علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

/http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی و بهینه‌سازی زاویه خم در خم‌کاری با لیزر به روش سطح پاسخ

مقاله پژوهشی

چکیده

فرآیند شکل‌دهی با لیزر، یک موضوع تحقیقاتی و صنعتی نسبتا جدید است. مواد استفاده‌شده در پژوهش‌های انجام شده از سوی محققان، نوعا تیتانیم، منیزیم، فولاد و آلیاژهای آن بوده است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن انعکاس سطحی بالای پرتو لیزر و ضریب جذب پایین، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، ابتدا نحوه و میزان تأثیر پارامترهای مختلف فرآیندی بر روی زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با لیزر ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شد. سپس، به‌منظور دست‌یابی به حداکثر زاویه خم، تمام پارامترها به روش سطح پاسخ (RSM) بهینه‌سازی شدند. علاوه بر این، تکرارپذیری فرآیند به همراه صحت و اعتبار شبیه‌سازی با اندازه‌گیری دقیق زاویه خم با انجام آزمایش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که ضخامت ورق بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد، به‌طوری‌که با افزایش ۱mm در ضخامت ورق، مقدار زاویه خم ۷۷٪ کاهش می‌یابد. همچنین با بهینه‌سازی پارامترها، حداکثر زاویه خم ۴/۹۱۱ درجه به دست آمد.

واژه‌های کلیدی خم‌کاری با لیزر، بهینه‌سازی، زاویه خم، شبیه‌سازی اجزای محدود، روش سطح پاسخ (RSM).

Investigating the Effect of Process Parameters and Optimization of Bending Angle in Laser Bending

Abstract The laser forming process is an emerging area of research and industry, primarily focused on materials like titanium, magnesium, steel, and their alloys. However, aluminum alloys have received less attention due to challenges related to surface reflection and low absorption coefficients. In this research, the effect of different process parameters on bending angle in the laser bending of Al 6061 sheets was investigated by experiments and finite element simulation. The parameters were optimized by Response Surface Method (RSM) to achieve the maximum bending angle. In addition, the reproducibility of the process, as well as the accuracy and validation of the simulation, were examined by conducting experiments that involved accurate measurement of the bending angle. The results revealed that the sheet thickness had the most significant effect on the bending angle. Specifically, with an increase of 1 mm in the sheet thickness, the bending angle decreased by 77%. Additionally, through process parameter optimization, the maximum bending angle achieved was 4.911 degrees.

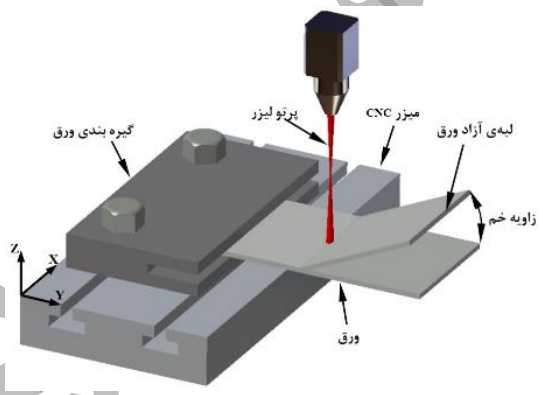
Keywords: Laser bending, Optimization, Bending angle, Finite element simulation, Response Surface Method (RSM)

مقدمه

به‌کارگیری روش‌های سنتی مانند خم‌کاری با قالب، برای خم‌کاری و شکل‌دهی قطعات بزرگ مانند بدنه کشتی‌ها و همچنین تولید قطعات با تعداد محصول کم، با محدودیت‌های فراوانی همراه می‌باشد. این محدودیت‌ها موجب تشویق صنعت‌گران به بهره بردن از روش‌های جایگزین مناسب گردیده است.

فرآیند شکل‌دهی با استفاده از پرتو لیزر یک روش شکل‌دهی غیر تماسی است که بدون استفاده از ابزار سخت و نیروی خارجی، از انرژی لیزر برای شکل‌دهی و خم‌کاری ورق‌های فلزی استفاده می‌شود. توانایی شکل‌دهی فلزات با استحکام بالا، عدم استفاده از مجموعه ابزارها، انعطاف‌پذیری سیستم و قابلیت خودکارسازی خوب توأم با سایر کاربردهای لیزر مانند برش و جوش‌کاری ازجمله مزیت‌های قابل‌توجه این روش در مقایسه با سایر فرآیندهای شکل‌دهی سنتی است. این مزیت‌ها عمدتا ناشی از استفاده از پرتو لیزر به‌عنوان بخشی از ابزار تغییر شکل در فرآیند می‌باشد [1]. امروزه این فرآیند در صنایع مختلف هوافضا، کشتی‌سازی و صنعت میکروالکترونیک به کار گرفته می‌شود [2]. در این فرآیند، با پرتو لیزر با سرعت مشخص بر روی سطح ورق یک گرادیان دمایی در راستای ضخامت ورق ایجاد می‌شود. این امر، موجب ایجاد تنش‌های حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌شود. اگر میزان حرارت دهی موضعی به‌اندازه‌ای باشد که تنش حرارتی ایجاد شده در قطعه از حد الاستیک ماده بیشتر گردد، در این حالت کرنش‌های حرارتی تبدیل به کرنش‌های پلاستیک فشاری به‌صورت موضعی می‌شوند. ابتدا در اثر کرنش‌های پلاستیک کششی در سطوح بالایی که بزرگ‌تر از کرنش ایجاد شده در سطوح پایین هستند، یک خم منفی در قطعه ایجاد می‌شود و لبه ورق به

سمت پایین خم می‌شود، اما با گذشت زمان و خنک شدن قطعه، سطوح بالایی آن بیشتر منقبض می‌گردد و درنهایت خم مثبت در قطعه و رو به بالا به‌صورت دائمی ایجاد می‌شود [3]. اساس فرآیند شکل‌دهی با پرتو لیزر شکل‌دهی ورق با اعمال تنش‌های حرارتی است که در اثر تابش پرتو لیزر در آن القا می‌شود. نحوه توزیع دمای القا شده در اثر تابش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، مشخص کننده مکانیزم شکل‌دهی است. توزیع دمایی در قطعه‌کار به پارامترهای فرآیند نظیر توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو و ضخامت قطعه‌کار بستگی دارد [4, 5]. گیگر و ولرتسن [6] سه مکانیزم فرآیند شکل‌دهی با پرتو لیزر را که عبارت از مکانیزم‌های گرادیان دمایی، کمانش و کوتاه کردن است، شناسایی نمودند. آنان از مکانیزم گرادیان دمایی در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی نمودند. شکل (۱) نمایی از فرآیند خم‌کاری با لیزر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ تصویر شماتیک از فرآیند خم‌کاری با اشعه لیزر

اولین فعالیت‌ها در استفاده از لیزر به‌منظور شکل‌دهی ورق‌های فلزی در سال ۱۹۸۶ توسط نامبا انجام شد [7]. پس از آن، بسیاری از محققان از پرتو لیزر به‌عنوان ابزاری برای شکل‌دهی استفاده کرده‌اند و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شد. ریاحی و همکاران [8] به بررسی اثر توزیع شار حرارتی یکنواخت و گوسی در اندازه‌های مختلف توان، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر بر زاویه خم پرداختند. ورق استفاده شده در این مطالعه از یک ورق دولایه از جنس (Al/Sic) بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع شار حرارتی یکنواخت، زاویه خم بیشتری نسبت به توزیع شار حرارتی گوسی ایجاد می‌کند. یانجین و همکاران [9] اثر خواص مواد را در فرآیند خم‌کاری با لیزر صفحه فلزی از جنس فولاد مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، ضریب انبساط حرارتی رابطه مستقیم با مقدار شکل‌دهی دارد. همچنین افزایش ضریب هدایت حرارتی عامل محدود کننده شکل‌دهی نهایی است. صفری و همکاران [10] شکل‌دهی سطوح استوانه‌ای با شعاع انحنای دلخواه را بر روی ورق فولاد کم‌کربن به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق یاد شده پارامترهای مربوط به لیزر با توجه به شرایط دستگاه لیزر ثابت فرض شد و پارامتر لازم برای شکل‌دهی سطح ورق به‌صورت استوانه‌ای با شعاع انحنای دلخواه پیشنهاد و معرفی شد. از آنجایی که فرآیند شکل‌دهی با لیزر ازجمله فرآیندهای شکل‌دهی بدون قالب می‌باشد، تولید قطعات با هندسه مشخص در آن پیچیده است زیرا در این فرآیند باید پارامترهای لیزر و ورق اولیه طوری تنظیم شود که منجر به تولید قطعه با هندسه مشخص شود. باوجود چندین پارامتر متغیر، دست‌یابی به یک زاویه خم مشخص در فرآیند خم‌کاری با لیزر پیچیده می‌باشد. در این زمینه تحقیقاتی توسط سایر محققان انجام شده است. به‌طور نمونه، یک مطالعه تجربی درزمینه‌ی اثر عوامل مؤثر بر خم‌کاری ورق‌های فلزی از جنس آلومینیوم و فولاد توسط شیچون و همکارش [3] صورت گرفته است. به‌این‌ترتیب، پارامترهای مؤثر بر زاویه خم به سه دسته‌ی پارامترهای وابسته به انرژی لیزر، پارامترهای وابسته به جنس ورق و پارامترهای هندسی ورق تقسیم گردید. حسین‌پور و همکاران [11] در یک مطالعه تجربی و آماری با استفاده از یک لیزر نئودیوم-یاگ پالسی، اثر پارامترهای فرآیندی مانند خواص ماده، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن پرتو لیزر، ضخامت ورق و تعداد اسکن پرتو لیزر را بر زاویه خم بررسی کردند. در این مطالعه از دو جنس ورق فولاد St-12 و فولاد ۳۰۴ برای انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای تعداد اسکن پرتو لیزر، جنس ماده، ضخامت ورق، سرعت اسکن و قطر پرتو لیزر به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر روی خم ورق دارند. مولای و همکاران [12] یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی زاویه خم برای ورق‌های AISI 304 پیشنهاد کردند. علاوه بر این، آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند مانند توان لیزر و سرعت اسکن را بر زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با لیزر بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی زاویه خم دقیق را برای فرآیند خم‌کاری با لیزر چند پاسه پیش‌بینی می‌کند. همچنین میزان زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با لیزر چند پاسه به پارامترهای توان لیزر و سرعت اسکن بستگی دارد. در سال ۲۰۲۰ بونپوانگ و همکاران [13] بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند خم‌کاری با لیزر را با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD) برای ورق‌های فولاد ضدزنگ بررسی کردند. علاوه بر این، آن‌ها اثر سه پارامتر نرخ تکرار پالس، توان لیزر و زمان اسکن را هم مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که زاویه خم با افزایش نرخ تکرار پالس و توان لیزر افزایش، اما زاویه خم با افزایش زمان اسکن کاهش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که توان لیزر بالاتر و زمان اسکن کمتر تأثیر معنی‌داری بر زاویه خم دارد. در همان سال بهرا و همکاران [14] از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به حداکثر زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با لیزر استفاده کردند. چهار پارامتر ورودی توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو لیزر و مدت زمان پالس برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر زاویه خم که می‌توان با در نظر گرفتن این پارامترهای بهینه به دست آورد، ۲۰ درجه بود. علاوه بر این، از بین چهار پارامتر مورد بررسی در این مطالعه، قطر پرتو لیزر بیشترین تأثیر را بر زاویه خم دارد. ونکادشواران و همکاران [15] از روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی رابطه بین زاویه خم و پارامترهای فرآیند مانند توان لیزر، قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن و ضخامت ورق در فرآیند خم‌کاری با لیزر ورق ALSI 304 استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر بهینه پارامترها باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه کل عملیات برای یک زاویه خم خاص می‌شود. در سال ۲۰۱۳ زهرانی و مراچی [16] پارامترها را برای به دست آوردن حداکثر زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با لیزر ورق فولادی AISI 1010 از طریق روش سطح پاسخ (RSM) و با استفاده از طرح باکس بنکن (BBD) مدل‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتیجه این بهینه‌سازی منجر به ارائه ترکیب‌های پارامتری بهینه شده است که در آن با کنترل پارامترها، زاویه خم حداکثر خواهد بود. روحی و همکاران [17] تأثیر چهار پارامتر فرآیند شامل ضخامت ورق، توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن را بر روی شکل‌دهی با لیزر ورق Al6061-T6 بررسی کردند. آن‌ها از روش سطح پاسخ (RSM) به‌منظور محدود کردن آزمایش‌های مورد نیاز برای کاهش هزینه‌ها و تعیین

