



مطالعه تجربی و تحلیل المان محدود روش حرارت خطی جهت شکل دهی ورق های فلزی مورد استفاده در بدنه شناورها

رامین هاشمی^{1*}، ایرج جلیلی²، مهران عبدالمحمدی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، سازمان تحقیقات و جهاد خودکفائی نداجا، تهران
 * تهران، صندوق پستی 1684613114@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این پژوهش، آزمایش و تشریح مکانیزم فرآیند شکل دهی که آن را شکل دهی حرارتی می نامند، به همراه توسعه ابزار عددی برای 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، بوسیله تورچ و گاز استیلن برای ایجاد انحنا و فرم دهی مد نظر می باشد. امروزه این روش که بطور گسترده ای در تولید ورق پوسته و سازه بدنه کشتی بکار می رود، به عنوان یک فرآیند جایگزین و یا مکمل سایر روش های شکل دهی در صنایع کشتی سازی از قبیل پرس و نورد می باشد. به کارگیری یک روش معقول و منطقی در انتخاب میزان حرارت و نحوه اجرای روش شکل دهی حرارتی، این فرآیند را بسیار مقرون به صرفه خواهد کرد. لذا تحقیقات زیادی در خصوص کسب فناوری شکل دهی حرارتی به جهت عامل بالقوه صرفه اقتصادی آن انجام شده است. در این مقاله، آزمایش تجربی و شبیه سازی عددی روش حرارت خطی بر روی ورق دریایی گرید E انجام شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود حرارتی و مکانیکی و 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.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 01 تیر 1393
 پذیرش: 20 مرداد 1393
 ارائه در سایت: 06 آبان 1393
 کلید واژگان:
 شکل دهی ورق شناور
 روش حرارت خطی
 تحلیل المان محدود
 آزمایش تجربی

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

Ramin Hashemi^{1*}, 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

ARTICLE INFORMATION

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

Keywords:

Forming of ship plates
 Line heating method
 Finite element method

ABSTRACT

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 results 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.

1- مقدمه

مکانیکی و شکل دهی حرارتی (حرارت خطی¹) تقسیم شده اند. شکل دهی

در مراجع اصلی کشتی سازی روش های شکل دهی به دو گروه اصلی شکل دهی

1- Line Heating

Please cite this article using:

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 Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 9-16, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به‌صورت محدود، سطح حرارت داده شده پایین‌تر از حد الاستیک خود متورم می‌شود و سپس بعد از خنک‌کاری مقداری تغییر شکل در خود حفظ می‌کند. در طول فرآیند خنک‌کاری، سمت برآمده در نتیجه اعوجاج زاویه‌ای و انقباض کلی بیشتر از سمت دیگر منقبض می‌شود [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 اتوماسیون اجرا می‌کرد. این نرم افزار در تولید 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 خنک‌کاری با آب را در تغییر شکل ورق در فرآیند حرارت خطی شبیه‌سازی نمودند. آنها در شبیه‌سازی خود جابه‌جایی و تشعشع را لحاظ نمودند. بررسی‌های آنها نشان داد که تغییر فاز فولاد از آستنیت به مارتنیت، باینیت و فریت یا پرلیت به سرعت خنک‌کاری بعد از اعمال حرارت بستگی دارد. آن‌ها ماکزیم عمق حرارت را در 1 میلی‌متری در نظر گرفتند و حداکثر دمای ورق را بین 870 تا 880 درجه سانتی‌گراد کنترل کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با نتایج تست تجربی تطابق خوبی داشت [6]. در سال 2012 کانگ یول بای و همکارانش از تکنیک حرارت مثلثی با استفاده از شعله‌گازی 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 خم‌کاری اثر گذارد. لذا کانگ یول‌بای و همکارانش یک مدل عددی جهت بررسی تکنیک حرارت مثلثی ارائه نمودند و به جای شعله‌گازی از منبع حرارتی القایی با فرکانس بالا که قابلیت کنترل حرارتی بیشتری دارد جهت تحلیل تغییر شکل استفاده نمودند. جهت ساده‌سازی مسیر پیچیده حرارت مثلثی یک مسیر دورانی برای شاخص³ 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 به‌کار گرفته شده در این تحقیق موثر و اثربخش بوده است [7]. در سال 2013 ویژنگ و همکارانش میدان دمای حرارتی خطی را به صورت تئوری و شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. آن‌ها بازده جذب حرارت 4 ورق را در فرآیند حرارت خطی همراه با بازبایی حرارت تلف شده در فرآیند شعله با گاز تحلیل کردند. ویژنگ و همکارانش با استفاده از تحلیل شش وجهی ورق، معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی میدان حرارتی گذرای سه‌بعدی را استخراج نمودند [8]. با بررسی‌های بعمل آمده در کشور در موضوع مقاله حاضر کارهای پژوهشی و تحقیقاتی قابل استناد یافت نشد ولی چند پژوهش که به نوعی در موضوع شکل‌دهی حرارتی انجام شده است شامل موارد ذیل است:

