



بررسی تجربی و عددی خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده با در نظر گرفتن مکانیزم های خم کاری مختلف

مهدي صفري^{1*}، محمود فرزین²

1- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

*اراک، صندوق پستی 38181-41167، m.safari@arakut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1399

داوری اولیه: 6 مهر 1399

پذیرش: 28 مهر 1399

کلیدواژه ها:

خم کاری به کمک لیزر

ورق های ترکیبی ماشین کاری شده

الگوی اسکن

پدیده خمش چند منحنی

زاویه خمش

در این پژوهش، خم کاری به کمک لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده به وسیله آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. باید توجه داشت که به دلیل وجود ضخامت های متفاوت در ورق های ترکیبی ماشین کاری شده، خم کاری به کمک لیزر این ورق ها در مقایسه با ورق های ساده ی یکپارچه پیچیده تر می باشد. همچنین پدیده خمش چند منحنی که غیر یکنواختی تغییر شکل ها در جهت عرضی می باشد به صورت محسوس تری در خم کاری به کمک لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده نسبت به ورق های یکپارچه دیده می شود. در این مقاله، یک روش جدید تابش دهی بر مبنای تغییر سرعت اسکن لیزر برای خم کاری به کمک لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده پیشنهاد شده است. ثابت می شود که با استفاده از روش تابش دهی پیشنهاد شده، اختلاف در زاویه خمش قسمت های نازک و ضخیم ورق های ترکیبی ماشین کاری شده و همچنین پدیده خمش چند منحنی به شدت کاهش یافته است. نتایج زوایای خمش و پدیده خمش چند منحنی با در نظر گرفتن مکانیزم های خمشی متفاوت در قسمت های نازک و ضخیم ورق ترکیبی ماشین کاری شده ثابت می کنند که روش تابش دهی پیشنهاد شده، روش مناسبی برای خم کاری به کمک لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده می باشد.

Experimental and numerical investigation of laser bending of tailor machined blanks with different bending mechanisms

Mehdi Safari^{1*}, Mahmoud Farzin²

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*P.O.B. 38181-41167 Arak, m.safari@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 September 2020

First Decision: 27 September 2020

Accepted: 19 October 2020

Keywords:

Laser bending

Tailor machined blank

Irradiating scheme

Multi-Curvature bending phenomenon

bending angle

Abstract

In this work, the laser bending of tailor machined blanks has been investigated with experimental tests and finite element simulations. It should be noted because of presence of different thicknesses in the tailor machined blanks, their laser bending process is more complicated than the monolithic sheets. In addition, multi-curvature bending phenomenon that is the non-uniformity of deformations in the transverse direction can appear more considerably in the laser bending process of tailor machined blanks than the monolithic sheets. In this paper, a new irradiating scheme has been proposed based on laser scanning speed variations for laser bending of tailor machined blanks. It is proved that with the proposed irradiating method, the differences in the bending angles of thin and thick sections of tailor machined blanks and also multi-curvature bending phenomenon has been extremely decreased. The results of bending angle and multi-curvature bending phenomenon with considering the different mechanisms in thin and thick sections of tailor machined blank demonstrate that the proposed irradiating scheme is an appropriate method for laser bending of tailor machined blanks.

1- مقدمه

پذیر می باشد که در آن نیازی به ابزار یا نیروهای خارجی نمی باشد. خم کاری با لیزر در بسیاری از فرایندهای ورق کاری از جمله خم کاری در صفحه و خارج از صفحه ورق، تصحیح اعوجاج های ناخواسته حاصل از سایر فرایندهای شکل دهی ورق های فلزی و تنظیم قطعات الکترونیکی در جایشان مورد

در سال های اخیر با توسعه استفاده از تکنولوژی لیزر، تحقیقات متنوعی در زمینه کاربرد لیزر در فرآوری مواد انجام شده است [1، 2]. فرایند خم کاری با لیزر¹، یک فرایند شکل دهی انعطاف

1. Laser bending

Please cite this article using:

M. Safari, M. Farzin, Experimental and numerical investigation of laser bending of tailor machined blanks with different bending mechanisms, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 11, pp. 52- 65, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بدون پیش بار توسعه یافته و با آنالیز تنش و کرنش در ناحیه حرارت‌دهی و با در نظر گرفتن فاکتورهای پیش بار ارائه گردید. نتایج تجربی نشان دادند که مدل ارائه شده قادر به پیش‌بینی زاویه خمش با شرایط پیش بار بوده و با دقت 97 درصد زوایای خمش را در خم کاری به کمک لیزر ورق پیش‌بینی می‌نماید [10]. صفری و همکاران شکل‌دهی به کمک لیزر قطعات پیچیده دو منحنی زین اسبی با استفاده از مسیر تابش‌دهی اسپیرال را مطالعه کردند. آنها با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها اثر پارامترهای مسیر اسپیرال مانند گام اسپیرال، تعداد پاس‌های تابش‌دهی و الگوی تابش‌دهی اسپیرال بر میزان تغییر شکل قطعه زین اسبی شکل‌دهی شده با لیزر را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در قطعه زین اسبی با کاهش گام اسپیرال، افزایش تعداد پاس‌های تابش‌دهی و الگوی تابش‌دهی خارج به داخل افزایش می‌یابد [11]. صفری به مطالعه تجربی خم کاری لوله به کمک پرتوی لیزر پرداخته و اثر پارامترهای طول تابش‌دهی و تعداد پاس‌های تابش‌دهی را بر مقدار خمش اصلی، خمش جانبی، بیضوی شدن و تغییرات ضخامت لوله خم شده بررسی نمود. نتایج او نشان داد که با افزایش طول تابش‌دهی پرتوی لیزر، زاویه خمش اصلی، بیضوی شدن و تغییرات ضخامت لوله افزایش یافته و زاویه خمش جانبی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد پاس‌های تابش‌دهی زوایای خمش اصلی و جانبی، بیضوی شدن و تغییرات ضخامت لوله افزایش می‌یابد [12]. کتبی و همکاران به صورت عددی اثر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت اسکن، تعداد پاس‌های تابش‌دهی و ضخامت ورق را بر زاویه خمش و ماکزیمم تنش‌های باقی‌مانده کششی در فرآیند خم کاری به کمک لیزر ورق‌های دو لایه فولاد-تیتانیوم مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که زاویه خمش ورق دولایه خم کاری شده با لیزر با افزایش توان لیزر و تعداد پاس تابش‌دهی و همچنین کاهش سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق افزایش می‌یابد. همچنین ماکزیمم تنش پسماند کششی با افزایش توان لیزر و تعداد پاس تابش‌دهی و همچنین کاهش سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق افزایش می‌یابد [13]. عبدالحسنی و همکاران با استفاده از الگوی تابش‌دهی خطوط موازی کنار هم به بررسی شکل‌دهی به کمک لیزر قطعات دو منحنی گنبدی شکل پرداختند. آنها تأثیر همپوشانی بین مسیرهای مجاور که می‌تواند با تغییر فاصله مسیرها و قطر پرتو کنترل شود را بر میزان تغییر شکل قطعه تولید شده مطالعه نمودند. نتایج آنها

استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند خم کاری با لیزر، ورق تحت تابش یک پرتوی لیزر غیر متمرکز¹ قرار می‌گیرد. بدین وسیله دمای سطح ناحیه تحت تابش‌دهی سریعاً افزایش یافته و با حرکت پرتوی لیزر به نواحی مجاور، این ناحیه سریعاً سرد می‌شود. در مرحله تابش‌دهی و در صورتی که کرنش‌های حرارتی ایجاد شده در ناحیه حرارت دیده از حد الاستیک تجاوز کنند تبدیل به کرنش‌های پلاستیک فشاری می‌شوند. در مرحله سرد شدن، ناحیه حرارت دیده دچار انقباض شده و بدین ترتیب می‌توان یک ورق فلزی را بدون ابزار و تنها به کمک تنش‌های حرارتی شکل‌دهی کرد.

