



## بررسی عددی رفتار تغییر شکل در خمکاری ورق با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

مهدي صفري

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک  
اراک، صندوق پستی 381351177، m.safari@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 فروردین 1401

داوری اولیه: 1 خرداد 1401

پذیرش: 28 خرداد 1401

کلیدواژگان:

فرآیند خمکاری با لیزر

بررسی عددی

الگوی تابش دهی منحنی

رفتار تغییر شکل

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی فرآیند خمکاری با لیزر ورق فلزی توسط الگوی تابش دهی منحنی بررسی می‌شود. بدین منظور از نرم-افزار تجاری آباکوس جهت انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود استفاده می‌شود. ورق فلزی مورد بررسی، فولاد کم کربن مایلد استیل<sup>1</sup> با ضخامت 1 میلی‌متر می‌باشد. به کمک میدان تنش حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل اثر تنش‌های باقیمانده در جهت‌های مختلف واقع بر مسیر تابش دهی با لیزر، مکانیک تغییر شکل و دلیل خمش ورق در فرآیند خمکاری با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که مسیر تابش دهی منحنی می‌تواند به طور مناسب ورق فلزی فولادی را خمکاری نماید. همچنین اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر بر میانگین جابجایی‌های ورق خمکاری شده با لیزر توسط مسیر تابش دهی منحنی مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش توان لیزر، میانگین جابجایی‌های ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی افزایش می‌یابد. همچنین از شبیه‌سازی‌های عددی نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش سرعت اسکن لیزر میانگین جابجایی‌های ورق خمکاری شده با لیزر کاهش می‌یابد. ثابت می‌شود که با افزایش قطر پرتوی لیزر میانگین جابجایی‌های ورق خمکاری شده با لیزر کاهش می‌یابد.

## Numerical investigation of deformation behavior in laser bending of sheet with curved irradiating scheme

Mehdi Safari

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran  
P.O.B. 381351177 Arak, Iran, m.safari@arakut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 16 April 2022  
First Decision: 22 May 2022  
Accepted: 18 June 2022

### Keywords:

Laser bending process  
Numerical investigation  
Curved irradiating scheme  
Deformation behavior

### Abstract

In this research, numerical simulation of laser bending process of the metallic sheet with curved irradiating scheme is investigated. For this purpose, the commercial ABAQUS software is used for performing the finite element simulations. The used sheet metal is the low carbon mild steel with thickness of 1 mm. Using the stress field obtained by the numerical simulations and analyzing the residual stresses in different directions located on the laser irradiation path, the mechanics of deformation and the reason for sheet bending in the laser bending process with curved irradiating scheme are investigated. The results show that the curved irradiating scheme can properly bend the steel sheet. Also, the effects of laser power, laser scanning speed and laser beam diameter on the average value of displacements of the laser-bent sheet with curved irradiating scheme are investigated. The results show that with increasing the laser power, the average value of displacements of laser-bent sheet with curved irradiating scheme is increased. Also, it is concluded from numerical simulations that with increasing the laser scanning speed, the average value of displacements of laser-bent sheet is decreased. It is proved that with increasing the laser beam diameter, the average value of displacements of laser-bent sheet is decreased.

### 1- مقدمه

کرنش‌های پلاستیک حرارتی شده، باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در ورق می‌شود. در فرآیند خمکاری با لیزر، ناحیه متأثر از شار حرارتی لیزر که تغییر شکل‌های پلاستیک در آن رخ می‌دهد بسیار باریک بوده و در نتیجه تغییرات ریزساختاری قابل توجهی در ورق ایجاد نمی‌شود. همچنین در فرآیند خمکاری با لیزر میزان برگشت فنری ایجاد شده در ورق خم شده بسیار اندک بوده و بنابراین خمکاری دقیق ورق‌های فلزی به منظور کاربرد در شرایط خاص توسط پرتوی لیزر امکان‌پذیر

طی دو دهه اخیر لیزر به عنوان ابزار مناسبی برای خمکاری فلزاتی که خمکاری آنها مشکل می‌باشد و همچنین برای شکل‌دهی قطعات پیچیده بدون نیاز به قالب‌های گران‌قیمت معرفی شده است. فرآیند خمکاری با لیزر<sup>2</sup> یک روش خمکاری پیشرفته بدون تماس می‌باشد که نیاز به قالب نداشته و به واسطه شار حرارتی وارد شده به ورق که منجر به ایجاد

<sup>1</sup> Mild steel

<sup>2</sup> Laser bending process

Please cite this article using:

M. Safari, Numerical investigation of deformation behavior in laser bending of sheet with curved irradiating scheme, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 1- 7, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شرایط سرمایش اجباری بطور قابل ملاحظه‌ای زاویه خمش را به خصوص در الگوهای تابش‌دهی چند پاسه افزایش می‌دهد. ونگ و همکاران [7] با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، مکانیزم فرآیند خمکاری با لیزر ورق‌های کامپوزیتی را مطالعه کردند. آنها میدان‌های دما، تنش و کرنش را بین لایه‌های ورق کامپوزیتی بررسی کردند. همچنین آنها به منظور کنترل رفتار خمش و اثرات لبه ای، الگوهای اسکن مختلفی را پیشنهاد کردند. ناث و همکاران [8] با استفاده از شبیه سازی المان محدود ترمومکانیکال، خمکاری با لیزر آلیاژ منیزیم AM30 را مطالعه کردند. در تحقیق آنها اثر پارامترهای فرآیند و همچنین الگوهای تابش‌دهی تک پاسه و چند پاسه بر زاویه خمش ورق خمکاری شده با لیزر بررسی شد. مهمترین نتیجه ای که از تحقیق آنها به دست آمد این بود که زاویه خمش به دست آمده در الگوی تابش‌دهی چند پاسه 430 درصد بزرگتر از زاویه خمش به دست آمده با الگوی تابش‌دهی تک پاسه بود. ژنگ و همکاران [9] به منظور کاهش اثرات لبه ای در ورق خمکاری شده با لیزر از جنس فولاد DP-980 یک الگوی تابش‌دهی با سرعت متغیر پیشنهاد کردند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات زاویه خمش در لبه خم شده ورق خمکاری شده با لیزر با استفاده از الگوی تابش‌دهی سرعت متغیر در مقایسه با الگوی تابش‌دهی سرعت ثابت به طور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین آنها نتیجه گرفتند که زاویه خمش به دست آمده با الگوی تابش‌دهی سرعت متغیر بیشتر از زاویه خمش به دست آمده با الگوی تابش‌دهی سرعت ثابت است.

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، فرآیند خمکاری با لیزر ورق فولادی کم کربن مایلد استیل با استفاده از مسیر تابش‌دهی منحنی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار تغییر شکل در این مسیر تابش‌دهی با استفاده از تحلیل میدان تنش‌های باقی‌مانده مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. شبیه سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌شوند. همچنین به بررسی اثر پارامترهای لیزر شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتوی لیزر بر میانگین جابجایی‌های ورق خمکاری شده با لیزر توسط مسیر تابش‌دهی منحنی پرداخته می‌شود.

## 2- شبیه‌سازی عددی

به منظور انجام شبیه‌سازی‌های عددی از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده می‌شود. با توجه به اینکه فرآیند خمکاری با لیزر، یک

می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در زمینه خمکاری با لیزر انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. مجی و همکاران [1] فرآیند خمکاری با لیزر ورق‌های فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 را مطالعه کرده و اثر پارامترهای لیزر بر زاویه خمش را با استفاده از تحلیل‌های آماری مورد مطالعه قرار دادند. آنها اثر پارامترهای توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و قطر پرتو را بر زاویه خمش ورق خم شده با لیزر بررسی کردند. به منظور مدل‌سازی و بهینه سازی نیز از روش سطح پاسخ استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش توان لیزر منجر به افزایش زاویه خمش ورق شده در حالی که افزایش سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر منجر به کاهش زاویه خمش در ورق خمکاری شده با لیزر می‌شود. همچنین آنها مقایسه‌ای نیز بین استفاده از پرتوی لیزر پیوسته و پالسی بر زاویه خمش انجام دادند. صفری و همکاران [2] به بررسی اثر نقطه شروع مسیر اسکن از بخش نازک یا بخش ضخیم و همچنین اثر سطح تحت تابش‌دهی نسبت به پله‌ی ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده در فرآیند خمکاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مسیر تابش‌دهی از لبه بخش ضخیم به سمت لبه بخش نازک منجر به افزایش زاویه خمش در فرآیند خمکاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌شود. همچنین آنها نتیجه گرفتند که در صورت تابش‌دهی سطحی از ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده که دارای پله می‌باشد زاویه خمش کاهش می‌یابد. کانت و جوشی [3] فرآیند خمکاری با لیزر آلیاژ منیزیم MIA را با هدف دستیابی به زوایای خمش بیشتر از 10 درجه مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که تعداد پاسهای تابش‌دهی اثر قابل توجهی بر رفتار تغییر شکل ورق‌های منیزیمی خمکاری شده با لیزر دارد. صفری و جودکی [4] با استفاده از شبکه عصبی، زاویه خمش را در فرآیند خمکاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشان داد که شبکه عصبی استفاده شده می‌توانست با دقت قابل قبولی زاویه خمش را پیش‌بینی کند. فتن و همکاران [5] اثر عرض و ضخامت ورق‌های فولادی AH36 را در فرآیند خمکاری با لیزر چند پاسه مطالعه کردند. بررسی‌های آنها با استفاده از تست‌های تجربی و شبیه سازی‌های عددی انجام شد. نتایج آنها نشان داد که استحکام خمشی و سختی ورق‌های تابش‌دهی شده با لیزر بعد از فرآیند خمکاری با لیزر افزایش می‌یابد. کانت و جوشی [6] فرآیند خمکاری با لیزر در شرایط سرمایش اجباری را با شرایط سرد شدن طبیعی ورق بعد از خم شدن مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که خمکاری با لیزر در