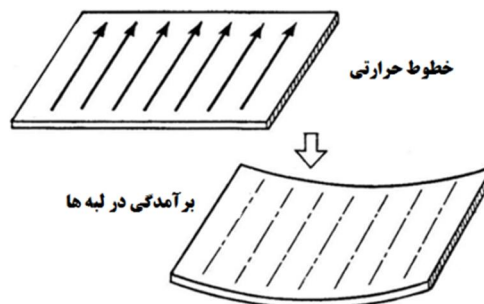
تحلیل المان محدود و مقایسه آن با روش آزمایشگاهی برای شکل‌دهی داغ یک ورق آلایژ آلومینیم که در قالب خاص با حرارت گاز انجام شده است [14]

مکانیکی با استفاده از دستگاه‌های پرس و نورد انجام می‌گیرد. دستگاه نورد جهت ایجاد شکل‌های استوانه‌ای و مخروطی مانند دکل استفاده می‌شود [1]. دستگاه پرس نیز برای اهداف مختلفی مثل خم‌کاری، مسطح‌سازی و فلنج-کاری¹ بکار گرفته می‌شود [2].

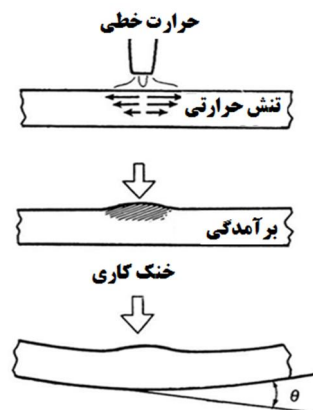
در شکل‌دهی حرارتی از حرارت و خنک‌کاری کنترل شده جهت ایجاد انحنای مطلوب استفاده می‌شود. همچنین این روش جهت رفع اعوجاج اجزای مونتاژی نیز کارایی مناسبی دارد [1].

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 می‌گردد. در صورت کنترل این تنش‌ها، کرنش‌های کنترل شده‌ای خواهیم داشت که مانند شکل‌دهی 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 می‌شود، به محض خنک‌کاری، 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 خوردگی² در این حالت رخ می‌دهد (به شکل 1 و 2 توجه کنید) [3].

مشابه این حرارت می‌تواند در تمام جهات و به دفعات و یا بین یا روی خم‌های ایجاد شده از حرارت‌های قبلی به‌کار 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 می‌یابد. 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]



شکل 2 تنش حرارتی ناشی از حرارت موضعی [3]

3- Indicator
4- Endothermic efficiency

1- Flanging
2- Shrinkage

عددی این تکنیک استفاده شد. نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود حرارتی - مکانیکی نیز نتایج آزمایش تجربی نشان داد که با استفاده از حرارت گاز اکسی - استیلن می‌توان انحنا را 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 میلی‌متر میزان تنش بیشینه 6 درصد افزایش می‌یابد و افزایش حرارت ورودی میزان خمیدگی را افزایش می‌دهد.

2- آزمایش تجربی

روش حرارت خطی به صورت 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 در حدود 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 انحنا 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 70×90 سانتی‌متر استفاده شد. ورق صاف بر روی تکیه‌گاه 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 سانتی‌متری بعد از عبور مشعل انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل 5، مشخص است افزایش خطوط حرارتی باعث افزایش میزان خمیدگی می‌گردد. مطابق شکل فاصله ورق در کناره‌ها از زمین این بار به 24 میلی‌متر (معادل 3/9 درجه) افزایش یافت.