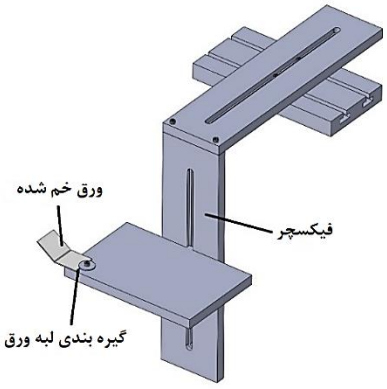
اثر پارامترها بر زاویه خم استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان لیزر و زاویه اسکن رابطه مستقیم با زاویه خم دارند، درحالی‌که ضخامت ورق و سرعت اسکن رابطه عکس دارند. در سال ۲۰۱۶ تأثیر گرادیان دما در ورق‌های آلومینیوم Al 6061-T6 برای سه ضخامت بر زاویه خم توسط روحی و همکاران [18] مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر چهار پارامتر شامل توان لیزر، سرعت اسکن، تعداد اسکن و ضخامت ورق بر گرادیان دمایی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) مطالعه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که گرادیان دما رابطه مستقیم با میزان زاویه خم ایجاد شده در ورق دارد. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که از بین پارامترهای ورودی، توان لیزر و ضخامت ورق تأثیر مستقیم دارند و سرعت اسکن و قطر پرتو تأثیر معکوس بر بزرگی گرادیان دما دارند. در سال ۲۰۲۰ خنداندل و همکاران [19] ایده جدیدی بر اساس روش اسکن دایره‌ای ارائه کردند که در قالب دو طرح گام‌به‌گام و معکوس ارائه شده است. با توجه به نتایج آن‌ها، استخراج دقیق مسیر اسکن لیزری برای تمام شکل‌های دوبعدی و سه‌بعدی آسان خواهد بود. از آنجایی که این استراتژی قابل برنامه‌ریزی است، می‌توان تنها با تغییر پارامترهای ورودی، از این روش برای طراحی و پیاده‌سازی شکل‌های مختلف استفاده کرد. تحقیق دیگری توسط خنداندل و همکاران [20] انجام شده است که در آن تأثیر خنک‌سازی اجباری بر شکل‌دهی لوله لیزر به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که خنک‌سازی موضعی با آب، مدت زمان خم ۱ درجه را در مقایسه با خنک‌سازی در دمای محیط، حدود ۸ تا ۱۳ برابر کاهش می‌دهد.

در مقاله حاضر چگونگی و میزان تأثیر پارامترهای مختلف در فرآیند خم‌کاری با لیزر مانند پارامترهای انرژی لیزر و پارامترهای هندسی ورق بر روی زاویه خم و همچنین بهینه کردن مقدار آن‌ها به‌منظور دست‌یابی به حداکثر زاویه خم، با استفاده از روش‌های تجربی، عددی و آماری بر روی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب، مسئله مورد تحقیق در این مقاله، رسیدن به درک درست نسبت به رفتار پارامترهای مختلف فرآیند بر زاویه خم و دست‌یابی به بیش‌ترین مقدار زاویه خم با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای موجود فرآیند می‌باشد.

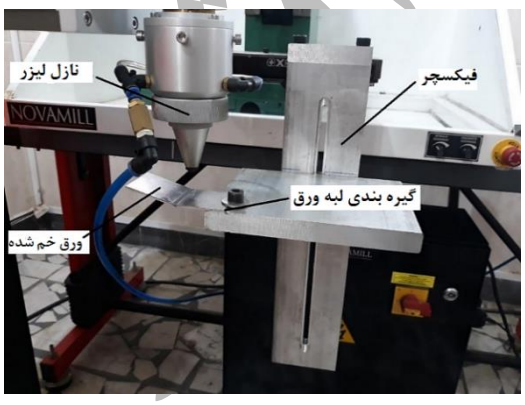
مراحل انجام پژوهش

مواد و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG مدل ۴۲۹۷ PMT با حداکثر توان ۴۰۰W استفاده شد. کله‌گی دستگاه ثابت بوده و حرکت قطعه کار توسط یک میز با کنترل عددی انجام می‌شد. ورق استفاده شده از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابعاد ۲ × ۵۰ × ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. پس از برش قطعه کار، سطح آن با محلول استون تمیز شد. همچنین سطح ورق توسط اسپری گرافیت پوشانده شد تا ضریب جذب پرتو لیزر افزایش یابد. علاوه بر این، برای محدود کردن لبه ورق و قرار دادن قطعه کار در زیر نازل لیزر، در ابتدا یک فیکسچر طراحی و ساخته شد که می‌تواند در راستای عمودی (z) تنظیم و جابجا شود. از جابجایی در جهت z برای تنظیم قطر پرتو لیزر استفاده شده است. شکل (۲) فیکسچر طراحی شده را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان زاویه خم ایجاد شده در قطعه کار از یک دستگاه اندازه‌گیری مختصات CMM مدل Mora3 با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر استفاده شد. با توجه به این‌که فرآیند خم‌کاری با لیزر یک فرآیند حرارتی است، ایجاد اعوجاج حرارتی در لبه آزاد ورق امری اجتناب‌ناپذیر است. ازاین‌رو، مقدار خطای ناچیزی بین ۰/۰۲۷- - ۰/۰۴۱ درجه هنگام اندازه‌گیری زاویه با استفاده از دستگاه CMM در قطعات خم شده مشاهده شد. روش اندازه‌گیری زاویه خمش با استفاده از دستگاه CMM بدین صورت بوده است که در ابتدا موقعیت ۴ تا ۵ نقطه بر روی هر یک از صفحات خم شده ورق مشخص شد. سپس با تعیین صفحه عبوری از طریق نقاط شناسایی شده، زاویه بین دو صفحه در نرم‌افزار Inca 3D محاسبه گردید. شکل (۳) نمونه از قطعه خم‌کاری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک فیکسچر طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها



شکل ۳ تجهیزات استفاده شده در انجام آزمایش‌ها

شبیه‌سازی عددی

در مقاله حاضر از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS) نسخه

۲۰۱۷ به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری با لیزر استفاده شده است. قابلیت تحلیل ترکیبی مکانیکی و حرارتی این نرم‌افزار به‌طور هم‌زمان امکان تحلیل و مدل‌سازی را در این فرآیند فراهم کرده است [21]. شار حرارتی ایجاد شده توسط پرتو لیزر منجر به تغییرات دمای بالا می‌شود که بر خواص مواد تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، از خواص وابسته به دما در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. خواص فیزیکی و مکانیکی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین از شرایط مرزی مکانیکی برای محدود کردن جابجایی ورق در طول فرآیند شبیه‌سازی استفاده شده است. به این منظور، دو نوع گیره‌بندی یک‌سرگیردار و گیره‌بندی V شکل مرسوم است. در روش گیره‌بندی V شکل قطعه‌کار بر روی دو پایه ساده نگه‌داشته می‌شود. در روش گیره‌بندی یک‌سرگیردار، یک انتهای ورق توسط گیره بسته می‌شود و تمام شش درجه آزادی آن محدود می‌گردد. جابجایی ورق به‌منظور ایجاد زاویه خم از انتهای آزاد ورق اتفاق می‌افتد. در این مطالعه در انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی از شیوه گیره‌بندی یک‌سر گیردار به‌منظور مقید کردن حرکت ورق استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات ماده وابسته به دما برای AA 6061 T6 [22]

T (C)	Yield stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	T (C)	Specific heat (J/Kg C)	Density (Kg/m^3)	T (C)	Conductivity (W/m C)
۲۰	۱۲۵	۷۰	۲۰	۸۹۸	۲۷۵۰	۲۰	۱۷۰
۱۰۰	۹۵	۷۰	۱۲۰	۹۵۱	۲۷۳۰	۵۸۵	۲۲۰
۲۰۰	۵۵	۶۱	۲۲۰	۱۰۰۳	۲۷۱۰	-	-
۳۰۰	۲۷	۵۵/۶	۳۲۰	۱۰۵۵	۲۶۹۰	-	-
۴۰۰	۱۵	۴۹/۳	۴۲۰	۱۱۰۸	۲۶۶۰	-	-
۵۰۰	۵	۴۱/۳	۵۸۷	۱۱۹۵	۲۶۳۰	-	-
۶۰۰	۵	۵	۶۴۴	۱۲۰۰	۲۴۵۰	-	-

