مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، بهمن 1399، دوره 7، شماره 11، ص‌ص. 52- 65

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تجربی و عددی خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده با در نظر گرفتن مکانیزم‌های خم‌کاری مختلف

مهدی صفری[1*]، محمود فرزین[2]

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1399

داوری اولیه: 6 مهر 1399

پذیرش: 28 مهر 1399

کلیدواژگان:

خم‌کاری به کمک لیزر

ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده

الگوی اسکن

پدیده خمش چند منحنی

زاویه خمش

چکیده

در این پژوهش، خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده به وسیله آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. باید توجه داشت که به دلیل وجود ضخامت‌های متفاوت در ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده، خم‌کاری به کمک لیزر این ورق‌ها در مقایسه با ورق‌های ساده ی یکپارچه پیچیده‌تر می‌باشد. همچنین پدیده خمش چند منحنی که غیر یکنواختی تغییر شکل‌ها در جهت عرضی می‌باشد به صورت محسوس‌تری در خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده نسبت به ورق‌های یکپارچه دیده می‌شود. در این مقاله، یک روش جدید تابش‌دهی بر مبنای تغییر سرعت اسکن لیزر برای خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده پیشنهاد شده است. ثابت می‌شود که با استفاده از روش تابش‌دهی پیشنهاد شده، اختلاف در زاویه خمش قسمت‌های نازک و ضخیم ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده و همچنین پدیده خمش چند منحنی به شدت کاهش یافته است. نتایج زوایای خمش و پدیده خمش چند منحنی با در نظر گرفتن مکانیزم‌های خمشی متفاوت در قسمت‌های نازک و ضخیم ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده ثابت می‌کنند که روش تابش‌دهی پیشنهاد شده، روش مناسبی برای خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌باشد.

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

Mehdi Safari[1*], Mahmoud Farzin[2]

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

در سال‌های اخیر با توسعه استفاده از تکنولوژی لیزر، تحقیقات متنوعی در زمینه کاربرد لیزر در فرآوری مواد انجام شده است [1، 2]. فرایند خم‌کاری با لیزر[1]، یک فرایند شکل‌دهی انعطاف پذیر می‌باشد که در آن نیازی به ابزار یا نیروهای خارجی نمی‌باشد. خم‌کاری با لیزر در بسیاری از فرایندهای ورق‌کاری از جمله خم‌کاری در صفحه و خارج از صفحه ورق، تصحیح اعوجاج‌های ناخواسته حاصل از سایر فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی و تنظیم قطعات الکترونیکی در جایشان مورد

1. Laser bending

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند خم‌کاری با لیزر، ورق تحت تابش یک پرتوی لیزر غیر متمرکز[1] 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 خم‌کاری با لیزر را بر اساس پارامترهای هندسی ورق و پرتوی لیزر به سه مکانیزم اصلی گرادیان دمایی[2]، کمانشی[3] و کوتاه شدگی[4] تقسیم کردند [4]. در سال 1993 ولرتسن و همکارانش فرایند خم‌کاری با لیزر را با استفاده از روش اختلاف محدود[5] و روش المان محدود[6] مدلسازی کردند [5]. آنها همچنین معادلات سودمندی را برای مکانیزمهای مختلف خم‌کاری 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری دوبعدی و سه بعدی لوله‌ها به کمک پرتوی لیزر می‌باشد [9]. گو و همکاران یک مدل تحلیلی برای خم‌کاری ورق به کمک لیزر در شرایط اعمال پیش بار ارائه نمودند. مدل ارائه شده بر مبنای مدل زاویه کمانش حرارتی 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های دو لایه فولاد-تیتانیوم مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که زاویه خمش ورق دولایه خم‌کاری 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

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 خم‌کاری به کمک لیزر لوله‌ها پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو و زمان تابش‌دهی را بر زاویه خمش لوله‌های خم‌کاری 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری 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 خم‌کاری به کمک لیزر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که اثر لبه‌ای در ورق خم‌کاری شده به کمک لیزر با افزایش تعداد پاس‌های تابش‌دهی کاهش می‌یابد [17]. دوتا و همکاران به صورت تجربی و عددی، خم‌کاری لیزر فولاد AH36 به کمک نیروی خارجی الکترومغناطیسی را انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نیروی الکترومغناطیسی در فرآیند خم‌کاری 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 خم‌کاری 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، چسباندن[1] و یا ماشین‌کاری تولید شوند. یک ورق یکپارچه[2] می‌تواند توسط فرایند ماشین‌کاری دارای قسمت‌های مختلفی با ضخامت‌های متفاوت بشود. ورق ترکیبی که با استفاده از فرایند ماشین‌کاری تولید شود معروف به ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌باشد. با استفاده از ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 خم‌کاری با لیزر و ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده در سالهای اخیر مطرح شده‌اند و با وجود مزایای ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری شده، خم‌کاری با لیزر این ورق‌ها از ورق‌های یکپارچه پیچیده‌تر می‌باشد. همچنین وجود ضخامت‌های مختلف در ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده باعث ایجاد اثرات لبه‌ای شدیدتری در این ورق‌ها نسبت به ورق‌های یکپارچه می‌شود.

