مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 293-304

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

علی شهیدی[1]، محمدمهدی نکاحی[1]، احمد عاصم‌پور[2*]

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

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

* تهران، صندوق پستی 9567-11365، assem@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 تیر 1395

پذیرش: 20 شهریور 1395

ارائه در سایت: 24 مهر 1395

کلید واژگان:

شکل‌دهی ورق

حرارت دهی خطی

تحلیل ترمو الاستو- پلاستیک

مدل جت برخورد کننده

روش کرنش معیار

چکیده

استفاده از ورق‌های فلزی در صنایع مختلف ازجمله کشتی‌سازی بسیار متداول است. در این صنایع ایجاد سطوح موردنظر از ورق تخت اولیه به کمک فرآیند حرارت‌دهی خطی حائز اهمیت است. در این مقاله ابتدا به شبیه‌سازی این فرآیند و انتقال حرارت بین گاز خروجی از مشعل و ورق پرداخته شده است. برای مدل‌سازی اثر مشعل و هوای خنک‌کننده از مدل جت برخورد کننده در نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده است. پس از یافتن توزیع دما در ورق، با انتقال این توزیع دما به نرم افزار انسیس و انجام یک تحلیل ترمو الاستو- پلاستیک تغییر شکل ورق بدست آمد و سپس نتایج این کار اعتبارسنجی شد. برای اجرای فرآیند حرارت‌دهی خطی بایستی مسیرها و شرایط حرارتی مشعل تعیین گردد. به این منظور مسیرهای حرارتی شکل استوانه‌ای با روش کرنش معیار بدست آمد. به کمک شبیه‌سازی انجام شده، 63 اجرای مختلف در توان‌ها و سرعت‌های مختلف مشعل انجام داده و برای یافتن توان و سرعت حرکت مشعل، به آموزش شبکه‌ی عصبی با این داده‌ها پرداخته شد. در انتها ویژگی‌های حرارتی بدست آمده برای این شکل به کمک شبیه‌سازی به یک ورق تخت اولیه اعمال شده و از مقایسه‌ی شکل بدست آمده با شکل مطلوب خطای کمتر از 5 درصد بدست آمد.

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.

1- مقدمه

شکل‌دهی به روش حرارت‌دهی خطی[1] کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف ازجمله ساخت مخازن جدار ضخیم در صنعت نفت و ساخت ورق‌های انحنادار بدون قالب مورد استفاده در بدنه کشتی‌ها در صنعت دریایی دارد. اما از آن‌جا که کشور ما در شمال و جنوب، مرزهای آبی گسترده‌ای داشته و صنعت دریایی ما نیز درحال بین‌المللی شدن می‌باشد، اهمیت این روش در صنعت دریایی بیشتر برای ما ملموس است. ورق‌های به‌کار رفته در این صنعت ضخیم و سنگین بوده و شکل و فرم شناورها با یکدیگر متفاوت است، به همین دلیل ساخت قالب برای هر شناور مقرون به صرفه نخواهد بود. به همین منظور امروزه برای شکل دهی ورق بدنه کشتی‌ها از روش شکل دهی با حرارت‌دهی خطی استفاده می‌کنند.

[1] Line Heating

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

در این مقاله ابتدا به مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی با حرارت‌دهی خطی با خنک‌کاری پرداخته شد. پس از صحت‌یابی مدل‌سازی صورت گرفته مسیرهای حرارتی شکل استوانه‌ای با روش کرنش‌معیار بدست آمد.

2- مرور ادبیات

خمکاری با منبع حرارتی، یکی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فولادی است. در این فرآیند با اعمال گرمایش و خنک‌کاری کنترل شده در امتداد مسیرهای معین روی ورق، آن را شکل می‌دهند. وقتی یک‌طرف ورق توسط منبع حرارتی گرم می‌شود درحالی‌که طرف دیگر آن خنک است، گرادیان‌های دمایی به خصوص در راستای ضخامت باعث انبساط‌های گرمایی و در نتیجه ممان خمشی و نیروهای صفحه گرمایی می‌شود. چون دما در منطقه زیر منبع گرما بالا و برعکسش تنش تسلیم 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 1" 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- مدل‌سازی مشعل گازی

برای مدل‌سازی 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، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این توزیع حرارت، اثری از دما وجود ندارد و انتقال حرارت به‌صورت معلوم و مستقل از دما صورت می‌گیرد. در این مقاله، برای دقت بیشتر و بررسی رفتار ورق در لبه‌ها از مدل جت برخوردکننده 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 پردازش‌گرها بوده است. در زمینه بررسی پلاستیسیته نیز دیگر نیازی به محدوده‌بندی جسم به نواحی مختلف مثل کار جانگ [2] نیست.

وگا [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 خنک‌کاری ورق، انتقال حرارت همرفت هوا را روی سطح اعمال کرده است.

او به این نتیجه رسید که بیشترین تغییر شکل ورق مربوط به وسط ورق

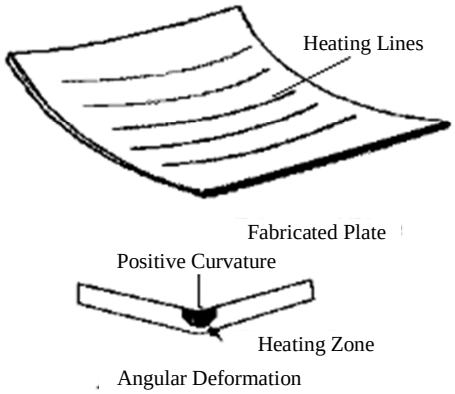

Fig. 1 Flat plate and fabricated plate after bending in Line Heating Process [14]

شکل 1 ورق اولیه و سطح نهایی پس از فرآیند خمکاری با منبع حرارتی [4]

می‌باشد (محل داده برداری) و در لبه‌ها این مقدار کمتر است.

