



## بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند بر تغییرات زاویه خم و انتروپی در شکل‌دهی فولاد استحکام بالا با استفاده از پرتو لیزر

حسین طالبی قادیکلایی<sup>۱</sup>، علی احمدی<sup>۲</sup> و علی ملکی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۰۸

### چکیده

در این پژوهش، شکل‌دهی ورق فولادی با استفاده از پرتو لیزر برای ایجاد خم V شکل، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج بیانگر این موضوع است که افزایش توان در محدوده گرادیان دمایی، موجب افزایش زاویه خم می‌شود. سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق، عوامل موثر بر زاویه خم شناخته شدند که افزایش مقادیر آن‌ها، موجب کاهش زاویه خم می‌شود. در شکل‌دهی فولاد A-131 به منظور دستیابی به خم V شکل، قطر پرتو به عنوان اثرگذارترین عامل در تعیین زاویه خم شناخته شد. علاوه بر پارامترهای اصلی، اثر تعاملی توان-ضخامت ورق، سرعت اسکن-ضخامت ورق، قطر پرتو-ضخامت ورق و همچنین، اثر تعاملی سرعت اسکن-قطر پرتو بر زاویه خم، از جمله پارامترهای موثر بر شکل‌دهی فولاد A-131 به کمک پرتو لیزر، شناخته شده‌اند؛ همچنین، ماکزیمم اختلاف بین نتایج مدل‌سازی و زاویه خم پیش‌بینی شده، توسط رابطه ارائه شده در این پژوهش، ۶/۵٪ است که بیانگر دقت مناسب نتایج است؛ همچنین روشی بر مبنای انتروپی به منظور پیش‌بینی روند افزایشی و کاهش زاویه خم ارائه گردید. مطابق با نتایج، انتروپی قابلیت پیش‌بینی اثر توان لیزر، قطر پرتو و سرعت اسکن بر زاویه خم را خواهد داشت.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی با لیزر؛ فولاد استحکام بالا؛ زاویه خم؛ انتروپی.

## Investigation of the Effect of Process parameters on Bending Angle and Entropy Generation in Laser Forming of High Strength Steel

H. Talebi-Ghadikolae<sup>1</sup>, A. Ahmadi<sup>2</sup>, A. Maleki<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D., Mech. Eng., Babol Noshirvani Univ. of Tech., Babol, Iran

<sup>3</sup> MS.c, Marine. Eng., Malek Ashtar Univ., Tehran, Iran

### Abstract

In this study, laser forming of steel was investigated in order to create V-Shape bend. The result shows, Increases in laser power within the temperature gradient range, lead to higher bending angle. Scan velocity, beam diameter, and thickness of the sheet metal were known as effective factors on bending angle. Increases in value of mentioned parameters caused lower bending angle. Also, the beam diameter is the most effective parameter in determination of the bending angle to form A-131 steel into V shape product. In addition to main factors, the interaction effect of power-thickness, scan velocity-thickness, beam diameter-thickness, and scan velocity-beam diameter were considered as effective parameters in forming of A-131 by using laser beam. Also, maximum difference between result of FE model and regression equation was 6.5 %. This indicates the appropriate accuracy of the proposed model. Also in this study, a new method was developed based on the entropy generation for prediction of the increasing and decreasing trend of bending angle. According to the result, entropy generation method is capable to predict the effect of laser power, beam diameter, and scan velocity.

**Keywords:** Laser Forming; High Strength Steel; Bending Angle; Entropy.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۲۱۳۳۲۹۷؛ فکس: ۰۱۱۳۵۶۶۵۱۹۱

آدرس پست الکترونیک: [alimaleki@mut.ac.ir](mailto:alimaleki@mut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی فلزات یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌های تولید قطعات فلزی است. فرایندهای شکل‌دهی تدریجی [۱]، هیدروفرمینگ [۲] و شکل‌دهی الکترومغناطیس [۳]، نمونه‌هایی از فرایندهای شکل دادن ورقی فلزات می‌باشند. فرایند شکل‌دهی با لیزر یکی دیگر از فرایندهای موجود برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که یک تکنیک چندبعدی و انعطاف‌پذیر است. در فرایند مذکور، از پرتو لیزر به منظور ایجاد زاویه خم در ورق‌های فلزی و همچنین مواد سخت استفاده می‌شود. در این فرایند، قطعه‌کار در نتیجه ایجاد تنش‌های پسماند حرارتی خم می‌شود.

یکی از مهمترین ویژگی‌های فرایند شکل‌دهی با لیزر این است که نیاز به نیروی خارجی یا ابزار ندارد؛ بنابراین، فرایند مذکور دارای مزایایی همچون، انعطاف‌پذیری بالا و ظرفیت بالا برای تولید الگوهای پیچیده است. بر این اساس، شکل‌دهی با لیزر و تولید محصولات واقعی به کمک این فرایند، توسط محققان مورد بررسی قرار گرفت [۴]. پژوهش‌های مذکور، به صورت کلی در دو بخش تقسیم بندی می‌گردند که عبارتند از: بررسی‌های مرتبط با مسیر اسکن و پارامترهای آن و بررسی‌های مرتبط با تاثیر پارامترهای منبع حرارتی بر میزان تغییر شکل.

در زمینه تاثیر مسیر اسکن بر تغییر شکل، ادواردسون و همکاران [۵] تلاش کردند تا قوانینی برای تعیین موقعیت و ترتیب قراردادن خط‌های تابشی به منظور دستیابی به تغییر شکل متقارن زینی از یک ورق مستطیلی، ارائه نمایند. آنان شکل‌دهی ورق نرم فولادی CR4 به ابعاد  $1/5 \times 200 \times 400$  میلی‌متر را به کمک منبع لیزر CO<sub>2</sub>، مورد بررسی قرار دادند. استراتژی‌های اسکن در این پژوهش، شامل خط‌های شعاعی، مستقیم و الگوهای دایروی هم مرکز بود. طبق نتایج آنان، استفاده از دایره هم مرکز به عنوان مسیر اسکن، قابلیت ایجاد الگوی زینی را خواهد داشت؛ همچنین، تکرار پذیری در این حالت بسیار مناسب است.

صفری و همکاران [۶] پژوهشی به منظور شکل‌دهی الگوی زینی شکل توسط فرایند شکل‌دهی با لیزر را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از الگوی مسیر اسکن مارپیچ برای دستیابی به هندسه نهایی استفاده شده است. اثر متغیرهایی همچون، گام مسیر مارپیچ، تعداد مسیرهای

مارپیچ و همچنین جهت حرکت، بر میزان تغییر شکل و میزان اعوجاج مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج بدست آمده، حرکت از ناحیه بیرونی به سمت داخل مارپیچ، کاهش گام مارپیچ و افزایش تکرار، موجب افزایش تغییر شکل می‌گردد.

با توجه به نتایج پژوهش‌های اخیر، مسیر اسکن و همچنین پارامترهای مرتبط با آن از عوامل موثر بر شکل‌نهایی و میزان تغییر شکل مومسان می‌باشند؛ لذا، می‌بایست متناسب با هندسه نهایی قطعه تعیین گردند.

از سوی دیگر، تاثیر پارامترهای مرتبط با منبع حرارتی بر میزان تغییر شکل، یکی دیگر از مسائلی است که در پژوهش‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، روحی و همکاران [۷] تاثیر متغیرهای فرایند بر میزان تغییر شکل فلز آلومینیم ۶۰۶۱ در فرایند لیزر فرمینگ را مورد بررسی قرار دادند. مطابق با نتایج، افزایش توان موجب افزایش زاویه خم می‌شود؛ زیرا افزایش توان موجب افزایش انرژی حرارتی وارد بر ورق و افزایش شیب حرارتی در راستای ضخامت ورق می‌شود. از سوی دیگر افزایش سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق، باعث کاهش زاویه خم در ورق آلومینیم می‌شود. شیچان و جینسانگ [۸]، به بررسی پارامترهای فرایند در خمش ورق‌های فلزی با استفاده از لیزر پرداختند. آنان پارامترهای فرایند را به سه دسته پارامترهای انرژی لیزر (توان، سرعت پرتو، قطر پرتو و تعداد پالس)، جنس ورق (ضریب رسانش، ضریب انبساط حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی) و هندسه ورق (طول، عرض و ضخامت) تقسیم نمودند. نتایج نشان دهنده اثرگذاری قابل توجه ضخامت بر کاهش زاویه خم است.

علاوه بر موارد ذکر شده تحقیقات زیادی روی مواد مختلف در فرایند شکل‌دهی فلزات صورت گرفته که فولادهای کربنی، سیلیکون، کروم و آلیاژهای تیتانیوم [۹-۱۱]، از جمله این موارد می‌باشند؛ همچنین، پژوهش‌هایی در زمینه کاربرد فرایند شکل‌دهی با لیزر در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و غیر فلزی انجام شده و اثر متغیرهای فرایند را در جنس‌های متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان می‌توان به پژوهش لیو و همکاران [۱۲] اشاره کرد. آنان بر اساس مدل ولرتسن [۱۳]، مدلی برای پیش‌بینی زاویه خمش در کامپوزیت‌ها تدوین کردند که در آن، تغییرات

دقت روش‌های تحلیلی در پیش‌بینی میزان تغییر شکل مومسان، روش ارائه شده بر مبنای انرژی می‌تواند در ادامه به عنوان معیاری به منظور پیش‌بینی مقدار کمی زاویه خم به کار گرفته شود.

## ۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

سطح مقطعی مربعی با ابعاد  $80 \times 80$  میلی‌متر به عنوان هندسه اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. مدل به صورت سه بعدی و شکل‌پذیر، در نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS Workbench ترسیم شد.

مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد A-131 در دماهای مختلف، بر اساس جنس ورق به نرم‌افزار معرفی شد. در این میان می‌توان به ضریب رسانش حرارتی، ظرفیت گرمایی، چگالی، ضریب یانگ، تنش تسلیم، ضریب انبساط حرارتی و همچنین رفتار مکانیکی ماده در محدوده‌ی پلاستیک اشاره کرد. در جدول ۱ و ۲، مقادیر این مشخصه‌ها بیان شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های حرارتی فولاد A-131 [۱۶]

ظرفیت گرمایی (J/Kg°C)	رسانش حرارتی (W/mm°C)	دما (°C)
۴۸۶	۰/۰۵۱۹	۰
۴۸۶	۰/۰۵۱۱	۱۰۰
۴۹۸	۰/۰۴۸۶	۲۰۰
۵۱۵	۰/۰۴۴۴	۳۰۰
۵۳۶	۰/۰۴۲۷	۴۰۰
۵۵۷	۰/۰۳۹۴	۵۰۰
۵۸۶	۰/۰۳۵۶	۶۰۰
۶۱۹	۰/۰۳۱۸	۷۰۰

شرایط مرزی به دو صورت حرارتی و مکانیکی روی مدل اعمال می‌شود. شرایط مرزی حرارتی به صورت همرفتی و تابشی بر سطح ورق اعمال شد. انتقال حرارت همرفت بر اساس قانون سرمایش نیوتن بوده و با معادله ۱ بیان می‌شود.

مشخصه‌های حرارتی و مکانیکی مواد از قبیل، تنش تسلیم، مدول الاستیسیته، ضریب جذب و ضریب رسانش در نظر گرفته شده است؛ همچنین، تلاش‌هایی به منظور ارائه روابط تحلیلی برای پیش‌بینی زاویه خم انجام گرفت که در این میان می‌توان به پژوهش‌شن و همکاران [۱۴] اشاره کرد. آنان با در نظر گرفتن این فرض که تغییر شکل پلاستیک فقط در مرحله حرارت دهی اتفاق می‌افتد، رابطه‌ای را به منظور پیش‌بینی زاویه خم ارائه نمودند.

یکی از کاربردهای فرایندهای شکل‌دهی فلزات، فرم‌دهی فولادهای استحکام بالا است. به دلیل اهمیت بالایی استحکام و نسبت استحکام به وزن در سازه‌های مکانیکی، استفاده از فولادهای استحکام بالا در سال‌های اخیر، مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به خواص این فولادها (قابلیت تحمل کرنش پلاستیک کمتر تا نقطه ناپایداری و تنش تسلیم بالا)، فرایند شکل‌دهی این دسته از مواد با چالش‌هایی روبرو خواهد شد. فرایند شکل‌دهی با لیزر می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب به منظور کاربرد در این حوزه، مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

با توجه به تاثیرپذیری فرایند از پارامترهای مرتبط با مسیر اسکن و منبع حرارتی [۶ و ۷] و همچنین، پیچیدگی فرایند شکل‌دهی با لیزر و عدم قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج تحقیقات پیشین به حالت‌های مشابه، نیاز است تا بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای فرایند و شناسایی موثرترین پارامترها، در این حوزه کاربردی نیز، مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، در این پژوهش، شکل‌دهی فولاد A-131 با استفاده از لیزر، مورد بررسی قرار گرفت. نحوه اثرگذاری پارامترهای فرایند بر زاویه خم، شناسایی پارامترهای موثر بر فرایند، نحوه اثرگذاری تعاملی پارامترها بر زاویه خم و ارائه رابطه رگرسیون به منظور پیش‌بینی زاویه خم، مورد بررسی قرار گرفت؛ همچنین با توجه به زمان‌بر بودن تحلیل‌های حرارتی-مکانیکی، در این پژوهش روشی بر مبنای انرژی به منظور پیش‌بینی اثر پارامترهای فرایند بر روند افزایشی و کاهش زاویه خم و تغییرات شدت اثر پارامترها بر زاویه خم ارائه گردید که می‌تواند به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرایند برای دستیابی به حداکثر زاویه خم، مورد استفاده قرار گیرد؛ همچنین، با توجه به قابلیت معیار ارائه شده در پیش‌بینی روند تغییر شکل و با در نظر گرفتن محدودیت

جدول ۲- مشخصه‌های مکانیکی فولاد A-131 [۱۶]

تنش تسلیم (کرنش پلاستیک = ۰/۱)	تنش تسلیم (کرنش پلاستیک = ۰)	انقباض	ضریب پواسون	مدول الاستیک (GPa)	دما (°C)
۴۲۲/۶۴	۳۴۴/۶۴	۰/۰۰۰۰۱۱۷	۰/۲۹۶	۲۰۶۰۰۰	۲۰
۴۰۹/۹۳	۳۳۱/۹۳	۰/۰۰۰۰۱۱۷	۰/۳۱۱	۲۰۳۰۰۰	۱۰۰
۳۸۶/۳۰	۳۰۸/۳۰	۰/۰۰۰۰۱۲۲	۰/۳۳۰	۲۰۱۰۰۰	۲۰۰
۳۴۲/۵۷	۲۷۶/۰۷	۰/۰۰۰۰۱۲۸	۰/۳۴۹	۲۰۰۰۰۰	۳۰۰
۲۹۰/۲۲	۲۳۵/۲۲	۰/۰۰۰۰۱۳۳	۰/۳۶۷	۱۶۵۰۰۰	۴۰۰
۲۳۰/۷۷	۱۸۵/۷۷	۰/۰۰۰۰۱۳۸	۰/۳۸۶	۱۰۰۰۰۰	۵۰۰
۱۶۲/۷۱	۱۲۷/۷۱	۰/۰۰۰۰۱۴۴	۰/۴۰۵	۶۰۰۰۰	۶۰۰
۹۶/۰۵	۶۸/۵۵	۰/۰۰۰۰۱۴۸	۰/۴۲۳	۴۰۰۰۰	۷۰۰
۸۴/۳۵	۶۴/۳۵	۰/۰۰۰۰۱۴۸	۰/۴۴۲	۳۰۰۰۰	۸۰۰
۶۰/۶۵	۴۵/۶۵	۰/۰۰۰۰۱۴۸	۰/۴۶۱	۲۰۰۰۰	۹۰۰
۲۱/۳۲	۱۱/۳۲	۰/۰۰۰۰۱۴۸	۰/۴۸۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰
-	-	۰/۰۰۰۰۱۴۸	۰/۴۸۰	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰

از وجوه کناری ورق مربعی شکل به منظور مقید کردن جابجایی آن انجام شده است. در این حالت، جابجایی خطی در سه راستای اصلی محدود گردید (گیره‌بندی یک سر گیردار).

بارگذاری حرارتی در این فرایند به صورت پیوسته و مطابق با توزیع حرارتی گوسین (معادله ۳) است. با توجه به حرکت نسبی پرتو لیزر و قطعه‌کار نسبت به هم، پرتو لیزر به صورت متحرک شبیه‌سازی می‌شود [۱۸].

$$I_s(x, y) = \frac{\eta P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \quad (۳)$$

در رابطه‌ی فوق،  $I_s(x, y)$  توزیع شدت پرتو لیزر بر حسب وات بر متر مربع،  $\eta$  مقدار ضریب جذب پرتو لیزر روی قطعه‌کار،  $r$  شعاع پرتو لیزر بر حسب متر و  $P$  مقدار توان لیزر بر حسب وات است و مقدار ضریب جذب ( $\eta$ ) برابر با ۰/۶ در نظر گرفته شد [۱۹]. ورق به صورت شکل‌پذیر مدل‌سازی شده و از المان‌های Solid186 به منظور شبکه ورق استفاده شده است. المان‌هایی با ابعاد ۰/۵×۰/۵ به منظور شبکه بندی

$$q = h_c (T_s - T) \quad (۱)$$

در این معادله،  $h_c$  برابر با ضریب انتقال حرارت همرفتی،  $T_s$  برابر با درجه حرارت ورق و  $T$  نیز معادل با درجه حرارت محیط است که برابر با ۲۵°C فرض می‌شود. انتقال حرارت به صورت تابش نیز از معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$q = 5/67 \times 10^{-8} \varepsilon (T_s^4 - T^4) \quad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق،  $\varepsilon$  برابر با ضریب تابش‌پذیری سطح است [۱۷]. به منظور جلوگیری از حرکت ورق در حین فرآیند، اعمال شرایط مرزی مکانیکی از طریق گیره‌بندی قطعه انجام می‌گیرد. دو نوع گیره‌بندی یک‌سر گیردار و گیره‌بندی ۷ شکل مرسوم است [۱۸].