برای مدل کردن منبع حرارت لیزر با توزیع حرارت گوسی شکل، لازم است منبع حرارتی به‌وسیله‌ی یک زیر برنامه DFLUX به زبان فرترن به نرم‌افزار آباکوس داده شود. زیربرنامه DFLUX به‌منظور تعریف شار حرارتی با توزیع غیریکنواخت و به‌صورت تابعی از موقعیت، زمان و دما در تحلیل مسائل انتقال حرارت استفاده می‌شود. مقدار چگالی شار حرارتی وارد بر سطح از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

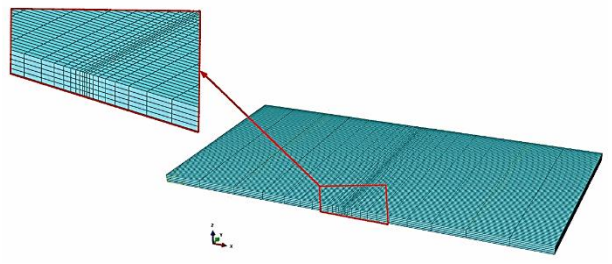
$$I = \frac{2AP}{\pi r^2} exp(-\frac{2r_1^2}{r^2}) \qquad (۱)$$

بنابراین مقدار شار حرارتی متوسط در محدوده قطر اشعه لیزر از انتگرال‌گیری تابع شار حرارتی در دامنه شعاع پرتو لیزر محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$I_m = \frac{1}{\pi r^2}\int_0^r I(2\pi r_1)dr_1$$
$$= \frac{2\pi}{\pi r^2}\int_0^r \frac{2AP}{\pi r^2} exp(-\frac{2r_1^2}{r^2})(r_1)dr_1 = \frac{0/865AP}{\pi r^2} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا A ضریب جذب سطح، P توان خروجی لیزر، r شعاع پرتو لیزر و r_1 فاصله بین نقطه مورد بررسی و مرکز پرتو لیزر است [9].

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی با لیزر، از المان‌های نوع C3D8T (المان هشت گره‌ای کوپل حرارتی- با جابجایی ۳ محوره) برای شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. علاوه بر این، به‌منظور نمایش دقیق شیب حرارتی از تعداد پنج المان در راستای ضخامت ورق استفاده شده است (شکل ۴). برای به‌دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی، از همگرایی تنش در راستای عبور پرتو لیزر استفاده شده است. از این‌رو، برای به‌دست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان، مدل‌هایی با اندازه دانه‌بندی مختلف، شبیه‌سازی شد. اندازه شبکه به‌صورت مرحله‌ای کاهش یافت تا نتایج مورد نظر همگرا گردد. با توجه به نتایج به دست آمده، با کاهش اندازه از ۰/۴ به ۰/۲mm تغییر محسوسی در توزیع تنش معادل به وجود می‌آید، در حالی که اختلاف توزیع تنش با تغییر اندازه شبکه از ۰/۱ به ۰/۲ mm کمتر از ۰/۲ درصد است. این در حالی است که زمان اجرای شبیه‌سازی با المان ۰/۱mm، بیش از دو برابر زمان اجرای شبیه‌سازی با المانی به ابعاد ۰/۲ است؛ بنابراین اندازه المان ۰/۲mm به‌عنوان اندازه مناسب برای شبیه‌سازی استفاده شد (شکل ۵). تعداد کل المان استفاده شده برای مدل ۱۱۵۰۰ می‌باشد.



شکل ۴ شبکه‌بندی مدل سه‌بعدی

بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

مدل‌سازی رفتاری فرآیند روشی است که می‌تواند با حذف آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه، دقت قابل قبولی را ارائه دهد. یکی از متداول‌ترین روش‌های مدل‌سازی رفتاری، روش سطح پاسخ (RSM) است. روش سطح پاسخ (RSM) شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی است که برای ساخت مدل‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از به‌کارگیری این روش، تعیین یک رابطه بین پاسخ (Y) و تعدادی از متغیرهای قابل کنترل یا ورودی می‌باشد که با $X_1, X_2, \ldots, X_K$ نمایش داده می‌شود. مدل برازش به‌صورت ترکیبی از ضریب تأثیر عوامل ورودی در خود آن عوامل تعریف می‌شود. این مدل در حالت کلی، طبق معادله (۴) تعریف می‌شود.

$$Y = \beta_o + \sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k}\beta_{ij}x_i^2 + \sum_i\sum_j \beta_{ij}x_i x_j + \varepsilon \qquad (۴)$$

در این معادله β_O ضریب تأثیر عوامل ورودی، β_i عامل مؤثر بر پاسخ و k تعداد عوامل هستند. در مدل برازش از پارامترهایی استفاده می‌شود که دارای تأثیر معنی‌داری بر متغیر پاسخ باشند [23]. روش‌های سطح پاسخ (RSM) می‌توانند بسته به کاربردشان در طرح آزمایش به روش‌های متفاوتی ازجمله طراحی باکس بنکن (BBD) و طراحی ترکیب مرکزی (CCD) تقسیم می‌شود. در این مقاله به‌منظور بهینه‌سازی و ارزیابی تأثیر پارامترها در فرآیند خم‌کاری با لیزر از طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. همچنین در مطالعه حاضر از نرم‌افزار Design-Expert- 11 برای طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این روش نسبت به روش طراحی باکس بنکن (BBD) این است که در RSM تمامی پارامترها در پنج سطح بررسی می‌شوند. این پنج سطح به‌صورت (-α، -1، 0، +1، +α) کدگذاری می‌شوند [24]. به‌طور کلی تعداد نقاط طراحی به روش ترکیب مرکزی (CCD) با معادله (۳) تعیین می‌شود.

$$n = 2^k + k + n_O \qquad (۳)$$

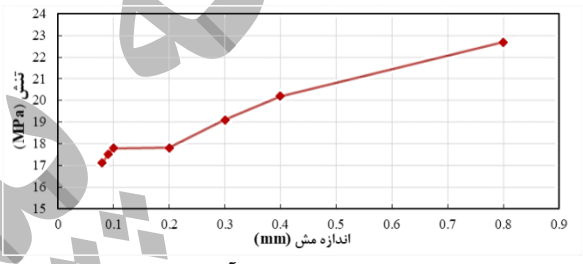
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

/http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد

در این رابطه no برابر با تعداد نقاط مرکزی می‌باشد. طراحی به شیوه ترکیب مرکزی از ترکیب یک طراحی مرتبه اول عاملی 2^k به تعداد 2k از نقاط طراحی اضافی موسوم به نقاط محوری و no نقاط مرکزی به‌دست می‌آید. با تعریف هشت پارامتر و تعیین پنج سطح برای هر عامل تعداد آزمایش‌ها به‌منظور بهینه‌سازی به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD) برابر ۲۸۲ آزمایش خواهد بود. در مقاله حاضر کلیه ۲۸۲ آزمایش به‌منظور بهینه‌سازی زاویه خم، شبیه‌سازی شد. جدول (۲) پارامترهای انتخاب شده و مقادیر مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. همان طوری که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، زمان استپ به‌عنوان یک پارامتر مستقل در نظر گرفته شد. زمان استپ، مقدار زمانی است که اشعه لیزر از لبه ورق به‌عنوان نقطه شروع، عرض ورق را طی می‌کند و مجدد به نقطه اولیه برمی‌گردد تا پاس بعدی را شروع کند. از آنجایی که فرآیند خم‌کاری با لیزر یک فرآیند چند پاسه است، بنابراین فاصله‌ی زمانی بین دو پاس متوالی می‌تواند مورد توجه و بررسی قرار گیرد.



شکل ۵ اندازه شبکه به‌دست آمده برای المان

جدول ۲ پارامترهای مورد بررسی و سطوح متناظر آن‌ها

فاکتورها	واحد	علامت	سطح‌ها				
			$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
توان	W	P	۳۷۵	۴۰۰	۴۲۵	۴۵۰	۴۷۵
قطر پرتو لیزر	mm	D	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵
سرعت اسکن	mm/s	V	۱۴	۱۸	۲۲	۲۶	۳۰
زمان استپ	s	t	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
تعداد اسکن	-	n	۳	۵	۷	۹	۱۱
طول ورق	mm	L	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰
عرض ورق	mm	W	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰
ضخامت ورق	mm	S	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴

نتایج و بحث

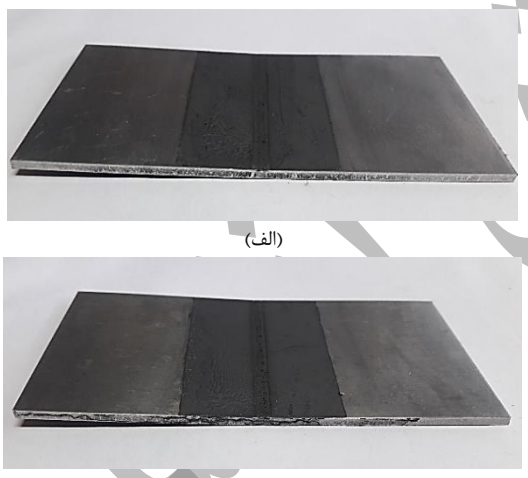
نتایج تجربی

به‌منظور بررسی قابلیت تکرارپذیری فرآیند خم‌کاری با لیزر، برای هر مقدار توان لیزر، دو نمونه AA 6061 به ضخامت ۲mm تحت آزمایش قرار گرفت و بعد از خم‌کاری، مقدار زاویه خم برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. مقادیر پارامترها به همراه زاویه خم به‌دست آمده، در جدول (۳) آورده شده است. مقدار پارامترهای طول، عرض، ضخامت و زمان استپ در آزمایش‌های تجربی، ثابت در نظر گرفته شد. هدف از تغییر سایر پارامترها مانند توان لیزر، سرعت اسکن و تعداد اسکن ایجاد شرایط متفاوتی برای آزمایش تجربی بود تا تکرارپذیری فرآیند در آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف بررسی شود.