نامبا در سال 1986 برای اولین بار از پرتوی لیزر به عنوان ابزاری برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی استفاده کرد [3]. پس از نامبا، بسیاری از محققان از پرتوی لیزر به عنوان ابزاری برای شکل‌دهی استفاده کردند و تحقیقات بسیاری را در این زمینه انجام دادند. در سال 1993 گایگر و ولرتسن فرایند خم کاری با لیزر را بر اساس پارامترهای هندسی ورق و پرتوی لیزر به سه مکانیزم اصلی گرادیان دمایی²، کمانشی³ و کوتاه شدگی⁴ تقسیم کردند [4]. در سال 1993 ولرتسن و همکارانش فرایند خم کاری با لیزر را با استفاده از روش اختلاف محدود⁵ و روش المان محدود¹ مدلسازی کردند [5]. آنها همچنین معادلات سودمندی را برای مکانیزم‌های مختلف خم کاری با لیزر استخراج کردند [6، 7]. در سالهای اخیر تحقیقات فراوانی بر روی فرآیند شکل‌دهی به کمک لیزر انجام شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. بهرا و همکاران به بررسی خم کاری ورق‌های آلومینیومی به کمک لیزر پرداخته و با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت اسکن و قطر پرتو را جهت دستیابی به حداکثر مقدار زاویه خمش بهینه نمودند [8]. خنده دل و همکاران با استفاده از الگوهای تابش‌دهی دایروی مختلف به خم کاری دو بعدی و سه بعدی لوله‌های از جنس فولاد زنگ نزن 304 به کمک پرتوی لیزر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که الگوی دایروی به خوبی قادر به خم کاری دوبعدی و سه بعدی لوله‌ها به کمک پرتوی لیزر می‌باشد [9]. گو و همکاران یک مدل تحلیلی برای خم کاری ورق به کمک لیزر در شرایط اعمال پیش بار ارائه نمودند. مدل ارائه شده بر مبنای مدل زاویه کمانش حرارتی

¹ Defocused laser beam

² Temperature gradient mechanism (TGM)

³ Buckling mechanism (BM)

⁴ Upsetting mechanism (UM)

⁵ Finite difference method (FDM)

⁶ Finite element method (FEM)

نشان داد که افزایش میزان همپوشانی مسیرهای مجاور باعث کاهش میزان تغییر شکلهای قطعه دو منحنی می‌شود [14]. لی و همکاران به مطالعه خم کاری به کمک لیزر لوله‌ها پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو و زمان تابش‌دهی را بر زاویه خمش لوله‌های خم کاری شده به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که زاویه خمش لوله با افزایش توان لیزر و قطر پرتو و کاهش سرعت اسکن افزایش می‌یابد [15]. فائوزی و همکاران اثر پروفیل پرتوی لیزر بر اثرات لبه‌ای در خم کاری به کمک لیزر فولاد زنگ نزن 304 را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور، آنها یک مدل تحلیلی برای مطالعه اثرات لبه‌ای ارائه کردند. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی به بررسی اثر پروفیل مثلثی پراوی لیزر بر زاویه خمش ورق خم کاری شده با لیزر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پروفیل پرتوی لیزر مثلثی منجر به ایجاد زوایای خمش بیشتر در ورق به همراه کاهش اثرات لبه‌ای می‌شود [16]. ژنگ و همکاران به مطالعه تجربی و عددی اثرات لبه‌ای فولاد دوفازی 980 در فرآیند خم کاری به کمک لیزر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که اثر لبه‌ای در ورق خم کاری شده به کمک لیزر با افزایش تعداد پاس‌های تابش‌دهی کاهش می‌یابد [17]. دوتا و همکاران به صورت تجربی و عددی، خم کاری لیزر فولاد AH36 به کمک نیروی خارجی الکترومغناطیسی را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نیروی الکترومغناطیسی در فرآیند خم کاری به کمک لیزر کمک شایانی به کاهش اثرات لبه‌ای دارد. همچنین آنها نتیجه گرفتند که سختی ناحیه تابش‌دهی شده با لیزر در هنگام استفاده از نیروی الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد [18]. فو و همکاران به مطالعه اثر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، قطر پرتوی لیزر و سرعت اسکن در خم کاری به کمک لیزر ورق‌های تقویت شده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات قطر پرتوی لیزر بیشترین تأثیر را در ماکزیمم دمای ایجاد شده در ورق تقویت شده دارد. آنها نتیجه گرفتند که با کاهش قطر پرتوی لیزر تغییرات ماکزیمم دما، کرنش پلاستیک و به دنبال آن تغییر شکل در موقعیت میانی مسیر اسکن لیزر بیشترین مقدار ممکن می‌باشد. افزایش تغییر شکل موقعیت میانی مسیر اسکن می‌تواند باعث کاهش میزان غیر یکنواختی در تغییر شکل لبه آزاد ورق تقویت شده شود [19]. جیساریو و همکاران شکل‌دهی به کمک لیزر کامپوزیت‌های الیاف-فلز را بررسی کردند. آنها اظهار کردند که شکل‌دهی به

کمک لیزر کامپوزیت‌های الیاف-فلز به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی و ترمومکانیکی لایه‌های مختلف پیچیده می‌باشد. لذا آنها به بررسی اثر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد پاس‌های تابش‌دهی بر تغییر شکل‌های کامپوزیت پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تابش‌دهی به کمک پرتوی لیزر ابزار مناسبی برای شکل‌دهی کامپوزیت‌های الیاف-فلز می‌باشد [20]. ورق‌های ترکیبی به مجموعه‌ای (ترکیبی) از ورق‌های فلزی با ضخامت و (یا) جنس و (یا) پوشش سطحی متفاوت اطلاق می‌شود. این ورق‌ها می‌توانند توسط فرایندهای جوشکاری، چسباندن¹ و یا ماشین کاری تولید شوند. یک ورق یکپارچه² می‌تواند توسط فرآیند ماشین کاری دارای قسمت‌های مختلفی با ضخامت‌های متفاوت بشود. ورق ترکیبی که با استفاده از فرآیند ماشین کاری تولید شود معروف به ورق ترکیبی ماشین کاری شده می‌باشد. با استفاده از ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده، توزیع ماده در داخل قطعات سازه‌ای مورد استفاده در صنایع هوایی و اتومبیل سازی بهبود می‌یابد و بنابراین تجهیزات ارزانتر، با مصرف سوخت کمتر و سبکتر قابل دستیابی خواهند بود. هر دو تکنولوژی خم کاری با لیزر و ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده در سالهای اخیر مطرح شده‌اند و با وجود مزایای ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده، وجود ضخامت‌های متفاوت در این ورق‌ها باعث ایجاد رفتارهای متفاوت شکل‌دهی از جمله زوایای خمش و انحناهای متفاوت در بخش‌های مختلف این ورق‌ها می‌شود. بنابراین به خاطر وجود ضخامت‌های مختلف در یک ورق ترکیبی ماشین کاری شده، خم کاری با لیزر این ورق‌ها از ورق‌های یکپارچه پیچیده‌تر می‌باشد. همچنین وجود ضخامت‌های مختلف در ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده باعث ایجاد اثرات لبه‌ای شدیدتری در این ورق‌ها نسبت به ورق‌های یکپارچه می‌شود.

در این مقاله، یک روش تابش‌دهی برای خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده پیشنهاد شده است. به منظور بررسی و تایید کارایی روش تابش‌دهی پیشنهاد شده، مطالعات مختلفی با تغییر پارامترهای لیزر و در سه حالت مختلف انجام می‌شوند. در حالت اول، در قسمت نازک ورق مکانیزم کمانشی و در قسمت ضخیم مکانیزم گرادیان دمایی حاکم هستند. در این حالت، مطالعات در دو حیطه تجربی و عددی انجام شده و صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده با

¹ Bonding
² Monolithic

مشخص شده و توسط زیربرنامه دی فلاکس⁵ به نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود.

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

در رابطه (1)، η ضریب جذب⁶ لیزر، P توان پرتوی لیزر، شعاع پرتوی لیزر تابش شده به سطح ورق فلزی و x و z فاصله یک نقطه از مرکز پرتوی لیزر می‌باشد. ماده مورد استفاده در این مقاله Mild Steel می‌باشد که ضریب جذب آن برگرفته از مرجع [21] و برابر با 0/65 می‌باشد. انتقال حرارت مدل شده در این مقاله به وسیله همرفتی⁷ و تشعشع⁸ طبیعی بیان شده است. همرفتی از قانون نیوتن تبعیت کرده و بر اساس آن نرخ اتلاف حرارت در واحد سطح (Wm^{-2}) طبق رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$q_c = h_c (T_s - T_a) \quad (2)$$

در فرمول فوق h_c ضریب انتقال حرارت همرفتی، T_s دمای سطح تحت تابش و T_a دمای محیط می‌باشد. نرخ اتلاف حرارت در واحد سطح (Wm^{-2}) ناشی از تشعشع از رابطه (3) بدست می‌آید:

$$q_r = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon (T_s^4 - T_a^4) \quad (3)$$

در فرمول فوق ε ضریب تشعشع از سطح می‌باشد که مقدار آن وابسته به شرایط سطحی و دمای ورق می‌باشد. در این مقاله یک مقدار ثابت $\varepsilon = 0.5$ برای برآورد اتلاف حرارت ناشی از تشعشع در نظر گرفته شده است [22]. در حل حرارتی به منظور شبیه‌سازی پرتوی لیزر، از زیربرنامه دی فلاکس استفاده شده و شار حرارتی که در معادله (1) نشان داده شد برای شبیه‌سازی پرتوی لیزر در آن اعمال می‌شود. در آنالیز مکانیکی نیز شرایط مرزی مورد نیاز جهت جلوگیری از حرکت جسم صلب در نظر گرفته می‌شوند. ابعاد ورق ترکیبی مورد استفاده در این مقاله در شکل 1-الف نشان داده شده‌اند. اطلاعات مربوط به مسیر تابش‌دهی لیزر و نقاط شروع و پایان آن در این شکل نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل 1-ب و 1-ج محل تغییر ناگهانی ضخامت بین قسمت‌های نازک و ضخیم نشان داده شده است. در آنالیز مکانیکی المان آجری سه بعدی C3D20 استفاده شده است. همچنین در آنالیز حرارتی از المان DC3D20 استفاده می‌شود. خواص فولاد Mild steel از جمله قابلیت هدایت حرارتی، گرمای ویژه،

