



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

سعید شادکام<sup>1</sup>، اسلام رنجبرنوده\*<sup>2</sup>، مهدی ایرانمنش<sup>1</sup>

1- مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

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

### چکیده

جوشکاری به طور گسترده‌ای در صنایع برای مونتاژ محصولات مختلف مانند کشتی، اتومبیل، قطار و پل استفاده می‌شود. اعوجاج جوش اغلب نتایجی مانند عدم دقت ابعادی در طول مونتاژ و افزایش هزینه‌های ساخت را در پی 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:** شبیه‌سازی جوش، روش الاستیک، پانل تقویت شده، ترتیب جوشکاری، اعوجاج.

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

S. Shadkam<sup>1</sup>, E. Ranjbar Nodeh\*<sup>2</sup>, M. Iranmanesh<sup>1</sup>

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

2- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, 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](mailto:islam_ranjbar@aut.ac.ir)

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

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 می‌کنند، با استفاده از روش تجربی و عددی به مطالعه پرداختند [2]. یوندا و همکارانش با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود 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 ترموالاستیک پلاستیک 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

تکنولوژی جوشکاری یکی از روش‌های اصلی اتصال است و به طور گسترده‌ای در صنایع برای مونتاژ تولیدات مختلف مثل کشتی‌ها، اتومبیل‌ها، قطارها، و پل‌ها استفاده می‌شود. 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 نه تنها بر ابعاد قطعه جوشکاری شده بلکه به طور 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

به وسیله آنالیز الاستیک که در آن از کرنش های ذاتی به عنوان کرنش اصلی استفاده می شود، بدست می آید. 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 به طور کامل نمی تواند 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 شبیه سازی المان محدود برای فرآیند جوشکاری به سادگی می تواند با ادغام این دو بنا شود.

## 2-1- آنالیز ترموالاستوپلاستیک

تحقیقات قبلی نشان می دهد که توسعه روش های عملی می تواند به صورت موثر و آسان اعوجاج ناشی از جوش را پیش بینی کند. اعوجاج ایجاد شده در طی فرآیند مونتاژ در نتیجه پدیده های 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 پیش بینی 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 پیش بینی و تخمین اعوجاج ناشی از جوشکاری با در نظر گرفتن این نوع مشکلات غیر خطی تعیین شود. روش ترموالاستوپلاستیک گذرا انتخابی خوب و امکان پذیر برای پیش بینی اعوجاج ناشی از جوشکاری در سازه های کوچک و متوسط است. در این تحلیل برای مدل سازی منبع حرارتی می توان از معادله حرارتی دو بیضی گلدک استفاده کرد.

اما بیشتر محققان برای شبیه سازی جوش با گاز از توزیع نرمال گاوسی استفاده می کنند. بنابراین در این مطالعه از مدل حرارتی گاوسی استفاده شده است که به صورت معادله (1) بیان

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

می شود:

تقویتی ها را روی اعوجاج ایجاد شده بررسی کردند [5]. لیانگ و همکارانش با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، روش ساده و پر بازدهی برای تخمین تغییر شکل های ذاتی در اتصالات رایج ارائه کردند تا در نهایت از طریق آن بتوانند تغییر شکل های ایجاد شده را در ورق های بزرگ پیش بینی کنند [6]. جیانگ چائو و نگ و همکارانش در پژوهشی که با استفاده از روش المان محدود الاستیک که بر اساس تئوری تغییر شکل های ذاتی انجام دادند، توانستند اعوجاج های خارج از صفحه ای 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 تغییر شکل های ذاتی، اعوجاج ایجاد شده در یک پانل بزرگ پیش بینی کردند. آن ها از حرارت خطی برای کاهش اعوجاج خارج از صفحه استفاده کردند. این حرارت خطی در کاهش اعوجاج زاویه ای 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 این رو، در این مطالعه روش المان محدود حرارتی الاستیک - پلاستیک برای تخمین تغییر شکل های ذاتی برای اتصالات جوشی متفاوت که از یک مدل جوشکاری شده بزرگ استخراج شده اند استفاده شد. سپس، بر اساس تغییر شکل ذاتی به دست آمده، روش المان محدود الاستیک برای پیش بینی اعوجاج جوشکاری در یک مدل جوشکاری شده بزرگ به کار می رود. 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 تقویت کننده پانل بر میزان اعوجاج پرداخته می شود.