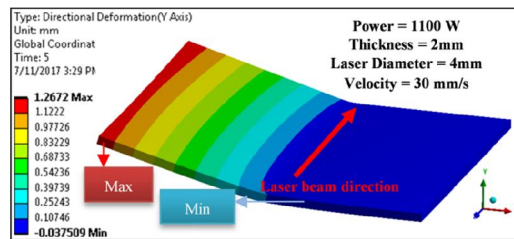
در روش گیره‌بندی یک‌سر گیردار، یک انتهای ورق توسط گیره بسته می‌شود و جابجایی ورق به منظور انجام خمش، از انتهای دیگر ورق اتفاق می‌افتد. در روش گیره‌بندی ۷ شکل، قطعه‌کار روی دو پایه‌ی ساده نگه‌داشته می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، گیره‌بندی روی یکی

در ادامه به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی [۱۷] (شکل دهی با لیزر CO<sub>2</sub> با طول موج ۱۰/۶ میکرومتر) و مدل شبیه‌سازی شده مقایسه شدند. مطابق با شکل ۳، زاویه خم در مسیر ABC و توزیع حرارت در مسیر DBE، مورد بررسی قرار گرفتند. در این شرایط، متغیر توان پرتو، قطر، سرعت و ضخامت ورق ثابت در نظر گرفته شده و به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ وات، ۵ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر می‌باشند. روند توزیع حرارت تجربی و شبیه‌سازی در شرایط مذکور، در شکل ۴ نشان داده شده است؛ همچنین، میزان زاویه خم در سرعت اسکن ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نیز با نتایج تجربی [۱۷] مقایسه شدند و نتایج بدست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است.

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۴، توزیع حرارت در قطعه‌کار به نحوی است که بیشترین مقدار دما در ناحیه میانی آن به وقوع می‌پیوندد. این موضوع ناشی از موقعیت مکانی مسیر اسکن است؛ لذا، با توجه به عبور پرتو لیزر از قسمت میانی ورق، در نواحی نزدیک به بخش میانی مقدار دما افزایش یافته و در نقطه B به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید. بیشترین اختلاف نتایج تجربی و شبیه‌سازی در توزیع دما، برابر با ۴/۱۱ درصد است که ناشی از تفاوت جزئی در خواص مکانیکی و حرارتی نمونه آزمون تجربی و مدل‌سازی و همچنین، شرایط محیطی فرایند از جمله انتقال حرارت به محیط است. در پژوهش حاضر، علاوه بر دما و شار حرارتی، زاویه خم نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت؛ لذا، صحت نتایج پیش‌بینی زاویه خم (حاصل از مدل‌سازی) به کمک نتایج تجربی ارزیابی شد. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی زاویه خم در شکل ۵ نشان داده شده است. زوایای خم در سرعت اسکن ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه مقایسه شدند و نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که زاویه خم با ماکزیمم خطای ۲/۹۳ درصد در سرعت اسکن ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، توسط مدل‌سازی المان محدود قابل پیش‌بینی است. نتایج بیانگر تطابق قابل قبول بین آزمون‌های تجربی و نمونه‌های شبیه‌سازی شده است. با توجه به این مسئله، می‌توان از نتایج حاصل از بررسی‌های المان محدود به منظور بررسی اثر متغیرهای فرایند بر میزان تغییر شکل و توزیع حرارت استفاده کرد. پس از صحت‌سنجی نتایج و اطمینان از دقت

ناحیه میانی (ناحیه عبور پرتو لیزر) و المان‌هایی با ابعاد ۱×۱ برای شبکه بندی نواحی دورتر مورد استفاده قرار گرفتند. در مجموع، ۳۵۲۰۰ المان به منظور شبکه بندی ورق به کار گرفته شد.

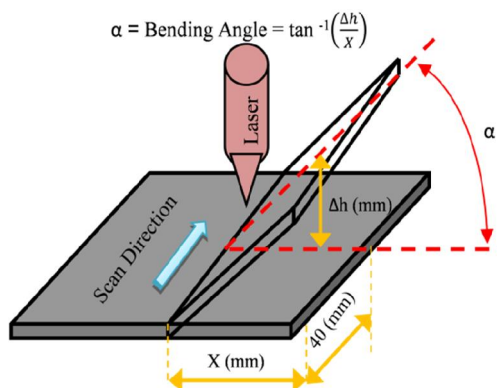
کانتور جابجایی ورق فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر که تحت تابش پرتو لیزر با توان ۱۱۰۰ وات، سرعت ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و قطر پرتو لیزر ۴ میلی‌متر قرار گرفته است، در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به هندسه نهایی قطعه در شکل ۱، محصولی به الگوی خم ۷ شکل در پایان فرآیند به دست آمده است.



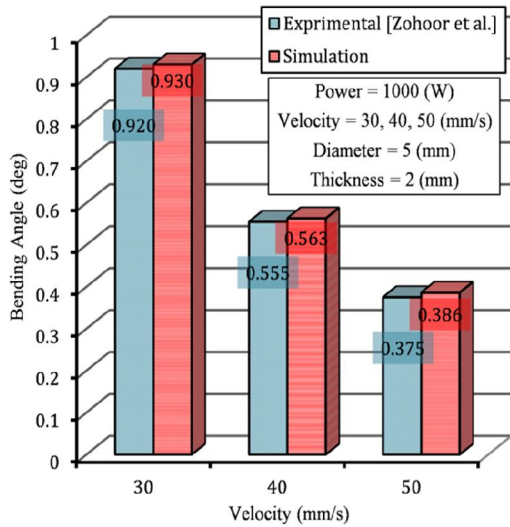
شکل ۱- تغییر شکل ورق در مدل‌سازی اجزای محدود

### ۳- صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

قبل از ارائه نتایج و بررسی اثر متغیرها، نحوه اندازه‌گیری زاویه خم در محصول نهایی باید تعیین گردد. نحوه اندازه‌گیری زاویه خم در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه اندازه‌گیری زاویه خم

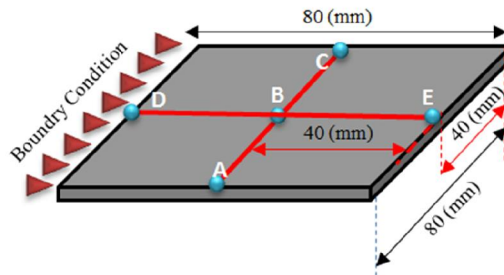


شکل ۵- مقایسه میزان زاویه خم در تست‌های تجربی و مدل شبیه‌سازی شده

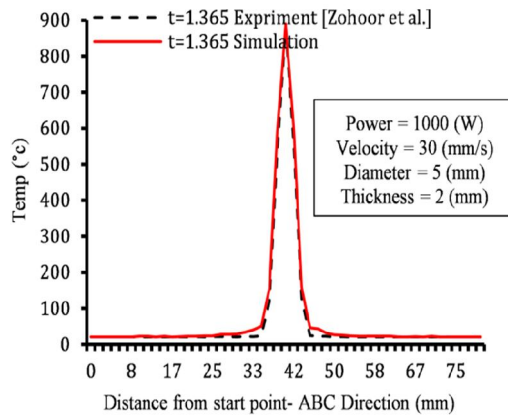
۴-۱- طراحی آزمایش‌ها به کمک روش پاسخ سطح در انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی، از روش طراحی آزمایش با طرح ترکیب مرکزی کوچک استفاده شده است. در طی این آزمایش‌ها، با شناسایی عوامل موثر بر زاویه خم محصول V شکل، رابطه‌ای بین عوامل ورودی و متغیر پاسخ استخراج می‌گردد. در طراحی آزمایش به شیوه ترکیب مرکزی کوچک، سه سطح به ازای هر عامل تعریف می‌گردد. عوامل مورد بررسی در آزمایش‌های شبیه‌سازی و سطوح متناظر آن شامل، بیشینه توان، سرعت اسکن، قطر لیزر و ضخامت ورق می‌باشند. اثر عوامل مذکور روی زاویه خم مورد بررسی قرار گرفت. عوامل ذکر شده و سطوح متناظر آن، در جدول ۳ نشان داده شده است. با تعریف چهار عامل موثر بر پاسخ و تعیین سه سطح به ازای هر عامل، تعداد نقاط طراحی به شیوه‌ی ترکیب مرکزی کوچک برابر با ۲۵ خواهد بود.

به منظور طراحی آزمایش، بررسی نتایج و شناسایی پارامترهای موثر، از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است که یکی از رایج‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل آماری است. مقادیر واقعی و کد شده متغیرها در سطوح مختلف در جدول ۳ بیان شده است.

مدل‌سازی، در ادامه اثر متغیرهای فرآیند بر میزان تغییر شکل، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۳- تعیین مسیر ABC و DBE



شکل ۴- مقایسه توزیع حرارت در تست‌های تجربی و مدل شبیه‌سازی شده

#### ۴- روش آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM) از جمله روش‌هایی است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی استفاده می‌شود که تحت تاثیر چندین متغیر قرار دارند [۲۰]. در هر آزمایش، تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شود. این روش توانایی ارائه نمودارهای خروجی مناسب جهت مشخص کردن نقطه بهینه در میان چندین پارامتر را داراست. ضمن اینکه قابلیت مدل‌سازی رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را به صورت یک مدل ریاضی دارد [۲۱].

جدول ۴ نشان دهنده طرح کد نشده ترکیب آزمایشات بر مبنای روش پاسخ سطح می‌باشد. برای تحلیل و بررسی نتایج و شناسایی عوامل موثر بر فرایند از آنالیز واریانس استفاده می‌شود. بعد از شناسایی عوامل موثر، رابطه زاویه خم بر حسب متغیرهای موثر به صورت یک معادله رگرسیون درجه دو به دست خواهد آمد که شامل ترم‌های اصلی و ترم‌های تعامل اثر است.

