌شوند. بدلیل حساسیت خواص مکانیکی قطعه به دما، این رفتار وابسته به خواص مکانیکی مصالح مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم بر تحلیل مکانیکی، معادلات پایه‌ای تعادل می‌باشند که توسط رابطه ذیل بیان می‌گردد.

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot b_i = 0 \quad (8)$$

این معادله بیان کننده تعادل جسم برای یک جسم ساکن می‌باشند. در معادله (۸)، σ_{ij} بیان کننده تانسور تنش موجود در قطعه و b_i نشان دهنده نیروهای حجمی است. برای تحلیل یک مسأله ترمومکانیکی جوشکاری علاوه بر معادلات بالا به معادلات دیگری نیز احتیاج است که معادلات پایه‌ای خوانده می‌شوند. این معادلات بر مبنای مواد ترموالاستو-پلاستیک و بر پایه معیار تسلیم فون میسز و قانون کرنش سختی همسانگرد بیان شده‌اند. این معادلات که ارتباط بین تنش و کرنش در مسائل ترموالاستو-پلاستیک را بیان می‌کند به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۷]:

$$[d\sigma] = [D^{eq}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \quad (9)$$



جوش را لحاظ می‌کند. پارامتر b مشخصه‌ای است که میزان نفوذ و عمق جوشکاری را تعیین می‌کند.

برای شبیه‌سازی فلز پر کننده در فرآیند جوشکاری نیز می‌توان از مرسوم‌ترین روش‌هایی که در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش رسوبی و روش تولد و مرگ اجزا، استفاده کرد. با توجه به اینکه هرکدام از این روش‌ها مزایا و معایبی دارند، برای استفاده از مزایای هر دو روش و کاهش معایب آن‌ها در این پژوهش از روش ترکیبی این دو روش استفاده شده است. از آن‌جا که مدل سازی جوش‌های تک‌گذره با استفاده از هر یک از این روش‌ها دقت قابل قبولی را دارد و نتایج تحلیل این روش‌ها اختلاف کمی با یک‌دیگر دارند، برای کاهش زمان پردازش برای جوش‌های تک‌گذره موجود در این پژوهش، با توجه تعداد بالای خطوط جوش، روش رسوبی مورد استفاده قرار گرفته است. برای جوش‌های دو گذره و بیشتر، میزان خطای روش رسوبی زیاد است و باید از روش تولد و مرگ اجزا استفاده کرد؛ ولی تعداد اجزای موجود در جوش‌های چند گذره به صورت نسبی بیشتر از جوش‌های تک پاسه می‌باشد و استفاده از روش تولد و مرگ به شدت زمان تحلیل را افزایش می‌دهد. برای حل این مشکلات از روش تولد و مرگ جزئی استفاده شده است.

۲-۵- تحلیل تنش در نرم افزار ABAQUS

در این پژوهش از نرم افزار ABAQUS جهت تحلیل استفاده می‌شود. همچنین با تهیه زیرروال DFLUX در حرکت قوس الکتریکی و حوضچه مذاب در محیط برنامه نویسی فرتن و پیوند آن با برنامه ABAQUS تحلیل حرارتی و مکانیکی کامل انجام می‌گردد.

۳- تعریف اتصال مورد مطالعه

هندسه انتخابی برای تحلیل حرارتی جوشکاری و به دست آوردن تنش‌های پسماند و تاثیر این تنش‌ها بر عملکرد سازه از مطالعات Saneei Nia و همکارانش [۱۹ و ۲۰] انتخاب شده است. مورد مطالعه شامل یک اتصال گیردار تیر به ستون و ورق‌های زیرسری و روسری می‌باشد. در شکل‌های (۲) تا (۴) هندسه و نحوه این اتصال به همراه ابعاد جوش‌های استفاده شده در تحلیل نشان داده شده است.

از آنجا که مهمترین عامل در شکل‌گیری تنش‌های پسماند در جوشکاری خواص وابسته به دما می‌باشد، تمامی این خواص شامل ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه، چگالی، ضریب انبساط حرارتی، تنش تسلیم، ضریب الاستیسیته یا مدول یانگ و

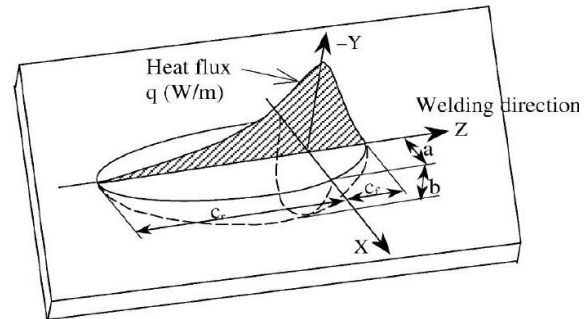
$$f_f = \frac{2c_f}{c_f + c_r} \quad (12)$$

$$f_r = \frac{2c_r}{c_f + c_r} \quad (13)$$

با جمع کردن معادلات فوق خواهیم داشت:

$$f_r + f_f = 2 \quad (14)$$

در معادلات (۱۲) و (۱۳) پارامترهای c_f و c_r مشخصه‌های طولی محسوب می‌شوند و به ترتیب میزان طول انتشار شار در جلو و عقب منبع حرارتی را مشخص می‌کنند. در شکل (۱) مدل توزیع شار گلداک و پارامترهای موجود در این مدل مشاهده می‌شود.



شکل ۱- منبع حرارتی دو بیضی‌گون گلداک [۱۸]

روابط این مدل برای دستگاه مختصات ثابت به صورت معادلات ذیل بیان می‌شود.

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} \times \quad (15)$$

$$e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c_f^2}}$$

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} \times \quad (16)$$

$$e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c_r^2}}$$

معادله (۱۵) شار حرارتی جلوی منبع و معادله شار حرارتی عقب منبع را تعریف می‌کند. در این معادلات Q نرخ کل انرژی ورودی، τ ضریب تاخیر و v سرعت جوشکاری است. پارامترهای a و b از دیگر پارامترهای طولی این مدل هستند و می‌توانند مقادیر متفاوتی را اختیار کنند. پارامتر a پارامتری است که مربوط به عرض بیضی‌گون است و ناحیه عرضی حوضچه

در پروژه موجود، مقادیر جریان الکتریکی (آمپراژ) و ولتاژ هر یک از گذرها متفاوت انتخاب گردیده است.

۳-۱- اعتبار سنجی

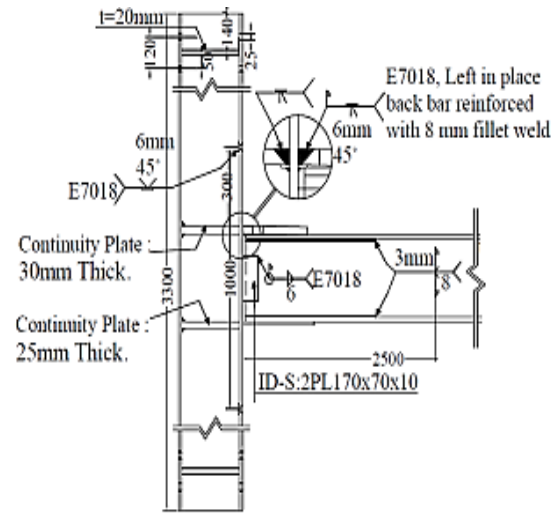
به منظور اطمینان و ارزیابی اعتبار شیوه‌های اجزاء محدود استفاده شده در این پژوهش، به مقایسه نتایج **Stamenković** و **Vasović** [۲۱] به صورت عددی و آزمایشگاهی تنش‌های پسماند در جوشکاری دو صفحه هم‌جنس را مورد بررسی قرار داده‌اند، می‌پردازیم. مدل مورد بررسی دو ورق فلزی هر یک به ابعاد $100 \times 100 \times 3$ میلیمتر می‌باشد و ناحیه جوشکاری به صورت لب به لب و تک گذر است. فولاد استفاده شده از نوع فولاد نرمه ASTM36 یا ST-52 بوده و مقدار دمای ذوب مفروض برابر ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است. پارامترهای جوشکاری در نظر گرفته شده با توجه به نوع جوشکاری که از نوع الکترو دستی است در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری [۲۱]

