



بررسی روش حرارت‌دهی خطی با خنک کاری و تعیین مسیرهای حرارتی به روش کرنش - معیار

علی شهیدی^۱، محمدمهدی نکاھی^۱، احمد عاصمپور^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۹۵۶۷ assem@sharif.edu

چکیده

استفاده از ورق‌های فلزی در صنایع مختلف از جمله کشتی‌سازی بسیار متداول است. در این صنایع ابجاد سطوح مورد نظر از ورق تخت اولیه به کمک فرآیند حرارت‌دهی خطی حائز اهمیت است. در این مقاله ابتدا به شیوه‌سازی این فرآیند و انتقال حرارت بین گاز خروجی از مشعل و ورق پرداخته شده است. برای مدل‌سازی اثر مشعل و هوای خنک کننده از مدل جت برخورد کننده در نرم‌افزار تجاری Flownet استفاده شده است. پس از یافتن توزیع دما در ورق، با انتقال این توزیع دما به نرم افزار آنسپس و انجام یک تحلیل ترموملاستو-پلاستیک تغییر شکل ورق بدست آمد و پس تابع این کار اعتبارسنجی شد. برای اجرای فرآیند حرارت‌دهی خطی با استفاده از مسیرها و شرایط حرارتی مشعل تعیین گردد. به این منظور مسیرهای حرارتی شکل استوانه‌ای با روش کرنش معيار بدست آمد. به کمک شیوه‌سازی انجام شده، ۶۳ اجرای مختلف در توان‌ها و سرعت‌های مختلف مشعل انجام داده و برای یافتن توان و سرعت حرکت مشعل، به آموزش شکله‌ی عصبی با این داده‌ها پرداخته شد. در انتها وینگی‌های حرارتی بدست آمده برای این شکل به کمک شیوه‌سازی به یک ورق تخت اولیه اعمال شده و از مقایسه‌ی شکل بدست آمده با شکل مطلوب خطای کمتر از ۵ درصد بدست آمد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۰ شهریور ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۴ مهر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

شرط دهنده ورق

حرارت دهنده خطی

تحلیل ترموملاستو-پلاستیک

مدل جت برخورد کننده

روش کرنش معيار

Investigation on Line Heating Process with cooling and Determination of the heat paths by Strain-Based Method

Ali Shahidi, Mohammad Mahdi Nekahi, Ahmad Assempour*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 11365-9567, Tehran, Iran. assem@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 July 2016

Accepted 10 September 2016

Available Online 15 October 2016

Keywords:

Sheet metal forming
Line Heating
Thermo Elasto-Plastic Analysis
Impingement jet model
Strain Based Method

ABSTRACT

Sheet Metals are widely used in different industries such as ship building. One important subject in these industries is to create the desired sheets through line heating process. In this paper, first, the simulation of heat transfer between a gas torch and a plate during the line heating process is investigated. Impingement jet model is used to simulate the effect of a heat source (flame) and air cooling on the plate by using the commercial engineering software, FLUENT. Then, the computed temperature distribution by FLUENT is fed into the ANSYS FEM package for thermo Elasto-Plastic deformation analysis and the results are validated. Process execution needs heat paths and heat conditions. For this purpose heat paths of the cylindrical shape were obtained based on the Strain-Based Method. For thermal conditions a neural network was trained. In this regard, close to 63 different situations in different powers and torch speeds were run. Finally, to verify the thermal characteristics obtained for the cylindrical shape, paths and thermal conditions obtained were passed on a flat sheet metal by simulation and the result was compared with the desired shapes. It was shown that the Strain-Based Method is very practical in determining the thermal paths.

دریایی ما نیز در حال بین‌المللی شدن می‌باشد، اهمیت این روش در صنعت دریایی بیشتر برای ما ملموس است. ورق‌های به کار رفته در این صنعت ضخیم و سنتگین بوده و شکل و فرم شاورها با یکدیگر متفاوت است، به همین دلیل ساخت قالب برای هر شناور مقرر به صرفه نخواهد بود. به همین منظور امروزه برای ورق بدن کشتی‌ها از روش شکل دهنده می‌باشد. حرارت‌دهی خطی استفاده می‌کنند.

۱- مقدمه
شكل دهنده به روش حرارت‌دهی خطی^۱ کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله ساخت مخازن جدار ضخیم در صنعت نفت و ساخت ورق‌های انحنی دارد. بدون قالب مورد استفاده در بدن کشتی‌ها در صنعت دریایی دارد. اما از آن جا کشور ما در شمال و جنوب، مرزهای آبی گسترهای داشته و صنعت

¹ Line Heating

Please cite this article using:

A. Shahidi, M. M. Nekahi, A. Assempour, Investigation on Line Heating Process with cooling and Determination of the heat paths by Strain-Based Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 293-304, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

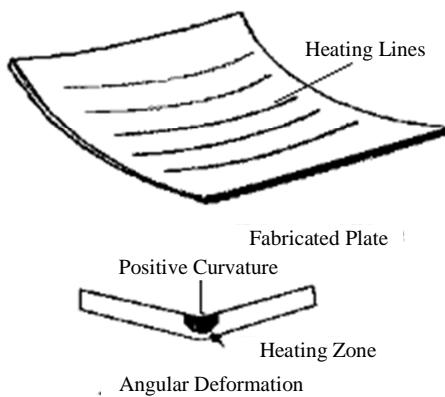


Fig. 1 Flat plate and fabricated plate after bending in Line Heating Process [14]

شکل ۱ ورق اولیه و سطح نهایی پس از فرآیند خنک کاری با منبع حرارتی [4]

می‌باشد (محل داده برداری) و در لبه‌ها این مقدار کمتر است. بیسوار [5] بر روی حرارتدهی خطی ورق تخت در یک و دو بار عبور مشعل کار کرده است. او در کار عملی خود از شعله گاز استیلن و مشعل‌های موجود در بازار استفاده کرد. جهت مدل سازی گرمایی، ورق را به دو قسمت تقسیم نمود. در ناحیه اول فقط توزیع گوسی اعمال شد و در ناحیه دوم نیز همرفت‌ها را با ضریب جابجایی نیوتونی معلوم برای خنک کاری ورق در نظر گرفت.

چوی [6] از توزیع گوسی استفاده کرده است. ابتدا مسئله گرمایی را حل و سپس آن را به محیط مکانیکی برای انجام یک تحلیل الاستوپلاستیک انتقال داده است. بعد از دو مین عبور منبع گرم و بعد از خنک شدن ورق تا ۱۵۰ درجه، نشان داده است که تغییر شکل بیش از ۲ برابر تغییر شکل عبور اول منبع گرم حاصل شده است.

و [7] به بررسی دقیق‌تر انتقال حرارت بین ورق و مشعل پرداخته است. او با مدل سازی میدان جریان سیال در خروجی از مشعل و در اطراف ورق، انتقال حرارت بین سیال و ورق را با توجه به روابط نیوتون بدست آورده است. او یک مدل متقاض محو را توسعه داده است که مشعل بر روی ورق ثابت بوده و آن را گرم می‌کند. برای مقایسه با انتقال حرارت گوسی، در زمان معلوم، یک شعله گوسی به نتایج خود برازش کرده و اثر این دو منبع گرم را در طول زمان بر ورق مشاهده نموده است. او نشان داده است که با گذشت زمان اختلاف دمای به دست آمده از شعله گوسی و تحقیق او بیشتر می‌شود. چرا که با افزایش دمای ورق انتقال حرارت بین ورق و سیال کاهش یافته ولی در شعله گوسی چنین امری در نظر گرفته نمی‌شود.

هاشمی و همکاران [8] آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی روش حرارت خطی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برووی ورق دریایی گردید E انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که با استفاده از حرارت گاز اکسی-استیلن میتوان انحنای ملایمی در ورق ایجاد نمود. با بررسی اثر میزان حرارت ورودی و افزایش خطوط نشان داده شد 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- روش کرنش معیار

ابتدا ترین فعالیتها در سال 1994 توسط اوئدا صورت پذیرفت و او توانست مسیرهای حرارت دهی را بر مبنای توزیع کرنش‌های ذاتی بیان کند. او مقادیر کرنش‌های ماندگار را به دست آورد و مناطق حرارتدهی را بر مبنای توزیع

در این مقاله ابتدا به مدل سازی فرآیند شکل دهی با حرارتدهی خطی با خنک کاری پرداخته شد. پس از صحیت یابی مدل سازی صورت گرفته مسیرهای حرارتی شکل استوانه‌ای با روش کرنش معیار بدست آمد.

2- معرفه ادبیات

خنک کاری با منبع حرارتی، یکی از فرآیندهای شکل دهی ورق‌های فولادی است. در این فرآیند با اعمال گرمایش و خنک کاری کنترل شده در امتداد مسیرهای معین روی ورق، آن را شکل می‌دهند. وقتی یک طرف ورق متوسط منبع حرارتی گرم می‌شود در حالی که طرف دیگر آن خنک است، گرادیان‌های دمایی به خصوص در راستای ضخامت باعث انبساط‌های گرمایی و در نتیجه ممان خمی و نیروهای صفحه گرمایی می‌شود. چون دما در منطقه زیر منبع گرما بالا و برعکشش تنفس تسیلیم در این منطقه پایین است، تغییر شکل پلاستیک روی می‌دهد. در هنگام خنک شدن ورق، سطح منطقه گرم شده منقبض شده و باعث خمش معکوس در ورق می‌شود. "شکل ۱" به صورت شماتیک، ورق تخت اولیه و ورق شکل داده شده و مسیرهای گرمایش روی ورق را نشان می‌دهد. در این شکل هم‌چنین نحوه تغییر شکل زاویه ورق پس از اعمال هر خط گرمایش نمایش داده شده است. اولین کارهایی که بر روی تغییر شکل با استفاده از حرارت صورت گرفت به سال 1961 [1] باز می‌گردد. از آن زمان تاکنون در روش‌های عددی و محاسباتی و نرم‌افزارهای موجود پیشرفت‌های زیادی حاصل است؛ از جمله می‌توان به خواص متغیر ماده با دما (شامل خواص گرمایی و مکانیکی)، توانایی اعمال شرایط مرزی گرمایی به دلخواه، معیار رسیدن به کرنش پلاستیک در هر نقطه و غیره اشاره کرد.

2-1- منبع حرارتی شعله

در این تحقیق نیز از منبع حرارتی شعله استفاده شده است. مشعل‌های گازی جریان گاز را از دو کپسول گاز و اکسیژن دریافت کرده و پس از اختلاط با یکدیگر از نازل انتهایی خارج می‌کنند. در بیرون مشعل به دلیل دمای بالا این مخلوط محترق شده و گرما آزاد می‌شود.

