



## بررسی عددی فرایند خمکاری به کمک لیزر لوله‌های سوراخ‌دار

مهدی صفری\*، دانش دانش‌پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران  
\* ایمیل نویسنده مسئول: m.safari@arakut.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ مهر ۱۴۰۴  
پذیرش: ۳۰ آبان ۱۴۰۴

## کلیدواژگان:

خمکاری به کمک لیزر  
لوله سوراخ‌دار  
توان خروجی لیزر  
سرعت اسکن لیزر

لوله‌های سوراخ‌دار، استوانه‌های توخالی هستند که با مجموعه‌ای از سوراخ‌های یکنواخت که در ساختار لوله ایجاد شده‌اند مشخص می‌شوند. ویژگی‌های لوله‌های سوراخ‌دار، استفاده از آن‌ها را در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله: سیستم‌های فیلتراسیون، عناصر معماری، مهندسی شیمی و فرایند، هوافضا و خودرو، کاربردهای کشاورزی و غیره امکان پذیر می‌سازد. در این پژوهش فرایند خمکاری به کمک لیزر لوله‌های سوراخ‌دار به صورت شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود. جهت انجام شبیه‌سازی‌های عددی از نرم افزار المان محدود تجاری آباکوس استفاده می‌شود. بدین منظور اثر مهم‌ترین پارامترهای ورودی فرایند شامل توان خروجی لیزر، سرعت اسکن لیزر و تعداد سوراخ واقع بر مسیر تابش‌دهی بر جابجایی‌های عمودی و جانبی لوله آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر مورد بررسی قرار می‌گیرند. جابجایی عمودی لوله آزاد لوله همان خمشی اصلی لوله می‌باشد در حالی که جابجایی جانبی لوله آزاد یک پدیده و اثر نامطلوب بوده که منجر به کاهش دقت ابعادی لوله‌های خمکاری شده به کمک لیزر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش توان لیزر جابجایی‌های عمودی و جانبی لوله آزاد لوله خمکاری شده با لیزر افزایش می‌یابند. از طرف دیگر افزایش سرعت اسکن لیزر منجر به کاهش جابجایی‌های عمودی و جانبی لوله آزاد می‌شود. همچنین با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی جابجایی عمودی لوله آزاد لوله کاهش می‌یابد در حالی که جابجایی جانبی زیاد می‌شود.

## Numerical investigation of laser bending process of perforated tubes

Mehdi Safari\*, Danesh Daneshpour

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

\* Corresponding Author's Email: m.safari@arakut.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 1 October 2025

Accepted: 21 November 2025

## Keywords:

Laser Bending

Perforated Tube

Laser Output Power

Laser Scanning Speed

## Abstract

Perforated tubes are hollow cylinders characterized by a pattern of uniform holes created in their tubular structure. The properties of perforated tubes enable their use in a wide range of applications, including filtration systems, architectural elements, chemical and process engineering, aerospace and automotive, agricultural applications, and more. In this study, the laser bending process of Perorated tubes is investigated through numerical simulation. The commercial finite element software Abaqus is used for the numerical simulations. To this end, the effects of the most important input parameters of the process, including laser output power, laser scanning speed and the number of holes located along the irradiation path, on the vertical and lateral displacements of the free edge of the laser-bent tube are investigated. The vertical displacement of the tube's free edge represents the main bending of the tube, while the lateral displacement of the free edge is an undesirable phenomenon and effect that leads to a reduction in the dimensional accuracy of the laser-bent tubes. The results show that by increasing the laser power, the vertical and lateral displacements of the free edge of the laser-bent tube increase. On the other hand, increasing the laser scan speed leads to a decrease in the vertical and lateral displacements of the free edge. Moreover, with an increase in the number of holes located along the irradiation path, the vertical displacement of the free edge of the tube decreases, while the lateral displacement increases.

Please cite this article using:

Safari M, Daneshpour D. Numerical investigation of laser bending process of perforated tubes. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Oct 23;12(8):38-48. doi: 10.22034/ijme.2025.550425.2136 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