در این مقاله، یک روش تابش‌دهی برای خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده پیشنهاد شده است. به منظور بررسی و تایید کارآیی 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

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 ماشین‌کاری 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 خم‌کاری به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده مورد استفاده قرار بگیرد. مهمترین نوآوری این مقاله شکل‌دهی به کمک لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 خم‌کاری 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 گردیده اند.

2- کار عددی

به منظور انجام کار عددی و انجام آنالیزهای حرارتی[1] و مکانیکی[2] فرایند خم‌کاری 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 خم‌کاری با لیزر، ابتدا میدان حرارتی[3] 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 گوسی[4] بوده و با رابطه (1) مشخص شده و توسط زیربرنامه دی فلاکس[5] به نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود.

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

در رابطه (1)، η ضریب جذب[6] 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 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 همرفتی[7] و تشعشع[8] 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:

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

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:

$$q_r=5.67\times10^{-8}\varepsilon(T_s^4-T_a^4) \qquad (3)$$

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 شده اند. 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،

[1]. Thermal analysis
[2]. Mechanical analysis
[3]. Temperature field
[4]. Gaussian distribution
[5]. DFLUX
[6]. Absorptivity
[7]. Convection
[8]. Radiation

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.

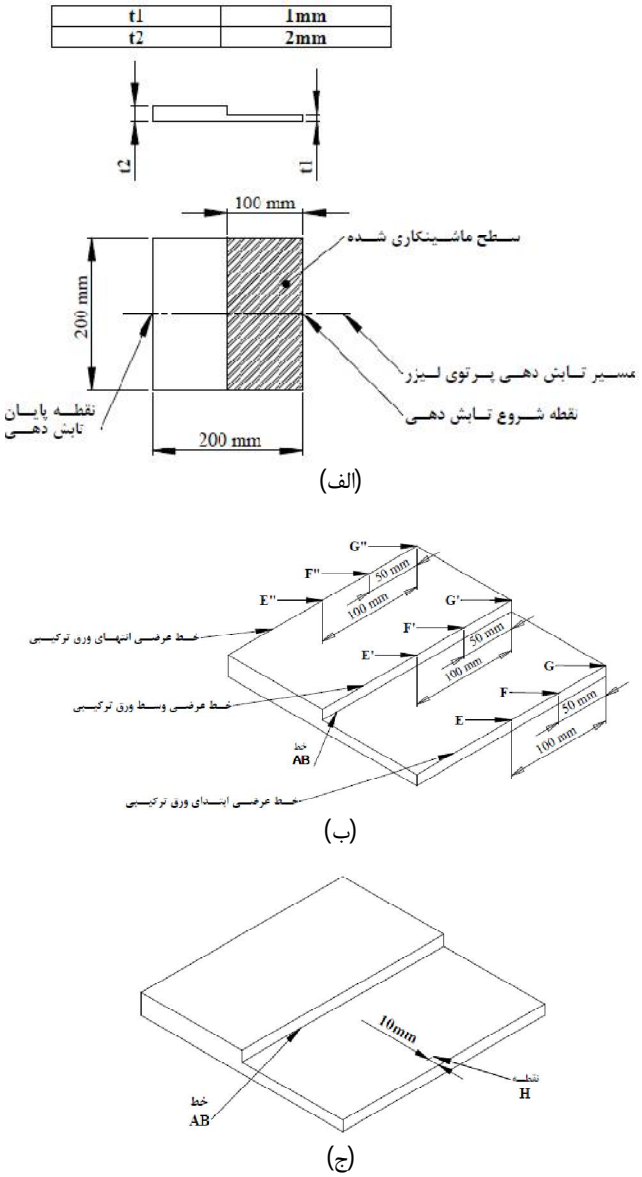

Fig. 1 Geometry of the blank and irradiating path. a-Dimensions of tailor machined blank and its irradiating path Position of line of abrupt thickness change (AB), b- Position of transverse lines and position of three sample points used for multi-curvature investigations, c- Position of line of abrupt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

شکل 1 هندسه بلانک و مسیر تابش‌دهی، الف- ابعاد ورق ترکیبی ماشین‌کاری 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 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 خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری شده، هدف، یافتن یک روش تابش‌دهی برای خم‌کاری با لیزر این ورق‌ها می‌باشد به طوری که اعوجاج‌ها و نایکنواختی‌های ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده در خم‌کاری با لیزر حداقل باشد.

