ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود روش حرارت خطی جهت شکلدهی ورقهای فلزی مورد استفاده در بدنه شناورها

رامین هاشمی<sup>1\*</sup>، ایرج جلیلی<sup>2</sup>، مهران عبدالمحمدی<sup>3</sup>

حكيده

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- كارشناسى ارشد، مهندسى مكانيك، سازمان تحقيقات و جهاد خودكفائي نداجا، تهران

\* تهران، صندوق يستى rhashemi@iust.ac.ir1684613114

#### اطلاعات مقاله

| هدف از این پژوهش، آزمایش و تشریح مکانیزم فرآیند شکلدهی که آن را شکلدهی حرارتی مینامند، به همراه توسعه ابزار عددی برای   | مقاله پژوهشی کامل           |
|---|-----------------------------|
| محاسبه مؤثر و پیش بینی رفتار آن می باشد. فرآیند شکل دهی شامل گرم کردن نمونه ورق فولادی در ناحیه خطوطی که از قبل مشخص شده،   | دريافت: 01 تير 1393         |
| بوسیله تورج و گاز استیلا، برای انجاز انجناء و فرم دهر ، مد نظر م باشد، امروزه این روش که نظور گستادهای در تولید ورق، بوسته و سازه بدنه  | پذیرش: 20 مرداد 1393        |
| مرد به روی در این در این این در در این در این در می در این در می در این در در این در این در این در در در در در<br>کشتر کار بردید به مایان کرد آیان در این در مان در ماه کار در در ماند کشتر دارد این در در ماه در ا | ارائه در سایت: 06 آبان 1393 |
| است بادر می رود، به طوری چا در بعد جیدری و یه شمه ساید در روشهای میکاردی در طبیع حسی شری در جیس پرش و فرد می بسد. به  | کلید واژگان:                |
| کار دیری بحث روس معفول و منطقی در انتخاب میزان خرارت و نخوه اجرای روس سخل دهی خرارتی، این فرایند را بسیار مقرون به صرفه   | شكلدهي ورق شناور            |
| خواهد کرد. لذا تحقیقات زیادی در خصوص کسب فناوری شکل دهی حرارتی به جهت عامل بالقوه صرفه اقتصادی آن انجام شده است. در این   | روش حرارت خطی               |
| مقاله، أزمایش تجربی و شبیهسازی عددی روش حرارت خطی برروی ورق دریایی گرید E انجام شده است. نتایج بدست أمده از تحلیل المان   | تحليل المان محدود           |
| محدود حرارتی و مکانیکی و نیز نتایج آزمایش تجربی نشان داد که با استفاده از حرارت گاز اکسی- استیلن میتوان انحنای ملایمی در ورق  | آزمایش تجربی                |
| ایجاد نمود که در ساخت بدنه شناورها کاربرد دارد. اثر میزان حرارت ورودی و افزایش خطوط حرارتی در این تحقیق ارزیابی شده است. نتایج  |                             |
| نشان داد که با افزایش دو خط حرارتی در ورق با عرض 700 میلیمتر میزان تنش بیشینه 6 درصد افزایش مییابد و افزایش حرارت ورودی   |                             |
| میزان خمیدگی را افزایش میدهد.   |                             |

# Experimental Test and Finite Element Analysis of Line Heating Method for Forming of Ship Hull Steel Plates

Ramin Hashemi1\*, Iraj Jalili2, Mehran Abdolmohammadi3

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Mechanical Engineering, Nedaja Research Organization, Iran

\* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

### ABSTRACT

Original Research Paper Received 22 June 2014 Accepted 11 August 2014 Available Online 28 October 2014

**ARTICLE INFORMATION** 

*Keywords:* Forming of ship plates

Line heating method

Finite element method

The purpose of this research is to examine and explain the mechanisms of the forming process called 'line heating' and to develop numerical tools for efficient calculation and prediction of its behavior. The forming process consists of steel plate heating in a predetermined pattern of lines by means of a gas torch so that the plate assumes a certain, curved shape. Today this method is widely applied in the production of ship hull shell plate and construction is an alternative or supplement to other forming methods such as pressing and rolling. Considering a rational method for the determination of heating line patterns and heating content would be very beneficial. Much research is carried out in industry and at universities to achieve this method technology , as the potential economic benefit is obvious. In this paper, experimental test and numerical simulation of Line Heating method has been done on naval plate-Grade E. Thermal and mechanical finite element analysis has been done separately. Experimental test fresults show that by using Oxy-Acetylene gas heat a smooth curvature can be made on plate. Effect of heat input and increasing of heating lines have been studied in this research. Results show that increasing two heating lines on plate will increase maximum stress 6% and increasing heat input will enhance bending effect.