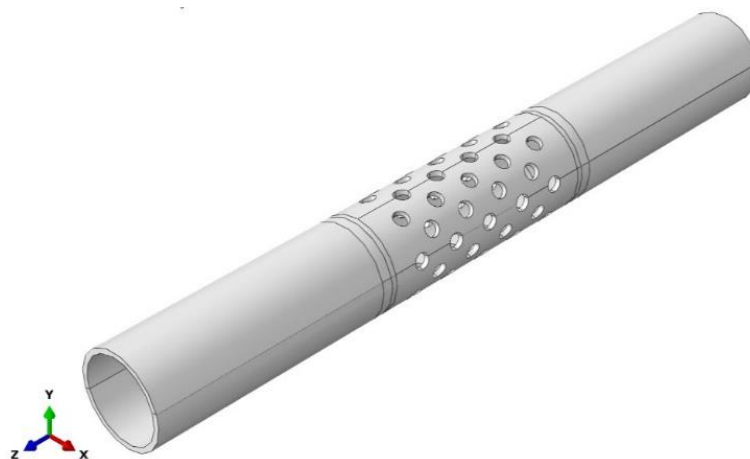
با معرفی لیزر به عنوان یک ابزار فرآوری مواد در حوزه‌های زیادی از مهندسی از لیزر استفاده شد [۱، ۲]. لوله‌های سوراخ‌دار، استوانه‌های توخالی هستند که با مجموعه‌ای از سوراخ‌های یکنواخت که در ساختار لوله ایجاد شده‌اند، مشخص می‌شوند. پیکربندی این سوراخ‌ها نه تنها اهداف کاربردی را دنبال می‌کند، بلکه بر خواص فیزیکی مانند وزن، دینامیک جریان و استحکام مکانیکی نیز تأثیر می‌گذارد. ویژگی‌های منحصر به فرد لوله‌های سوراخ‌دار، استفاده از آن‌ها را در طیف گسترده‌ای از کاربردها در بخش‌های مختلف از جمله: سیستم‌های فیلتراسیون، عناصر معماری، مهندسی شیمی و فرایند، هوافضا و خودرو، کاربردهای کشاورزی و غیره امکان پذیر می‌سازد. فرایند خمش لوله با لیزر یک تکنیک نوآورانه تولید است که از تابش لیزر برای ایجاد گرمایش موضعی استفاده می‌کند و در نتیجه لوله‌ها بدون نیاز به ابزارهای سنتی خم می‌شوند. این روش مزایایی مانند کاهش برگشت فتری و بهبود دقت را ارائه می‌دهد و آن را برای کاربردهای مختلف در صنایعی مانند هوافضا و خودرو مناسب می‌سازد [۳]. جنبه‌های کلیدی خمش لوله با لیزر شامل تأثیر پارامترهای فرایند، اثرات طرح‌های مختلف تابش و پیشرفت‌ها در عملیات حرارتی مواد برای افزایش عملکرد لوله‌های خمکاری شده با لیزر است و در این زمینه طی سال‌های اخیر تحقیقاتی انجام شده است. صفری و همکاران [۳] اثر پارامترهای فرایند و تعاملات آن‌ها را بر زوایای خمش اصلی و جانبی لوله‌های خم شده با لیزر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش توان لیزر، طول تابش و تعداد دفعات تابش و کاهش سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر، زاویه خمش اصلی و زاویه خمش جانبی افزایش می‌یابد. ایمهان و همکاران [۴] یک تحقیق تجربی برای بهبود فرایند خمکاری لوله با لیزر از طریق افزایش ضریب جذب ماده و شکل‌پذیری مکانیکی با استفاده از عملیات حرارتی نرم‌سازی لیزری انجام دادند. فرمول محاسبه زاویه خمش در فرایند خمکاری لوله با لیزر توسط هائو [۵] پیشنهاد و با آزمایش تأیید شد. مشاهده شد که زاویه خمش تابعی از توان لیزر، سرعت اسکن لیزر، ابعاد لوله و خواص ماده است. در مطالعه‌ای دیگر، ایمهان و همکاران [۶] یک بررسی تحلیلی برای تجزیه و تحلیل اثرات توان متوسط لیزر و سرعت اسکن لیزر بر فرایند خمکاری لوله با لیزر انجام دادند. نتایج تحلیلی آن‌ها به صورت تجربی نیز تأیید شده است. همچنین یک بررسی جامع و تجربی در مورد روش خمکاری لوله با لیزر توسط ایمهان و همکاران [۷] انجام شد. تغییرات مشخصات مواد در طول فرایند نیز در نظر گرفته شد. خمکاری لوله با لیزر به صورت عددی توسط گوان و همکاران [۸] شبیه‌سازی شد. آن‌ها دریافتند که رابطه بین تعداد اسکن‌ها و زاویه خمش تقریباً مستقیم است، به طوری که زوایای خمش با قطر پرتوی لیزر تغییر می‌کنند. ایمهان و همکاران [۹] خمش لوله با لیزر را با شکل‌دهی ورق با لیزر مقایسه کردند تا درک بهتری از فرایند شکل‌دهی لیزری ایجاد کنند و سازوکارهای به‌کار رفته در شکل‌دهی لیزری (به‌طور کلی) و خمش لوله‌های لیزری (به‌طور خاص) را روشن ساختند. هائو و گای [۱۰] یک طرح سیستماتیک برای خمش سه‌بعدی لوله با لیزر پیشنهاد کردند که لوله را با تغییر مداوم موقعیت و جهت خمش شکل می‌دهد و برای مواد با شکل‌پذیری کم و لوله‌های با ضخامت کم مناسب است. لی و یائو [۱۱] یک رابطه تحلیلی برای زاویه خمش ارائه دادند تا درک بهتری از ویژگی‌های تغییر شکل مانند تغییرات ضخامت دیواره، بیضی‌شدگی مقطع، شعاع خمش و عدم تقارن به دست آورند. خندان‌دل و همکاران [۱۲] یک استراتژی خنک‌کاری در حین فرایند خمش لوله با لیزر با طرح اسکن محیطی پیشنهاد کردند تا معایب اسکن محوری و محیطی را از بین ببرند و اثرات این روش بر زاویه خمش و کل زمان تولید را به صورت تجربی بررسی کردند. لی و همکاران [۱۳] تأثیر پارامترهای فرایند (شامل توان لیزر، سرعت اسکن، قطر نقطه و تعداد اسکن) را بر زاویه خمش در فرایند خمش لوله با لیزر فولاد زنگ نزن با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایش‌ها مطالعه کردند. یک مدل تحلیل اجزای محدود ترمومکانیکی سه‌بعدی برای فرایند خمش لوله با لیزر توسط گوان و همکاران [۱۴] بر اساس نرم‌افزار تجاری مارک توسعه داده شد و فرایندهای اسکن تک و چندگانه به صورت عددی تحلیل شدند. در پژوهشی توسط صفری [۱۵] اثرات طول تابش و تعداد پاس تابش بر زاویه خمش اصلی یک لوله دایره‌ای ساخته شده از فولاد نرم به صورت تجربی بررسی شده است و عیوب اصلی فرایند خمش لوله با لیزر مانند زاویه خمش جانبی، بیضی شدن و تغییرات ضخامت بررسی شده‌اند. بررسی خمش لوله‌های مستطیلی با لیزر از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود توسط ژانگ و لیو [۱۶] انجام شد که شامل گسسته‌سازی مدل، تعریف پرتو لیزر و شرایط مرزی و بررسی ویژگی‌های مواد در طول شبیه‌سازی بود.

همان‌طور که در بررسی منابع مشخص می‌باشد تمامی تحقیقات انجام شده تا کنون در زمینه خمکاری لوله با لیزر، بر لوله‌های معمولی و بدون سوراخ متمرکز بوده‌اند و بر اساس مطالعات نویسندگان تا کنون هیچگونه گزارشی در زمینه خمکاری با لیزر لوله‌های

سوراخ‌دار ارائه نشده است. بر این اساس هدف اصلی این تحقیق بررسی عددی فرایند خمکاری با لیزر لوله‌های سوراخ‌دار می‌باشد. بدین منظور اثر پارامترهای فرایند شامل توان لیزر، سرعت اسکن لیزر و تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی لوله بر جابجایی‌های عمودی و جانبی لبه آزاد لوله توسط نرم افزار تجاری آباکوس پرداخته خواهد شد.

