نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 25-13

کمینه‌سازی اعوجاج ناشی از جوشکاری، با استفاده از توالی بهینه در یک پانل بزرگ فولادی

سعید شادکام[1]، اسلام رنجبرنوده*[2]، مهدی ایرانمنش[1]

1- دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت مقاله: 1396/07/06 ؛ پذیرش مقاله: 1398/01/25)

چکیده

جوشکاری به طور گسترده ای در صنایع برای مونتاژ محصولات مختلف مانند کشتی، اتومبیل، قطار و پل استفاده می شود. اعوجاج جوش اغلب نتایجی مانند عدم دقت ابعادی در طول مونتاژ و افزایش هزینه های ساخت را درپی دارد. بنابراین، پیش‌بینی و کاهش اعوجاج جوش برای بهبود کیفیت سازه جوش داده شده بسیار مهم است. در این مطالعه پیش‌بینی اعوجاج ابتدا با استفاده ترکیب آنالیز المان محدود حرارتی الاستیک – پلاستیک و روش الاستیک که بر اساس تئوری تغییرشکل‌های ذاتی است، توسعه داده شد. پس از آن تغییرشکل‌های ذاتی اتصالات جوشی در طول پروسه جوشکاری پانل بزرگ بدست آمد و خصوصیات آن مورد بررسی قرار گرفت. پس از بدست آوردن تغییرشکل‌های ذاتی از روش سودمند الاستیک جهت آنالیز اعوجاج پانل بزرگ استفاده شد. در نهایت تاثیر ترتیب جوشکاری بر روی اعوجاج پانل بزرگ بررسی شد. نتایج آنالیز الاستیک اعوجاج‌هایی را در لبه‌های پانل و مناطق داخلی آن نشان داد، که با تغییر ترتیب جوشکاری تقویتی‌های پانل به یک ترتیب جوشکاری متقارن می‌توان این اعوجاج‌ها را کاهش داد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی جوش، روش الاستیک، پانل تقویت شده، ترتیب جوشکاری، اعوجاج.

Minimizing distortion caused by welding, by sequencing optimization in a large steel panel

S. Shadkam[1], E. Ranjbar Nodeh*[2], M. Iranmanesh[1]

1- Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received 28 September 2017 ; Accepted 14 April 2019)

Abstract

Increasingly, Welding is used in industry for assembled various products, such as ships, cars, trains and bridges. Welding distortion often results such as lack of accuracy during assembly and will have increases manufacturing costs.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: islam_ranjbar@aut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

So, predict and reduce welding distortion is very important to improve the quality of welded structures. In this study, firstly, a prediction method of welding distortion, which merges thermo-elastic-plastic finite element method (FEM) and large deformation elastic FEM based on inherent strain theory, was developed. Secondly, the inherent deformations of weld joints in a large thin plate panel structure were calculated using the thermo-elastic-plastic FEM and their specifications were also examined. Then, using the obtained inherent deformations, the usefulness of the proposed elastic FEM was demonstrated through the prediction of welding distortion in the large thin plate panel structures. Finally, the influences of welding sequence on distortion were investigated. The results of elastic analysis shows distortion in edges and interior parts of the panels, that can be reduced by changing welding sequence to symmetrical welding sequence.

Keywords: Welding simulation, Elastic method, Reinforced panel, Welding sequence, Distortion.

1- مقدمه

تکنولوژی جوشکاری یکی از روش‌های اصلی اتصال است و به طور گسترده‌ای در صنایع برای مونتاژ تولیدات مختلف مثل کشتی‌ها، اتومبیل ها، قطارها، و پل‌ها استفاده می شود. برای مثال فرآیند مونتاژ در کشتی سازی اساساً شامل اتصال بلوک‌های بزرگ است. عموماً، این بلوک‌ها دارای ورق‌های نازک کاملاً جوشکاری شده‌اند. در طول ساخت این بلوک‌ها، اعوجاج به دلایل مختلف مانند برشکاری و جوشکاری رخ می‌دهد. اعوجاج ناشی از جوشکاری هزینه ساخت را افزایش می‌دهد. اگرچه از بین بردن کامل اعوجاج عملاً دشوار است، اما تولید بلوک‌های با سطح دقت کافی برای جلوگیری از مشکلات حاصل در طی مونتاژ امکان‌پذیر است. بنابراین، برای سازه‌های جوش داده شده بزرگ، پیش‌بینی کمی و کنترل اعوجاج در طول فرآیند مونتاژ بسیار مهم است[1]. اعوجاج‌های ناشی از جوش نه‌تنها بر ابعاد قطعه جوشکاری‌شده بلکه به‌طور مشخص بر کارایی و کیفیت آن نیز تأثیر می‌گذارند. اصلاح اعوجاج‌های ایجاد شده نیاز به عملیات‌های وقت‌گیری دارد که در نهایت باعث می‌شود کیفیت جوش‌های انجام شده کاهش یابد. برای اطمینان از صحت تولید، ایجاد یک سیستم مدیریت دقت در ساخت سازه‌های نازک صفحه‌ای یک امر ضروری است. در صنعت کشتی‌سازی مدیریت دقت در تولیدات یکی از مهمترین مسایل است. به طور کلی دو راه اصلی برای رسیدن به هدف مدیریت دقت وجود دارد: یکی این‌که کنترل دقیق از طریق کاهش تغییرات ایجاد شده در طی فرآیند اسمبل کردن و راه دیگر برنامه ریزی دقیق در مرحله طراحی تولید است. اگر برای جوشکاری پانل‌های نازک و بزرگ بتوان مولفه‌های کمانشی و اعوجاج را پیش از جوشکاری پیش‌بینی نمود، این پیش‌بینی می‌تواند در بهبود دقت ساخت، نقش بزرگی ایفا نماید. ساتو و همکارانش روی رفتار کمانش ورق‌های نازک که تحت جوش قرار گرفته اند مطالعه داشته اند[1]. ناماتو و همکارانش روی متغیرهایی که در طول فرآیند جوشکاری اعوجاج کمانش را کنترل می کنند، با استفاده از روش تجربی و عددی به مطالعه پرداختند[2]. یوئدا و همکارانش با استفاده از روش تحلیل اجزای‌محدود کرنش صفحه‌ای تعمیم یافته به محاسبه اعوجاج زاویه‌ای در جوش‌های نبشی پرداختند. همچنین تأثیرات ترتیب جوشکاری و شرایط محدودکننده اعمالی خارجی را روی اعوجاج زاویه‌ای ایجادشده مورد بررسی قرار دادند[3]. ونگ و همکاران با انجام آزمایش‌هایی روی یک پانل کشتی به اندازه‌گیری اعوجاج ناشی از جوشکاری پرداختند. روش جوشکاری مورد استفاده مگ با گاز محافظ دی‌اکسیدکربن بوده است. آن‌ها از آزمایش‌هایشان نتیجه گرفتند که میزان حرارت ورودی نقش بزرگی در ایجاد اعوجاج روی ورق‌ها ایفا می‌کند[4]. دنگ و همکاران روی پیش‌بینی کمانش ناشی از جوشکاری در سازه‌های صفحه‌ای بزرگ و نازک مطالعه و پژوهش کردند. آن‌ها برای پیش‌بینی اعوجاج ایجاد شده ناشی از جوشکاری از ترکیب دو روش المان محدود ترموالاستیک‌پلاستیک و المان محدود الاستیک استفاده کردند و مفید بودن این روش‌ها را برای صفحات نازک نشان دادند. در نهایت تأثیر پارامترهایی مثل حرارت ورودی، فرآیند جوشکاری، ترتیب جوشکاری، ضخامت ورق و فاصله بین