2-2- مدل سازی مشعل گازی

برای مدل سازی مشعل گازی دو راه وجود دارد: توزیع گوسی و جریان جت برخورد کننده. توزیع گوسی حرارت به دو دلیل سادگی و تطبیق خوب با عمل در نقاط دور از لبه، سیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این توزیع حرارت، اثری از دما وجود ندارد و انتقال حرارت به صورت معلوم و مستقل از دما صورت می‌گیرد. در این مقاله، برای دقت بیشتر و بررسی رفتار ورق در لبه‌ها از مدل جت برخورد کننده استفاده گردید که تاکنون این روش برای حرارت دهی خطی به کار گرفته نشده است.

در کارهای اخیر، خواص ماده، متغیر با دما وارد شده است. این امر ناشی از گسترش نرم‌افزارها و توان بالای محاسباتی پردازش گرها بوده است. در زمینه بررسی پلاستیسیته نیز دیگر نیازی به محدوده‌بندی جسم به نواحی مختلف مثل کار جانگ [2] نیست.

و گا [3] ورق را به دو بخش تقسیم کرده است و انتقال حرارت مشعل را در بخش اول به دو المان در طول و چهار المان در عرض و یک المان در ضخامت اعمال نموده است. در بخش دوم، برای خنک کاری ورق، انتقال حرارت هم‌رفت‌ها را روی سطح اعمال کرده است. او به این نتیجه رسید که بیشترین تغییر شکل ورق مربوط به وسط ورق

دماهی ورق را افزایش داده است. سپس با حرکت در راستای طولی ورق یک مسیر را گرم کرده است. همزمان با این فرایند هوا از دهانه‌ی خروجی یک نازل با فاصله‌ی از مشعل به ورق فلزی با سرعت وارد شده و پس از برخورد با آن باعث خنک شدن ورق به صورت سریع شده است و در این حین، دیگر نقاط ورق با جابجایی آزاد هوا خنک شده‌اند.

حل مسئله‌ی شبیه‌سازی در دو قسمت انجام شده است. قسمت اول مربوط به یافتن میدان جریان سیال حول ورق و انتقال حرارت بین سیال و ورق بوده است. قسمت دوم مربوط به اعمال دماهای به دست آمده از قسمت اول و محاسبه تغییر شکل ورق در اثر کرنش‌های دمایی می‌باشد. بخش سیالاتی با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت¹ و بخش جامداتی آن با نرم‌افزار تجاری انسیس² انجام گرفته است. در این تحلیل، خواص مربوط به مواد با توجه به توانایی‌های نرم‌افزار متغیر با دما وارد شده است تا بتوان شبیه‌سازی را هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک کرد. در این گونه تحلیل‌ها که حل دمایی و تغییر شکلی جداگانه انجام شده است، دی‌کوبله گفته می‌شود. در این فرآیند بهدلیل تغییر شکل اندک ورق، از اثر متقابل تغییر شکل بر جریان سیال و توزیع دماهی ورق صرف‌نظر شده است، ولذا حل مستقل از هم دما و جابجایی مانع ندارد. ماراما می‌در کار خود نشان داده است که حل کوبله و دی‌کوبله این مسئله تفاوت چندانی با هم ندارد [14].

3-1- فرضیات هندسی ورق

برای انجام این تحلیل از تقارن نسبت به وسط ورق استفاده شده است. دلیل استفاده از تقارن در این تحلیل بالارفتمن سرعت حل و پایین آمدن زمان هر تحلیل می‌باشد و این امر با توجه به این که تعداد تحلیل‌های عددی موردنیاز بالا است، کاملاً ضروری می‌باشد.

3-2- بخش سیالاتی

آن چه که در واقعیت رخ می‌دهد خروج مخلوط اکسیژن و گاز از مشعل و محترق شدن به علت دمای زیاد می‌باشد. تحلیل این مسئله به خودی خود دارای پیچیدگی‌های بسیار بوده و مطلوب ما نمی‌باشد. لذا مطابق کار وو [7] از فرض ساده کننده جریان هوای داغ برخورد کننده با ورق استفاده شده است. همچنین در این مسئله عمل خنک‌کاری، با هوای خنک کننده برخورد کننده با و با فاصله از مشعل انجام گرفته است. انتقال حرارت بین سیال و ورقة است توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در نهایت دمای ورق به صورت تابعی از زمان به عنوان خروجی گزارش شده است.

3-1-2- مروری بر معادلات

معادلات پایه‌ای که برای محاسبه میدان جریان به کار رفته است شامل معادلات (1) پیوستگی و (2) مومنتوم می‌باشد. برای به دست آوردن میدان دما، معادله (3) انرژی نیز حل شده است [15]. با توجه به این که سرعت و ماهیت جریان در رده آشفته قرار گرفته است، روابط مربوط به جریان آشفته در معادلات (4) و (5) مدنظر قرار گرفته‌اند. در جریان آشفته برای بررسی متغیرها به دلیل این که نوسانات زیاد و محدودی دارند، از متغیر اصلی به عنوان میانگین مقادیر و از متغیر دارای³ به عنوان میزان نوسانات استفاده شده است. از آنجایی که میزان نوسانات در زمان تغییر می‌کند، در رابطه مورد نظر، از میانگین این مقادیر در طول زمان استفاده شده است.

¹ FLUENT
² ANSYS

کرنش‌های ذاتی و متتمرکز کردن کرنش‌ها به مناطق حرارتدهی مشخص نمود. او به طور کامل بیان نکرد که کرنش‌های ذاتی چه نقش مرکزی را ایفا می‌کنند. هم‌چنین بیان نکرد که آیا آنالیز المان محدود الاستیک تغییر شکل‌های بزرگ، برای مسائل الکتروپلاستیک (مانند حرارتدهی خطی) صحت دارد یا خیر.

یو و همکارانش در سال 2000 [9]. الگوریتم‌هایی را برای توسعه‌ی بهینه‌ی سطوح دو اعشاری به سطوح صفحه‌ای از روشهای کرنش حاصل در این تبدیل مینیم مقدار شود ارائه کرده‌اند. فرآیند توسعه توسط کرنش صفحه‌ای از سطح منحنی به سطح تخت مدل شد. توزیع میدان کرنش مینیم مناسب، با حل یک مسئله‌ی برنامه‌نویسی غیرخطی به دست آمد. در این مقاله مسیرهای کرنش محاسبه نشده‌اند. چنگ و یاو در سال 2004 [10]. یک فرآیند ساخت را برای لیزرفرمینگ دستهای از ورق‌های فلزی دو بعدی ارائه کرده‌اند. فرآیند ساخت آن‌ها بر مبنای الگوریتم ژنتیک بود. تعداد اسکن‌های لیزر، فاصله‌ی بین اسکن‌های مجاور، سرعت لیزر و توان لیزر به عنوان متغیر در سیکل طراحی موردنظر قرار گرفته‌اند. این ایده برای قطعات دو بعدی به خوبی جواب داد و با استفاده از آن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تصمیم‌گیری برای مینیم کردن اختلاف بین سطح موردنظر و شکل فرم داده شده به دست آمد. گزارش‌های آن‌ها برای اشکال سه‌بعدی ساده و همچنین اشکال نیمه سه‌بعدی مانند اشکال استوانه‌ای و متقارن ارائه شده بود. به هر حال روش‌های ارائه شده توسعه این محققین برای طراحی این فرآیند سه‌بعدی دو اعشاری عمومی که دارای اشکال پیچیده بودند، مناسب نبود.

چنگ و یاو در سال 2004 [11]. روشهای ارائه کرده که برای طراحی مسیرهای لیزر و شرایط حرارتی لیزرفرمینگ در قطعات سه‌بعدی در ورق‌های نازک مورد استفاده قرار می‌گرفت. میدان کرنش به وسیله المان‌های محدود محاسبه می‌شود. در برآورد مسیرهای اسکن لیزر و شرایط حرارتی، این روش تنها جزء کرنش‌های صفحه‌ای از کرنش‌های کلی را ارائه می‌کرد و بنابراین ممکن بود در ورق‌های ضخیم‌تر خطاهای بزرگی ایجاد شود.

لیو و همکارانش در سال 2004 [12]. استراتژی‌هایی را برای اشکال سه‌بعدی ارائه کرده و در ایده‌ی آن‌ها میدان کرنش براساس اختلاف هندسی و ایده‌ی بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. این ایده تنها صفحات میانی ورق را مورد بررسی قرار می‌داد و اثر کرنش‌های خمی در امتداد ضخامت ورق را در نظر نمی‌گرفت. بنابراین این روش تنها برای ورق‌های نازک کاربرد داشت.

لیو و همکارانش در سال 2005 [13]. روش طراحی فرآیند لیزرفرمینگ براساس المان محدود سه‌بعدی را ارائه کرده. که در این روش ایده‌ی قبلی‌شان را با در نظر گرفتن کرنش‌های خمی در کنار کرنش‌های صفحه‌ای بر ورق ضخیم توسعه دادند. در این روش میدان کرنش به وسیله‌ی یک المان محدود الاستیک با تغییر شکل‌های بزرگ محاسبه می‌شود. مسیرهای اسکن لیزر عمود بر جهت می‌نیم کرنش اصلی در صفحات بالا، وسط و پایین ورق در نظر گرفته می‌شوند. هم‌چنین نسبت‌های کرنش صفحه‌ای و خمی به منظور برآورد شرایط حرارتی محاسبه می‌شوند.

3- روش انجام تحقیق

این پژوهش از دو بخش شبیه‌سازی فرآیند حرارتدهی خطی و تعیین مسیرهای حرارتی دو شکل بالشتی و استوانه‌ای به روش کرنش معیار تشکیل شده است. در بخش شبیه‌سازی، مسئله‌ی ای حل شده است که در آن سیال داغ از دهانه مشعل خارج شده و پس از برخورد با ورق و تبادل حرارت با آن،

شبیه‌سازی‌ها توجیهی به آن نشده است.

3-2-3- شرایط مسئله

این مسئله دارای ذاتی متغیر با زمان است و در نتیجه از تحلیل گذرا استفاده شده است. در این تحقیق برای شعله از مدل هوای داغ برخوردکننده با ورق استفاده شده است. شرایط ورودی برای هوای داغ، دو مورد دبی و دمای آن می‌باشد. هم‌چنین بهمنظور خنک کاری از جت هوای خنک کننده استفاده شده است که شرایط ورودی برای آن سرعت بوده و دمای آن برای مطابقت با

حالت واقعی دمای محیط در نظر گرفته شده است.