همان‌طور که در شکل 6 مشخص است با افزایش تعداد خطوط حرارتی میزان زاویه خم ورق در حدود 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 دمایی بیشتر سطح بالایی و پائینی می‌شود.



شکل 8 انجام روش حرارت خطی بر روی ورق ضخامت 4 میلی‌متر



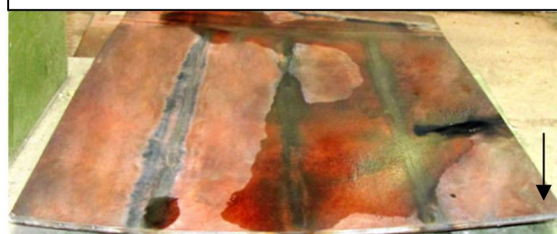
شکل 3 نازل اکسی استیلن استفاده شده در تست تجربی

بعد از اعمال حرارت لبه کناری 10 میلی‌متر از زمین بلند شد

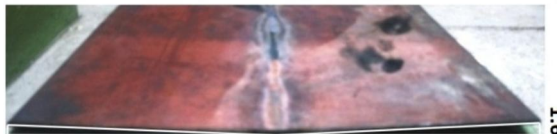


شکل 4 انحنا ورق بعد از پاس حرارتی اول

با افزایش خطوط ارتفاع لبه کناری از زمین به 24 میلی‌متر رسید



شکل 5 انحنا ورق بعد از پاس حرارتی اول



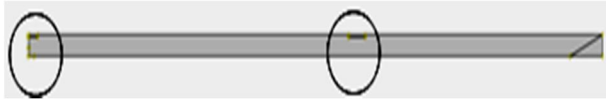
شکل 6 مقایسه زوایای خم قبل و بعد از افزایش خطوط حرارتی



شکل 7 وضعیت توزیع خمیدگی در طول ورق

بررسی تاثیر گرا دیان 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 بی [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 E به ضخامت 8 و 4 میلی‌متر اجرا شد و همچنین جهت بررسی دقیق تر روش از تحلیل المان محدود با نرم افزار آباکوس¹ جهت بررسی



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

3- تحلیل المان محدود

جهت بررسی دقیق‌تر 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.

جهت مقایسه نتایج، شبیه‌سازی برابر شکل 10، روی ورق ضخامت 8 میلی‌متر با ابعاد 0/9 × 0/7 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 تکیه‌گاهی جزء بندی¹ شد.

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

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

که ρ چگالی، c_p گرمای ویژه، T دما، λ 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 اینکروپرا² 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 (Q_c)، از سطحی که در حالت کلی در فرض نیوتن تشریح شده است جابه‌جا می‌شود.

$$Q_c = \int_A h_f (T_s - T_B) dA \quad (2)$$

که h_f ضریب فیلم، T_s دمای سطح و T_B دمای حجم هوا می‌باشد. مطابق جدول خواص ترموفیزیکیال 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 می‌شود.

$$Q_R = \int_A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_B^4) dA \quad (3)$$

که A مساحت، ϵ ضریب انکسار³ و σ ثابت استفان بولتزمن است. در این تحقیق ضریب انکسار برابر 0/7 در نظر گرفته شد [11]. شکل 12، چگونگی ثبت مقادیر در نرم‌افزار آباکوس را برای مقاطع مختلف ورق نشان می‌دهد.

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

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 بر روی تکیه‌گاه‌ها ثابت شد و سپس دو پاس حرارتی براساس تنظیمات قبل بر روی ورق مطابق شکل 8، انجام گرفت.