## 2- شرح مدل ریاضی و آنالیز المان محدود

دو روش برای پیش بینی اعوجاج در جوشکاری می توان به کار گرفت. یکی آنالیز ترموالاستیک پلاستیک، به طوریکه فرآیند جوش به عنوان یک مساله گذرای غیرخطی مورد حل قرار می گیرد. روش دیگر روش کرنش ذاتی، به طوریکه اعوجاج

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 تغییر شکل‌های 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 تغییر شکل 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 تغییر شکل ذاتی انقباض طولی، انقباض عرضی، پیچش طولی و پیچش عرضی وجود دارد. تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری مانند انقباض طولی و عرضی و اعوجاج زاویه‌ای اغلب به وسیله‌ی کرنش‌های ذاتی طولی و عرضی ( $\epsilon_x^*$  و  $\epsilon_z^*$ ) به وجود می‌آیند. با انتگرال‌گیری از کرنش ذاتی بر روی سطح مقطع عمود بر خط جوش و به صورت میانگین برای ضخامت (h) مقدار تغییر شکل ذاتی به دست می‌آید [10 و 11].

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

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

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

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

در روابط بالا  $\delta_L^*$  انقباض طولی،  $\delta_T^*$  انقباض عرضی،  $\theta_L^*$  اعوجاج زاویه‌ای یا پیچش در جهت طول و  $\theta_T^*$  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

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

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

### 2-2- آنالیز الاستیک

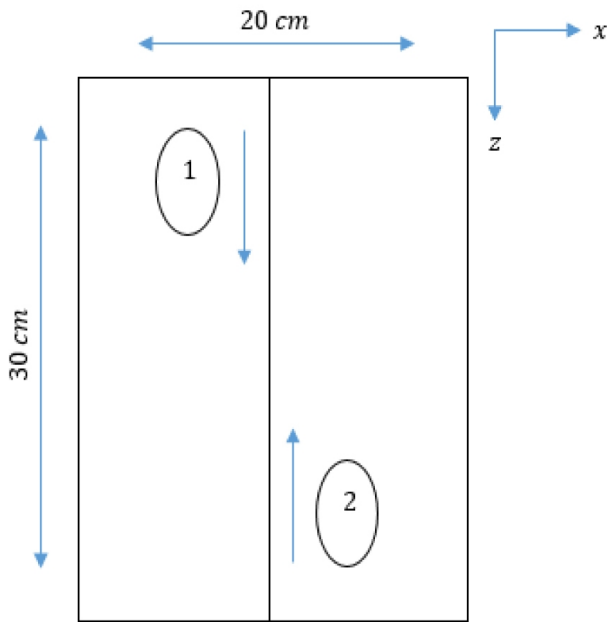
روش ترموالاستیک پلاستیک یک روش عملی برای تحلیل اعوجاج‌های ناشی از جوشکاری در سازه‌های بزرگ و پیچیده نیست، چون مکانیک جوش آن به شدت مشکلات غیر خطی دارد و قدرت محاسباتی قابل توجهی مورد نیاز است. در حالی که روش الاستیک به کرنش‌های پلاستیک پسماند در نزدیکی نقطه ذوب به عنوان کرنش‌های ذاتی می‌پردازد که یک روش جایگزین برای پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوش در سازه‌های بزرگ است. چون روش کرنش‌های ذاتی به راحتی می‌تواند اعوجاج ناشی از جوش را با استفاده از تحلیل الاستیک المان محدود پیش‌بینی کند، پس این روش بسیار عملی‌تر و کارآمدتر 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 کرنش‌ها 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].

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

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



شکل 1- 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.



شکل 2- ورق بعد از انجام جوشکاری

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 صفحه‌ای شکل، 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 کافیت 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 می‌کنند 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  $300 \times 200 \times 6$  میلی‌متر و تقویتی به ابعاد  $300 \times 100 \times 6$  میلی‌متر با دستگاه جوش نیمه‌اتوماتیک گاز  $CO_2$  برای انجام جوشکاری ورق به صورت فیلت، اجرا شده است. مشعل دستگاه جوش با زاویه 45 درجه بر روی دستگاه برش اتوماتیک نصب و روی سرعت  $5 \text{ mm/s}$  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.

جدول 1- شرایط جوشکاری فولاد اس ام 490

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

## 4- بدست آوردن تغییر شکل های ذاتی و آنالیز الاستیک برای

## مدل آزمایشگاهی

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

این تغییر شکل ها اگر طول خط جوش به اندازه کافی بزرگ باشد، مستقل از طول و عرض یک اتصال جوشی است. بنابراین اگر تغییر شکل ذاتی برای یک اتصال جوشی تعیین شود، می توان آن را برای سازه های 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 تغییر شکل ذاتی مشکل غیرخطی بودن مواد از طریق روش المان محدود ترموالاستوپلاستیک و وابستگی خواص حرارتی و مکانیکی مواد به دما در نظر گرفته می شود [11].