نقاط شروع و پایان مسیر تابش دهی منحنی در شکل 1 نشان داده شده اند و ارتفاع منحنی نیز در آن 30 میلی متر می باشد. در شبیه سازی های عددی، توان لیزر از 60 تا 120 وات، سرعت اسکن لیزر از 50 تا 170 میلی متر بر دقیقه و قطر پرتوی لیزر نیز از 0/85 تا 2 میلی متر در نظر گرفته می شوند. در شکل 2 کانتور دمای فرآیند خمکاری با لیزر ورق فولادی کم کربن مایلد استیل با الگوی تابش دهی منحنی نشان داده شده است. همچنین در شکل 3 کانتور مربوط به تنش فون میزز ورق فولادی خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی نشان داده شده است.

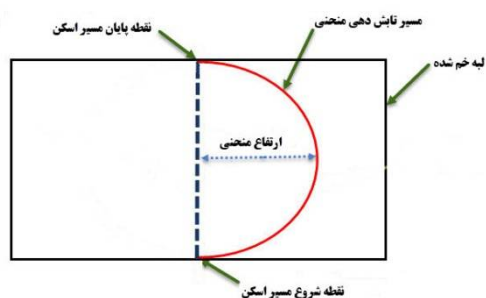


Fig. 1 The curved irradiating scheme

شکل 1 الگوی تابش دهی منحنی

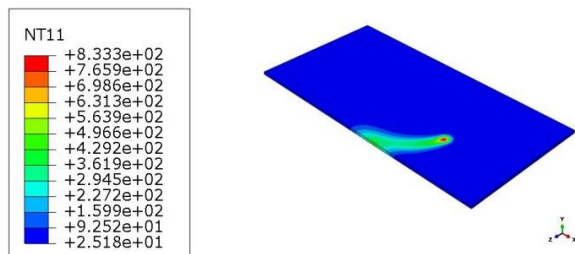


Fig. 2 The temperature contour of laser-bent sheet with curved irradiating scheme

شکل 2 کانتور دمای ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

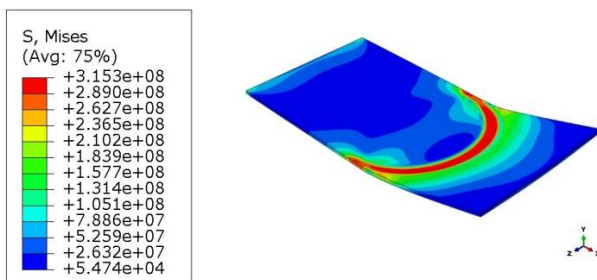


Fig. 3 The residual stress contour of laser-bent sheet with curved irradiating scheme

شکل 3 کانتور تنش باقیمانده ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

فرآیند حرارتی-مکانیکی<sup>1</sup> می باشد در نرم افزار آباکوس نیز هر دو حل حرارتی و مکانیکی انجام شده و نتایج آنها استخراج می شوند. در شبیه سازی اجزای محدود فرآیند خمکاری با لیزر انجام شده در این تحقیق، با توجه به اینکه گرمای حاصل از کار پلاستیک در مقایسه با انرژی حرارتی بسیار بالای لیزر اندک و ناچیز می باشد می توان ابتدا حل حرارتی را انجام داده و سپس نتایج حاصل از حل حرارتی را به عنوان یک بار اولیه در حل مکانیکی وارد نمود. به این شیوه حل در اصطلاح روش حل غیر کوپل نیز می گویند. خواص مکانیکی و حرارتی فولاد استفاده شده در این تحقیق همگی وابسته به دما بوده و از مرجع [10] استخراج شده اند. در شبیه سازی اجزای محدود فرآیند خمکاری ورق با لیزر، اثر پرتوی لیزر به صورت شار حرارتی در نظر گرفته می شود. توزیع شار حرارتی مورد استفاده در این تحقیق به صورت گوسی بوده و با رابطه (1) نشان داده می شود.