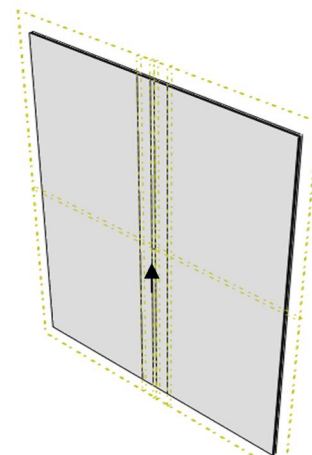
این بار برخلاف آزمایش قبل ورق به علت ضخامت کم از مرکز افزایش ارتفاع داشت و در نهایت ورق به سمت زمین خم شد. همان‌طورکه پیش‌تر اشاره شد در روش حرارت خطی به‌طورکلی بلافاصله بعد از اعمال حرارت به-علت انبساط حرارتی در سطح بالایی ورق به ویژه در ناحیه حرارت دیده، انحنای محدب (به سمت نازل) ایجاد می‌شود که در حین خنک‌کاری به علت اختلاف دمای دو سطح و وضعیت تنش‌ها که پیش‌تر تشریح شد انقباض شدید در ناحیه حرارت دیده منجر به جمع‌شدگی ورق می‌گردد و ورق در نهایت شکل مقعر به خود می‌گیرد. اما در ورق‌های نازک بعلت اینکه در عمل اختلاف دمایی زیادی بین دو سطح ایجاد نمی‌گردد و مرحله دوم یعنی انقباض و جمع‌شدگی انجام نمی‌پذیرد، همچنان‌که در شکل 9، دیده می‌شود ورق برخلاف حالت قبل شکل محدب به خود می‌گیرد.

جدول 1 خصوصیات حرارتی فولاد دریایی

گرمای ویژه J/kg.K	ضریب هدایت حرارتی W/m.K	ضریب انبساط حرارتی $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	دما $^{\circ}\text{C}$
450	51/9	10	0
499/2	51/1	11	100
565/5	46/1	12	300
630/5	41/05	13	450
705/5	37/5	14	550
773/3	35/6	14	600
1080/4	30/64	14	720
931	26	14	800
437/93	29/45	15	1450



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



شکل 10 مدل المان محدود با ابعاد 900×700×8 میلی‌متر تنها شامل پاس حرارتی میانی

1- Partition
2- Incropera
3- emissivity

جدول 2 خواص مکانیکی

دما (°C)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب 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 0/0001 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 می‌گیرد. جهت تحلیل مکانیکال معادله تعادل برابر است با [12]:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (4)$$

که در آن σ_{ij} مولفه‌های تانسور تنش¹، ρ چگالی و b_i مولفه‌های نیروی حجمی² می‌باشد. رابطه کرنش جابجایی با فرض کرنش‌های کوچک بصورت زیر است [13]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

که در آن ε_{ij} مولفه‌های کرنش و u_{ij} مولفه‌های جابجایی است. نهایتاً تنش‌ها از معادله ساختاری تنش - کرنش بدست می‌آیند. معادله ساختاری تنش - کرنش برابر است با:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (6)$$

که در آن C_{ijkl} مولفه‌های ماتریس سختی است که تابعی از مدول الاستیسیته E و نسبت پواسون است. در فرایند حرارت خطی مشابه جوشکاری، کرنش کل ε^{tot} برابر است با:

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{th} \quad (7)$$

که ε^e کرنش الاستیک، ε^p کرنش پلاستیک و ε^{th} کرنش حرارتی است. کرنش الاستیک و کرنش حرارتی به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

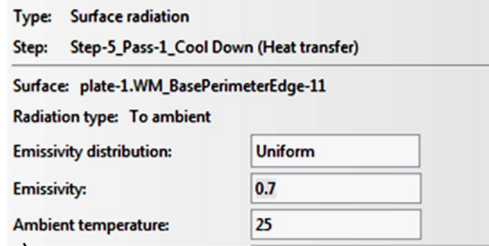
$$\varepsilon^{th} = \alpha_{th} (T - T_{ref}) \quad (9)$$

که در آن α_{th} ضریب انبساط حرارتی³، T_{ref} دمای مرجع⁴، در حالت بدون کرنش می‌باشد. در نهایت خواهیم داشت:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl}^{tot} - \varepsilon_{kl}^p - \varepsilon_{kl}^{th}) \quad (10)$$