جدول ۳- مقادیر واقعی و کد شده فاکتورهای ورودی

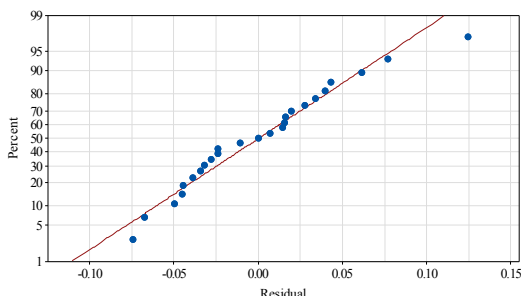
فاکتورهای ورودی	-۱	۰	+۱
توان لیزر [P] [w]	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
سرعت اسکن [V] [mm/s]	۳۰	۴۰	۵۰
ضخامت ورق [T] [mm]	۲	۲/۵	۳
قطر لیزر [D] [mm]	۴	۵	۶

جدول ۴- ترکیب‌های مختلف آزمایش به روش سطح پاسخ

شماره‌ی آزمایش	عامل ۱ ضخامت ورق [mm]	عامل ۲ توان لیزر [W]	عامل ۳ سرعت [mm/s]	عامل ۴ قطر پرتو [mm]	پاسخ زاویه خم [deg]
۱	۲	۱۰۰۰	۴۰	۵	۰/۶۴۹۷
۲	۳	۹۰۰	۳۰	۶	۰/۱۱۴۳
۳	۲/۵	۱۱۰۰	۴۰	۵	۰/۳۱۶۶
۴	۳	۱۱۰۰	۳۰	۶	۰/۲۲۹۱
۵	۲	۱۱۰۰	۳۰	۴	۱/۱۹۶۳
۶	۲/۵	۹۰۰	۴۰	۵	۰/۱۸۱۹
۷	۲/۵	۱۰۰۰	۵۰	۵	۰/۱۷۹۸
۸	۲	۱۱۰۰	۳۰	۶	۰/۵۱۸۷
۹	۲/۵	۱۰۰۰	۴۰	۶	۰/۱۳۵۵
۱۰	۲/۵	۱۰۰۰	۴۰	۵	۰/۲۶۰۷
۱۱	۲	۹۰۰	۳۰	۴	۰/۸۰۴۷
۱۲	۳	۱۱۰۰	۳۰	۴	۰/۵۴۸۴
۱۳	۳	۹۰۰	۳۰	۴	۰/۳۴۳۶
۱۴	۲/۵	۱۰۰۰	۳۰	۵	۰/۴۰۹۵
۱۵	۲	۹۰۰	۵۰	۴	۰/۳۷۶۱
۱۶	۳	۱۱۰۰	۵۰	۴	۰/۲۶۸۴
۱۷	۳	۹۰۰	۵۰	۴	۰/۱۶۹۷
۱۸	۳	۱۱۰۰	۵۰	۶	۰/۱۰۳۲
۱۹	۲	۹۰۰	۳۰	۶	۰/۲۶۵۶
۲۰	۳	۱۰۰۰	۴۰	۵	۰/۱۸۴۵
۲۱	۳	۹۰۰	۵۰	۶	۰/۰۵۱۸
۲۲	۲	۱۱۰۰	۵۰	۴	۰/۶۳۱۰
۲۳	۲/۵	۱۰۰۰	۴۰	۴	۰/۴۱۶۸
۲۴	۲	۱۱۰۰	۵۰	۶	۰/۱۹۸۱
۲۵	۲	۹۰۰	۵۰	۶	۰/۰۸۶۹

جدول ۵- ضریب معادله رگرسیون در مدل اولیه و اصلاح شده برای زاویه خم

ترم ها	مدل سازی اولیه		مدل اصلاح شده اول		مدل اصلاح شده دوم	
	ضریب معادله	P مقدار	ضریب معادله	P مقدار	ضریب معادله	P مقدار
ثابت	۰/۲۸۴۰	۰/۰۰۰	۰/۲۷۱۵	۰/۰۰۰	۰/۲۷۱۵	۰/۰۰۰
T	-۰/۱۵۰۸	۰/۰۰۰	-۰/۱۵۰۸	۰/۰۰۰	-۰/۱۵۰۸	۰/۰۰۰
P	۰/۰۸۹۷	۰/۰۰۰	۰/۰۸۹۷	۰/۰۰۰	۰/۰۸۹۷	۰/۰۰۰
V	-۰/۱۳۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۱۳۱۴	۰/۰۰۰	-۰/۱۳۱۴	۰/۰۰۰
D	-۰/۱۶۹۶	۰/۰۰۰	-۰/۱۶۹۶	۰/۰۰۰	-۰/۱۶۹۶	۰/۰۰۰
T.T	۰/۱۲۹۲	۰/۰۰۲	۰/۱۲۹۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰۲۹	۰/۰۰۲
P.P	-۰/۰۳۸۶	۰/۲۴۵	-	-	-	-
V.V	۰/۰۰۶۸	۰/۸۳۳	-	-	-	-
D.D	-۰/۰۱۱۷	۰/۷۱۵	-	-	-	-
T.P	-۰/۰۳۳۸	۰/۰۲۲	-۰/۰۳۳۸	۰/۰۲۶	-۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۴
T.V	۰/۰۵۳۲	۰/۰۰۲	۰/۰۵۳۲	۰/۰۰۲	۰/۰۵۳۲	۰/۰۰۳
T.D	۰/۰۶۹۲	۰/۰۰۰	۰/۰۶۹۲	۰/۰۰۰	۰/۰۶۹۲	۰/۰۰۰
P.V	-۰/۰۲۰۸	۰/۰۴۹	-۰/۰۲۰۸	۰/۰۵۹	-	-
P.D	-۰/۰۲۶۲	۰/۰۶۲	-	-	-	-
V.D	۰/۰۴۷۵	۰/۰۰۳	۰/۰۴۷۵	۰/۰۰۴	۰/۰۴۷۵	۰/۰۰۶



شکل ۶- نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده

مقدار سطح اطمینان در تحقیق حاضر برابر ۰/۹۵ انتخاب شده است. این بدان معناست که مقادیر P-value کوچک‌تر از ۰/۰۵، نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن مدل است. به منظور تحلیل نتایج، در ابتدا جدول آنالیز واریانس که شامل ضریب معادله رگرسیون و مقدار P-value برای همه ترم‌ها است، تشکیل می‌شود (مدل‌سازی اولیه). ترم‌های موثر و غیر موثر با در نظر گرفتن میزان P-value شناسایی می‌شوند. در ادامه تحلیل، پارامترهای غیر موثر حذف شده و آنالیز عددی مجدداً انجام می‌گیرد (مدل اصلاح شده اول). این فرایند (حذف عوامل غیر موثر)، بر حسب مقادیر جدید P-value در مدل اصلاح شده اول نیز تکرار شد تا در نهایت ضرایب معادله رگرسیون صرفاً بر مبنای پارامترهای موثر تعیین گردند (مدل اصلاح شده دوم). در نهایت جدول آنالیز واریانس اصلاح شده بر حسب ترم‌های موثر (با توجه به قابلیت اطمینان ۰/۹۵ درصد) تشکیل می‌شود که دارای مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ درصد می‌باشند. جدول آنالیز واریانس مدل اولیه و اصلاح شده برای متغیرهای کد شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

مقدار  $R-Sq. (adj) = 94/8\%$  است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل برازش شده است. تحلیل واریانس پرکاربردترین تحلیل برای بررسی اثر فاکتورها در فرایند است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع خطا، استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به بررسی جواب‌های مسئله می‌پردازد؛ لذا، منطقی است که قبل از بکاربردن این تحلیل، فرضیات این روش مورد بررسی قرارگیرد. نرمال بودن توزیع خطا، توسط نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده بررسی می‌شود که در شکل ۶ نشان داده شده است.

در نمودار نرمال، داده‌ها در اطراف خط نرمال به صورت مناسب پراکنده شده‌اند که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده (Residual) یا همان خطاهاست؛ همچنین، با توجه به اینکه باقی‌مانده‌ها روند خاصی را طی نمی‌کنند (عدم رعایت ساختار مشخص توسط نقاط نمودار شکل ۷)، ثابت بودن واریانس و مستقل بودن آن ثابت می‌شود. مقدار p-value در آنالیزهای عددی برابر با ۰/۵۴۱ بدست آمد که به صورت کمی وضعیت نرمال بودن توزیع مقادیر باقی‌مانده را ارزیابی می‌نماید. بزرگتر بودن مقدار p-value از بازه اطمینان (که در این پژوهش ۰/۰۵ درصد در نظر گرفته شده است)

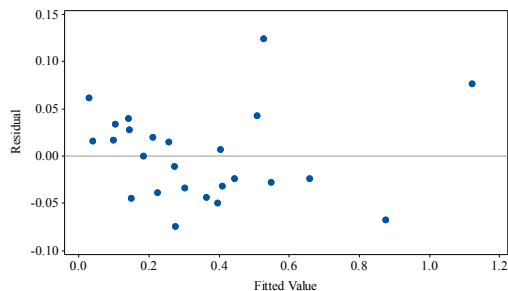


پارامترهای فرایند شکل‌دهی حرارتی است که رابطه مستقیم با منبع حرارت دارد. مطابق با نتایج، افزایش توان موجب افزایش شدت اثرگذاری توان پرتو لیزر بر میزان تغییر شکل (زاویه خم) می‌گردد (شکل ۸-الف). ضریب مثبت پارامتر توان در معادله ۴ نیز تایید کننده این موضوع است. در فرایند شکل‌دهی با لیزر، قطعه کار در اثر تنش‌های پسماند حرارتی تغییر شکل می‌یابد. از طرفی سطح تنش‌های پسماند حرارتی وابسته به میزان و نحوه توزیع حرارت و شار حرارتی روی سطح قطعه کار است؛ در نتیجه انتظار می‌رود، عواملی که بر زاویه خم اثرگذارند، بر میزان و نحوه توزیع حرارت اعمال شده بر سطح قطعه کار نیز موثر باشند. با افزایش توان لیزر مقادیر دمای ایجاد شده در نواحی مختلف قطعه کار، روند افزایشی خواهند داشت؛ همچنین شار حرارتی در قطعه کار نیز با افزایش توان روند افزایشی را طی خواهد کرد. عوامل مذکور موجب تغییرات در میزان انبساط و انقباض نواحی مختلف قطعه می‌گردد و در نهایت با ایجاد تغییر در سطح تنش‌ها، موجب افزایش میزان تغییر شکل می‌شود.