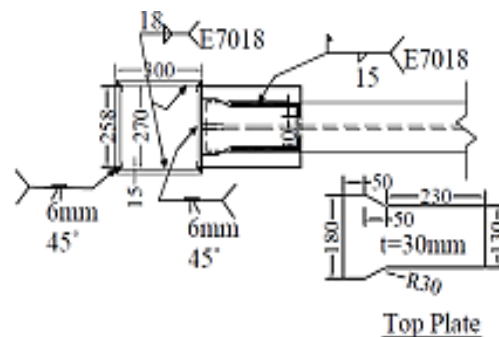
آمپر (I)	ولتاژ (V)	بازده قوس الکتریکی	سرعت حرکت منبع حرارتی (mm/s)
۱۸۰	۲۴	۰/۸۵	۵

در اولین گام برای بررسی درستی شیوه‌های موجود در این تحقیق، باید فرآیند جوشکاری مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از تهیه زیرروال DFLUX استفاده شده و مدل منبع حرارتی دو بیضیگون گلدک با اعمال پارامترهای موثر آن در محیط برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. پس از انجام تحلیل حرارتی و به دست آمدن تاریخچه دمایی هر یک از گره‌ها تحلیل مکانیکی برای به دست آوردن تنش‌های پسماند انجام می‌شود. برای مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی برای صحت‌سنجی و نتایج به دست آمده توسط **Stamenković** و **Vasović** [۲۱]، نتایج در شکل (۵) ارائه شده و به دلیل وجود تقارن در هندسه مورد بررسی، تنها برای یک نیمه از هندسه بیان گردیده است.

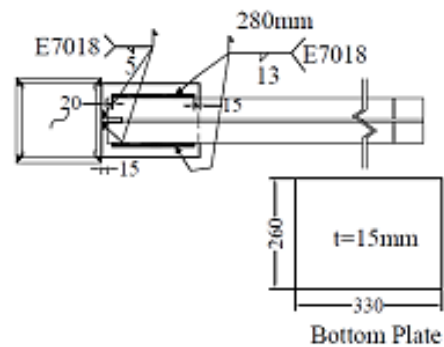
در شکل (۵) خطوط آبی، نارنجی و طوسی رنگ به ترتیب بیانگر نتایج تحلیل‌های آزمایشگاهی و عددی به دست آمده توسط **Stamenković** و **Vasović** و تحلیل عددی انجام شده در ABAQUS است. نتایج بدست آمده تطابق مطلوبی با یکدیگر دارند و میزان خطا کمتر از ۵٪ است؛ از این رو روش تحلیل انتخاب شده در این پژوهش دارای عملکرد مناسبی است و می‌توان در ادامه از آن بهره برد.



شکل ۲- اتصال تیر به ستون [۱۹ و ۲۰]



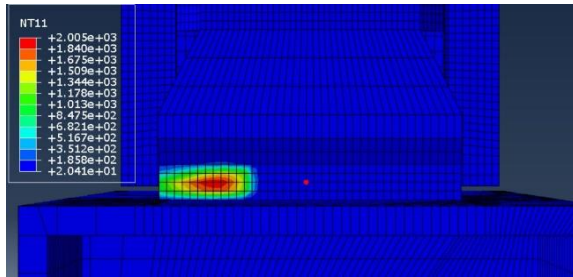
شکل ۳- ابعاد ورق روسری [۱۹ و ۲۰]



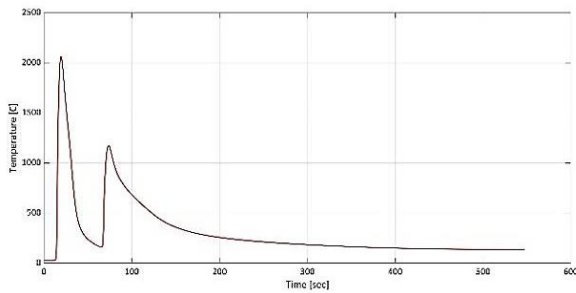
شکل ۴- ابعاد ورق زیرسری [۱۹ و ۲۰]

ضریب پواسون به صورت تابعی از دما مطابق مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده است. نوع جوشکاری با توجه به گستردگی استفاده از جوشکاری به روش الکترو دستی در صنعت ساختمان، به صورت دستی در نظر گرفته شده است. با توجه به متفاوت بودن ضخامت و طول هر یک از گذرهای جوشکاری

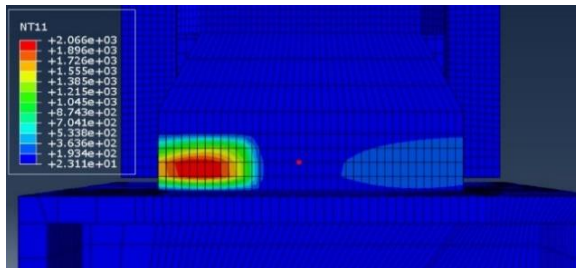
در شکل (۱۹) نمایش داده شده است.



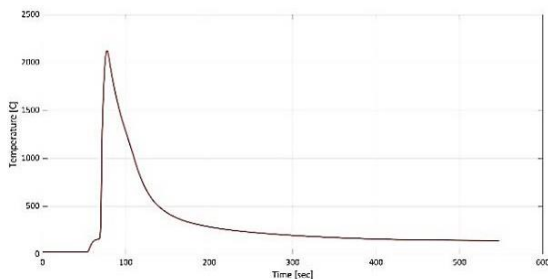
شکل ۶- نمودارهای توزیع دمایی گذر اول جوشکاری اتصال ورق
روسی به ستون $t = 10$ s



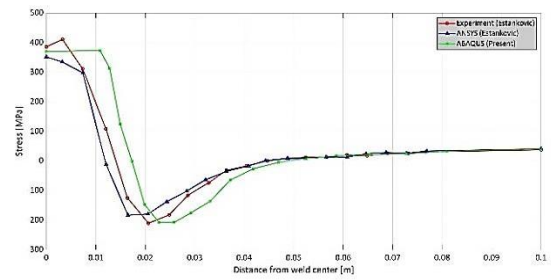
شکل ۷- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در گذر اول جوشکاری
اتصال ورق روسی به ستون



شکل ۸- نمودارهای توزیع دمایی گذر دوم جوشکاری اتصال ورق
روسی به ستون $t = 10$ s



شکل ۹- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در گذر دوم جوشکاری
اتصال ورق روسی به ستون



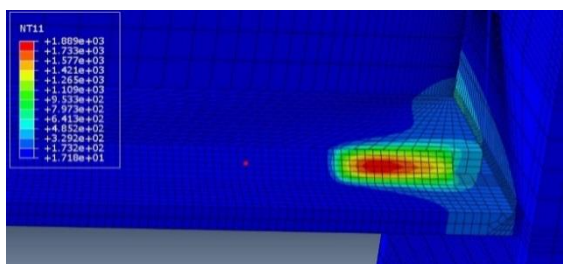
شکل ۱۰- مقایسه نتایج تنش‌های پسماند بدست آمده از این تحقیق با
نتایج تحلیل [۲۱]