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

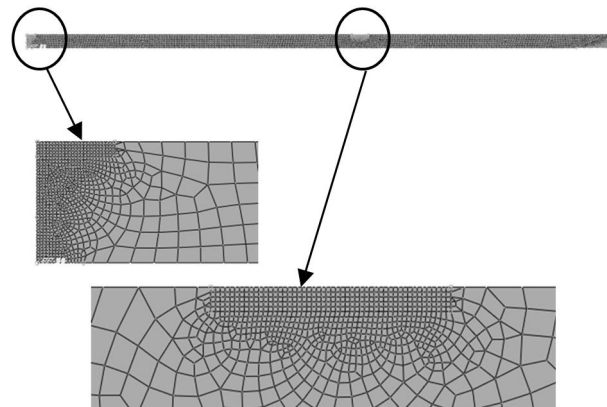
هر پاس حرارتی از دو مرحله تشکیل شده است. مرحله اعمال حرارت و مرحله خنک‌کاری. در مرحله اعمال حرارت با توجه به ضخامت 8 میلی‌متری



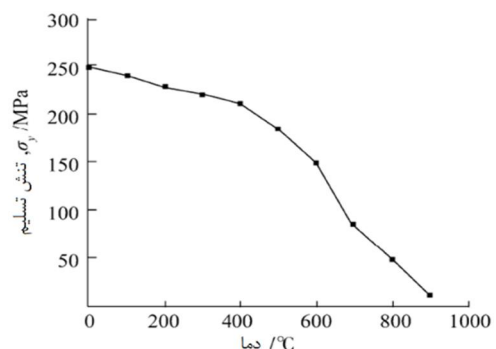
شکل 12 تعریف تشعشع و جابه‌جایی برای مقاطع مختلف ورق در نرم‌افزار آباکوس



شکل 13 تعریف دمای ناحیه اعمال حرارت (750 درجه)

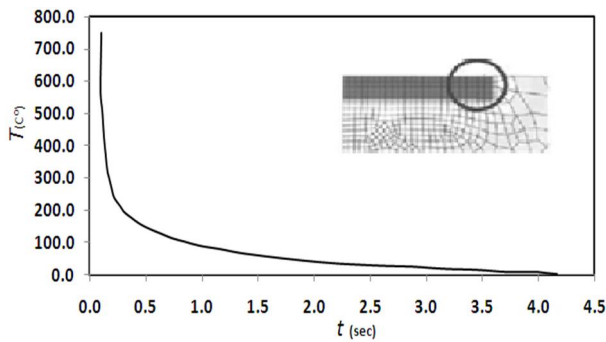


شکل 14 تعداد کل مش در حالت تحلیل دوبعدی 1963 در نیمی از مقطع ورق

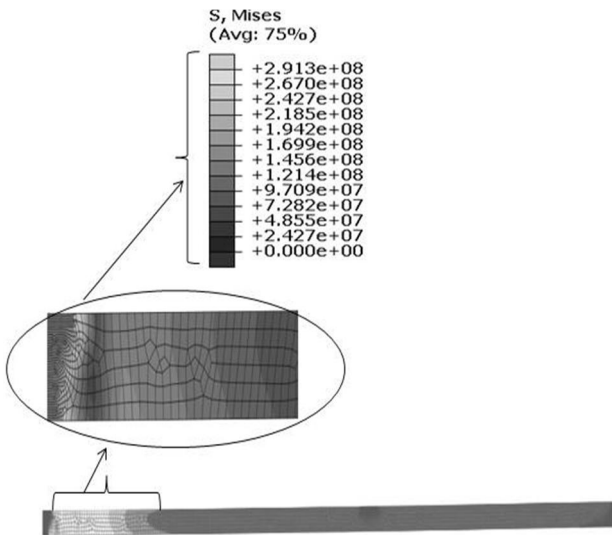


شکل 15 تغییرات تنش تسلیم به دما [9]