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

تقویتی‌ها را روی اعوجاج ایجاد شده بررسی کردند[5]. لیانگ و همکارانش با استفاده از روش تحلیل اجزای‌محدود، روش ساده و پر بازدهی برای تخمین تغییرشکل‌های ذاتی در اتصالات رایج ارائه کردند تا در نهایت از طریق آن بتوانند تغییر شکل‌های ایجاد شده را در ورق‌های بزرگ پیش‌بینی کنند[6]. جیانگ چائو ونگ و همکارانش در پژوهشی که با استفاده از روش المان‌محدود الاستیک که بر اساس تئوری تغییرشکل‌های ذاتی انجام دادند، توانستند اعوجاج‌های خارج از صفحه‌ای ناشی از جوش را محاسبه کنند. سپس برای کم کردن کمانش و خمش ایجاد شده از حرارت خطی استفاده کردند[7]. ماراکاوا و همکارانش در سال 2013 با استفاده از روش آنالیز المان محدود الاستیک بر پایه تئوری تغییرشکل‌های ذاتی، اعوجاج ایجاد شده در یک پانل بزرگ پیش‌بینی کردند. آن‌ها از حرارت خطی برای کاهش اعوجاج خارج از صفحه استفاده کردند. این حرارت خطی در کاهش اعوجاج زاویه‌ای تأثیر خوبی داشت[8].

علیرغم وجود تحقیقاتی در این زمینه و طبق اطلاع نویسندگان، پژوهش جامعی در مورد تأثیر متغیرهای این روش بر میزان اعوجاج ناشی از جوشکاری در مورد فولاد اس ام 490 انجام نشده است. از این‌رو، در این مطالعه روش المان محدود حرارتی الاستیک - پلاستیک برای تخمین تغییرشکل‌های ذاتی برای اتصالات جوشی متفاوت که از یک مدل جوشکاری شده بزرگ استخراج شده‌اند استفاده شد. سپس، براساس تغییر شکل ذاتی به‌دست آمده، روش المان محدود الاستیک برای پیش‌بینی اعوجاج جوشکاری در یک مدل جوشکاری شده بزرگ به کار می‌رود. در همین حال، تأثیر ترتیب جوشکاری بر اعوجاج نهایی جوشکاری بررسی شده است. در نهایت نیز با استفاده از متغیر هندسه پانل بزرگ، به بررسی تأثیر شکل و جنس تقویت‌کننده پانل بر میزان اعوجاج پرداخته می‌شود.

2- شرح مدل ریاضی و آنالیز المان محدود

دو روش برای پیش بینی اعوجاج در جوشکاری می توان به‌کار گرفت. یکی آنالیز ترموالاستیک پلاستیک، به‌طوریکه فرآیند جوش به عنوان یک مساله گذرای غیرخطی مورد حل قرار می‌گیرد. روش دیگر روش کرنش ذاتی، به‌طوریکه اعوجاج به‌وسیله آنالیز الاستیک که در آن از کرنش های ذاتی به عنوان کرنش اصلی استفاده می شود، بدست می‌آید. این دو روش دارای مزایا و معایبی هستند.

در روش دوم مزیت در زمان محاسبه است و عیب آن این است که جزئیات و شرایط جوشکاری به‌طور کامل نمی‌تواند در نظر گرفته شوند. مفهوم کرنش ذاتی [9]، بسیار نزدیک به تنش ذاتی و نیروی ذاتی است. زمانی که قیود و موانع بسیار ضعیف باشند، کرنش ذاتی تبدیل به تغییر شکل ذاتی می گردد و زمانی که قیود قوی باشند به تنش تبدیل می شود. چارچوب شبیه‌سازی المان محدود برای فرآیند جوشکاری به سادگی می‌تواند با ادغام این دو بنا شود.

2-1-آنالیز ترموالاستوپلاستیک

تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که توسعه روش‌های عملی می‌تواند به صورت موثر و آسان اعوجاج ناشی از جوش را پیش‌بینی کند. اعوجاج ایجاد شده در طی فرآیند مونتاژ در نتیجه پدیده‌های غیرخطی است که شامل مواد غیرخطی (رفتار ترموالاستوپلاستیک جوش و فلز پایه) هندسه غیرخطی (تغییر شکل های بزرگ) است. بنابراین به منظور رسیدن به یک پیش‌بینی دقیق از اعوجاج ناشی از جوش این مسائل غیرخطی باید به دقت در نظر گرفته شوند.

در این مقاله بر اساس تحقیقات قبلی تلاش شد تا روش موثر و مفیدی برای پیش‌بینی و تخمین اعوجاج ناشی از جوشکاری با در نظر گرفتن این نوع مشکلات غیر خطی تعیین شود. روش ترموالاستو پلاستیک گذرا انتخابی خوب و امکان‌پذیر برای پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوشکاری در سازه‌های کوچک و متوسط است. در این تحلیل برای مدل‌سازی منبع حرارتی می‌توان از معادله حرارتی دو بیضی گلداک استفاده کرد.

اما بیشتر محققان برای شبیه‌سازی جوش با گاز از توزیع نرمال گاوسی استفاده می‌کنند. بنابراین در این مطالعه از مدل حرارتی گاوسی استفاده شده است که به صورت معادله (1) بیان می‌شود:

$$q_x = \frac{3.Q_{arc}}{\pi r_a^2}.\exp\left(-\left(\frac{r_x}{r_a}\right)^2\right) \quad (1)$$

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

که در آن Q_{arc} نشانگر حرارت ورودی برحسب وات (W) است و مطابق معادله (2) بیان می‌شود:

$$Q_{arc} = \eta UI \quad (2)$$

که در آن η راندمان قوس، U ولتاژ و I آمپراژ می باشد.

2-2-آنالیز الاستیک

روش ترموالاستیک پلاستیک یک روش عملی برای تحلیل اعوجاج های ناشی از جوشکاری در سازه‌های بزرگ و پیچیده نیست، چون مکانیک جوش آن به شدت مشکلات غیر خطی دارد و قدرت محاسباتی قابل توجهی مورد نیاز است. در حالی که روش الاستیک به کرنش‌های پلاستیک پسماند در نزدیکی نقطه ذوب به عنوان کرنش‌های ذاتی می‌پردازد که یک روش جایگزین برای پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوش در سازه‌های بزرگ است. چون روش کرنش‌های ذاتی به راحتی می تواند اعوجاج ناشی از جوش را با استفاده از تحلیل الاستیک المان محدود پیش‌بینی کند، پس این روش بسیار عملی‌تر و کارامدتر از روش ترموالاستوپلاستیک گذرا است. در این مقاله از روش المان محدود الاستیک که بر اساس تئوری کرنش‌های ذاتی است استفاده شده است تا اعوجاج ناشی از جوشکاری در سازه‌های بزرگ ورقی شکل را بتوان تخمین زد.

2-2-1-تئوری کرنش‌های ذاتی

در حین جوشکاری رفتار مکانیکی بسیار پیچیده است. به طور کلی پنج نوع کرنش الاستیک، پلاستیک، حرارتی، خزشی و انتقال فاز در قطعات به هم جوش داده شده به وجود می‌آید. بخش الاستیک قابل برگشت است و پس از سرد شدن قطعه حذف می‌شود، اما بقیه کرنش ها در قطعه به عنوان کرنش ذاتی می‌مانند. کرنش‌های ذاتی عامل اصلی به وجود آورنده اعوجاج‌ها و تنش‌های پسماند معرفی می‌شوند. این کرنش‌ها به عواملی چون ضخامت ورق‌ها، گرمای ورودی، سرعت جوشکاری، نوع اتصال و غیره بستگی دارند. به طور کلی کرنش‌های پدید آمده در یک سازه جوشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود[10].

