

مطالعه و مدل‌سازی پارامترهای موثر در شکل‌دهی ورق‌های فولادی و ضدزنگ با استفاده از پرتوی لیزر

محمد حسین پور گللو^{۱*}، سیدنادر عاملی کلخوران^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۰۹	شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از پرتوی لیزر از روش‌های نوین خمکاری ورق‌ها می‌باشد. انعطاف‌پذیری و سرعت عمل در این فرآیند شکل‌دهی از یک سو و امکان کنترل فرآیند از سوی دیگر سبب گردیده تا این روش در دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گیرد. به دست آوردن پارامترهای موثر و بهینه جهت رسیدن به بیشترین زاویه خمش و بدون ایجاد ذوب سطحی، از جمله نکات اساسی در این زمینه می‌باشد. در این مقاله با استفاده از لیزر Nd : YAG پیوسته به شکل‌دهی قطعه‌کارهای فولادی در توان، سرعت و قطرهای مختلف پرتوی لیزر پرداخته شده است. نتایج این آزمایشات نشان داد که در توان‌های بالاتر و قطر پرتوی کوچکتر، منحنی زاویه خمش - سرعت به سمت راست میل خواهد کرد. همچنین مشخص گردید که در قطرهای کمتر پرتوی لیزر، تغییرات زاویه خمش نسبتاً خطی و در مقادیر بالاتر غیر خطی می‌باشد. در ادامه به مطالعه عددی این فرآیند تحت شرایط مختلف پرداخته شد. نتایج حاصل از این بخش نیز نشان داد که با کاهش قطر پرتو، سرعت عبور و ضخامت قطعه‌کار و با افزایش توان، زاویه خمش افزایش خواهد یافت. در انتها با مقایسه مقادیر عددی و تجربی، اعتبارسنجی تحلیل اجزاء محدود فرآیند انجام پذیرفت و صحت نتایج مشخص گردید.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱	
واژگان کلیدی: شکل‌دهی با لیزر، لیزر فورمینگ، روش المان محدود، پارامترهای موثر شکل‌دهی.	

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی قطعات با استفاده از پرتوی لیزر، روشی غیر سنتی برای خمکاری ورق‌ها فلزی، غیر فلزی و کامپوزیتی می‌باشد که اساس آن بر مبنای تنش‌های حرارتی است. امروزه این روش به علت انعطاف‌پذیری بالا و عدم نیاز به ادواتی مانند قالب و ابزار مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. ولرسن و گیگر برای اولین بار سه مکانیزم کلیدی را به منظور بیان رفتار حرارتی - مکانیکی مواد در این فرآیند شناسایی و پیشنهاد کردند، که هر یک از آن‌ها تابع هندسه قطعه و شرایط اعمال لیزر بود. این روش‌ها شامل مکانیزم گرادیان دمایی^۳، مکانیزم خمشی یا کمانشی^۴ و مکانیزم کوتاه کردن^۵ می‌باشند [۱]. بررسی

و انتخاب پارامترهای مناسب و موثر، جهت نیل به بیشترین زاویه خمش، همواره یکی از اصلی‌ترین زمینه‌های پیش روی محققین بوده است. مطالعات صورت پذیرفته در این زمینه شامل سه دسته آزمایشات تجربی، شبیه‌سازی عددی فرآیند و مطالعه تحلیلی می‌باشد. آزمایش‌های تجربی مبنای اصلی این فرآیند می‌باشند که نظر برخی از محققین را به خود جلب نموده است. لوبیانو و همکارانش [۲] با استفاده از پرتوی لیزر به شکل‌دهی ورق‌های نازک پرداخته‌اند. آن‌ها ورق‌هایی با جنس آلومینیومی، فولاد ضد زنگ و کربنی را با استفاده از لیزر CO₂ شکل دادند و مقادیر بهینه توان و سرعت اسکن لیزر را به منظور نیل به بیشترین زاویه خمش به دست آوردند. یائو [۳] با

³ Temperature Gradient Mechanism

⁴ Buckling Mechanism

⁵ Upsetting Mechanism

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hoseinpour@sru.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی

بیشترین و قطر پرتوی لیزر کمترین تاثیر را بر زاویه خمش ورق فلزی خواهد داشت. وو و همکارانش [۹] با استفاده از لیزرهای Nd:YAG و CO₂ به بررسی شکل‌دهی ورق-های شکننده‌ای از جنس^۴ MCS، شیشه بورسیلیکات^۵ و سرامیک Al₂O₃ پرداخته‌اند. پارامترهای موثر در فرآیند در تمامی این مواد مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به منظور جلوگیری از شکست ترد در این قطعات، باید دمای لایه‌ای قطعه تا حد معینی بالا برود. همچنین نشان داده شد که مواد سیلیکونی و سرامیکی فقط می‌توانند خمش مثبت داشته باشند درحالی‌که در مورد مواد شیشه-ای هر دو نوع خمش مثبت و منفی قابل رخ دادن است. جی و همکارانش [۱۰] با ارائه مسیری خاص بر روی ورق-های مربعی، موفق به شکل‌دهی این ورق‌ها به صورت گنبدی گشتند. آن‌ها مقدار ارتفاع گنبد را با تغییر پارامترهای موثر استخراج کرده و مشاهده نمودند که این مقدار با افزایش توان لیزر، افزایش و با افزایش قطر پرتوی لیزر، کاهش می‌یابد. همچنین آزمایشات نشان داد که با افزایش سرعت عبور پرتوی لیزر، مقدار برجستگی گنبد ابتدا افزایش و سپس کاهش خواهد یافت. در ادامه، مشخص گردید که با افزایش اندازه قطعه کار و کاهش گام‌های مسیر، مقدار ارتفاع گنبد افزایش خواهد یافت.

پیچیدگی و هزینه‌بر بودن آزمایش‌های تجربی از یک سو و گسترش نرم‌افزارهای کاربری^۶ مدل‌سازی عددی از سوی دیگر، باعث گردیده تا بسیاری از محققین روی به تحلیل‌های عددی آورند. جی و وو [۱۱] در سال ۱۹۹۸ یک شبیه‌سازی عددی را به منظور بررسی توزیع حرارتی در قطعه و در حین فرآیند لیزر فورمینگ انجام دادند. با توجه به نوپا بودن و محدودیت‌های موجود در زمان تحقیق، فرضیاتی از قبیل شار مربعی و عدم وابستگی مکانیکی - حرارتی در بسط مدل مذکور به کار گرفته شد. نتایج عددی به دست آمده، نشان‌دهنده تطابق مناسب آن با نتایج تفاضل محدود داشت. همچنین نشان داده شد که بیشینه دمای سطح قطعه کار با افزایش توان لیزر، کاهش ضخامت ورق و سرعت اسکن، افزایش می‌یابد. لیئو و همکارانش [۱۲] با استفاده از روش اجزاء محدود، به مطالعه شکل‌دهی دو انحنایی ورق‌ها^۷ با استفاده از فرآیند لیزر فورمینگ پرداختند. آن‌ها