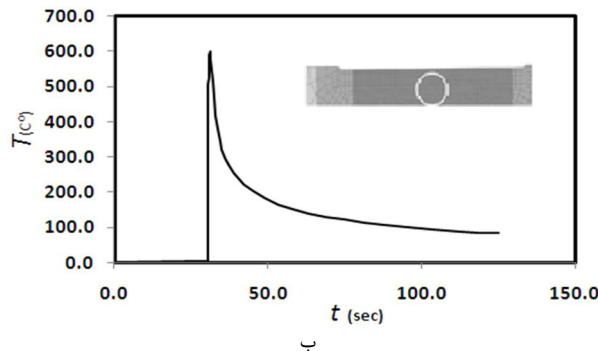
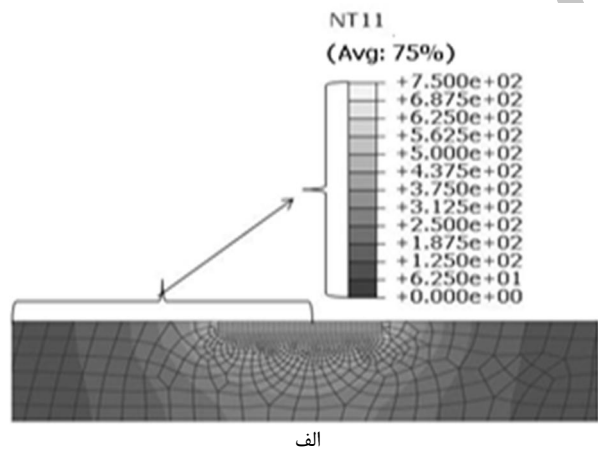
1- Stress Tensor
2- Body Force
3- Thermal Expansion Coefficient
4- Reference Temperature



شکل 18 نمودار تاریخچه حرارتی نقطه ای از ناحیه پاس حرارتی در حالت تک پاس



شکل 19 توزیع تنش و تغییر شکل نهایی به میزان 1 درجه برای حالت تک پاس

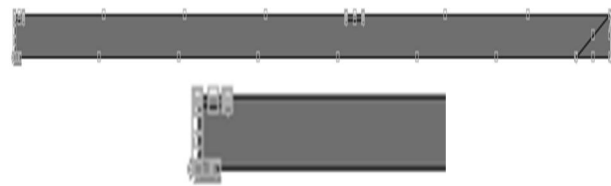


شکل 20 الف: توزیع حرارت در ابتدای شروع پاس میانی (واحد کانتورها: w/m^2) ب: تاریخچه حرارتی نقطه‌ای در زیر ناحیه پاس دوم

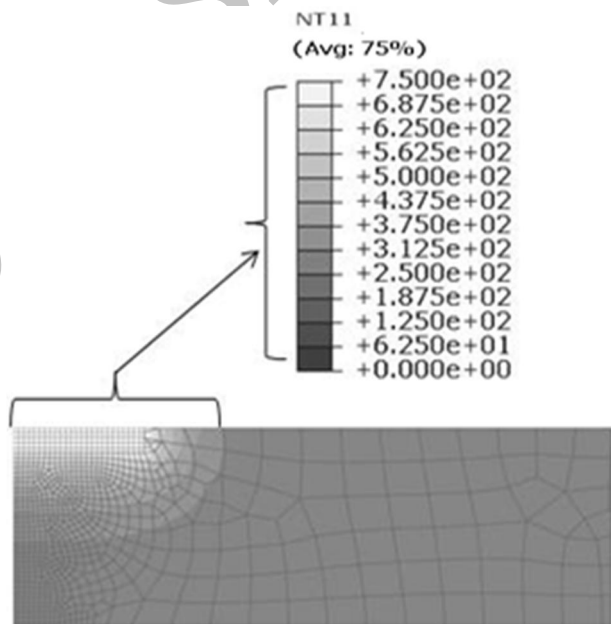
ورق و براساس پیشنهاد چیریلو [3] سرعت 5 میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین در مورد تعریف شرایط مرزی مسئله، بعد از انجام آزمایش بر روی مدل‌های مختلف نتایج نشان داد بهترین محل برای تعریف شرایط مرزی نقطه میانی ورق و در سطح پایین ورق است. محدود نمودن کناره‌های ورق باعث ایجاد خطا در حل می‌شود. همچنین در گوشه سمت راست نیروی عکس‌العمل 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 می‌دهد.