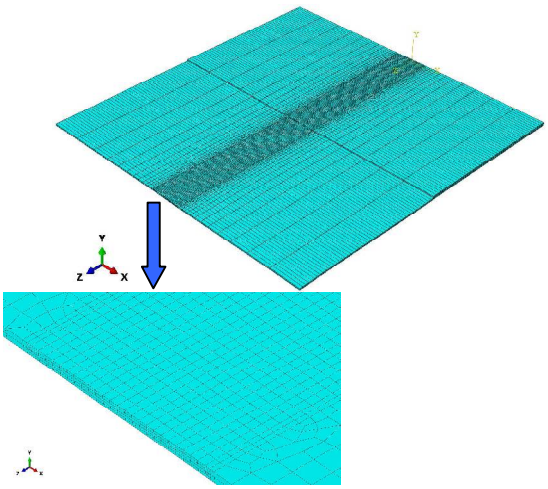

Fig. 2 Mesh pattern of tailor machined blank in the FEM simulations

شکل 2 الگوی شبکه‌بندی ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده در شبیه‌سازی‌های عددی

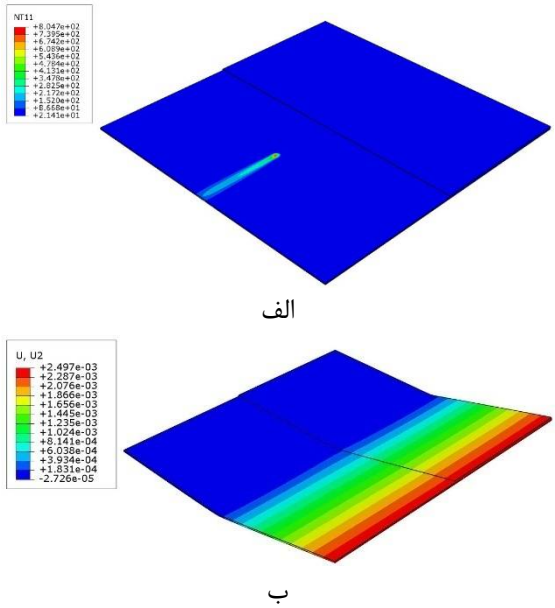

Fig. 3 Numerical simulation of laser forming of a tailor machined blank; a-Thermal analysis, b- Mechanical analysis

شکل 3 شبیه‌سازی عددی خم‌کاری به کمک لیزر یک ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده، الف- آنالیز حرارتی، ب- آنالیز مکانیکی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده به واسطه وجود ضخامت‌های متفاوت در دو قسمت ورق ترکیبی، زوایای خمش و انحناهای بخش‌های مختلف ورق متفاوت هستند. این پدیده می‌تواند به خاطر اختلاف در انرژی ورودی در واحد حجم قسمت‌های مختلف ورق ترکیبی باشد. در ورق‌های ترکیبی که تحت تابش پرتوی لیزر با انرژی ثابت قرار می‌گیرند، بخشهای ضخیم تر انرژی کمتری در واحد حجم نسبت به بخشهای نازکتر دریافت می‌کنند. بنابراین می‌بایستی روش تابش‌دهی مناسبی ارائه شده و انرژی ورودی پرتوی لیزر در سراسر ورق ترکیبی متعادل شود. در این مقاله و همچنین مرجع [23] مطالعات بر روی خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی با نسبت ضخامت 2 انجام می‌شوند. بنابراین در مرجع [23] سه روش تابش‌دهی به نام‌های روش سرعت ثابت[1]، روش سرعت نصف شده[2] و روش سرعت بهبود یافته[3] معرفی شده و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج بررسیهای مختلف نشان داد که روش تابش‌دهی سرعت بهبود یافته بهترین انتخاب برای خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که در مرجع [23]، شرایط پارامترهای لیزر به گونه‌ای در نظر گرفته شده بود که در قسمت ضخیم ورق ترکیبی مکانیزم تغییر شکل گرادیان دمایی حاکم بوده و در قسمت نازک مکانیزم کمانشی ظهور پیدا می‌کرد. در این مقاله هدف، بررسی اثربخشی و کارآیی روش تابش‌دهی سرعت بهبود یافته در حالت‌های دیگر از مکانیزم‌های تغییر شکل با در نظر گرفتن پارامترهای لیزر در فرآیند شکل‌دهی با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌باشد.

3- کار تجربی

به منظور تأیید نتایج عددی، برخی آزمایشات تجربی نیز در زمینه خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی انجام می‌شود. نمونه‌های مورد بررسی در کار تجربی از فولاد Mild steel با طول 200 میلی‌متر، عرض 200 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر تهیه می‌شوند. به منظور آماده‌سازی ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده، ضخامت نیمی از ورق با استفاده از فرایند ماشین‌کاری کاهش یافته و برابر با 1 میلی‌متر می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که فرایند ماشین‌کاری باعث ایجاد تنش‌های پسماند در ورق ترکیبی بخصوص در قسمت ماشین‌کاری شده (قسمت نازک) می‌شود و بنابراین نمونه‌های ماشین‌کاری شده باید قبل از فرایند خم‌کاری با لیزر، تنش‌گیری شوند. بدین منظور فرایند تنش گیری حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین با توجه به مرجع [24]، نمونه‌های ماشین‌کاری شده در کوره‌ای با دمای 500 درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت نگه داشته می‌شوند. پس از خروج از کوره، به نمونه‌ها اجازه داده می‌شود که در هوای آرام سرد شوند. آزمایش‌های خم‌کاری با لیزر با استفاده از یک دستگاه لیزر گازی پیوسته دی اکسید کربن 2000 وات انجام می‌شوند. در این آزمایشات از پرتوی لیزر با توان 1000 وات و قطر 6 میلی‌متر استفاده می‌شود. نمونه‌ها با استفاده از یک سیستم قفل هیدرولیکی و از یک لبه مهار می‌شوند. در شکل 4، تجهیزات مورد استفاده در فرایند خم‌کاری با لیزر و همچنین نمونه‌ای از قطعات فرم‌دهی‌شده 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 می‌شوند. زاویه خمش ورق‌های ترکیبی خم‌کاری شده با لیزر به کمک یک ماشین اندازه‌گیری مختصاتی[4] در 11 نقطه در امتداد

[1]. Equal Speed Method (ESM)
[2]. Half Speed Method (HSM)
[3]. Improved Speed Method (ISM)
[4]. Coordinate Measuring Machine (CMM)

مسیر تابش‌دهی و بر روی لبه آزاد ورق ترکیبی اندازه‌گیری می‌شوند. در شکل 5- الف شماتیک یک ورق ترکیبی شکل‌دهی شده به همراه لبه قفل شده، لبه آزاد، خط تابش‌دهی و برخی نقاط نمونه که اندازه‌گیری در آنها انجام می‌شود نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل 5- ب شماتیکی از زاویه خمش متناسب با جابجایی عمودی نقاط نمونه اندازه‌گیری نشان داده شده است. به منظور محاسبه زاویه خمش، از رابطه (4) استفاده می‌گردد.

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

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

شکل 4 تجهیزات مورد استفاده در فرایند خم‌کاری با لیزر و نمونه‌ای از قطعات فرم دهی شده

4- نتایج و بحث

در شبیه‌سازی‌های فرآیند خم‌کاری با لیزر، اندازه شبکه مورد استفاده برای ورق ترکیبی بسیار مهم می‌باشد. استفاده از المان‌های درشت منجر به کاهش دقت شبیه‌سازی‌ها شده و استفاده از المان‌های خیلی ریز نیز منجر به افزایش زمان شبیه‌سازی‌ها بدون ایجاد بهبود در دقت نتایج می‌شود. اندازه شبکه بر روی مسیر تابش‌دهی می‌بایستی ریزتر از اندازه شبکه در نواحی دورتر از مسیر تابش‌دهی 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 همان‌طور که در شکل 1- ج نشان داده شده است در نظر گرفته می‌شود.

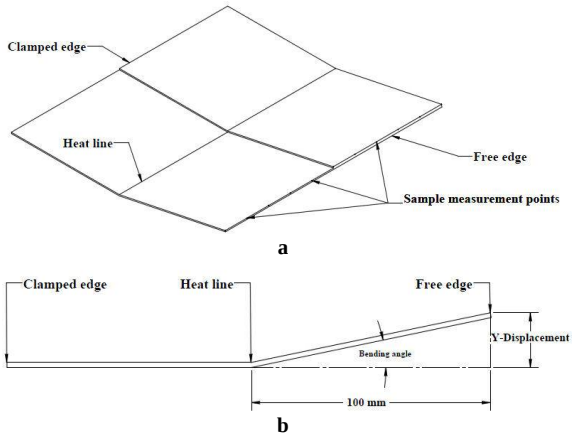

Fig. 5 Schematic shape of laser formed tailor machined blank, a- Clamped edge, free edge, heat line and sample measurement points, b- Calculation of bending angle from displacement