۴- بحث و بررسی نتایج

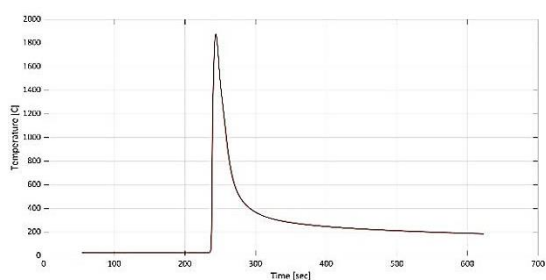
۴-۱- نتایج تحلیل حرارتی

در مرحله تحلیل حرارتی در مجموع از ۲۰ گام برای مدل‌سازی جوشکاری و انتقال حرارت جوشکاری به قطعه استفاده شده است. گام اول برای استفاده از شیوه تولد و مرگ اجزای جوش-های دو گذره در نظر گرفته شده است؛ در این گام که زمان آن برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است، اجزای جوش‌های دو گذره تحلیل به حالت مرگ در می‌آیند. از گام ۲ تا گام ۱۹ فرآیند جوشکاری آغاز می‌شود و هر یک از این گام‌ها برای یک گذر جوشکاری موجود در مساله استفاده می‌شود؛ در زمان این گام‌ها متفاوت بوده و به طول و سرعت جوشکاری هر گذر وابسته است، بازه زمانی این گام‌ها حداقل برابر ۱۰ ثانیه و در بیشترین حالت برابر ۵۷ ثانیه است. گام ۲۰ و نهایه تحلیل حرارتی مربوط به زمان سرمایش کلی قطعه است و نسبت به دیگر گام‌ها دارای زمان به مراتب بزرگتری است.

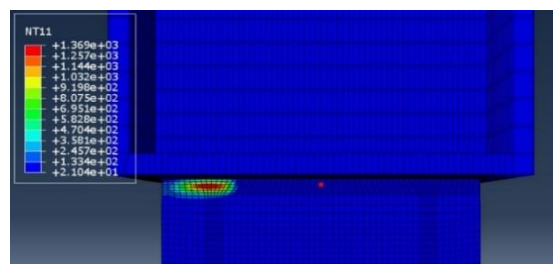
نمودارهای توزیع دمایی گذرهای اول و دوم جوشکاری اتصال ورق روسی به ستون در شکل‌های (۶) و (۸)، و گذرهای اول و دوم جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون در شکل‌های (۱۰) و (۱۲)، جوشکاری اتصال ورق زیرسری و روسی به تیر در شکل‌های (۱۴) و (۱۶) و جوشکاری قائم اتصال ورق برشی به ستون در شکل (۱۸) در زمان‌های مختلف در ادامه آورده شده است. همچنین در این شکل‌ها نقطه‌ای با رنگ قرمز در میانه خط جوش (به صورت تقریبی) مشخص شده است و نمودار تاریخچه دمایی مربوط به این نقطه در گذرهای اول و دوم جوشکاری اتصال ورق روسی به ستون در شکل‌های (۷) و (۹)، در گذرهای اول و دوم جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون در شکل‌های (۱۱) و (۱۳)، در جوشکاری اتصال ورق زیرسری و روسی به تیر در شکل‌های (۱۵) و (۱۷) و در جوشکاری قائم اتصال ورق برشی به ستون



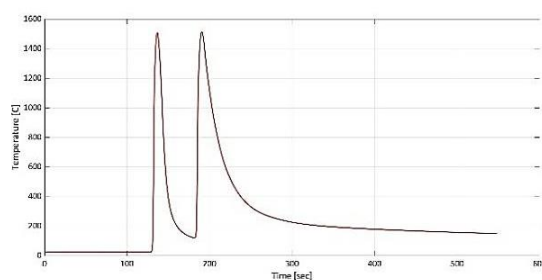
شکل ۱۴- نمودارهای توزیع دمایی جوشکاری اتصال ورق زیرسری به تیر $t = 10$ s



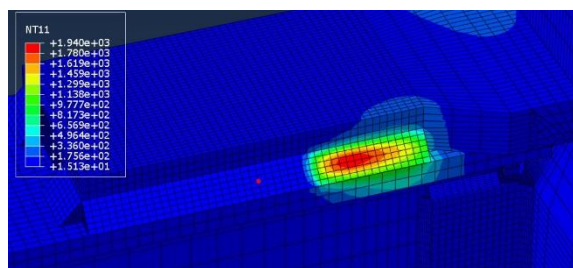
شکل ۱۵- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در جوشکاری اتصال ورق زیرسری به تیر



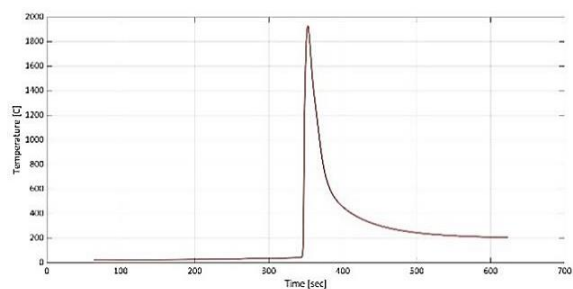
شکل ۱۰- نمودارهای توزیع دمایی گذر اول جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون $t = 10$ s



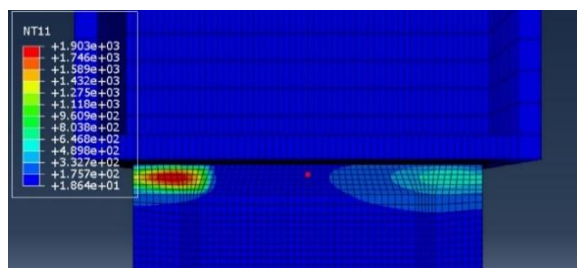
شکل ۱۱- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در گذر اول جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون



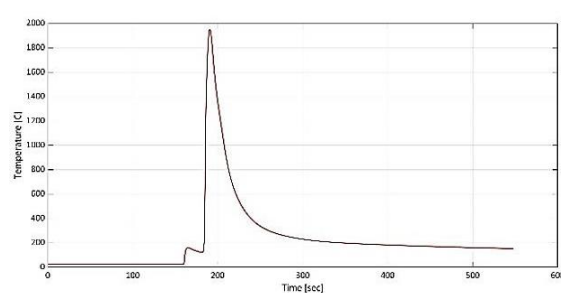
شکل ۱۶- نمودارهای توزیع دمایی جوشکاری اتصال ورق روسری به تیر $t = 10$ s



شکل ۱۷- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در جوشکاری اتصال ورق روسری به تیر

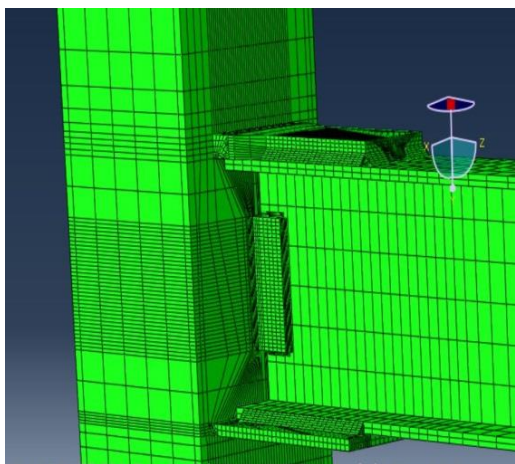


شکل ۱۲- نمودارهای توزیع دمایی گذر دوم جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون $t = 10$ s