مکانیکی و شکلدهی حرارتی (حرارت خطی<sup>1</sup>) تقسیم شدهاند. شکلدهی

1- مقدمه

1- Line Heating

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در مراجع اصلی کشتیسازی روشهای شکلدهی به دو گروه اصلم، شکل،دهم

R. Hashemi, I. Jalili, M. Abdolmohammadi, Experimental Test and Finite Element Analysis of Line Heating Method for Forming of Ship Hull Steel Plates, Modares' Mechanical Ur Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 9-16, 2015 (In Persian)



مکانیکی با استفاده از دستگاههای پرس و نورد انجام می گیرد. دستگاه نورد جهت ایجاد شکلهای استوانهای و مخروطی مانند دکل استفاده می شود [1]. دستگاه پرس نیز برای اهداف مختلفی مثل خم کاری، مسطحسازی و فلنج-کاری' بکار گرفته می شود [2].

در شکلدهی حرارتی از حرارت و خنککاری کنترل شده جهت ایجاد انحناى مطلوب استفاده مىشود. همچنين اين روش جهت رفع اعوجاج اجزاى مونتاژی نیز کارایی مناسبی دارد[1].

اصول شکلدهی با استفاده از تکنیک حرارت خطی به این صورت است که وقتی در قسمتی از یک ورق فولادی حرارت اعمال شود تنش ایجاد می گردد. درصورت کنترل این تنشها، کرنشهای کنترل شدهای خواهیم داشت که مانند شکل دهی دائمی توسط اعمال نیروهای مکانیکی عمل خواهد کرد. به طور مشابه، تنشهای القایی حرارتی، میتواند جهت از بین بردن کرنش و اعوجاج مورد استفاده قرار گیرد. وقتی که یک ورق در طول یک خط توسط مشعل حرارت داده می شود، به محض خنک کاری، خمی مشابه شکل یک برآمدگی در طول خط رخ میدهد. وقتی خنککاری توسط آب انجام گیرد، شکل خم بیشتر به چشم خواهد آمد. انحنای بهدست آمده مشابه خم و انحنایی خواهد بود که توسط یک پرس به آرامی ایجاد شده است. البته کمی چروک خوردگی<sup>2</sup> در این حالت رخ میدهد (به شکل 1 و 2 توجه کنید)[3]. مشابه این حرارت می تواند در تمام جهات و به دفعات و یا بین یا روی

خمهای ایجاد شده از حرارتهای قبلی به کار گرفته شود.

حرارت موضعی، تنش حرارتی در ناحیه بسیار کوچک ایجاد میکند. مدول یانگ و حد الاستیک ماده در اثر افزایش دما هر دو کاهش می یابد. بعد از عبور منبع حرارتی، مواد اطراف، حتی اگر با آب سرد نشده باشند، به مقداری سرد هستند که در مقابل تنشهای حرارتی مقاومت نمایند.



شکل 1 نمای کلی از انحنای بدست آمده از اعمال تکنیک حرارت خطی [3]



1- Flanging 2- Shrinkage

به صورت محدود، سطح حرارت داده شده پایین تر از حد الاستیک خود متورم می شود و سپس بعد از خنک کاری مقداری تغییر شکل در خود حفظ می کند. در طول فرآیند خنک کاری، سمت برآمده در نتیجه اعوجاج زاویهای و انقباض کلی بیشتر از سمت دیگر منقبض می شود [3]. استفاده از روش حرارت خطی به دهه 50 میلادی باز میگردد و ژاپنیها پیشگام استفاده از این روش بودند[3]. تا سال 1990 بیشتر فعالیتها بر روی اجرای هر چه بهتر روش منعطف شده بود اما از آن سال به بعد تلاشهایی نیز جهت مکانیزه نمودن این روش با استفاده از سیستمهای کنترل عددی و کامپیوتر صورت گرفت. تانگو و همکارانش نرمافزاری را طراحی کردند که خطوط حرارتی و شرایط اعمال حرارت را با استفاده از اتوماسيون اجرا مي كرد. اين نرم افزار در توليد شناورهای غول پیکر و بسیار بزرگ باعث افزایش سرعت تولید گردید [4].