دمای شعله استیلن در نوک شعله حدود 3000 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [19]، که با توجه به دمای آدیباٽیک آن، 3300 درجه سانتی‌گراد [20]، معقول است. بدلیل این‌که از انجام واکنش و آزاد شدن حرارت صرف نظر شده است و با توجه به اختلاط سیال پس از خروج از مشعل با هوای اطراف، دمای در نظر گرفته شده برای خروجی هوا در شبیه‌سازی، طوری تنظیم شده است که در فاصله معینی از مشعل برابر دمای گزارش شده در کارهای عملی باشد به دلیل استفاده از بیشترین دمای شعله، قرار گیری مشعل نسبت به ورق به گونه‌ای است که نوک شعله مماس بر ورق باشد.

این فاصله برای شعله استیلن در حدود 20 mm می‌باشد [1]. اندازه گیری دبی گازهای مورد استفاده در مشعل نیاز به تجهیزات دارد و ساده نیست. تعداد کمی از پژوهشگران، دبی گازهای استفاده شده در آزمایشات خود را گزارش داده‌اند و بعضاً به صورت فشار کپسول ذکر کرده‌اند. می‌توان قدرت شعله و دبی را پارامترهای مرتبط به هم دانست و از اثر شعله بر دمای ورق در طول زمان دبی را تخمین زد. برای این تحقیق از شرط مرزی سرعت

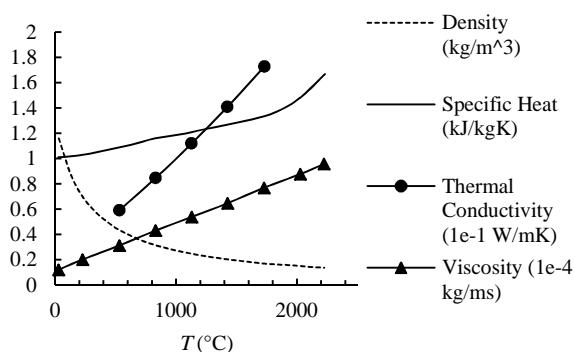


Fig. 2 Flame properties

شکل 2 خواص شعله

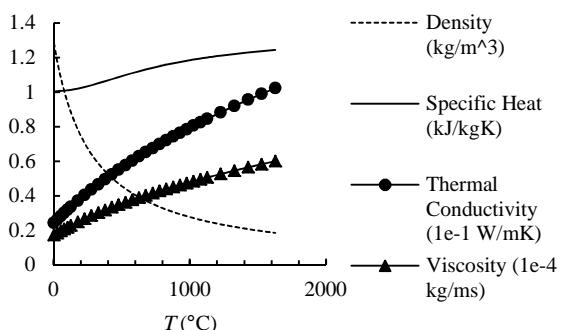


Fig. 3 Air properties used for cooling

شکل 3 خواص هوای مورد استفاده به منظور خنک کاری

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1) \text{ پیوستگی}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u_i)}{\partial z} = \rho \vec{g}_i - \nabla P + \nabla \cdot (\mu_e \nabla \vec{v}) \quad (2) \text{ مومنتوم}$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{v}) = \nabla \cdot (K_e \nabla T) - P \nabla \cdot \vec{v} \quad (3) \text{ انرژی}$$

$$-\rho u' u'_j = \mu_T (u_{i,j} + u_{j,i}) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4) \text{ ویسکوزیته آشفته}$$

$$-\rho C_p \vec{v} \cdot \vec{T}' = K_T \nabla T \quad (5) \text{ هدایت آشفته}$$

با توجه به کارهای پیشین، از مدل $k-\epsilon$ برای محاسبات آشفته‌گی استفاده شده است [7]. در این معادلات، ضرایب موردنیاز در روابط ویسکوزیته‌ی آشفته و هدایت آشفته به دست آمده است. ویسکوزیته و هدایت مؤثر که در روابط مومنتوم و انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از نتایج معادلات (8) و (9) موسوم به معادلات $k-\epsilon$ استخراج شده است [16].

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} k - \frac{\mu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) = \mu_T \varphi - \rho \epsilon \quad (6) \text{ معادله } k$$

$$\frac{\partial(p\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \epsilon - \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) = C_{1\epsilon} \mu_T \frac{\epsilon}{k} \varphi - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7) \text{ معادله } \epsilon$$

$$\mu_e = \mu + C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8) \text{ ویسکوزیته مؤثر}$$

$$K_e = K + \frac{\mu_T C_p}{\sigma_k} \quad (9) \text{ هدایت مؤثر}$$

3-2-3- خواص سیال

از آنجایی که فرض ساده ساز هوای داغ برخورد کننده با ورق مورد استفاده قرار گرفته است، یک فاز سیال وجود دارد که خواص آن مطابق با محصولات احتراق و متغیر با دما در نظر گرفته شده است. اگر از شعله خنثی استفاده می‌شود، با فرض ایده‌آل بودن فرآیند احتراق، محصولات واکنش شامل CO_2 و H_2O بوده که در یک فاز، خواص به صورت میانگین وزن دار از نسبت مولی آن‌ها به دست می‌آمد. واکنش سوختن استیلن با اکسیژن این گونه است که:



$$\text{Property} = \frac{2 \times \text{Property}_{\text{CO}_2} + \text{Property}_{\text{H}_2\text{O}}}{3} \quad (11) \text{ محاسبه خواص}$$

در نهایت با انجام میانگین‌گیری در دمای‌های مختلف برای خواص چگالی، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و ویسکوزیته، نمودار "شکل 2" جهت استفاده در نرم‌افزار استخراج شده است [17].

برای هوای مورد استفاده به منظور خنک کاری از خواص هوای محیط استفاده شده است که نمودار آن در "شکل 3" نشان داده شده است. در این قسمت، توزیع دمای ورق همزمان با توزیع دمای جریان حل شده است و نیاز است که پارامترهای حرارتی ورق به نرم‌افزار داده شود. به دست آوردن خواص مختلف ماده در دمای‌های گوناگون هزینه‌های زیادی دارد و از این‌رو در تحقیق این داده‌ها از کارهای دیگران بازخوانی شده است.

چگالی، ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی از پارامترهای موردنیاز می‌باشند. از خواص فولاد آلیاژ کربنی 0.19 برای ورق فلزی استفاده شده است. اطلاعات وارد شده در نرم‌افزار در "شکل 4" آمده است [17]. با توجه به داده‌های موجود، مقدار چگالی در بازه‌ی دمایی مورد استفاده، تغییرات قابل توجه نداشته و ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار چگالی برای ورق فلزی 7800 kg/m³ می‌باشد [18]. بیشترین دمای ورق در حین شبیه‌سازی و کار عملی از 700°C فراتر نمی‌رود و لذا تغییر فاز در ورق وجود ندارد و در

جدول ۱ ضریب انتقال حرارت همرفتی سطح در خنک کاری با هوا [14]

Table 1 Air cooling convection coefficient

1000	800	600	400	325	300	293.2	T [K]
727	527	327	127	52	27	20	T [°C]
7.1	7.4	7.8	7.3	5.3	3.4	0	h_f [W/m ² K]

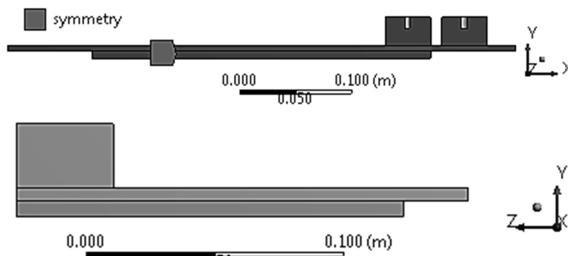


Fig. 5 Halved areas, Y-Z view (bottom figure)– Symmetry boundary condition planes, X-Y view (top figure)

شکل ۵ نواحی نصف شده ، تصویر از صفحه Y-Z (شکل پایین) صفحات با شرط مرزی تقارن، تصویر از صفحه X-Y (شکل بالا)

پس از آغاز فرایند حرارتدهی و قبل از شروع حرکت، مشعل در راستای خط حرارتدهی حدوداً به مدت 10 ثانیه ثابت مانده است تا دمای ورق را به مرز بین 600 تا 700 درجه‌ی سانتی‌گراد که دمای مطلوب ورق فولادی برای شکل‌دهی است، برساند. سپس با سرعت ثابت حرکت خود را ادامه داده است. در طول مدت 10 ثانیه‌ی ابتدایی که ورق هنوز شروع به حرکت نکرده است، سرعت خروجی هوای خنک‌کاری برابر صفر بوده و پس از شروع حرکت مشعل، سرعت خروجی خنک‌کاری به تدریج افزایش یافته است و با فاصله‌ی از منبع حرارتدهی عمل خنک‌کاری انجام گرفته است. میزان سرعت خروجی از مشعل و خنک‌کاری، دو پارامتر مؤثر و مورد بررسی در میزان تغییر شکل بوده‌اند. پس از آن که مشعل به لبه‌ی انتهایی ورق نزدیک شد، به منظور حفظ تقارن، فاصله‌ای که در شروع عمل حرارتدهی و خنک‌کاری وجود داشت، در انتهای مسیر نیز حفظ شده است. حرکت مشعل در این تحقیق، بر روی خط صاف و با سرعت ثابت در نظر گرفته شده است.

در انتهای فرایند، پس از اجرای تحلیل در نرم‌افزار تجاری فلوبنت، توزیع دمای سطح ورق برای هر نقطه و در هر لحظه بدست آمده است و در قسمت حل جامداتی برای محاسبه‌ی تغییر شکل ورق مورد استفاده قرار گرفته است.

3-3-بخش جامداتی

پس از محاسبه‌ی توزیع دما در ورق برای بازه‌ی زمانی مورد بررسی در قسمت سیالاتی، نتایج به صورت فایل‌های ورودی به بخش جامداتی وارد شده‌اند و این توزیع بهصورت یک بار دمایی به ورق اعمال شده و تغییر شکل ورق در هر لحظه و در انتهای فرایند بدست آمده است. با توجه به آن که میزان تغییر شکل نسبت به ابعاد، قابل اغراض نیست و تغییر شکل‌های بزرگ وجود دارد، نباید از جملات با درجات بالاتر موجود در کرنش صرف نظر کرد. در تحلیل تغییر شکل، از آن‌جایی که زمان به اندازه کافی زیاد است و در این مدت اثرات زمانی جرم ورق بر تغییر شکل آن قابل صرف‌نظر کردن است، از تحلیل "شبه‌گذرا"³ استفاده گردیده است.

3-1-3-خواص ورق

انجام آزمایشات برای بدست آوردن خواص مواد در دمای‌های مختلف بسیار پر

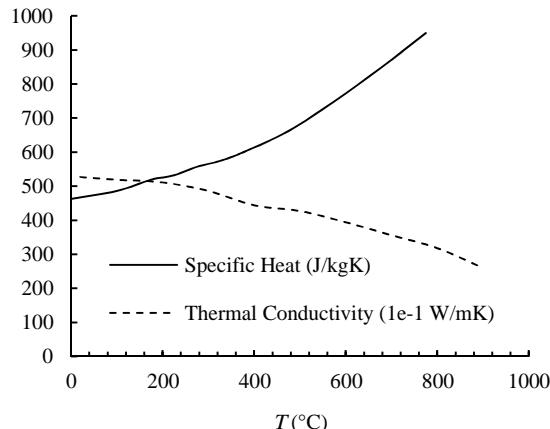


Fig. 4 Thermal Properties of steel sheet

شکل ۴ خواص گرمایی ورق فولادی

استفاده شده است که پروفیل آن در سطح یکنواخت می‌باشد.