$$Q(x, z) = \frac{3\eta P}{\pi R^2} \text{Exp} \left( -3 \left( \left( \frac{x}{R} \right)^2 + \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right) \right) \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $\eta$  ضریب جذب لیزر،  $P$  توان پرتوی لیزر،  $R$  شعاع پرتوی لیزر تابش شده به سطح ورق فلزی و  $x$  و  $z$  فاصله یک نقطه از مرکز پرتوی لیزر می باشد. ضریب جذب فولاد کم کربن مایلد استیل مورد استفاده در این تحقیق برگرفته از مرجع [10] و برابر با 0/65 می باشد. انتقال حرارت نیز در این پژوهش بر مبنای انتقال حرارت همرفتی و تشعشع در نظر گرفته شده است. همچنین جهت اعمال شار حرارتی در نرم افزار آباکوس از زیربرنامه دی فلاکس<sup>2</sup> استفاده می شود. المان مورد استفاده در حل حرارتی DC3D20 بوده در حالی که در حل مکانیکی از المان C3D20 استفاده می شود. حل های حرارتی و مکانیکی دارای شبکه بندی یکسان و کاملاً مشابه هم هستند. شبیه سازی های اجزای محدود در حل حرارتی و مکانیکی در دو مرحله انجام می شوند. مرحله اول حرارت دهی می باشد که در آن شار حرارتی معادل با انرژی پرتوی لیزر به ورق اعمال شده و در مرحله دوم شرایط مناسب برای شبیه سازی سرد شدن ورق در دمای اتاق و به آرامی اعمال می شوند. در این پژوهش به منظور بررسی رفتار تغییر شکل ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی از یک مسیر تابش دهی همانند شماتیک ارائه شده در شکل 1 استفاده می شود.

ورق مورد بررسی در این پژوهش دارای طول 100 میلی متر، عرض 60 میلی متر و ضخامت 0/85 میلی متر می باشد. همچنین

<sup>1</sup> Thermo-mechanical

<sup>2</sup> DFLUX

### 3- نتایج و بحث

شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش با استفاده از یک روند منطقی در تحقیق دیگری توسط نویسنده مقاله [10] با آزمایش‌های تجربی مقایسه و تایید شده اند و بنابراین در این مقاله روند تایید شبیه سازی‌ها ارائه نمی‌شود و به مرجع [10] ارجاع داده می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی‌های عددی به منظور کاهش خطاهای ناشی از حل عددی و عدم وابستگی نتایج به اندازه المان، پالایش شبکه انجام شده و نتایج آن در جدول 1 ارائه شده است. بدین منظور دمای نقطه شروع مسیر اسکن در انتهای مرحله تابش دهی و به ازای تعداد المان‌های مختلف اندازه گیری شده و همان‌طور که از جدول 1 مشاهده می‌شود به ازای تعداد المان 11000، نتایج عددی به پایداری نسبی رسیده‌اند و با کاهش بیشتر اندازه المان تغییری در نتایج دیده نمی‌شود. بنابراین تعداد المان مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی تحقیق حاضر 11000 می‌باشد.

در ادامه به بررسی رفتار تغییر شکل و تحلیل فرآیند خمکاری به کمک لیزر ورق با مسیر تابش دهی منحنی که منجر به ایجاد خمش در ورق می‌شود پرداخته می‌شود. بدین منظور دو نقطه مهم و اساسی واقع بر مسیر تابش دهی منحنی انتخاب شده و تنش‌های فون میز باقیمانده موجود در این نقاط در دو جهت X و Z و در انتهای مرحله تابش دهی با لیزر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. در شکل 4 نقاط مهم انتخاب شده جهت بررسی و تحلیل نشان داده شده اند.

در شکل 5 تنش‌های باقیمانده صفحه‌ای در نقطه نمونه A نشان داده شده است.