مقایسه نتایج عددی و تجربی مورد تایید قرار می‌گیرد. با تایید شبیه‌سازی‌های انجام شده، دو حالت بعد فقط در حیطه شبیه‌سازی عددی مطالعه می‌شوند. در حالت دوم، در هر دو قسمت ورق ترکیبی مکانیزم کمانشی حاکم است و در حالت سوم، در هر دو قسمت ورق ترکیبی مکانیزم گرادیان دمایی حاکم می‌باشد. نتایج حاصل از هر سه حالت مورد مطالعه نشان می‌دهند که با استفاده از روش تابش‌دهی پیشنهاد شده، اختلاف در زوایای خمش بخش‌های مختلف ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده و همچنین پدیده خمش چند منحنی به شدت کاهش می‌یابند. با مقایسه نتایج مختلف مربوط به زوایای خمش در این مقاله، نشان داده می‌شود که الگوی تابش‌دهی پیشنهاد شده می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای فرایند خم کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده مورد استفاده قرار بگیرد. مهمترین نوآوری این مقاله شکل‌دهی به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده بر مبنای آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی و ارائه یک روش تابش‌دهی مناسب برای ماکزیمم نمودن زاویه خمش و مینیمم نمودن اثرات لبه-ای در ورق ترکیبی خم کاری شده با لیزر می‌باشد. در این زمینه، مطالعه جامعی بر روی حالت‌های مختلفی از ترکیب مکانیزم‌های متفاوت در دو بخش نازک و ضخیم ورق ترکیبی انجام شده و نتایج زاویه خمش و اثرات لبه‌ای در این حالت‌ها مقایسه گردیده‌اند.

2- کار عددی

به منظور انجام کار عددی و انجام آنالیزهای حرارتی¹ و مکانیکی² فرایند خم کاری با لیزر، از روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. در انجام شبیه‌سازی‌ها، با توجه به اینکه گرمای ایجاد شده ناشی از کار پلاستیک در مقایسه با انرژی حرارتی بالای لیزر قابل چشم‌پوشی است حل‌های حرارتی و مکانیکی می‌توانند به صورت غیر کوپل حل شوند. در شبیه‌سازی غیر کوپل فرایند خم کاری با لیزر، ابتدا میدان حرارتی³ موجود در ورق توسط آنالیز حرارتی بدست می‌آید. سپس نتایج حاصل از آنالیز حرارتی به عنوان یک بار اولیه در آنالیز مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. توزیع شار حرارتی لیزر بصورت توزیع گوسی⁴ بوده و با رابطه (1)

⁵. DFLUX
⁶. Absorptivity
⁷. Convection
⁸. Radiation

¹. Thermal analysis
². Mechanical analysis
³. Temperature field
⁴. Gaussian distribution

افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها، در نواحی تحت تابش‌دهی لیزر از شبکه بندی ریزتر استفاده می‌شود و به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها در نواحی دور از پرتوی لیزر از شبکه بندی درشت استفاده می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله انجام می‌شوند. در مرحله اول، ورق توسط پرتوی لیزر تابش‌دهی می‌شود و در مرحله دوم ورق در دمای محیط سرد می‌شود. همچنین ضرایب همرفتی مشابهی در مراحل حرارت دهی و سرد شدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر فرض می‌شود که هیچگونه جت هوا یا آب در مرحله سرد شدن ورق فلزی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. در شبیه‌سازی‌های عددی جهت تطابق کار عددی با کار تجربی، توان لیزر و قطر پرتو به ترتیب 1000 وات و 6 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند. در شکل 3، نمونه‌ای از شبیه‌سازی‌های انجام شده شامل آنالیزهای حرارتی و مکانیکی برای شکل‌دهی به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی جوشکاری شده نشان داده شده است.

2-1- روش تابش‌دهی برای خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده

در این قسمت از روش‌های تابش‌دهی مورد بررسی در تحقیقات قبلی [23] نویسندگان مقاله کنونی استفاده می‌شود. همان‌طور که در مرجع [23] به طور کامل توسط نویسندگان همین مقاله بحث و بررسی‌های لازم انجام شده است در شکل‌دهی به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده، هدف، یافتن یک روش تابش‌دهی برای خم کاری با لیزر این ورق‌ها می‌باشد به طوری که اعوجاج‌ها و نایکنواختی‌های ورق ترکیبی ماشین کاری شده در خم کاری با لیزر حداقل باشد.

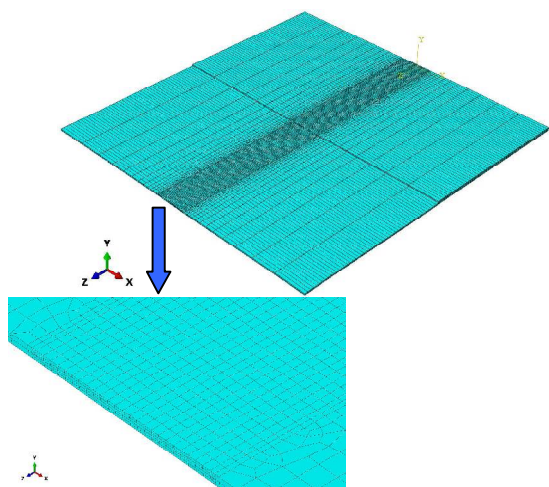


Fig. 2 Mesh pattern of tailor machined blank in the FEM simulations
شکل 2 الگوی شبکه‌بندی ورق ترکیبی ماشین کاری شده در شبیه‌سازی‌های عددی

مدول یانگ، ضریب انبساط و تنش‌های تسلیم همگی برگرفته از مرجع [21] و وابسته به دما می‌باشند. همچنین از شبکه بندی یکسان و مشابه برای آنالیزهای حرارتی و مکانیکی استفاده می‌شود.

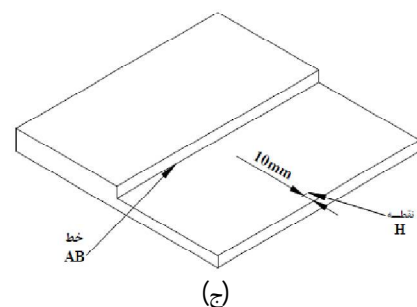
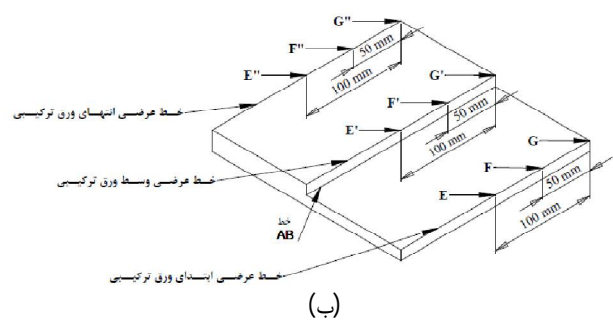
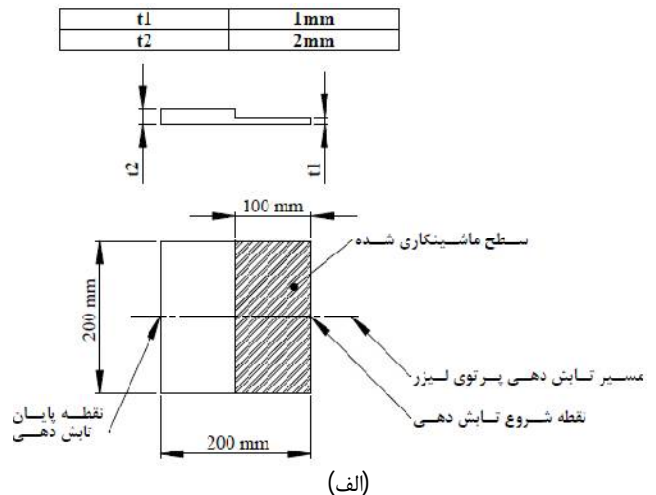


Fig. 1 Geometry of the blank and irradiating path. a- Dimensions of tailor machined blank and its irradiating path Position of line of abrupt thickness change (AB), b- Position of transverse lines and position of three sample points used for multi-curvature investigations, c- Position of line of abrupt thickness change (AB) and sample point H

شکل 1 هندسه بلانک و مسیر تابش‌دهی، الف- ابعاد ورق ترکیبی ماشین کاری شده، مسیر تابش‌دهی آن و موقعیت خط تغییر ضخامت ناگهانی (AB)، ب- موقعیت خطوط عرضی و نقاط نمونه بر روی آنها و مورد استفاده در بررسی‌های پدیده خمش چند منحنی، ج- محل تغییر ضخامت (AB) و نقطه نمونه H

همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است به منظور

شده بود که در قسمت ضخیم ورق ترکیبی مکانیزم تغییر شکل گرادیان دمایی حاکم بوده و در قسمت نازک مکانیزم کمانشی ظهور پیدا می کرد. در این مقاله هدف، بررسی اثربخشی و کارایی روش تابش دهی سرعت بهبود یافته در حالت های دیگر از مکانیزم های تغییر شکل با در نظر گرفتن پارامترهای لیزر در فرآیند شکل دهی با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده می باشد.