جدول ۳ پارامترهای مورد بررسی و مقادیر آن برای آزمایش‌های تجربی

توان، P (W)	سرعت اسکن، V (mm/s)	قطر پرتو لیزر، D (mm)	تعداد اسکن، n	زاویه خم نمونه ۱ (درجه)	زاویه خم نمونه ۲ (درجه)	میزان خطا (٪)
۲۲۰	۱۰	۳	۷	۰/۶۳۶	۰/۶۴۹	۲
۲۴۰	۱۵	۳	۱۰	۰/۷۸۴	۰/۷۸۹	۰/۶
۲۷۰	۱۰	۳	۸	۱/۱۷۱	۱/۱۶۸	۰/۳
۳۳۰	۱۵	۳	۸	۱/۲۹۶	۱/۲۳۸	۱

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، در یک توان معین، مقدار زاویه خم هر دو نمونه با خطای بسیار کمی مشابه یکدیگرند. بیش‌ترین و کمترین درصد خطا برای تکرارپذیری فرآیند، به ترتیب برابر با ۲ و ۰/۳ درصد است که به ترتیب متعلق به توان‌های ۲۲۰ و ۲۷۰W می‌باشد. نمونه‌ای از ورق‌های خم‌کاری شده با اشعه لیزر به همراه مقدار هر پارامتر برای انجام آزمایش در شکل (۶) نشان داده شده است. بدین ترتیب، این نتیجه حاصل شد که خم‌کاری ورق AA 6061 با فرآیند خم‌کاری با لیزر دارای تکرارپذیری مناسب می‌باشد.



(الف)

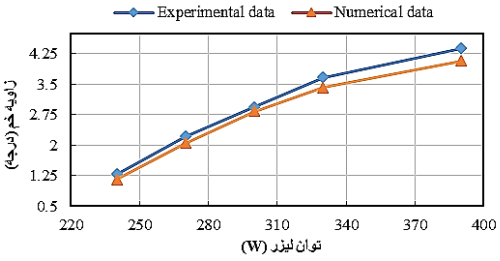
(ب)

شکل ۶ قطعات خم‌کاری شده در آزمایش‌های تجربی با شرایط تنظیمی:
D=۳mm, V=۱۵mm/s, S=۲mm, n=۱۰, P=۲۴۰W
الف) نمونه ۱ ، ب) نمونه ۲

صحت سنجی شبیه‌سازی عددی فرآیند

در این مقاله از مقایسه نتایج آزمایش تجربی برای صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. به این منظور، آزمایش تجربی برای پنج مقدار توان ۲۴۰، ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰ و ۳۹۰ وات انجام شد، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، تطابق

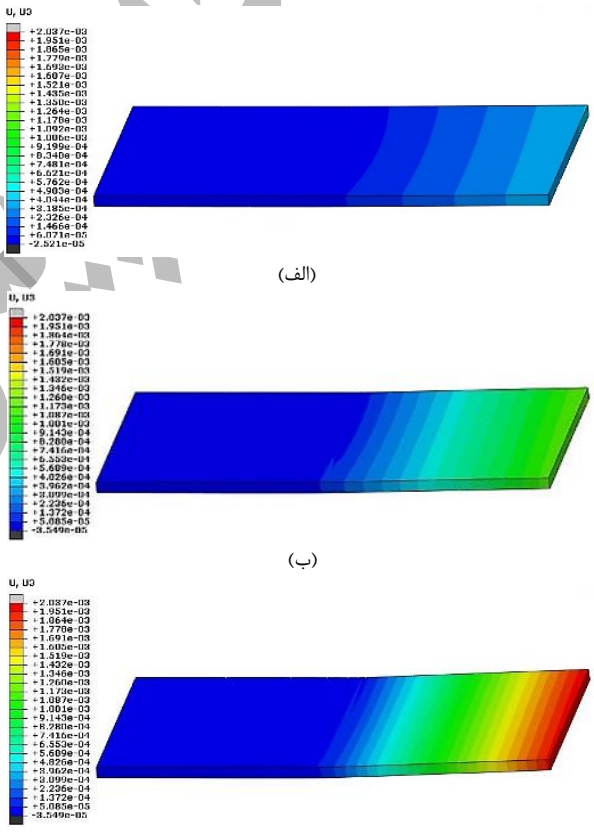
خوبی بین زاویه خم به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده و آزمایش‌های تجربی وجود دارد.



شکل ۷ مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی با شرایط:
D=۳mm, V=۱۸mm/s, S=۲mm, n=۹

نتایج شبیه‌سازی عددی

نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی که نحوه جابجایی لبه آزاد ورق و همچنین

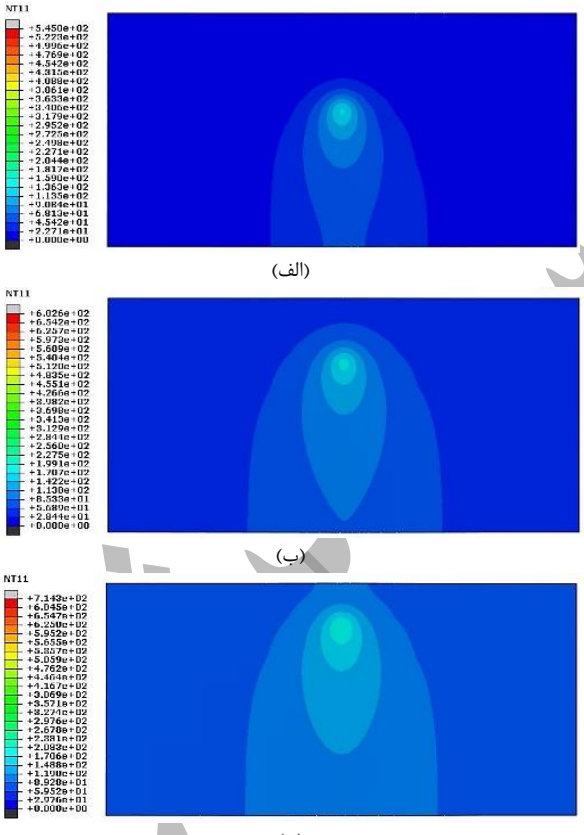


شکل ۸ کانتور جابجایی ورق آلومینیوم در حین فرآیند
الف) ۳/۴۹۰ ثانیه، ب) ۳۵/۰۱۷ ثانیه، ج) ۷۰ ثانیه

نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل (۱۰) برابر با توان لیزر ۴۲۵W، قطر پرتوی لیزر ۲/۵mm، سرعت اسکن ۲۲mm/s، ضخامت ورق ۳mm و تعداد عبور پرتوی لیزر ۳ در نظر گرفته شده است. نمودار نشان داده شده در شکل (۱۰) مربوط به گره‌ای است که در لبه آزاد ورق و با فاصله عرضی mm ۲۵ قرار دارد. این پدیده در ابتدای فرآیند، به دلیل تابش پرتو لیزر بر روی سطح ورق و ایجاد انبساط حرارتی بیشتر در سطح بالایی که به علت اختلاف

تصویر توزیع دمای ورق در حین فرآیند خم‌کاری با لیزر را نشان می‌دهد، به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است. در این شبیه‌سازی زمان کل فرآیند ۷۰ ثانیه می‌باشد. شرایط تنظیم پارامترها برای نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده برابر با توان لیزر ۴۵۰W، قطر پرتوی لیزر ۲mm، سرعت اسکن ۱۸mm/s، ضخامت ورق ۲/۵mm و تعداد عبور پرتوی لیزر ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طوری که در شکل ۸ نشان داده شده است، با ادامه پیمایش پرتو لیزر بر روی سطح ورق، میزان زاویه خم افزایش می‌یابد. در انتهای فرآیند، میزان جابجایی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از روابط مثلثاتی به زاویه خم تبدیل می‌شود. زاویه خم به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی شکل زیر برابر با ۲/۳۳۴ درجه می‌باشد.

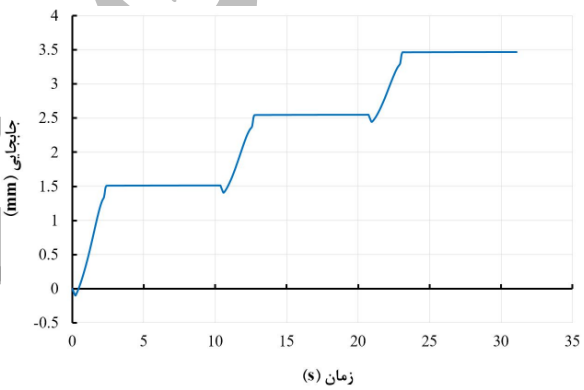
یکی از نکات مهم در خم‌کاری با پرتو لیزر و استفاده از سازوکار گرادیان دمایی، وقوع یک خم منفی در ابتدای فرآیند است که به علت کم بودن مقدار آن، هنگام انجام آزمایش دیده نمی‌شود. این پدیده در نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نمودار جابجایی لبه‌ی آزاد ورق نسبت به زمان انجام فرآیند، قابل مشاهده است. شکل (۱۰) نمودار جابجایی- زمان را که از شبیه‌سازی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد. شرایط تنظیم پارامترها برای



شکل ۹ کانتور توزیع دمایی ورق آلومینیوم در حین فرآیند
الف) ۱/۶۶۲ ثانیه، ب) ۳۰/۰۵۶ ثانیه، ج) ۵۸/۰۳۹ ثانیه

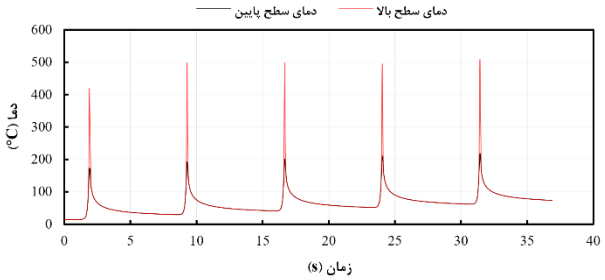
درجه حرارت در راستای ضخامت است، در قطعه‌کار به وجود می‌آید. مقدار هر یک از پارامترها برای دست‌یابی به سازوکار گرادیان دمایی بسیار مهم است. در ادامه فرآیند، به‌خصوص در مرحله سرد شدن ورق، خم منفی به دلیل انقباض در سطح بالای ورق از بین می‌رود و درنهایت خم نهایی ورق به سمت تابش پرتو لیزر خواهد بود [2]. نکته دیگر قابل‌توجه در شکل، میزان اندک کاهش جابجایی به ازای هر بار عبور پرتو لیزر می‌باشد، به‌طوری که میزان

جابجایی در پاس سوم کمتر از مقدار جابجایی در پاس اول می‌باشد. دلیل این امر آن است که خم ایجاد شده در قطعه‌کار بر نیمی از هندسه پرتو تابشی تأثیر می‌گذارد. منظور از هندسه پرتو تابشی، شعاع پرتو لیزر می‌باشد. هر چه زاویه خم ورق در شکل‌دهی‌های چند پاسه به ازای هر بار عبور پرتو لیزر افزایش پیدا می‌کند، آن قسمت از پرتو لیزر که بر روی زانوی خم قطعه (طول آزاد ورق) تابیده می‌شود، به‌طور فزآینده‌ای شکل بیضی به خود می‌گیرد، به‌طوری که سطح مقطع پرتو لیزر بر روی سطح ورق، همچنان که قطعه دچار خم می‌شود، به‌صورت ترکیبی از نیم دایره و نیم بیضی درمی‌آید. بدیهی است که بر میزان واپیچش نیمه بیضی به ازای هر بار عبور پرتو لیزر افزوده خواهد شد. واپیچش سطح پرتو لیزر، یک افزایش مؤثر در مساحت پرتو تابشی بر روی نمونه و به‌تبع آن، کاهش چگالی انرژی را به همراه دارد. این موضوع می‌تواند بر میزان خم در هر پاس تابشی اثر بگذارد.