بیسواز [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 مدل‌سازی گرمایی، ورق را به دو قسمت تقسیم نمود. در ناحیه اول فقط توزیع گوسی اعمال شد و در ناحیه دوم نیز همرفت هوا را با ضریب جابجایی نیوتونی معلوم برای خنک‌کاری 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 دومین عبور منبع گرم و بعد از خنک شدن ورق تا 150 درجه، نشان داده است که تغییر شکلی بیش از 2 برابر تغییر شکل عبور اول منبع گرم حاصل شده است.

وو [7] به بررسی دقیق‌تر انتقال حرارت بین ورق و مشعل پرداخته است. او با مدل‌سازی 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 متقارن محوری 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 به‌دست 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 برروی ورق دریایی گرید 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.

2-3- روش کرنش معیار

ابتدایی‌ترین فعالیت‌ها در سال 1994 توسط اوئدا صورت پذیرفت و او توانست مسیرهای حرارت دهی را برمبنای توزیع کرنش‌های ذاتی بیان کند. او مقادیر کرنش‌های ماندگار را به‌دست آورد و مناطق حرارت‌دهی را برمبنای توزیع

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

کرنش‌های ذاتی و متمرکز 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 انحنایی به سطوح صفحه‌ای از روشی که کرنش حاصل در این تبدیل مینیمم مقدار شود ارائه کرده‌اند. فرآیند توسعه توسط کرنش صفحه‌ای از سطح منحنی به سطح تخت مدل شد. توزیع میدان کرنش مینیمم مناسب، با حل یک مسئله‌ی برنامه‌نویسی غیرخطی به‌دست می‌آمد. در این مقاله مسیرهای کرنش محاسبه نشدند. چنگ و یاو در سال 2004 [10]، یک فرآیند ساخت را برای لیزرفرمینگ دسته‌ای از ورق‌های فلزی دوبعدی ارائه کردند. فرآیند ساخت آن‌ها برمبنای الگوریتم ژنتیک بود. تعداد اسکن‌های لیزر، فاصله‌ی بین اسکن‌های مجاور، سرعت لیزر و توان لیزر به‌عنوان متغیر در سیکل طراحی موردنظر قرار گرفتند. این ایده برای قطعات دوبعدی به خوبی جواب داد و با استفاده از آن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای تصمیم‌گیری برای مینیمم کردن اختلاف بین سطح موردنظر و شکل فرم داده شده به‌دست آمد. گزارش‌های آن‌ها برای اشکال سه‌بعدی ساده و همچنین اشکال نیمه سه‌بعدی مانند اشکال استوانه‌ای و متقارن ارائه شده بود. به‌هرحال روش‌های ارائه شده توسط این محققین برای طراحی این فرآیند سه‌بعدی دو انحنایی عمومی که دارای اشکال پیچیده بودند، مناسب نبود.

چنگ و یاو در سال 2004 [11]، روشی را ارائه کردند 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 می‌شد. 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 کردند و در ایده‌ی آن‌ها میدان کرنش براساس اختلاف هندسی و ایده‌ی بهینه‌سازی محاسبه می‌شد. این ایده تنها صفحات میانی ورق را مورد بررسی قرار می‌داد و اثر کرنش‌های خمشی در امتداد ضخامت ورق را در نظر نمی‌گرفت. بنابراین این روش تنها برای ورق‌های نازک کاربرد داشت.

لئو و همکارانش در سال 2005 [13]، روش طراحی فرآیند لیزرفرمینگ براساس المان محدود سه‌بعدی را ارائه کردند. که در این روش ایده‌ی قبلی‌شان را با در نظر گرفتن کرنش‌های خمشی 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 می‌شد. مسیرهای اسکن لیزر عمود بر جهت می‌نیمم کرنش اصلی در صفحات بالا، وسط و پایین ورق در نظر گرفته می‌شدند. هم‌چنین نسبت‌های کرنش صفحه‌ای و خمشی به منظور برآورد شرایط حرارتی محاسبه می‌شدند.

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، مسئله 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، دمای 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 فاصله 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 به‌دست آمده از قسمت اول و محاسبه تغییر شکل ورق در اثر کرنش‌های دمایی می‌باشد. بخش سیالاتی با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت[1] و بخش جامداتی آن با نرم‌افزار تجاری انسیس[2] 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، دی‌کوپله گفته می‌شود. در این فرآیند به‌دلیل تغییر شکل اندک ورق، از اثر متقابل تغییر شکل بر جریان سیال و توزیع دمای ورق صرف‌نظر شده است، و لذا حل مستقل از هم دما و جابجایی مانعی ندارد. مارامایی در کار خود نشان داده است که حل کوپله و دی‌کوپله 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 بالارفتن سرعت حل و پایین آمدن زمان هر تحلیل می‌باشد و این امر با توجه به این‌که تعداد تحلیل‌های عددی موردنیاز بالا است، کاملا ضروری می‌باشد.

3-2- بخش سیالاتی

آن‌چه که در واقعیت رخ می‌دهد خروج مخلوط اکسیژن و گاز از مشعل و محترق شدن به‌علت 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 برخوردکننده با ورق استفاده شده است. هم‌چنین در این مسئله عمل خنک‌کاری، با هوای خنک کننده‌ی برخورد کننده با و با فاصله از مشعل انجام گرفته است. انتقال حرارت بین سیال و ورق که به پارامترهای زیادی از جمله سرعت و دمای سیال و ورق وابسته است توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در نهایت دمای ورق به صورت تابعی از زمان به‌عنوان خروجی گزارش شده است.

3-2-1- مروری بر معادلات

معادلات پایه‌ای که برای محاسبه میدان جریان به‌کار رفته است شامل معادلات (1) پیوستگی و (2) مومنتوم می‌باشد. برای به‌دست آوردن میدان دما، معادله (3) انرژی نیز حل شده است [15]. با توجه به این‌که 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 به‌دلیل این‌که نوسانات زیاد و محدودی دارند، از متغیر اصلی به‌عنوان میانگین مقادیر و از متغیر دارای "′" به عنوان میزان نوسانات استفاده شده است. از آن‌جایی‌که میزان نوسانات در زمان تغییر می‌کند، در رابطه‌ی مورد نظر، از میانگین این مقادیر در طول زمان استفاده شده است.