پس از اجرای تحلیل، برای یافتن مقدار سرعت، توزیع دمای ورق با مقادیر مورد نظر مقایسه و بهترین سرعت انتخاب شده است. مقدار سرعت در دهانه خروجی مشعل در محدوده 90-130 m/s قرار گرفته است. برای خنک‌کاری نیز از جت‌های ایجاد شده است.

در تحلیل سیالاتی، قسمت‌های مختلفی وجود دارد؛ نازلی برای خروج شعله و نازلی برای خروج جت‌های خنک‌کاری که فاصله‌ی آن‌ها از هم 4 سانتی‌متر است تا خنک‌کاری باعث بیشترین تغییر شکل در ورق شود. ناحیه‌ی دیگر لایه‌ی هوایی است که از یک طرف بر روی ورق قرار گرفته و از طرف دیگر با حجم کنترل مشعل در ارتباط است تا حرارت را از مشعل و خروجی خنک‌کاری به ورق منتقل کند.

پایین‌ترین ناحیه‌ی موجود، همان ورق فلزی است که قرار است تغییر شکل در آن رخ دهد. با توجه به این که در واقعیت، در اطراف و پایین فلز نیز انتقال حرارت با هوای آزاد به صورت جابجایی آزاد برقرار است، مطابق جدول ۱، شرایط مرزی جابجایی آزاد با هوا در نظر گرفته شده است. بهدلیل وجود تقارن در مسئله، هندسه‌ی تمامی نواحی به صورت نیمه در نظر گرفته شده و در مرکز تمامی آن‌ها شرط مرزی تقارن اعمال شده است. صفحات تقارن همه‌ی نواحی به صورت یکجا در "شکل ۵" نشان داده شده‌اند.

در سطح بین سیال و ورق انتقال حرارت صورت گرفته است. این انتقال حرارت وابسته به دمای ورق و هوا و سرعت هوا می‌باشد. دو ناحیه‌ی سیال نسبت به یکدیگر حرکت دارند. در این‌گونه مسائل از روش مش لغزنده¹ استفاده شده است. این روش در هر مرحله از حل اطلاعات سیال شامل سرعت، دما، فشار و میزان آشفتگی را از یک سطح به روی سطح دیگر نقشه می‌کند. به این ترتیب می‌توان دو ناحیه را یکدیگر تکان داد و محیط سیال موجود را یکپارچه در نظر گرفت.

برای انجام تحلیل سیالاتی مسئله، علاوه بر شرایط مرزی، شرایط اولیه نیز موردنیاز است. به منظور مطابقت شبیه‌سازی با واقعیت، دمای اولیه‌ی تمام سطوح برابر با دمای محیط و 300 کلوین در نظر گرفته شده است و در حالت اولیه، سرعت سیال در تمام نواحی برابر صفر می‌باشد. برای شروع فرایند حرارتدهی با شعله نیاز است که مشعل، اندکی از لبه‌ی ورق فاصله داشته باشد که این امر به منظور جلوگیری از تمرکز بیش از اندازه‌ی حرارت در لبه‌ی ورق و عدم امکان انتقال دمای بالا به سایر نقاط اعمال شده است.

² Large Deformations

³ Semi Transient

محاسبه کرنش دمایی به المان اعمال کرد. این المان آجری از مرتبه 2 بوده و دارای 20 گره است (شکل 8). در تحلیل‌های المان محدود نیاز است استقلال نتایج از اندازه المان‌بندی مورد بررسی قرار گیرد. پس از حل با تعداد المان‌های متفاوت، بهترین نتیجه که کمترین تعداد المان را دارد انتخاب شده است. برای این کار سه المان مختلف برای ضخامت در نظر گرفته شد و به ازای تغییرات تعداد المان در صفحه‌ی ورق فولادی نمودار بدست آمده است. این نتایج برای ورق با ابعاد $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ و با سرعت شعله 130 m/s ضخامت 8 میلی‌متر و سرعت حرکت 7 mm/s بروزی شده‌اند. با افزایش ضخامت المان در راستای ضخامت نتایج به یک مقدار مشخص همگرا شده است. تعداد المان در راستای ضخامت در نظر گرفته شد.

4-3- روشن کرنش معیار

همان‌طور که از نام این روش پیداست، روش کرنش معیار براساس کرنش بنا شده است. به این ترتیب که، بیشترین تغییر شکل در یک نقطه از یک شکل مشخص در راستای عمود بر جهت مینیمم کرنش اصلی می‌باشد و میزان این تغییر شکل با مقدار مینیمم کرنش اصلی درون صفحه‌ی ارتباط مستقیم دارد. اولین گام در یافتن مسیرهای حرارتی به روش کرنش معیار، یافتن میدان کرنش برای تخت کردن شکل مشخص است. می‌توان جزئیات کامل این روش را این‌گونه بیان کرد:

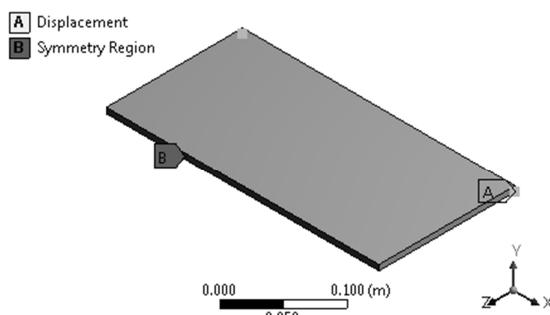


Fig. 7 Boundary conditions, (A) Zero movement along y axis, (B) Symmetry boundary condition in plate symmetry plane

شکل 7 شرایط مرزی در نظر گرفته شده، (A) محدود نکردن نقاط گوشه به عدم جابجایی در راستای y، (B) شرط مرزی تقارن در صفحه تقارن ورق

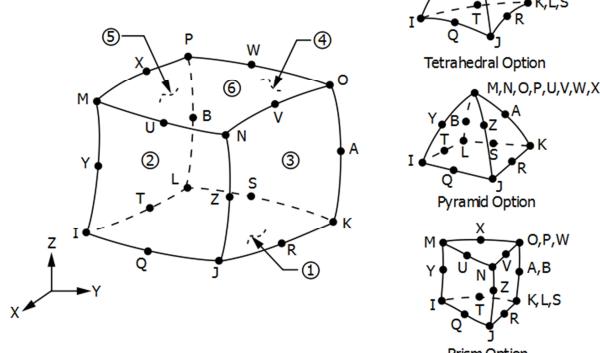


Fig. 8 Solid 186 Element

شکل 8 المان solid 186

هزینه است. از آنجایی که این روش بیشتر در صنایع کشتی‌سازی رواج دارد، خواص ورق مورد استفاده در این صنعت استخراج و استفاده شد.

خواصی که در این فرآیند اثرگذارند عبارت‌اند از: ضریب کشسانی، ضریب پواسون، تنش تسلیم و ضریب انسپاٹ حرارتی [21]. تمامی این خواص، متغیر با دما و طبق "شکل 6" به نرم‌افزار وارد شده‌اند. برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک ورق از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک دوخطی¹ استفاده شده است که پارامتر ضریب مماسی² در مسئله اثرگذار است [22].

3-2- شرایط مرزی

حين اجرای عملی این فرآیند، ورق کاملاً آزاد بوده و به جز با دو تکه تیر آهن زیر طرفین ورق، با جسم دیگر تماس ندارد. این قطعات تیر آهن به دلیل جلوگیری از تاب خوردن ورق حول خط وسط آن در زمان اجرای فرآیند استفاده شده‌اند. تنش‌های ناشی از وزن ورق در این حالت در حدود 1 MPa می‌باشد. در یک حل اولیه و برای بدست آوردن حدود تنش‌ها در حين فرآیند، عدد 200 MPa بدست آمد. از این رو می‌توان از اثرات وزن بر تغییر شکل ورق صرف نظر کرد. همان‌طور که در "شکل 7" نشان داده شده است،

دو نوع شرط مرزی برای جابجایی ورق در نظر گرفته شد:

(1) شرط عدم جابجایی ورق در نقاط گوشه‌ی ورق در راستای y که باعث می‌شود ورق پس از تغییر شکل نتواند از گوشه‌ها به سمت بالا حرکت کند.

(2) شرط مرزی تقارنی در صفحه‌ی وسط ورق که صفحه‌ی تقارن را در راستای z مقید کرده است تا به چپ و راست حرکت نکند.

با اعمال این دو شرط مرزی میزان تغییر شکل در ورق برابر با میزان پایین‌آمدن ورق در راستای y در صفحه‌ی تقارن خواهد بود. با تعریف مسیرهای خروجی مختلف در نرم‌افزار تغییر شکل‌ها در مقاطع مختلف بدست آمده‌اند. با توجه به غیرخطی بودن مسئله که ناشی از تغییر شکل بزرگ ورق و خواص غیرخطی ماده می‌باشد، از بررسی همگرایی برای نیرو و جابجایی استفاده شده است. در همگرایی نیرویی اگر جذر جمع مربعات نیروهای داخلی کمتر از مقدار ترانس ضربدر نیروی خارجی باشد حل همگرا شده است. در این تحلیل از المان نوع Solid186 استفاده شده است. این المان در درجات آزادی u_x , u_y و u_z را داراست و می‌توان دما را به عنوان بار گرمایی در