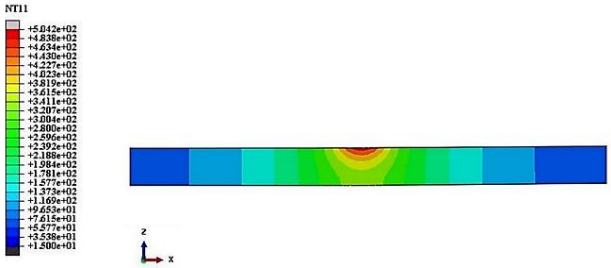


شکل ۱۰ نمودار زمان - جابجایی به‌دست آمده از شبیه‌سازی

در شکل (۱۱) نمودار دما نسبت به زمان نشان داده شده است. این نمودار اختلاف دما بین سطوح بالا و پایین ورق را که از شبیه‌سازی به‌دست آمده، نشان می‌دهد. اختلاف دمای ایجاد شده عامل ایجاد سازوکار گرادیان دمایی است. بیش‌ترین مقدار دمای ایجاد شده در این آزمایش بر روی سطح بالای ورق $^{\circ}C$ ۵۰۴ و بیش‌ترین اختلاف دما در زمان ۹/۲۹۲ ثانیه رخ می‌دهد، زمانی که پرتو لیزر در مرحله دوم از مرکز صفحه عبور می‌کند. حداکثر اختلاف دما بین سطوح بالایی و پایینی ورق $^{\circ}C$۳۵۰ است. شکل (۱۲) گرادیان دمایی ایجاد شده در راستای ضخامت ورق را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ نمودار دما-زمان در مرکز صفحه به دست آمده از شبیه‌سازی با شرایط تنظیمی: n=۵ ،S=۲mm ،V=۱۸mm/s ،P=۴۰۰W ،D=۳mm



شکل ۱۲ کانتور توزیع دما در امتداد ضخامت ورق

نتایج حاصل از طراحی ترکیب مرکزی (CCD)

در این بخش تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه و همچنین مقادیر بهینه به‌دست‌آمده در فرآیند خم‌کاری با لیزر، به‌طور مجزا و کامل توضیح داده شده است.

مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های آزمایش، برازش منحنی برای پاسخ‌های غیرخطی است که معمولا از طریق رگرسیون انجام می‌شود. بهترین مدل برازش مربوط به چندجمله‌ای با بیش‌ترین درجه و بیش‌ترین مقدار برای F-value می‌باشد. مقدار F-value در مدل استفاده شده برابر با ۲۲۴/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. همچنین پارامترهای آماری مانند p-value و مقادیر R^2 برای مقایسه و انتخاب مدل‌ها استفاده می‌شوند. مقدار سطح اطمینان در مطالعه حاضر برابر با ۹۵ درصد انتخاب شده است. این بدان معنی است که مقادیر p-value کوچک‌تر از ۵ درصد نشان دهنده معنی‌دار بودن مدل است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مقدار p-value برای مدل انتخاب شده کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. همچنین مدل انتخابی باید واجد این شرایط باشد که اختلاف بین دو مقدار Predicted R^2 و Adjusted R^2 کمتر از ۰/۲ باشد که مقدار به‌دست‌آمده در این مطالعه برابر ۰/۰۱ می‌باشد. با توجه به نکات ذکر شده، مدل درجه‌دوم به‌عنوان مدل پیشنهادی ارائه شده است. مدل پیشنهادی به همراه مقادیر R^2، Predicted R^2 و Adjusted R^2 در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴ مدل پیشنهادی بر اساس نتایج به دست آمده

Source	Std. Dev.	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2
Linear	۰/۴۸۱۳	۰/۸۲۳۹	۰/۸۱۸۷	۰/۸۱۱۷
Quadratic	۰/۸۱۸۲	۰/۹۷۶۶	۰/۹۷۲۳	۰/۹۶۶۵
2FI	۰/۲۲۰۳	۰/۹۶۶۹	۰/۹۶۲۰	۰/۹۵۸۲

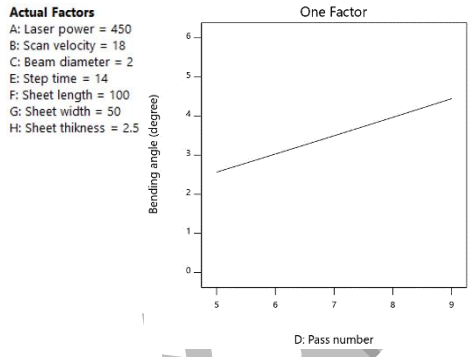
مدل رگرسیون برای پیش‌بینی تابع هدف، یعنی زاویه خم استفاده

می‌شود. مقدار R^2 کیفیت برازش داده‌های واقعی را با مدل مشخص می‌کند و بهترین مقدار آن $R^2 = 1$ می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مقدار R^2 بیان‌گر مقدار تشابه مقادیر واقعی با مقادیر به دست آمده توسط مدل است و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که توافق خوبی بین مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل وجود دارد. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که مقادیر R^2 و Adjusted R^2 نزدیک به ۱ (٪۱۰۰) است که نشان می‌دهد مدل به دست آمده از تحلیل می‌تواند پاسخ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. در تحقیق حاضر مقدار R^2 برابر ۰/۹۷۶۶ می‌باشد، به این معنی که مدل حاضر می‌تواند زاویه خم را با دقت ٪۹۷ پیش‌بینی کند. علاوه بر این، Adeq Precision نسبت سیگنال به نویز (S/N) را اندازه‌گیری می‌کند که در این مقاله مقدار آن ۶۸/۴۶۸۲ برای مدل به دست آمد. به‌طور کلی نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است. بر این اساس نسبت به دست آمده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان نسبت مناسب تلقی شود. معادله رگرسیون حاوی پارامتر مؤثر برای پیش‌بینی زاویه خم می‌باشد که با معادله (۵) بیان می‌شود. این فرمول از پارامترهایی تشکیل شده است که مقدار p-value متناظر آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است (جدول ۵)؛ به عبارت دیگر، این فرمول شامل پارامترهایی است که در جدول ANOVA به‌عنوان پارامترهای مؤثر معرفی شده‌اند.

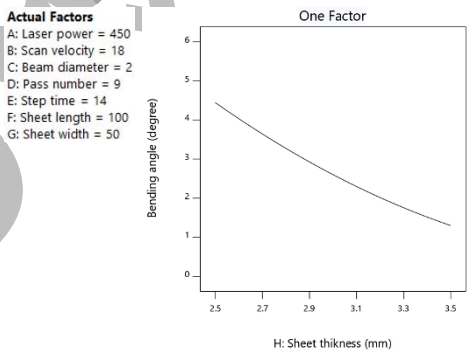
$$\alpha_b = 0.9172 - 0.2932A - 0.3626B - 0.2798C + 0.3986D - 0.0205E - 0.0669F + 0.1066G - 0.8059H - 0.0554AB - 0.0404AC + 0.0903AD + 0.0322AG - 0.1432AH - 0.1222BD + 0.2146BH - 0.0249CD + 0.1286CH + 0.0418DG - 0.267DH + 0.0496FH - 0.0381GH + 0.0711B^2 + 0.27H^2 \quad (۵)$$

تأثیر پارامترهای فرآیند

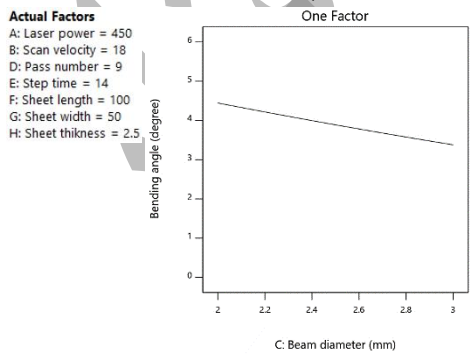
تأثیر پارامترهای مورد بررسی در این مقاله در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این در حالی است که برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر زاویه خم، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۳- الف) بیان‌گر تأثیر ضخامت ورق بر زاویه خم است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر اساس طراحی آزمایش به روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD)، می‌توان گفت که با افزایش ضخامت از ۲/۵mm به ۳/۵mm، زاویه خم از ۱/۷ به ۰/۳۷۹ درجه کاهش پیدا کرده است؛ یعنی به ازای افزایش ۱mm ضخامت ورق در دو آزمایش با ترکیب پارامترهای مشخص بر اساس طراحی آزمایش انجام شده در این تحقیق، زاویه خم حدود ٪۷۷ کاهش یافت. دلیل این کاهش عدم خم منفی اولیه قابل‌توجه در ابتدای فرآیند در لایه‌های پایینی ورق است. مقدار تنش حرارتی ایجاد شده در لایه‌های زیرین ورق توسط پرتوهای لیزر به تنش جریان ماده نمی‌رسد؛ بنابراین، لایه‌های زیرین از خم شدن ورق جلوگیری می‌کنند. همچنین با افزایش ضخامت ورق، مدول خمشی مورد نیاز برای خم شدن ورق افزایش می‌یابد که خم کردن ورق را دشوارتر می‌کند. تأثیر تعداد اسکن پرتو لیزر در شکل (۱۳- ب) نشان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که با افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، مقدار زاویه خم افزایش می‌یابد.