[1] FLUENT
[2] ANSYS

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

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

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

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

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

$$-\rho C_p \overrightarrow{v'T'} = K_T \nabla T$$ (5) هدایت آشفته

با توجه به کارهای پیشین، از مدل k-ε برای محاسبات آشفتگی استفاده شده است [7]. در این معادلات، ضرایب موردنیاز در روابط ویسکوزیته‌ی آشفته و هدایت آشفته به‌دست 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-ε استخراج شده است [16].

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

$$\frac{\partial(p\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \varepsilon - \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon\right) = C_{1\varepsilon} \mu_T \frac{\varepsilon}{k} \varphi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$ (7) معادله ε

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

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

3-2-2- خواص سیال

از آن‌جایی‌که 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 شعله‌ی خنثی استفاده می‌شد، با فرض ایده‌آل بودن فرآیند احتراق، محصولات واکنش شامل CO_2 و H_2O بوده که در یک فاز، خواص به‌صورت میانگین وزن دار از نسبت مولی آن‌ها به‌دست می‌آمد. واکنش سوختن استیلن با اکسیژن این گونه است که:

$$C_2H_2 + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$$ (10) واکنش سوختن استیلن

$$\text{Property} = \frac{2 \times \text{Property}_{CO_2} + \text{Property}_{H_2O}}{3}$$ (11) محاسبه خواص

در نهایت با انجام میانگین‌گیری در دماهای 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 به‌منظور خنک‌کاری 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. به‌دست آوردن خواص مختلف ماده در دماهای 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 $7800\ kg/m^3$ 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 شبیه‌سازی‌ها توجهی 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 خنک‌کاری از جت هوای خنک‌کننده 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 آدیاباتیک آن، 3300 درجه سانتی‌گراد [20]، معقول است. به‌دلیل این‌که از انجام واکنش و آزاد شدن حرارت صرف‌نظر 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 استفاده‌ی 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 بعضا به‌صورت 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

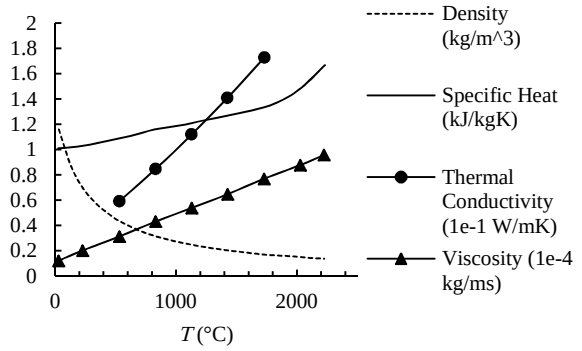

Fig. 2 Flame properties

شکل 2 خواص شعله

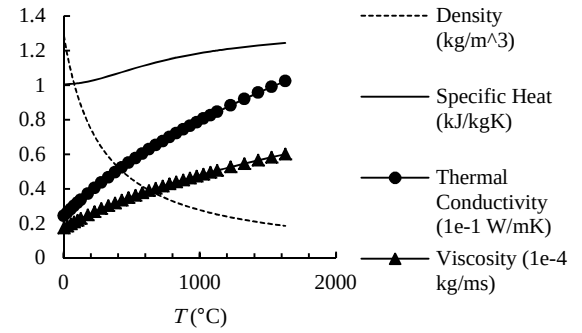

Fig. 3 Air properties used for cooling

شکل 3 خواص هوای مورد استفاده به منظور خنک کاری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

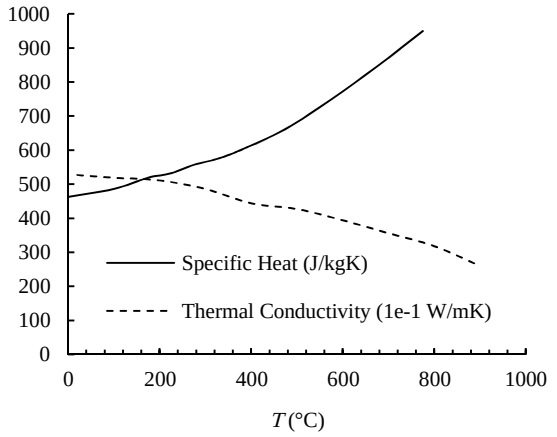

Fig. 4 Thermal Properties of steel sheet

شکل 4 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 جت هوا استفاده گردیده است.

در تحلیل سیالاتی، قسمت‌های مختلفی وجود دارد؛ نازلی برای خروج شعله و نازلی برای خروج جت هوای 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 این‌که در واقعیت، در اطراف و پایین فلز نیز انتقال حرارت با هوای آزاد به صورت جابجایی آزاد برقرار است، مطابق جدول 1، شرایط مرزی جابجایی آزاد با هوا در نظر گرفته شده است. به‌دلیل وجود تقارن در مسئله، هندسه‌ی تمامی نواحی به‌صورت 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 5" 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 لغزنده[1] 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 نسبت به 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.

[1] Sliding Mesh

جدول 1 ضریب انتقال حرارت همرفتی سطح در خنک‌کاری 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]

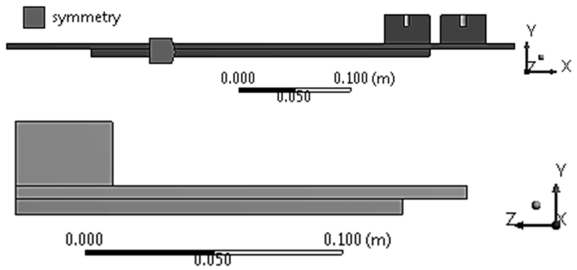

Fig. 5 Halved areas, Y-Z view (bottom figure)– Symmetry boundary condition planes, X-Y view (top figure)

شکل 5 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 حدودا 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 آن‌که 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 فرآیند، پس از اجرای تحلیل در نرم‌افزار تجاری فلوئنت، 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 به‌دست آمده است. با توجه به آن‌که میزان تغییر شکل نسبت به ابعاد، قابل قابل اغماض نیست و تغییر شکل‌های بزرگ[2] وجود دارد، نباید از جملات با درجات بالاتر موجود در کرنش صرف نظر کرد. در تحلیل تغییر شکل، از آن‌جایی‌که زمان به اندازه کافی زیاد است و در این مدت اثرات زمانی جرم ورق بر تغییرشکل آن قابل صرف‌نظر کردن است، از تحلیل "شبه‌گذرا[3]" استفاده گردیده است.