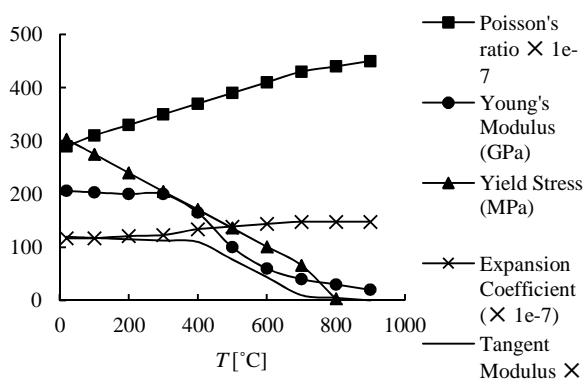


Fig. 6 Sheet mechanical properties

شکل 6 خواص مکانیکی ورق

¹ Bilinear Isotropic Hardening

² Tangent modulus

3-4-3- مسیریابی

بعد از یافتن توزیع برداری کرنش‌های مطلوب، از روی آن‌ها به مسیریابی حرارتی می‌پردازیم. به این ترتیب که ابتدا میدان‌های مینیمم و ماکزیمم کرنش اصلی صفحه‌ای را در صفحه‌ی بالایی ورق تخت شده می‌یابیم و سپس این دو را با هم تلفیق می‌کنیم. در توزیع برداری تلفیقی به دست آمده، جهت میله‌ها راستای ماکزیمم کرنش اصلی و طول میله‌ها مقدار مینیمم کرنش اصلی را شناس می‌دهد. سپس از یک نقطه روی ورق مثل نقاط تقاضی ورق شروع کرده و اولین مسیر حرارتی را عمود بر جهت مینیمم کرنش اصلی درون صفحه‌ای، در هر نقطه جانمایی می‌کنیم. در واقع در راستای ماکزیمم کرنش اصلی صفحه‌ای حرکت می‌کنیم تا به لبه‌ی دیگر ورق برسیم. بعد از ترسیم خط اول، به فاصله‌ی مناسبی از آن، نقطه‌ی ثانویه را انتخاب کرده و دوباره، المان به المان، در جهت ماکزیمم کرنش اصلی صفحه‌ای حرکت می‌کنیم تا به لبه‌ی دیگر ورق برسیم. به این ترتیب تمامی مسیرهای حرارتی یافت می‌شوند [13]. برای فواصل میان خطوط حرارتی، نباید فاصله‌ی خطوط حرارتی کمتر از 5 سانتی‌متر شود تا بتوان اثر خطوط حرارتی را به صورت مستقل در نظر گرفت. طبق مطالعات انجام شده توسط هاشیموتو [23]،

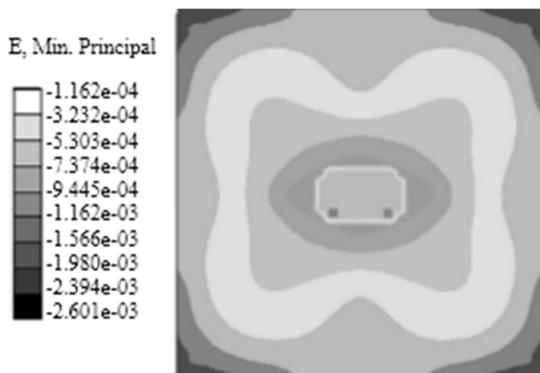


Fig. 9 Sample of minimum principal strain contour in flattened pillow shape

شکل 9 نمونه‌ای از رسم کانتور توزیع مینیمم کرنش اصلی در شکل تخت شده بالشتی [13]

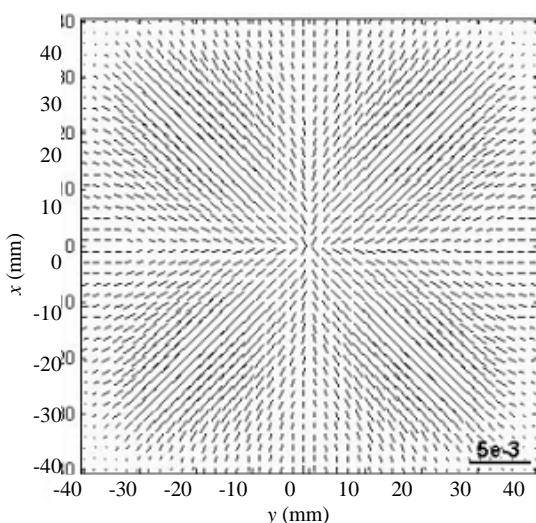


Fig. 10 Minimum principal strain vectors on the middle surface of flattened pillow shape

شکل 10 نمایش برداری توزیع مینیمم کرنش‌های اصلی، روی صفحه‌ی وسط شکل بالشتی تخت شده [13]

3-4-4- ایجاد فایل کد

ابتدا با استفاده از شکل مورد نظری را که می‌خواهیم از ورق تخت بعد از اعمال حرارت به آن برسیم، به صورت فایل کد ترسیم کنیم.

3-4-5- تعیین میدان کرنش

فایل کد ایجاد شده را در نرم‌افزار تجاری آباکوس 6.14 وارد می‌کنیم و برای یافتن میدان کرنش، تحلیل المان محدود الاستیک با تغییر شکل‌های بزرگ روی آن انجام می‌دهیم. دلیل استفاده از المان محدود با تغییر شکل بزرگ آنست که میزان بسیاری از تغییر شکل‌ها در ایجاد صفحات سه بعدی شکل داده شده، بیشتر از 5 درصد است و به همین دلیل تansورهای تنش و کرنش متناسب با آن باید مورد استفاده قرار گیرند. بجای المان محدود الاستوپلاستیک نیز از المان محدود الاستیک استفاده می‌شود چرا که نیاز به مشخص شدن ویژگی‌های ماده‌ی کمتری است [13].

برای یک شکل مطلوب داده شده، از آنالیز المان محدود الاستیک تغییر شکل بزرگ استفاده می‌شود تا مسئله رشد صفحه‌ای¹ پاسخ داده شود و میدان کرنش تحت قیود جابجایی به دست آید. قیود جابجایی با تحت فشار قرار دادن صفحه‌ی دو انحنایی بین دو صفحه‌ی صلب تحلیلی² اعمال می‌شوند. به این ترتیب که یکی از صفحات صلب را ثابت کرده و قیود را روی صفحه‌ی صلب دیگر اعمال می‌کنیم. هیچ اصطکاکی بین صفحات وجود ندارد. فشرده سازی تا زمانی ادامه می‌یابد که فاصله‌ی بین دو صفحه‌ی صلب برابر ضخامت صفحه‌ی دو انحنایی شود و به این ترتیب تمام قیود جابجایی روی تمام گره‌های صفحه‌ی میانی اعمال می‌شود [13]. "شکل 9" نمونه‌ای از کانتور توزیع مینیمم کرنش اصلی را در شکل بالشتی نشان می‌دهد.

بعد از یافتن کانتور مینیمم کرنش اصلی، به نمایش برداری توزیع مینیمم کرنش‌های اصلی، روی صفحه‌ی بالایی می‌پردازیم که اندازه‌ی هر میله بیانگر مقدار مینیمم کرنش اصلی در آن محل و سوی آن بیانگر جهت همان کرنش است. "شکل 10" نمونه‌ای از نمایش برداری را در شکل بالشتی نشان می‌دهد. در این تحقیق، جهت ماکزیمم کرنش اصلی با مقدار مینیمم کرنش اصلی تلفیق و رسم می‌شود؛ با توجه به آن که مقدار بیشترین تغییر شکل با مقدار مینیمم کرنش اصلی در ارتباط مستقیم است ولی در راستای ماکزیمم کرنش اصلی اتفاق می‌افتد، به همین دلیل از توزیع برداری استفاده شده است که جهت میله‌ها راستای ماکزیمم کرنش اصلی و طول میله‌ها مقدار مینیمم کرنش اصلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 10" و "شکل 11" مشاهده می‌شود، دلیل استفاده از نمایش برداری کرنش خمی آنست که، نواحی درون خط‌چین‌ها بیانگر مناطقی با کرنش خمی مثبت‌اند. با توجه به آن که ورق به سمتی خم می‌شود که حرارت داده می‌شود، پس می‌توان گفت در نقاطی که کرنش خمی منفی است بایستی سطح بالایی را شعله داد و در نقاطی که کرنش خمی مثبت است، سطح پایینی را، یعنی پشت ورق را، بایستی دقت کرد که در شکل بالشتی، نواحی با کرنش فشاری مثبت (کرنش خمی مثبت) بسیار کمتر است از نواحی با کرنش فشاری منفی و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود. اما در شکل زین اسپی به هیچ عنوان نمی‌توان از نواحی با کرنش فشاری مثبت صرف‌نظر کرد چرا که بسیار چشم‌گیرند. بنابراین در شکل زین اسپی هر دو طرف ورق نیازمند حرارت‌دهی هستند و باید خطوط حرارت‌دهی را در هر دو طرف ورق جانمایی کرد [13].

¹ Planar Development Problem
² Analytical Rigid Plates

جدول 2 پارامترها و سطوح مختلف مورد استفاده در شبکه عصبی

Table 2 Effective parameters and their limitations in the neural network

ردیف	پارامترهای مؤثر	سطوح مختلف پارامترها
1	سرعت حرکت مشعل	3 الی 9 میلی‌متر بر ثانیه
2	توان مشعل	90 الی 130 متر بر ثانیه
3	ضخامت ورق	6 و 8 میلی‌متر
4	مقدار مینیمم کرنش اصلی	-0.0006 الی -0.00028

ضرایب و مابقی برای اعتبارسنجی توسط متلب به کار گرفته شد.

4- نتایج

4-1- اعتبارسنجی شبیه‌سازی فرآیند حرارتدهی خطی

برای اطمینان از عملکرد صحیح شبیه‌سازی فرآیند حرارتدهی خطی نتایج حاصله از این شبیه‌سازی با نتایج کارهای پیشین مقایسه می‌شود. و [7] به انتقال حرارت در اثر جریان سیال اشاره کرد. او از مدل جت هوا استفاده کرد. این بدان معناست که شعله را با یک جت هوا با شرایط دمایی مشخص مدل کرد. در تحلیلی که او انجام داد، ضخامت ورق 8mm، فاصله مشعل از ورق 50mm، سرعت خروج جت هوا 100m/s و دمای آن 2000k در نظر گرفته شده است. برای انجام مقایسه در تحلیلی که در شبیه‌سازی این تحقیق انجام گرفته تمام مشخصات شعله مانند مدل و در نظر گرفته شد و توزیع دمای حاصل شده با کار او مقایسه شد (شکل 12). میزان خطای موجود بین کار و او این تحقیق حدود 5% می‌باشد. کار و با استفاده از ساده‌سازی تقارن محوری انجام شده است ولی در این تحقیق مدل سازی 3بعدی با در نظر گرفتن تقارن نسبت به یک صفحه صورت گرفته است، از این‌رو ایجاد اختلاف در نتایج به دست آمده دور از انتظار نیست. پس از تأیید نتایج دمایی از این به بعد برای مقایسه این پژوهش با کارهای انجام شده، به دلیل نبود اطلاعات مربوط به حرارتدهی توسط شعله از جمله سرعت خروج هوا، قدرت شعله‌ی خروجی از مشعل به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بیشینه‌ی دمای به وجود آمده در سطح ورق در این پژوهش و پژوهش دیگران یکسان باشد. بهمنظور اعتبارسنجی تغییرشکل‌های حاصل از نتایج دمایی در قسمت جامداتی، میزان تغییر شکل ورق در این تحقیق و تحقیق دیگری مورد بررسی قرار می‌گیرد. محل داده‌خوانی نتایج تغییر شکل در "شکل 13" نشان داده شده است.