3- کار تجربی

به منظور تأیید نتایج عددی، برخی آزمایشات تجربی نیز در زمینه خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی انجام می شود. نمونه های مورد بررسی در کار تجربی از فولاد Mild steel با طول 200 میلی متر، عرض 200 میلی متر و ضخامت 2 میلی متر تهیه می شوند. به منظور آماده سازی ورق های ترکیبی ماشین کاری شده، ضخامت نیمی از ورق با استفاده از فرایند ماشین کاری کاهش یافته و برابر با 1 میلی متر می شود. توجه به این نکته ضروری است که فرایند ماشین کاری باعث ایجاد تنش های پسماند در ورق ترکیبی بخصوص در قسمت ماشین کاری شده (قسمت نازک) می شود و بنابراین نمونه های ماشین کاری شده باید قبل از فرایند خم کاری با لیزر، تنش گیری شوند. بدین منظور فرایند تنش گیری حرارتی مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین با توجه به مرجع [24]، نمونه های ماشین کاری شده در کوره ای با دمای 500 درجه سانتی گراد و به مدت یک ساعت نگه داشته می شوند. پس از خروج از کوره، به نمونه ها اجازه داده می شود که در هوای آرام سرد شوند. آزمایش های خم کاری با لیزر با استفاده از یک دستگاه لیزر گازی پیوسته دی اکسید کربن 2000 وات انجام می شوند. در این آزمایشات از پرتوی لیزر با توان 1000 وات و قطر 6 میلی متر استفاده می شود. نمونه ها با استفاده از یک سیستم قفل هیدرولیکی و از یک لبه مهار می شوند. در شکل 4، تجهیزات مورد استفاده در فرایند خم کاری با لیزر و همچنین نمونه ای از قطعات فرم دهی شده نشان داده است. پارامترهای لیزر در کار تجربی متناسب با حالت اول مورد مطالعه در این مقاله (مکانیزم کمانشی در قسمت نازک و مکانیزم گرادیان دمایی در قسمت ضخیم) تنظیم می شوند. زاویه خمش ورق های ترکیبی خم کاری شده با لیزر به کمک یک ماشین اندازه گیری مختصاتی⁴ در 11 نقطه در امتداد

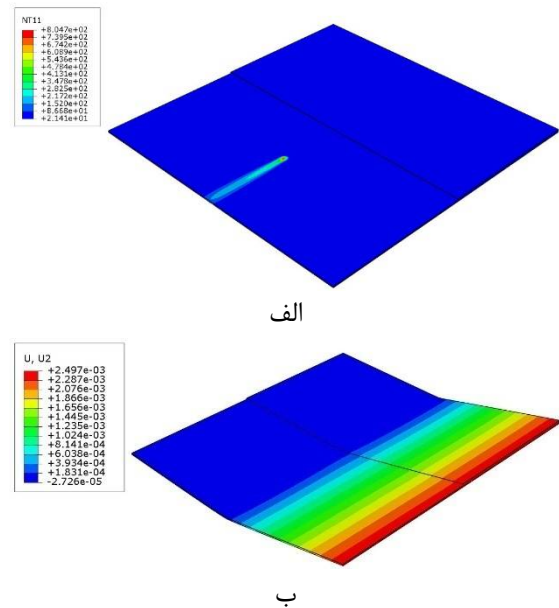


Fig. 3 Numerical simulation of laser forming of a tailor machined blank; a-Thermal analysis, b- Mechanical analysis

شکل 3 شبیه سازی عددی خم کاری به کمک لیزر یک ورق ترکیبی ماشین کاری شده، الف- آنالیز حرارتی، ب- آنالیز مکانیکی

همان طور که قبلاً اشاره شد در فرایند خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده به واسطه وجود ضخامت های متفاوت در دو قسمت ورق ترکیبی، زوایای خمش و انحنای بخش های مختلف ورق متفاوت هستند. این پدیده می تواند به خاطر اختلاف در انرژی ورودی در واحد حجم قسمت های مختلف ورق ترکیبی باشد. در ورق های ترکیبی که تحت تابش پرتوی لیزر با انرژی ثابت قرار می گیرند، بخش های ضخیم تر انرژی کمتری در واحد حجم نسبت به بخش های نازک تر دریافت می کنند. بنابراین می بایستی روش تابش دهی مناسبی ارائه شده و انرژی ورودی پرتوی لیزر در سراسر ورق ترکیبی متعادل شود. در این مقاله و همچنین مرجع [23] مطالعات بر روی خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی با نسبت ضخامت 2 انجام می شوند. بنابراین در مرجع [23] سه روش تابش دهی به نام های روش سرعت ثابت¹، روش سرعت نصف شده² و روش سرعت بهبود یافته³ معرفی شده و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج بررسی های مختلف نشان داد که روش تابش دهی سرعت بهبود یافته بهترین انتخاب برای خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده می باشد. ذکر این نکته ضروری است که در مرجع [23]، شرایط پارامترهای لیزر به گونه ای در نظر گرفته

¹ Equal Speed Method (ESM)

² Half Speed Method (HSM)

³ Improved Speed Method (ISM)

⁴ Coordinate Measuring Machine (CMM)

شبیه سازی ها بدون ایجاد بهبود در دقت نتایج می شود. اندازه شبکه بر روی مسیر تابش دهی می بایستی ریزتر از اندازه شبکه در نواحی دورتر از مسیر تابش دهی بر روی ورق باشد. یک شبکه بندی مناسب در شکل 2 نشان داده شده است. به منظور تعیین اندازه شبکه بهینه، یک نقطه نمونه بر روی ورق همان طور که در شکل 1- ج نشان داده شده است در نظر گرفته می شود.

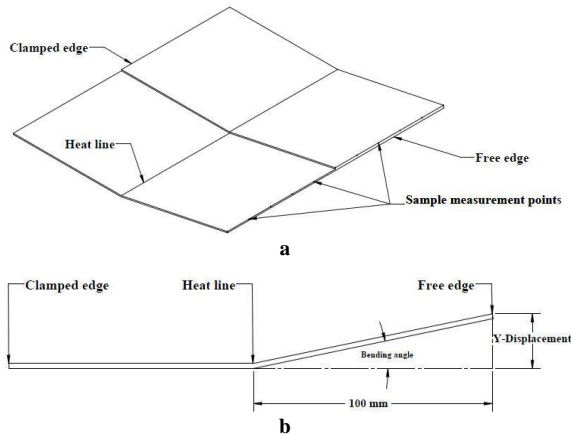


Fig. 5 Schematic shape of laser formed tailor machined blank, a- Clamped edge, free edge, heat line and sample measurement points, b- Calculation of bending angle from displacement

شکل 5 شکل شماتیک ورق ترکیبی خم کاری شده با لیزر، الف- لیه قفل شده، لبه آزاد، مسیر حرارت دهی و نقاط اندازه گیری نمونه، ب- محاسبه زاویه خمش از جابجایی

نقطه نمونه (نقطه H) بر روی مسیر تابش دهی در مقطع نازک و در فاصله 10 میلی متری از لبه ورق در نظر گرفته می شود. در این شرایط دمای این نقطه در پایان مرحله حرارت دهی و به ازای اندازه شبکه های مختلف (تعداد المان های مختلف) اندازه گیری شده و در شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که از شکل 6 دیده می شود تعداد المان بهینه برای انجام شبیه سازی ها برابر با 14000 المان می باشد. به منظور استفاده از روش ISM، یک بررسی موردی در این مقاله انجام می شود. در این بررسی، هدف یافتن زاویه خمش 1/5 درجه در دو قسمت نازک و ضخیم ورق ترکیبی با نسبت ضخامت 2 می باشد. مسلماً در حین فرایند خم کاری با لیزر، دمای سطح ورق ترکیبی نباید به نقطه ذوب برسد و سرعت های تابش دهی نیز متناسب با این محدودیت بدست می آیند. بر اساس مرجع [16] برای دستیابی به زاویه 1/5 درجه در دو قسمت ورق ترکیبی، سرعت تابش دهی در قسمت نازک 0/1 متر بر ثانیه برآورد می شود. سرعت تابش دهی در قسمت ضخیم متناسب با روش تابش دهی انتخاب می شود.