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{thermal} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{phase} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{total} - \varepsilon_{elastic} = \varepsilon_{plastic} + \varepsilon_{thermal} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{phase} = \varepsilon_{inherent} = \varepsilon^* \quad (4)$$

مطابق رابطه (4) کرنش ذاتی برابر است با مجموع کرنش‌های پلاستیک و حرارتی. اما در جوش با گاز مقدار کرنش حرارتی ناچیز است و از آن صرف نظر می‌شود. پس مقدار کرنش ذاتی با مقدار کرنش پلاستیک در هر جهت برابر است.

2-2-2- تئوری تغییرشکل‌های ذاتی

می‌توان از کرنش‌های ذاتی به صورت مستقیم استفاده نمود و آن‌ها را به مدل الاستیک اعمال کرد، اما این کاری بسیار زمان‌بر است. به این صورت که اعمال این کرنش‌ها به عنوان کرنش اولیه به مدل الاستیک و به تک‌تک گره‌ها بسیار سخت است. با این فرض که در یک سازه جوشی در هر مقطع عمود بر خط جوش یک مقدار ذاتی از تغییرشکل وجود دارد، تئوری تغییر شکل‌های ذاتی مطرح شده است. می‌توان این مقدار که یک عدد برای هر نوع تغییر شکل و هر مقطع است را با توزیع کرنش‌های ذاتی جایگزین کرد. بنابراین با این روش برای هر مقطع چهار تغییرشکل ذاتی انقباض طولی، انقباض عرضی، پیچش طولی و پیچش عرضی وجود دارد. تغییرشکل‌های ناشی از جوشکاری مانند انقباض طولی و عرضی و اعوجاج زاویه‌ای اغلب به‌وسیله‌ی کرنش‌های ذاتی طولی و عرضی (ε^*_x و ε^*_z) به‌وجود می‌آیند. با انتگرال‌گیری از کرنش ذاتی بر روی سطح مقطع عمود بر خط جوش و به‌صورت میانگین برای ضخامت (h) مقدار تغییرشکل ذاتی به‌دست می‌آید[10و11].

$$\delta_L^* = \frac{1}{h}\iint \varepsilon_z^* dydz \quad (5)$$

$$\delta_T^* = \frac{1}{h}\iint \varepsilon_x^* dydz \quad (6)$$

$$\theta_L^* = \frac{12}{h^3}\iint \left(y - h/2\right)\varepsilon_z^* dydz \quad (7)$$

$$\theta_T^* = \frac{12}{h^3}\iint \left(y - h/2\right)\varepsilon_x^* dydz \quad (8)$$

در روابط بالا δ_L^* انقباض طولی، δ_T^* انقباض عرضی، θ_L^* اعوجاج زاویه‌ای یا پیچش در جهت طول و θ_T^* اعوجاج زاویه‌ای یا پیچش در جهت عرض می‌باشند.

2-2-3- شرح فرآیند آنالیز الاستیک

روش شبیه‌سازی الاستیک برای سازه‌های نازک ورقی شکل مناسب است. اعوجاج ناشی از جوش را می‌توان به وسیله

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

اعمال کرنش‌های ذاتی در هر مرحله ساخت در یک اتصال جوشی مطابق یک ترتیب جوشکاری شبیه‌سازی کرد. در روش آنالیز المان محدود الاستیک برای شبیه‌سازی قسمت‌های جوش داده شده از المان صفحه‌ای‌شکل، 4 گره‌ای استفاده می‌شود. به طور کلی کرنش‌های پلاستیک باقیمانده فقط در نزدیکی نقطه جوش داده شده توزیع شده است[12]. کرنش‌های ذاتی در مناطق اطراف خط جوش در طول خط جوش به جز نقاط ابتدایی و انتهایی تقریباً یکسان هستند. به همین خاطر برای محاسبه تغییرشکل‌های ذاتی کافیست که تغییرشکل‌ها را در یک مقطع، مثلاً مقطع میانی حساب کرده و به کل قطعه تعمیم داد. پس از بدست آوردن تغییرشکل‌های ذاتی، کرنش‌های پلاستیک هر المان را در سطح مقطع همان المان ضرب می کنند و با استفاده از روابط(5 تا 8) به صورت عددی محاسبه می‌شوند. با اعمال این تغییرشکل‌ها به مدل طراحی شده و حل آن به صورت پایدار، مدل به صورت الاستیک تحلیل می‌شود.

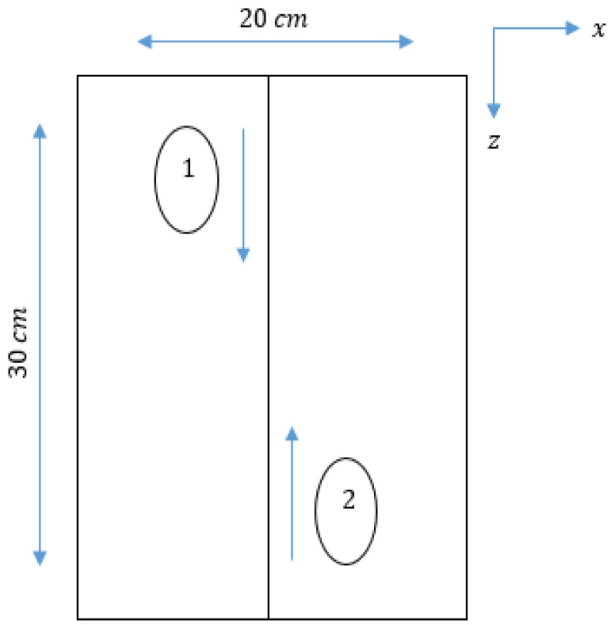
3- شرح فرآیند تجربی

آزمایش روی یک ورق فولاد به ابعاد 300×200×6 میلی متر و تقویتی به ابعاد 300×100×6 میلی متر با دستگاه جوش نیمه‌اتوماتیک گازCo_2 برای انجام جوشکاری ورق به صورت فیلت، اجرا شده است. مشعل دستگاه جوش با زاویه 45 درجه برروی دستگاه برش اتوماتیک نصب و روی سرعت 5 mm/s تنظیم شد. ترتیب جوشکاری موجود در این نمونه مطابق شکل(1) انجام شده است.

آزمایش مورد استفاده برای ورق جوشکاری شده دارای شرایط جوشکاری از جمله شدت جریان، ولتاژ، سرعت دستگاه جوش و راندمان جوش است. در جدول(1) شرایط جوشکاری معرفی شده است .

جدول1-شرایط جوشکاری فولاد اس ام 490

Current	Voltage	Velocity	Efficiency
100 A	25 V	5 mm/s	0.8



شکل1-ترتیب جوشکاری در مدل مورد آزمایش

برای اعتبار سنجی مدل، تاب ورق نشان داده شده در شکل (2) در راستای قائم در دو طرف قطعه اندازه‌گیری شد و نتایج آن استخراج گردید. شکل (2) ورق بعد از جوشکاری را نشان می‌دهد.



شکل2- ورق بعد از انجام جوشکاری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

4- بدست آوردن تغییرشکل‌های ذاتی و آنالیز الاستیک برای مدل آزمایشگاهی

تغییرشکل‌های ذاتی معرفی شده در معادلات (5 الی 8) به حرارت ورودی، خواص مواد و ضخامت اتصال بستگی دارد.

این تغییرشکل‌ها اگر طول خط جوش به اندازه کافی بزرگ باشد، مستقل از طول و عرض یک اتصال جوشی است. بنابراین اگر تغییرشکل ذاتی برای یک اتصال جوشی تعیین شود، می‌توان آن را برای سازه‌های بزرگ نیز استفاده کرد[13].