شکل ۱۳- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در گذر دوم جوشکاری اتصال ورق زیرسری به ستون

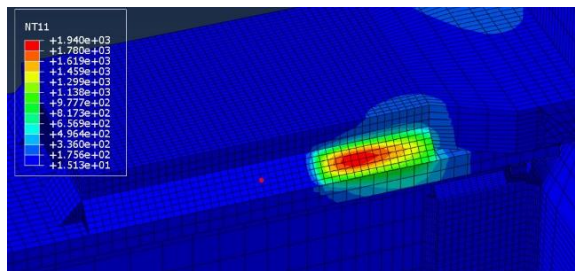
تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری انجام می‌شود و تنش‌های پسماند در نواحی مختلف اتصال محاسبه می‌شود. به دلیل تنوع در تعداد گذرهای جوشکاری موجود در تحلیل و تنوع در حالت قرارگیری آن‌ها میدان‌های تنش پیچیده‌ای در مدل ایجاد شده است؛ میدان‌های تنشی که در تمام چرخه سرمایش در قطعه باقی می‌مانند در واقع شکل نهایی تنش‌های پسماند موجود در قطعات هستند. این میدان‌های تنشی سه بعدی می‌باشند و در هر یک راستاهای مختصات مقادیر متفاوتی را پدید آورده‌اند. به همین علت می‌بایست دستگاه مختصات محلی در نظر گرفته شده برای ارایه نتایج مشخص باشد. برای تمامی اشکال و مقادیری که در ادامه آورده شده است دستگاه مختصات محلی مطابق با شکل (۲۰) است و تغییری نمی‌کند.



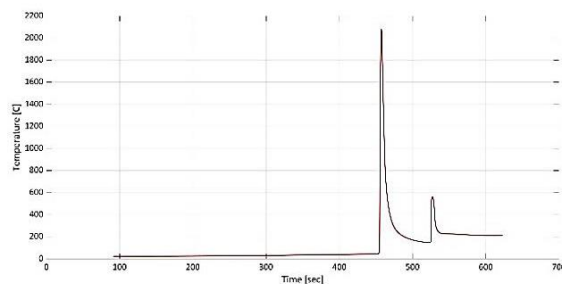
شکل ۲۰- مختصات محلی برای تحلیل تنش‌های پسماند

بر اساس شکل (۲۰)، راستای طولی تیر در جهت محور z راستای عمودی ستون در راستای محور y دستگاه مختصات و راستای سوم که بر اساس این دو محور تعیین می‌شود راستای x بوده و راستای عرض تیر در امتداد این محور مختصات قرار دارد. طبق دستگاه مختصات در نظر گرفته شده، راستای گذرهای جوشکاری اتصالات ورق روسری به زیرسری در راستای محور x ها، پاس‌های جوشکاری طولی و بلند اتصال ورق‌های روسری و زیرسری به تیر در راستای محور z ها، گذرهای جوشکاری ورق برشی که در راستای ستون و به صورت قائم قرار دارند، در راستای محور y ها و بقیه گذرهای جوشکاری اتصال ورق برشی در راستای محور z ها می‌باشد.

در ادامه برای هر یک از حالات تنش ارائه شده، دو شکل ارایه گردیده است که در اولین شکل نمودارهای توزیع تنش و



شکل ۱۸- نمودارهای توزیع دمایی جوشکاری قائم اتصال ورق برشی به ستون $t = 16s$

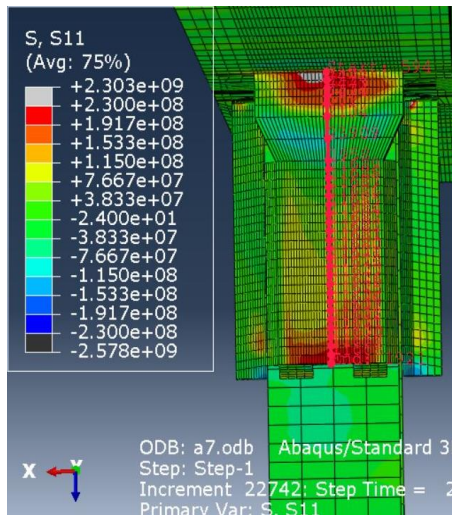


شکل ۱۹- تاریخچه دمایی نقطه مشخص شده در جوشکاری قائم اتصال ورق برشی به ستون

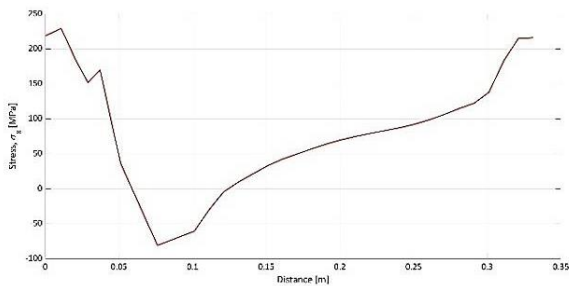
در تمامی نمودارهای توزیع دمایی مشاهده می‌شود که دمای هر گره در ناحیه فلز جوش با رسیدن منبع حرارتی جوشکاری به سرعت به دمای مذاب خود که محدوده‌ای بین ۱۶۰۰ تا ۲۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فولاد ساختمانی است، می‌رسد. پس از عبور منبع از روی هر گره، گره مذکور به سرعت فرآیند سرمایش را آغاز می‌کند و دمای آن تا دمای محیط کاهش می‌یابد. همچنین در نمودارهای تاریخچه دمایی مهمترین نکته، افزایش سریع دمای نقطه مشخص شده به عنوان نماینده‌ای از دیگر نقاط جوشکاری به نقطه ذوب خود و کاهش تدریجی دمای آن به صورت تدریجی است. این چرخه گرمایش و سرمایش عامل اصلی شکل‌گیری تنش‌ها و تغییر شکل‌های پسماند می‌باشد.

۴-۲- نتایج تحلیل مکانیکی تنش پسماند

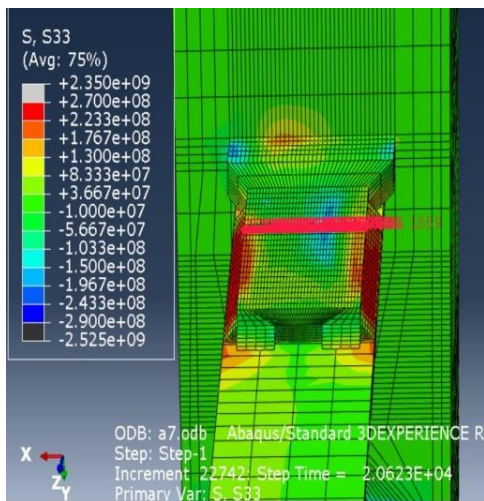
پس از اتمام تحلیل حرارتی که در بخش قبلی ارایه شد، تحلیل مکانیکی برای محاسبه تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری آغاز می‌شود. برای انجام این تحلیل لازم است که تاریخچه دمایی تمامی گره‌های بدست آمده از تحلیل حرارتی به عنوان شرایط اولیه حرارتی به این تحلیل داده شود. با اعمال تاریخچه‌های دمایی گره‌ها به تحلیل مکانیکی مرحله پردازش



شکل ۲۳- تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای اتصال ورق روسری به تیر



شکل ۲۴- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای مسیر مشخص شده در شکل (۲۳)