در سال 2007 آدان و همکارانش تاثیر اندازه ورق و اثر لبه را بر روی شکل نهایی خم در روش حرارت خطی بررسی نمودند. هدف تحقیق آنها پیشبینی تغییر فرم ورقهای با اندازه بزرگ بود. بررسیهای آنها نشان داد که اثر طول و عرض ورق در صورتی که اندازه آن بیش از 800 میلیمتر باشد در تغییر شکل نهایی کوچک است[5]. در سال 2011 نوموتو و همکارانش فرآیند خنک کاری با آب را در تغییر شکل ورق در فرآیند حرارت خطی شبیهسازی نمودند. آنها در شبیهسازی خود جابهجایی و تشعشع را لحاظ نمودند. بررسی های آنها نشان داد که تغییر فاز فولاد از آستنیت به مارتنزیت، باینیت و فریت یا پرلیت به سرعت خنککاری بعد از اعمال حرارت بستگی دارد. آن ها ماکزیمم عمق حرارت را در 1 میلیمتری در نظر گرفتند و حداکثر دمای ورق را بین 870 تا 880 درجه سانتی گراد کنترل کردند. نتایج شبیه-سازی آنها با نتایج تست تجربی تطابق خوبی داشت[6]. در سال 2012 کانگ یول بای و همکارانش از تکنیک حرارت مثلثی با استفاده از شعله گازی جهت فرمدهی ورق فولادی در ساخت کشتی استفاده کردند. در فرآیند اعمال حرارت با شعله، کنترل منبع حرارتی مشکل است و ممکن است این کار در بازده خم کاری اثر گذارد. لذا کانگ یول بای و همکارانش یک مدل عددی جهت بررسی تکنیک حرارت مثلثی ارائه نمودند و به جای شعله گازی از منبع حرارتی القایی با فرکانس بالا که قابلیت کنترل حرارتی بیشتری دارد جهت تحليل تغيير شكل استفاده نمودند. جهت سادهسازی مسير پيچيده حرارت مثلثی یک مسیر دورانی برای شاخص $^{5}$ و یک مدل حرارت ورودی دایرهای دوبعدی پیشنهاد شد. نتایج تحلیل با نتایج تست تجربی مطابقت خوبی داشت که نشان میدهد منبع حرارتی و مدلهای تحلیل حرارتی-مکانیکی به کار گرفته شده در این تحقیق موثر و اثربخش بوده است[7]. در سال 2013 ویژنگ و همکارانش میدان دمای حرارتی خطی را به صورت تئوري و شبيهسازي عددي بررسي كردند. آنها بازده جذب حرارت 4 ورق را در فرآیند حرارت خطی همراه با بازیابی حرارت تلف شده در فرآیند شعله با گاز تحلیل کردند. ویژنگ و همکارانش با استفاده از تحلیل شش وجهی ورق، معادلات دیفرانسیل جزیی غیرخطی میدان حرارتی گذرای سهبعدی را استخراج نمودند [8]. با بررسی های بعمل آمده در کشور در موضوع مقاله حاضر کارهای پژوهشی و تحقیقاتی قابل استناد یافت نشد ولی چند پژوهش که به نوعی در موضوع شکل دهی حرارتی انجام شده است شامل موارد ذیل

تحلیل المان محدود و مقایسه آن با روش آزمایشگاهی برای شکل دهی داغ یک ورق آلیاژ آلومینیم که در قالب خاص با حرارت گاز انجام شده است[14]

<sup>3-</sup> Indicator 4- Endothermic efficency

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16



**شکل3** نازل اکسی استیلن استفاده شده در تست تجربی



شكل 4 انحناي ورق بعد از پاس حرارتي اول



**شکل** 5 انحنای ورق بعد از پاس حرارتی اول



**شکل 6** مقایسه زوایای خم قبل و بعد از افزایش خطوط حرارتی



**شکل 7** وضعیت توزیع خمیدگی در طول ورق

بررسی تاثیر گرادیان حرارتی لیزر در خمش ورق فلزی و تحلیل عددی و تجربی آن [15] و تعیین شرایط گرمایش در فرآیند شکلدهی ورق به روش خم کاری شعله یی [16]

با توجه به ظرفیتهای بالای کشور در حوزه صنایع دریایی و همچنین نیاز آتی کشور به افزایش سرعت ساخت شناورهای نظامی و تجاری، در این تحقیق تلاش شده است اجرای روش حرارت خطی به صورت عددی و تجربی بررسی شود. لذا روش حرارت خطی به صورت آزمایشگاهی بر روی ورق دریایی گرید Eبه ضخامت 8 و 4 میلیمتر اجرا شد و همچنین جهت بررسی دقیقتر روش از تحلیل المان محدود با نرم افزار آباکوس<sup>1</sup> جهت بررسی

1- ABAQUS

عددی این تکنیک استفاده شد. نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدودحرارتی- مکانیکی نیز نتایج آزمایش تجربی نشان داد که با استفاده از حرارت گاز اکسی- استیلن می توان انحنای ملایمی در ورق ایجاد نمود که در ساخت بدنه شناورها کاربرد دارد. اثر میزان حرارت ورودی و افزایش خطوط حرارتی در این تحقیق ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دو خط حرارتی در ورق با عرض 700 میلی متر میزان تنش بیشینه 6 درصد افزایش می یابد و افزایش حرارت ورودی میزان خمیدگی را افزایش می دهد.

#### 2- آزمایش تجربی

روش حرارت خطی بهصورت عملی بر روی ورق دریایی گرید E در کارگاه اجرا شد. جهت بررسی اثر شدت منبع حرارتی دو مدل شعله مختلف آزمایش شد. الف: گاز طبیعی- اکسیژن

ب: استیلن- اکسیژن (اکسی استیلن)

در حالت (الف) فشار متان درحدود 2 بار و فشار اکسیژن 50 بار و در حالت اکسی- استیلن، فشار استیلن 0/15 بار و فشار اکسیژن 5 بار تنظیم شد.