## 4-1- تحلیل ترموالاستوپلاستیک

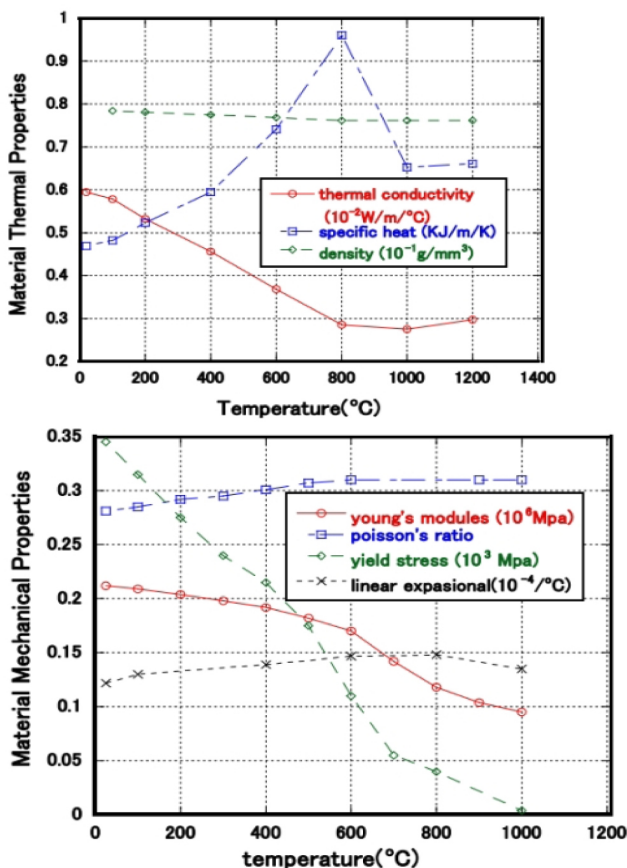
فلز استفاده شده در این شبیه سازی فولاد کشتی سازی اس ام 490 است که ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (2) آمده است. برای شبیه سازی حرارتی و مکانیکی یک نمونه باید تا حد امکان شرایط واقعی مسأله در نظر گرفته شود تا بتوان نتایج درستی بدست آورد.

از آنجایی که خواص حرارتی و ترمومکانیکی فلزات با افزایش دما تغییر می کند، باید این تغییرات را در شبیه سازی جوش فلزات در نظر گرفت. خواص مواد حرارتی و مکانیکی فولاد اس ام 490 که در آنالیز ترموالاستوپلاستیک 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 سه بعدی جوش گوشه مطابق شکل (4) طراحی گردید. پس از ترسیم مدل در ابتدا با المان Solid 278 مش بندی می شود. تعداد کل المان ها و گره ها، به ترتیب 96542 و 85636 می باشد و برای این که مدل از دقت کافی برخوردار گردد، مش بندی اتصالات به گونه ای است که با نزدیک شدن به گره جوش المان ها ریزتر شده اند. همه المان ها به صورت مکعبی بوده و دارای 8 گره می باشند.

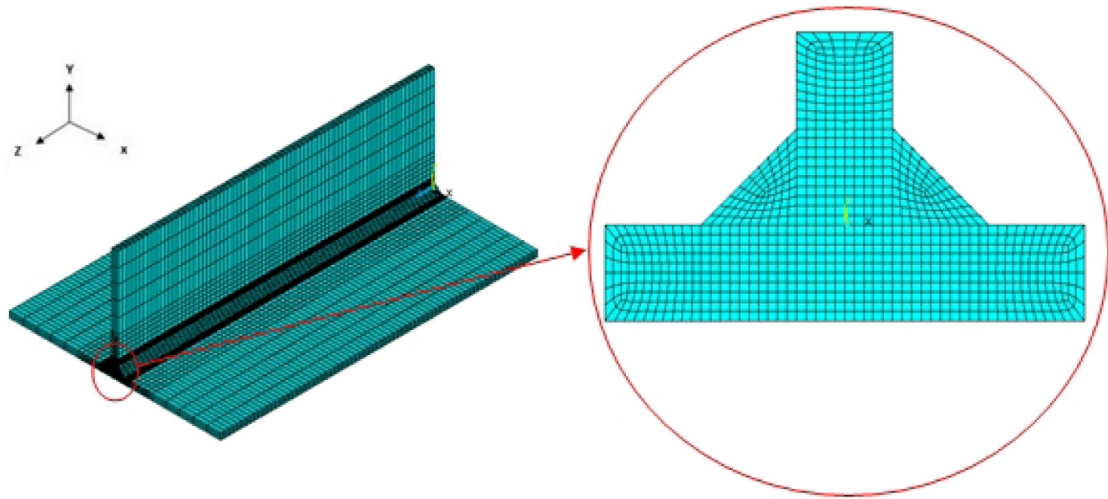


شکل 3- خواص مواد وابسته به دما برای فولاد اس ام 490 [13]