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

نقطه نمونه (نقطه H) بر روی مسیر تابش‌دهی در مقطع نازک و در فاصله 10 میلی‌متری از لبه ورق در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط دمای این نقطه در پایان مرحله حرارت دهی و به ازای اندازه شبکه‌های مختلف (تعداد المان‌های مختلف) اندازه‌گیری شده و در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 6 دیده می‌شود تعداد المان بهینه برای انجام شبیه‌سازی‌ها برابر با 14000 المان می‌باشد. به منظور استفاده از روش ISM، یک بررسی موردی در این مقاله انجام می‌شود. در این بررسی، هدف یافتن زاویه خمش 1/5 درجه در دو قسمت نازک و ضخیم ورق ترکیبی با نسبت ضخامت 2 می‌باشد. مسلما در حین فرایند خم‌کاری با لیزر، دمای سطح ورق ترکیبی نباید به نقطه ذوب برسد و سرعت‌های تابش‌دهی نیز متناسب با این محدودیت بدست می‌آیند. بر اساس مرجع [16] برای دستیابی به زاویه 1/5 درجه در دو قسمت ورق ترکیبی، سرعت تابش‌دهی در قسمت نازک 0/1 متر بر ثانیه براورد می‌شود. سرعت تابش‌دهی در قسمت ضخیم متناسب با روش تابش‌دهی انتخاب می‌شود.

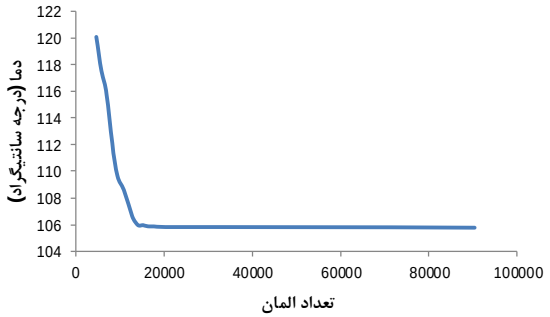

Fig. 6 Temperature of the sample point H (Fig. 1b), versus number of elements at the end of heating step.

شکل 6 دمای نقطه نمونه H (شکل 1) در مقابل تعداد المان‌ها در انتهای مرحله تابش‌دهی

در شکل 7 نتایج تجربی و عددی زاویه خمش ورق ترکیبی در امتداد مسیر تابش‌دهی برای روش‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته و نشان می‌دهد که دقت قابل قبولی در انجام شبیه‌سازی‌های عددی وجود داشته است. در روش تابش‌دهی ESM در هر دو قسمت ورق ترکیبی از سرعت حرکت پرتوی لیزر 0/1 متر بر ثانیه استفاده می‌شود. همچنین در روش HSM از سرعت 0/1 متر بر ثانیه برای قسمت نازک و 0/05 متر بر ثانیه برای قسمت ضخیم استفاده می‌شود. برای روش تابش‌دهی 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 خمش 1/5 درجه استفاده می‌شود. همان‌طور که از شکل 7 دیده می‌شود با تغییر روش تابش‌دهی از روش ESM به روش HSM و به دنبال آن روش ISM، زاویه خمش به طور قابل ملاحظه‌ای هم در نتایج تجربی و هم در نتایج عددی افزایش می‌یابد. اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم زاویه خمش بدست آمده برای هر روش تابش‌دهی می‌تواند به عنوان معیاری برای یکنواختی انحنا در ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده در نظر گرفته شود. در جداول 1 و 2، ماکزیمم و می‌نیمم مقدار زوایای خمش و همچنین یکنواختی انحنا، برای هر روش تابش‌دهی بصورت تجربی و عددی آورده شده است.

از جدول 1 می‌توان نتیجه گرفت که در نتایج تجربی، ماکزیمم زاویه خمش با تغییر روش تابش‌دهی از ESM به ISM در حدود % 305 و از روش HSM به ISM در حدود 63% افزایش یافته است. همچنین از جدول 2 مشاهده می‌شود که در نتایج عددی، ماکزیمم زاویه خمش با تغییر روش تابش‌دهی 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 تابش‌دهی 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 1و2 مشاهده می‌شود که روش تابش‌دهی ISM بهترین روش تابش‌دهی در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده می‌باشد.