در حالت (الف) بعد از اعمال حرارت میزان انحنای ایجاد شده ناچیز مشاهده شد اما در حالت (ب) میزان خمیدگی افزایش یافت که علت این امر حرارت بیش تر گاز استیلن و اکسیژن است. همچنین براساس تحقیقات قبلی فاصله بین نوک نازل تا ورق در هر دو حالت در حدود 16 میلیمتر ثابت نگه-داشته شد[3]. شکل 3، یک نمونه از نازل اکسی استیلن استفاده در تست را نشان میدهد.

در آزمایش اول از ورق ضخامت 8 میلیمتر با ابعاد 90×70 سانتیمتر استفاده شد. ورق صاف بر روی تکیه گاه قرار گرفت و در وسط ورق حرارت اعمال شد. بعد از اعمال حرارت در قسمت میانی مطابق شکل 4، ورق فولادی در کنارهها در حدود 10 میلیمتر (معادل 1/6 درجه) از زمین بلند شد.

جهت بررسی اثر افزایش خطوط حرارتی در گام دوم، دو پاس حرارتی در کنار پاس میانی اولیه ایجاد شد و خنککاری با آب با فاصله 10 سانتی متری بعد از عبور مشعل انجام پذیرفت. همان طور که در شکل 5، مشخص است افزایش خطوط حرارتی باعث افزایش میزان خمیدگی می گردد. مطابق شکل فاصله ورق در کنارهها از زمین این بار به 24 میلی متر (معادل 3/9 درجه) افزایش یافت.

همانطور که در شکل 6 مشخص است با افزایش تعداد خطوط حرارتی میزان زاویه خم ورق درحدود 2/5 برابر حالت قبل افزایش یافته است.

شکل 7، نشان دهنده وضعیت توزیع خمیدگی در طول ورق است. همانطور که مشخص است خم مورد نظر در تمام طول ورق بطور یکنواخت ایجاد شده است. میزان خم در لبه چپ ورق اندکی بیشتر است که دلیل آن افزایش انتقال حرارت در سطح زیرین و لبه ورق است که باعث اختلاف دمای بیشتر سطح بالایی و پائینی میشود.



شكل 8 انجام روش حرارت خطى برروى ورق ضخامت 4 ميلىمتر

جهت بررسی کارآیی روش بر روی ورقهای نازک، این بار روش حرارت خطی بر روی ورق ضخامت 4 میلیمتر با ابعاد 0/6 × 0/6 متر انجام شد. ورق برروی تکیهگاهها ثابت شد و سپس دو پاس حرارتی براساس تنظیمات قبل برروی ورق مطابق شکل 8، انجام گرفت.

این بار برخلاف آزمایش قبل ورق به علت ضخامت کم از مرکز افزایش ارتفاع داشت و در نهایت ورق به سمت زمین خم شد. همان طور که پیش تر اشاره شد در روش حرارت خطی به طور کلی بلافاصله بعد از اعمال حرارت به-علت انبساط حرارتی در سطح بالایی ورق به ویژه در ناحیه حرارت دیده، انحنای محدب (به سمت نازل) ایجاد می شود که در حین خنک کاری به علت اختلاف دمای دو سطح و وضعیت تنش ها که پیش تر تشریح شد انقباض شدید در ناحیه حرارت دیده منجر به جمع شدگی ورق می گردد و ورق در نهایت شکل مقعر به خود می گیرد. اما در ورق های نازک بعلت اینکه در عمل افتلاف دمایی زیادی بین دو سطح ایجاد نمی گردد و مرحله دوم یعنی انقباض و جمع شدگی انجام نمی پذیرد، همچنان که در شکل 9. دیده می شود ورق برخلاف حالت قبل شکل محدب به خود می گیرد.

**جدول 1** خصوصيات حرارتي فولاد دريايي

| 1.0 |                       |   |                   |            |  |
|-----|-----------------------|---|-------------------|------------|--|
|     | دما                   | ضريب انبساط حرارتي                      | ضريب هدايت حرارتي | گرمای ویژه |  |
|     | <b>c</b> <sup>0</sup> | <b>10</b> <sup>-6</sup> /c <sup>0</sup> | W/m.K             | J/kg.K     |  |
|     | 0                     | 10                                      | 51/9              | 450        |  |
|     | 100                   | 11                                      | 51/1              | 499/2      |  |
|     | 300                   | 12                                      | 46/1              | 565/5      |  |
| ĺ   | 450                   | 13                                      | 41/05             | 630/5      |  |
|     | 550                   | 14                                      | 37/5              | 705/5      |  |
|     | 600                   | 14                                      | 35/6              | 773/3      |  |
|     | 720                   | 14                                      | 30/64             | 1080/4     |  |
|     | 800                   | 14                                      | 26                | 931        |  |
|     | 1450                  | 15                                      | 29/45             | 437/93     |  |