3-3-1- خواص ورق

انجام آزمایشات برای به‌دست آوردن خواص مواد در دماهای مختلف بسیار پر

[2] Large Deformations
[3] Semi Transient

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

هزینه است. از آن‌جایی‌که 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 انبساط حرارتی [21]. تمامی این خواص، متغیر با دما و طبق "شکل 6" به نرم‌افزار وارد شده‌اند. مارامائی خواص مکانیکی این نوع ورق فولادی را ذکر کرده است [14]. برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک ورق از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک دوخطی[1] استفاده شده است که پارامتر ضریب مماسی[2] در مسئله اثرگذار است [22].

3-3-2- شرایط مرزی

حین اجرای عملی این فرآیند، ورق کاملا آزاد بوده و به جز با دو تکه تیر آهن زیر طرفین ورق، با جسم دیگری 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 حین 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 پایین آمدن 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 تلرانس ضربدر نیروی خارجی باشد حل همگرا شده است. در این تحلیل از المان نوع Solid186 استفاده شده است. این المان درجات آزادی u_x، u_y و u_z را داراست و می‌توان دما را به‌عنوان بار گرمایی در

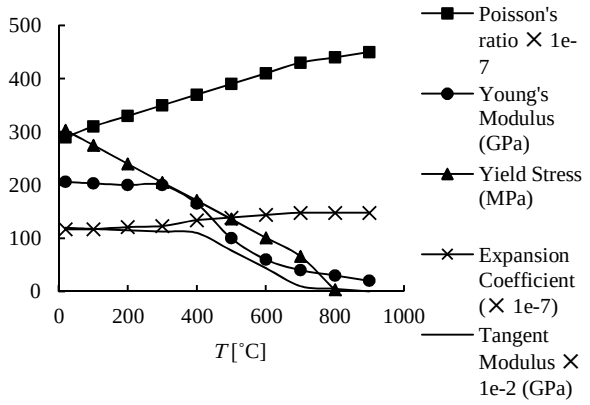

Fig. 6 Sheet mechanical properties

شکل 6 خواص مکانیکی ورق

[1] Bilinear Isotropic Hardening
[2] Tangent modulus

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 30mm × 30mm و با سرعت شعله 130 m/s و ضخامت 8 میلی‌متر و سرعت حرکت 7 mm/s بررسی شده‌اند. با افزایش تعداد المان در راستای ضخامت نتایج به یک مقدار مشخص همگرا شده است. جهت دستیابی به محاسبات دقیق‌تر در راستای ضخامت و اطلاعات بیشتر در مورد روند تغییر شکل، پس از بررسی وابستگی به المان، تعداد 4 المان در ضخامت و 50 المان در راستای طول در نظر گرفته شد.

3-4- روش 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 صفحه‌ای ارتباط مستقیم دارد. اولین گام در یافتن مسیرهای حرارتی به روش کرنش‌معیار، یافتن میدان کرنش برای تخت کردن شکلی مشخص است. می‌توان جزئیات کامل این روش را این‌گونه بیان کرد:

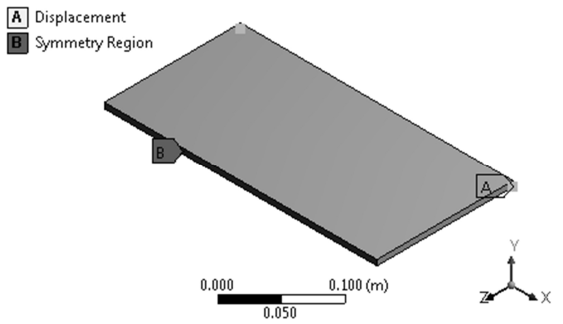

Fig. 7 Boundary conditions, (A) Zero movement along y axis, (B) Symmetry boundary condition in plate symmetry plane

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

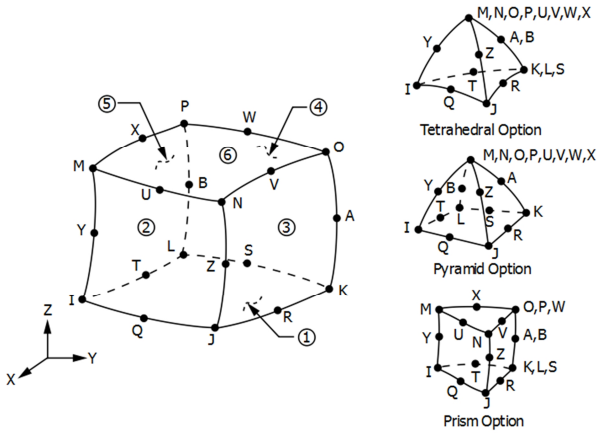

Fig. 8 Solid 186 Element

شکل 8 المان solid 186

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

3-4-1- ایجاد فایل کد

ابتدا بایستی شکل مورد نظری را که می خواهیم از ورق تخت بعد از اعمال حرارت به آن برسیم، به صورت فایل کد ترسیم کنیم.