## ۲- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی‌های عددی خمکاری به کمک پرتوی لیزر لوله سوراخ‌دار توسط نرم افزار آباکوس انجام می‌شوند. مدل لوله سوراخ‌دار مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های المان محدود در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ مدل لوله سوراخ‌دار مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های المان محدود خمکاری به کمک لیزر

مشخصات هندسی لوله سوراخ‌دار شامل طول، قطر خارجی و ضخامت به ترتیب ۱۴۰، ۱۸ و ۱ میلی‌متر بوده و همچنین قطر سوراخ‌ها نیز ۳ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است به جهت ساده‌سازی در مدل‌سازی و افزایش سرعت شبیه‌سازی‌های عددی، فقط قسمت‌هایی از لوله که تحت تابش‌دهی توسط پرتوی لیزر قرار دارند، سوراخ‌دار شده‌اند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده از خواص ترمومکانیکی مربوط به فولاد کم کربن که وابسته به دما هستند شامل هدایت حرارتی، گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش تسلیم استفاده می‌شود (جدول ۱ و ۲).

جدول ۱ خواص حرارتی وابسته به دمای لوله سوراخ‌دار از جنس فولاد کم کربن

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m/°C)	Specific heat (KJ/Kg/°C)
0	51.9	486
100	51.1	486
200	48.6	498
300	44.4	515
400	42.7	536
500	39.4	557
600	35.6	586
700	31.8	619
800	26	691
900	26.4	695
1000	27.2	691
3000	120	700

در این پژوهش اثر پارامترهای لیزر شامل توان، سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر بر زاویه خمش اصلی و جانبی لوله بررسی می‌شود. شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم افزار آباکوس و با رویکرد تحلیل حرارتی-مکانیکی غیر همزمان انجام می‌شوند بدین صورت که ابتدا حل حرارتی انجام شده و سپس با وارد کردن نتیجه حل حرارتی به عنوان بار ورودی در حل مکانیکی تغییر شکل‌های مورد نظر در

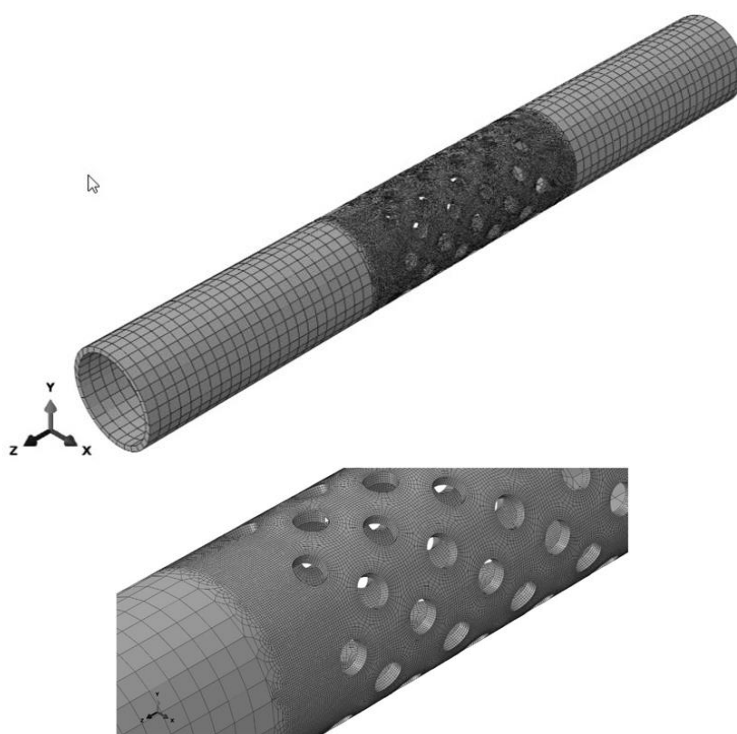
لوله ایجاد می‌شود. دمای اولیه لوله ۲۵ درجه در نظر گرفته شده است. همه شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله تابش‌دهی لیزر و خنک شدن انجام می‌شوند. برای تحلیل حرارتی شرایط تماسی انتقال حرارت همرفتی و تشعشع با محیط پیرامون در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط همرفتی فرض شده است که لوله پس از تابش‌دهی در هوای آرام سرد می‌شود و بر این اساس ضریب همرفتی مناسب در نظر گرفته شده است. برای تشعشع نیز شرایط مشابه در نظر گرفته شده است. در تحلیل مکانیکی نیز یک انتهای لوله سوراخ‌دار به صورتی که تمام درجات آزادی آن بسته باشد، مقید می‌گردد. شار حرارتی ناشی از تابش‌دهی با پرتوی لیزر از فرمول گوس به صورت زیر محاسبه شده و در شبیه‌سازی‌ها توسط زیربرنامه دی فلاکس اعمال می‌شود.

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

که در آن  $\eta$  ضریب جذب،  $P$  توان لیزر،  $R$  شعاع پرتو لیزر و  $x$  و  $z$  مختصات لحظه ای پرتو لیزر نسبت به مبدا مختصات است. المان مورد استفاده در تحلیل حرارتی از نوع DC3D8 و در تحلیل مکانیکی از نوع C3D8R می‌باشد. در شکل ۲، الگوی شبکه بندی در لوله سوراخ‌دار جهت انجام شبیه‌سازی عددی فرایند خمکاری به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های عددی فرض شده است که یک طرف لوله کاملاً مهار شده است و طرف دیگر لوله کاملاً آزاد می‌باشد.