**شکل 9** نتیجه اجرای آزمایش برروی ورق ضخامت 4 میلیمتر (بعد از اجرای آزمایش انحنای محدب در ورق ایجاد شد)



شكل 10 مدل المان محدود با ابعاد 8 ×700×900 ميلىمتر تنها شامل پاس حرارتي مياني



**شکل 11** مدل تعریف شده برای نیمی از ورق در نرم افزار

#### 3- تحليل المان محدود

(2)

جهت بررسی دقیق تر تکنیک حرارت خطی تحلیل عددی روش حرارت خطی با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس انجام شد. حل مسئله در دو مرحله حرارتی و مکانیکی انجام شد. میدان حرارتی از عکسالعمل و پاسخ حل مکانیکال غیرمتاثر است در نتیجه تحلیل حرارتی به عنوان بارگذاری برای تحلیل مکانیکی استفاده میشود.

8 جهت مقایسه نتایج، شبیهسازی برابر شکل 10، روی ورق ضخامت میلیمتر با ابعاد 0/7 × 0/9 متر مطابق آزمایش تجربی انجام گردید.

جهت کاهش حجم محاسبات و با توجه به متقارن بودن شرایط تحلیل-های حرارتی و مکانیکی تنها بر روی نیمه سمت راست ورق انجام شد. دایره-های مشخص شده در شکل 11، محل خطوط حرارتی را نشان میدهد. همچنین ناحیه مثلثی سمت راست جهت استفاده از مش ریزتر برای نیروی تکیه گاهی جزء بندی<sup>1</sup> شد.

تحلیل المان محدود ابتدا با تحلیل حرارتی شروع میشود. معادله حاکم بر مسائل حرارت بصورت زیر است.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}$$
(1)

که ho چگالی،  $c_p$  گرمای ویژه، T دما،  $\lambda$  معین کننده هدایت حرارتی و t زمان است. جدول 1، خصوصیات حرارتی فولاد دریایی را نشان میدهد[9].

خصوصیات جابهجایی هوای اطراف از توصیف جابهجایی آزاد یک ورق افقی از کتاب انتقال حرارت اینکروپرا<sup>2</sup> گرفته شد[10]. اگرچه این تئوری برای یک ورق بینهایت با توزیع دمای یکنواخت است اما میتواند حرارت موضعی را نیز به خوبی توصیف نماید. فرض اصلی استفاده شده در مدل المان محدود این است که حرارت (*۵*)، از سطحی که در حالت کلی در فرض نیوتن تشریح شده است جابهجا می شود.

$$Q_c = \int_{A} h_f \left( T_s - T_B \right) dA$$

که  $h_f$  ضریب فیلم،  $T_s$  دمای سطح و  $T_b$  دمای حجم هوا میباشد. مطابق جدول خواص ترموفیزیکال گازها در فشار اتمسفر کتاب اینکروپرا ضریب فیلم برای هوا در این پژوهش 7 در نظر گرفته شد.

جهت سادهسازی بیشتر، جابهجایی بر روی سطح پائینی برابر سطح بالایی فرض شد. حرارت متشعشع بهوسیله قانون استفان بولتزمن مدل می شود.

 $Q_{R} = \int_{A} \epsilon \sigma \left( T_{s}^{4} - T_{B}^{4} \right) dA$ (3) که A مساحت،  $\delta - \epsilon$  انکسار<sup>3</sup> و  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن است. در این تحقیق ضریب انکسار برابر 0/7 در نظر گرفته شد[11]. شکل12، چگونگی ثبت مقادیر در نرمافزار آباکوس را برای مقاطع مختلف ورق نشان میدهد.

دمای تغییر فاز فولاد کم کربن 750 درجه سانتی گراد است. در روش حرارت خطی سعی میشود تغییر فاز در فولاد رخ ندهد. لذا دمای ناحیه اعمال حرارت برابر 750 درجه سانتی گراد تعریف شد. بنابراین مسئله تغییر فاز در این تحلیل بررسی نخواهد شد. شکل 13، تعریف دما براساس ناحیه اعمال حرارت را نشان می دهد.