به طور کلی دو روش اصلی که می توان به وسیله آن تغییر شکل ذاتی را به دست آورد وجود دارد، یکی روش آزمایشگاهی و دومی روش المان محدود ترموالاستوپلاستیک است که در این مقاله دومین روش انتخاب شده است. در طی مسیر محاسبه تغییرشکل ذاتی مشکل غیرخطی بودن مواد از طریق روش المان محدود ترموالاستو پلاستیک و وابستگی خواص حرارتی و مکانیکی مواد به دما در نظر گرفته می‌شود[11].

4-1- تحلیل ترموالاستوپلاستیک

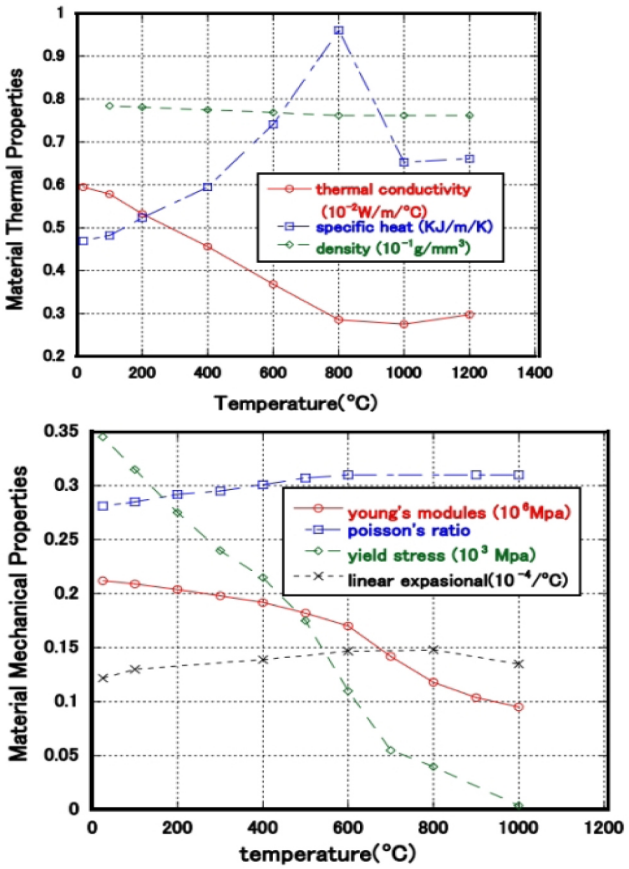
فلز استفاده شده در این شبیه‌سازی فولاد کشتی‌سازی اس ام 490 است که ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول(2) آمده است. برای شبیه سازی حرارتی و مکانیکی یک نمونه باید تا حد امکان شرایط واقعی مسأله درنظر گرفته شود تا بتوان نتایج درستی بدست آورد.

از آنجایی که خواص حرارتی و ترمومکانیکی فلزات با افزایش دما تغییر می‌کند، باید این تغییرات را در شبیه‌سازی جوش فلزات درنظر گرفت. خواص مواد حرارتی و مکانیکی فولاد اس ام 490 که در آنالیز ترموالاستو پلاستیک استفاده شده است، در شکل(3) نشان داده شده است[13].

جدول 2- ترکیب شیمیایی فولاد اس ام 490

عنصر	فسفر	منگنز	سیلیسیم	کربن	گوگرد
درصد جرمی	0/035	0/56	-	0/32	0/035

بر اساس مدل آزمایشگاهی موجود، مدل سه‌بعدی جوش گوشه مطابق شکل(4) طراحی گردید. پس از ترسیم مدل در ابتدا با المان Solid 278 مش بندی می‌شود. تعداد کل المان‌ها و گره‌ها، به ترتیب 96542 و 85636 می باشد و برای این‌که مدل از دقت کافی برخوردار گردد، مش‌بندی اتصالات به‌گونه‌ای است که با نزدیک شدن به گرده جوش المان‌ها ریزتر شده اند. همه المان‌ها به صورت مکعبی بوده و دارای 8 گره می‌باشند.



شکل3-خواص مواد وابسته به دما برای فولاد اس ام 490[13]

کوچکترین المان‌ها در خط جوش بوده و اندازه آن‌ها 0/6 میلی‌متر می‌باشد. به این صورت که وتر فلز پرکننده و ضخامت فلز پایه به 10 قسمت تقسیم شده‌اند. همچنین بزرگترین المان‌ها در دو لبه فلز پایه بوده اندازه آن‌ها 1/525 سانتی‌متر می‌باشد. در آخرین مرحله از مش‌بندی باید از نوعی المان سطحی برای اعمال شار حرارتی سطحی ناشی از منبع حرارتی و همچنین در صورت لزوم شرط مرزی تشعشع استفاده کرد. چراکه خود

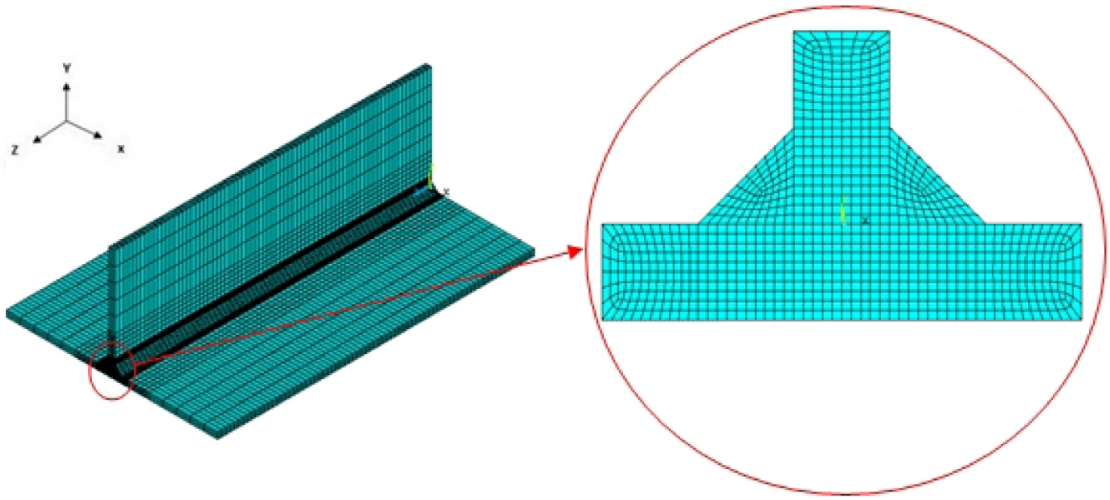
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

المان‌های سالید این شرایط را مهیا نمی‌کنند. بنابراین در این شبیه‌سازی از المان‌های 4 گره‌ای Surf 152 برای اعمال شار حرارتی ناشی از منبع حرارتی و همچنین شرط مرزی تشعشع استفاده شده است. جهت جوش به موازات محورZ است.