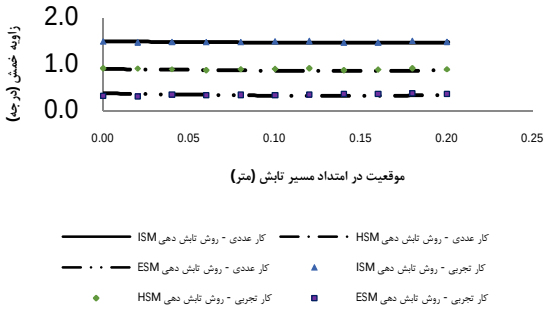

Fig. 7 Experimental and numerical results of bending angle along the irradiating path

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

جدول 1 مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زاویه خمش و یکنواختی انحنا در کار تجربی

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

روش تابش‌دهی	ماکزیمم زاویه خمش (درجه)	می نیمم زاویه خمش (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 خمش – می‌نیمم زاویه خمش)\ماکزیمم زاویه خمش]×100

جدول 2 مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زاویه خمش و یکنواختی انحنا در کار عددی

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

روش تابش‌دهی	ماکزیمم زاویه خمش (درجه)	می نیمم زاویه خمش (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 خم‌کاری ورق‌های یکپارچه، انحنای غیر یکنواختی در جهت عرضی اتفاق می‌افتد که سبب ایجاد پدیده‌ای به نام خمش چند منحنی می‌شود. انتخاب یک روش

تابش‌دهی مناسب می‌تواند این پدیده نامطلوب را کاهش دهد. در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده به دلیل وجود ضخامت‌های مختلف، پدیده خمش چند منحنی در این ورق‌ها می‌تواند بصورت شدیدتری نسبت به ورق‌های یکپارچه اتفاق بیفتد. کاهش پدیده خمش چند منحنی در خطوط عرضی مختلف ورق می‌تواند 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 شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسیهای خمش چند منحنی هم بصورت تجربی و هم بصورت عددی و متناسب با روش‌های مختلف تابش‌دهی می‌باشند.

در کار تجربی، جابجایی‌های در جهت Y با استفاده از یک ماشین اندازه‌گیری 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)) اندازه‌گیری می‌شوند. در کار عددی نیز روند اندازه‌گیری جابجاییهای در جهت Y همانند روش تجربی می‌باشد. همان‌طور که از شکل 8 دیده می‌شود، هنگام استفاده از روش تابش‌دهی ESM، اختلاف زیادی بین جابجاییهای در جهت Y در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق وجود دارد.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در هنگام استفاده از این روش تابش‌دهی، پدیده خمش چند منحنی به اندازه زیادی اتفاق می‌افتد. از شکل 8 مشاهده می‌شود که با استفاده از روش تابش‌دهی HSM پدیده خمش چند منحنی نسبت به روش ESM به مقداری زیادی کاهش می‌یابد ولی کماکان اختلاف زیادی بین جابجاییهای در جهت Y ورق ترکیبی در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتها وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با استفاده از روش تابش‌دهی ISM، پدیده خمش چند منحنی به صورت قابل توجهی نسبت به روش‌های ESM و HSM کاهش می‌یابد. در ورق ترکیبی خم‌کاری شده با روش تابش‌دهی ISM اختلاف بین جابجاییهای در جهت Y در خطوط مختلف عرضی شدیداً کاهش یافته است به طوری که به نظر می‌رسد که همه خطوط عرضی ورق تقریبا به یک اندازه جابجا شده‌اند.