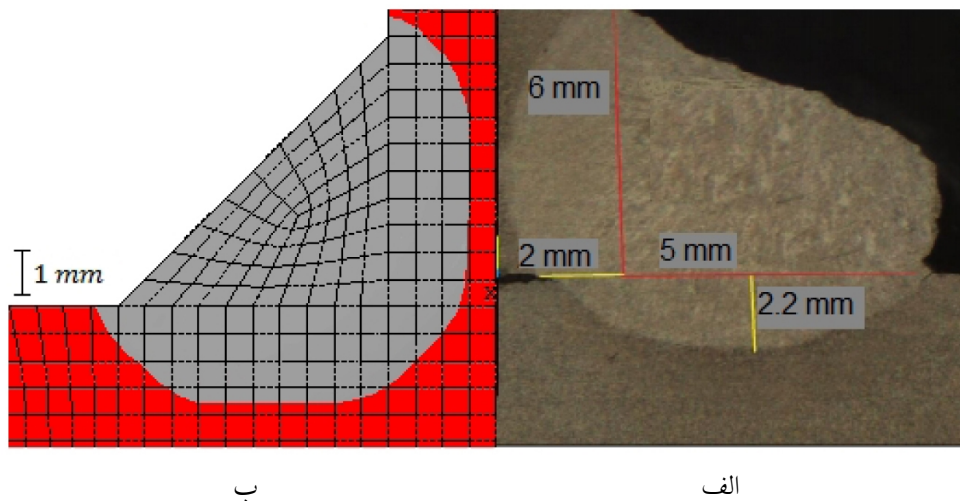
کوچکترین المان ها در خط جوش بوده و اندازه آن ها 0/6 میلی متر می باشد. به این صورت که وتر فلز پرکننده و ضخامت فلز پایه به 10 قسمت تقسیم شده اند. همچنین بزرگترین المان ها در دو لبه فلز پایه بوده اندازه آن ها 1/525 سانتی متر می باشد. در آخرین مرحله از مش بندی باید از نوعی المان سطحی برای اعمال شار حرارتی سطحی ناشی از منبع حرارتی و همچنین در صورت لزوم شرط مرزی تشعشع استفاده کرد. چراکه خود

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

المان‌های سالیید این شرایط را محیا 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 محور Z 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 آن‌هایی که 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.



شکل 4- مدل المان محدود اتصال گوشه



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



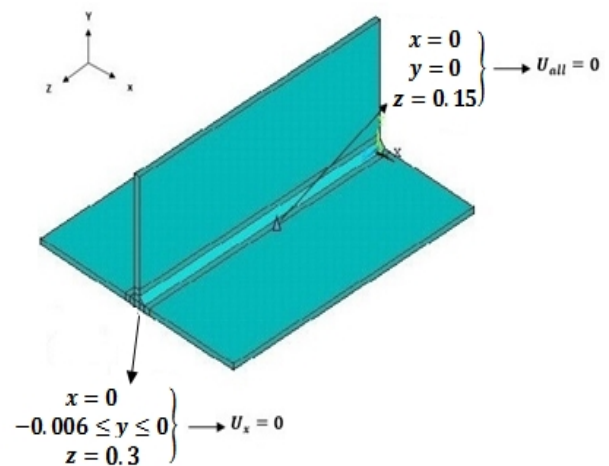
نتایج قابل قبولی را برای اعوجاج جوشکاری نشان داد. چرا که گرادیان حرارتی ایجاد شده در ضخامت ورق به خاطر حرارت ورودی، باعث تولید اعوجاج زاویه‌ای در طی فرآیند جوشکاری می‌شود.

#### 4-2- آنالیز الاستیک

پس از بدست آوردن کرنش‌های ذاتی، مطابق معادلات (5 الی 8) 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 در نظر 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

برای حوضچه مدل تجربی عمق نفوذ 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 نمونه‌های 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 به منظور 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.