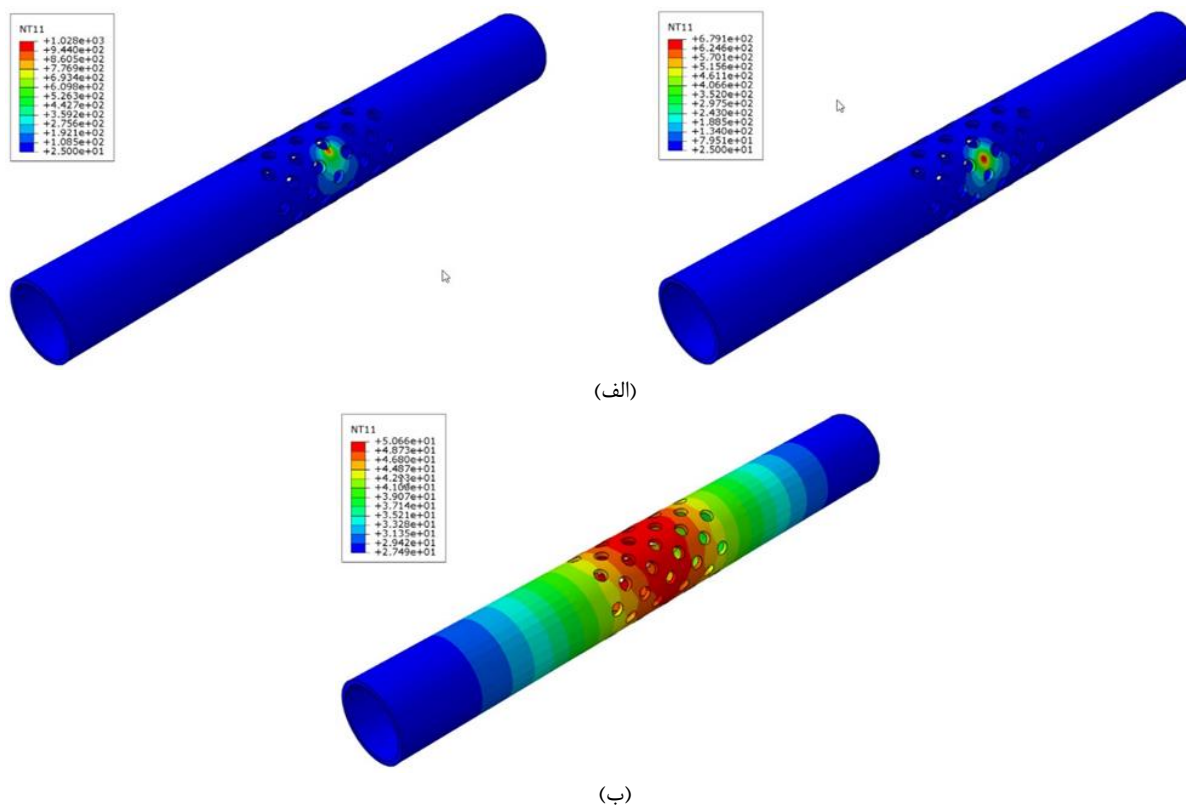
جدول ۲ خواص مکانیکی وابسته به دمای لوله سوراخ‌دار از جنس فولاد کم کربن

Temperature (°C)	Elasticity modulus (N/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Expansion	Yield stress for $\epsilon_p = 0$ (N/m <sup>2</sup> )	Yield stress for $\epsilon_p = 0.1$ (N/m <sup>2</sup> )
0	2.06E+11	0.296	1.17E-05	344.64E+6	422.64E+6
100	2.03E+11	0.311	1.17E-05	331.93E+6	409.93E+6
200	2.01E+11	0.33	1.22E-05	308.3E+6	386.30E+6
300	2E+11	0.349	1.28E-05	276.07E+6	342.57E+6
400	1.65E+11	0.367	1.33E-05	235.22E+6	290.22E+6
500	1.2E+11	0.386	1.38E-05	185.77E+6	230.77E+6
600	6E+10	0.405	1.44E-05	127.71E+6	162.71E+6
700	4E+10	0.423	1.48E-05	68.55E+6	96.05E+6
800	3E+10	0.442	1.48E-05	64.35E+6	84.35E+6
900	2E+10	0.461	1.48E-05	45.65E+6	60.65E+6
1000	1E+10	0.48	1.48E-05	11.32E+6	21.32E+6



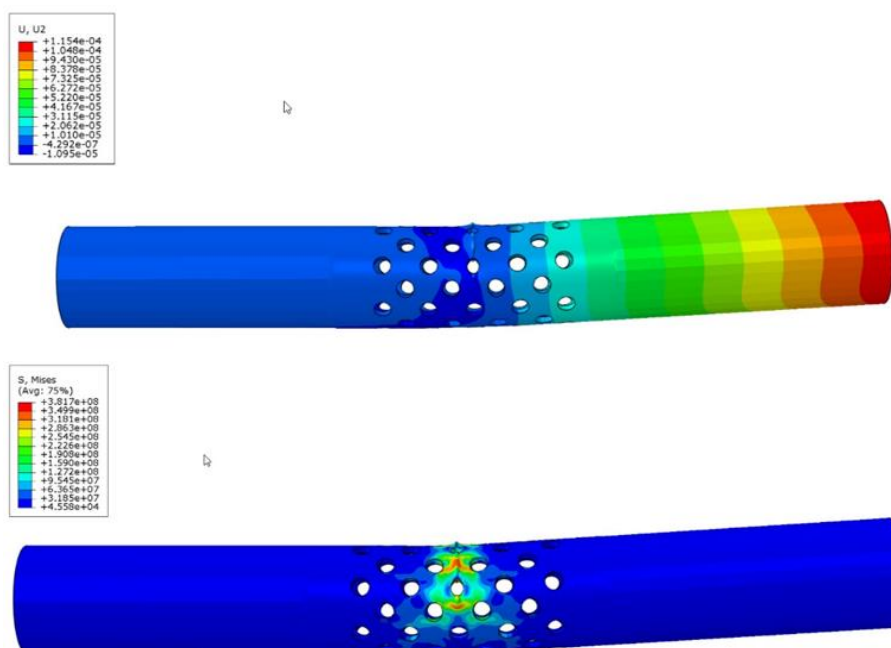
شکل ۲ الگوی شبکه بندی در لوله سوراخ‌دار جهت انجام شبیه‌سازی عددی فرایند خمکاری به کمک لیزر

در شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به صورت کانتورهای دمایی در حین تابش‌دهی و در مرحله خنک شدن لوله نشان داده شده است.