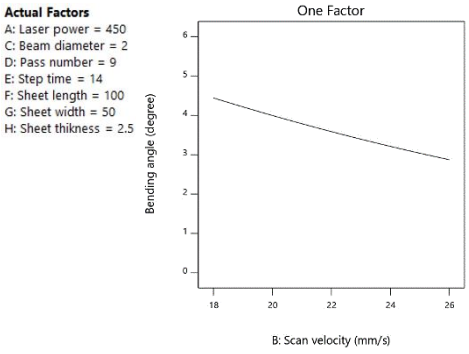
(ب)



(الف)



(ت)

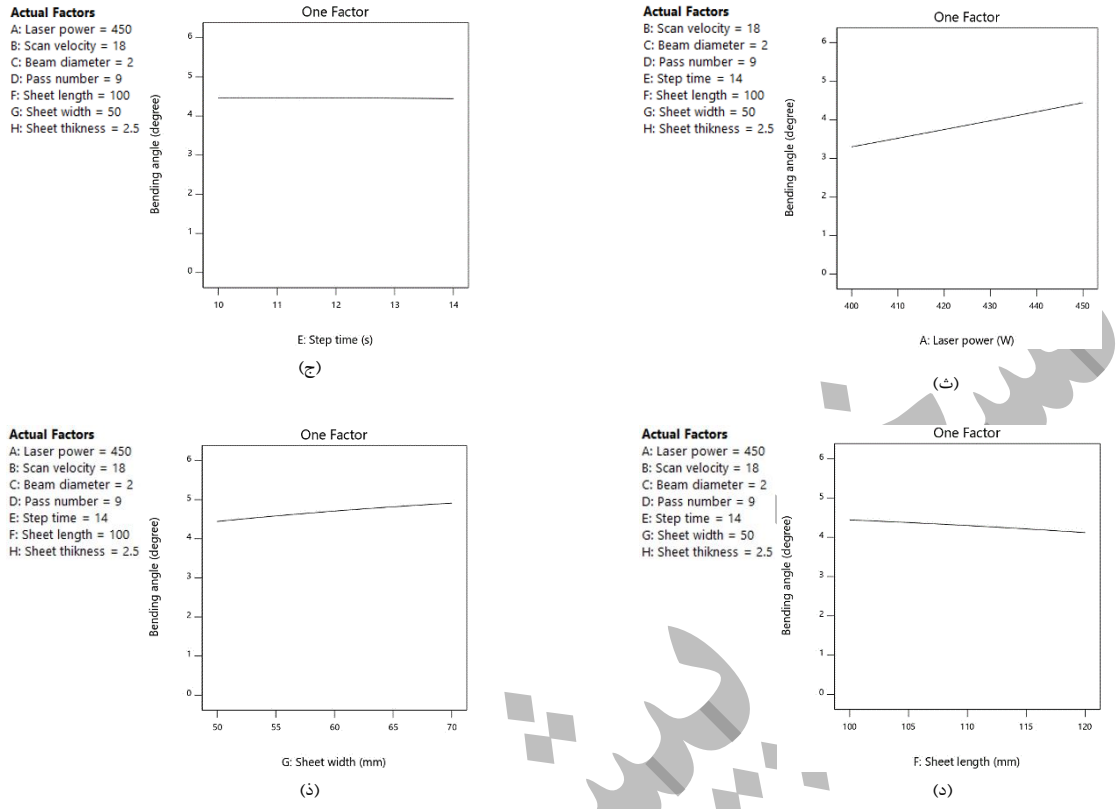


(پ)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

/http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران



شکل ۱۳ تأثیر پارامترهای بررسی شده بر زاویه خم

به‌طوری که با افزایش تعداد اسکن از ۵ به ۹، در حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شوند، زاویه خم ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش تعداد اسکن به معنای تکرار تابش پرتو لیزر است که زاویه خم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان افزایش زاویه خم در هر مرحله نسبت به مرحله قبل اندکی کاهش می‌یابد. تأثیر سرعت اسکن بر زاویه خم در شکل (۱۳- پ) نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل نشان داده شده است، با افزایش سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کم خواهد شد. دلیل آن این است که با افزایش سرعت اسکن، مقدار انرژی حرارتی اعمال شده بر روی سطح ورق در راستای مسیر اسکن، کاهش می‌یابد. البته باید به این نکته توجه داشت که در ورق از جنس آلومینیوم به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارت بالا، با کاهش بسیار زیاد سرعت اسکن، مقدار زاویه خم کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که اگر مقدار سرعت اسکن کم باشد، دما در سطح بالای ورق افزایش می‌یابد و به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای ورق آلومینیوم، دما به‌سرعت از سطح بالای به سطح پایین ورق انتقال پیدا می‌کند. درنتیجه شیب حرارتی مورد نیاز در راستای ضخامت ورق که برای ایجاد خم ضروری است، کاهش می‌یابد و به‌تبع آن زاویه خم هم کاهش خواهد یافت. شکل (۱۳- ت) اثر قطر پرتو لیزر بر روی زاویه خم را نشان می‌دهد. با افزایش قطر پرتو لیزر با فرض ثابت ماندن توان، انرژی حرارتی لیزر در سطح بزرگ‌تری توزیع می‌شود. درنتیجه، تأثیر قطر پرتو لیزر در تشکیل گرادیان حرارتی که عامل اصلی شکل‌دهی است، کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، با بزرگ‌تر شدن قطر پرتو شدت انرژی وارد بر واحد سطح ورق کاهش می‌یابد و درنتیجه مقدار زاویه خم نیز کم‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که توان لیزر رابطه مستقیمی با زاویه خم در این فرآیند دارد، یعنی با افزایش توان لیزر بر میزان زاویه خم افزوده می‌شود (شکل ۱۳- ث). همان‌طوری که در بخش گذشته بیان شد، لیزر استفاده شده در این مطالعه از نوع پالسی است. در لیزرهای پالسی مقدار انرژی برای هر پالس از رابطه (۶) به دست می‌آید.

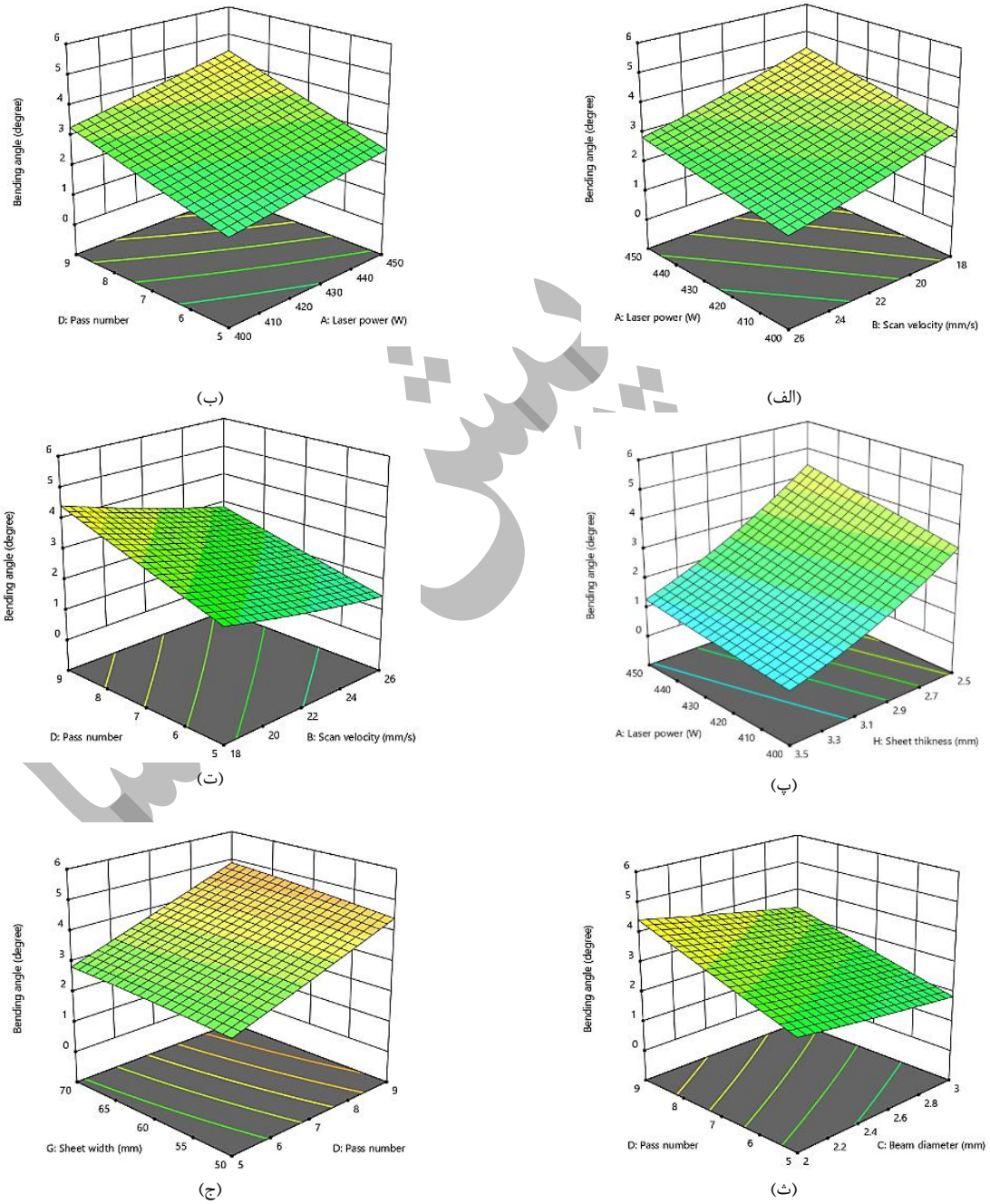
$$P_e = P \times P_w \qquad (۶)$$

در این رابطه، P_e انرژی هر پالس، P توان و P_w عرض پالس می‌باشد. با توجه به رابطه بالا با فرض ثابت بودن مقدار عرض پالس، اگر مقدار توان افزایش یابد مقدار انرژی به ازای هر پالس نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان لیزر به معنای افزایش انرژی حرارتی به سطح ورق و به‌تبع آن، افزایش شیب حرارتی در را ستای ضخامت ورق می‌باشد. درنتیجه زاویه خم افزایش خواهد یافت. همان‌طوری که در شکل‌های (۱۳ ج تا ذ) مشاهده می‌شود شیب نمودار برای سه پارامتر زمان استپ، طول ورق و

عرض ورق کمترین مقدار را در مقایسه سایر پارامترها دارند. علاوه بر این با مشاهده **مقادیر** F-value **برای این سه پارامتر که** نشان دهنده میزان و نوع اثرگذاری هر پارامتر بر زاویه خم است و با مقایسه آن با سایر پارامترها م شاهده می شود که **مقادیر** F-value **مربوط به این سه پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر ناچیز است؛ بنابراین** پارامترهای زمان استپ، طول ورق و عرض ورق، تأثیر زیادی روی زاویه خم ندارند به‌طوری‌که می‌توان اثر این سه پارامتر را در این فرآیند بر روی زاویه خم نادیده گرفت.