4- نتایج تحلیل المان محدود

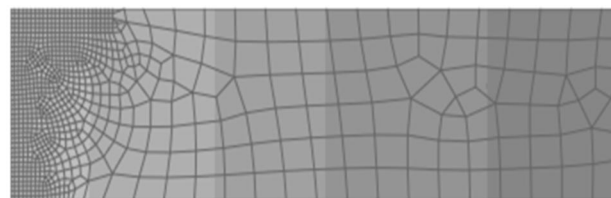
شکل 17، وضعیت توزیع حرارت را در هنگام شروع و خنک کاری پاس حرارتی نشان می‌دهد. (واحد کانتورها: w/m^2)



شکل 16 شرایط مرزی در نقطه میانی و در سطح پایین ورق



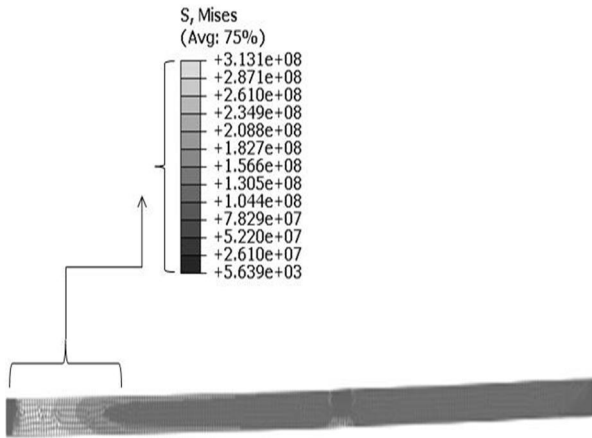
الف: وضعیت توزیع حرارت در آغاز پاس حرارتی (شروع اعمال حرارت)



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.

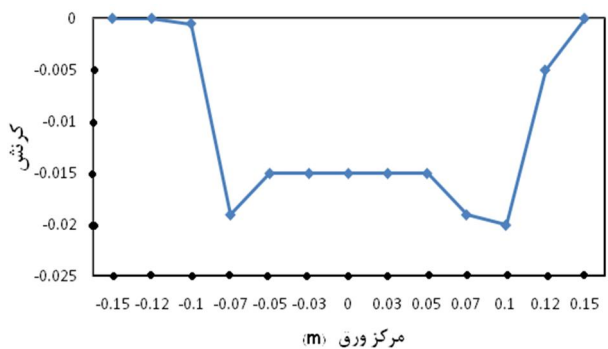
شکل 18، تاریخچه حرارتی را از لحظه شروع پاس حرارتی برای نقطه ای در ناحیه اعمال حرارت نشان می‌دهد. بعد از گذشت 40 ثانیه دمای فلز با دمای محیط برابر می‌شود.



شکل 19 افزایش نیرو تکیه‌گاه باعث افزایش میزان تنش ماکزیمم می‌شود.



شکل 20 مقایسه نتایج عددی و تجربی برای زاویه خم در ورق ضخامت 8 میلی‌متر



شکل 21 نمودار کرنش المان‌های موجود در مرکز 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 خم‌کاری می‌شود.

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

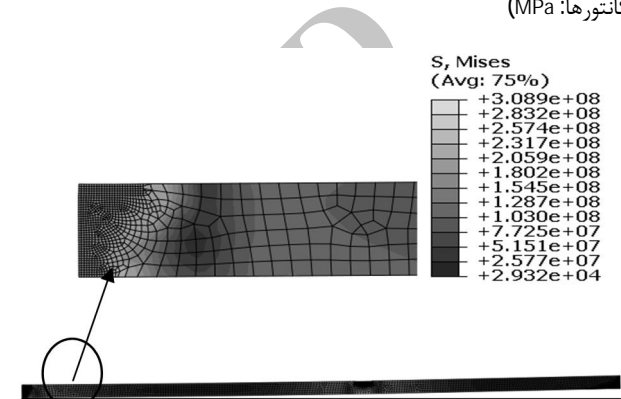
در شکل 24 نتایج عددی و تجربی مقایسه شده و علت تغییرات در بخش نتیجه‌گیری توضیح داده شده است.