استفاده از پرتوی لیزر توانست لوله فلزی را خم کند. او از یک روش توصیفی بسته^۱ جهت انجام این کار استفاده نمود و پارامترهای مهم از جمله ضخامت قطعه کار و قطر پرتوی لیزر را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که با افزایش قطر پرتوی لیزر و نسبت قطر بیرونی لوله، زاویه خمش افزایش خواهد یافت. چنگ و همکارانش [۴] به مطالعه تاثیر هندسه قطعه کار بر نتیجه نهایی شکل‌دهی ورق‌های فلزی با استفاده از لیزر پرداخته‌اند. آن‌ها ترکیبی از طول‌ها و پهناهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند و مقدار خمش هریک از آن‌ها را به دست آوردند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که با افزایش پهناي قطعه کار، مقدار زاویه خمش کاهش خواهد یافت. در سال ۲۰۰۴، ادواردسون [۵] مطالعه‌ای کامل در ارتباط با شکل‌دهی دوبعدی و سه‌بعدی قطعات با استفاده از پرتوی لیزر انجام داد. در این تحقیق، او به مطالعه مکانیکی و حرارتی قطعه‌کارهایی با جنس فولاد و تیتانیوم پرداخت. او همچنین با تعریف مسیری در دو جهت x و y ، به شکل‌دهی سه‌بعدی این قطعات را نیز انجام داد. در ادامه، تاثیر سرعت عبور لیزر، تعداد پاس‌های عبوری، زمان سرمایش و سرمایش اجباری بررسی گردید. درک و شناخت کامل هر یک از مکانیزم‌های شکل‌دهی لیزری نقشی اساسی در رسیدن به بهترین خروجی خواهد داشت. در همین ارتباط، شی و همکارانش [۶] علاوه بر مطالعه سه روش مرسوم، مکانیزم جدید ترکیبی^۲ را نیز معرفی نموده و مقدار خمش قطعه کار را در هر مکانیزم بررسی نمودند. حسین پور و همکارانش [۷] با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG و طراحی آزمایش به روش تاگوچی، آزمایشی تجربی در ارتباط با خمش ورق‌های فولادی انجام دادند. آن‌ها با تغییر پارامترهای تاثیر گذار، همچون قطر پرتو، زمان تناوب^۳، توان و سرعت عبور لیزر، ارتباط آن‌ها را با نتایج نهایی به دست آورده و مقداری را که در آن بیشترین خمش حاصل گردیده را مشخص نمودند. در تحقیقی دیگر از حسین پور و همکارانش [۸]، تاثیر فاکتورها و تعامل آن‌ها با زاویه خمش بررسی گردید. آن‌ها با تحلیل آماری نتایج تجربی، به رابطه درجه اولی جهت پیشبینی زاویه خمش قطعه کار تحت شرایط مختلف دست یافتند. همچنین مشخص گردید که توان لیزر

⁵ Borosilicate glass

⁶ User friendly

⁷ Doubly Curved Shapes

¹ Closed-form expression

² Coupling

³ Pulse duration

⁴ Mono-crystalline silicon

ماکروی نرم افزار کتیا به زبان ویژوال بیسیک نوشته شد و در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس انتقال یافت. نتایج نشان- دهنده خمش این قطعه کار با عبور پرتوی لیزر بود. در این مقاله، به بررسی تجربی و عددی روند خطی یا غیرخطی بودن خمش ورق های فولادی در شرایط مختلف پرداخته شد. بدین منظور، تاثیر تغییر پارامترهای توان، سرعت، قطر پرتوی لیزر و ضخامت قطعه کار بررسی گردید. در آزمایش های تجربی، مقدار زاویه خمش قطعه کار در توان، سرعت و قطرهای مختلف پرتوی لیزر با استفاده از سنسور لیزری اندازه گیری شد. تحلیل عددی این فرآیند با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس و به صورت کوپل دما - جابجایی صورت پذیرفت. در انتها، با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و آزمایش های تجربی، اعتبارسنجی لازم صورت پذیرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از پرتوهایی با قطر کوچکتر، منجر به خطی شدن روند تغییرات زاویه خمش خواهد شد. بعلاوه، مشخص گردید که در هنگام استفاده از توان های بالا و قطرهای کوچکتر، باید از سرعت های بالای لیزر استفاده نمود.

۲- آزمایشات تجربی

۲-۱- تجهیزات و قطعه کارها

به منظور انجام آزمایش های تجربی از لیزر پیوسته Nd : YAG مدل U. S. LASER Corporation. U استفاده شد. ایجاد حرکت نسبی پرتوی لیزر و قطعه کار نسبت به هم، با استفاده از یک میز سه محور XYZ قابل کنترل به وسیله رایانه مدل Hercus V300 CNC Mill صورت پذیرفت. شکل (۱) لیزر مورد استفاده که با استفاده از فیبر نوری^۱ به کله گی ماشین کنترل رایانه ای نصب شده را نشان می دهد. جنس قطعه کارهای مورد آزمایش فولاد کربنی AISI 1010 و ضد زنگ و اندازه آن ها $50 \times 100 \text{ mm}^2$ و $100 \times 100 \text{ mm}^2$ می باشد که این ابعاد برای حفظ تاریخچه دمایی و نشان دادن زاویه خمش، مناسب است. علت انتخاب این ورق های فلزی در دسترس بودن، قیمت پائین و استفاده فراوان آن در صنعت می باشد. این ورق ها با نورد سرد تولید شده و خواص مکانیکی و

با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود ابتدا توزیع کرنش را به دست آورده و در ادامه مسیرهای اسکن را که عمود بر جهات کرنش های اصلی کمینه می باشد، مشخص کردند. آن ها موفق به شبیه سازی دو نوع شکل بالشتی و زین اسبی شدند و اعتبار نتایج بدست آمده را با مقایسه آزمایش های تجربی اثبات نمودند. شن و همکارانش [۱۳] مطالعه ای عددی بر روی ورق دولایه فلز/ سرامیک انجام دادند. لایه فلزی آلومینیوم ۶۰۶۱ و لایه سرامیکی SiC بود. مدل مکانیکی لایه آلومینیومی به صورت الاستیک - پلاستیک و مدل لایه سرامیکی به صورت الاستیک در نظر گرفته شده بود با بررسی تاثیر توان و سرعت های متفاوت لیزر مشخص گردید که تنش پسماند در هر دو سوی ورق، از نوع کششی و در سطح میانی دو ماده از نوع فشاری می باشد. در ارتباط با فولادهای St12 و ۳۰۴ حسین پور و همکارانش [۱۴] پارامترهای مختلف را بررسی نموده و با استفاده از تحلیل رگرسیون، موفق به شناسایی حالت بهینه ی شکل دهی شدند. مطالعات عددی صورت پذیرفته توسط همین نویسنده، تاییدکننده نتایج تجربی بود. چاکرابورتی و همکارانش [۱۵] با استفاده از مکانیزم TGM، به مطالعه شکل دهی اجسام کاسه ای شکل پرداخته اند. آن ها با ترکیب مسیر شعاعی و دایروی و بررسی پارامترهایی مانند شعاع پرتو، توان و سرعت اسکن لیزر توانستند این اشکال را بوجود بیاورند. نتایج نشان دهنده این بود که با کاهش سرعت اسکن و قطر پرتوی لیزر، زاویه خمش کاهش می یافت. همچنین با افزایش تعداد و یا طول خطوط اسکن شعاعی، زاویه خمش نهایی افزایش یافت. در نهایت آن ها پیشنهاد کردند که به منظور افزایش بهره وری در خمکاری تحت پرتوی لیزر، از هر دوی حرکت شعاعی و دایروی توأماً استفاده گردد. هو و همکارانش [۱۶] به منظور بهینه سازی روش سنتی، مدل جدید المان ورقه ای چندلایه را پیشنهاد کردند. با این ساده سازی، تعداد اجزاء کاهش یافته و در پی آن زمان و حجم محاسبات، به خصوص در ورق های بزرگ کاهش یافت. این روش می تواند به عنوان دیدگاهی نوین در حل مسائل اجزاء محدود پیچیده به کار گرفته شود. در تحقیقی جدید از حسین پور و همکارانش [۱۷]، فوم های فلزی سلول بسته مدل سازی گشته و تحت فرآیند شکل- دهی لیزری قرار گرفتند. بدین منظور یک برنامه در محیط