اثر تغییرات قطر پرتو لیزر با در نظر گرفتن مقادیر ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر برای قطر پرتو، مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۸-ب نشان داده شده است، افزایش قطر پرتو، کاهش شدت اثرگذاری پارامتر مذکور و کاهش میزان زاویه خم را در پی خواهد داشت. افزایش قطر پرتو موجب کاهش چگالی توان لیزر می‌گردد که این موضوع در نهایت منجر به کاهش میزان تغییر شکل و زاویه خم می‌شود.

همچنین اثر سرعت حرکت پرتو لیزر (سرعت اسکن) به عنوان یکی دیگر از پارامترهایی مورد بررسی قرار گرفت که به صورت مستقیم با منبع حرارتی در ارتباط است. محدوده تغییرات سرعت اسکن در بازه ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج در شکل ۸-ج، افزایش سرعت حرکت پرتو لیزر (سرعت اسکن) موجب کاهش میزان تغییر شکل (شیب منفی نمودار) و کاهش شدت اثرگذاری آن می‌گردد (کاهش شیب منفی نمودار در محدوده ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه نسبت به ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه). این موضوع ناشی از کاهش شار حرارتی ایجاد شده در قطعه کار به دلیل کاهش زمان حرارت‌دهی است.

ضخامت ورق یکی دیگر از پارامترهای موثر بر فرایند است. طبق نتایج، افزایش ضخامت ورق موجب کاهش تغییر



شکل ۷- نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر برازش شده

نشان می‌دهد که خطا دارای توزیع نرمال است. اکنون که صحت فرض‌های بالا (نرمال بودن توزیع خطا و مستقل بودن آن) اثبات گردید، می‌توان به صحت داده‌های حاصل از آزمایش‌ها پی‌برد و به نتایج ANOVA اعتماد نمود که در جدول ۵ بیان شده است.

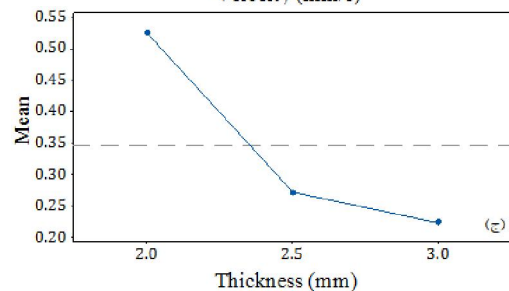
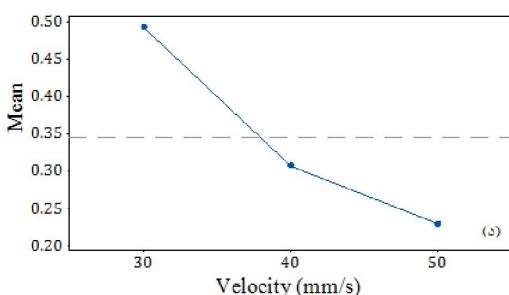
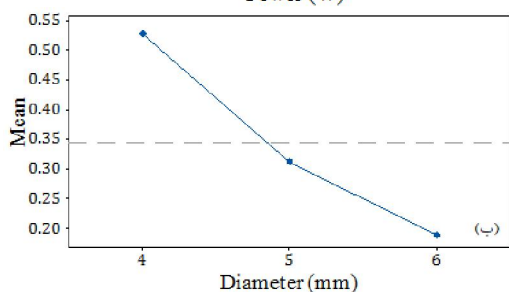
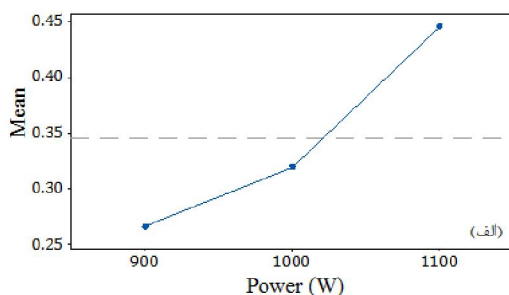
با توجه به نتایج بدست آمده از جدول آنالیز واریانس، معادله رگرسیون مدل اصلاح شده برای متغیرهای کد نشده، در معادله ۴ نشان داده شده است. اکنون که صحت مدل استفاده شده مورد تأیید واقع شده است، می‌توان رابطه پیش بینی زاویه خم در شکل‌دهی فولاد A-131 که توسط این مدل ارائه می‌شود را قابل اطمینان دانست. مطابق با نتایج، زاویه خم عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Bending angle} = & 6.13 - 2.801 [T] \\ & + 0.002589 [P] - 0.0635 [V] - 0.7055 [D] \\ & + 0.412 [T] * [T] - 0.000677 [T] * [P] \\ & + 0.01064 [T] * [V] + 0.1384 [T] * [D] \\ & + 0.00475 [V] * [D] \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $T$  برابر با ضخامت ورق بر حسب میلی‌متر،  $P$  توان لیزر بر حسب وات،  $V$  سرعت اسکن پرتو بر حسب میلی‌متر بر ثانیه و  $D$  قطر پرتو لیزر بر حسب میلی‌متر است.

#### ۵- اثر پارامترهای موثر بر زاویه خم

به منظور تحلیل دقیق اثر پارامترهای موثر در فرایند، می‌بایست اثر فاکتورهای اصلی و برهم کنش موثر فاکتورها مورد بررسی قرار گیرند. در ابتدا اثر توان پرتو لیزر بر تغییرات زاویه خم، مورد بررسی قرار گرفت. توان پرتو لیزر یکی از



شکل ۸- اثر فاکتورهای اصلی فرایند بر زاویه خم، (الف) توان، (ب) قطر پرتو، (ج) سرعت اسکن و (د) ضخامت ورق

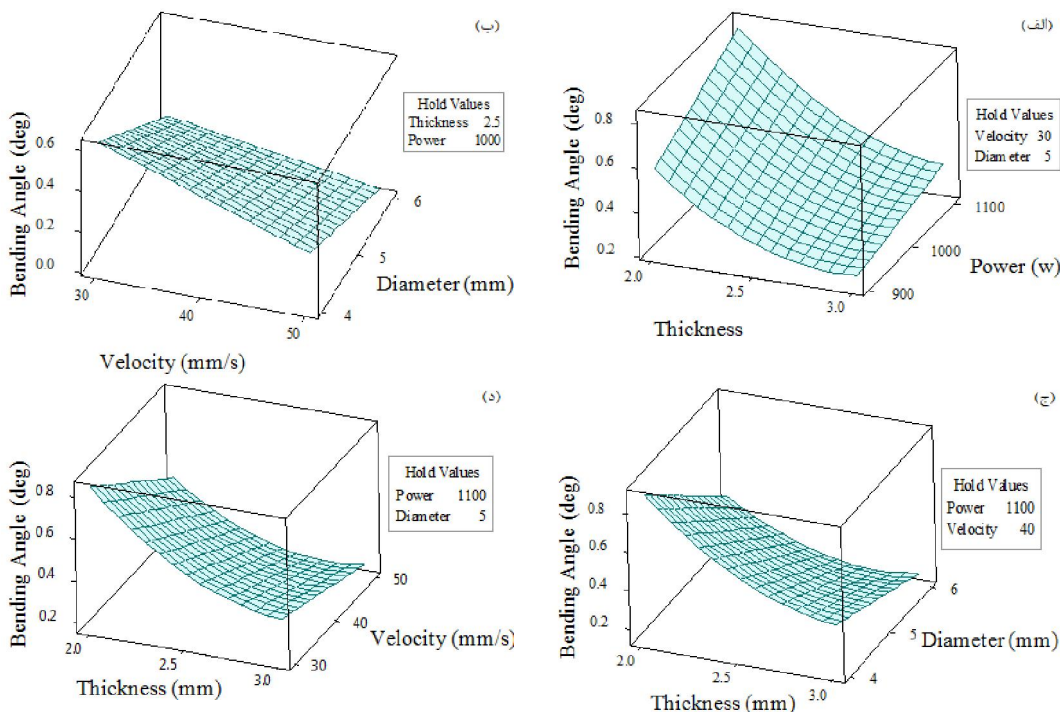
با توجه به نتایج، افزایش توان پرتو از ۹۰۰ به ۱۱۰۰ وات در شرایطی که ضخامت ورق ۲ میلی‌متر است، موجب می‌گردد تا زاویه خم از محدوده ۰/۵ درجه تا محدوده بزرگتر از ۰/۸ درجه افزایش یابد؛ اما در ضخامت ۳ میلی‌متر، افزایش توان در محدوده ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ وات موجب می‌گردد تا زاویه

شکل و زاویه خم در نمونه نهایی می‌شود؛ همچنین، شدت اثرگذاری این پارامتر در کران‌های بالایی محدوده مورد بررسی کاهش می‌یابد. کاهش زاویه خم در ازای افزایش ضخامت می‌تواند ناشی از افزایش مقاومت ماده در برابر تغییر شکل باشد. افزایش ضخامت موجب می‌گردد تا به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک، انتقال از وضعیت الاستیک به پلاستیک در منطقه وسیع‌تری به وقوع بپیوندد که این موضوع در شرایطی که سایر پارامترهای فرایند ثابت می‌باشند، منجر به کاهش میزان تغییر شکل خواهد شد. مطالب بیان شده در شکل ۸-د نشان داده شده است. ضرایب منفی پارامترهای سرعت اسکن و ضخامت ورق در معادله ۴ نیز، بیانگر اثر کاهشی پارامترهای مذکور بر زاویه خم است که همراستا با نتایج اشاره شده در این بخش است.