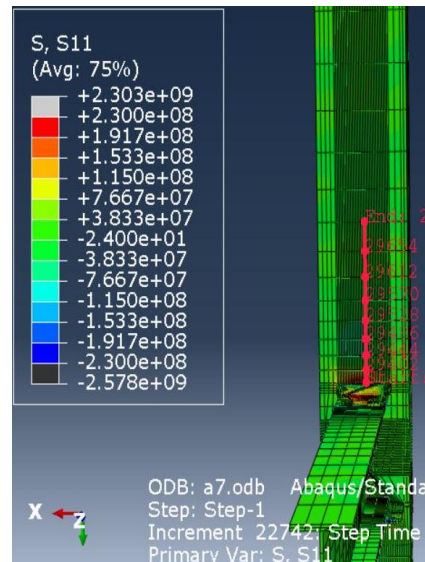


شکل ۲۵- تنش‌های پسماند در راستای محور z ها (σ_z) برای اتصال ورق روسری به تیر

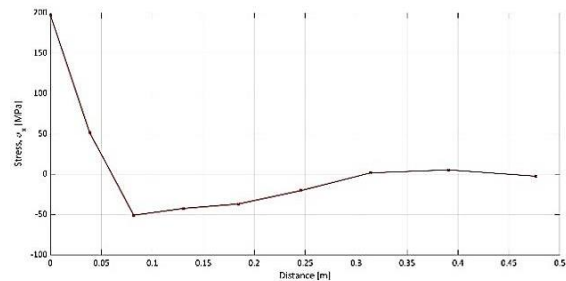
مسیرهایی در نزدیکی گذرهای جوش مشخص گردیده‌اند و در این شکل، نمودارهای تنش برای این مسیرهای مشخص آورده شده است.

۴-۲-۱- اتصال ورق روسری به ستون و تیر

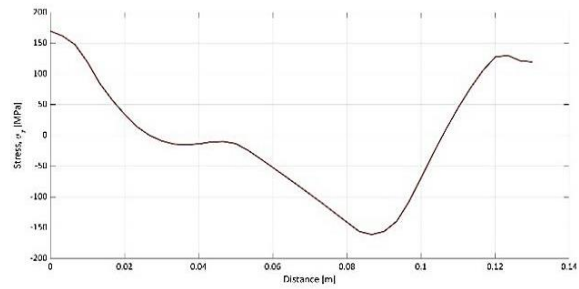
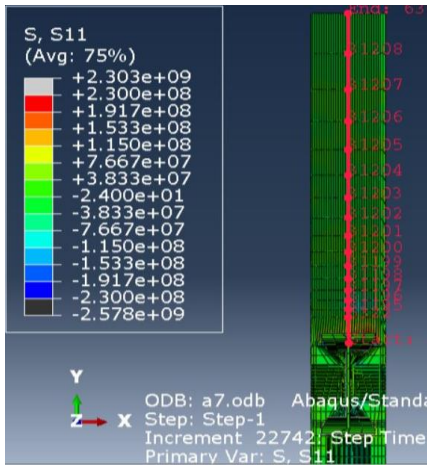
اتصالات ورق روسری به ستون شامل دو گذر جوشکاری است و این گذرهای جوشکاری در امتداد محور x ها می‌باشند. اتصال این ورق به تیر شامل دو گذر جوشکاری مجزا در امتداد محور z ها می‌باشد. در شکل‌های (۲۱)، (۲۳) و (۲۵) نمودار توزیع تنش در اتصال ورق روسری به ستون و تیر در شکل‌های (۲۲)، (۲۴) و (۲۶) نمودار تنش در مسیر مشخص شده در تصویر نمودار توزیع تنش به منظور بررسی و تحلیل عددی نمودارهای توزیع تنش، ارائه شده است.



شکل ۲۱- تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای اتصال ورق روسری به ستون

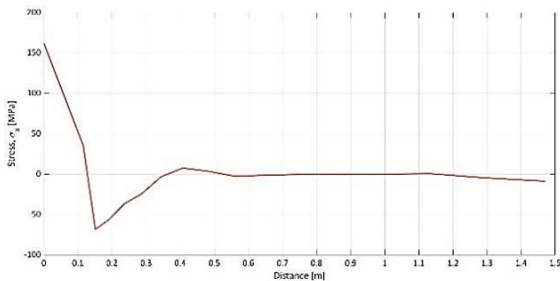


شکل ۲۲- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای مسیر مشخص شده در شکل (۲۱)

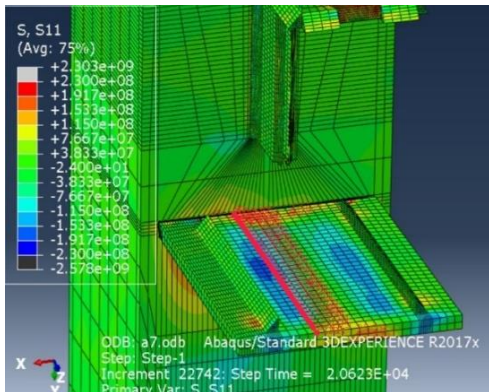


شکل ۲۶- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور z ها (σ_z) برای مسیر مشخص شده در شکل (۲۵)

شکل ۲۷- تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای اتصال ورق زیرسری به ستون



شکل ۲۸- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای مسیر مشخص شده در شکل (۲۷)



شکل ۲۹- تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای اتصال ورق زیرسری به تیر

مذاب از نوع تنش کششی می‌باشند و با فاصله گرفتن از این نواحی از مقدار آن‌ها کاسته شده و به حالت فشاری در نواحی دورتر تبدیل می‌گردند. همچنین بعضی از نقاط در نواحی نزدیک به ناحیه جوش به شکل پلاستیک درآمده‌اند.

با دقت در شکل‌های (۲۲)، (۲۴) و (۲۶) که به ترتیب بیانگر مقادیر عددی شکل‌های (۲۱)، (۲۳) و (۲۵) هستند، می‌توان اظهار کرد که تنش‌های پسماند در نواحی نزدیک حوضچه مذاب از نوع تنش کششی می‌باشند و با فاصله گرفتن از این نواحی از مقدار آن‌ها کاسته شده و به حالت فشاری در نواحی دورتر تبدیل می‌گردند. بزرگی تنش‌های پسماند در نزدیکی حوضچه مذاب به دلیل چرخه حرارتی بالایی که در آن نواحی ایجاد شده نزدیک به نقطه تسلیم فلز است. این نکته نشان می‌دهد بعضی از نقاط در نواحی نزدیک به ناحیه جوش به شکل پلاستیک درآمده‌اند.

۴-۲-۴- اتصال ورق زیرسری به ستون و تیر

اتصال ورق زیرسری به تیر و ستون از لحاظ تعداد گذرهای جوشکاری مشابه ورق روسری می‌باشد. در اتصال این ورق به ستون از دو گذر جوشکاری استفاده شده است. فرق اتصال ورق زیرسری نسبت به ورق روسری ضخامت کمتر بعد جوش است. این اتصال در راستای محور x ها انجام می‌شود. در اتصال ورق روسری به تیر نیز از دو گذر مجزای جوش گوشه در طرفین تیر استفاده شده است. راستای جوشکاری در این حالت در راستای محور z ها است. نمودار توزیع میدان تنش‌های پسماند در شکل‌های (۲۷)، (۲۹) و (۳۱) به ترتیب در اتصال ورق زیرسری به ستون، اتصال ورق زیرسری به تیر در راستای محور x ها و اتصال ورق زیرسری به تیر در راستای محور z ها برای یک گذر جوش و نمودار تنش‌های پسماند در راستای عمود بر مسیر جوشکاری در راستای مشخص شده در تصویر نمودار توزیع تنش، در شکل‌های (۲۸)، (۳۰) و (۳۲) آورده شده است.