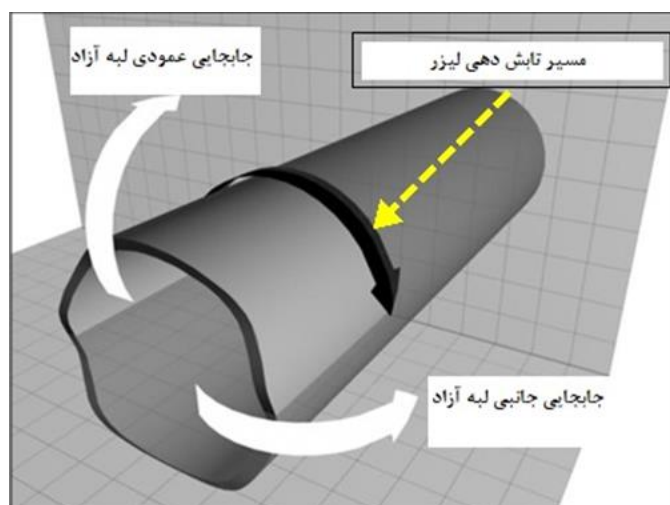
شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به صورت کانتورهای دمایی، (الف) در حین تابش‌دهی و (ب) در مرحله خنک شدن لوله

همچنین در شکل ۴ کانتورهای جابجایی و میدان تنش در لوله سوراخ‌دار خمکاری شده به کمک پرتوی لیزر نشان داده شده است.



شکل ۴ کانتورهای جابجایی و میدان تنش در لوله سوراخ‌دار خمکاری شده به کمک پرتوی لیزر، (الف) کانتور جابجایی و (ب) کانتور تنش باقیمانده

از آنجایی که در این مقاله اثر پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن لیزر بر جابجایی‌های عمودی و جانبی لبه آزاد لوله سوراخ‌دار خمکاری شده با لیزر بررسی می‌شود، در شکل ۵ شماتیک جابجایی‌های عمودی و جانبی لبه آزاد لوله نشان داده شده است.

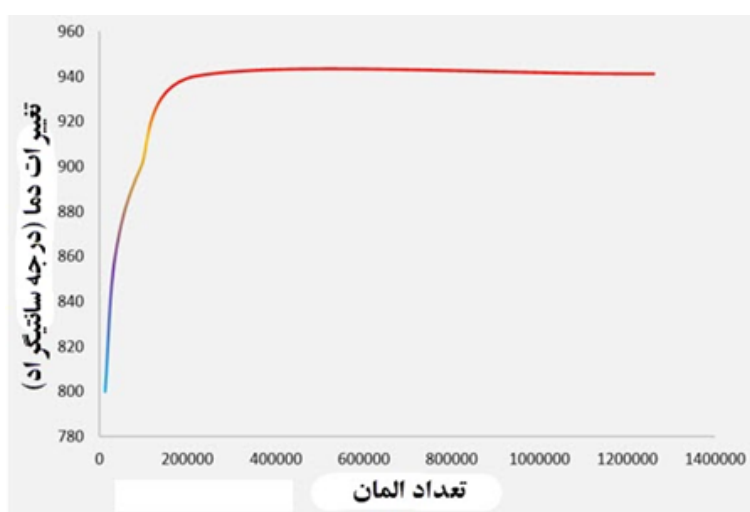


شکل ۵ شماتیک جابجایی‌های عمودی و جانبی لبه آزاد لوله سوراخ‌دار خمکاری شده با لیزر

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود منظور از جابجایی عمودی لبه آزاد لوله همان خمش اصلی مطلوب و مد نظر می‌باشد. از طرف دیگر، جابجایی جانبی لبه آزاد لوله به عنوان یک پدیده مضر و غیر مطلوب است که باعث کاهش دقت ابعادی لوله‌های سوراخ‌دار خمکاری شده با لیزر می‌شود و هر چه مقدار آن کمتر باشد مطلوب‌تر است.

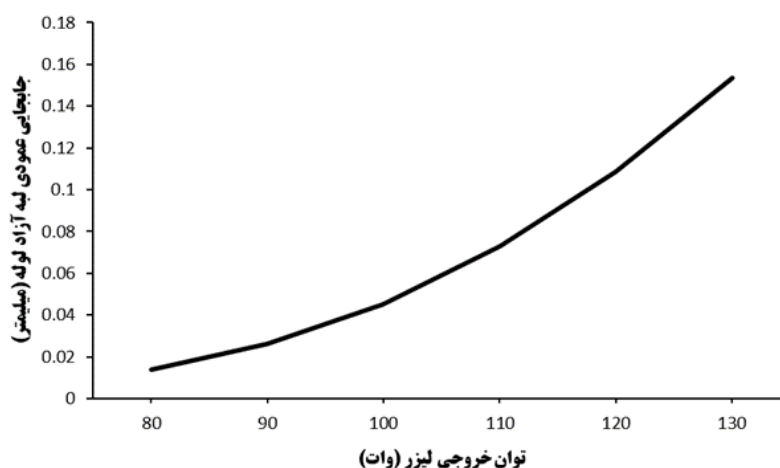
### ۳- نتایج و بحث

قبل از ارائه نتایج و بحث بر روی آن‌ها، لازم است اشاره شود شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق دقیقاً با شبیه‌سازی‌های انجام شده در مرجع [۱۷] که از تحقیقات پیشین همین نویسندگان بر روی خمکاری به کمک لیزر لوله‌های بدون سوراخ بوده است (دقت شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج تجربی مقایسه و تایید شدند) مشابه هستند و فقط هندسه لوله دارای سوراخ‌هایی در محل تابش‌دهی شده است. از آنجایی که در شکل ۶ نمودار تغییرات دمای لوله بر اساس تغییر تعداد المان‌ها (استقلال شبکه) مربوط به شبیه‌سازی‌های عددی فرایند خمکاری لوله سوراخ‌دار به کمک پرتوی لیزر نشان داده شده است.



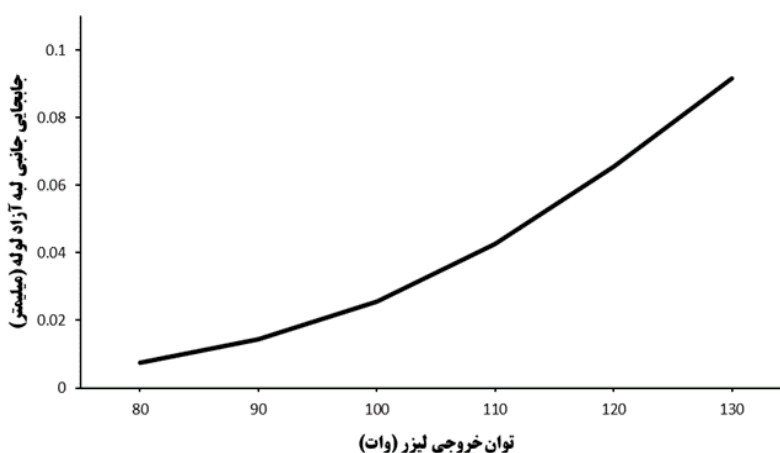
شکل ۶ نمودار تغییرات دمای لوله بر اساس تغییر تعداد المان‌ها در شبیه‌سازی‌های عددی فرایند خمکاری لوله سوراخ‌دار به کمک لیزر