^۱ Fiber optic

گرفت و مشخص شد که ماده مورد استفاده خاصیتی یکسان با استاندارد دارد.

حرارتی شان در جداول ۱ و ۲ آورده شده اند. با توجه به امکانات موجود جهت مطابقت ماده مورد استفاده با استاندارد، آزمایش کشش بر روی ورق مورد نظر انجام



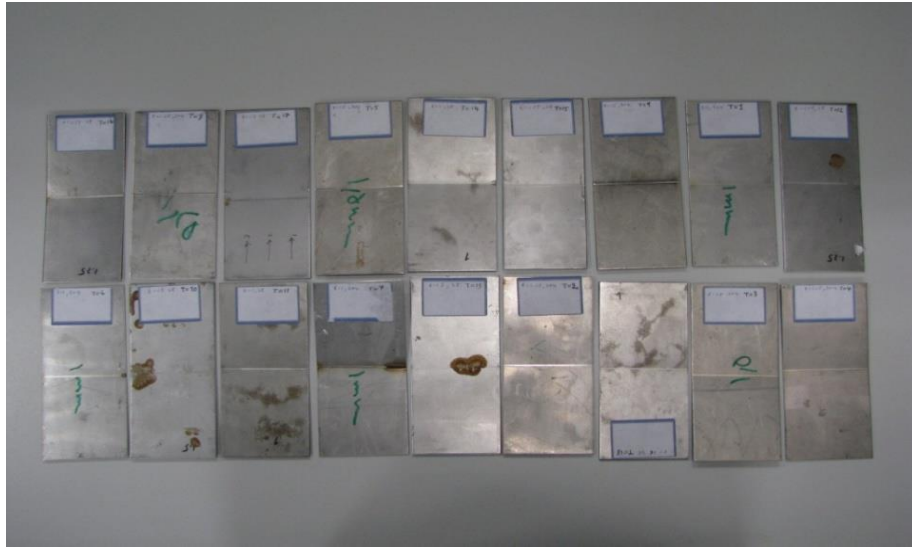
شکل ۱: تجهیزات لیزر پیوسته Nd:YAG دانشگاه RMIT

جدول ۱: خواص مکانیکی و حرارتی فولاد کربنی AISI 1010 [۱۸]

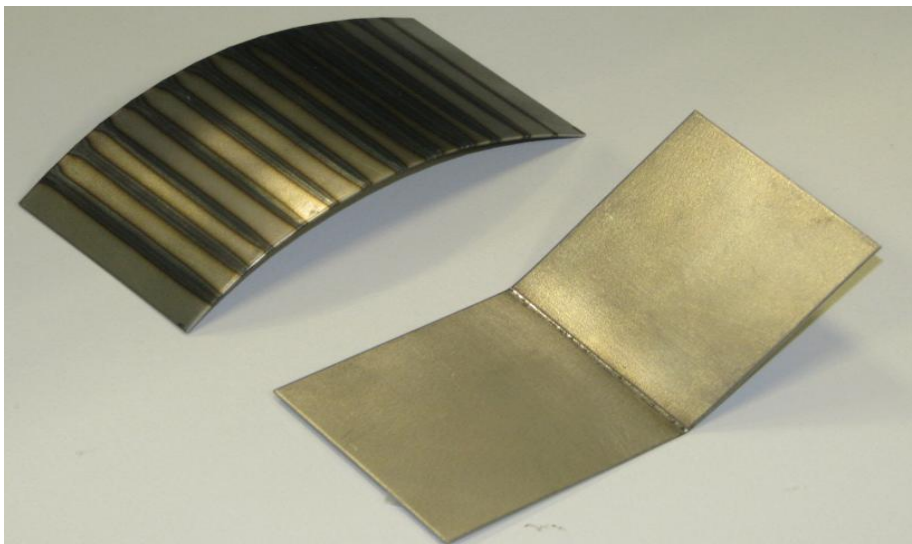
$T(^{\circ}\text{C})$	$k \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \right)$	$C_p \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg K}} \right)$	$h_u \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \right)$	$h_{\text{down}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \right)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$E (\text{GPa})$	$\alpha (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
۰	۵۱/۹	۴۵۰	---	---	۰	۲۹۰	۲۰۰	۱۰
۱۰۰	۵۱/۱	---	۷/۶۴۵۷۷	۳/۸۲۲۴۲	۱۰۰	۲۶۰	۲۰۰	۱۱
۲۰۰	۴۹	۵۱۹	۹/۰۴۴۹۵	۴/۵۲۲۴۸	۳۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۲
۳۰۰	۴۶/۱	۵۵۷	۱۰/۰۸۶۳	۵/۰۴۳۱۵	۴۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۳
۴۰۰	۴۲/۷	۵۹۹	۱۰/۳۳۵۶	۵/۱۶۷۸۲	۵۵۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۴
۵۰۰	۳۹/۴	۶۶۲	۱۰/۵۲۵۶	۵/۲۶۲۸۲	۶۰۰	۱۱۰	۸۸	۱۴
۶۰۰	۳۵/۶	۷۴۹	۱۰/۷۳۶۹	۵/۳۶۸۴۵	۷۲۰	۹/۸	۲۰	۱۴
۷۰۰	۳۱/۸	۸۴۶	۱۰/۸۹۴۷	۵/۴۷۳۳۵	۸۰۰	۹/۸	۲۰	۱۴
۸۰۰	۲۶	۹۵۰	۱۱/۰۰۰۲	۵/۵۰۰۱۰	---	---	---	---
۱۰۰۰	۲۷/۲	---	۱۱/۱۷۴۴	۵/۵۸۷۲۲	---	---	---	---
۱۵۰۰	۲۹/۷	۴۰۰	---	---	---	---	---	---

جدول ۲: خواص مکانیکی و حرارتی فولاد ضد زنگ L304 [۱۸]