با توجه به ارزیابی متغیرهای فرایند با استفاده از روش پاسخ سطح، ضرایب معادله رگرسیون و تغییر بیشتر (در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵۵) نمودار شدت اثرگذاری قطر پرتو بر تغییر شکل نسبت به سایر پارامترها، می‌توان دریافت که در میان متغیرهای فرایند، قطر پرتو اثرگذارترین پارامتر و بعد از آن ضخامت، سرعت اسکن و توان پرتو به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.

تاکنون اثرگذاری پارامترهای فرایند بر زاویه خم در شرایطی بررسی شد که از چهار پارامتر مورد بررسی، سه پارامتر ثابت بوده و اثر یکی از پارامترها بر زاویه خم بررسی شد. طبق بررسی‌های انجام شده در روش پاسخ سطح و تعیین پارامترهای اثرگذار، اثرات تعاملی توان- ضخامت، سرعت اسکن- ضخامت، قطر پرتو- ضخامت و اثر تعاملی سرعت اسکن- قطر پرتو، از جمله پارامترهای موثر بر زاویه خم معرفی شدند. در ادامه، نحوه اثرگذاری این متغیرها بر زاویه خم و شدت اثر آن‌ها، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

اثر متقابل توان و ضخامت ورق بر میزان زاویه خم در شکل ۹-الف نشان داده شده است. همانطور پیش‌تر بیان شد، افزایش ضخامت در جهت کاهش و افزایش توان در جهت افزایش زاویه خم اثرگذار خواهند بود؛ اما با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹-الف، شدت تغییرات زاویه خم به ازای افزایش توان، در ضخامت‌های بالاتر کاهش می‌یابد.



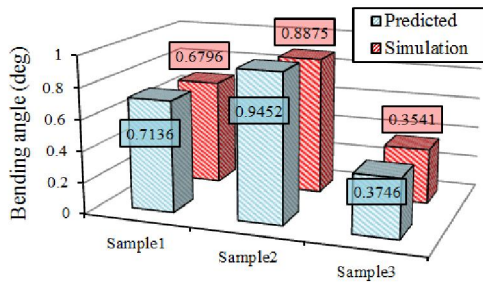
شکل ۹- اثر تعاملی پارامترهای فرایند بر زاویه خم، الف) توان و ضخامت ورق، ب) سرعت اسکن و قطر پرتو، ج) قطر پرتو و ضخامت ورق، د) سرعت اسکن و ضخامت ورق

و قطر پرتو برابر با ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۴ میلی‌متر بدست آمد؛ در حالی که کمترین زاویه خم (برابر با ۰/۰۷۴ درجه) در شرایطی ایجاد می‌شود که سرعت اسکن و قطر پرتو به ترتیب برابر با ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شوند. در حالات فوق، توان لیزر و ضخامت ورق به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ وات و ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

از سوی دیگر، اثر تعاملی ضخامت و قطر پرتو بر زاویه خم نیز، بیانگر کاهش شدت اثر این دو کمیت بر تغییرات زاویه خم در کران بالای محدوده مورد بررسی است. این موضوع در نمودار سه بعدی اثر تعاملی ضخامت و قطر پرتو بر زاویه خم، در شکل ۹-ج مشهود است. بر اساس نتایج، در شرایطی که توان و سرعت اسکن برابر با ۱۱۰۰ وات و ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه (ثابت) در نظر گرفته شده است، ضخامت ۲ میلی‌متر و قطر پرتو ۴ میلی‌متر حداکثر زاویه خم را در پی خواهد داشت که برابر با ۰/۹۱ درجه است.

خم از محدوده ۰/۳ درجه به ۰/۴ درجه افزایش یابد؛ در نتیجه، با توجه به نمودار تعامل اثر دو پارامتر توان و ضخامت ورق (شکل ۹-الف)، می‌توان به کاهش شدت اثر توان پرتو بر زاویه خم در ضخامت‌های بالاتر پی‌برد. بیشترین زاویه خم در این محدوده به ازای توان ۱۱۰۰ وات و ضخامت ۲ میلی‌متر (سرعت اسکن و قطر پرتو به ترتیب برابر با ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۵ میلی‌متر) بدست خواهد آمد که برابر با ۰/۸۶ درجه است.

در ادامه، بررسی اثر تعاملی تغییرات سرعت اسکن و قطر پرتو مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، قطر و سرعت اسکن پرتو لیزر از عوامل اثرگذار بر میزان تغییر شکل می‌باشند. اثر متقابل این دو پارامتر بر میزان زاویه خم در شکل ۹-ب نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این بخش شدت اثرگذاری متغیرهای سرعت و قطر پرتو است. با توجه به نتایج، در قطر و سرعت‌های بالاتر شدت اثرگذاری متغیرها بر زاویه خم کاهش می‌یابد. در این حالت، بیشترین زاویه خم (برابر با ۰/۶۲ درجه) با در نظر گرفتن سرعت اسکن



شکل ۱۰- مقدار زاویه خم در نمونه‌های انتخابی

### ۷- بررسی انترویی

با توجه به نتایج بدست آمده و بررسی‌های حرارتی، می‌توان دریافت که تغییر مقدار پارامترهایی همچون توان، قطر پرتو، سرعت اسکن و ضخامت ورق از طریق اثرگذاری بر توزیع حرارت (دمای نواحی مختلف قطعه) و شارحرارتی موجب تغییرات در زاویه خم می‌شوند؛ لذا، در بخش پایانی این پژوهش، راهکاری به منظور توصیف کمی تغییرات توزیع حرارت و شار حرارتی ناشی از تغییر پارامترهای فرآیند ارائه خواهد شد، تا بر مبنای آن بتوان بدون نیاز به تحلیل‌های حرارتی-مکانیکی و صرفاً بر پایه بررسی حرارتی، روند افزایشی و یا کاهش زاویه خم را پیش‌بینی نمود. بر این اساس، معیاری تحت عنوان انترویی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که معیار مذکور وابسته به دما و شار حرارتی است، در نتیجه انتظار می‌رود که قابلیت پیش‌بینی روند تغییرات زاویه خم در ازای تغییر مقادیر پارامترهای فرآیند را داشته باشد. در ادامه، نحوه محاسبه انترویی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

به کمک قانون دوم ترمودینامیک، نرخ انترویی تولیدی برای یک حجم کنترل با فرض ثابت بودن ضریب هدایت حرارتی از طریق معادله ۵ قابل محاسبه است [۲۱].

$$\dot{s}_{gen} = k \left( \frac{\nabla T}{T} \right)^2 \quad (5)$$

در معادله ۵، پارامترهای  $k$ ،  $T$  و  $\nabla T$  به ترتیب برابر با ضریب هدایت گرمایی، دما و گرادیان دمایی می‌باشند. همانطور که از معادله ۵ پیداست، نرخ انترویی تولیدی وابسته به شار حرارتی و توزیع حرارت در قطعه کار است که با انجام تحلیل عددی و محاسبه این دو پارامتر، تعیین انترویی تولیدی در طی انتقال حرارت در فرآیند شکل‌دهی با لیزر میسر خواهد بود. رابطه‌ای که تاکنون ارائه شد (معادله ۵)،

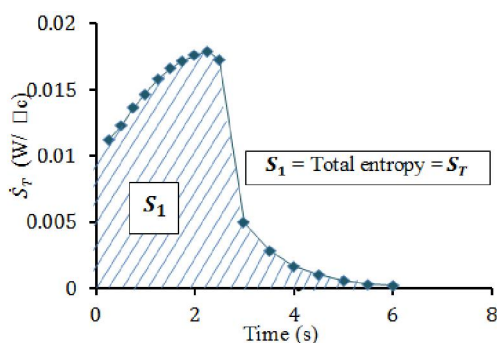
### ۶- ارزیابی معادله رگرسیون

برای بررسی دقت معادله ارائه شده به منظور پیش‌بینی زاویه خم، نتایج زاویه خم توسط مدل‌سازی المان محدود در شرایطی خارج از محدوده تست‌های پیشنهادی در روش سطح پاسخ، مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب پارامترهای فرآیند به گونه‌ای انجام گرفت که آزمایشات انتخابی، با موارد اشاره شده در جدول ۴ متفاوت باشند. به علاوه، آزمایشات انتخاب شده در این بخش به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که شرایط گردآیدان دمایی بر مجموعه حاکم باشد. پارامترهای فرآیند در جدول ۶ نشان داده شده است. در مرحله بعد، زاویه خم حاصل از بررسی‌های المان محدود با مقادیر بدست آمده از معادله رگرسیون، مقایسه شدند. مقادیر زاویه خم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، ماکزیمم اختلاف بین نتایج حاصل از بررسی‌های المان محدود و زاویه خم حاصل از معادله رگرسیون، ۶/۵ درصد است. میزان خطای پیش‌بینی زاویه خم در نمونه‌های ۱ و ۳ به ترتیب بیانگر ۵ و ۵/۸ درصد است. این موضوع بیانگر دقت قابل قبول معادله رگرسیون ارائه شده در این پژوهش به منظور پیش‌بینی زاویه خم در شکل‌دهی فولاد A-131 در محدوده گردآیدان دمایی است.