بیسواز [5] در کارهای عملی خود روی ورقی با ضخامت 8 mm و سرعت مشعل 8 mm/s مقدار جابجایی ورق را در راستای عرض ورق و در محل وسط آن گزارش کرده است. بیشینه دمای ورق در این کار 450°C بوده است. بهمنظور انجام مقایسه، پارامترهای مدل سازی خود را با پارامترهای بیسواز یکسان در نظر گرفته و نتایج مطابق "شکل 14" به دست می‌آید. میزان خطای متوسط بین کار عملی بیسواز و این تحقیق 9.37% می‌باشد. این مقدار با توجه به تفاوت 5% در بیشینه دمای در "شکل 15" به تصویر در آمده است، قابل قبول بوده و می‌توان نتایج این تحلیل اعتماد کرد. محل داده خوانی جهت به دست آوردن دما وسط ورق یا همان مرکز مختصات است.

در "شکل 16" میزان تغییرشکل بیشینه برای ورق با ضخامت 8mm و سرعت حرکت 5 mm/s بر حسب سرعت خروج شعله و در "شکل 17" همین موارد با شرایط یکسان برای ورق با ضخامت 6mm نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده میزان تغییر شکل ورق با افزایش سرعت سیال خروجی از مشعل در هر دو ضخامت افزایش می‌یابد. همچنین در تمام حالات

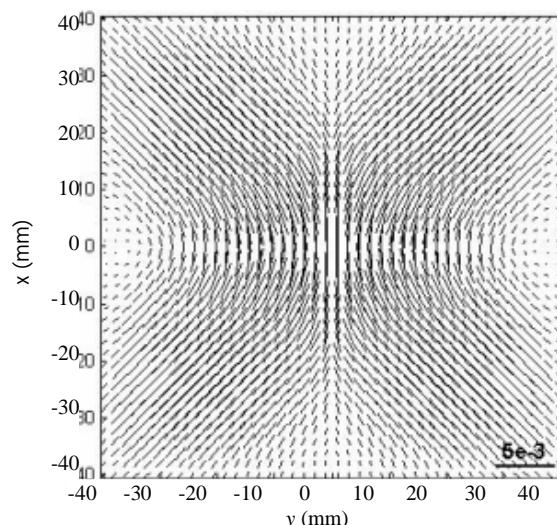


Fig. 11 نمایش برداری توزیع کرنش‌های خمی، روی صفحه‌ی بالایی، شکل پلاستی تخت شده [13]

می‌توان اثر هر خط حرارتی را که فاصله‌ی بین آن‌ها بیش از 5 سانتی‌متر است، مستقل از هم در نظر گرفت.

4-4-3- تعیین پارامترهای حرارتی در منبع حرارتی مشعل

جهت تعیین این پارامترها، راههای متعددی نظریه شبیه‌سازی، استفاده از کارهای تجربی و شبکه‌ی عصبی وجود دارد. در این تحقیق، برای آموزش شبکه‌ی عصبی از داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی فرآیند حرارتدهی خطی با شعله، در نرمافزار انسیس استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی که معمولاً به اختصار شبکه‌های عصبی نامیده می‌شوند، یک مدل ریاضی یا محاسباتی الهام گرفته از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی هستند. برای آن که بتوان آموزش شبکه‌ی عصبی را به ترتیبی انجام داد که به بهترین نتایج دست یافت، ابتدا باید پارامترهای مؤثر بر فرآیند را شناسایی نمود. از مهم‌ترین متغیرهای مستقل این فرآیند می‌توان به ضخامت ورق، توان مشعل و سرعت حرکت آن اشاره نمود. مهم‌ترین پارامتر وابسته نیز مقدار می‌نیم کرنش اصلی می‌باشد. برای آموزش این شبکه‌ی عصبی، 63 شبیه‌سازی با شرایط حرارتی مختلف اجرا شده است. به این‌گونه که بعد از اعمال شرایط حرارتی مشخص، مقدار مینیمم کرنش اصلی در نقطه‌ای که بیشترین تغییر شکل را در ورق طی یک مسیر حرارتی ایجاد نموده خوانده است. برای خواندن مقدار مینیمم کرنش اصلی روی صفحات بالایی و میانی ورق معدل گرفته شد. مقدار مینیمم کرنش اصلی، سرعت شعله‌ی خروجی از نازل و ضخامت ورق به عنوان ورودی شبکه‌ی عصبی و سرعت حرکت مشعل نیز خروجی شبکه در نظر گرفته شده است. سطوح مختلف پارامترهای مذکور طی این 63 حالت در جدول 2 آورده شده است. در این تحقیق، سرعت خروج شعله از نازل، نماینده‌ی توان منبع حرارتی مشعل می‌باشد.

جهت طراحی شبکه‌ی عصبی موردنظر از نرمافزار متلب و محیط nntool استفاده شده است. شبکه‌ی عصبی طراحی شده دارای یک لایه‌ی ورودی با 5 عصب، یک لایه‌ی مخفی با 10 عصب و تابع فعال‌سازی سیگموئید و یک لایه‌ی خروجی با یک عصب و تابع فعال‌سازی همانی است. برای تسريع همگرایی شبکه، به طور همزمان از مومنتوم و نرخ یادگیری تطبیقی (متغیر) استفاده شده است. 60 درصد داده‌ها برای آموزش، 20 درصد آن‌ها برای تصحیح

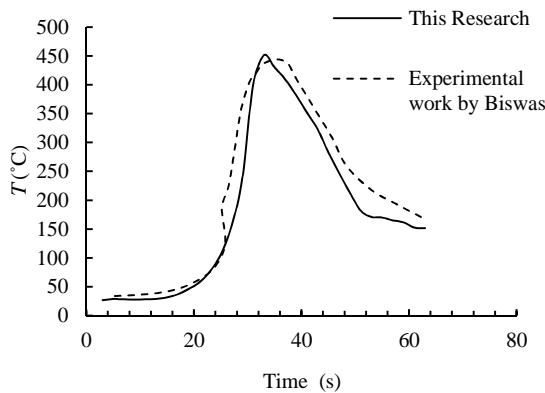


Fig. 15 Middle point temperature comparison of this research with Biswas's experimental work

شکل 15 مقایسه تغییر دمای وسط ورق در این تحقیق با کار عملی بیسوار

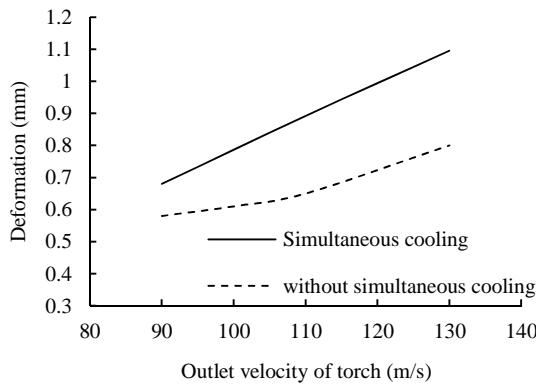


Fig. 16 Maximum sheet metal deformation – $v = 5\text{mm/s}$ – Thickness=8mm

شکل 16 تغییر شکل بیشینه ورق – $v = 5\text{mm/s}$ – ضخامت = 8mm

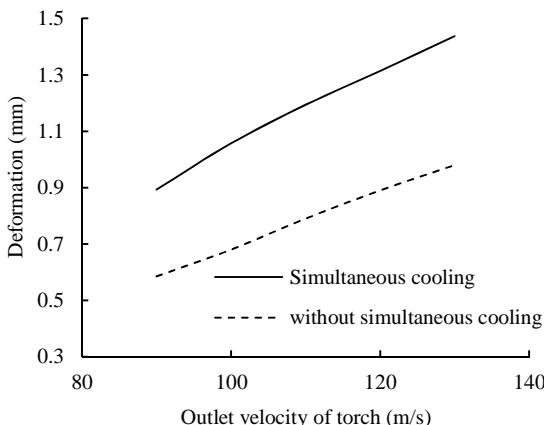


Fig. 17 Maximum sheet metal deformation – $v = 5\text{mm/s}$ – Thickness=6mm

شکل 17 تغییر شکل بیشینه ورق – $v = 5\text{mm/s}$ – ضخامت = 6mm

نازل خنک کننده ورق است. در این قسمت سرعت هوای خنک کننده را تغییر داده و پس از اجرای تحلیل نرمافزار به ازای هر سرعت حرکت مشعل و هر سرعت خنک کاری، تغییر شکل های نهایی را بدست می آوریم. در "شکل 18" تأثیر سرعت خنک کاری برای ورق با ضخامت 6mm و سرعت خروجی شعله 130 m/s نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که در هر سرعت حرکت با افزایش سرعت خنک کاری میزان تغییر شکل

میزان تغییر شکل برای حالتهای خنک کاری به صورت همزمان با حرارتدهی اعمال می شود بیشتر از حالت دیگر خنک کاری است؛ البته این افزایش برای ضخامت 8mm وقتی سرعت شعله به 90m/s می رسد بسیار کم می شود. می توان مشاهده کرد که میزان تغییر شکل و همچنین افزایش آن در اثر خنک کاری همزمان در تمام حالات با کاهش ضخامت از 8 mm به 6 mm یافته است. این کاهش به دلیل مقاومت کمتر لایه های ورق فلزی در راستای ضخامت برای تغییر شکل پلاستیک و شکل پذیری راحت تر فلز است.