3-4-2- 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 استفاده‌ی از المان محدود با تغییرشکل 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 تانسورهای تنش و کرنش متناسب با آن باید مورد استفاده قرارگیرند. 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 مسئله‌ی رشد صفحه‌ای[1] پاسخ داده شود و میدان کرنش تحت قیود جابجایی به‌دست آید. قیود جابجایی با تحت فشار قرار دادن صفحه‌ی دو انحنایی بین دو صفحه‌ی صلب تحلیلی[2] 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 صفحه 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 آن‌که 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 11" مشاهده می‌شود، دلیل استفاده‌ی از نمایش برداری کرنش خمشی آنست که، نواحی درون خط‌چین‌ها بیانگر مناطقی با کرنش خمشی مثبت‌اند. با توجه به آن‌که ورق به سمتی خم می‌شود که حرارت داده می‌شود، پس می‌توان گفت در نقاطی که کرنش خمشی منفی است بایستی سطح بالایی را شعله داد و در نقاطی که کرنش خمشی مثبت است، سطح پایینی را، یعنی پشت ورق را. بایستی دقت کرد که در شکل بالشتی، نواحی با کرنش فشاری مثبت (=کرنش خمشی مثبت) بسیار کم‌تر است از نواحی با کرنش فشاری منفی و می توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود. اما در شکل زین اسبی به هیچ عنوان نمی توان از نواحی با کرنش فشاری مثبت صرف‌نظر کرد چرا که بسیار چشم‌گیرند. بنابراین در شکل زین اسبی 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

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 به‌دست آمده، جهت میله‌ها راستای ماکزیمم‌کرنش اصلی و طول میله‌ها مقدار مینیمم کرنش اصلی را نشان می‌دهد. سپس از یک نقطه روی ورق مثل نقاط تقارنی 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 به‌صورت مستقل در نظر گرفت. طبق مطالعات انجام شده توسط هاشیموتو [23]،

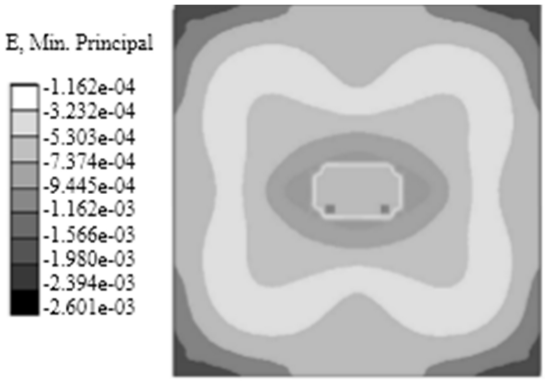

Fig. 9 Sample of minimum principal strain contour in flattened pillow shape

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

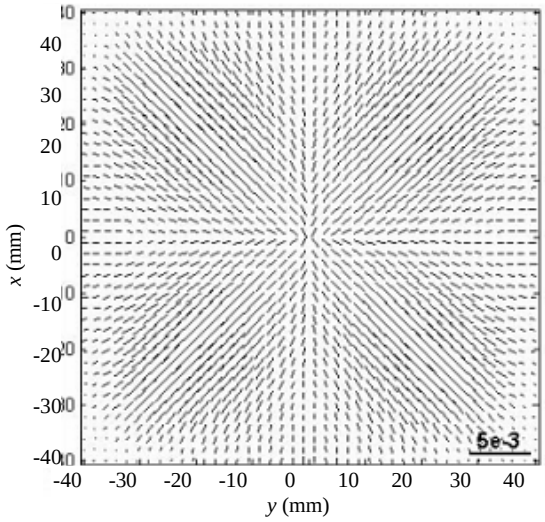

Fig. 10 Minimum principal strain vectors on the middle surface of flattened pillow shape

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

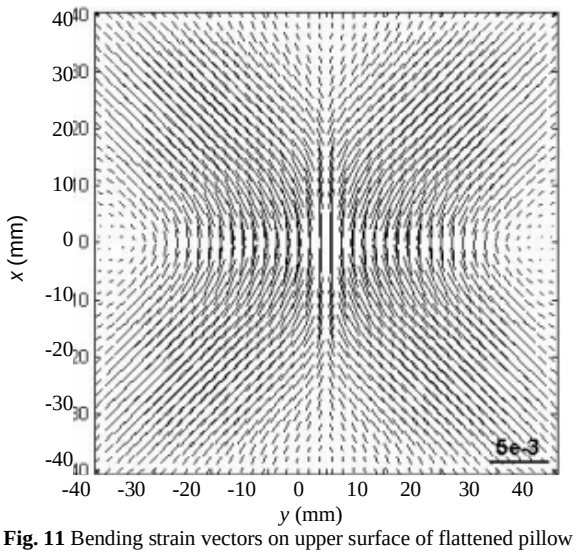

Fig. 11 Bending strain vectors on upper surface of flattened pillow shape

شکل 11 نمایش برداری توزیع کرنش‌های خمشی، روی صفحه‌ی بالایی، شکل بالشتی تخت شده [13]

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

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

جهت تعیین این پارامترها، راه‌های متعددی نظیر شبیه‌سازی، استفاده از کارهای تجربی و شبکه‌ی عصبی وجود دارد. در این تحقیق، برای آموزش شبکه‌ی عصبی از داده‌های بدست‌آمده از شبیه‌سازی فرآیند حرارت‌دهی خطی با شعله، در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی که معمولا به اختصار شبکه‌های عصبی نامیده می‌شوند، یک مدل ریاضی یا محاسباتی الهام گرفته از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی هستند. برای آن‌که 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 می‌نیمم 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 شده 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 به‌عنوان 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 لایه خروجی با یک عصب و تابع فعال‌سازی همانی است. برای تسریع 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

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	-0.00028 الی -0.0006

ضرایب و مابقی برای اعتبارسنجی توسط متلب به‌کار 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. وو [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 وو در نظر گرفته شد و توزیع دمای حاصل شده با کار او مقایسه شد (شکل 12). میزان خطای موجود بین کار وو و این تحقیق حدود 5% می‌باشد. کار وو با استفاده از ساده‌سازی تقارن محوری انجام شده است ولی در این تحقیق مدل‌سازی 3بعدی با در نظر گرفتن تقارن نسبت به یک صفحه صورت گرفته است، از این‌رو ایجاد اختلاف در نتایج به‌دست آمده دور از انتظار نیست. پس از تأیید نتایج دمایی از این به بعد برای مقایسه‌ی این پژوهش با کارهای انجام شده، به‌دلیل نبود اطلاعات مربوط به حرارت‌دهی توسط شعله از جمله سرعت خروج هوا، قدرت شعله‌ی خروجی از مشعل به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که بیشینه‌ی دمای به‌وجود 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 مدل‌سازی خود را با پارامترهای بیسواز یکسان در نظر گرفته و نتایج مطابق "شکل 14" به‌دست می‌آید. میزان خطای متوسط بین کار عملی بیسواز و این تحقیق 9.37% می‌باشد. این مقدار با توجه به تفاوت 5% در بیشینه دما که 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 برحسب سرعت خروج شعله و در "شکل 17" همین موارد با شرایط یکسان برای ورق با ضخامت 6 mm 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