مشابه آنچه در تحلیل تنش پسماند برای ورق روسری گفته شد، با دقت در شکل‌های (۲۸)، (۳۰) و (۳۲) که به ترتیب بیانگر مقادیر عددی شکل‌های (۲۷)، (۲۹) و (۳۱) هستند، در این حالت نیز تنش‌های پسماند در نواحی نزدیک حوضچه

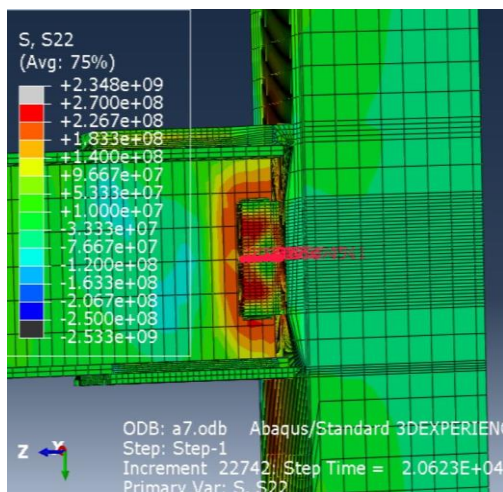
کوچک‌تری در ورق زیرسری شکل می‌گیرد به همین علت بزرگی تنش‌های پسماند در نهایت در این ورق نسبت به ورق روسری کوچک‌تر می‌شود.

۳-۲-۴- اتصال ورق‌های برشی به ستون و تیر

در اتصال مورد بررسی از دو ورق برشی استفاده شده است. هر یک از این ورق‌های برشی توسط چهار پاس جوشکاری به ستون و تیر متصل شده‌اند. برای اتصال هر ورق برشی به ستون از یک گذر جوش گوشه در راستای قائم استفاده شده است. راستای این جوش در جهت محور y ها می‌باشد.

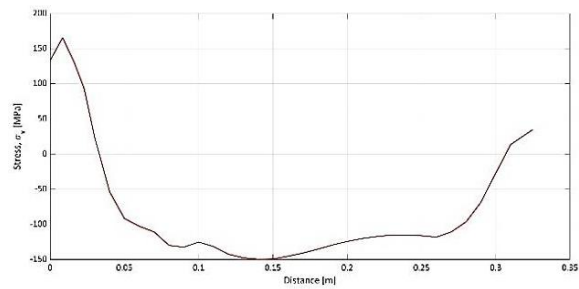
طراحی اتصال ورق‌های برشی به تیر از سه گذر جوش مجزا تشکیل شده است. پاس جوش بلندتر موازی و از نظر ابعاد برابر با جوش متصل کننده ورق برشی به ستون است. دو گذر جوش دیگر که در بالا و پایین ورق‌های برشی قرار دارند کوتاه‌تر بوده و در راستای محور z ها می‌باشند.

در شکل‌های (۳۳) و (۳۵) نمودار توزیع تنش در اتصال ورق‌های برشی به تیر و ستون و در شکل‌های (۳۴) و (۳۶) نمودار تنش در مسیر مشخص شده در تصویر نمودار توزیع تنش، آورده شده است.

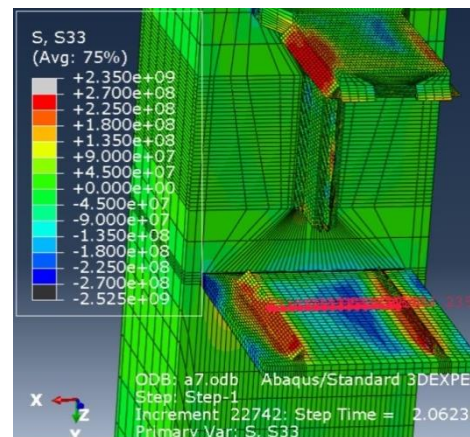


شکل ۳۳- تنش‌های پسماند در راستای محور y ها برای اتصال ورق برشی به تیر و ستون

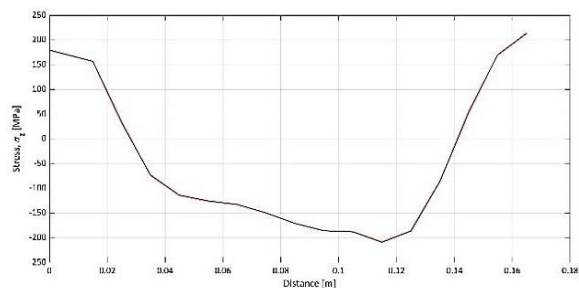
با ملاحظه شکل‌های (۳۴) و (۳۶) که به ترتیب بیانگر مقادیر عددی تنش در شکل‌های (۳۳) و (۳۵) هستند، در ورق‌های برشی به دلیل ابعاد کوچکتر این صفحات و تعداد بالای گذرهای جوشکاری، میدان‌های تنشی شکل گرفته پیچیده‌تر از میدان‌های تشکیل شده در حالات قبل می‌باشد. این نکته را می‌توان از مقارن نبودن میدان‌ها در شکل‌های (۳۴) و (۳۶) برداشت کرد.



شکل ۳۰- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور x ها (σ_x) برای مسیر مشخص شده در شکل (۲۹)



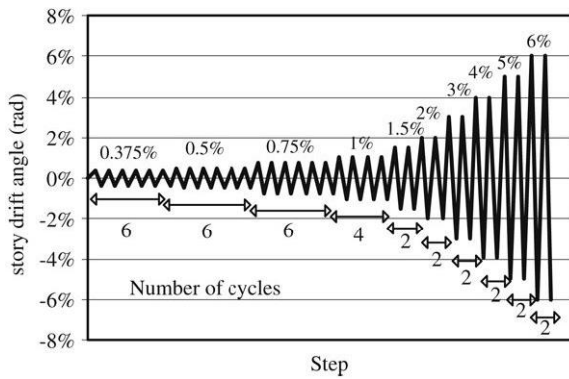
شکل ۳۱- تنش‌های پسماند در راستای محور z ها (σ_z) برای اتصال ورق زیرسری به تیر



شکل ۳۲- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور z ها (σ_z) برای مسیر مشخص شده در شکل (۳۱)

مقایسه نتایج تنش پسماند ورق روسری و زیرسری نشان می‌دهد که بزرگی تنش‌های پسماند در ورق زیرسری به صورت کلی از تنش‌های شکل گرفته در ورق روسری کوچک‌تر است. دلیل این اتفاق ضخامت کمتر ورق زیرسری و ضخامت کمتر بعد پاس‌های جوش است. به دلیل ضخامت کمتر، انرژی کمتری برای فرآیند جوشکاری احتیاج است که به همین علت شار حرارتی کمتری به قطعه می‌رسد و چرخه‌های حرارتی

جهت بررسی اثرات تنش‌های پسماند بر روی اتصال، دو مدل آزمایشگاهی و عددی بدون تنش پسماند و با در نظر گرفتن تنش پسماند مورد مطالعه قرار گرفته است. بارگذاری انتخابی بدلیل موجود بودن نتایج تحلیل‌های تجربی و عددی این اتصال در مطالعات **Saneei Nia** و همکارانش [۱۹] انتخاب گردیده است. این الگوی بارگذاری در ضوابط FEMA350 [۲۲] و AISC [۲۳] موجود است و برای تأیید صلاحیت اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوی این بارگذاری مطابق شکل (۳۷)، متناسب با اعمال جابه‌جایی زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تعیین می‌شود.