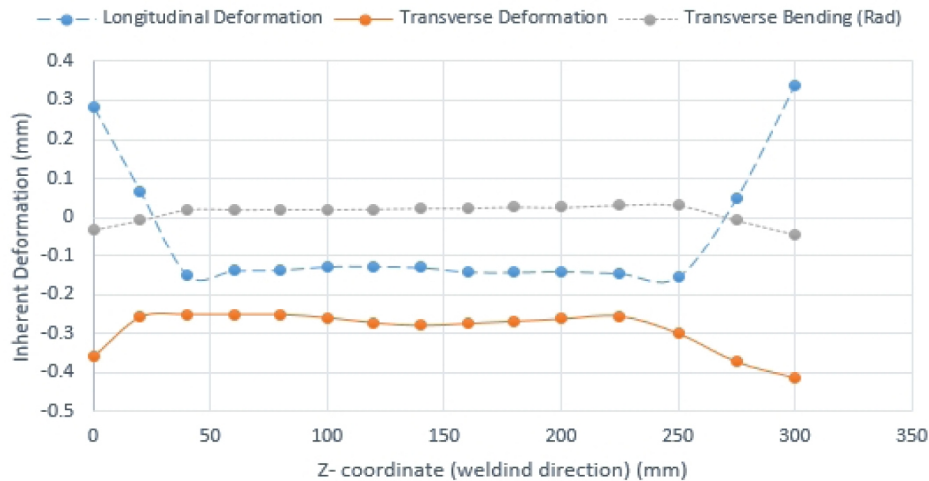
شکل 6- شرایط مرزی مکانیکی

با انجام آنالیز مکانیکی میزان جابجایی نقاط خط 1 در شکل (3)، محاسبه شد و مطابق شکل (7) با نتایج تحلیل مقایسه شد، که

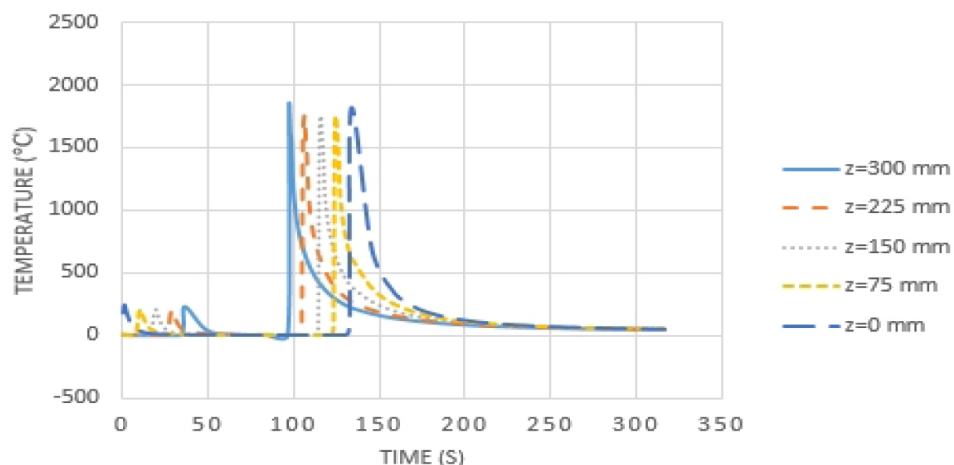


جدول 3- تغییر شکل های ذاتی مدل تخت در مقطع z=15 cm.

انقباض طولی	انقباض عرضی	پیچش عرضی
-۰,۱۵	-۰,۲۴	۰,۰۲۲



شکل 7- توزیع تغییر شکل های ذاتی در جهت خط جوش



شکل 8- نمودار دما - زمان در نقاط مختلف محل جوشکاری

سپس هشت نوع ترتیب جوشکاری برای این سیستم انجام می شود تا بهترین نوع ترتیب جوشکاری انتخاب شود. در این قسمت از شایسته ترین T شکل و تیرچه تخت استفاده می شود. در این نوع سیستم دو شایسته در عرض ورق با فاصله 2 متر از هم قرار گرفته و تیرچه ها 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 فریم بندی مطابق شکل (13) هشت ترتیب جوشکاری مختلف جهت به دست آوردن بهترین ترتیب

روش تغییر شکل ذاتی حدود 25 درصد با مقدار واقعی اختلاف دارد. که این اختلاف برای شبیه سازی سازه های پیچیده قابل قبول است.