مسیر تابش دهی و بر روی لبه آزاد ورق ترکیبی اندازه گیری می شوند. در شکل 5- الف شماتیک یک ورق ترکیبی شکل دهی شده به همراه لبه قفل شده، لبه آزاد، خط تابش دهی و برخی نقاط نمونه که اندازه گیری در آنها انجام می شود نشان داده شده اند. همچنین در شکل 5- ب شماتیکی از زاویه خمش متناسب با جابجایی عمودی نقاط نمونه اندازه گیری نشان داده شده است. به منظور محاسبه زاویه خمش، از رابطه (4) استفاده می گردد.

$$Bending\ angle = \tan^{-1} \left(\frac{Y - Displacement(mm)}{100} \right) \quad (4)$$



Fig. 4 Experimental setup for laser bending and a sample of formed specimens

شکل 4 تجهیزات مورد استفاده در فرایند خم کاری با لیزر و نمونه ای از قطعات فرم دهی شده

4- نتایج و بحث

در شبیه سازی های فرآیند خم کاری با لیزر، اندازه شبکه مورد استفاده برای ورق ترکیبی بسیار مهم می باشد. استفاده از المان های درشت منجر به کاهش دقت شبیه سازی ها شده و استفاده از المان های خیلی ریز نیز منجر به افزایش زمان

روش تابش دهی از ESM به ISM در حدود % 292 و از روش HSM به ISM در حدود % 67 افزایش یافته است. به علاوه، یکنواختی انحنا با تغییر روش تابش دهی از ESM و HSM به ISM، هم در نتایج تجربی و هم در نتایج عددی افزایش یافته است. بنابراین با توجه به نتایج شکل 7 و جداول 1 و 2 مشاهده می شود که روش تابش دهی ISM بهترین روش تابش دهی در فرایند خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده می باشد.

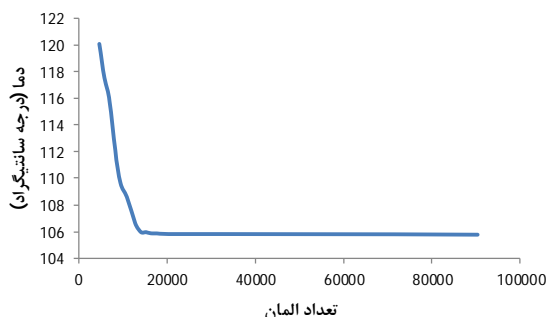


Fig. 6 Temperature of the sample point H (Fig. 1b), versus number of elements at the end of heating step.

شکل 6 دمای نقطه نمونه H (شکل 1) در مقابل تعداد المان ها در انتهای مرحله تابش دهی

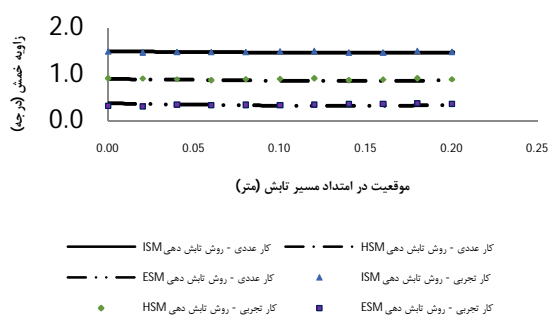


Fig. 7 Experimental and numerical results of bending angle along the irradiating path

شکل 7 نتایج تجربی و عددی زاویه خم در امتداد مسیر تابش

جدول 1 مقادیر ماکزیمم و می نیمم زاویه خم و یکنواختی انحنا در کار تجربی

Table 1 Maximum and minimum values of bending angle and curvature uniformity in experimental work

روش تابش دهی	ماکزیمم زاویه خم (درجه)	می نیمم زاویه خم (درجه)	یکنواختی انحنا (درصد)
ESM	0/37	0/30	18/92
HSM	0/92	0/87	5/43
ISM	1/50	1/46	2/67

یکنواختی انحنا = [(ماکزیمم زاویه خم - می نیمم زاویه خم) / ماکزیمم زاویه خم] * 100%

جدول 2 مقادیر ماکزیمم و می نیمم زاویه خم و یکنواختی انحنا در کار عددی

Table 2 Maximum and minimum values of bending angle and curvature uniformity in numerical work

روش تابش دهی	ماکزیمم زاویه خم (درجه)	می نیمم زاویه خم (درجه)	یکنواختی انحنا (درصد)
ESM	0/38	0/32	15/79
HSM	0/89	0/86	3/37
ISM	1/49	1/47	1/34

در فرایند خم کاری ورق های یکپارچه، انحنا ی غیر یکنواختی در جهت عرضی اتفاق می افتد که سبب ایجاد پدیده ای به نام خم چند منحنی می شود. انتخاب یک روش

در شکل 7 نتایج تجربی و عددی زاویه خم ورق ترکیبی در امتداد مسیر تابش دهی برای روش های مختلف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته و نشان می دهد که دقت قابل قبولی در انجام شبیه سازی های عددی وجود داشته است. در روش تابش دهی ESM در هر دو قسمت ورق ترکیبی از سرعت حرکت پرتوی لیزر 0/1 متر بر ثانیه استفاده می شود. همچنین در روش HSM از سرعت 0/1 متر بر ثانیه برای قسمت نازک و 0/05 متر بر ثانیه برای قسمت ضخیم استفاده می شود. برای روش تابش دهی ISM بر اساس مرجع [16] سرعت 0/0981 متر بر ثانیه برای قسمت نازک و سرعت 0/033 متر بر ثانیه برای قسمت ضخیم جهت دستیابی به زاویه خم 1/5 درجه استفاده می شود. همان طور که از شکل 7 دیده می شود با تغییر روش تابش دهی از روش ESM به روش HSM و به دنبال آن روش ISM، زاویه خم به طور قابل ملاحظه ای هم در نتایج تجربی و هم در نتایج عددی افزایش می یابد. اختلاف بین ماکزیمم و می نیمم زاویه خم بدست آمده برای هر روش تابش دهی می تواند به عنوان معیاری برای یکنواختی انحنا در ورق ترکیبی ماشین کاری شده در نظر گرفته شود. در جداول 1 و 2، ماکزیمم و می نیمم مقدار زوایای خم و همچنین یکنواختی انحنا، برای هر روش تابش دهی بصورت تجربی و عددی آورده شده است.

از جدول 1 می توان نتیجه گرفت که در نتایج تجربی، ماکزیمم زاویه خم با تغییر روش تابش دهی از ESM به ISM در حدود % 305 و از روش HSM به ISM در حدود % 63 افزایش یافته است. همچنین از جدول 2 مشاهده می شود که در نتایج عددی، ماکزیمم زاویه خم با تغییر

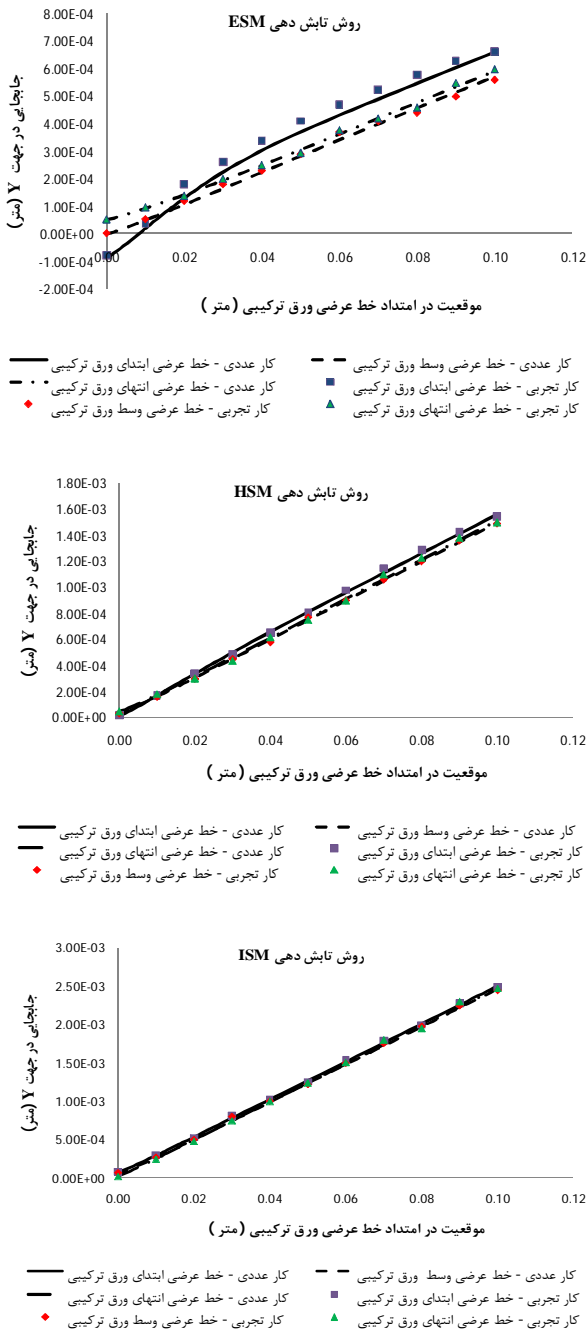


Fig. 8 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines in the transverse direction for ESM, HSM and ISM irradiating paths