2-4- اثرات سرعت خنک کاری

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر میزان تغییر شکل ورق سرعت هوای خروجی از

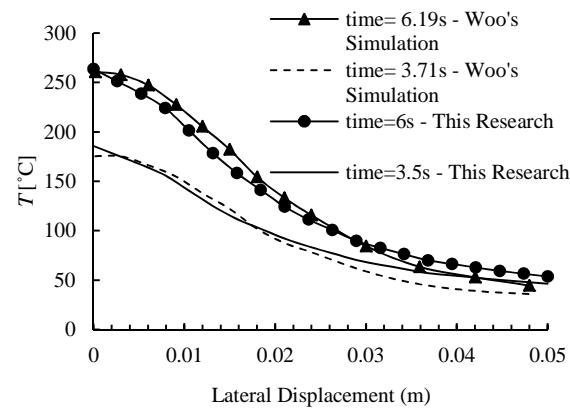


Fig. 12 Comparison of this research with Woo's simulation

شکل 12 مقایسه نتایج این تحقیق با شبیه سازی وو

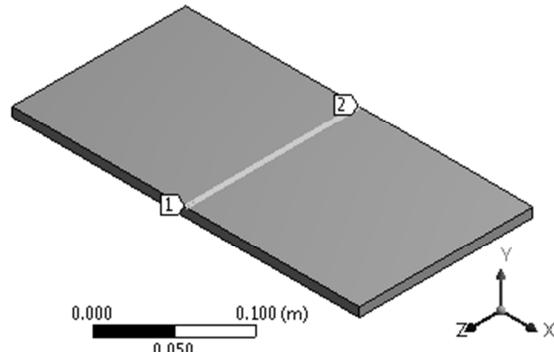


Fig. 13 محل داده خوانی برای تغییر شکل

شکل 13 محل داده خوانی برای تغییر شکل

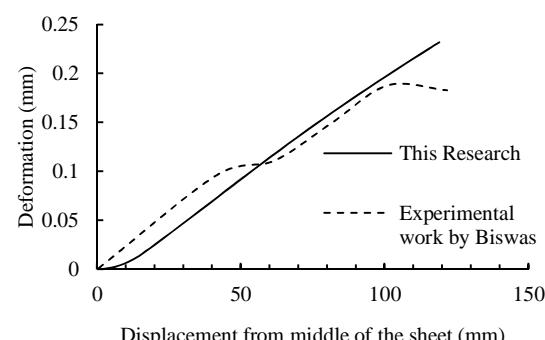


Fig. 14 Deformation comparison of this research and the Biswas' experimental work

شکل 14 مقایسه تغییر شکل این تحقیق با کار عملی بیسوار

3-4- اعتبارسنجی نتایج شبکه عصبی با مقادیر هدف

در "شکل 20"، مقادیر خروجی شبکه عصبی ایجاد شده، برای تعیین شرایط حرارتی مشغول، با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی مقایسه شده است. این مقایسه تطابق بسیار خوبی را بین مقادیر خروجی و مقادیر هدف نشان داده است. خطای مجموع مربعات در آموزش این شبکه $2.9938e^{-8}$ و رگرسیون داده‌ها نیز در مرحله آموزش 0.99901، ارزیابی 0.99844، تست 0.99764 و به صورت کلی 0.09985 بوده است.

4-4- مسیرها و شرایط حرارتی شکل استوانه‌ای

شکل استوانه‌ای به صورت فایل کد وارد نرم‌افزار تجاری آباکوس شده و تحلیل الاستیک روی آن انجام شد. "شکل 21" توزیع مینیمم کرنش اصلی در این استوانه را نشان می‌دهد که بین دو فک صلب به صورت کاملاً تخت درآمده است. خطوط حرارتی عمود بر جهت مینیمم کرنش اصلی در نظر گرفته شد. تخت کردن شکل مطلوب استوانه‌ای به نشان می‌دهد که خطوط حرارتی آن موازی یکدیگر می‌شوند؛ دلیل این موضوع آستن است که شکل استوانه‌ای از جمله سطوح تک انتخابی است و در طول بعد سوم، سطح مقطع ثابت است. در تعیین فواصل میان خطوط حرارتی، دقت شد که این خطوط مستقل از هم در نظر گرفته شوند؛ یعنی فواصل میان مسیرهای حرارتی کمتر از 5 سانتی‌متر در نظر گرفته نشد. بعد از تعیین مسیرهای حرارتی برای شکل استوانه‌ای، سراغ تعیین شرایط حرارتی به کمک شبکه عصبی رفتیم. ابتدا برای هر خط یک توان مشخصی را در نظر گرفتیم، منظور از توان برای منبع حرارتی شعله، همان سرعت خروجی شعله می‌باشد. با توجه به تقارنی که شکل استوانه‌ای دارد تنها برای نصف ورق انجام داده و شرایط را به کل ورق تعیین دادیم. در این آزمایش، بیشترین مقدار مینیمم کرنش اصلی در حدود $3e^{-4}$ به دست آمد؛ به همین منظور برای خطوط نزدیک وسط ورق، سرعت خروج شعله از نازل را 130 m/s در نظر گرفتیم. با توجه به توان منظور شده و مقدار مینیمم کرنش اصلی، و با مراجعة به شبکه عصبی، سرعت حرارت منبع حرارتی متناسب با هر خط حرارتی را یافتیم. "شکل 22" مسیرها و شرایط حرارتی بدست آمده برای شکل استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

4-5- اعتبارسنجی شکل استوانه‌ای

بعد از تعیین مسیرها و شرایط حرارتی برای شکل مطلوب استوانه‌ای،

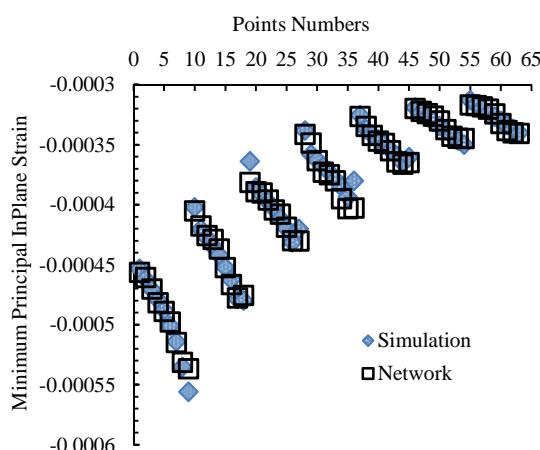


Fig. 20 Comparison of trained neural network output with the simulation results

شکل 20 مقایسه خروجی شبکه عصبی آموزش داده شده با مقادیر شبیه سازی (مقادیر هدف)

بیشینه‌ی ورق افزایش می‌یابد. علت این امر منقبض شدن سریع‌تر لایه‌های بالایی ورق در اثر کاهش دمای سریع‌تر در سرعت‌های خنک‌کاری بالاتر و درنتیجه خم شدن بیشتر ورق است. همچنین می‌توان بهوضوح دید که اگر سرعت خنک‌کاری از یک حد پایین تر باشد تقواوت چندانی باحالتشبدون خنک‌کاری همزمان نمی‌توان مشاهده کرد. این حد سرعت در اینجا حدود 50 m/s به دست آمده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد افزایش سرعت حرکت مشغول وقتی سرعت به حدود 7 mm/s افزایش میزان تغییر شکل ورق در شکل کاهش می‌یابد. در "شکل 19" نمودار میزان تغییر شکل ورق در راستای عرضی با سرعت خروج شعله 130 m/s و سرعت حرکت = 5 m/s نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 19" نشان داده شده با افزایش سرعت خنک‌کاری میزان تغییر شکل ورق در تمام نقاط ورق افزایش می‌یابد.

همچنین می‌توان مشاهده نمود که این افزایش تغییر شکل در وسط ورق که بر روی مرکز تقارن ورق و خط حرارتدهی قرار دارد دارای بیشترین مقدار است و هرچه از وسط ورق دور می‌شوند میزان تغییر شکل‌ها بسیار ناچیز بوده و در اثر افزایش سرعت خنک‌کاری نیز افزایش ناچیزی داشته و مقدرشان بسیار بهم نزدیک می‌باشد. به صورت متوسط در وسط ورق به ازای 0.15 mm/s افزایش سرعت خنک‌کاری میزان تغییر شکل حدود 50 m/s افزایش می‌یابد در حالی که در لبه‌های سمت راست و چپ ورق این اختلاف به حدود 0.03 mm/s می‌رسد.

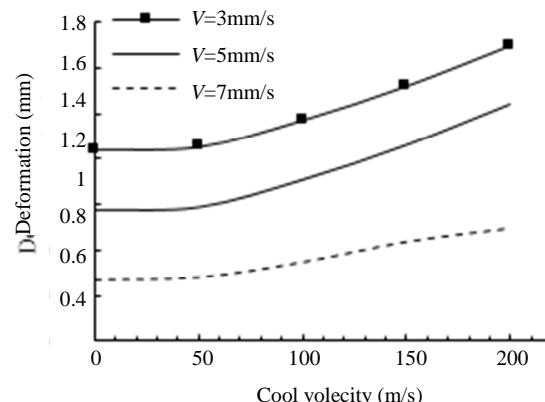


Fig. 18 Sheet metal deformation in different velocities – V = Flame movement velocity

شکل 18 میزان تغییر شکل بیشینه‌ی ورق بر حسب سرعت خنک‌کاری - سرعت حرکت مشغول v

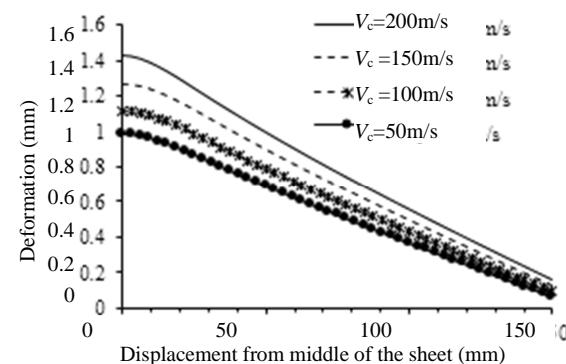


Fig. 19 Lateral sheet metal deformation, V_c = Cool velocity, Flame outlet velocity = 130 m/s , Flame movement velocity = 5 mm/s

شکل 19 میزان تغییر شکل ورق در راستای عرضی، V_c = سرعت خنک‌کاری، سرعت خروج شعله = 130 m/s ، سرعت حرکت مشغول = 5 mm/s

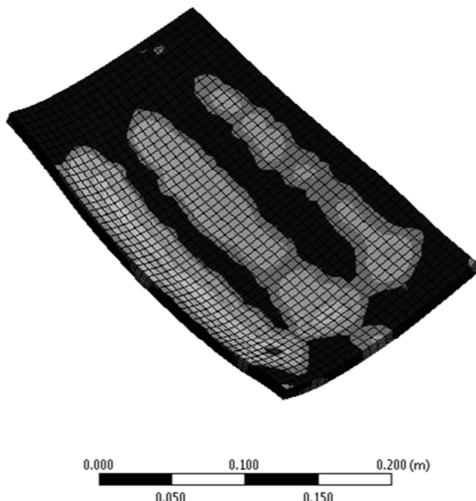


Fig. 23 Validation of obtained paths and heat conditions to achieve the cylindrical shape (half of the plate)

شکل 23 اعتبارسنجی مسیرها و شرایط حرارتی به دست آمده برای رسیدن به شکل استوانه‌ای (نصف ورق)

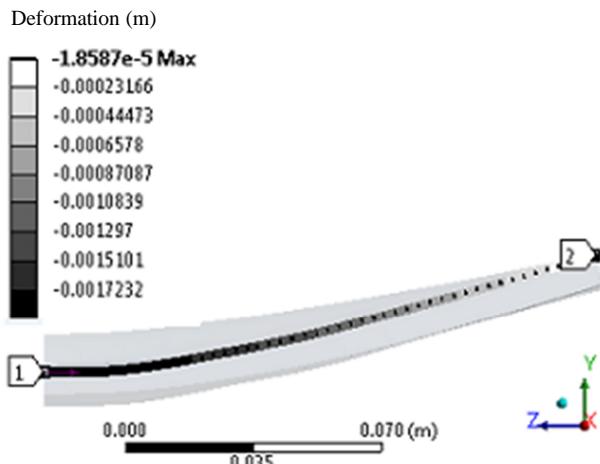


Fig. 24 Plate deformation after applying paths and heat conditions in the simulation of flame heat source to get pillow shape from the initial flat plate; (half of the plate)