مقدار	خاصیت ماده
۸۰۰۰	چگالی (Kg/m^3)
۱۴۵۰-۱۴۰۰	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
۱۹۳	مدول الاستیسیته (GPa)
۱۶/۲	رسانش در ۱۰۰ درجه (W/m.K)
$17/2 \text{ e}^{-6}$	ضریب انبساط حرارتی در ۱۰۰ درجه ($1/\text{K}$)
۵۰۰	تنش تسلیم (MPa)
۴۵	درصد ازدیاد طول (%)
۹۲	سختی (Rockwell B)

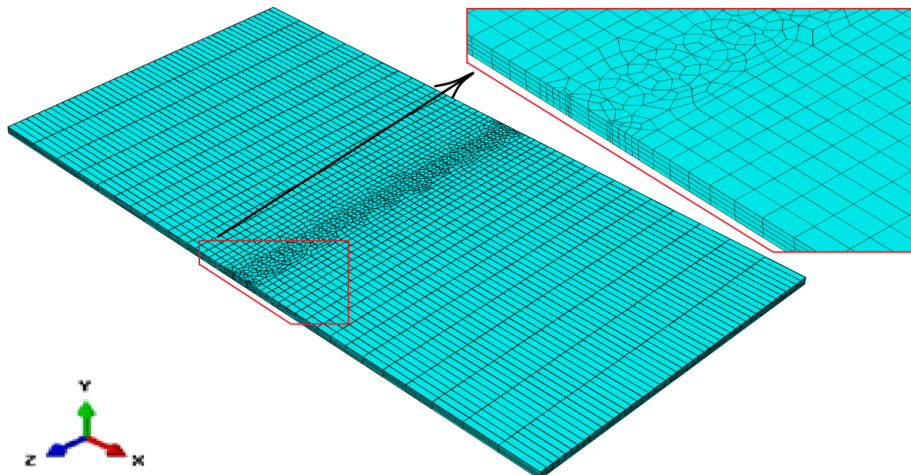


الف



ب

شکل ۲: الف - ورق‌های فولادی AISI 1010 به ابعاد $50 \times 100 \text{ mm}^2$ شکل‌دهی شده با پرتوی لیزر،
ب - دو نمونه از قطعه‌کارها پس از ۱۵ پاس عبور پرتوی لیزر



شکل ۳: مش‌بندی قطعه‌کار

لیزر می‌باشد. مطابق با رابطه (۱)، شار حرارتی لیزر به صورت توزیع گاوسی در نرم‌افزار تعریف گردیده است؛ که بیشینه انرژی آن در مرکز پرتو می‌باشد.

$$I(x,y) = \frac{2P}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-2[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2]}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

در اعمال مقادیر مرجع، از توان‌های ۱۵۰، ۱۱۰ و ۱۸۰ وات، سرعت عبور پرتو لیزر ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر بر ثانیه و قطر پرتو ۱ میلی‌متر استفاده شده است.

شرایط مرزی قطعه‌کار در این فرآیند به دو صورت مکانیکی و حرارتی می‌باشد. از لحاظ مکانیکی، یکی از لبه‌های ورق به موازات مسیر اسکن، از نظر حرکتی و دورانی قفل شده است. شرایط مرزی سطح قطعه‌کار به صورت همرفت آزاد فرض گردیده است که در آن ضریب انتقال حرارت جابجایی $\frac{W}{^\circ C m^2}$ و دمای محیط $25^\circ C$ بود. مقدار انتقال حرارت جابجایی از سطوح ورق، مطابق رابطه زیر می‌باشد [۵]:

$$q_c = h_c(T_s - T_0) \quad (2)$$

در این رابطه h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی، T_s دمای سطح قطعه‌کار و T_0 دمای محیط می‌باشد.

جدول ۳: بررسی اندازه مش بر روی پاسخ

تعداد مش	پاسخ (درجه)	زمان تحلیل ساعت
۷۰۰۰	۱,۲۱	۶
۹۷۰۰	۱,۲۶	۱۱
۱۱۷۰۰	۱,۳۱	۱۷
۱۳۰۰۰	۱,۳۴	۱۹
۲۵۰۰۰	۱,۳۵۵	۴۲

۳-۴- مش‌بندی قطعه‌کار

شکل (۳)، مش‌بندی صورت پذیرفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در تمامی مدل‌سازی‌های انجام یافته، از المان خطی شش‌وجهی، سه بعدی و هشت نقطه-ای استفاده شده است (C3D8T). به منظور افزایش دقت تحلیل، مش‌بندی ناحیه متأثر از شار حرارتی ریزتر و جهت کاهش زمان تحلیل نرم‌افزار، المان‌های دورتر، درشت‌تر معین گردیدند. مطابق جدول ۳، با تغییر تعداد گره‌ها و مش‌بندی، تحلیل استقلال از شبکه بررسی گردید تا تعداد مش کمترین اثر را بر روی پاسخ داشته باشد. با توجه به

۲-۲- مراحل انجام آزمایش

جهت آغاز آزمایش‌های تجربی، تهیه گیره مناسب جهت استقرار قطعه‌کارها الزامی است که بدین منظور گیره‌های فولادی طراحی و بر روی میز لیزر تعبیه گردید. با توجه به اهمیت تنش پسماند در فرآیند شکل‌دهی ورق‌ها با پرتوی لیزر، قطعه‌کارها با استفاده از روش واترجت به ابعاد مناسب مورد نظر رسیدند. لازم به ذکر است که تمامی قطعات به منظور تمیز بودن سطح قطعه‌کار و افزایش جذب لیزر با اتیل الکل مورد شستشو قرار گرفتند. در ادامه، قطعه‌کارهای مورد نظر به گیره بسته شده و توان، سرعت و قطر پرتوی مختلف بر روی آن اعمال گردید. این پارامترها باید به حدی باشند که نه باعث ذوب سطحی بر روی قطعه‌کار و نه عدم به وجود آمدن گرادیان دمایی گردند. در انتها، با تعیین پارامترهای مناسب، آزمایش‌های تعیین شده انجام یافتند. در شکل (۲)- الف نمایی از قطعه‌کارهای شکل‌دهی شده و در شکل (۲)- ب دو قطعه‌کار پس از ۱۵ پاس عبور پرتوی لیزر نشان داده شده است؛ که در حالت اول تمامی این پاس‌ها در یک مسیر و در حالت دوم، در ۱۵ مسیر متمایز اعمال گردیده‌اند.

۳- مدل‌سازی و تحلیل عددی

۳-۱- هندسه قطعه‌کار

تحلیل عددی این فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام پذیرفت. اندازه ورق‌های فلزی مدل‌سازی شده 50×100 میلی‌متر و از جنس کربن استیل بوده و با تغییر پارامترها، نتایج میدان گذرای دمایی برای بخش حرارتی همچنین تنش، کرنش و جابجایی برای بخش مکانیکی آورده شده است.