<sup>1-</sup> Partition

 <sup>2-</sup> Incropera
3- emissivity

|                 | <b>جدول 2</b> خواص مکانیکی   | •          |
|-----------------|------------------------------|------------|
| دما <b>(°C)</b> | مدول الاستيسيته( <b>GPa)</b> | ضريب پوسان |
| 0               | 200                          | 0/2786     |
| 100             | 200                          | 0/3095     |
| 300             | 200                          | 0/331      |
| 450             | 150                          | 0/338      |
| 550             | 110                          | 0/3575     |
| 600             | 88                           | 0/3738     |
| 700             | 20                           | 0/3738     |
| 800             | 20                           | 0/4238     |
| 1450            | 20                           | 0/4738     |

دو موضوع در مشبندی ورق حائز اهمیت است. اول استفاده از مش ریزتر در نواحی اعمال خطوط حرارتی و دوم محدودیت تعداد کلی مش. با توجه به پیچیدگی مسئله حرارت و بعد از آزمایشهای مختلف در نرمافزار از مش سایز 0/0015 برای کل مدل و مش سایز 00001 برای نواحی اعمال حرارت استفاده شد که در مجموع کل مشهای تعریفی برای مسئله برابر 1960 شد. شکل 14، شکل مشها و محل آن در ورق را نشان میدهد.

تحلیل مکانیکال از تاریخچه دمایی بهدست آمده از تحلیل حرارتی

صورت می گیرد. جهت تحلیل مکانیکال معادله تعادل برابر است با [21]:  $\sigma_{ij,i} + \rho_{b_i} = 0$  (4) که در آن  $\sigma_{ij}$  مولفههای تانسور تنش<sup>1</sup>،  $\rho$  چگالی و  $b_i$  مولفههای نیروی حجمی<sup>2</sup> میباشد. رابطه کرنش جابجایی با فرض کرنشهای کوچک بصورت زیر است[13]:

 $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ (5)  $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ (5)  $\epsilon_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}$ (6)  $\epsilon_{ijkl} \epsilon_{kl}$ (7)  $\epsilon_{kl} \epsilon_{kl}$ (7)  $\epsilon_{kl} \epsilon_{kl}$ (7)  $\epsilon_{kl} \epsilon_{kl}$ (7)  $\epsilon_{kl} \epsilon_{kl}$ (7)

- $\varepsilon^{e} = \frac{\sigma}{E}$ (8)  $\varepsilon^{th} = \alpha_{th} (T - T_{ref})$ (9)  $\Sigma_{th} = \alpha_{th} (T - T_{ref}) + \alpha_{th} = \alpha_{th} (T - T_{ref}) + \alpha_{th} = \alpha_{th} + \alpha_{$
- $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \left( \varepsilon_{kl}^{\text{tot}} \varepsilon_{kl}^p \varepsilon_{kl}^{\text{th}} \right)$

خواص مکانیکی و وابسته به دمای فولاد نرم دریایی مطابق جدول 2، می باشد، همچنین تغییرات میزان تنش در برابر تغییرات دما در شکل 15، نشان داده شده است[9].

(10)

1- Stress Tensor

- 2- Body Force
- 3- Thermal Expansion Coefficient

| Step: Step-5_Pass-1_Cool D                               | own (Heat transfer) |
|--|---------------------|
| Surface: plate-1.WM_BasePe<br>Radiation type: To ambient | rimeterEdge-11      |
| Emissivity distribution:                                 | Uniform             |
| Emissivity:  | 0.7                 |
| Ambient temperature:                                     | 25                  |

|   | 0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0                   |   |                               |
|---|--|---|-------------------------------|
|   | Name: WM_Weld-1_                             | InitialTemperature  |                               |
|   | Type: Temperature                            |   |                               |
|   | Step: Initial                                |   |                               |
|   | Region: InitialTemper                        | rature  | Edit Region                   |
|   | Distribution:                                | Direct specification  | on 🔽                          |
|   | Section variation:                           | Constant through  | region                        |
|   | Magnitude:                                   | 750   |                               |
| 6 | ِارت (750 درجه)                              | دمای ناحیه اعمال حر   | شكل 13 تعريف                  |
|   |  | In the second |                               |
|   |  |   |                               |
| ق | مرابع ور<br>1963 در نیمی از مقطع ور          | حالت تحليل دوبعدى   | شکل 14 تعداد کل مش در         |
| ق | منابع ور<br>1963 در نیمی از مقطع ور<br>300 ۲ | حالت تحليل دوبعدى   | <b>شکل 14 تع</b> داد کل مش در |



مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16

شکل 12 تعریف تشعشع و جابهجایی برای مقاطع مختلف ورق در نرمافزار آباکوس



شکل 20 الف: توزیع حرارت در ابتدای شروع پاس میانی (واحد کانتورها: w/m<sup>2</sup>) ب: تاریخچه حرارتی نقطهای در زیر ناحیه پاس دوم

ورق و براساس پیشنهاد چیریلو [3] سرعت 5 میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین در مورد تعریف شرایط مرزی مسئله، بعد از انجام آزمایش بر روی مدل های مختلف نتایج نشان داد بهترین محل برای تعریف شرایط مرزی نقطه میانی ورق و در سطح پایین ورق است. محدود نمودن کنارههای ورق باعث ایجاد خطا در حل می شود. همچنین در گوشه سمت راست نیروی عکس العمل وزن برابر 250 نیوتن برای نیمی از ورق اعمال گردید. شکل 16، تعریف شرایط مرزی در نقطه میانی و در سطح پایین ورق را نشان می دهد.