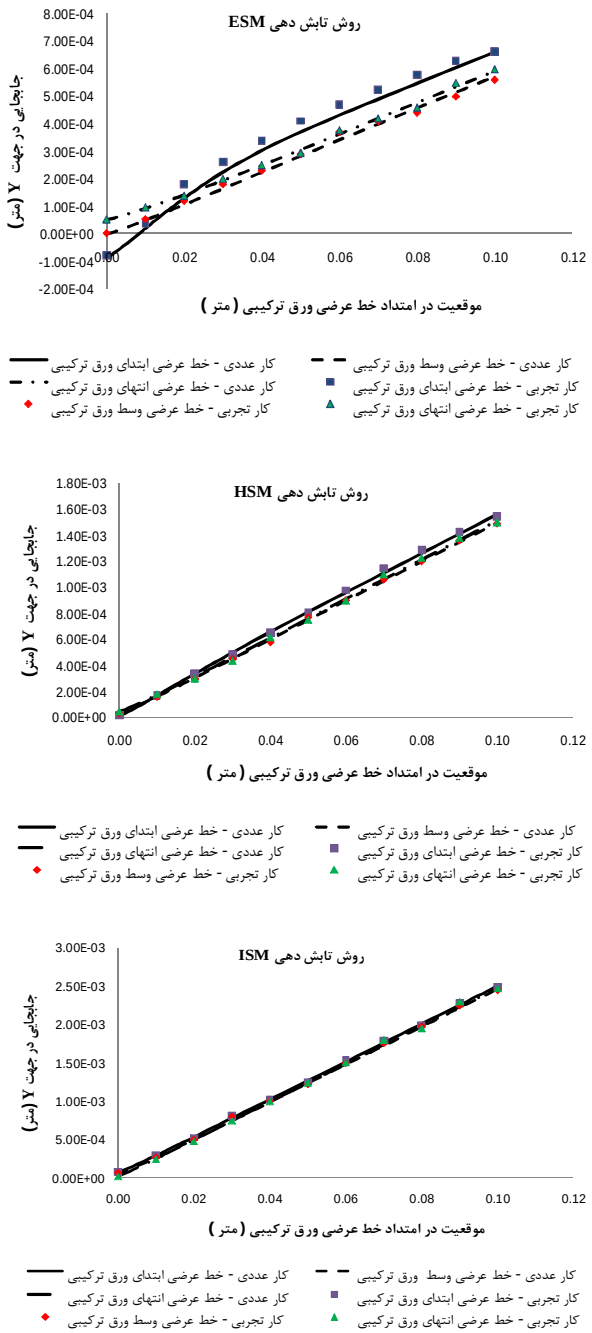

Fig. 8 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines in the transverse direction for ESM, HSM and ISM irradiating paths

شکل 8 جابجایی در جهت **Y** در امتداد خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی برای روش‌های تابش‌دهی **ESM**، **HSM** و **ISM**

در جداول 3 و 4 مقایسه‌ای بین جابجایی‌های 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 جابجایی‌های در جهت Y این نقاط این است که به خاطر وجود ضخامتهای متفاوت در دو قسمت ورق ترکیبی ماشین‌کاری شده و همچنین با توجه به پارامترهای لیزر، دو مکانیزم مختلف در خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده وجود دارند. در قسمت

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 انحناهای متفاوتی در دو قسمت ورق ترکیبی اتفاق می‌افتند. به منظور کاهش اختلاف بین جابجایی‌های در جهت Y، زوایای خمش و انحناهای 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 مناسب ترین روش جهت خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 کارآیی روش تابش‌دهی پیشنهاد 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 افزایشی محسوسی دارد. در جدول 5، مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم زوایای خمش و همچنین یکنواختی انحنا، 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

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 خم‌کاری شده به کمک لیزر نشان داده شده اند. 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 خم‌کاری 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.

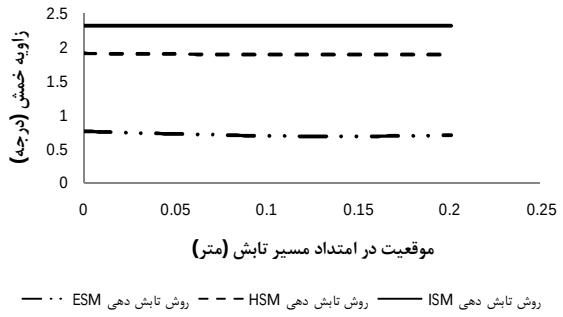

Fig. 9 Bending angle along the irradiating path for the second mode of investigation

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)	می نیمم 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

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.

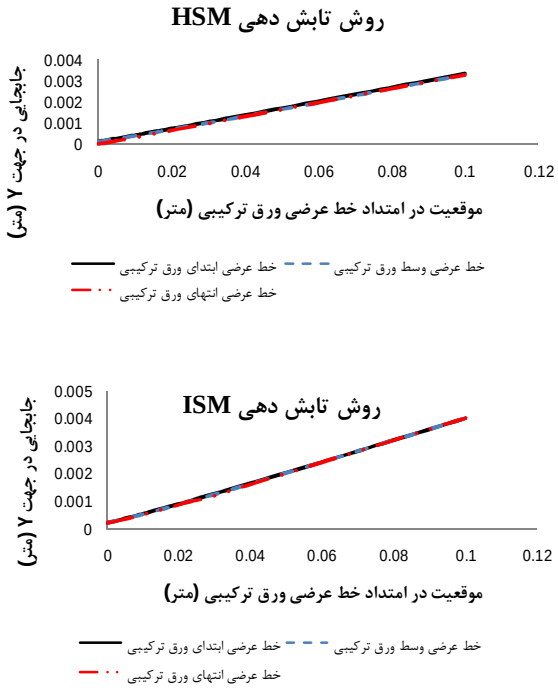

Fig. 10 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines of tailored blank for ESM, HSM and ISM irradiating paths in the second mode