۳-۲- خواص مواد

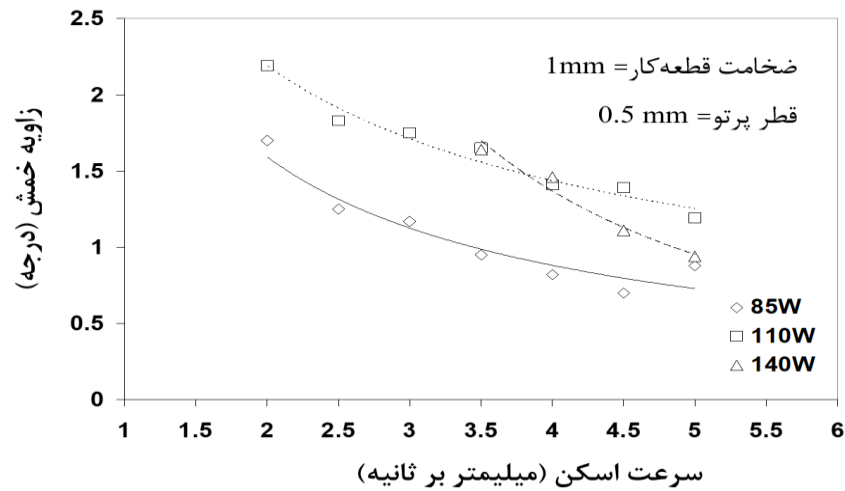
در این تحلیل فرضیاتی از قبیل همگن و همسانگرد بودن قطعه‌کار در نظر گرفته شده است. مدل مکانیکی قطعه‌کار به صورت الاستیک - پلاستیک کامل (عدم وجود کار سختی در مواد) فرض گردیده و بدین صورت در نرم‌افزار اعمال شده است. با توجه به متغیر بودن خواص مواد در درجه حرارت‌های مختلف، ضروری است که مقادیر مختلف آن‌ها در دماهای گوناگون را، به نرم‌افزار وارد نمود.

۳-۳- نیروی شکل‌دهی و شرایط مرزی

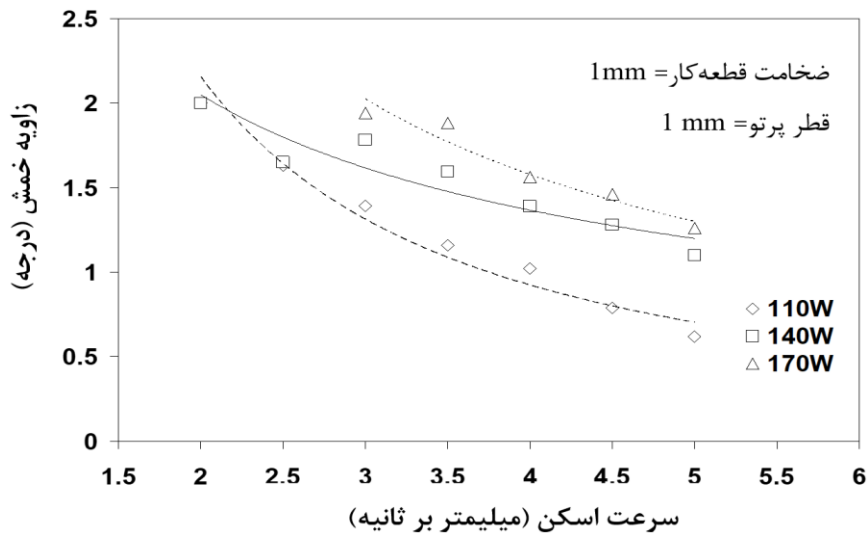
تنها نیروی شکل‌دهی در این فرآیند همان انرژی حرارتی

بهبود، تحلیل‌ها با تعداد المان‌های ۱۲۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ صورت پذیرفتند.

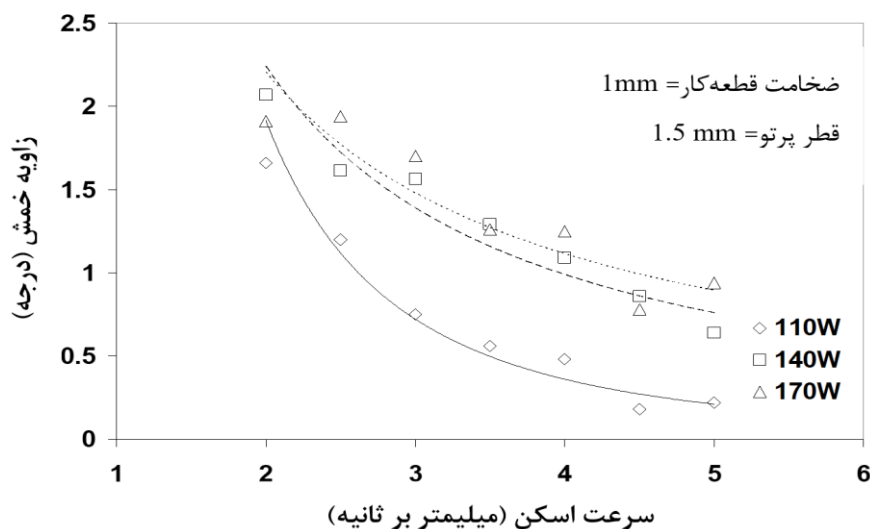
افزایش شدید زمان تحلیل با افزایش تعداد المان‌ها و متاثر شدن پاسخ خروجی با کاهش زیاد المان‌ها، به عنوان حالتی



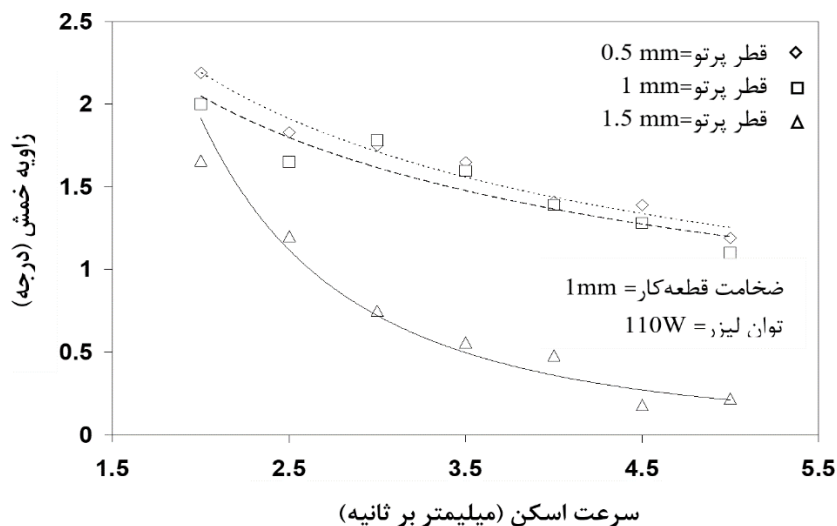
شکل ۴: تاثیر سرعت عبور پرتو بر زاویه خمش در توان‌های مختلف با قطر پرتو ۰.۵ میلی‌متر