شکل 24 تغییر شکل ورق، بعد از اجرای مسیرها و شرایط حرارتی در شبیه‌سازی منبع حرارتی شعله، برای رسیدن به شکل استوانه‌ای از ورق تخت اولیه؛ (نصف ورق)

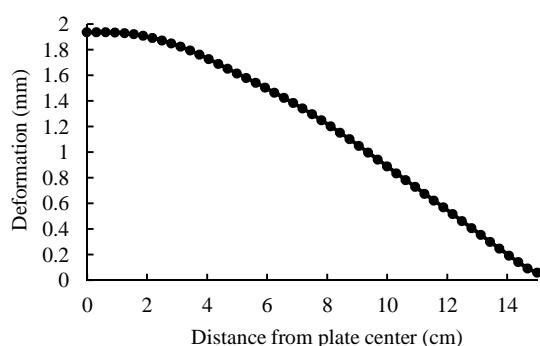


Fig. 25 Obtained deformation after applying paths and heat conditions in the simulation of flame heat source to get pillow shape from the initial flat plate; (half of the plate)

شکل 25 میزان تغییر شکل کلی به دست آمده، بعد از اجرای مسیرها و شرایط حرارتی در شبیه‌سازی منبع حرارتی شعله، برای رسیدن به شکل استوانه‌ای از ورق تخت اولیه؛ (نصف ورق)

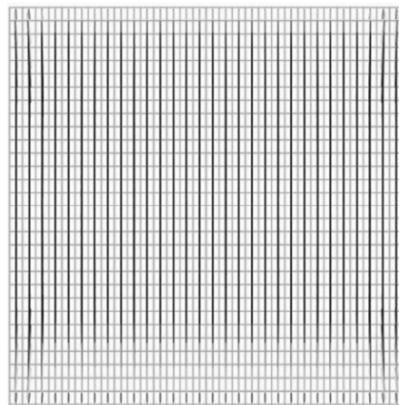


Fig. 21 Elastic analysis on desired cylindrical shape to find minimum principal strain distribution

شکل 21 تحلیل الاستیک روی شکل مطلوب استوانه‌ای و یافتن توزیع مینیمم کرنش اصلی

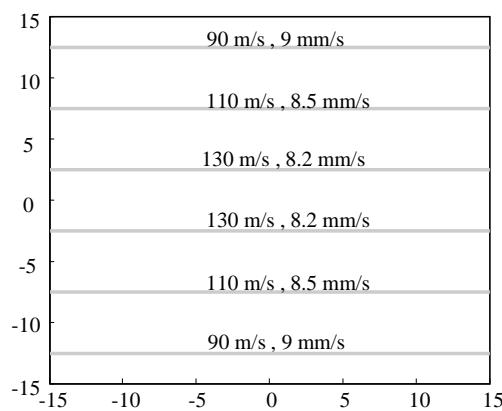


Fig. 22 Obtained paths and heat conditions for desired cylindrical shape

شکل 22 مسیرها و شرایط حرارتی به دست آمده برای شکل مطلوب استوانه‌ای

ویژگی‌های حرارتی به دست آمده را در نرم‌افزار انسپیس، به کمک شبیه‌سازی منبع حرارتی شعله، روی یک ورق تخت اولیه اجرا کردیم تا به صحت مسیرها و شرایط حرارتی به دست آمده برای رسیدن از یک ورق اولیه به شکل مطلوب استوانه‌ای برسیم و میزان خطای حاصله را نیز بباییم. "شکل 23" نصف یک ورق تخت را نشان می‌دهد که منبع حرارتی شعله با شرایط حرارتی مشخص، به کمک شبیه‌سازی، از روی آن عبور داده شده است. همان‌طور که "شکل 23" نشان می‌دهد، خط حرارتی سوم از اثرات حرارتی کمتری برخوردار است چرا که توان حرارتی کمتر و سرعت حرکت مشعل بیشتری دارد. ابعاد استوانه‌ای مطلوب، $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ با 2 میلی متر نسبت به حالت تخت می‌باشد. میزان خمی که با استفاده از شبیه‌سازی در شرایط حرارتی مشخص به دست آمد، 1.93 میلی متر است. خم به دست آمده در شبیه‌سازی، در "شکل 24" نشان داده شده است. این میزان اختلاف، کاربردی بودن این روش در ایجاد این شکل را نشان می‌دهد که مقدار آن از 5 درصد نیز کمتر می‌باشد. "شکل 25" نیز تغییر شکل کلی را بیان می‌کند.

به این ترتیب، با روش کرنش معيار، ابتدا مسیرهای حرارتی به دست آمد و سپس به کمک آموزش شبکه‌ی عصبی شرایط حرارتی یافته شد. علت مهم و اصلی در ایجاد خطای بعد از اجرای فرآیند حرارتدهی خطی در شبیه‌سازی، وجود اثرات لبه‌ای است. اثرات لبه‌ای موجب می‌شود که زاویه‌ی تغییر شکل در امتداد خط حرارتی ثابت نماند و در ابتداء، انتهای و وسط ورق متفاوت باشد.

- Denmark, 2000.
- [5] P. Biswas, N. R. Mandal, O. P. Sha, Thermo-mechanical and Experimental Analysis of Double Pass Line Heating, *Marine Science Application*, No. 10, pp. 190-198, 2011.
- [6] Y. H. Choi, Y. W. Lee, K. Choi, D. H. Doh, K. J. Kim, Temperature Distribution and Thermal Stresses in Various Conditions of Moving Heating Source during Line Heating Process, *Journal of Thermal Science*, No. 21, pp. 82-87, 2012.
- [7] J. H. Woo, J. G. Shin, Analysis of Heat Transfer Between the Torch and the Plate for the Application of line Heating, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 125, pp. 794-800, 2003.
- [8] 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*, No. 14, pp. 9-16, 2015. (in Persian)
- [9] G. Yu, N. M. Patrikalakis, T. Maekawa, Optimal development of doubly curved surfaces, *Computer Aided Geometric Design*, No. 17, pp. 545-577, 2000.
- [10] J. G. Cheng, Y. L. Yao, Process synthesis of laser forming by genetic algorithm, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 44, pp. 1619-1628, 2004.
- [11] J. Cheng, Y. L. Yao, Process design of laser forming for three-dimensional thin plates, *Journal of manufacturing science and engineering*, No. 126, pp. 217-225, 2004.
- [12] C. Liu, Y. L. Yao, V. Srinivasan, Optimal process planning for laser forming of doubly curved shapes, *Journal of manufacturing science and engineering*, No. 126, pp. 1-9, 2004.
- [13] C. Liu, Y. L. Yao, FEM-based process design for laser forming of doubly curved shapes, *Journal of manufacturing processes*, No. 7, pp. 109-121, 2005.
- [14] A. Maramaei, *Sheet metal forming by using the line heating technique in the Shipbuilding industry*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2013. (in Persian)
- [15] F. M. White, *Fluid Mechanics*: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [16] Standard k-epsilon model, Accessed on 24 January 2016; http://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model.
- [17] Kaye & Laby Table of Physical & Chemical Constants, Accessed on 24 January 2016;http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/
- [18] Metal Alloys Densities, Accessed on 2 February 2016; http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities_50.html.
- [19] J. Grill, *Operating a Gas Welding Torch*, Accessed on 9 February 2016; <http://www.weldguru.com/gas-welding-torch.html>
- [20] Acetylene, Accessed on 9 February 2016, <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Acetylene>
- [21] J. Hemmati, *Determination of effects of the effective parameters on ship-hull plates forming process by line heating method to develop a computer-aided process planning system*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2003. (in Persian).
- [22] B. Sorensen, *Simulation of Welding Distortions in Ship Sections*, PhD Thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 1999.
- [23] T. Hashimoto, Line heating method-a new technique taking the place of smith work, *60th Anniversary Series of the Society of Naval Architects of Japan*, No. 5, pp. 53-71, 1961

همین موضوع شکل استوانهای را با درصدی از خط از حالت استوانهای خارج کرده است.

5- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی دقیق‌تر شکل‌دهی ورق در این تحقیق از مدل جت برخورد کننده برای مدل سازی شعله استفاده شده و خنک‌کاری به صورت همزمان در نظر گرفته شد. پس از انجام تحلیل‌های متعدد نرم‌افزاری نتیجه گرفته شد که با افزودن خنک‌کاری به صورت همزمان میزان تغییر شکل در ورق افزایش می‌یابد. اثر سرعت خنک‌کاری بر میزان تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش سرعت خنک‌کاری میزان تغییر شکل ورق پیوسته افزایش می‌یابد.

پیش از این پژوهش، روش کرنش معیار تنها برای سطوحی با منبع حرارتی لیزر به کار برده شده بود. این پژوهش نشان داد که این روش برای سطوح ضخیم‌تری که برای منبع حرارتی مشعل نیز استفاده می‌شوند کاربردی است. با توجه به نرم‌افزارهای المان محدودی که امروزه در دسترس است، یافتن میدان‌های کرنش و تجهیزی آن‌ها کار دشواری نیست و به همین دلیل روش کرنش معیار قابلیت تعیین مسیرهای حرارتی سطوح سه بعدی پیچیده را نیز علاوه بر سطوح دو بعدی و ساده دارد. ضمن آن که تنها با یک بار اجرای این روش می‌توان به تمامی مسیرهای حرارتی موردنیاز دست یافت. استفاده از شبیه‌سازی برای تشکیل شبکه‌ی عصبی به جای آزمایش تجربی، هزینه‌های زمانی و مادی را کاهش داده است و می‌توان به کمک شبیه‌سازی دیتابیس‌های قوی تشکیل داد.

6- مراجع

- [1] S. Nakanishi, T. Yamamoto, T. Hamasaki, S. Okubo *The National Shipbuilding Research Program Line Heating*, United States Department of Transportation, Transportation research institute, pp. 6-25, 1982.
- [2] C. D. Jang, T. H. Kim, D. E. Ko, Prediction of steel plate deformation due to triangle heating using the inherent strain method, *Journal of Marine Science Technology*, No. 10, pp. 211-216, 2005.
- [3] V. Adan, R. Sherif, S. Hisashi, M. Hidekazu, Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 1), *Transactions of JWRI*, No. 36, pp. 57-64, 2007.
- [4] H. B. Clausen, *Plate Forming by Line Heating*, PhD Thesis, Department of naval architecture and offshore engineering, Technical university of