فرایند استقلال شبکه یا پالایش شبکه برای بدست آوردن حالت بهینه مش‌بندی انجام می‌شود بدین صورت که هر بار با ریزتر کردن المان‌ها نتیجه کانتور دما استخراج می‌شود. این کار تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که ریزتر کردن اندازه المان‌ها در نتیجه کانتور دما تأثیر بیشتری نداشته باشد. در ادامه به بررسی اثر پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن لیزر بر جابجایی‌های عمودی و جانبی لوله خمکاری شده به کمک لیزر پرداخته می‌شود. در شکل ۷ تأثیر توان خروجی لیزر بر جابجایی عمودی لوله آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۷، سرعت اسکن لیزر ۲۱۲ میلی‌متر بر دقیقه و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



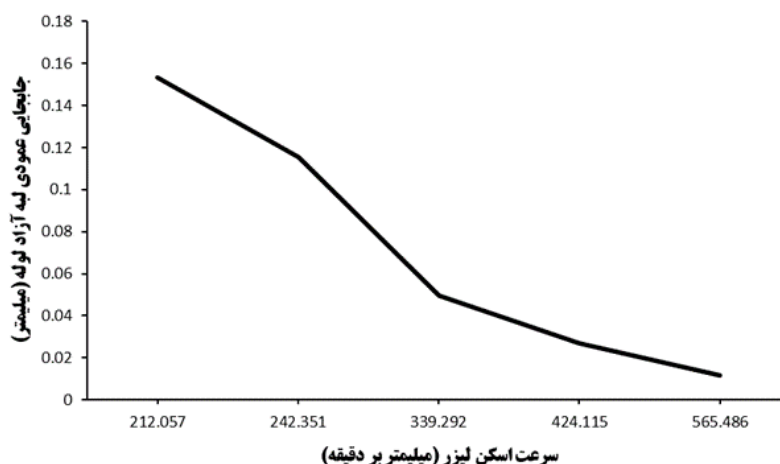
شکل ۷ اثر توان خروجی لیزر بر جابجایی عمودی لوله آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان خروجی لیزر جابجایی عمودی لوله آزاد لوله خمکاری شده نیز بیشتر می‌شود؛ علت این است که با افزایش توان خروجی لیزر، حرارت ورودی به لوله در محل تابش‌دهی بیشتر شده و کرنش‌های حرارتی و سپس کرنش‌های پلاستیک بیشتر می‌شوند. بنابراین با افزایش نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته که منجر به خمش لوله می‌شوند، جابجایی عمودی لوله آزاد لوله خمکاری شده نیز بیشتر می‌شود. همچنین در شکل ۸ تأثیر توان خروجی لیزر بر جابجایی جانبی لوله آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۸، سرعت اسکن لیزر ۲۱۲ میلی‌متر بر دقیقه و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



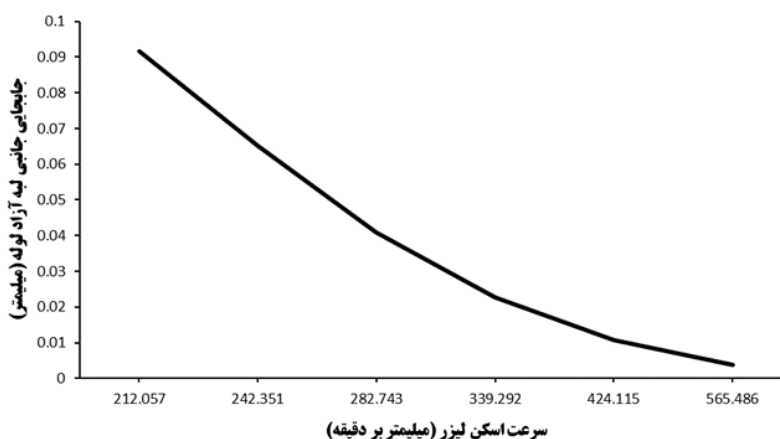
شکل ۸ اثر توان خروجی لیزر بر جابجایی جانبی لوله آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

ملاحظه می‌شود که با افزایش توان خروجی لیزر جابجایی جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده نیز بیشتر می‌شود؛ به عبارت دیگر پدیده نامطلوب جابجایی جانبی لبه آزاد لوله به واسطه افزایش توان خروجی لیزر افزایش می‌یابد. علت این است که همان‌طور که قبلاً گفته شد با افزایش توان لیزر حرارت ورودی به ورق زیاد می‌شود و کرنش‌های حرارتی و کرنش‌های پلاستیک نیز افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش کرنش‌های پلاستیکی که منجر به جابجایی جانبی لوله می‌شوند می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش توان لیزر جابجایی جانبی لیزر نیز زیاد می‌شود. در شکل ۹ اثر سرعت اسکن لیزر بر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۹، توان لیزر ۱۳۰ وات و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



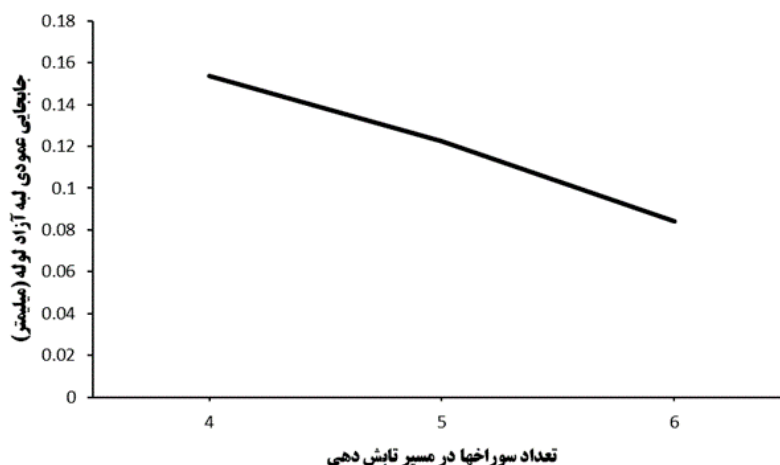
شکل ۹ اثر سرعت اسکن لیزر بر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت اسکن لیزر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله کاهش می‌یابد؛ علت این موضوع این است که با افزایش سرعت اسکن لیزر زمان کافی برای وارد شدن حرارت ناشی از تابش‌دهی لیزر بر روی لوله کاهش می‌یابد. با توجه به کاهش حجم حرارت ورودی به لوله، کرنش‌های حرارتی و کرنش‌های پلاستیک نیز در نواحی تابش‌دهی شده کاهش می‌یابند. بنابراین با توجه به کاهش نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته در لوله، جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نیز کاهش می‌یابد؛ همچنین در شکل ۱۰ اثر سرعت اسکن لیزر بر جابجایی جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۱۰، توان لیزر ۱۳۰ وات و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