نمودارهای سطح سه‌بعدی بر اساس معادله (۵) هستند و می‌توانند برای درک شهودی پاسخ در حالتی استفاده شوند که ترکیبات مختلفی از پارامترهای ورودی وجود دارد. شکل (۱۴) نمودارهای سطح سه‌بعدی مربوط به زاویه خم را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار قطر پرتو و پارامترهای سرعت اسکن، زاویه خمش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش توان لیزر و تعداد اسکن منجر به افزایش زاویه خم می‌شود. بدیهی است که افزایش ضخامت ورق منجر به کاهش قابل‌توجه زاویه خم می‌شود.

نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۳) برای نتیجه‌گیری قطعی استفاده نمی‌شوند. به‌منظور تأیید اثرات نشان داده‌شده برای پارامترها، از تحلیل واریانس استفاده می‌شود. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع خطا، ثابت بودن واریانس و استقلال آن انجام می‌شود. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده تحلیل آماری ANOVA برای این مطالعه در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول، مؤثر بودن یا نبودن پارامترها و همچنین میزان تأثیر هر یک از پارامتر بررسی شده در فرآیند، بیان شده است. نرمال بودن توزیع خطا

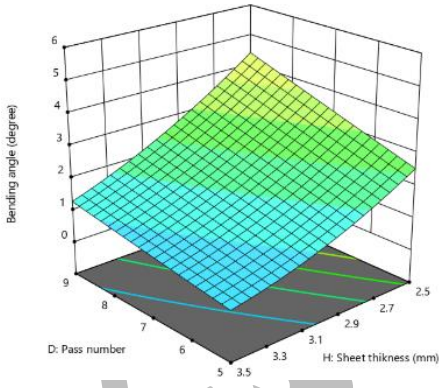


(الف) (ب) (پ) (ت) (ث) (ج)

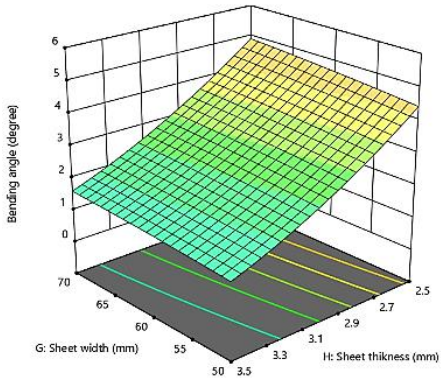
علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

/http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران



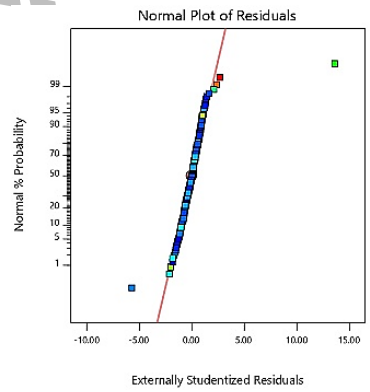
(د)



(ذ)

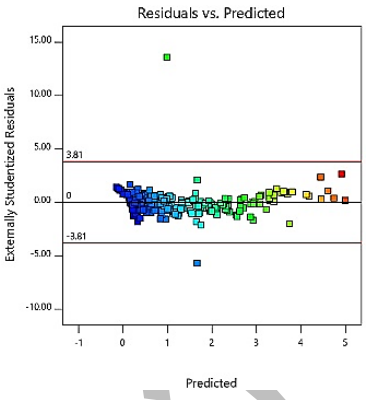
شکل ۱۴ نمودارهای سطح سه‌بعدی برای زاویه خم.

توسط نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی‌مانده بررسی می‌شوند. نمودار احتمال نرمال به مقادیر باقی‌مانده برای نتایج حاصل از نتایج انجام شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به روند توزیع نقاط در اطراف خط مورب می‌توان گفت که مقادیر باقی‌مانده از توزیع نرمال برخوردار است.



شکل ۱۵ نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده

در روش دیگر، مدل ارائه‌شده توسط نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده بررسی می‌شود. نمودار فوق در شکل (۱۶) نشان داده شده است. عدم وجود یک روند مشخص در توزیع نقاط در این نمودار نشان‌دهنده‌ی ثابت بودن واریانس است [25]. این دو شکل صحت فرض‌های تحلیل واریانس را تائید می‌کند.



شکل ۱۶ نمودار مقادیر باقیمانده در برابر مقادیر برازش شده

در جدول (۴) از sum of squares و Mean squre برای محاسبه F-value استفاده شده است. مقدار F-value میزان اثرگذاری هر پارامتر را در فرآیند بیان می‌کند. به‌طور کلی هرچه این مقدار برای هر پارامتر بیش‌تر باشد تأثیر آن پارامتر در فرآیند بیشتر خواهد بود. با توجه به مقدار F-value در جدول (۵)، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن پرتو، سرعت اسکن، توان لیزر، قطر پرتو لیزر، عرض ورق، طول ورق و زمان هر استپ به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر زاویه خم دارند.

جدول ۵ تحلیل واریانس برای پارامترها

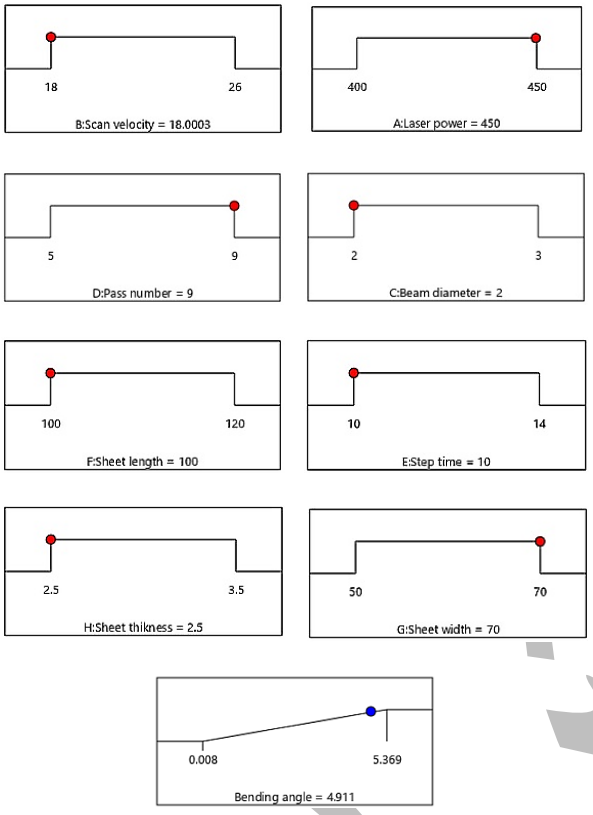
source	sum of squares	Mean square	F –Value	p - value
Model	۳۵۰/۶۱	۷/۹۷	۲۲۴/۹۱	<۰/۰۰۰۱
A-Laser power	۲۲/۶۹	۲۲/۶۹	۶۴۰/۵۲	<۰/۰۰۰۱
B-Scan velocity	۳۴/۷۲	۳۴/۷۲	۹۷۹/۹۰	<۰/۰۰۰۱
C-Beam diameter	۲۰/۶۷	۲۰/۶۷	۵۸۳/۴۶	<۰/۰۰۰۱

نسخه پیش انتشار

D-Pass number	۴۱/۹۵	۴۱/۹۵	۱۱۸۴/۲۰	<۰/۰۰۰۱
E-Step time	۰/۱۱۰۸	۰/۱۱۰۸	۳/۱۳	۰/۰۷۸۲
F-Sheet length	۱/۱۸	۱/۱۸	۳۳/۳۵	<۰/۰۰۰۱
G-Sheet width	۳	۳	۸۴/۷۴	<۰/۰۰۰۱
H-Sheet thickness	۱۷۱/۴۵	۱۷۱/۴۵	۴۸۳۹/۲۱	<۰/۰۰۰۱
AB	۰/۷۸۴۹	۰/۷۸۴۹	۲۲/۱۵	<۰/۰۰۰۱
AC	۰/۴۱۷۷	۰/۴۱۷۷	۱۱/۷۹	۰/۰۰۰۷
AD	۲/۰۹	۲/۰۹	۵۸/۹۶	<۰/۰۰۰۱
AE	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۱۴	۰/۳۲۰۵	۰/۵۷۱۸
AF	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۶۸	۱/۰۴	۰/۳۰۹۲
AG	۰/۲۶۴۹	۰/۲۶۴۹	۷/۴۸	۰/۰۰۶۷
AH	۵/۲۵	۵/۲۵	۱۴۸/۲۴	<۰/۰۰۰۱
BC	۰/۰۸۲۳	۰/۰۸۲۳	۲/۳۲	۰/۱۲۸۹
BD	۳/۸۲	۳/۸۲	۱۰۷/۸۹	<۰/۰۰۰۱
BE	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۵۵۱	۰/۸۱۴۶
BF	۰/۱۲۴۷	۰/۱۲۴۷	۳/۵۲	۰/۰۶۱۸
BG	۰/۰۳۹۶	۰/۰۳۹۶	۱/۱۲	۰/۲۹۱۶
BH	۱۱/۷۹	۱۱/۷۹	۳۳۲/۷۴	<۰/۰۰۰۱
CD	۲/۳۰	۲/۳۰	۶۵/۰۱	<۰/۰۰۰۱
CE	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۳۱۲۳	۰/۵۷۶۸
CF	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۸۸۷	۰/۷۶۶۱
CG	۰/۱۷۰۶	۰/۱۷۰۶	۴/۸۲	۰/۰۲۹۲
CH	۴/۲۳	۴/۲۳	۱۱۹/۴۹	<۰/۰۰۰۱
DE	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۲۹	۰/۳۶۴۸	۰/۵۴۶۴
DF	۰/۰۵۹۳	۰/۰۵۹۳	۱/۶۷	۰/۱۹۶۹
DG	۰/۴۴۷۰	۰/۴۴۷۰	۱۲/۶۲	۰/۰۰۰۵
DH	۱۸/۲۵	۱۸/۲۵	۵۱۵/۲۵	<۰/۰۰۰۱
EF	۰/۰۳۵۳	۰/۰۳۵۳	۰/۹۹۶۹	۰/۳۱۹۱
EG	۰/۰۸۲۳	۰/۰۸۲۳	۲/۳۲	۰/۱۲۸۹
EH	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۰۴	۰/۹۱۸۹
FG	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۶	۰/۱۵۹۰	۰/۶۹۰۴
FH	۰/۶۲۹۵	۰/۶۲۹۵	۱۷/۷۷	<۰/۰۰۰۱
GH	۰/۳۷۱۱	۰/۳۷۱۱	۱۰/۴۷	۰/۰۰۱۴
A^2	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۷۶۰۲	۰/۰۹۳۳
B^2	۰/۱۷۷۰	۰/۱۷۷۰	۰/۰۲۶۴	۵/۰۰
C^2	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۱	۰/۴۶۳۸	۰/۵۳۸۶
D^2	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸	۰/۷۷۸۲	۰/۰۷۹۵
E^2	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۲۹	۰/۷۷۳۷	۰/۰۸۲۹
F^2	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۰۸	۰/۵۸۲۱	۰/۳۰۳۸
G^2	۰/۰۳۴۳	۰/۰۳۴۳	۰/۳۲۶۴	۰/۹۶۷۱
H^2	۲/۵۵	۲/۵۵	۷۲/۰۳	<۰/۰۰۰۱
Residual	۸/۴۰	۰/۰۳۵۴	-	-
Lack of Fit	۸/۴۰	۰/۰۳۶۸	-	-
Pure Error	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱۸	-	-
Adeq Precision	۶۸/۴۶۸۲	-	-	-
Cor Total	۳۵۹/۰۱	-	-	-

بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی با لیزر

هدف از بهینه‌سازی در این مقاله، رسیدن به بیش‌ترین مقدار برای زاویه خم است. با در نظر گرفتن حدود مشخص شده برای پارامترهای فرآیند که در جدول (۲) ذکر شد، مقدار بهینه برای دست‌یابی به حداکثر مقدار زاویه خم برای هر پارامتر در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷، حداکثر زاویه خم زمانی به دست می‌آید که پارامترهای توان لیزر (۴۵۰W)، تعداد اسکن (۹) و عرض ورق (۷۰mm) در سطح بالا و سرعت اسکن (۱۸mm/s)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، طول ورق (۱۰۰mm)، زمان استپ (۱۰s) و ضخامت ورق (۲/۵mm) در سطح پایین قرار داشته باشند. همچنین، در شکل ۱۷ کمترین (°۰۰۸/۰) و بیشترین (°۳۶۹/۵) مقدار واقعی برای زاویه خم را نشان می‌دهد. در حالی که حداکثر زاویه خم پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون با در نظر گرفتن مقادیر بهینه برای هر پارامتر، °۴/۹۱۱ می‌باشد.



شکل ۱۷ مقادیر بهینه برای هر پارامتر

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر پارامترهای موجود در فرآیند خم‌کاری با پرتو لیزر در ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. هم‌چنین، به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و روش‌های آماری، پارامترهای مورد نظر جهت دست‌یابی به حداکثر زاویه خم بهینه شدند. پس از بررسی تمامی موارد ذکر شده در مورد بهینه‌سازی و تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی زاویه خم، نتایج زیر به‌دست آمد:

- در بین هشت پارامتر بررسی شده، پارامترهای ضخامت ورق، تعداد اسکن، سرعت اسکن، توان لیزر و قطر اشعه لیزر به‌عنوان پارامترهایی که به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر زاویه خم داشتند، معرفی شده‌اند.
- زمان گام، طول و عرض ورق به‌عنوان پارامترهایی که به ترتیب کمترین تأثیر در فرآیند را دارند شناخته شدند.
- اثر هشت پارامتر بر زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با پرتو لیزر بررسی گردید. نتایج بررسی‌های انجام شده به روش تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پارامترهای ضخامت ورق، قطر اشعه لیزر و سرعت اسکن پرتو لیزر، زمان استپ و طول ورق رابطه عکس با زاویه خم و پارامترهای توان لیزر، تعداد اسکن و عرض ورق رابطه مستقیم با زاویه خم در فرآیند خم‌کاری با پرتو لیزر دارند.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

/http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

- در نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مشاهده شده است که مقدار زاویه خم به ازای افزایش تعداد اسکن پرتو لیزر، افزایش می‌یابد اما مقدار افزایش زاویه در تعداد پاس‌های بالا به ازای هر پاس به مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند.
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد که حداکثر زاویه خم به دست آمده توسط مدل (۴/۹۱۱ درجه) زمانی به دست می‌آید که ضخامت ورق (۲/۵mm)، قطر پرتو لیزر (۲mm)، زمان استپ (۱۰s)، طول ورق (۱۰۰mm) و سرعت اسکن (۱۸mm/s) در سطح پایین باشند و تعداد اسکن (۹)، عرض ورق (۷۰mm) و توان لیزر (۴۵۰W) در سطح بالا قرار داشته باشند.

فهرست علائم

دما	T
شارحرارتی	I
شارحرارتی متوسط	I_m
ضریب جذب سطح	A
توان لیزر	P
شعاع پرتو لیزر	r
تعداد نقاط مرکزی	n_O
تعداد فاکتور	K
قطر پرتو لیزر	D
سرعت اسکن	V
زمان استپ	t
تعداد اسکن	n
طول ورق	L
عرض ورق	W
ضخامت ورق	S
ضریب تأثیر پارامترها	β_O
پارامترهای مؤثر بر پاسخ	β_i
متغیر پاسخ	Y
زاویه خم	α_b
انرژی هر پالس	P_e
عرض پالس	P_w

واژه‌نامه

روش سطح پاسخ	Response Surface Methodology (RSM)
طرحی ترکیب مرکزی	Central Composite Design (CCD)
طرحی باکس بنکن	Box-Behnken Design (BBD)
روش اجزای محدود	Finite Element Method (FEM)
طرحی تاگوچی	Taguchi Design
آنالیز نتایج	Analysis of variance (ANOVA)
هدایت حرارتی	Thermal Conductivity
ظرفیت گرمایی	Heat capacity
انبساط حرارتی	Thermal expansion
مدول یانگ	Young's modulus
تنش تسلیم	Yield stress

نسخه پیش انتشار

مراجع

[1] M. Geiger, F. Vollertsen, and G. Deinzer, "Flexible straightening of car body shells by laser forming", *SAE Technical Paper*, 0148-7191, (1993).
[2] Y. Shi, H. Shen, Z. Yao, and J. Hu, "Numerical investigation of straight-line laser forming under the temperature gradient mechanism", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 19, no. 2, pp. 144-150, (2006).
[3] W. Shichun and Z. Jinsong, "An experimental study of laser bending for sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 2, pp. 160-163, (2001).
[4] Z. Hu, R. Kovacevic, and M. Labudovic, "Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 13, pp. 1427-1439, (2002).
[5] Y. Guan, H. Zhang, J. Liu, and S. Sun, "Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 662-671, (2012).
[6] M. Geiger and F. Vollertsen, "The mechanisms of laser forming", *CIRP annals*, vol. 42, no. 1, pp. 301-304, (1993).
[7] Y. Namba, "Laser forming in space", in *Proc. Int. Conf. Lasers' 85*, vol. 403, (1986).

[8] M. Riahi, M. Hoseinpour Gollo, and S. Nader Ameli Kalkhoran, "Experimental and numerical study of heat flux distribution in laser forming of bi-layer sheets", *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, vol. 4, no. 1, pp. 67-79, (2014).
[9] Y. Guan, S. Sun, G. Zhao, and Y. Luan, "Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, no. 1, pp. 124-131, (2005).
[10] M. Safari and H. Mostaan, "Experimental and numerical investigation of laser forming of cylindrical surfaces with arbitrary radius of curvature", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 1941-1949, (2016).
[11] M. H. Gollo, S.-M. Mahdavian, and H. M. Naeini, "Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd: YAG laser", *Optics & Laser Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 475-482, (2011).
[12] S. Mulay, V. Paliwal, and N. R. Babu, "Analytical approach to predict the bend angle of sheet formed by multiple laser scans", *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 272-277, (2021).
[13] R. Boonpuang, M. Mongkolwongroj, A. Sakulkalavek, and R. Sakdanuphab, "Empirical modeling and optimization of laser bending process parameters using the central composite design method for HDD slider PSA/RSA adjustment", *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, pp. 290-304, (2020).
[14] A. Behera, P. S. Sahu, and S. K. Patel, "Application of Taguchi methodology for optimization of process parameters in laser bending of Al sheet", *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 2323-2327, (2020).
[15] K. Venkadeshwaran, S. Das, and D. Misra, "Bend angle prediction and parameter optimisation for laser bending of stainless steel using FEM and RSM", *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, vol. 5, no. 3-4, pp. 308-321, (2012).
[16] E. G. Zahrani and A. Marasi, "Modeling and optimization of laser bending parameters via response surface methodology", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 227, no. 7, pp. 1577-1584, (2013).
[17] A. H. Roohi, H. Moslemi Naeini, and M. Hoseinpour Gollo, "An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 231, no. 5, pp. 433-442, (2017).
[18] A. H. Roohia, N. H. Moslemi, G. M. Hoseinpour, K. J. Shahbazi, and S. S. Imani, "Effects of temperature gradient magnitude on bending angle in laser forming process of aluminium alloy sheets", (2016).
[19] S. E. Khandandel, S. H. Seyedkashi, and M. Moradi, "A novel path strategy design for precise 2D and 3D laser tube forming process; experimental and numerical investigation", *Optik*, vol. 206, p. 164302, (2020).
[20] S. Esmaeil Khandandel, S. Hossein Seyedkashi, and M. Moradi, "Numerical and experimental analysis of the effect of forced cooling on laser tube forming", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 7, p. 338, (2021).
[21] M. A. Bhatti, "Fundamental finite element analysis and applications: with Mathematica and Matlab computations", (2005).
[22] J. Zimmerman, W. Wlosinski, and Z. R. Lindemann, "Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding", *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1644-1653, (2009).
[23] E. G. Zahrani and A. Marasi, "Experimental investigation of edge effect and longitudinal distortion in laser bending process", *Optics & Laser Technology*, vol. 45, pp. 301-307, (2013).
[24] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, (2016).
[25] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons, (2017).