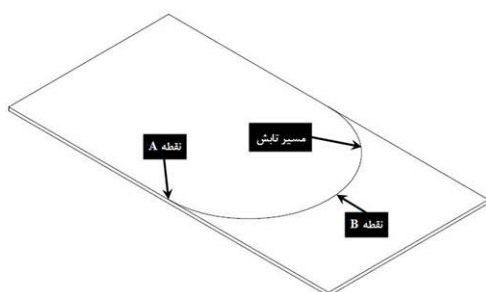
همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود با شروع تابش دهی در نقطه A، تنش در جهت X فشاری می‌باشد که این به دلیل ممانعت مواد سرد اطراف نسبت به انبساط لایه سطحی ورق در نقطه A می‌باشد. در ادامه و با عبور پرتوی لیزر از محل نقطه A و همزمان با انقباض مواد در این محل، مواد سرد اطراف مجدداً با انقباض مخالفت کرده و تنش کششی در این حالت در نقطه A ایجاد می‌شود. در نقطه A و همزمان با تابش پرتوی لیزر، ورق در جهت Z نیز دچار انبساط شده و تنش فشاری در این جهت در ورق ایجاد می‌شود. نکته مهم در این قسمت کاهش قابل توجه تنش فشاری در جهت Z نسبت به جهت X است. دلیل این کاهش، اختلاف در قیود هندسی در جهت‌های X و Z در نقطه A می‌باشد. به هر حال در جهت Z نیز پس از عبور پرتوی لیزر، تنش کششی ایجاد شده که با توجه به ناچیز بودن تنش در جهت Z نسبت به جهت X خمش اصلی ورق در جهت X اتفاق

می‌افتد. در ادامه و در شکل 6 تنش‌های باقیمانده صفحه‌ای در نقطه نمونه B نشان داده شده است.

جدول 1 دمای نقطه شروع مسیر اسکن در انتهای مرحله تابش دهی و به ازای تعداد المان‌های مختلف

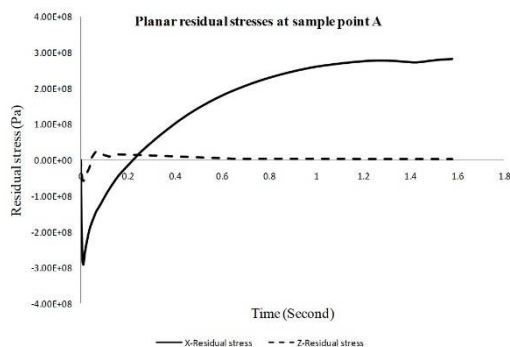
**Table 1** The temperature of start point of scan path at the end of irradiating step and according to different element numbers

تعداد المان	دما (درجه سانتی‌گراد)
8000	134
9000	121
10000	115
11000	104
14000	103
20000	101
25000	100



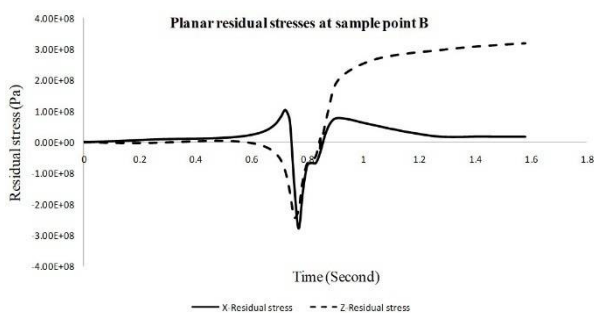
**Fig. 4** The schematics of curved irradiating scheme and two sample points A and B

شکل 4 شماتیک الگوی تابش دهی منحنی و دو نقطه نمونه A و B



**Fig. 5** The planar residual stress at sample point A

شکل 5 تنش‌های باقیمانده صفحه‌ای در نقطه نمونه A



**Fig. 6** The planar residual stress at sample point B

شکل 6 تنش‌های باقیمانده صفحه‌ای در نقطه نمونه B

همان‌طور که در این شکل 6 دیده می‌شود تنش‌های فشاری در جهت‌های X و Z در نقطه B ایجاد می‌شوند که با عبور پرتوی لیزر از روی نقطه B و انقباض ناحیه حرارت دیده، تنش‌های فشاری به کششی تبدیل می‌شوند. در این حالت تنش‌های موجود در جهت X به دلیل قیده‌های هندسی ورق در این محل به سمت صفر میل می‌کنند در حالی که تنش‌های کششی در جهت Z افزایش می‌یابند. دلیل افزایش تنش کششی در جهت Z در این نقاط این است که همزمان با انقباض مواد در این نقطه، در نقطه بعدی مواد در اثر حرارت وارده به ورق دچار انبساط می‌شوند که با ممانعت مواد اطراف روبرو می‌شوند. از جمله موادی که مانع از انبساط نقطه بعدی می‌شوند مواد این نقطه هستند. بنابراین طبیعت مواد این نقطه به سمت کششی پیش می‌رود و تا انتهای فرآیند نیز در همین حالت باقی می‌ماند.