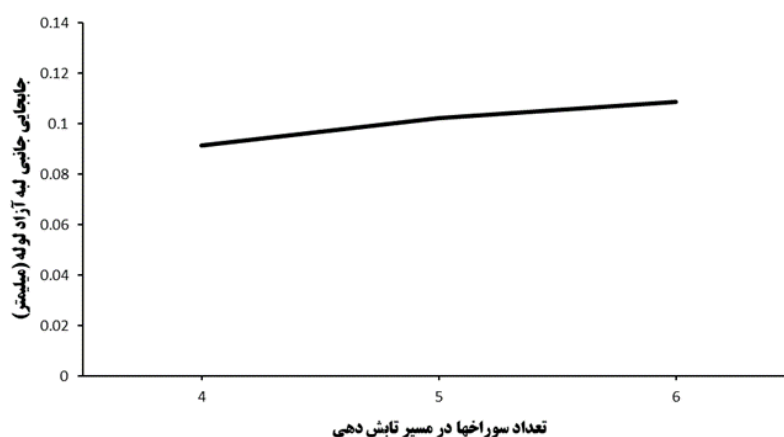
شکل ۱۰ اثر سرعت اسکن لیزر بر جابجایی جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

کاملاً واضح است که با افزایش سرعت اسکن لیزر جابجایی جانبی لبه آزاد لوله کاهش می‌یابد؛ علت این موضوع نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد کاهش حجم حرارت ورودی به لوله با افزایش سرعت اسکن لیزر می‌باشد. کم شدن حجم حرارتی ورودی به لوله منجر به کاهش نواحی تغییر شکل پلاستیک یافته در لوله شده و با توجه به اینکه بخشی از کرنش‌های پلاستیک ناشی از تابش‌دهی به کمک لیزر منجر به جابجایی‌های جانبی لوله می‌شود؛ بنابراین با کاهش کرنش‌های پلاستیک جابجایی جانبی لوله نیز کم می‌شود. در شکل ۱۱ اثر تعداد سوراخ‌های موجود در مسیر تابش‌دهی بر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۱۱، توان لیزر ۱۳۰ وات، سرعت اسکن لیزر ۲۱۲ میلی‌متر بر دقیقه و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۱ اثر تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی بر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی جابجایی عمودی لبه آزاد لوله کاهش می‌یابد؛ علت این است که با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی در واقع حجم ماده‌ای که شار حرارتی می‌پذیرد، کاهش یافته و میزان نواحی که دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند، کاهش می‌یابد و نهایتاً جابجایی عمودی لبه آزاد لوله نیز کم می‌شود. همچنین در شکل ۱۲ اثر تعداد سوراخ‌های موجود در مسیر تابش‌دهی بر جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شکل ۱۲، توان لیزر ۱۳۰ وات، سرعت اسکن لیزر ۲۱۲ میلی‌متر بر دقیقه و قطر پرتوی لیزر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۲ اثر تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی بر جابجایی جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده به کمک لیزر

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی جابجایی جانبی لبه آزاد لوله افزایش می‌یابد؛ دلیل این نتیجه این است که با افزایش تعداد سوراخ‌ها در مسیر تابش‌دهی لیزر در واقع نواحی با شرایط حرارتی غیر متعادل افزایش یافته و به دنبال آن پدیده جابجایی جانبی لوله نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عددی خمکاری به کمک لیزر لوله‌های سوراخ‌دار پرداخته شد. بدین منظور شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شدند. جهت بررسی فرایند خمکاری به کمک لیزر لوله‌های سوراخ‌دار، اثر مهمترین پارامترهای ورودی فرایند شامل توان خروجی لیزر، سرعت اسکن لیزر و تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی لوله بر جابجایی‌های عمودی و جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. جابجایی عمودی لبه آزاد لوله همان خمش اصلی لوله بود ولی جابجایی جانبی لبه آزاد یک پدیده و اثر نامطلوب بود که منجر به کاهش دقت ابعادی لوله‌های خمکاری شده به کمک لیزر می‌شد. در ادامه مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق ارائه خواهند شد:

- نتایج نشان دادند که با افزایش توان خروجی لیزر از ۸۰ تا ۱۳۰ وات، جابجایی عمودی لبه آزاد لوله خمکاری شده ۹۱ درصد افزایش یافت؛ علت این بود که با افزایش توان خروجی لیزر، حرارت ورودی به لوله در محل تابش‌دهی و به دنبال آن کرنش‌های پلاستیک بیشتر شدند که منجر به افزایش جابجایی عمودی گردید.
- از نتایج مشخص شد که با افزایش توان خروجی لیزر از ۸۰ تا ۱۳۰ وات، جابجایی جانبی لبه آزاد لوله خمکاری شده ۹۱/۹ درصد افزایش یافت؛ به علت این که با افزایش توان لیزر حرارت ورودی به ورق و به دنبال آن کرنش‌های پلاستیکی که منجر به جابجایی جانبی لوله می‌شدند، زیاد گردیدند.
- از نتایج ثابت شد که با افزایش سرعت اسکن لیزر از ۲۱۲ تا ۵۶۵ میلی‌متر بر دقیقه، جابجایی عمودی لبه آزاد لوله ۹۲/۵ درصد کاهش یافت؛ علت این بود که با افزایش سرعت اسکن لیزر زمان کافی برای وارد شدن حرارت ناشی از تابش‌دهی لیزر بر روی لوله و به دنبال آن کرنش‌های حرارتی و نتیجتاً کرنش‌های پلاستیک نیز در نواحی تابش‌دهی شده کاهش یافتند.
- نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت اسکن لیزر ۲۱۲ تا ۵۶۵ میلی‌متر بر دقیقه، جابجایی جانبی لبه آزاد لوله ۹۵/۹ درصد کاهش یافت؛ علت این موضوع نیز همان‌طور که قبلاً گفته شد کاهش حجم حرارت ورودی به لوله با افزایش سرعت اسکن لیزر بود.
- از نتایج به دست آمد که با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی از ۴ تا ۶ سوراخ، جابجایی عمودی لبه آزاد لوله ۴۵ درصد کاهش یافت؛ علت این بود که با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی در واقع حجم ماده‌ای که شار حرارتی می‌پذیرفت کاهش یافته و نهایتاً جابجایی عمودی لبه آزاد لوله نیز کم شد.
- نتایج نشان دادند که با افزایش تعداد سوراخ‌های واقع بر مسیر تابش‌دهی از ۴ تا ۶ سوراخ، جابجایی جانبی لبه آزاد لوله ۱۵/۹ درصد افزایش یافت؛ دلیل این نتیجه این بود که با افزایش تعداد سوراخ‌ها در مسیر تابش‌دهی لیزر در واقع نواحی با شرایط حرارتی غیر متعادل افزایش یافته و به دنبال آن پدیده جابجایی جانبی لوله نیز افزایش یافت.

#### References

- [1] Khatir FA, Sadeghi MH, Akar S. Investigation of surface integrity in laser-assisted turning of AISI 4340 hardened steel: Finite element simulation with experimental verification. *Optics & Laser Technology*. 2022 Mar 1;147:107623. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107623
- [2] Khatir FA, Sadeghi MH, Akar S. Investigation of surface roughness in laser-assisted hard turning of AISI 4340. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;38:3085-90. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.480
- [3] Safari M, Alves de Sousa R, Joudaki J. Comprehensive assessment of laser tube bending process by response surface methodology. *steel research international*. 2023 Feb;94(2):2200230. doi: 10.1002/srin.202200230
- [4] Imhan KI, Baharudin BT, Zakaria A, Ismail MI, Alsabti NM, Ahmad AK. Improve the material absorption of light and enhance the laser tube bending process utilizing laser softening heat treatment. *Optics & Laser Technology*. 2018 Feb 1;99:15-8. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.10.012

- [5] Hao N. On the process parameter of laser tube bending. In 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering 2010 Jun 26 (pp. 5880-5883). IEEE. doi: [10.1109/MACE.2010.5534296](https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5534296)
- [6] Imhan KI, Baharudin BT, Zakaria A, Alsabti NM, Ahmad AK. An analytical and experimental investigation of average laser power and angular scanning speed effects on laser tube bending process. In MATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 95, p. 05008). EDP Sciences. doi: [10.1051/mateconf/20179505008](https://doi.org/10.1051/mateconf/20179505008)
- [7] Imhan KI, Baharudin BT, Zakaria A, Ismail MI, Alsabti NM, Ahmad AK. Investigation of material specifications changes during laser tube bending and its influence on the modification and optimization of analytical modeling. Optics & Laser Technology. 2017 Oct 1;95:151-6. doi: [10.1016/j.optlastec.2017.05.020](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.05.020)
- [8] Guan YJ, Zhang HM, Sun S, Zhao GQ. Numerical Study on Influences of Process Parameters on Laser Tube Bending. Advanced Materials Research. 2011 Jan 31;148:590-4. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.148.590](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148.590)
- [9] Imhan KI, Baharudin BT, Zakaria A, Ismail MI, Alsabti NM, Ahmad AK. Features of laser tube bending processing based on laser forming: a review. Journal of Lasers, Optics & Photonics. 2018 Feb;5(1):1000174. doi: [10.4172/2469-410X.1000174](https://doi.org/10.4172/2469-410X.1000174)
- [10] Hao NH, Gai YL. On the Three-Dimensional Laser Bending of Metal Tubes. Applied Mechanics and Materials. 2012 Oct 5;197:297-301. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.197.297](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.197.297)
- [11] Li W, Yao YL. Laser bending of tubes: mechanism, analysis, and prediction. J. Manuf. Sci. Eng.. 2001 Nov 1;123(4):674-81. doi: [10.1115/1.1390611](https://doi.org/10.1115/1.1390611)
- [12] Khandandel SE, Seyedkashi SM, Hoseinpour Gollo M. Effect of cooling on bending angle and microstructure in laser tube bending with circumferential scanning. Iranian Journal of Materials Forming. 2020 Apr 1;7(1):14-23. doi: [10.22075/IJMF.2020.17161.1348](https://doi.org/10.22075/IJMF.2020.17161.1348)
- [13] Li F, Liu S, Shi A, Chu Q, Shi Q, Li Y. Research on laser thread form bending of stainless steel tube. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2019 Jun 1;20(6):893-903. doi: [10.1007/s12541-019-00573-8](https://doi.org/10.1007/s12541-019-00573-8)
- [14] Guan Y, Yuan G, Sun S, Zhao G. Process simulation and optimization of laser tube bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013 Mar;65(1):333-42. doi: [10.1007/s00170-012-4019-1](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4019-1)
- [15] Safari M. A study on the laser tube bending process: Effects of the irradiating length and the number of irradiating passes. Iranian Journal of Materials Forming. 2020 Apr 1;7(1):46-53. doi: [10.22075/IJMF.2020.16488.1277](https://doi.org/10.22075/IJMF.2020.16488.1277)
- [16] Zhang P, Liu H. Thermal deformation behaviors of laser rectangular tube bending. In 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 2010 Aug 24 (Vol. 6, pp. 398-401). IEEE. doi: [10.1109/CMCE.2010.5559737](https://doi.org/10.1109/CMCE.2010.5559737)
- [17] Safari M. A study on main and lateral bending angles in laser tube bending process. Journal of Stress Analysis. 2021 Mar 1;5(2):33-40. doi: [10.22084/jrstan.2021.23127.1163](https://doi.org/10.22084/jrstan.2021.23127.1163)