شکل ۳۷- بارگذاری چرخه‌ای برای آزمایش اتصالات [۲۲]

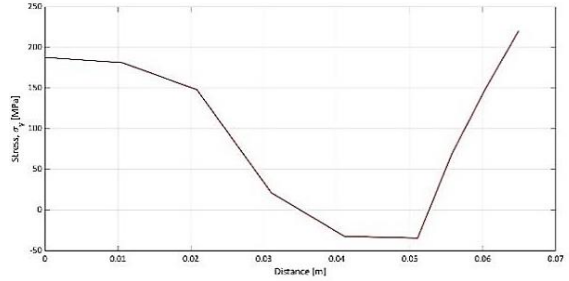
در این پژوهش ۹ چرخه کامل، شامل ۳۲ گام برای بارگذاری چرخه‌ای لحاظ شده است و تا زاویه چرخش نسبی طبقه به مقدار ۶٪ رادیان ادامه پیدا می‌کند.

۴-۳-۱- صحت‌سنجی

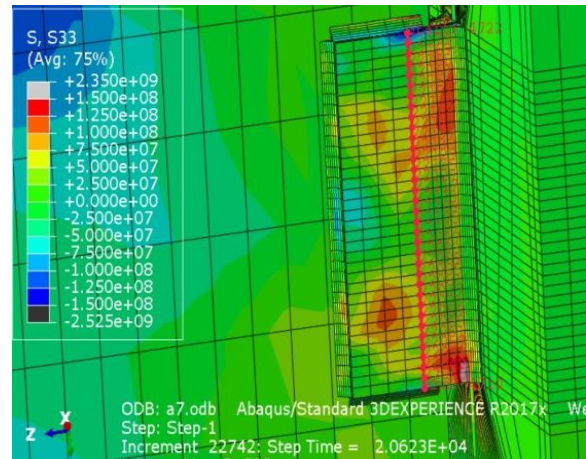
برای صحت‌سنجی مدل‌های ایجاد شده در این پژوهش، مدل شبیه‌سازی شده اتصال در این پژوهش با صرف نظر از اثرات تنش‌های پسماند که در شکل (۳۸) آمده است با نتایج مدل‌های تجربی و عددی همین اتصال که در مطالعات **Saneei Nia** و همکارانش [۱۹ و ۲۰] مطابق شکل (۳۹) موجود است، مورد ارزیابی قرار داده شده است.

با مقایسه شکل‌های (۳۸) و (۳۹) مشاهده می‌شود که مقادیر عددی دو مدل تا انتهای چرخه هشتم (۵٪ رادیان) دارای انطباق مناسبی با یکدیگر می‌باشند و نتایج مدل ساخته شده در این پژوهش از دقت مناسبی برخوردار است. در چرخه نهایی (۶٪ رادیان) اختلاف در بین دو نمودار افزایش پیدا می‌کند، با این وجود میزان خطا کمتر از ۱۵٪ است و می‌توان به مقایسه نتایج پرداخت. تفاوت‌های موجود می‌تواند بدلیل متفاوت در نظر گرفتن خواص فلز جوش در مدل عددی طراحی شده باشد.

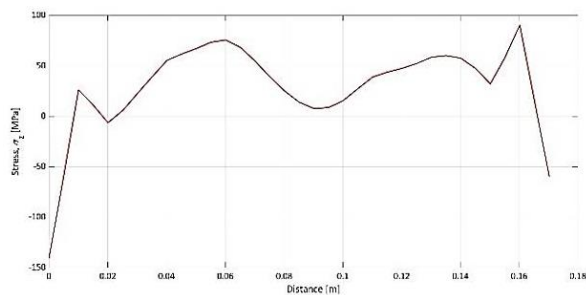
از دیگر دلایلی که این میدان‌های تنش را متفاوت می‌کند فاصله کم این دو ورق از یکدیگر است که باعث تاثیر گذار شدن حرارت جوشکاری گذرهای جوش یکی از این ورق‌های برشی بر دیگری است.



شکل ۳۴- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور σ_y ها برای مسیر مشخص شده در شکل (۳۳)

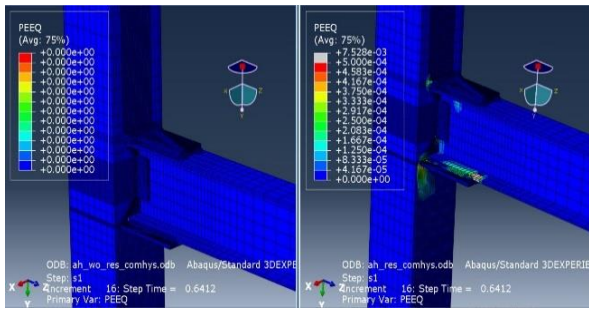


شکل ۳۵- تنش‌های پسماند در راستای محور σ_z ها برای اتصال ورق برشی به تیر و ستون

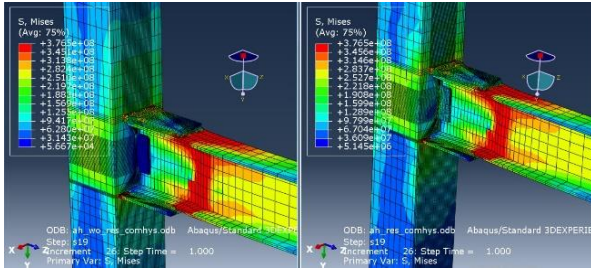


شکل ۳۶- نمودار تنش‌های پسماند در راستای محور σ_z ها برای مسیر مشخص شده در شکل (۳۵)

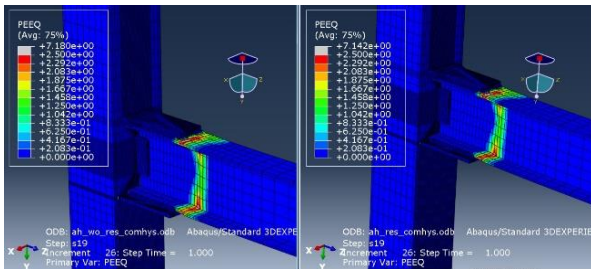
۴-۳-۲- نتایج تحلیل مکانیکی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۴۱- معیار کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) قبل از شروع بار گذاری



شکل ۴۲- تنش فون میسز (Pa) در انتهای چرخه‌های بارگذاری

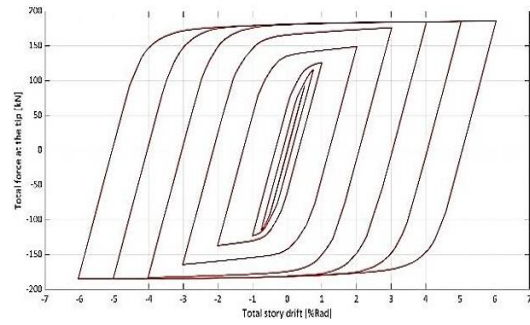


شکل ۴۳- معیار کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در انتهای چرخه‌های بارگذاری

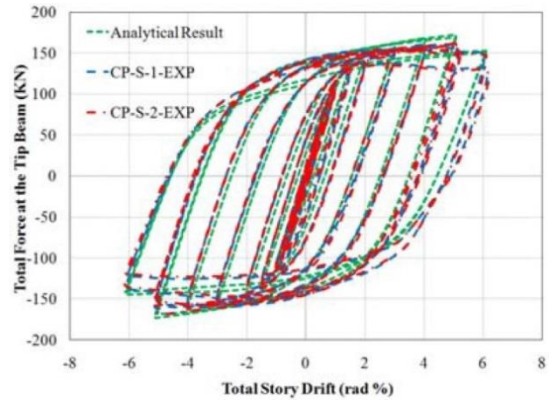
تنش‌های پسماند جوشکاری قبل از آغاز بارگذاری چرخه‌ای، در نواحی اطراف جوشکاری و مخصوصاً در انتهای گذرهای جوشکاری مقادیر قابل توجهی دارند. از طرفی در شکل (۴۲) و (۴۳) مشاهده می‌شود که در انتهای چرخه‌های بارگذاری در هر دو مدل، مکانیزم خرابی اتصال در تیر و در ناحیه‌ای خارج از ورق‌های زیرسری و روسری به خوبی قابل برداشت است. علاوه بر این، وجود تمرکز تنش در نواحی انتهایی گذرهای جوش مشاهده می‌شود که منطبق با مشاهدات تجربی است.