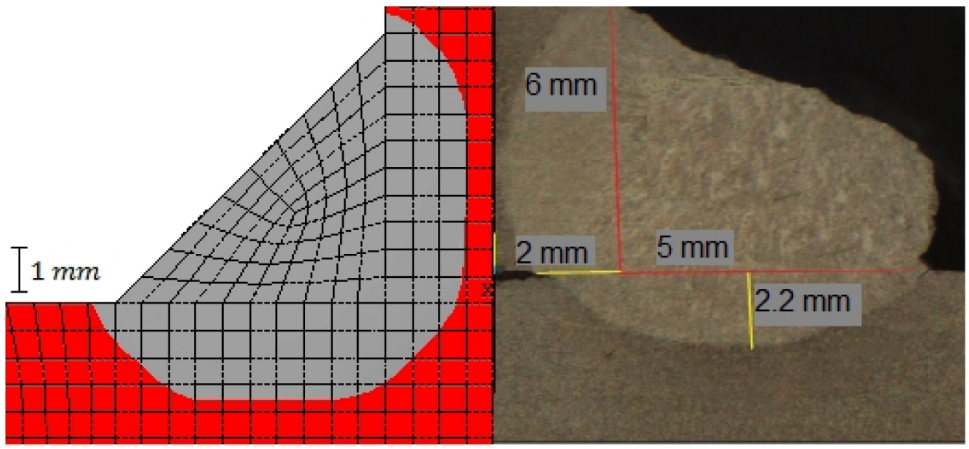
به‌منظور شبیه‌سازی اضافه شدن فلز پرکننده در فرآیند جوشکاری و همچنین به‌منظور حذف المان‌های مربوط به مسیر جوش در فرآیند جوشکاری از تکنیک تولد و مرگ المان استفاده شده است. در این روش تمام المان‌ها اعم از آن‌هایی‌که متعلق به فلزات پایه و یا فلز جوش هستند در ابتدا مدل می‌گردند، سپس المان‌هایی که از نظر زمانی وجود ندارند، در حالت مرگ قرار می‌گیرند.

این المان‌ها پس از رسیدن منبع حرارتی زنده می‌شوند و حرارت منبع به آن‌ها اعمال می‌گردد. منظور از کشتن المان، ضرب کردن ضریب سختی المان در یک عدد بسیار کم است تا عملاً از فرآیند تحلیل حذف شوند.

پس از انجام تحلیل حرارتی مطابق شکل(5) حوضچه جوش بدست آمده از تحلیل با حوضچه جوش بدست آمده از عکس‌های متالوگرافی با هم مقایسه شدند. همچنین با توجه به توضیحات داده شده در قسمت مش‌بندی اندازه هر پاره خط در ناحیه حوضچه جوش 0/6 میلی‌متر می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل حوضچه جوش بدست آمده از شبیه‌سازی عمق نفوذ 1/8 و 2 میلی‌متر است، که برای حوضچه مدل تجربی عمق نفوذ



شکل4- مدل المان محدود اتصال گوشه

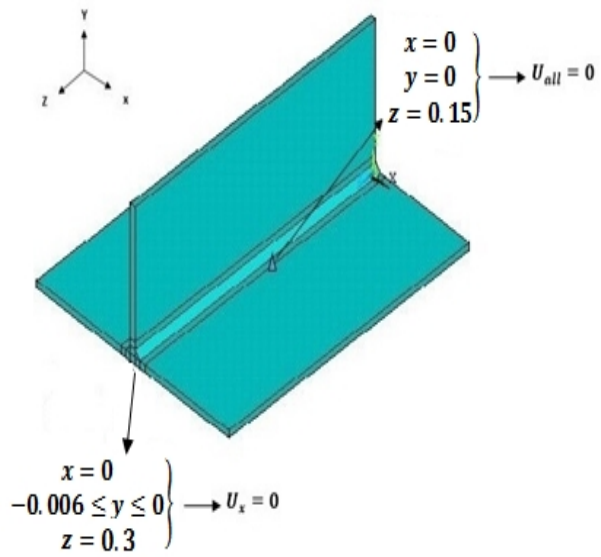


ب الف

شکل 5- صحه‌گذاری مدل حرارتی، الف) حوضچه جوش تجربی و ب) حوضچه جوش شبیه‌سازی شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

به ترتیب 2 و 2/2 میلی‌متری است. با این اطلاعات شبیه‌سازی حرارتی نمونه تجربی با خطای 10 درصدی همراه است که قابل قبول می‌باشد. برای تحلیل مکانیکی نتایج دمایی حاصل از تحلیل حرارتی فراخوانده شده و به عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بدین منظور کلیه نموهای هر مرحله بارگذاری حرارتی فراخوانی شده و تحت تحلیل مکانیکی قرار می‌گیرند. زمان هر بارگذاری مکانیکی همانند تحلیل حرارتی با توجه به سرعت جوشکاری به دست آمده است. نوع مش بکار رفته در تحلیل مکانیکی به‌منظور انتقال خروجی‌های حرارتی به آن، مانند تحلیل حرارتی است، فقط نوع المان بکار رفته تغییر کرده و از المان Solid 45 که دارای درجه آزادی جابجایی در سه بعد است، استفاده شده است. برای جلوگیری از ایجاد خطای ناشی از حرکت صلب نمونه در تحلیل مکانیکی در اتصال گوشه مطابق شکل(6) قید جابجایی در یک صفحه به مختصات$X=0$ ، که در وسط مقطع قرار می‌گیرد، در جهت X اعمال شده، چراکه به علت تقارن این صفحه در راستای X جابجایی ندارد. همچنین از آن‌جایی که نقطه وسط سازه و در کف عملاً هیچ‌گونه جابجایی ندارد، درجه آزادی آن گره نیز در همه جهات بسته می‌شود.



شکل6- شرایط مرزی مکانیکی

با انجام آنالیز مکانیکی میزان جابجایی نقاط خط 1 در شکل(3)، محاسبه شد و مطابق شکل(7) با نتایج تحلیل مقایسه شد، که نتایج قابل قبولی را برای اعوجاج جوشکاری نشان داد. چرا که گرادیان حرارتی ایجاد شده در ضخامت ورق به خاطر حرارت ورودی، باعث تولید اعوجاج زاویه‌ای در طی فرآیند جوشکاری می‌شود.

4-2-آنالیز الاستیک

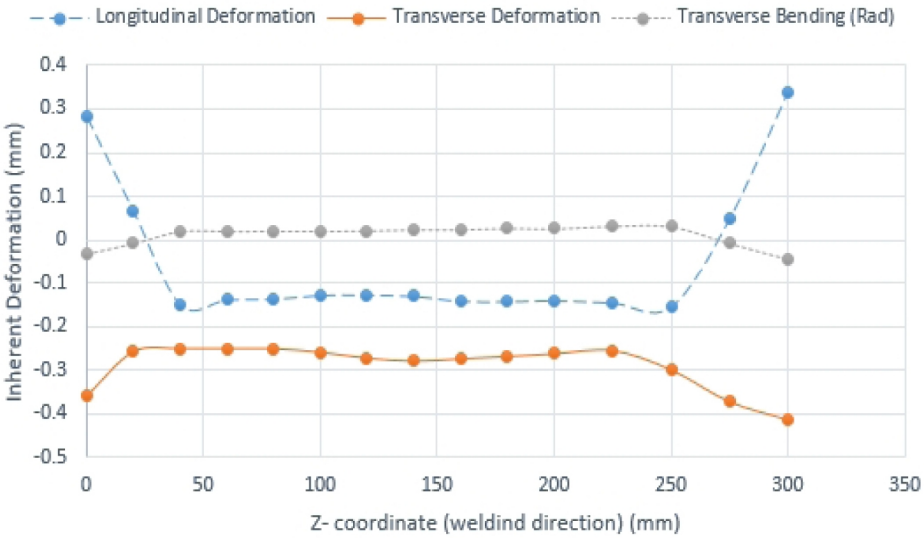
پس از بدست آوردن کرنش‌های ذاتی، مطابق معادلات(5 الی8) تغییرشکل‌های ذاتی محاسبه می‌شوند. شکل(7) توزیع تغییرشکل‌های ذاتی را در طول خط جوش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرشکل‌های ذاتی به جز در نقاط ابتدا و انتهای جوش، توزیع یکنواختی دارد. این امر به این دلیل است که تاریخچه دمایی مطابق شکل(8) برای همه نقاط به جز نقاط ابتدا و انتهای خط جوش یکسان است. بنابراین بار حرارتی یکسانی به همه جا اعمال می‌شود به گونه‌ای که می‌توان حرکت منبع حرارتی را شبه استاتیک درنظر گرفت .همچنین غیر یکسان بودن تغییر شکل‌ها و تاریخچه دمایی برای نقاط ابتدا و انتها را می‌توان اینگونه توجیه کرد که منبع حرارتی نسبت به این نقاط به نوعی شتاب‌دار است و حرارت یکسانی به همه نقاط نمی‌رسد. به همین خاطر برای محاسبه تغییرشکل‌های ذاتی کافیست که مقدار متوسط بخش مرکزی قطعه را حساب کرده و به کل قطعه تعمیم داد. پس از بدست آوردن تغییر شکل‌ها مطابق معادلات 5-8، با اعمال این تغییرشکل‌ها مطابق شکل(9) به مدل طراحی شده در قسمت بعد و حل آن به صورت گذرا، مدل به صورت الاستیک تحلیل می‌شود. برای این نمونه مورد بررسی مقدار تغییر شکل‌های ذاتی مطابق جدول(3) بدست آمده است .