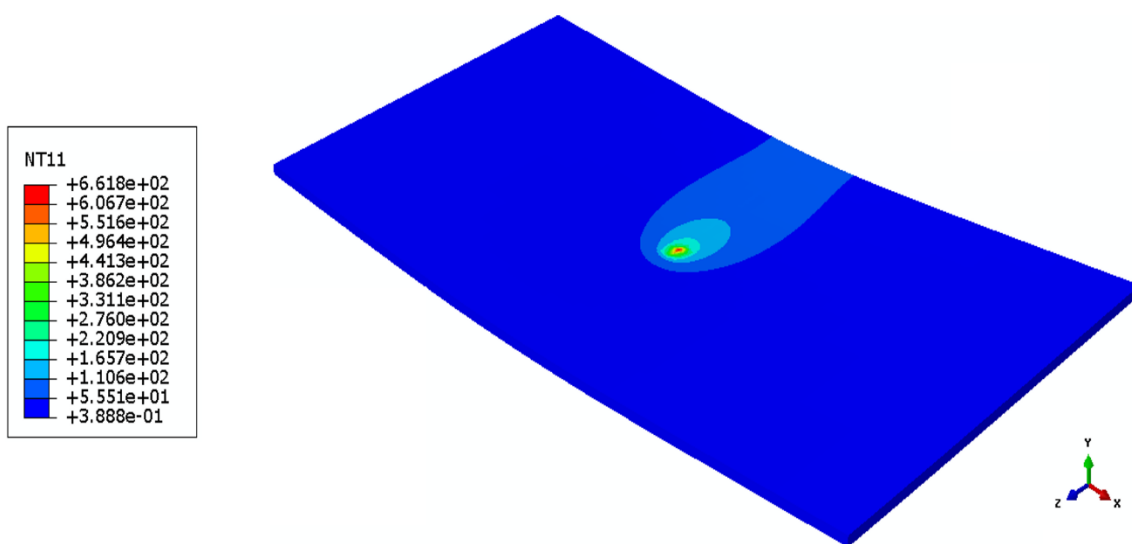
شکل ۵: تاثیر سرعت عبور پرتو بر زاویه خمش در توان‌های مختلف با قطر پرتو ۱ میلی‌متر



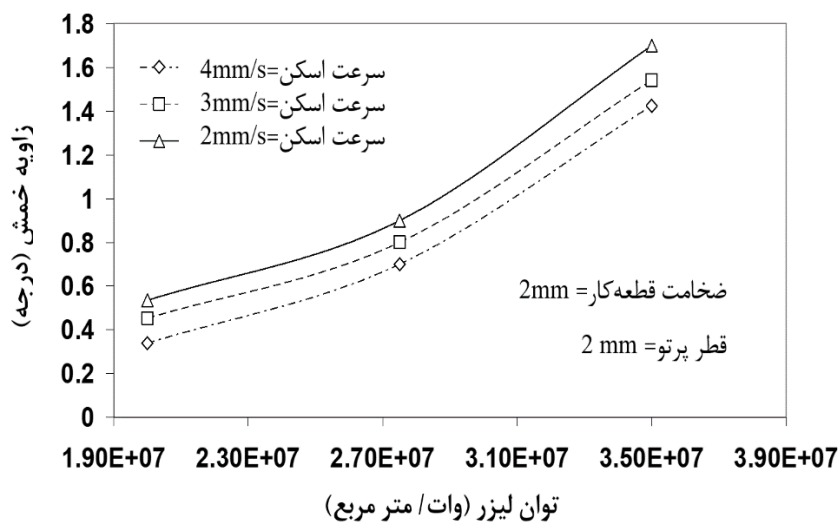
شکل ۶: تاثیر سرعت عبور پرتو بر زاویه خمش در توان‌های مختلف با قطر پرتو ۱.۵ میلی‌متر



شکل ۷: تاثیر قطر پرتو لیزر بر زاویه خمش در سرعت های مختلف



شکل ۸: کانتور دمایی حاصل از تحلیل عددی فرآیند شکل دهی لیزری



شکل ۹: بررسی تاثیر توان لیزر بر زاویه خمش در سرعت های مختلف به روش عددی

۳-۵- شرایط تحلیل

حل این مسئله به صورت کوپل دما - جابجایی و از نوع گذرا بوده و جهت افزایش دقت تحلیل، از حل غیر خطی استفاده شده است. در حل این فرآیند، ابتدا تحلیل حرارتی بوسیله روابط انتقال حرارت برای هر جزء انجام یافته و در ادامه از این نتایج جهت تحلیل مکانیکی - جابجایی آن قسمت استفاده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایشات تجربی

همان طور که در شکل های (۴)، (۵) و (۶) دیده می شود قطر پرتو لیزر ۰.۵، ۱ و ۱.۵ میلیمتر و همچنین توان لیزر ۸۵، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۷۰ وات می باشد که در سرعت های مختلف، زاویه خمش بدست آمده است. با انجام آزمایش های فوق محدوده کاری به صورت تقریبی مشخص شده و از داده های موجود، منحنی با درجه مناسب عبور داده شده است. لازم به ذکر است که با آزمایش های انجام شده می توان اندازه زاویه خمش قطعه کار را در سرعت، توان و قطر پرتو لیزر موجود در محدوده به دست آورد، در حالی که برای به دست آوردن زاویه دلخواه، باید از یک حلقه کنترلی پیوسته استفاده نمود.

از شکل های (۴)، (۵) و (۶) می توان دریافت که در پرتوهای با قطر کوچکتر، تغییرات زاویه خمش نسبت به سرعت عبور پرتو نسبتاً خطی بوده (شکل (۴))، اما با افزایش قطر پرتو، تغییرات غیر خطی نسبتاً محسوسی بین سرعت عبور و پاسخ دیده می شود (شکل های (۵) و (۶)). شاید دلیل این امر آن است که در قطرهای کوچکتر پرتوی لیزر، انرژی وارد شده متمرکزتر بوده و مقدار بیشتری از آن صرف ایجاد گرادیان دمایی می گردد. حال آنکه در قطرهای بزرگتر، با تغییر دیگر پارامترها، این نسبت با شدت بیشتری تغییر کرده و در نتیجه منجر به پاسخ غیر خطی می گردد. همچنین هر چه سرعت عبور پرتو لیزر افزایش پیدا کند، نرخ کاهش زاویه خمش، کاهش پیدا خواهد کرد. علت این موضوع، کاهش انرژی حرارتی ورودی به قطعه کار در سرعت های بالاتر است که منجر به کاهش گرادیان دمایی خواهد شد. با توجه به شکل (۴)، در سرعت های پائین که قطر پرتو ۰.۵ میلیمتر و توان ۱۴۰ وات بوده، ذوب در قطعه کار ایجاد شده و اندازه زاویه خمش نیز حتی از زاویه خمش ایجاد شده با توان ۱۱۰ وات کمتر شده است و این اتفاق می تواند به دلیل