میزان تغییر شکل برای حالتی که خنک‌کاری به‌صورت همزمان با حرارت‌دهی اعمال می‌شود بیشتر از حالت دیگر خنک‌کاری است؛ البته این افزایش برای ضخامت 8mm وقتی سرعت شعله به 90m/s می‌رسد بسیار کم می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که میزان تغییر شکل و همچنین افزایش آن در اثر خنک‌کاری همزمان در تمام حالات با کاهش ضخامت از 8 به 6 mm کاهش یافته است. این کاهش به‌دلیل مقاومت کمتر لایه‌های ورق فلزی در راستای ضخامت برای تغییر شکل پلاستیک و شکل‌پذیری راحت‌تر فلز است.

4-2- اثرات سرعت خنک‌کاری

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

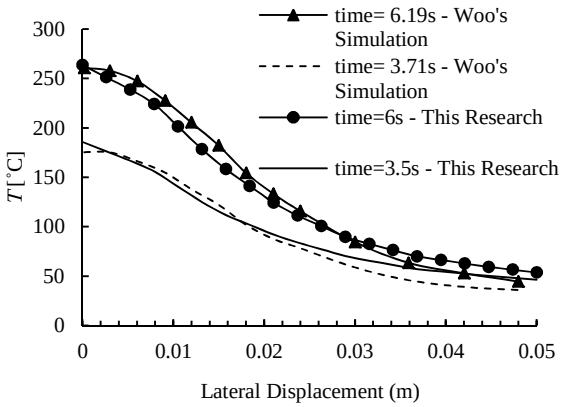

Fig. 12 Comparison of this research with Woo's simulation

شکل 12 مقایسه نتایج این تحقیق با شبیه‌سازی وو

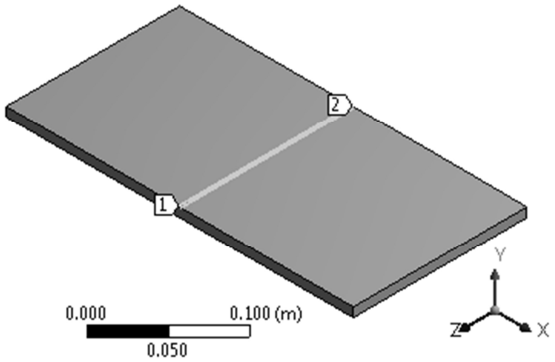

Fig. 13 Data reading place for deformation

شکل 13 محل داده خوانی برای تغییر شکل

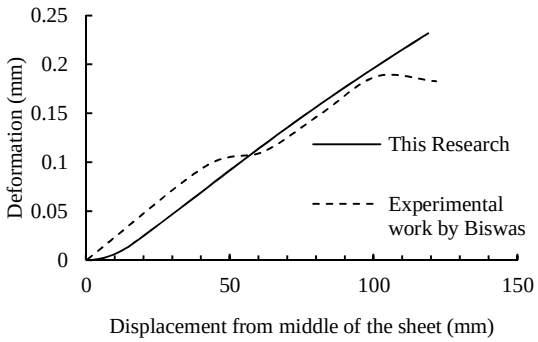

Fig. 14 Deformation comparison of this research and the Biswas' experimental work

شکل 14 مقایسه تغییر شکل این تحقیق با کار عملی بیسواز

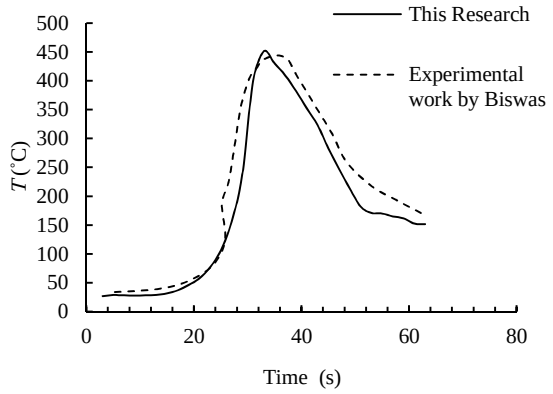

Fig. 15 Middle point temperature comparison of this research with Biswas's experimental work

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

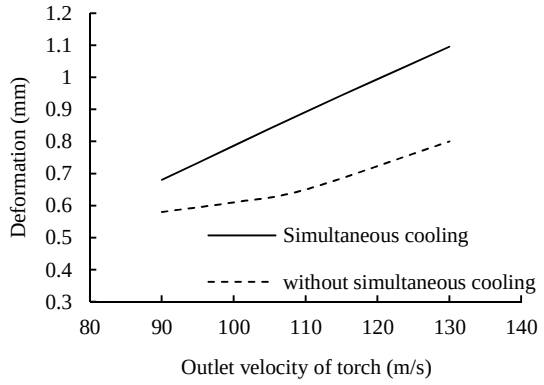

Fig. 16 Maximum sheet metal deformation – v = 5mm/s – Thickness=8mm

شکل 16 تغییر شکل بیشینه ورق – v = 5mm/s – ضخامت = 8mm

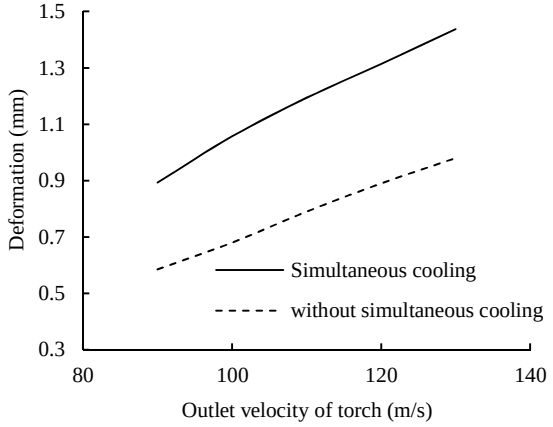

Fig. 17 Maximum sheet metal deformation – v = 5mm/s – Thickness=6mm

شکل 17 تغییر شکل بیشینه ورق – v = 5mm/s – ضخامت = 6mm

نازل خنک کننده‌ی 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 خنک‌کاری، تغییر شکل‌های نهایی را بدست می‌آوریم.