پس از اتمام تحلیل، جهت صحت‌سنجی مدل الاستیک نتایج این تحلیل با داده‌های تجربی مقایسه شدند. شکل(10) جابجایی مدل در راستای قائم و شکل(11) مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل(10) مشاهده می‌شود بیشترین اعوجاج بدست آمده برای شبیه‌سازی 2/956 میلی‌متر است در حالی که این مقدار برای نمونه تجربی حدود 4 میلی‌متر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، اعوجاج در

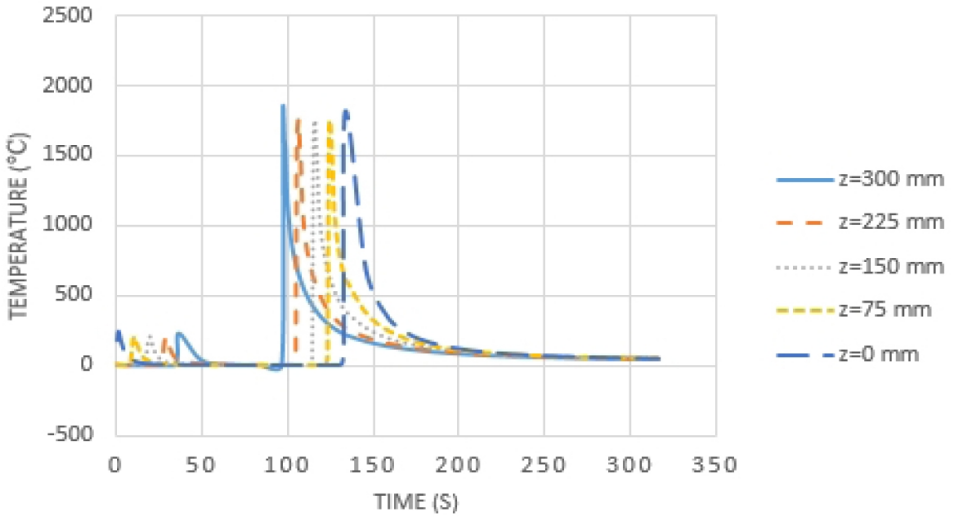
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جدول3- تغییرشکل‌های ذاتی مدل تخت در مقطع z=15 cm.

پی‌چش عرضی	انقباض عرضی	انقباض طولی
۰,۰۲۲	-۰,۲٤	-۰,۱۵



شکل7- توزیع تغییرشکل‌های ذاتی در جهت خط جوش



شکل8- نمودار دما - زمان در نقاط مختلف محل جوشکاری

روش تغییر شکل ذاتی حدود 25 درصد با مقدار واقعی اختلاف دارد. که این اختلاف برای شبیه‌سازی سازه‌های پیچیده قابل قبول است.

5-نتایج و بحث

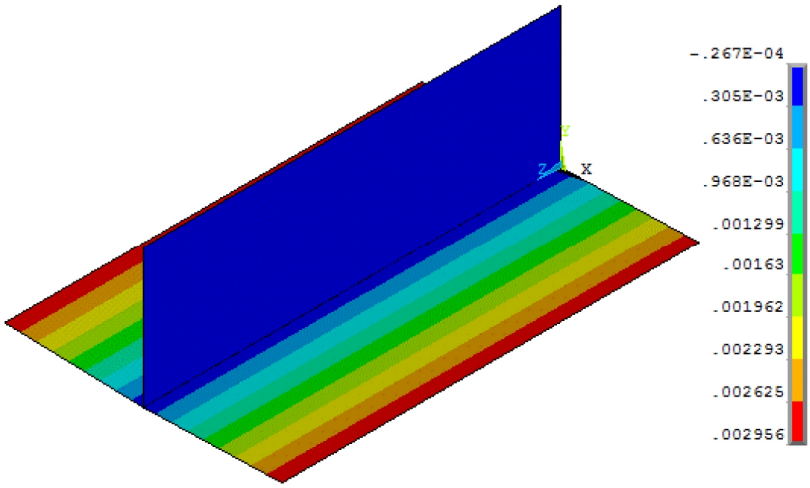
در این قسمت مطابق استانداردهای دریایی، مطابق شکل(12) سیستم فریم‌بندی را روی یک ورق 3×3 متری اجرا کرده و سپس هشت نوع ترتیب جوشکاری برای این سیستم انجام می‌شود تا بهترین نوع ترتیب جوشکاری انتخاب شود. در این قسمت از شاهتیر T شکل و تیرچه تخت استفاده می‌شود. در این نوع سیستم دو شاهتیر در عرض ورق با فاصله 2 متر از هم قرار گرفته و تیرچه‌ها در طول ورق به فاصله یک متر از هم قرار دارند. شرایط مرزی مساله همان شرایط مرزی تعریف شده در مدل کوچک است.

پس از انتخاب نوع سیستم فریم‌بندی مطابق شکل(13) هشت ترتیب جوشکاری مختلف جهت به دست آوردن بهترین ترتیب

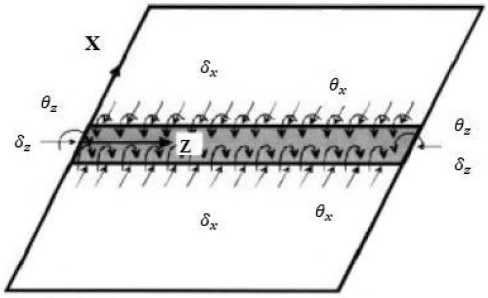
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

جوشکاری برای پانل مورد نظر رسم می‌شود. لازم به ذکر است که شرایط مرزی جهت انجام آنالیز برای پانل بزرگ همان شرایط مرزی موجود در مدل کوچک است.