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

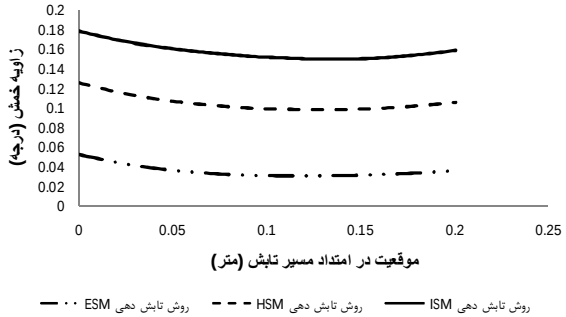

Fig. 11 Bending angle along the irradiating path for the third mode of investigation

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

جدول 6 مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم 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 تابش‌دهی	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 می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ماکزیمم زاویه خمش با تغییر روش تابش‌دهی 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 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 شکل 12 جابجاییهای در جهت Y در خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی خم‌کاری شده به کمک لیزر در حالت سوم 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 مجدداً با توجه به نتایج مختلف، ثابت می‌شود که روش تابش‌دهی ISM در حالت سوم نیز بهترین روش تابش‌دهی در فرایند خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی است.

از مقایسه جداول 1، 5 و 6 مشاهده می‌شود 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.

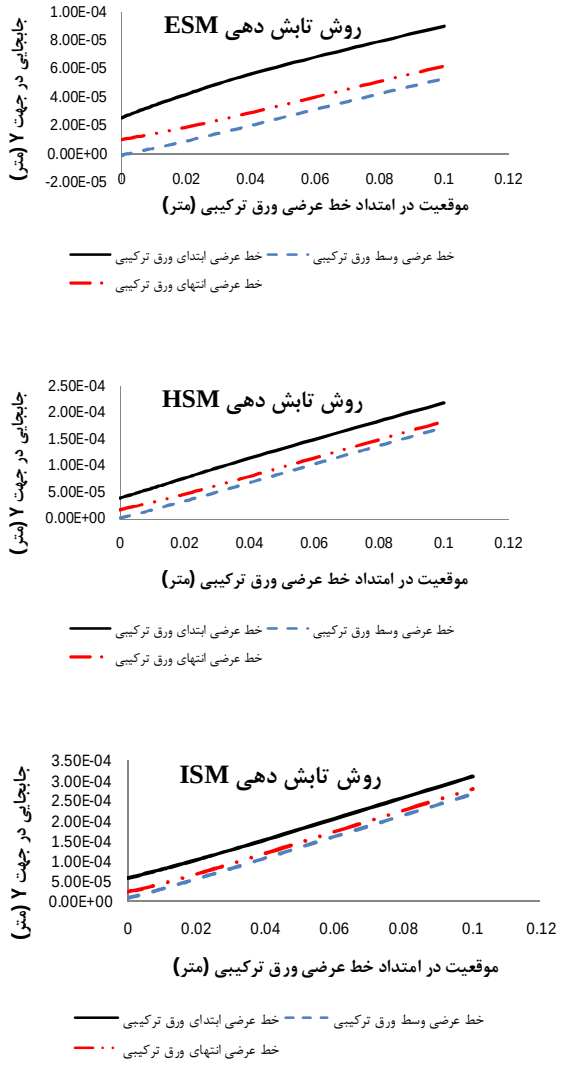

Fig. 12 Y displacements along the Entrance, Middle and Exit lines of tailored blank for ESM, HSM and ISM irradiating paths in the third mode

شکل 12 جابجایی در جهت Y در امتداد خطوط عرضی ابتدا، وسط و انتهای ورق ترکیبی برای روش‌های تابش‌دهی ESM، HSM و ISM در حالت سوم

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرایند خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری شده مورد بررسی قرار گرفت. اشاره شد که در خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی به واسطه وجود ضخامت‌های متفاوت، با اعمال روش‌های تابش‌دهی با انرژی تابشی ثابت زوایای خمش و انحناهای متفاوتی نیز در قسمت‌های مختلف آنها ایجاد می‌شود. بنابراین به منظور کاهش این اختلافات، می‌بایستی یک روش تابش‌دهی مناسب ارائه گردد. نتایج زیر در این مقاله بدست آمدند:

- روش‌های تابش‌دهی مختلفی همانند ESM، HSM و ISM جهت دستیابی به زاویه خمش یکنواخت در دو قسمت

ورق ترکیبی ماشین‌کاری 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 خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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 خم‌کاری با لیزر ورق‌های ترکیبی ماشین‌کاری 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.

[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

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 interactions in the multi-layers material, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 110, pp. 364-376, 2018.

[21] L. Zhang, E.W. Reutzel, 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.