نکته ای که باید بدان توجه شود این است که تنش‌های کششی در جهت Z که مقدارشان نیز قابل ملاحظه می‌باشد دیگر توانایی خمش ورق حول محور X را ندارند. دلیل این موضوع قیده‌های هندسی ناشی از گیرش ورق در لبه آن و جلوگیری از خمش ورق حول محور X است. دلیل دیگر نیز سفتی ایجاد شده در ورق در اثر خمش حول محور Z از ابتدای تابش دهی است که مانع از چرخش ورق حول محور X می‌شود. با توجه به بررسی و تحلیل تنش‌ها در دو نقطه ابتدایی و وسط ورق بر روی خط تابش دهی، پیداست که ورق حول محور Z و به سمت پرتوی لیزر خمش پیدا می‌کند و البته به خاطر وجود تنش‌های کششی قابل ملاحظه در نقاط مختلف، ورق اندکی نیز حول محور X خمش خواهد داشت که در منابع از آن تحت عنوان اثر لبه<sup>1</sup> ای یاد می‌شود. نکته دیگری که می‌بایستی بدان توجه شود مقدار کمتر تنش فشاری ایجاد شده در جهت Z نسبت به جهت X است. دلیل این موضوع این است که همواره مقداری از حرارت پرتوی لیزر به دلیل هدایت حرارتی به سمت جلوی پرتو منتقل می‌شود. بنابراین دمای مواد جلوی پرتوی لیزر افزایش یافته و بدین ترتیب فشار کمتری بر موادی که در وسط پرتوی لیزر هستند اعمال می‌کنند. همین موضوع باعث می‌شود که مواد جلوی پرتوی لیزر توانایی جلوگیری از انقباض مواد قبلی خود در جهت Z را به اندازه کافی نداشته باشند و به همین دلیل است که در جهت X قبل از مرحله تنش فشاری اندکی تنش کششی وجود دارد حال آنکه در جهت Z چنین اتفاقی نمی‌افتد. در ادامه و در شکل 7 به بررسی جابجایی‌های در جهت Y نقاط واقع بر لبه خم شده ورق خمکاری شده با لیزر توسط مسیر

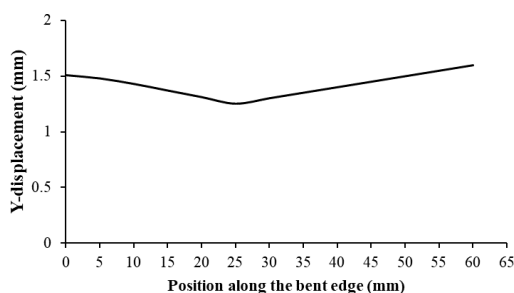


Fig. 7 Y-displacements along the laser-bent edge with curved irradiating scheme

شکل 7 جابجایی‌های در جهت Y در امتداد لبه خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

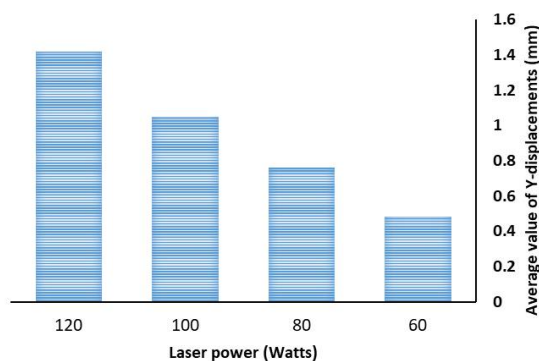


Fig. 8 Effect of laser power on the average value of Y-displacements of laser-bent edge with curved irradiating scheme

شکل 8 اثر توان لیزر بر میانگین جابجایی‌های در جهت Y لبه خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

همان‌طور که از شکل 8 نتیجه گرفته می‌شود، با افزایش توان لیزر میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر افزایش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش توان لیزر، انرژی حرارتی وارد شده به ورق افزایش یافته که منجر به افزایش کرنش‌های پلاستیک حرارتی و به دنبال آن نواحی تغییر

همان‌طور که در این شکل 6 دیده می‌شود تنش‌های فشاری در جهت‌های X و Z در نقطه B ایجاد می‌شوند که با عبور پرتوی لیزر از روی نقطه B و انقباض ناحیه حرارت دیده، تنش‌های فشاری به کششی تبدیل می‌شوند. در این حالت تنش‌های موجود در جهت X به دلیل قیده‌های هندسی ورق در این محل به سمت صفر میل می‌کنند در حالی که تنش‌های کششی در جهت Z افزایش می‌یابند. دلیل افزایش تنش کششی در جهت Z در این نقاط این است که همزمان با انقباض مواد در این نقطه، در نقطه بعدی مواد در اثر حرارت وارده به ورق دچار انبساط می‌شوند که با ممانعت مواد اطراف روبرو می‌شوند. از جمله موادی که مانع از انبساط نقطه بعدی می‌شوند مواد این نقطه هستند. بنابراین طبیعت مواد این نقطه به سمت کششی پیش می‌رود و تا انتهای فرآیند نیز در همین حالت باقی می‌ماند.