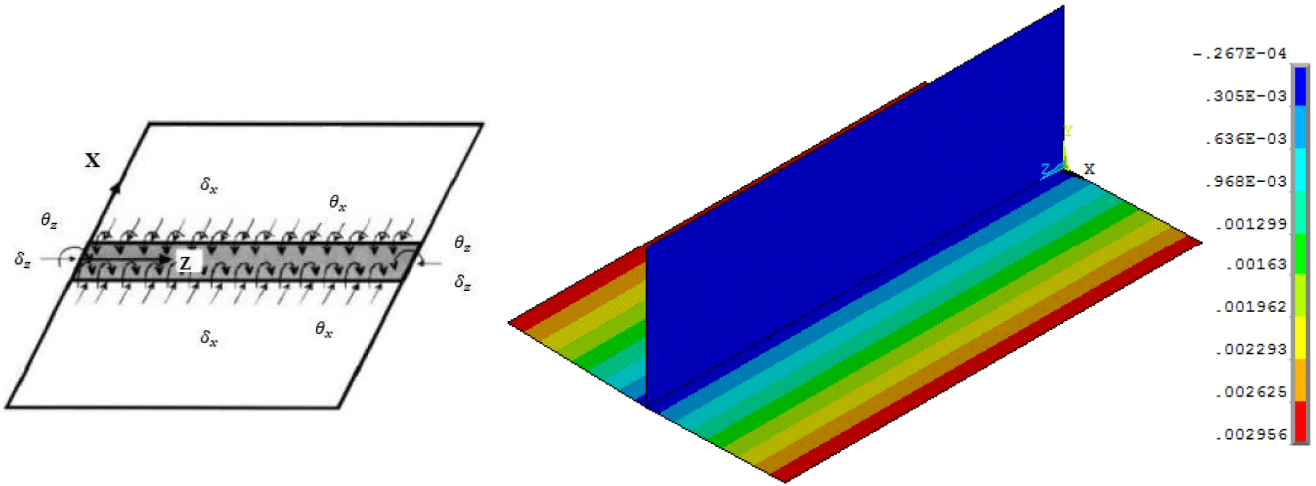
### 5- نتایج و بحث

5-1- تأثیر ترتیب های مختلف جوشکاری بر اعوجاج و انتخاب بهترین ترتیب جوشکاری

در این قسمت مطابق استانداردهای دریایی، مطابق شکل (12) سیستم فریم بندی را روی یک ورق 3x3 متری اجرا کرده و

حالی 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

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.

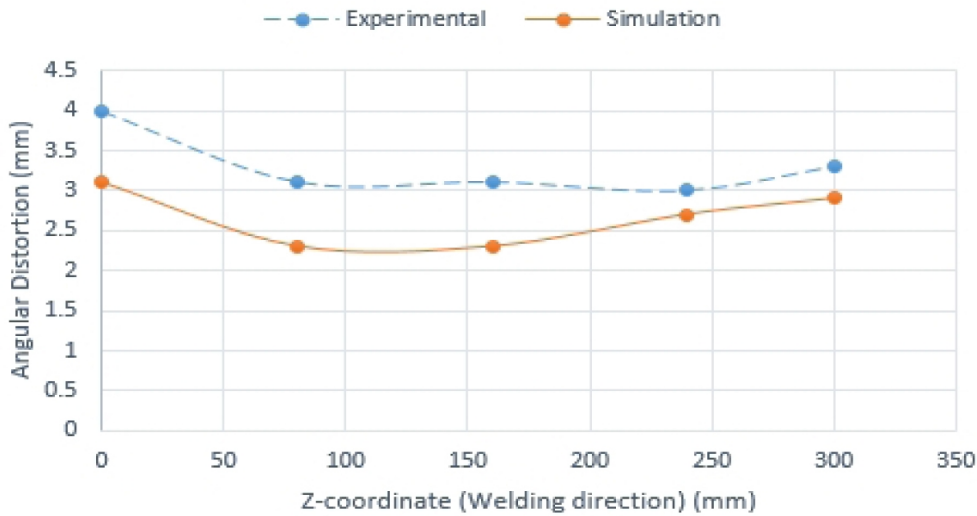


شکل 9- بارگذاری تغییرشکل‌های ذاتی به مناطقی که در آن‌ها کرنش ذاتی تولید می‌شود جهت تحلیل

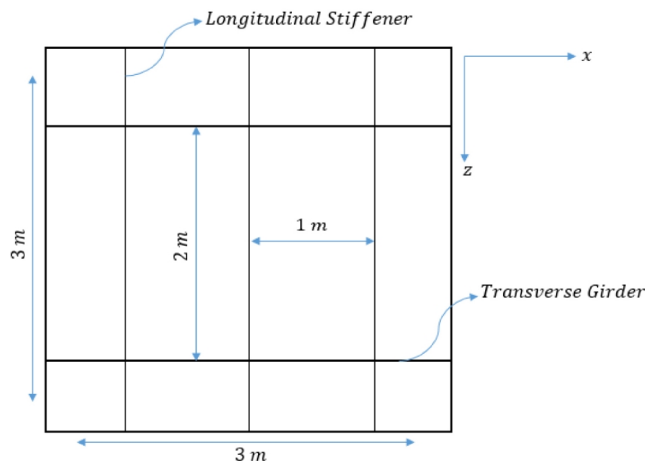
شکل 10- اعوجاج ایجاد شده در مدل الاستیک

در راستای Y

الاستیک [14]