جدول ۶- مقادیر پارامترهای فرآیند در نمونه‌های انتخابی

شماره نمونه	توان [W]	قطر پرتو [mm]	سرعت اسکن [mm/s]	ضخامت ورق [mm]
۱	۱۱۰۰	۴	۳۰	۲/۵
۲	۱۰۵۰	۴	۳۵	۲
۳	۹۵۰	۵	۴۵	۲

انتگرال گیری از نرخ انتروپی کل نسبت به زمان (مساحت زیر سطح نمودار)، انتروپی کل محاسبه می‌شود (معادله ۸). در شکل ۱۱ روند تغییرات نرخ انتروپی کل در حالتی که توان لیزر، قطر پرتو، سرعت اسکن و ضخامت ورق به ترتیب برابر با ۱۱۰۰ وات، ۴ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر می‌باشند، نشان داده شده است.  $S_1$  برابر با سطح زیر نمودار زمان-نرخ انتروپی کل است که معادل است با انتروپی کل. در ادامه به منظور بررسی میزان قابلیت انتروپی در پیش‌بینی روند تغییر شکل، مقدار زاویه خم و انتروپی کل در نمونه‌هایی که مشخصات آن‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۱- نرخ انتروپی و انتروپی کل در فرایند لیزر فرمینگ در شرایطی که توان، سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق به ترتیب برابر با ۱۱۰۰ وات، ۴ میلی‌متر بر ثانیه، ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر می‌باشد

پیش‌تر میزان اعوجاج در فرایند جوشکاری و ارتباط آن با مقادیر انتروپی توسط فلاحی [۲۲] و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، عملکرد معیار در پیش‌بینی روند تغییرات زاویه خم، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطابق با نتایج ارائه شده در بخش‌های پیشین، افزایش توان پرتو موجب افزایش زاویه خم می‌شود. مقایسه نمونه‌های شماره ۱ و ۲ در جدول ۷، بیانگر این موضوع است که مقدار انتروپی همانند زاویه خم با افزایش توان پرتو روند افزایشی خواهد داشت. نمونه‌های شماره ۱ و ۳ در جدول ۷ به منظور بررسی اثر قطر پرتو انتخاب شدند. در این حالت قطر پرتو از ۴ میلی‌متر در نمونه شماره ۱ به ۶ میلی‌متر در نمونه شماره ۳ افزایش یافت. سایر متغیرهای فرایند همچون، توان، سرعت

روی یک ناحیه پیوسته حاکم است و نیازمند اصلاحاتی به منظور کاربرد در تحلیل‌های اجزای محدود است. پس از تحلیل حرارتی، مقادیر دما و شارحرارتی در هر المان قابل دست‌یابی است. بدین ترتیب، نرخ انتروپی تولیدی ( $\dot{S}_{gen}$ ) برای هر المان در یک زمان مشخص محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه انتروپی کل می‌بایست از مقادیر بدست آمده نسبت به زمان و مکان انتگرال‌گیری شود. انتگرال سه گانه روی ناحیه گسسته در معادله ۶ نشان داده شده است.

$$\iiint f(x, y, z) dv = \iiint f(x, y, z) dx dy dz$$

$$= \lim_{\text{Max} \Delta v_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i) \Delta v_i \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن نرخ انتروپی تولیدی به جای تابع  $f$  در معادله ۶، رابطه ۷ برقرار خواهد بود:

$$\dot{S}_T = \iiint \dot{S}_{gen} dv = \sum_{i=1}^n \dot{S}_{gen_i} \Delta v_i \quad (۷)$$

مقدار  $n$  در معادله ۷ برابر تعداد المان‌ها و  $\dot{S}_T$  نرخ انتروپی تولیدی در کل جسم در یک زمان مشخص بر حسب  $(W/°C)$  است.  $\Delta v_i$  حجم هر المان است که با توجه به ابعاد هر المان در شبیه‌سازی اجزای محدود قابل محاسبه است. مقادیر بدست آمده را می‌توان نسبت به زمان رسم کرد. همانطور که در معادله ۸ نشان داده شده است، به منظور محاسبه انتروپی کل ( $S_T$ ) می‌بایست از معادله ۷ نسبت به زمان انتگرال‌گیری نمود (مساحت سطح زیر نمودار منحنی نرخ انتروپی تولیدی در کل جسم نسب به زمان که تحت عنوان  $S_1$  در شکل ۱۱ نشان داده شده است).

$$S_T = \int_0^{t_f} \dot{S}_T dt \quad (۸)$$

در معادله ۸،  $t_f$  و  $S_T$  به ترتیب برابر با زمان انجام فرایند و انتروپی کل می‌باشند. در ادامه به منظور بررسی قابلیت کمیت انتروپی در پیش‌بینی روند افزایشی و یا کاهشی زاویه خم، مقدار این کمیت در تعدادی از حالات محاسبه شد. بدین منظور، داده‌های مربوط به دما و شار حرارتی هر المان در هر نمونه تغییر شکل، از نرم‌افزار المان محدود استخراج شده و نرخ انتروپی به کمک رابطه ۵ محاسبه می‌گردد. با توجه به مشخص بودن حجم هر المان، با در نظر گرفتن رابطه ۷ نرخ انتروپی کل ( $\dot{S}_T$ ) در هر لحظه محاسبه می‌شود. در نهایت با

جدول ۷- مقایسه مقادیر زاویه خم و انحرابی کل

شماره نمونه	توان [W]	قطر پرتو [mm]	سرعت اسکن [mm/s]	ضخامت ورق [mm]	زاویه خم (شبیبه- سازی) [deg]	انحرابی کل [W/°C]
۱	۱۱۰۰	۴	۳۰	۲	۱/۱۹۶۳	۰/۰۴۴۹۱
۲	۹۰۰	۴	۳۰	۲	۰/۸۰۴۱	۰/۰۴۰۱۰
۳	۱۱۰۰	۶	۳۰	۲	۰/۵۱۸۷	۰/۰۳۷۴۶
۴	۱۱۰۰	۴	۵۰	۲	۰/۶۳۱۰	۰/۰۳۸۶۸
۵	۱۱۰۰	۴	۳۰	۳	۰/۵۴۸۴	۰/۰۶۹۰۱

با افزایش ضخامت، انحرابی در حجم بیشتری انتگرال‌گیری می‌شود (طبق معادله ۶) که در نهایت موجب افزایش مقدار آن می‌گردد. با توجه به نتایج، در شرایطی که ضخامت ورق ثابت در نظر گرفته شود، کمیت انحرابی قابلیت پیش‌بینی تأثیر پارامترهای فرآیند بر روند افزایشی و یا کاهش زاویه خم را بدون نیاز به انجام تحلیل‌های مکانیکی- حرارتی و صرفاً با در نظر گرفتن تحلیل حرارتی خواهد داشت. به منظور بررسی دقیق‌تر، تأثیر سرعت اسکن ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ثابته بر روند تغییرات انحرابی و زاویه خم در شرایطی که توان، قطر پرتو و ضخامت ورق به ترتیب برابر با ۱۱۰۰ وات، ۴ و ۲ میلی‌متر می‌باشند، مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق با نتایج بدست آمده، معیار ارائه شده بر مبنای توزیع حرارت و شار حرارتی (انحرابی)، علاوه بر پیش‌بینی روند (کاهش) تغییرات زاویه خم در ازای افزایش سرعت اسکن، قابلیت پیش‌بینی تغییرات شدت اثرگذاری پارامتر مذکور بر زاویه خم را هم خواهد داشت. این موضوع نقش بسزایی در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای فرآیند شکل‌دهی با لیزر، خواهد داشت. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، شدت تأثیرگذاری سرعت اسکن بر زاویه خم در کران بالایی محدوده تغییرات (۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه) نسبت به بازه ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال افزایش سرعت اسکن از ۳۰ به ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه و از ۴۰ به ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، به ترتیب موجب ۳۰ و ۲۴ درصد کاهش در زاویه خم می‌گردد (کاهش شدت اثرگذاری در بازه ۴۰ تا ۵۰ نسبت به بازه ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه). انحرابی نیز در شرایط مذکور به ترتیب ۱۷ و ۱۱

اسکن و ضخامت ورق، در هر دو نمونه یکسان و به ترتیب برابر با ۱۱۰۰ وات، ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. با افزایش قطر پرتو، زاویه خم از مقدار ۱/۱۹۶۳ درجه در نمونه شماره ۱ به ۰/۵۱۸۷ درجه کاهش یافت؛ همچنین، با توجه به مقادیر انحرابی می‌توان دریافت که کمیت مذکور به خوبی روند کاهش زاویه خم در ازای افزایش قطر پرتو را نیز پیش‌بینی می‌کند. بر این اساس، مقدار انحرابی از ۰/۰۴۴۹۱ وات بر درجه سانتی‌گراد در نمونه شماره ۱ به ۰/۰۳۷۴۶ وات بر درجه سانتی‌گراد در نمونه شماره ۳ کاهش یافت. با مقایسه مقادیر زاویه خم و انحرابی در نمونه شماره ۱ و ۴، قابلیت انحرابی در پیش‌بینی اثر سرعت اسکن بر زاویه خم نیز به اثبات می‌رسد. افزایش سرعت اسکن از ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه در نمونه شماره ۱ به ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در نمونه شماره ۴، موجب کاهش زاویه خم می‌گردد. مقادیر انحرابی در نمونه‌های مذکور نیز، نشان‌دهنده روند کاهش با افزایش سرعت اسکن است.