نکته ای که باید بدان توجه شود این است که تنش‌های کششی در جهت Z که مقدارشان نیز قابل ملاحظه می‌باشد دیگر توانایی خمش ورق حول محور X را ندارند. دلیل این موضوع قیده‌های هندسی ناشی از گیرش ورق در لبه آن و جلوگیری از خمش ورق حول محور X است. دلیل دیگر نیز سفتی ایجاد شده در ورق در اثر خمش حول محور Z از ابتدای تابش دهی است که مانع از چرخش ورق حول محور X می‌شود. با توجه به بررسی و تحلیل تنش‌ها در دو نقطه ابتدایی و وسط ورق بر روی خط تابش دهی، پیداست که ورق حول محور Z و به سمت پرتوی لیزر خمش پیدا می‌کند و البته به خاطر وجود تنش‌های کششی قابل ملاحظه در نقاط مختلف، ورق اندکی نیز حول محور X خمش خواهد داشت که در منابع از آن تحت عنوان اثر لبه<sup>1</sup> ای یاد می‌شود. نکته دیگری که می‌بایستی بدان توجه شود مقدار کمتر تنش فشاری ایجاد شده در جهت Z نسبت به جهت X است. دلیل این موضوع این است که همواره مقداری از حرارت پرتوی لیزر به دلیل هدایت حرارتی به سمت جلوی پرتو منتقل می‌شود. بنابراین دمای مواد جلوی پرتوی لیزر افزایش یافته و بدین ترتیب فشار کمتری بر موادی که در وسط پرتوی لیزر هستند اعمال می‌کنند. همین موضوع باعث می‌شود که مواد جلوی پرتوی لیزر توانایی جلوگیری از انقباض مواد قبلی خود در جهت Z را به اندازه کافی نداشته باشند و به همین دلیل است که در جهت X قبل از مرحله تنش فشاری اندکی تنش کششی وجود دارد حال آنکه در جهت Z چنین اتفاقی نمی‌افتد. در ادامه و در شکل 7 به بررسی جابجایی‌های در جهت Y نقاط واقع بر لبه خم شده ورق خمکاری شده با لیزر توسط مسیر

<sup>1</sup> Edge effect

از شکل 10 نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش قطر پرتوی لیزر میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر کاهش می‌یابد. دلیل این نتیجه نیز این است که با افزایش قطر پرتوی لیزر، شدت انرژی ورودی به ورق کاهش یافته که منجر به کاهش کرنش‌های پلاستیک حرارتی، نواحی تغییر شکل پلاستیک و نهایتاً خمش ورق می‌شود.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عددی فرآیند خمکاری ورق فولادی با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی پرداخته شد. به منظور انجام آنالیزهای المان محدود از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شد. با انجام شبیه سازی‌های عددی، مکانیک تغییر شکل و دلیل خمش ورق در فرآیند خمکاری با لیزر به صورت تحلیلی و جزئی بررسی شد. نتایج نشان دادند که با استفاده از الگوی تابش دهی منحنی ورق فولادی به طور مناسبی خم می‌شود. همچنین به بررسی اثر پارامترهای لیزر بر میزان خمش ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی پرداخته شد. نتایج نشان دادند که با افزایش توان لیزر، میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر به دلیل افزایش انرژی حرارتی وارد شده به ورق و به دنبال آن افزایش کرنش‌های پلاستیک حرارتی و نهایتاً نواحی تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت اسکن لیزر، میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر کاهش یافت. دلیل این است که با افزایش سرعت اسکن لیزر به دلیل عدم وجود زمان کافی، انرژی حرارتی وارد شده به ورق کاهش یافته که به دنبال آن نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته نیز کاهش می‌یابند. نتایج شبیه سازی عددی همچنین نشان دادند که با افزایش قطر پرتوی لیزر میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر به دلیل کاهش شدت انرژی ورودی به ورق و به دنبال آن نواحی تغییر شکل پلاستیک، کاهش می‌یابد.