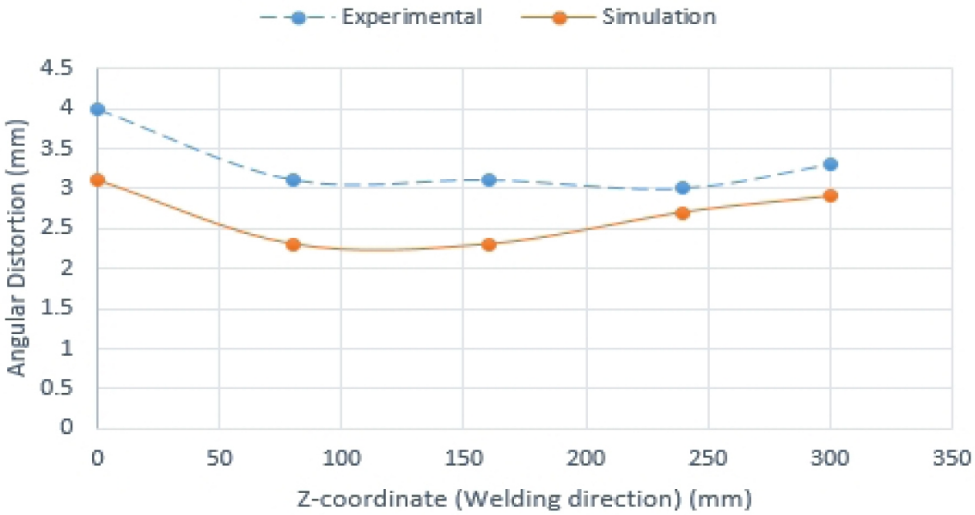
حال که توالی‌های جوشکاری مشخص شد، تمام این توالی‌ها روی پانل تقویت شده با شاه تیر T شکل و تیرچه تخت اعمال و بهترین ترتیب جوشکاری جهت کاهش اعوجاج معرفی



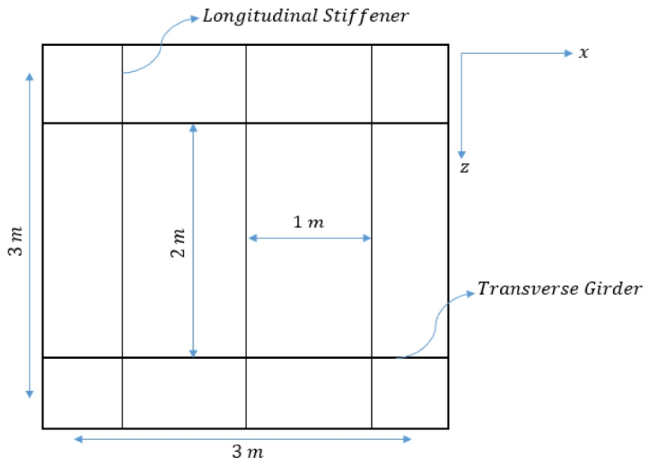
شکل9-بارگذاری تغییرشکل‌های ذاتی به مناطقی که در آن‌ها کرنش ذاتی تولید می‌شود جهت تحلیل الاستیک[14]



شکل10-اعواج ایجاد شده در مدل الاستیک در راستای Y



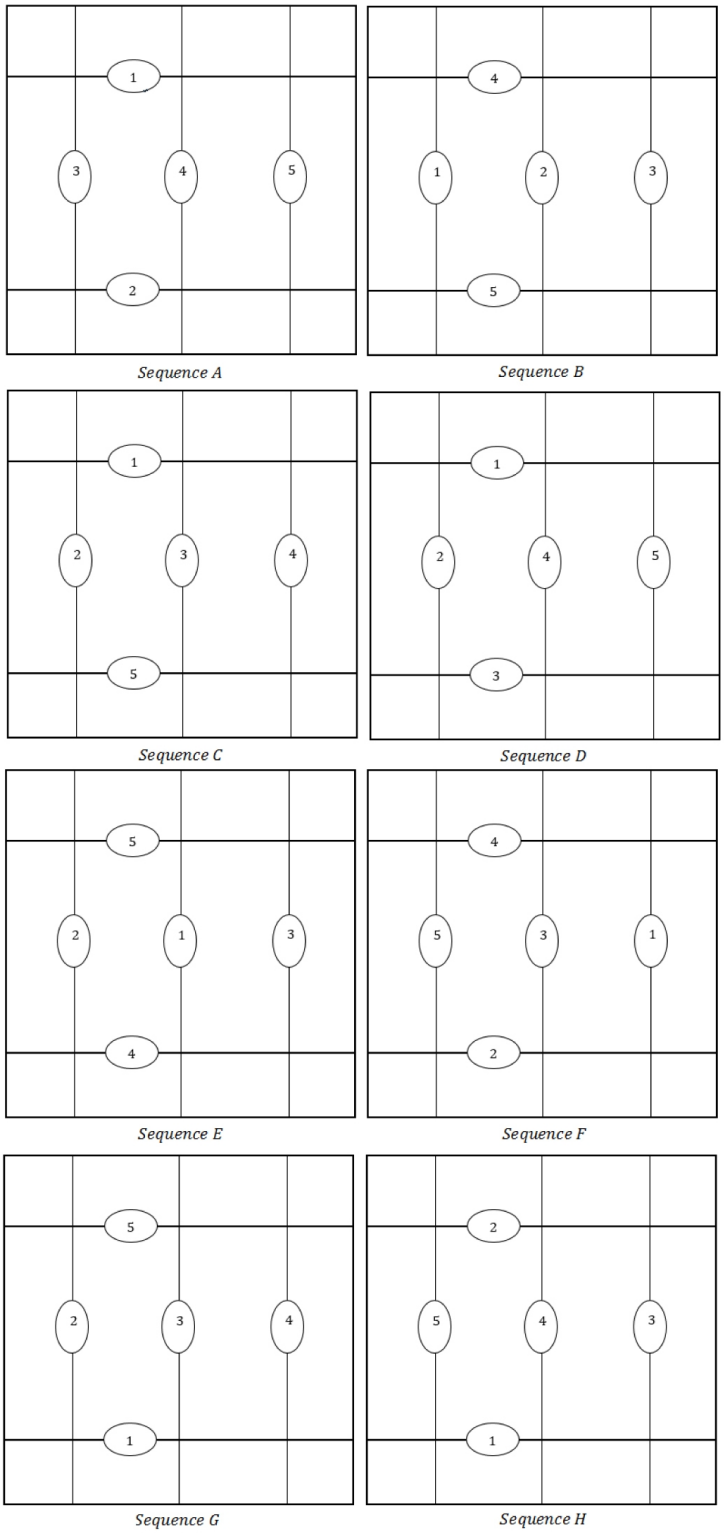
شکل11- اعواج ایجاد شده در مدل الاستیک و مدل تجربی در راستای Y در لبه ورق



شکل12- سیستم فریم‌بندی طولی در پانل بزرگ

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

می‌شود. شکل (14و15) توزیع اعوجاج ناشی از ترتیب‌های مختلف جوشکاری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ترتیب جوشکاری B دچار کمترین اعوجاج شده است. به طوری که میزان بالاآمدگی در این ترتیب جوشکاری حدود 4/3 میلی‌متر و میزان فرورفتگی در راستای قائم نیز حدود 9- میلی‌متر است.