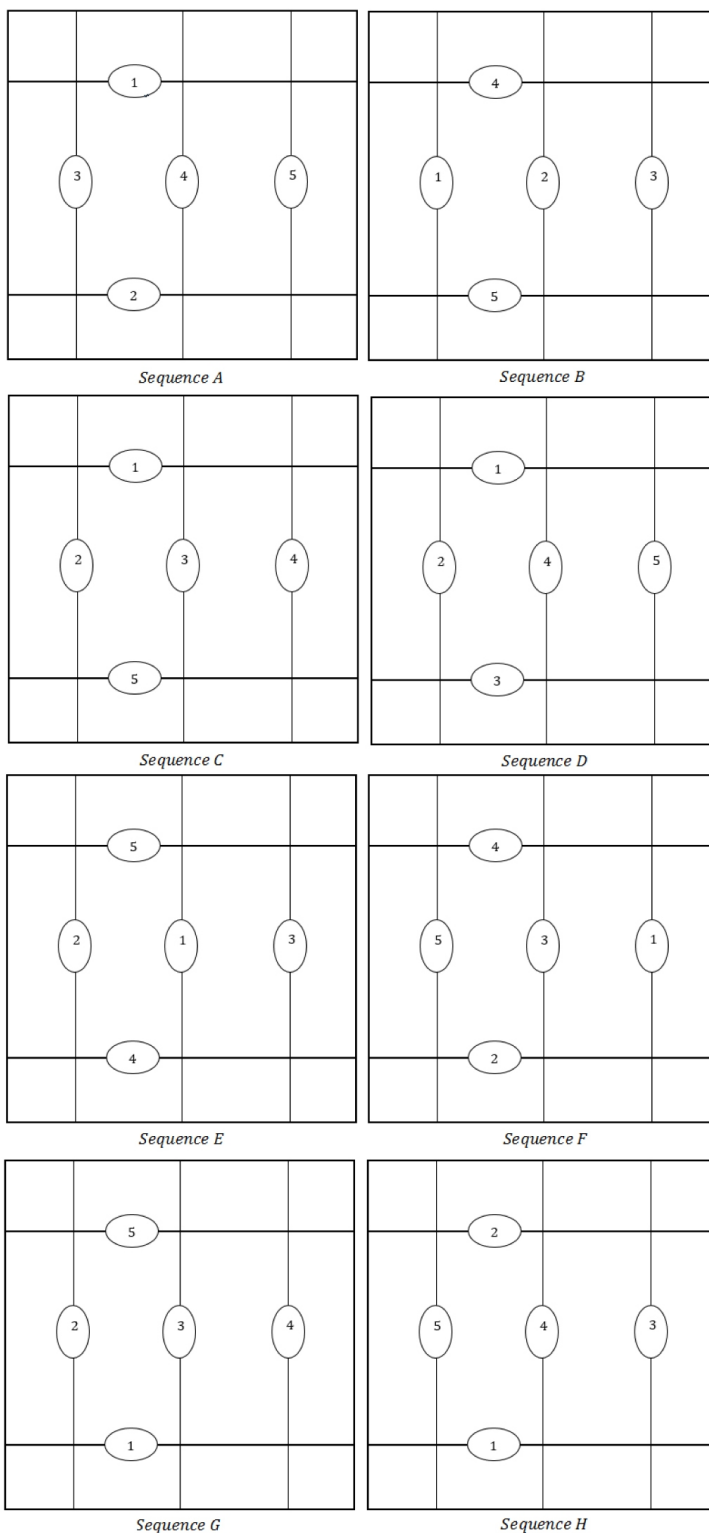
شکل 11- اعوجاج ایجاد شده در مدل الاستیک و مدل تجربی در راستای Y در لبه ورق



شکل 12- سیستم فریم‌بندی طولی در پانل بزرگ

می‌شود. شکل (14 و 15) 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 بالآمدگی در این ترتیب جوشکاری حدود  $4/3$  میلی‌متر و میزان فرورفتگی در راستای قائم نیز حدود  $9$ - میلی‌متر است.

می‌شود. شکل (14 و 15) توزیع اعوجاج ناشی از ترتیب‌های مختلف جوشکاری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ترتیب جوشکاری B دچار کمترین اعوجاج شده