# 4- نتايج تحليل المان محدود

شکل 17، وضعیت توزیع حرارت را در هنگام شروع و خنک کاری پاس حرارتی نشان میدهد. (واحد کانتورها: w/m<sup>2</sup>)



الف: وضعیت توزیع حرارت در آغاز پاس حرارتی (شروع اعمال حرارت)



ب: وضعیت توزیع حرارت در مرحله خنک کاری (مرحله آخر) شکل 17 وضعیت توزیع حرارت در ناحیه میانی ورق

نتیجه تحلیل نشان میدهد که هنگامی که دما در سطح بالایی در حدود 750 درجه است دمای سطح پایینی در حدود 250 درجه است.

شکل 18، تاریخچه حرارتی را از لحظه شروع پاس حرارتی برای نقطه ای در ناحیه اعمال حرارت نشان میدهد. بعد از گذشت 40 ثانیه دمای فلز با دمای محیط برابر میشود. S, Mises (Avg: 75%) +3.131e+08 +2.610e+08 +2.610e+08 +2.349e+08 +1.827e+08 +1.566e+08 +1.056e+08 +1.044e+08 +7.829e+07 +5.639e+03



-0.025 مركز ورق (m، مركز ورق (m) مركز ورق (m) مركز ورق (m) مركز ورق (m) مركز ورق

شکل 22، نمودارهای تنش زمان را برای مرحله اعمال حرارت در پاس ابتدایی برای دو وضعیت ماکزیمم دمای 600 و 750 درجه نشان میدهد. مطابق نمودارها کاهش میزان دمای مشعل از 750 به 600 درجه باعث کاهش میزان تنش ماکزیمم جهت خم کاری میشود.

همچنین مطابق شکل 23، افزایش 25 درصدی نیروی تکیهگاه باعث افزایش تنش ماکزیمم و افزایش میزان خم نهایی میشود.

در شکل 24 نتایج عددی و تجربی مقایسه شده و علت تغییرات در بخش نتیجه گیری توضیح داده شده است .

در شکل 25 نمودار کرنش برای المانهای موجود در مرکز ورق رسم شده است. در قسمت میانی ورق و تا فاصله 5 میلیمتری از مرکز میزان کرنش درحدود 0/05 است. کرنش در فاصله 10 میلیمتری به 0/02 می-رسد که در این نقطه شاهد بیشترین مقدار کرنش هستیم. در واقع در 10 میلیمتری از مرکز پاس حرارتی مرز برخورد تنشهای حرارتی ناحیه حرارت دیده و مقاومت ناحیه سرد است که باعث ایجاد بیشترین کرنش میشود. بعد شکل 19، وضعیت توزیع تنش را در حالت تک پاس نشان میدهد. تنش در ناحیه حرارت دیده برابر 291 مگاپاسکال است که 40 مگاپاسکال از تنش تسلیم بیشتر است که نشاندهنده ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ورق است. همچنین میزان خم نهایی ایجاد شده برای حالت تک پاس برابر 1 درجه می باشد. (واحد کانتورها: MPa)

شکل 20- الف توزیع حرارت را در ابتدای شروع اعمال حرارت در پاس میانی نشان میدهد. همچنین شکل 20- ب تاریخچه حرارتی نقطهای زیر ناحیه پاس دوم را نشان میدهد. تاخیر اولیه در نمودار مربوط به پاس اول میباشد و بعد از انجام پاس اول پاس دوم بعد از 30 ثانیه آغاز میشود.

شکل 21، توزیع تنش و تغییر شکل نهایی ورق را بعد از اعمال پاسهای کناری نشان میدهد. همانطور که مشخص است با اضافه شدن پاسهای کناری بهعلت افزایش میزان حرارت میزان تنشها نیز افزایش مییابد. (واحد کانتورها: **MPa**)



رامین هاشمی و همکاران

از فاصله 10 میلیمتری با توجه به کاهش اثر حرارت تنشها نیز افت میکنند و رفته رفته کرنشها نیز به صفر نزدیک میشود. البته این کرنشها دارای مقدار کوچکی است اما در نمودار بعلت کوچک بودن آن نسبت به مرکز صفر نشان داده شده است.

# 5- بحث و نتیجه گیری

نتایج آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود روش حرارتخطی را میتوان در موارد زیر خلاصه نمود.

 هزینه راهاندازی و اجرای روش حرارت خطی در مقایسه با سایر روشهای شکلدهی مانند پرس کاری و خم کاری با استفاده از رول بسیار کمتر است و با استفاده از یک سیستم مشعل ساده می توان این روش را اجرا نمود.

ترکیب اکسیژن و پرویان جهت خم کاری بازده لازم را ندارد.