در "شکل 18" تأثیر سرعت خنک‌کاری برای ورق با ضخامت 6mm و سرعت خروجی شعله‌ی 130 m/s نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که در هر سرعت حرکت با افزایش سرعت خنک‌کاری میزان تغییر شکل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

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 به وضوح دید که اگر سرعت خنک‌کاری از یک حدی پایین تر باشد تفاوت چندانی با حالت بدون خنک‌کاری همزمان نمی‌توان مشاهده کرد. این حد سرعت در این‌جا حدود 50m/s به‌دست آمده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد با افزایش سرعت حرکت مشعل وقتی سرعت به حدود 7 mm/s می‌رسد، افزایش میزان تغییر شکل کاهش می‌یابد. در "شکل 19" نمودار میزان تغییر شکل ورق در راستای عرضی با سرعت خروج شعله‌ی 130 m/s و سرعت حرکت = mm/s 5 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 میشویم میزان تغییرشکل‌ها بسیار ناچیز بوده و در اثر افزایش سرعت خنک‌کاری نیز افزایش ناچیزی داشته و مقدرشان بسیار بهم نزدیک می‌باشد. به‌صورت متوسط در وسط ورق به ازای هر 50m/s افزایش سرعت خنک‌کاری میزان تغییر شکل حدود 0.15mm افزایش می‌یابد در حالی‌که در لبه‌های سمت راست و چپ ورق این اختلاف به حدود 0.03 mm می‌رسد.

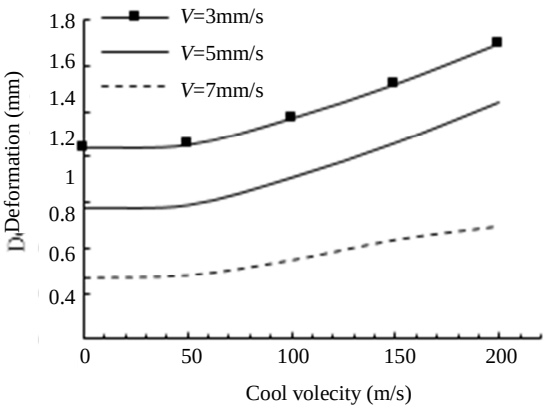

Fig. 18 Sheet metal deformation in different velocities – *V*= Flame movement velocity

شکل 18 میزان تغییر شکل بیشینه‌ی ورق برحسب سرعت خنک‌کاری- سرعت حرکت مشعل = *v*

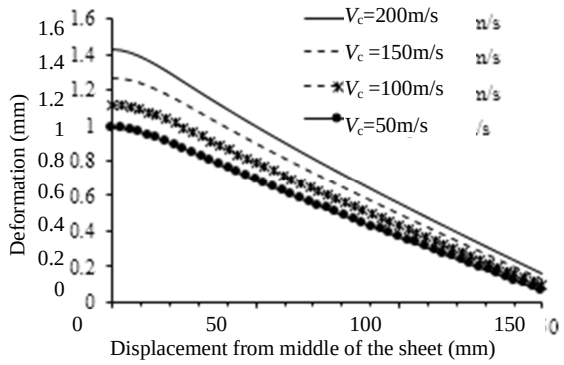

Fig. 19 Lateral sheet metal deformation, *Vc* = Cool velocity, Flame outlet velocity = 130 m/s, Flame movement velocity = 5 mm/s

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

3-4- اعتبارسنجی نتایج شبکه عصبی با مقادیر هدف

در "شکل 20"، مقادیر خروجی شبکه‌ی عصبی ایجاد شده، برای تعیین شرایط حرارتی مشعل، 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 داده ها نیز در مرحله آموزش 0.99901، ارزیابی 0.99844، تست 0.99764 و به‌صورت کلی 0.09985 بوده است.

4-4- مسیرها و شرایط حرارتی شکل استوانه ای

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 به‌صورت کاملا 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 آنست که شکل استوانه‌ای از جمله سطوح تک انحنایی 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 شبکه‌ی 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 تعمیم دادیم. در این آزمایش، بیشترین مقدار می‌نیمم کرنش اصلی در حدود $3e^{-4}$ به‌دست 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 مراجعه به شبکه‌ی عصبی، سرعت حرکت منبع حرارتی متناسب با هر خط حرارتی را یافتیم. "شکل 22" مسیرها و شرایط حرارتی بدست آمده برای شکل استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

5-4- اعتبارسنجی شکل استوانه ای

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

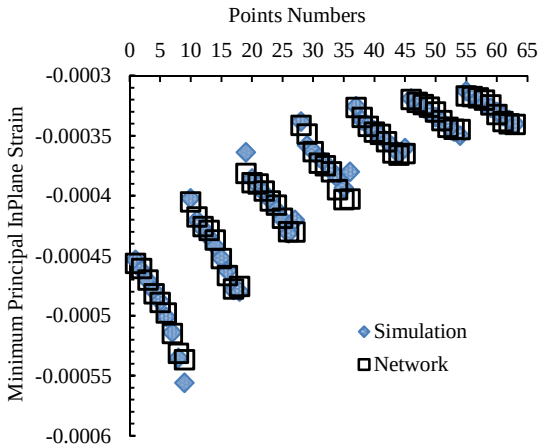

Fig. 20 Comparison of trained neural network output with the simulation results

شکل 20 مقایسه‌ی خروجی شبکه‌ی عصبی آموزش داده شده با مقادیر شبیه سازی (مقادیر هدف)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