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 در حدود 0/015 است. کرنش در فاصله 10 میلی‌متری به 0/02 می‌رسد 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

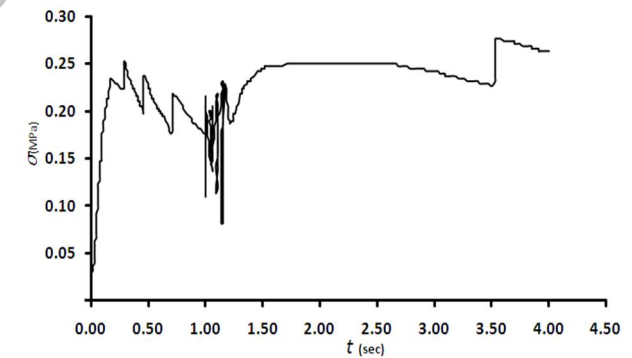
شکل 19، وضعیت توزیع تنش را در حالت تک پاس نشان می‌دهد. تنش در ناحیه حرارت دیده برابر 291 مگاپاسکال است که 40 مگاپاسکال از تنش تسلیم بیشتر است که نشان‌دهنده ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ورق است. همچنین میزان خم‌نهایی ایجاد شده برای حالت تک پاس برابر 1 درجه می‌باشد. (واحد کانتورها: MPa)

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.

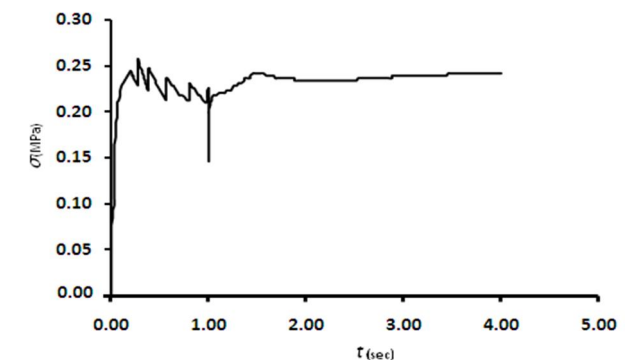
شکل 21، توزیع تنش و تغییر شکل نهایی ورق را بعد از اعمال پاس‌های کناری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با اضافه شدن پاس‌های کناری به علت افزایش میزان حرارت میزان تنش‌ها نیز افزایش می‌یابد. (واحد کانتورها: MPa)



شکل 21 توزیع تنش و تغییر شکل نهایی در حالت 3 پاس حرارتی (زاویه خم نهایی 2.9 درجه)



الف: نمودار تنش-زمان برای دمای ماکزیمم 750 درجه



ب: نمودار تنش- زمان برای دمای ماکزیمم 600 درجه

شکل 22 مقایسه میزان تنش‌ها در 3/5 ثانیه اول بعد از شروع پاس اول (مرحله قبل از خنک کاری) در حالت‌های دمای اولیه 750 و 600 درجه

T_{∞} دمای محیط (c)

T دما (K)

علایم یونانی

α_{th} ضریب انبساط حرارتی (c^{-1})

ε ضریب صدور موثر

ρ چگالی ($kg\ m^{-3}$)

σ_y تنش تسلیم (MPa)

σ ثابت استفان بولتزمن

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 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 butt-welds of dissimilar pipe joints*, International Journal of Pressure Vessel and Piping, P.776-769, 2009.
- [13] D.George, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book company, New York, 1988.
- [14] M.S Zoei, H. Pasdarsahri, M. Farzin, A.H. Mohammadi, *Finite 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. Pourkhalo, S. Mazdak, *Numerical and Experimental investigation on laser 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)

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 نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود روش حرارت خطی 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 می‌توان این روش را اجرا نمود.
- ترکیب اکسیژن و پروپان 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 می‌توان گفت با افزایش خطوط حرارتی، تنش‌های حرارتی افزایش می‌یابد و این افزایش تنش باعث افزایش میزان خم ورق می‌شود.
- 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 می‌تواند 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 می‌شود.
- 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 کاملاً برعکس می‌شود و ورق به سمت خلاف مشعل خم می‌شود.

6- فهرست علائم

C ظرفیت گرمایی ویژه ($J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$)

E مدول الاستیسیته (GPa)

K ضریب هدایت حرارتی ($w\ m^{-1}\ s^{-1}$)

N راستای کسینوس نرمال به مرز

q_{conv} میزان انتقال حرارت جابجایی ($w\ m^{-2}$)

q_{rad} میزان انتقال حرارت تشعشعی ($w\ m^{-2}$)

t زمان (sec)