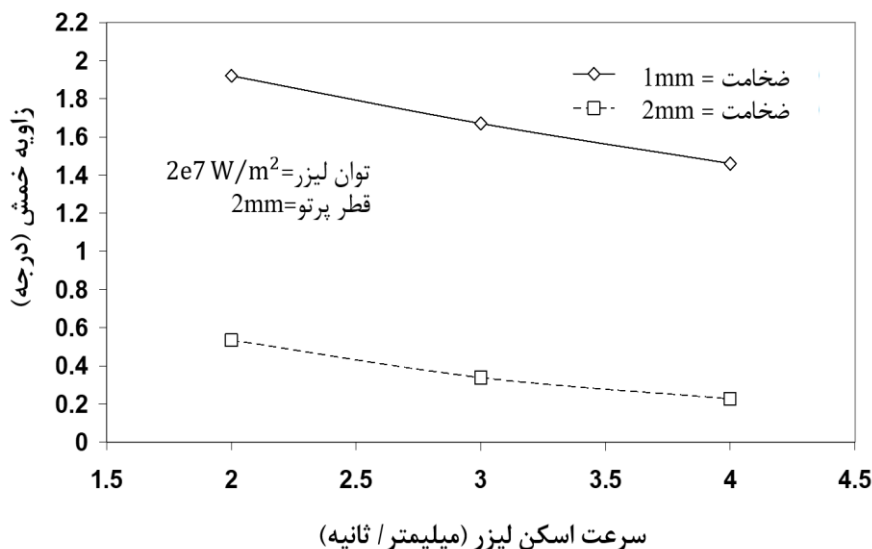
ذوب سطحی و ایجاد نشدن گرادیان دمایی مناسب باشد. همچنین در شکل های (۵) و (۶) می توان مشاهده نمود که با افزایش توان لیزر تغییرات زاویه خمش خیلی محسوس نمی باشد؛ که به نظر می رسد دلیل آن محدودیت در انتقال حرارت فولاد بدون ذوب سطحی باشد. با توجه به شکل های فوق، در یک پرتوی لیزر با قطر دلخواه، هر چه توان لیزر افزایش پیدا کند، منحنی مربوط به زاویه خمش به سمت راست حرکت خواهد کرد. بنابراین برای رسیدن به یک زاویه دلخواه بایستی سرعت عبور پرتو لیزر افزایش یابد.

با توجه به شکل (۷)، می توان مشاهده نمود که با افزایش قطر پرتو لیزر در یک توان مشخص، منحنی های زاویه خمش به سمت چپ حرکت کرده اند. بنابراین برای رسیدن به یک زاویه خمش دلخواه با افزایش قطر پرتو باید سرعت عبور پرتو کاهش پیدا کند. شاید این کاهش را بتوان به ثابت نگه داشتن انرژی وارد شده به قطعه کار نسبت داد. اما برای بررسی علت کاهش زاویه خمش با افزایش سرعت پرتو لیزر می توان به معادله (۳) استناد کرد که هر چه سرعت افزایش پیدا کند، ضریب k_0 معادله بسط کاهش پیدا خواهد کرد. بنابراین دمای ورق نیز کاهش پیدا خواهد کرد؛ و هر چه سرعت عبور پرتو کاهش پیدا کند، ضریب معادله بسط افزایش و در نتیجه دما نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

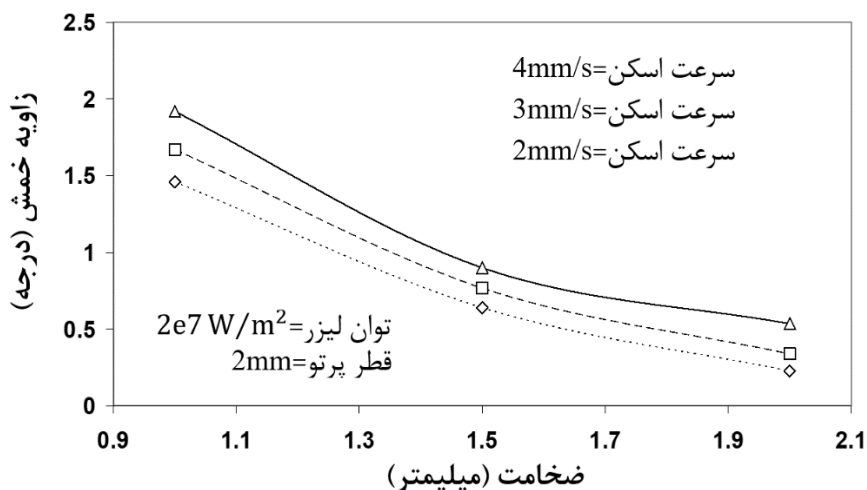
$$T - T_0 = \frac{q'}{2\pi k} e^{-\frac{v}{2\alpha}\xi} k_0 \left(\frac{vr}{2\alpha}\right) \quad (3)$$

۴-۲- نتایج تحلیل عددی

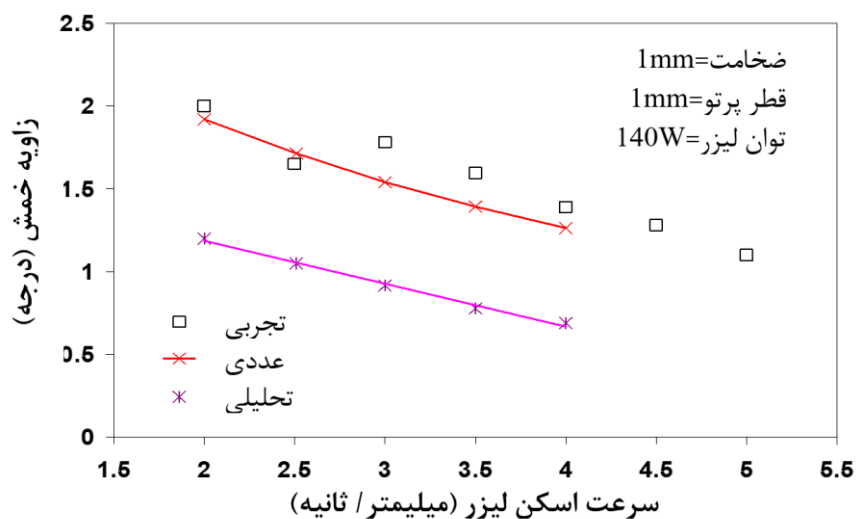
در این بخش از مقاله نتایج مربوط به تحلیل عددی اجزا محدود کوپل حرارتی - مکانیکی برای یک پاس از فرآیند شکل دهی ورق های فولادی با استفاده از لیزر ارائه شده است. در شکل (۸)، نمونه ای از نتایج کانتور دمایی حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود این فرآیند آورده شده است. همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، با افزایش توان لیزر در محدوده بررسی شده، زاویه خمش افزایش یافته است. مطابق این شکل، این روند افزایشی در سرعت های مختلف اسکن تا حد زیادی یکسان می باشد. طبق رابطه (۱)، علت این امر ثابت بودن شار حرارتی وارد شده به قطعه کار می باشد که این مقدار، مستقل از سرعت حرکت پرتوی لیزر است. همچنین نتیجه دیگری که می توان از منحنی مزبور گرفت این است که با کاهش سرعت عبور پرتو لیزر، اندازه زاویه خمش افزایش یافته است و این به دلیل افزایش انرژی وارد بر قطعه بر اثر کاهش سرعت پرتو لیزر خواهد بود.