#### 5- مراجع

- [1] K. Maji, D. Pratihari, A. Nath, Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet, *Optics & Laser Technology*, Vol. 49, pp. 18-27, 2013.
- [2] M. Safari, H. Mostaan, M. Farzin, Laser bending of tailor machined blanks: Effect of start point of scan path and irradiation direction relation to step of the blank, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, No. 2, pp. 1587-1594, 2016.
- [3] R. Kant, S.N. Joshi, Thermo-mechanical studies on

شکل پلاستیک یافته می‌شود. نتیجتاً با افزایش نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته، زاویه خمش ورق خمکاری شده با لیزر نیز افزایش می‌یابد.

در شکل 9 اثر سرعت اسکن لیزر بر میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود با افزایش سرعت اسکن لیزر، میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر کاهش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش سرعت اسکن لیزر به دلیل عدم وجود زمان کافی، انرژی حرارتی وارد شده به ورق کاهش یافته که به دنبال آن کرنش‌های پلاستیک حرارتی، نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته و نهایتاً خمش ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی کاهش می‌یابد. در شکل 10 اثر قطر پرتوی لیزر بر میانگین جابجایی‌های در جهت Y ورق خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی نشان داده شده است.

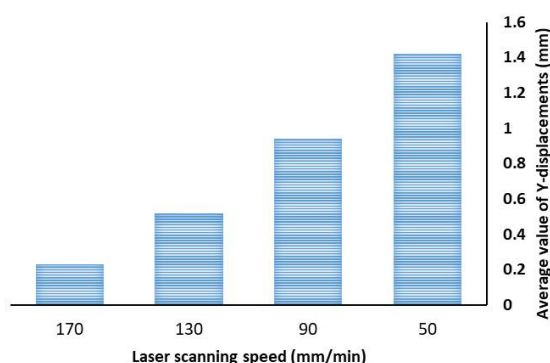


Fig. 9 Effect of laser scanning speed on the average value of Y-displacements of laser-bent edge with curved irradiating scheme

شکل 9 اثر سرعت اسکن لیزر بر میانگین جابجایی‌های در جهت Y لبه خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

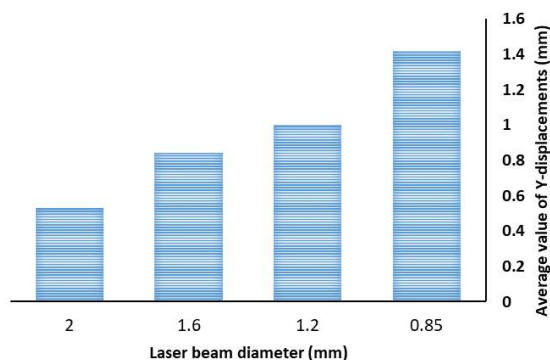


Fig. 10 Effect of laser beam diameter on the average value of Y-displacements of laser-bent edge with curved irradiating scheme

شکل 10 اثر قطر پرتوی لیزر بر میانگین جابجایی‌های در جهت Y لبه خمکاری شده با لیزر توسط الگوی تابش دهی منحنی

- [7] X. Wang, Y. Shi, Y. Guo, R. Sun, Laser bending and edge effect control of laminated metal composite plate, *Chinese Journal of Lasers*, Vol. 47, No. 3, pp. 0302004, 2020.
- [8] U. Nath, V. Yadav, R. Purohit, Finite element analysis of AM30 magnesium alloy sheet in the laser bending process, *Advances in Materials and Processing Technologies*, pp. 1-13, 2021.
- [9] Y. Zhang, W. Dong, T. Yang, C. Guo, F. Chen, Edge effect reduction in laser bending of DP980 high-strength steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 119, No. 3, pp. 1965-1973, 2022.
- [10] M. Safari, M. Farzin, H. Mostaan, A novel method for laser forming of two-step bending of a dome shaped part, *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-14, 2017.
- bending mechanism, bend angle and edge effect during multi-scan laser bending of magnesium M1A alloy sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 23, pp. 135-148, 2016.
- [4] M. Safari, J. Joudaki, Prediction of bending angle for laser forming of tailor machined blanks by neural network, *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 5, No. 1, pp. 47-57, 2018.
- [5] B. N. Fetene, V. Kumar, U. S. Dixit, R. Echempati, Numerical and experimental study on multi-pass laser bending of AH36 steel strips, *Optics & Laser Technology*, Vol. 99, pp. 291-300, 2018.
- [6] R. Kant, S.N. Joshi, *A Numerical Investigation into the Effect of Forced Convection Cooling on the Performance of Multi-scan Laser Bending Process*, in *Application of Lasers in Manufacturing*, pp. 21-43, Singapore, Springer, 2019.