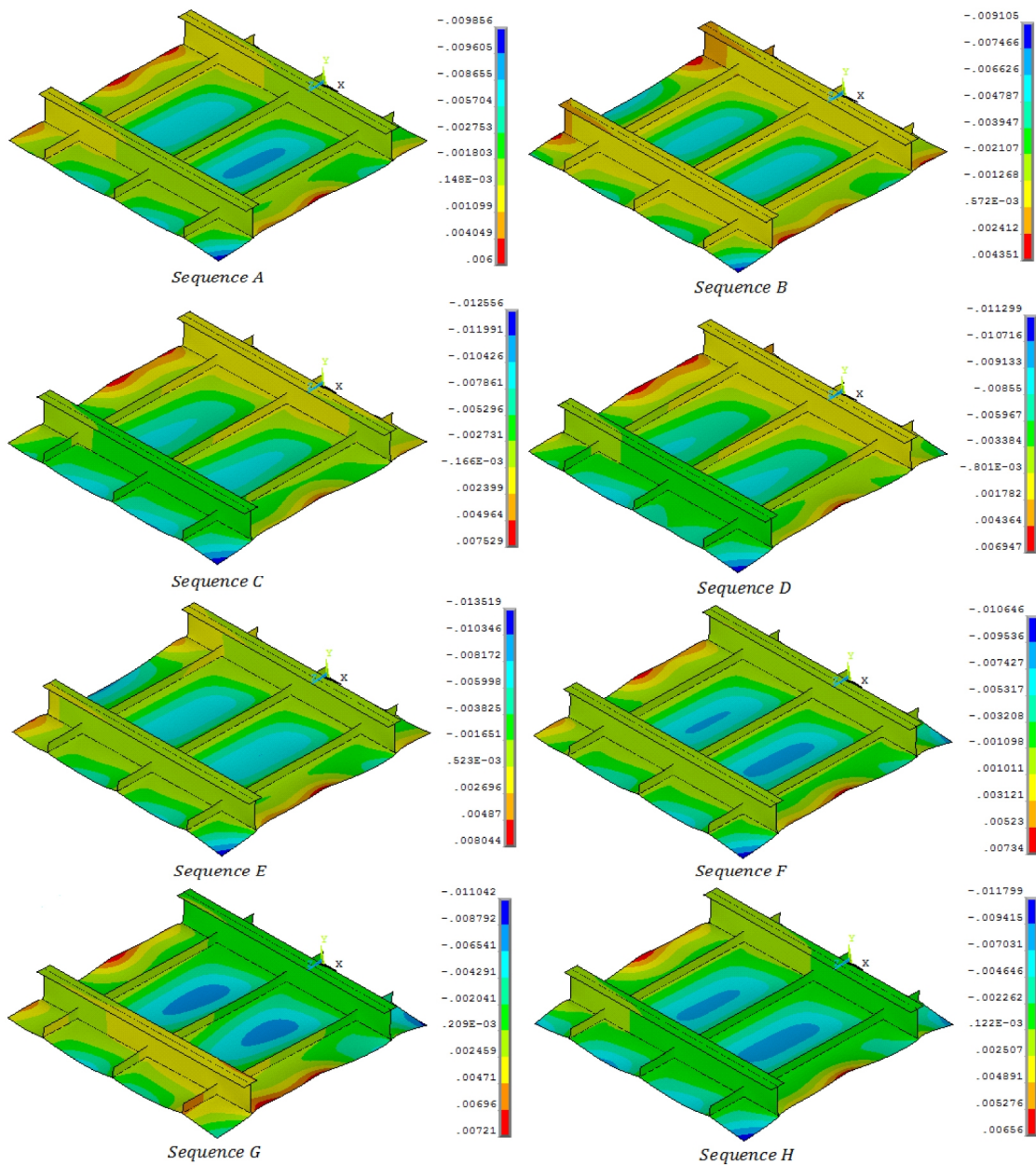


شکل 13- ترتیب‌های جوشکاری پیشنهادی برای سیستم فریم‌بندی

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 این رو یک مدل کوچک با تقویتی نوع تخت طراحی و آنالیز شد. همان‌گونه که مشاهده شد نتایج شبیه‌سازی و تجربی

این در حالی است که بیشترین اعوجاج مربوط به ترتیب جوشکاری E است، که در راستای قائم به میزان 8 میلی‌متر 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 شاهرها به صورت متقارن و بعد تیرچه‌ها *stiffness* بالا می‌رود و به طبع آن پانل کمتر می‌تابد، پس کمترین میزان اعوجاج در این ترتیب جوشکاری مشاهده می‌شود.



شکل 14- اعوجاج ترتیب‌های مختلف جوشکاری در پانل

welding induced buckling in production of ship panel structure." *Marine Structures* 41 (2015): 20-52.

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

[6]Liang, W., et al. "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, Jiangchao, et al. "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, Jiangchao, et al. "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, Hidekazu. "Computational welding mechanics and concept of inherent strain for industrial applications." *Materials science forum*. Vol. 539. Trans Tech Publications, 2007.

[10]Wang, Jiangchao, et al. "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, Yukio, et al. "Establishment of Computational Welding Mechanics (Mechanics, Strength & Structural Design)." (1995).

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

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

[14]Wang, Jiangchao, et al. "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.

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 به دست آوردن کرنش‌های ذاتی برای مدل مشاهده شد که تغییر شکل‌های 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 بالآمدگی 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, Masaki, and Kunihiko Satoh. "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, Toshiharu, Shoji Takechi, 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, Yukio, and Taketo Yamakawa. "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, Jiangchao, Ninshu Ma, and Hidekazu Murakawa. "An efficient FE computation for predicting