شکل 8 جابجایی در جهت Y در امتداد خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی برای روش های تابش دهی ESM، HSM و ISM

در جداول 3 و 4 مقایسه ای بین جابجایی های در جهت Y در سه نقطه مشابه شامل نقاط "E-E'-E"، "F-F'-F" و "G-G'-G" انجام شده است. دلیل اختلاف در جابجایی های در جهت Y این نقاط این است که به خاطر وجود ضخامت های متفاوت در دو قسمت ورق ترکیبی ماشین کاری شده و همچنین با توجه به پارامترهای لیزر، دو مکانیزم مختلف در خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده وجود دارند. در قسمت

تابش دهی مناسب می تواند این پدیده نامطلوب را کاهش دهد. در فرایند خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده به دلیل وجود ضخامت های مختلف، پدیده خمش چند منحنی در این ورق ها می تواند بصورت شدیدتری نسبت به ورق های یکپارچه اتفاق بیفتد. کاهش پدیده خمش چند منحنی در خطوط عرضی مختلف ورق می تواند به عنوان معیاری برای خمش یکنواخت مطرح شود. در این تحقیق، خمش چند منحنی در خطوط عرضی ابتدایی (لبه قسمت نازک ورق ترکیبی)، میانی (خط عرضی واقع در محل جدایش قسمتهای نازک و ضخیم و بر روی قسمت ضخیم) و انتهایی (لبه قسمت ضخیم ورق ترکیبی) که در شکل 1- ب نشان داده شده اند مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی های خمش چند منحنی هم بصورت تجربی و هم بصورت عددی و متناسب با روش های مختلف تابش دهی می باشند.

در کار تجربی، جابجایی های در جهت Y با استفاده از یک ماشین اندازه گیری مختصاتی و در 11 نقطه در راستای خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق از مرکز ورق تا لبه آزاد آن (از نقطه E تا G بر روی خط عرضی ابتدایی و همچنین از نقاط E' تا G' بر روی خط عرضی میانی و نقاط E'' تا G'' بر روی خط عرض انتهایی (شکل 1- ب)) اندازه گیری می شوند. در کار عددی نیز روند اندازه گیری جابجایی های در جهت Y همانند روش تجربی می باشد. همان طور که از شکل 8 دیده می شود، هنگام استفاده از روش تابش دهی ESM، اختلاف زیادی بین جابجایی های در جهت Y در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق وجود دارد.

از این رو می توان نتیجه گرفت که در هنگام استفاده از این روش تابش دهی، پدیده خمش چند منحنی به اندازه زیادی اتفاق می افتد. از شکل 8 مشاهده می شود که با استفاده از روش تابش دهی HSM پدیده خمش چند منحنی نسبت به روش ESM به مقداری زیادی کاهش می یابد ولی کماکان اختلاف زیادی بین جابجایی های در جهت Y ورق ترکیبی در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتها وجود دارد. همچنین مشاهده می شود که با استفاده از روش تابش دهی ISM، پدیده خمش چند منحنی به صورت قابل توجهی نسبت به روش های ESM و HSM کاهش می یابد. در ورق ترکیبی خم کاری شده با روش تابش دهی ISM اختلاف بین جابجایی های در جهت Y در خطوط مختلف عرضی شدیداً کاهش یافته است به طوری که به نظر می رسد که همه خطوط عرضی ورق تقریباً به یک اندازه جابجا شده اند.

شده‌ی ISM در حالت دوم (مکانیزم کمانشی در هر دو قسمت ورق ترکیبی) می‌باشد.

جدول 4 اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم جابجایی در جهت Y بین نقاط مشابه قرار گرفته بر روی خطوط عرضی مختلف در کار عددی

Table 4 The difference between maximum and minimum Y displacements at three points along the transverse direction in experimental work

روش تابش‌دهی	موقعیت در امتداد خطوط عرضی	اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم جابجایی در جهت Y بر حسب درصد
ESM	E-E'-E''	263/05
	F-F'-F''	23/46
	G-G'-G''	13/88
HSM	E-E'-E''	72/92
	F-F'-F''	7/56
	G-G'-G''	4/13
ISM	E-E'-E''	68/90
	F-F'-F''	2/73
	G-G'-G''	1/33

با توجه به اینکه در بخش‌های قبل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با نتایج تجربی مورد تأیید قرار گرفتند در این بخش، مطالعات فقط در حیطه شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شوند. به منظور اعمال مکانیزم کمانشی در هر دو قسمت ورق ترکیبی از توان لیزر 2500 وات و شعاع پرتوی 12 میلی‌متر استفاده می‌شود. همچنین با توجه به اینکه به منظور اعمال مکانیزم کمانشی در هر دو قسمت ورق ترکیبی، پارامترهای لیزر تغییر کرده‌اند می‌بایستی مجدداً مراحل دستیابی به روش تابش‌دهی ISM انجام شود. به منظور بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف تابش‌دهی در حالت دوم، شبیه‌سازی‌های عددی به منظور دستیابی به زاویه 2/3 درجه در هر دو قسمت ورق ترکیبی و با استفاده از روش‌های مختلف تابش‌دهی انجام می‌شوند. پس از انجام مراحل فوق و استفاده از روش‌های مختلف تابش‌دهی در حالت دوم، نتایج مربوط به زاویه خمش در حالت دوم بدست آمدند که در شکل 9 نشان داده شده اند. همان‌طور که از شکل 9 مشاهده می‌شود زاویه خمش بدست آمده از روش ISM نسبت به روش‌های تابش‌دهی HSM و ESM افزایش محسوسی دارد. در جدول 5، مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زوایای خمش و همچنین یکنواختی انحناء برای هر روش تابش‌دهی آورده شده است. از جدول 5 می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ماکزیمم زاویه خمش با تغییر روش تابش‌دهی از ESM به ISM در

نازک ورق ترکیبی، مکانیزم کمانشی و در قسمت ضخیم آن مکانیزم گرادیان دمایی حاکم است. از آنجایی که ناحیه تغییر شکل پلاستیک در مکانیزم کمانشی بزرگتر از ناحیه تغییر شکل پلاستیک در مکانیزم گرادیان دمایی می‌باشد بنابراین جابجایی‌های در جهت Y متفاوت و به دنبال آن زوایای خمش و انحنای متفاوتی در دو قسمت ورق ترکیبی اتفاق می‌افتند. به منظور کاهش اختلاف بین جابجایی‌های در جهت Y، زوایای خمش و انحنای دو قسمت ورق ترکیبی می‌بایستی انرژی حرارتی تابش شده در واحد حجم قسمت ضخیم افزایش یافته و به دنبال آن ناحیه تغییر شکل پلاستیک در این قسمت افزایش یابد. در این شرایط، انتظار می‌رود که اختلاف بین جابجایی‌های در جهت Y قسمت‌های نازک و ضخیم کاهش بیابد. دلیل دیگر اختلاف جابجایی‌های در جهت Y نقاط E، E' و E'' و همچنین سایر نقاط نمونه مشابه آنها، اختلاف در شرایط مرزی حرارتی آنها می‌باشد. از جداول 3 و 4 مشاهده می‌شود که اختلاف بین جابجایی‌های در جهت Y در نقاط مشابه "E-E'-E''، F-F'-F'' و G-G'-G'' در روش تابش‌دهی ISM نسبت به روش‌های ESM و HSM به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. بنابراین مجدداً ثابت می‌شود که روش تابش‌دهی ISM مناسب‌ترین روش جهت خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده می‌باشد.