اثر ضخامت ورق بر زاویه خم و انحرابی نیز، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با جدول ۷ ضخامت ورق در نمونه شماره ۵ و ۱ به ترتیب ۳ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد (سایر پارامترها در هر دو نمونه یکسان است). با افزایش ضخامت ورق به ۳ میلی‌متر در نمونه شماره ۵، زاویه خم در این نمونه نسبت به نمونه شماره ۱ کاهش یافت؛ اما مقایسه انحرابی نشان دهنده این موضوع است که افزایش ضخامت موجب افزایش میزان انحرابی تولیدی در هر لحظه از فرآیند می‌گردد. این موضوع می‌تواند ناشی از نحوه محاسبه انحرابی باشد که با انتگرال‌گیری در کل حجم قطعه محاسبه می‌شود.

پیش‌بینی نحوه اثر پارامترهای فرایند بر روند کاهش و یا افزایش زاویه خم ارائه گردید. اهم نتایج به شرح زیر است:

- افزایش توان پرتو لیزر موجب افزایش زاویه خم در محصول نهایی می‌گردد؛ همچنین، افزایش قطر پرتو، سرعت اسکن و ضخامت ورق، کاهش زاویه خم را در پی خواهند داشت.

- قطر پرتو اثرگذارترین پارامتر بر زاویه خم شناخته شد. ضخامت، سرعت اسکن و توان پرتو به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار خواهند گرفت.

- در میان اثرات همزمان پارامترها، اثر تعاملی توان پرتو-ضخامت، سرعت اسکن-ضخامت، قطر پرتو-ضخامت و سرعت اسکن-قطر پرتو، به عنوان پارامترهای موثر بر زاویه خم شناخته شدند (طبق نتایج حاصل از روش RSM).

- شدت اثر توان پرتو در ضخامت‌های بالاتر کاهش می‌یابد؛ همچنین، شدت اثرگذاری قطر پرتو-سرعت اسکن بر زاویه خم، در کران بالایی محدوده تغییرات، کاهش می‌یابد.

- معادله رگرسیون ارائه شده در این پژوهش به منظور پیش‌بینی زاویه خم، با میانگین خطای ۵/۷۶ درصد قابلیت پیش‌بینی زاویه خم را خواهد داشت.

- معیار ارائه شده بر مبنای انتروپی، قابلیت پیش‌بینی تاثیر پارامترهای فرایند (توان پرتو، سرعت اسکن و قطر پرتو) بر روند افزایشی و کاهش زاویه خم و همچنین، پیش‌بینی تغییرات شدت اثرگذاری پارامترهای مذکور بر زاویه خم را خواهد داشت که می‌تواند نقش بسزایی در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای فرایند ایفا نماید.

- با توجه به تناسب مقدار تغییرات انتروپی و تغییر شکل، معیار ارائه شده این قابلیت را خواهد داشت که مبنای پژوهش‌های آینده به منظور پیش‌بینی دقیق زاویه خم قرار گیرد.

## ۹- مراجع

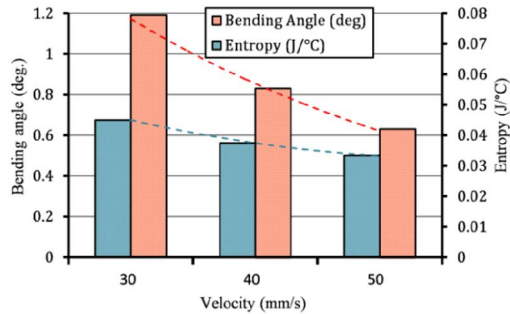
- [1] Vahdati AR, Vahdati M (2018) Experimental analysis the effect of lubricant and ultrasonic excitation of hemispherical-head tool on the vertical component of forming force in SPIF.

درصد کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر قابلیت معیار ارائه شده در پیش‌بینی دقیق تغییرات شدت تاثیر پارامترها، متناسب با رفتار حرارتی ماده می‌باشد. به کمک نتایج بدست آمده در این پژوهش و ارتباط بین مقادیر زاویه خم، انتروپی و پارامترهای فرایند، رابطه‌ای به منظور تعیین زاویه خم بر مبنای انتروپی، توان پرتو، سرعت اسکن، قطر پرتو و ضخامت ورق در معادله ۹ ارائه شده است:

$$Bending\ angle = -2.585$$

$$+ \left( \left( \frac{P}{V \times D} \right)^{0.0697} \times \left( \frac{S_T}{T} \right) \times 158.1 \right) \quad (9)$$

در معادله ۹، پارامترهای  $P$ ،  $V$ ،  $D$ ،  $S_T$  و  $T$  به ترتیب معادل با توان لیزر، سرعت اسکن، قطر پرتو، انتروپی کل و ضخامت ورق می‌باشند. با توجه به عدم تعمیم پذیری قواعد کلی حاکم بر فرایند (نتایج پژوهش‌های پیشین)، روش ارائه شده در این پژوهش می‌تواند نقش بسزایی در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای فرایند ایفا نماید؛ همچنین، با توجه به قابلیت‌های ذکر شده (تناسب مقدار تغییرات انتروپی و تغییر شکل)، معیار ارائه شده این قابلیت را خواهد داشت که مبنای پژوهش‌های آینده به منظور پیش‌بینی دقیق زاویه خم قرار گیرد.



شکل ۱۲- تاثیر سرعت اسکن بر زاویه خم و انتروپی، در شرایطی که توان، قطر پرتو و ضخامت ورق به ترتیب برابر با ۱۱۰۰ وات، ۴ و ۲ میلی‌متر می‌باشد

## ۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مطالعه‌ای بر شکل‌دهی حرارتی (شکل‌دهی با لیزر) و تاثیر متغیرهای فرایند بر میزان تغییر شکل انجام شده است؛ همچنین، روشی بر مبنای انتروپی به منظور

- [12] Liu FR, Chan KC, Tang CY, (2006) Finite element modeling of laser forming of Aluminium matrix composites. *J Laser Appl* 18: 56-64.
- [13] Vollertsen F (1994) An analytical model for laser bending. *Laser Eng* 2: 261-276.
- [14] Shen H, Yao ZQ, Shi YJ, Hu J (2006) An analytical formula for estimating the bending angle by laser forming. *Mech Eng Sci* 2: 243-247.
- [15] Song JH, Lee GA, Jung KH, Park SJ (2015) Laser irradiated bending characteristics of the ultra-high strength steel sheet. *Int J Auto Tech Kor* 16: 89-96.
- [16] Zhang L, Michaleris P (2004) Investigation of Lagrangian and Eulerian finite element methods for modeling the laser forming process. *Finite Elem Anal Des* 40: 383-405.
- [17] Zohoor M, EZahrani EG (2012) Experimental and numerical analysis of bending angle variation and longitudinal distortion in laser forming process. *Sci Iran* 19: 1074-1080.
- [18] Edwardson SP, Abed E, Bartkowiak K, Dearden G, Watkins KG (2006) Geometrical Influences on Multi-pass Laser Forming. *J Phys D Appl Phys* 39: 382-389.
- [19] Hsieh HS, Lin J (2004) Laser-induced vibration during pulsed laser forming. *Opt Laser Technol* 36: 431-439.
- [20] Montgomery DC (2011) Design and analysis of experiments. John Wiley and Son, New York.
- [21] Nekahi A, Dehghani K (2010) Modeling the thermo mechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology. *Mater Design* 31: 3845-3851.
- [22] Kolenda Z, Donizak J, Hubert J (2005) on the minimum entropy generation in steady state conduction processes. *Energy* 29: 2441-2460.
- [23] Fallahi A, Jafarpur K, Nami MR (2011) Analysis of welding conditions based on induced thermal irreversibilities in welded structures: Cases of welding sequences and preheating treatment. *Sci Iran* 18: 398-406.
- [2] Ghorbani Menghari H, Farzin M, Sadat A, Gorji A (2016) Experimental and numerical investigation of die filling and thickness variation at two step box copper tube hydroforming die with movable bushes. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(2): 87-96. (In Persian)
- [3] Eshghi E., Kadkhodayan M (2016) Sheet EMF using convex punch instead of concave die. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(1): 29-42. (In Persian)
- [4] Kim J, Na SJ (2009) 3DLaser forming strategies for sheet metal by geometrical information. *Opt Laser Technol* 41: 843-852.
- [5] Edwardson SP, Watkins KG, Dearden G, Magee J (2001) 3D laser forming of saddle shapes. Proc 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shaping, Germany, Erlangen.
- [6] Safari M, Farzin M (2015) Experimental investigation of laser forming of saddle shape with spiral irradiating scheme. *Opt Laser Technol* 146: 146-150.
- [7] Roohi A, Moslemi Naeini H, Hoseinpour Gollo M (2017) An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets. *P I Mech Eng L-J Mat* 231: 433-442.
- [8] Shichun Wu, Jinsong ZZ (2001) An Experimental study of laser bending for sheet metals. *J Mater Process Tech* 22: 160-167.
- [9] Gartner E, Erner H (2001) Laser bending of etched silicon microstructures. *Microsyst Technol* 7: 23-26.
- [10] Chan KC, Harado Y, Liang J, Yarshida F (2002) Deformation behavior of chromium sheets in mechanical and laser bending. *J Mater Process Tech* 122: 273-277.
- [11] Chan KC, Liang J (2001) Laser bending of Ti3Al-based intermetallic alloy. *Mater Lett* 49:51-55.