۵- نتیجه‌گیری

خلاصه‌ای از اهم نتایج به دست آمده در این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد:



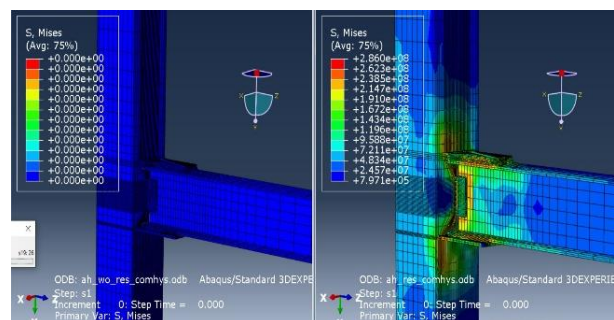
شکل ۳۸- نتایج عددی مدل موجود در این پژوهش



شکل ۳۹- نتایج عددی و تجربی اتصال در مطالعات Saneei Nia همکارانش [۱۹]

۴-۳-۲- مقایسه نتایج

نمودارهای توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل برای هر یک از دو مدل قبل از شروع و انتهای چرخه‌های بارگذاری آورده شده است. در شکل‌های (۴۰) تا (۴۳) تصویر سمت راست، مدل دارای تنش‌های پسماند جوشکاری و تصویر سمت چپ مدل، بدون لحاظ کردن تنش‌های پسماند جوشکاری است.



شکل ۴۰- تنش فون میسز (Pa) قبل از شروع بار گذاری

با توجه به شکل‌های (۴۰) و (۴۱) می‌توان دریافت که

- [9] Tsai, C., Park, S. and Cheng W. (1999), "Welding distortion of a thin-plate panel structure", *Welding Journal-New York*, Vol. 78, pp. 156-s.
- [10] Deo, M. and Michaleris, P. (2002), "Experimental verification of distortion analysis of welded stiffeners", *Journal of ship production*, Vol. 18, pp. 216-225.
- [11] Yajiang, L., Juan, W., Maoai, C. and Xiaolin, S. (2004), "Finite element analysis of residual stress in the welded zone of a high strength steel", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 27, pp. 127-132.
- [12] Barsoum, Z. (2007), "Residual stress prediction and relaxation in welded tubular joint", *Welding in the World*, Vol. 51, pp. 23-30.
- [13] Wang, R., Rashed, S., Serizawa, H., Murakawa, H. and Zhang, J. (2008), "Numerical and experimental investigations on welding deformation", *Transactions of JWRI*, Vol. 37, pp. 79-90.
- [14] Biswas, P., Mahapatra, M.M. and Mandal, N.R. (2010), "Numerical and experimental study on prediction of thermal history and residual deformation of double-sided fillet welding", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, pp. 125-134.
- [15] Chand, R.R., Kim, I.S., Lee, J.H., Jung, S.M. and Lee, J.P. (2012), "Numerical studies on residual stress and strain distribution in thick-welded plate", *King Mongkut's University of Technology North Bangkok International Journal of Applied Science and Technology*, Vol. 5, pp. 65-71.
- [16] Tsirkas, S., Papanikos, P. and Keramidis, T. (2003), "Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens", *Journal of materials processing technology*, Vol. 134, pp. 59-69.
- [17] Chang, P.-H. and Teng, T.-L. (2004), "Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints", *Computational Materials Science*, Vol. 29, pp. 511-522.
- [18] Gery, D., Long, H. and Maropoulos, P. (2005), "Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 393-401.
- [19] Saneei Nia, Z., Mazroi, A. and Ghassemieh, M. (2014), "Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 101, pp. 207-223.
- [20] Saneei Nia, Z., Mazroi, A., Ghassemieh, M. and Pezeshki, H. (2014), "Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 13, pp. 717-729.
- [21] Stamenković, D. and Vasović, I. (2009), "Finite element analysis of residual stress in butt welding two similar plates", *Scientific Technical Review*, Vol. 59, pp. 57-60.
- [22] FEMA, 2000, 350 Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for new steel moment-frame buildings, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency.
- [23] Seismic provisions for structural steel buildings, 2002, American Institute of Steel Construction.

- میزان تنش‌های پسماند در هر ناحیه به میزان شار حرارتی وارد شده به آن‌ها وابسته‌اند. هرچه میزان شار حرارتی وارد شده به ناحیه‌ای از اتصال بیشتر باشد (دمای بالاتر) تنش پسماند آن ناحیه نیز بزرگتر است.
- در صورتی که میزان شار حرارتی بالا باشد بزرگی تنش‌های پسماند پس از چرخه سرمایش قطعه و در دمای محیط به حد تسلیم فلز می‌رشد و نشان از حالت پلاستیک قطعه در ناحیه‌ای از جوشکاری است.
- در جوشکاری دو گذره، به دلیل وارد شدن شار حرارتی بیشتر به ناحیه اطراف جوش، تنش‌های پسماند بزرگتری نسبت به نواحی اطراف جوش‌های تک گذره شکل می‌گیرند.
- تنش‌های شکل گرفته در نواحی نزدیک به حوضچه مذاب به صورت کلی از جنس کششی می‌باشند و با دور شدن از این ناحیه جنس تنش‌های پسماند به فشاری تغییر پیدا می‌کند.
- در این مطالعه، نتایج مدل‌های اجزاء محدود در بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی انطباق خوبی با سایر نتایج آزمایشگاهی و تجربی ارائه نمودند.

۶- مراجع

- [1] Chihoski, R.A. (1972), "Understanding weld cracking in aluminum sheet (Al sheet weld cracking, discussing hold-down, localized heating, welding speed and gap effects)", *Welding journal*, Vol. 51, pp. 24-30.
- [2] Chihoski, R.A. (1972), "The character of stress fields around a weld arc moving on aluminum sheet", *Welding Journal*, Vol. 51, pp. 9.
- [3] Hibbitt, H.D. and Marcal, P.V. (1973), "A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure", *Computers & Structures*, Vol. 3, pp. 1145-1174.
- [4] Andersson, B.A.B. (1978), "Thermal stresses in a submerged-arc welded joint considering phase transformations", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 356-362.
- [5] Brown, S. and Song, H. (1992), "Implications of three-dimensional numerical simulations of welding of large structures", *Welding Journal*, Vol. 71, pp. 55-62.
- [6] Brown, S. and Song, H. (1992), "Finite element simulation of welding of large structures", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 441-451.
- [7] Michaleris, P. and DeBiccari, A. (1997), "Prediction of welding distortion", *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, Vol. 76, pp. 172s.
- [8] Cui, W. and Mansour A.E. (1998), "Effects of welding distortions and residual stresses on the ultimate strength of long rectangular plates under uniaxial compression", *Marine Structures*, Vol. 11, pp. 251-269.