جدول 3 اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم جابجایی در جهت Y بین نقاط مشابه قرار گرفته بر روی خطوط عرضی مختلف در کار تجربی

Table 3 The difference between maximum and minimum Y displacements at three points along the transverse direction in experimental work

روش تابش‌دهی	موقعیت در امتداد خطوط عرضی	اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم جابجایی در جهت Y بر حسب درصد
ESM	E-E'-E''	253/85
	F-F'-F''	29/27
	G-G'-G''	15/79
HSM	E-E'-E''	72/98
	F-F'-F''	7/41
	G-G'-G''	3/87
ISM	E-E'-E''	68/82
	F-F'-F''	3/17
	G-G'-G''	2/00

4-1- توسعه روش تابش‌دهی پیشنهاد شده ی ISM در حالت دوم (مکانیزم کمانشی در هر دو قسمت ورق ترکیبی)
در این قسمت، هدف بررسی کارایی روش تابش‌دهی پیشنهاد

در این قسمت نیز مطالعات در حیطه شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شوند. به منظور اعمال مکانیزم گرادیان دمایی در هر دو قسمت ورق ترکیبی از توان لیزر 300 وات و شعاع پرتوی 3 میلی‌متر استفاده می‌شود. همچنین با توجه به اینکه به منظور اعمال مکانیزم گرادیان دمایی در هر دو قسمت ورق ترکیبی، پارامترهای لیزر تغییر کرده‌اند می‌بایستی مجدداً مراحل دستیابی به روش تابش‌دهی ISM انجام شود. به منظور بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف تابش‌دهی در حالت سوم، شبیه‌سازی‌های عددی به منظور دستیابی به زاویه 0/18 درجه در هر دو قسمت ورق ترکیبی و با استفاده از روش‌های مختلف تابش‌دهی انجام می‌شوند. پس از انجام مراحل فوق و استفاده از روش‌های مختلف تابش‌دهی در حالت دوم، نتایج مربوط به زاویه خمش در حالت سوم بدست آمدند که در شکل 11 نشان داده شده‌اند. مجدداً همان‌طور که از شکل 11 مشاهده می‌شود زاویه خمش بدست آمده از روش ISM نسبت به روش‌های تابش‌دهی HSM و ESM افزایشی محسوسی دارد. در جدول 6 مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زوایای خمش و همچنین یکنواختی انحنا، برای هر روش تابش‌دهی آورده شده است.

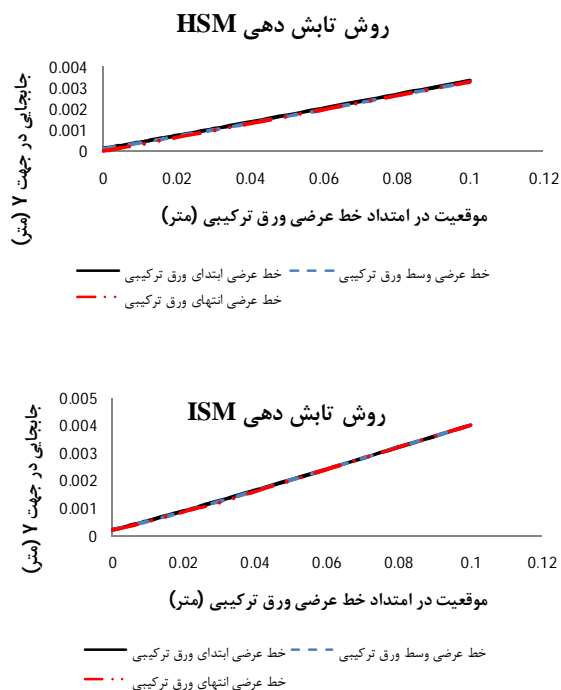


Fig. 10 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines of tailored blank for ESM, HSM and ISM irradiating paths in the second mode

شکل 10 جابجایی در جهت Y در امتداد خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی برای روش‌های تابش‌دهی ESM، HSM و ISM در حالت دوم

حدود % 209 و از روش HSM به ISM در حدود % 21 افزایش یافته است. به علاوه، یکنواختی انحنا با تغییر روش تابش‌دهی از ESM و HSM به ISM افزایش یافته است. به منظور بررسی پدیده خمش چند منحنی و عملکرد روش تابش‌دهی ارائه شده در کاهش این پدیده در حالت دوم، در شکل 10 جابجایی‌های در جهت Y در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی خم کاری شده به کمک لیزر نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با استفاده از روش تابش‌دهی ISM، پدیده خمش چند منحنی به صورت قابل توجهی نسبت به روش‌های ESM و HSM کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج مختلف، ثابت می‌شود که روش تابش‌دهی ISM در حالت دوم نیز بهترین روش تابش‌دهی در فرایند خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی است.

4-2- توسعه روش تابش‌دهی پیشنهاد شده ی ISM در حالت سوم (مکانیزم گرادیان دمایی در هر دو قسمت ورق ترکیبی)

در ادامه مطالعات این مقاله در این قسمت هدف بررسی کارآیی روش تابش‌دهی پیشنهاد شده ی ISM در حالت سوم (مکانیزم گرادیان دمایی در هر دو قسمت ورق ترکیبی) می‌باشد.

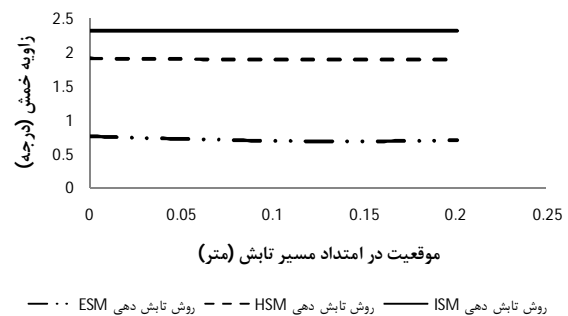


Fig. 9 Bending angle along the irradiating path for the second mode of investigation

شکل 9 زاویه خمش در امتداد مسیر تابش برای حالت دوم بررسی

جدول 5 مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زاویه خمش و یکنواختی انحنا در حالت دوم

Table 5 Maximum and minimum values of bending angle and curvature uniformity in the second mode

روش تابش‌دهی	ماکزیمم زاویه خمش (درجه)	می‌نیمم زاویه خمش (درجه)	یکنواختی انحنا (درصد)
ESM	0/75	0/68	9/33
HSM	1/92	1/90	1/04
ISM	2/32	2/31	0/40

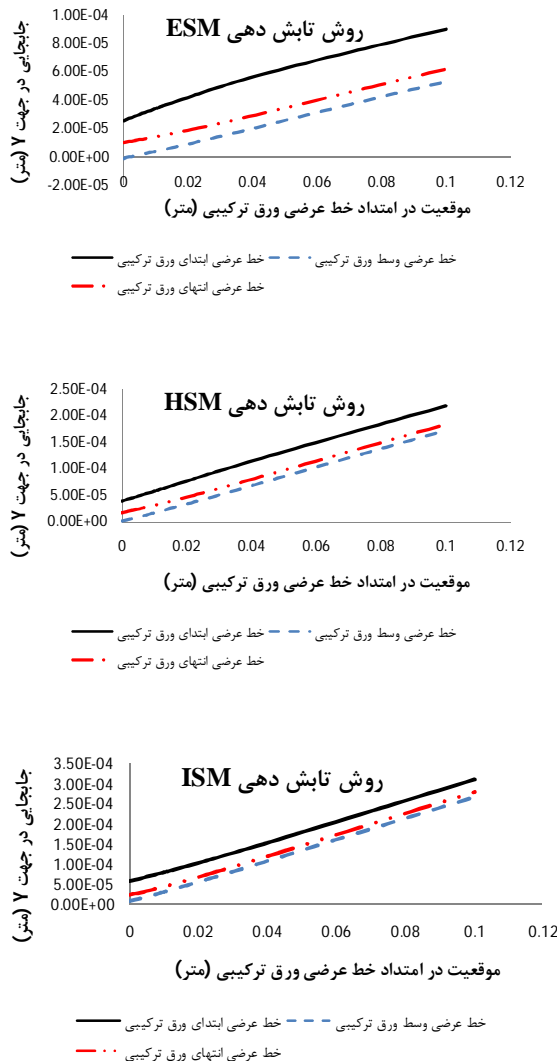


Fig. 12 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines of tailored blank for ESM, HSM and ISM irradiating paths in the third mode

شکل 12 جابجایی در جهت Y در امتداد خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی برای روش های تابش دهی ESM، HSM و ISM در حالت سوم

5- نتیجه گیری

در این مقاله، فرایند خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی ماشین کاری شده مورد بررسی قرار گرفت. اشاره شد که در خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی به واسطه وجود ضخامت های متفاوت، با اعمال روش های تابش دهی با انرژی تابشی ثابت زوایای خمش و انحنای متفاوتی نیز در قسمت های مختلف آنها ایجاد می شود. بنابراین به منظور کاهش این اختلافات، می بایستی یک روش تابش دهی مناسب ارائه گردد. نتایج زیر در این مقاله بدست آمدند:

- روش های تابش دهی مختلفی همانند ESM، HSM و ISM جهت دستیابی به زاویه خمش یکنواخت در دو قسمت

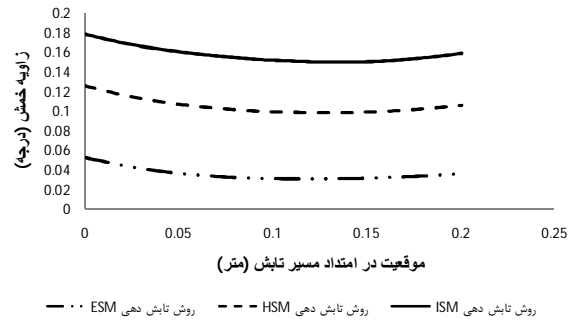


Fig. 11 Bending angle along the irradiating path for the third mode of investigation

شکل 11 زاویه خمش در امتداد مسیر تابش برای حالت سوم بررسی

جدول 6 مقادیر ماکزیمم و می نیمم زاویه خمش و یکنواختی انحنا در حالت سوم

Table 6 Maximum and minimum values of bending angle and curvature uniformity in the third mode

روش تابش دهی	ماکزیمم زاویه خمش (درجه)	می نیمم زاویه خمش (درجه)	یکنواختی انحنا (درصد)
ESM	0/05	0/03	40
HSM	0/13	0/10	23/08
ISM	0/18	0/15	16/67

از جدول 6 نیز می توان نتیجه گرفت که مقدار ماکزیمم زاویه خمش با تغییر روش تابش دهی از ESM به ISM در حدود % 260 و از روش HSM به ISM در حدود % 38 افزایش یافته است. به علاوه، یکنواختی انحنا با تغییر روش تابش دهی از ESM و HSM به ISM افزایش یافته است.