 بعد از اجرای عملی روش حرارت خطی، در نهایت ورق با خم ملایم ایجاد گردید. لبه کناری ورق بعد از اجرای پاس حرارت میانی 10 میلیمتر (1/6 درجه) و بعد از انجام های پاس های جانبی 24 میلیمتر (3/9 درجه) از کف زمین فاصله گرفت. در نتیجه می توان گفت با افزایش خطوط حرارتی، تنش-های حرارتی افزایش مییابد و این افزایش تنش باعث افزایش میزان خم ورق می شود.

 بعد از اعمال پاس حرارتی در کنار پاس در حالت ماکزیمم دمای 750 درجه میزان تنش نهایی 6 درصد افزایش یافت.

 در تحلیل المان محدود، زاویه خم در هر دو حالت تک پاس میانی و پاسهای جانبی از حالت تجربی حدود 1 درجه کمتر است که علت این اختلاف می تواند ترکیب عواملی مانند شرایط مرزی تعریف شده و اطلاعات محدود ناحیه پلاستیک باشد.

 در تمامی حالات تنش نهایی از تنش تسلیم بیشتر است که این اختلاف باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ورق می شود.

مطابق آزمایش تجربی تغییر زاویه مشعل اثری در نتیجه خم کاری ندارد.

در ورق با ضخامت 4 میلیمتر بعلت اینکه ورق نازک است و عملاً اختلاف
دمایی بین سطح بالایی و پایینی وجود ندارد نتیجه حرارت خطی کاملا
برعکس می شود و ورق به سمت خلاف مشعل خم می شود.

#### 6- فهرست علائم

C ظرفیت گرمایی ویژه ( $^{1}$ C<sup>-1</sup>) (GPa) مدول الاستیسیته (GPa) K ضریب هدایت حرارتی ( $^{1}$ GP ( $^{1}$ W m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) KM راستای کسینوس نرمال به مرز N میزان انتقال حرارت جابجایی ( $^{2}$ W m<sup>-2</sup>) میزان انتقال حرارت تشعشعی ( $^{2}$ W m<sup>-2</sup>)  $q_{rad}$ 

(c) دمای محیط  $T_{\infty}$ (K) دما T

(c<sup>-1</sup>) ضريب انبساط حرارتي 
$$\alpha_{th}$$

*ء* ضريب صدور موثر

ρ چگالی (kg m<sup>-3</sup> )

(MPa**)** تنش تسليم  $\sigma_{\! Y}$ 

ثابت استفان بولتزمن  $\sigma$ 

#### 7- مراجع

- [1] R. Lee, S. Ship Production, Cornell Maritime Press.Maryland, 1995
- [2] D. Eyres. *Ship construction*, Elsevier, Oxford, 2007
- [3] L.D. Chirillo, *Line Heating*, National Shipbuilding research Program Maritime Administration in Cooperation with Todd Pacific Shipyards Corporation, 1982
- [4] T. Yoshihiko. IHIMU-a A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding, IHI Engineering Review, Vol.44, No.1, 2011
- [5] V, Adan, Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 1), Transaction of JWRI., vol.36, No.1, 2007.
- [6] T, Nomoto, A study on the simulation of water cooling process for prediction of plate deformation due to line heating, International Journal of Ocean System Engineering, pp. 46-54, 2011.
- [7] K-Y, Bae, Analysis of Triangle Heating Technique using High Frequency Induction Heating in Forming Process of Steel Plate, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.13, No. 4, pp. 539-545, 2012
- [8] W, Xu, The Line Heating Temperature Field Theory Analysis and Numerical Simulation, Applied Mechanics Materials, Vols. 316, pp 1087-1093, 2013
- [9] P, Biswas, Thermo-mechanical and Experimental Analysis of Double Pass Line Heating, J. Marine Sci., 2011.
- [10] F.P. Incropera, Introduction to Heat Transfer, John Wiley&Sons, 1993.
- [11] J. J.Yagla, Laser welding Analysis and Experiments, Journal of ship production, pp. 102-110, 1995.
- [12] F, I. Sattari, Effect of the welding heat input on residual stresses in buttwelds of dissimilar pipe joints, International Journal of Pressure Vessel and Piping, P.776-769, 2009.
- [13] D,George, *MechanicalMetallurgy*,MaGraw-Hill Book company,NewYork, 1988.
- [14] M.S Zoei, H. Pasdarshahri, M. Farzin, A.H. Mohammadi, *Finitte element and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 49-56, 2010 (in Persian)
- [15] H. Moslemi, V. Panahizadeh, M. H. Pourkallo, S. Mazdak, Numerical and Experimental investigation on lasser forming of sheet metal mild steel(st37), Mechanical Engineering journal, Vol. 1, No. 2, 2008 (in Persian)
- [16] S.J. Hemmati, M.A. Niyazi, M. Marefat, R. Naghdiabadi, Determination thermal condition of metal forming by the thermal bending method, sharif Mechanical Engineering journal, Vol. 21, No. 29, 2005 (in Persian)