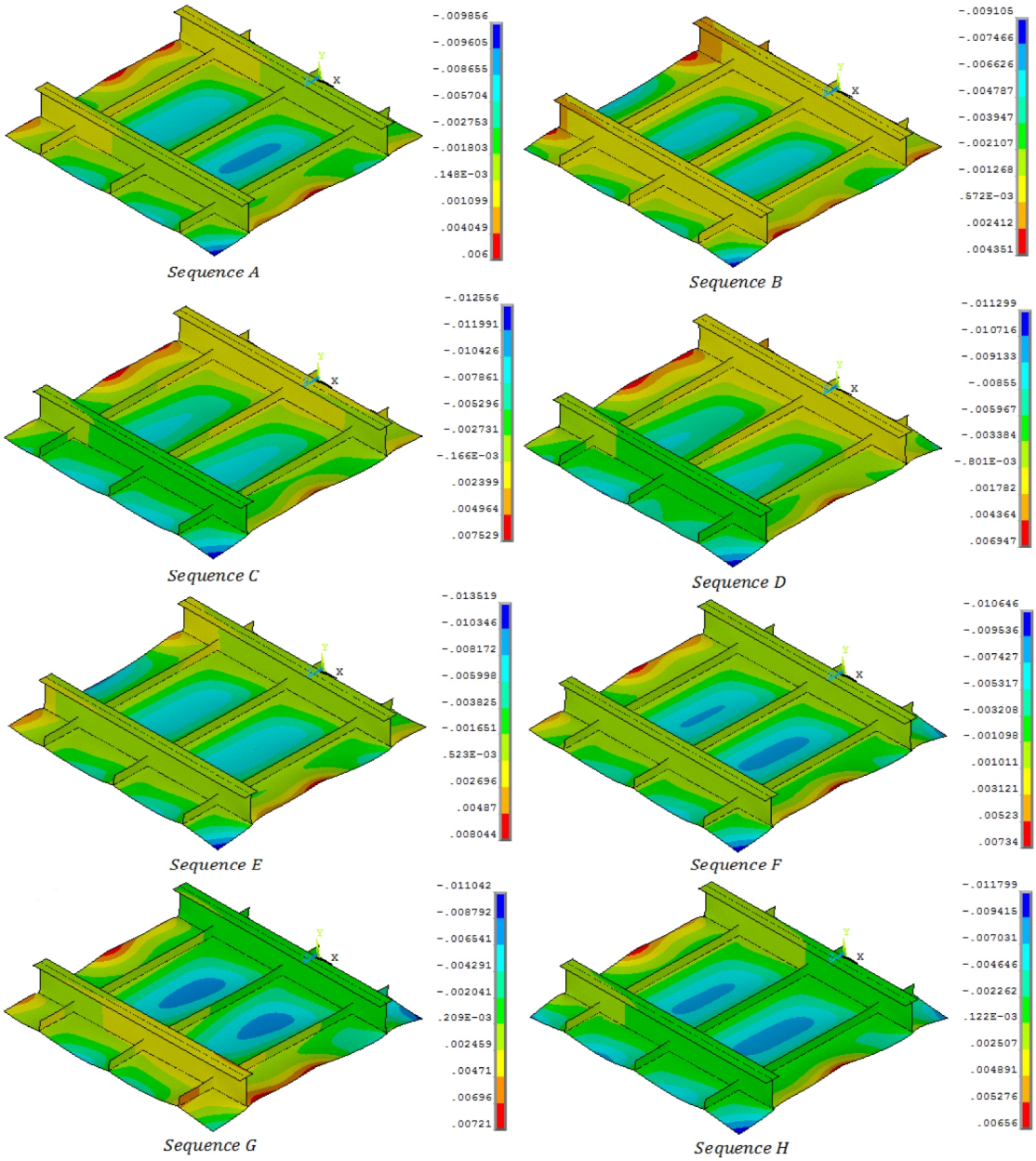
شکل13- ترتیب‌های جوشکاری پیشنهادی برای سیستم فریم‌بندی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

این در حالی است که بیشترین اعوجاج مربوط به ترتیب جوشکاریE است، که در راستای قائم به میزان 8میلی‌متر بالا آمده است و حدود 13 میلی‌متر نیز به سمت پایین فرورفتگی دارد. ترتیب جوشکاری B به دلیل اینکه حرارت متقارن‌تر به پانل وارد شده است، یعنی اینکه با جوشکاری کردن شاهترها به صورت متقارن و بعد تیرچه‌ها سفتی بالا می‌رود و به طبع آن پانل کمتر می‌تابد، پس کمترین میزان اعوجاج در این ترتیب جوشکاری مشاهده می‌شود.

6- نتیجه گیری

در این مطالعه سعی بر آن شد تا با استفاده از داده‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی عددی به روشی جدید برای آنالیز سازه‌های بزرگ جوشی دست یافت که نتایج آن به صورت زیر ارائه شده است. در این مطالعه برای شروع کار نیاز به اعتبار سنجی مدل حرارتی و مکانیکی بود، که با نتایج تجربی مطابقت داشته باشد. از این‌رو یک مدل کوچک با تقویتی نوع تخت طراحی و آنالیز شد. همان‌گونه که مشاهده شد نتایج شبیه‌سازی و تجربی



شکل14- اعوجاج ترتیب‌های مختلف جوشکاری در پانل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

مطابقت خوبی با هم داشتند. با انجام آنالیز حرارتی و مکانیکی مدل کوچک مشاهده شد که توزیع دما در ابتدا و انتهای قطعه غیریکنواخت و در بقیه قسمت‌ها دما به صورت یکنواخت توزیع شده بود، که با به‌دست آوردن کرنش‌های ذاتی برای مدل مشاهده شد که تغییرشکل‌های ذاتی نیز در این قسمت‌ها همانند توزیع دما به صورت یکنواخت توزیع شده بود و تقریباً برابر بودند.

در آنالیز المان محدود الاستیک یک پانل کناره کشتی متغیر ترتیب جوشکاری برای تقویتی‌های نصب شده بر روی پانل بررسی شد. مطابق نتایج ترتیب جوشکاری B کمترین اعوجاج را داشت که مقدار این اعوجاج در نقاط بالاآمدگی ورق حدود 4/3 میلی‌متر و در نقاط فرورفتگی ورق حدود 8- میلی‌متر بود. در حالی که بیشترین اعوجاج برای ترتیب جوشکاری E بود که به ترتیب 8 و 13- میلی‌متر اعوجاج در آن ایجاد شد.

منابع

[1] Watanabe, M., and Kunihiko S. "Fundamental study on buckling of thin steel plate due to bead-welding." *Journal of the Japan Welding Society* 27.6 (1958): 313-320.

[2] Nomoto, T., Shoji T., and Kazuhiro Aoyama. "Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations." *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* 1997.181 (1997): 249-260.

[3] Ueda, Y., and Taketo Y. "Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method." *Transactions of the Japan Welding Society* 2.2 (1971): 90-100.

[4]Wang, J., Ma N., and Murakawa. H. "An efficient FE computation for predicting welding induced buckling in production of ship panel structure." *Marine Structures* 41 (2015): 20-52.

[5]Deng, D., Murakawa H., and Liang. W. "Numerical simulation of welding distortion in large structures." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 196.45 (2007): 4613-4627.

[6]Liang, W., Deng, D., Sone, S. and Murakawa , H. "Prediction of welding distortion by elastic finite element analysis using inherent deformation estimated through inverse analysis." *Welding in the World* 49.11-12 (2005): 30-39.

[7] Wang, J., Roshed S., Murakawa, H. and Shibahora M., "Investigation of buckling deformation of thin plate welded structures." *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.

[8] Wang, J., Roshed S. , Murakawa, H. and Luo Y., "Numerical prediction and mitigation of out-of-plane welding distortion in ship panel structure by elastic FE analysis." *Marine Structures* 34 (2013): 135-155.

[9] Murakawa, H. "Computational welding mechanics and concept of inherent strain for industrial applications." *Materials science forum*. Vol. 539. Trans Tech Publications, 2007.

[10]Wang, J., Zou, J., Zhou, H., Wu, Z and Du,S. "Welding distortion prediction with elastic FE analysis and mitigation practice in fabrication of cantilever beam component of jack-up drilling rig." *Ocean Engineering* 130 (2017): 25-39.

[11]UEDA, Y., Murakawa, H., Nakacho , K., Ma, N. X. "Establishment of Computational Welding Mechanics (Mechanics, Strength & Structural Design)." (1995).

[12]Deng, D., and Murakawa, H. "FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures." *Computational Materials Science* 43.4 (2008): 591-607.

[13] Murakawa, H., Deng D., and Ma, N. "Concept of inherent strain, inherent stress, inherent deformation and inherent force for prediction of welding distortion and residual stress." (2010).

[14]Wang, J., Rushed, S., Murakawa, H., Shibahara, M. "Investigation of buckling deformation of thin plate welded structures." *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]