به منظور بررسی پدیده خمش چند منحنی و عملکرد روش تابش دهی ارائه شده در کاهش این پدیده، در شکل 12 جابجایی های در جهت Y در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی خم کاری شده به کمک لیزر در حالت سوم نشان داده شده اند.

همان طور که در این شکل مشاهده می شود با استفاده از روش تابش دهی ISM، پدیده خمش چند منحنی به صورت قابل توجهی نسبت به روش های ESM و HSM کاهش می یابد. بنابراین مجدداً با توجه به نتایج مختلف، ثابت می شود که روش تابش دهی ISM در حالت سوم نیز بهترین روش تابش دهی در فرایند خم کاری با لیزر ورق های ترکیبی است.

از مقایسه جداول 1، 5 و 6 مشاهده می شود که پارامتر یکنواختی انحنا در حالت های دوم، اول و سوم به ترتیب کمترین مقادیر را دارد و به عبارت دیگر می توان گفت که یکنواختی انحنا در حالت های دوم، اول و سوم به ترتیب بهترین شرایط را دارد.

- [5] F. Vollertsen, M. Geiger, W. Li, FDM and FEM simulation of laser forming: a comparative study, *Proceedings of fourth international conference on technology of plasticity*, Beijing, China, September 5-9, 1993.
- [6] F. Vollertsen, An analytical Model for laser bending, *Lasers in Engineering*, Vol. 2, pp. 261-276, 1994.
- [7] F. Vollertsen, I. Komel, R. Kals, The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism-a model, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 3, pp. 107-119, 1995.
- [8] A. Behera, P. S. Sahu, S. K. Patel, Application of Taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet, *Materialstoday: Proceedings*, Vol. 26, pp. 2323-2327, 2020.
- [9] S. E. Khandandel, S. M. H. Seyedkashi, M. Moradi, A novel path strategy design for precise 2D and 3D laser tube forming process; experimental and numerical investigation, *Optik*, Vol. 206, Article 164302, 2020.
- [10] Y. Guo, Y. Shi, X. Wang, R. Sun, Zh. Bing, An analytical model of laser bending angle under preload, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 108, pp. 2569-2577, 2020.
- [11] M. Safari, R. Alves de Sousa, J. Joudaki, Fabrication of Saddle-Shaped Surfaces by a Laser Forming Process: An Experimental and Statistical Investigation, *Metals*, Vol. 10, No. 7, pp. 1-13, 2020.
- [12] M. Safari, A Study on the Laser Tube Bending Process: Effects of the Irradiating Length and the Number of Irradiating Passes, *Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 7, No. 1, pp. 46-53, 2020.
- [13] M. Kotobi, H. Mansouri, M. Honarpisheh, Investigation of laser bending parameters on the residual stress and bending angle of St-Ti bimetal using FEM and neural network, *Optics & Laser Technology*, Vol. 116, pp. 265-275, 2019.
- [14] D. Abolhasani, S. M. H. Seyedkashi, Y. T. Kim, M. Hoseinpour Gollo, Y. H. Moon, A double raster laser scanning strategy for rapid die-less bending of 3D shape, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 5, pp. 4741-4756, 2019.
- [15] F. Li, S. Liu, A. Shi, Q. Chu, Q. Shi, Y. Li, Research on Laser Thread Form Bending of Stainless Steel Tube, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, pp. 893-903, 2019.
- [16] E. R. I. Fauzi, M. S. C. Jamil, Z. Samad, M. A. Sheikh, A. M. Najib, Influence of non-conventional beam profile on edge effects in laser forming of AISI 304 stainless steel plate, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, pp. 1593-1601, 2019.
- [17] Y. Zhang, W. Dong, Y. Qiao, Ch. Zhang, Edge

ورق ترکیبی ماشین کاری شده و در حالت اول مورد مطالعه بررسی شدند. مطالعات در دو حیطه تجربی و عددی انجام شدند و نتایج نشان دادند که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

- شکل‌های مختلف و جداول نشان دادند که اختلاف بین زوایای خمش و انحناهای دو قسمت ورق ترکیبی با استفاده از روش تابش‌دهی ISM نسبت به سایر روش‌های تابش‌دهی شدیداً کاهش یافت.

- نشان داده شد که با استفاده از روش تابش‌دهی ISM، پدیده خمش چند منحنی در مقایسه با سایر روش‌های تابش‌دهی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

- نتایج بررسی عملکرد روش تابش‌دهی ISM در حالت‌های دوم و سوم مورد مطالعه نشان دادند که این روش تابش‌دهی در حالت‌هایی که در هر دو قسمت ورق ترکیبی مکانیزم کمانشی یا گرادیان دمایی حاکم باشد نیز بهترین روش تابش‌دهی برای خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده می‌باشد.

- از مقایسه نتایج مربوط به حالت‌های اول، دوم و سوم مشاهده شد که پارامتر یکنواختی انحنا در حالت‌های دوم، اول و سوم به ترتیب کمترین مقادیر را دارد و به عبارت دیگر می‌توان گفت که یکنواختی انحنا در حالت‌های دوم، اول و سوم به ترتیب بهترین شرایط را دارد.

در نهایت با استفاده از نتایج تجربی و عددی حالت‌های اول، دوم و سوم ثابت شد که روش تابش‌دهی پیشنهاد شده ISM، بهترین انتخاب برای خم کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین کاری شده می‌باشد.

6- مراجع

- [1] E. G. Bidgoli, M. Moradi, S. Shamsaei, Laser drilling simulation of glass by using finite element method and selecting the suitable Gaussian distribution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 416-420, 2016.
- [2] E. Haddadi, M. Moradi, Ayub. K. Ghavidel, Ali. K. Ghavidel, S. Meiabadi, Experimental and Parametric Evaluation of Cut Quality Characteristics in CO2 Laser Cutting of Polystyrene, *Optik*, Vol. 184, pp. 103-114, 2019.
- [3] Y. Namba, Laser forming in space, *Proceedings of the international conference of laser and electro optics (ICALEO'85)*, California, U.S.A, November 11-14, 1985.
- [4] M. Geiger, F. Vollertsen, The Mechanisms of Laser Forming, *CIRP Annals*, Vol. 42, pp. 301-304, 1993.

- interactions in the multi-layers material, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 110, pp. 364-376, 2018.
- [21] L. Zhang, E.W. Reutzler, P. Michaleris, Finite element modeling discretization requirements for the laser forming process, *International Journal of Mechanical sciences*, Vol.46, 623-637, 2004.
- [22] G. Yu, K. Masubuchi, T. Maekawa, N. M. Patrikalakis, FEM Simulation of Laser Forming of Metal Plates, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.123, pp. 405-410, 2001.
- [23] M. Safari, M. Farzin, Experimental and numerical investigation of laser bending of tailor machined blanks, *Optics and Laser Technology*, Vol. 48, pp. 513-522, 2013.
- [24] G. Krauss, *Steels: heat treatment and processing principles*, pp. 216-218, Ohio, ASM International, 1990.
- Effect Investigation of DP980 Steel Sheet in Multiple Laser Scanning Process, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, pp. 319-326, 2019.
- [18] P. P. Dutta, K. Kalita, U. S. Dixit, Electromagnetic-Force-Assisted Bending and Straightening of AH36 Steel Strip by Laser Irradiation, *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 5, pp. 201-221, 2018.
- [19] Sh. Fu, L. Yang, H. Zhang, Y. Wang, G. Chi, Analyses of Effects of Process Parameters on Laser Bending of Stiffened Panels, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 19, pp. 593-604, 2018.
- [20] A. Gisario, M. Barletta, Laser forming of glass laminate aluminium reinforced epoxy (GLARE): on the role of mechanical, physical and chemical