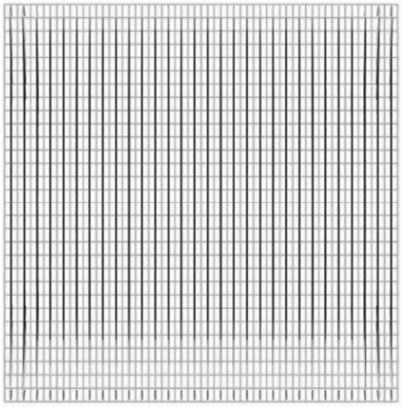

Fig. 21 Elastic analysis on desired cylindrical shape to find minimum principal strain distribution

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

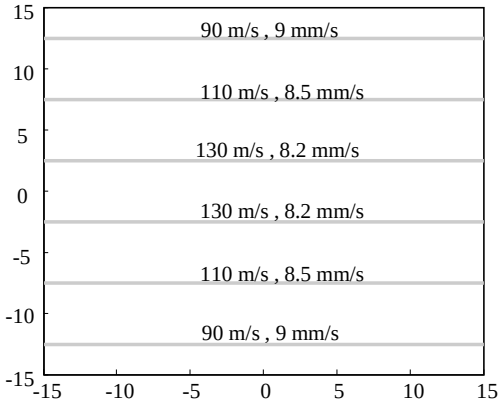

Fig. 22 Obtained paths and heat conditions for desired cylindrical shape

شکل 22 مسیرها و شرایط حرارتی به‌دست آمده برای شکل مطلوب استوانه‌ای

ویژگی‌های حرارتی به‌دست آمده را در نرم‌افزار انسیس، به کمک شبیه‌سازی منبع حرارتی شعله، روی یک ورق تخت اولیه اجرا کردیم تا به صحت مسیرها و شرایط حرارتی به‌دست آمده برای رسیدن از یک ورق اولیه به شکل مطلوب استوانه‌ای برسیم و میزان خطای حاصله را نیز بیابیم. "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 استوانه‌ی مطلوب، 30mm × 30mm با خم 2 میلی‌متر نسبت به حالت تخت می‌باشد. میزان خمی که با استفاده‌ی از شبیه‌سازی در شرایط حرارتی مشخص به‌دست آمد، 1.93 میلی‌متر است. خم به‌دست 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 تغییرشکل کلی را بیان می‌کند.

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

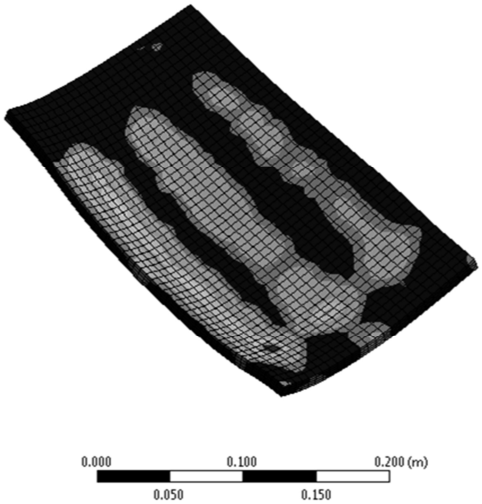

Fig. 23 Validation of obtained paths and heat conditions to achieve the cylindrical shape (half of the plate)

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

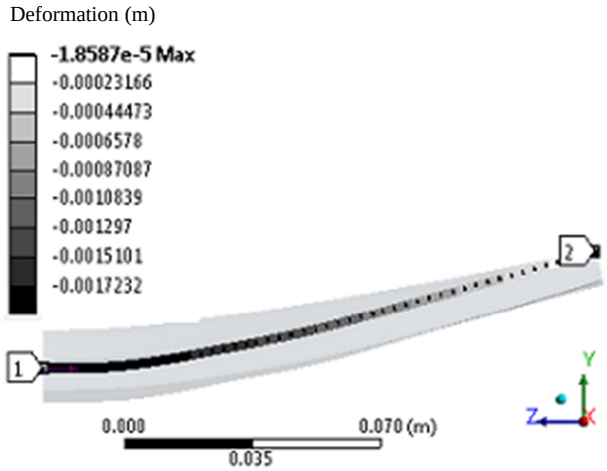

Fig. 24 Plate deformation after applying paths and heat conditions in the simulation of flame heat source to get pillow shape from the initial flat plate; (half of the plate)

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)

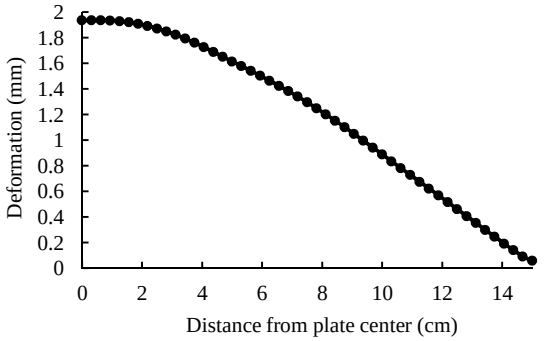

Fig. 25 Obtained deformation after applying paths and heat conditions in the simulation of flame heat source to get pillow shape from the initial flat plate; (half of the plate)

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]

همین موضوع شکل استوانه‌ای را با درصدی از خطا 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 تغییرشکل 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 به‌کار 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 تجزیه‌ی آن‌ها کار دشواری نیست و به همین دلیل روش کرنش معیار قابلیت تعیین مسیرهای حرارتی سطوح سه بعدی پیچیده را نیز علاوه بر سطوح دوبعدی و ساده دارد. ضمن آن‌که تنها با یک بار اجرای این روش می‌توان به تمامی مسیرهای حرارتی موردنیاز دست یافت. استفاده‌ی از شبیه‌سازی برای تشکیل شبکه‌ی عصبی به‌جای 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 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 فارسی)

[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 فارسی).

[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-densitiesd_ 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 فارسی).

[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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.9.0]