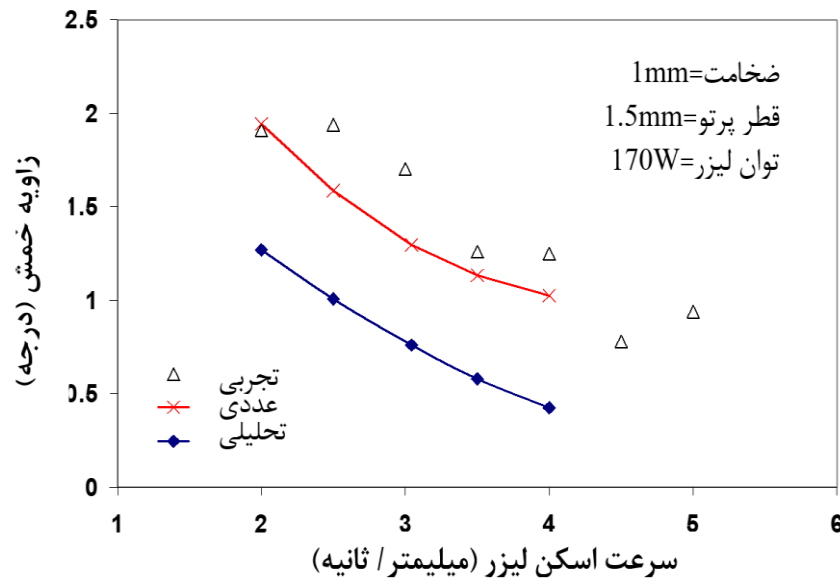
شکل ۱۰: بررسی تاثیر سرعت عبور پرتو لیزر بر زاویه خمش در ضخامت های مختلف به صورت عددی



شکل ۱۱: بررسی تاثیر ضخامت ورق بر زاویه خمش در سرعت های مختلف به روش عددی



شکل ۱۲: کرنش در نزدیکی لبه دوم ورق با فاصله ۱۰ میلیمتر



شکل ۱۳: کرنش در نزدیکی لبه دوم ورق با فاصله ۱۰ میلیمتر

۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای موثر بر زاویه خمش در شکل دهی لیزری ورق های فولادی به دو طریق تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش های تجربی نشان داد که در قطرهای کوچک تر پرتوی لیزر، با افزایش سرعت عبور پرتوی لیزر، روند تغییرات زاویه خمش قطعه کار به صورت نسبتاً خطی می باشد؛ که با افزایش قطر پرتوی لیزر این روند تبدیل به رابطه غیر خطی می گردد. همچنین نشان داد که در شرایط یکسان، با افزایش توان لیزر، منحنی خمش - سرعت به سمت راست میل خواهد کرد؛ که این امر لزوم استفاده از سرعت های بالاتر را در توان های بالای لیزر نشان می دهد. اما در ارتباط با افزایش قطر پرتوی لیزر، عکس این مطلب رخ داده و منحنی به سمت چپ میل پیدا می کند. در قسمت تحلیل عددی این پژوهش تاثیر ضخامت قطعه کار، توان و سرعت عبور پرتوی لیزر مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده گردید که با افزایش توان لیزر مقدار زاویه خمش قطعه کار افزایش یافته و در مقابل با افزایش ضخامت قطعه کار و سرعت عبور پرتوی لیزر، این مقدار کاهش می یابد. در انتها به مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و تحلیل عددی پرداخته شد و همخوانی مناسبی بین آن دو مشاهده گردید.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، کمال تشکر و قدردانی را از آزمایشگاه

در شکل (۱۰)، تاثیر سرعت عبور پرتوی لیزر بر زاویه خمش در دو ضخامت مختلف به صورت کمی بررسی شده است. در شکل مزبور دیده می شود که با افزایش ضخامت قطعه کار، زاویه خمش کاهش یافته است. دلیل این موضوع، افزایش مقاومت خمشی قطعه کار در برابر ورود شار حرارتی یکسان می باشد.

همچنین با افزایش ضخامت ورق، کاهش بسیار زیادی در زاویه خمش دیده شده است که این کاهش را می توان به رسانش سریع حرارت در ورق فلزی نسبت داد. منحنی دیگری که در شکل (۱۱) آورده شده، به بررسی تغییرات زاویه خمش در سرعت ها و ضخامت های مختلف پرداخته است.

شکل ارائه شده نشان می دهد که با افزایش ضخامت، زاویه خمش کاهش پیدا کرده است. همچنین می توان دید که با کاهش سرعت، زاویه خمش افزایش یافته است. علت این کاهش و افزایش زاویه خمش را می توان به ترتیب به رسانش حرارت و وارد شدن انرژی بیشتر نسبت داد. در ادامه در شکل های (۱۲) و (۱۳) به مقایسه نتایج عددی و تجربی در توان های ۱۴۰ و ۱۷۰ وات پرداخته شده است. اگرچه زاویه خمش به دست آمده از آزمایشات تجربی در اکثر موارد بیشتر از تحلیل عددی است، اما همان طور که مشاهده می گردد این نتایج تطابق نسبتاً مناسبی با یکدیگر دارند. دلیل اصلی این اختلاف نتایج، فرضیاتی است که در تحلیل عددی فرض شده بود.

تحقیقاتی لیزر دانشگاه RMIT استرالیا به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات دارند.

۷- مراجع

- [1] J. Hu, H. Xu, and D. Dang, "Modeling and reducing edge effects in laser bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, NO. 11, November 2013, pp. 1989 – 1996.
- [2] G. Lubiano, and J. Ramos, "Laser Bending of Thin Metal Sheets by Means of a Low Power CO2 Laser", 11th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 2000.
- [3] W. Li, B. Author2, and L. Yao, "Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, NO. 4, November 2001, pp. 363 – 367.
- [4] P. Cheng, L. Yao, C. Liu, D. Pratt, and Y. Fan, "Analysis and Prediction of Size Effect on Laser Forming of Sheet Metal", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, NO. 1, January 2005, pp. 28 – 41.
- [5] S. Edwardson, "A Study into the 2D and 3D Laser Forming of Metallic Components", PhD Thesis, Department of Engineering, University of Liverpool, Liverpool, UK, 2004.
- [6] Y. Shi, Z. Yao, H. Shen, and J. Hu, "Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 46, NO. 12-13, October 2006, pp. 1689 – 1697.
- [7] M. Hoseinpour, H. Moslemi, G. H. Liaghat, M. J. Torkamany, S. Jelvani, and V. Panahizade, "An experimental study of sheet metal bending by pulsed Nd: YAG laser with DOE method", *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, NO. 1, April 2008, pp. 137 – 140.
- [8] حمد حسین پورگللو، حسن مسلمی نائینی، غلامحسین لیاقت و سعید جلوانی، "مطالعه تحلیلی و تجربی پارامترهای موثر در فرآیند خمش ورق‌های فلزی با لیزر"، *مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۰، شماره ۳، ۱۳۸۹، صفحه ۶۷ – ۸۶.
- [9] D. Wu, Q. Zhang, G. Ma, Y. Guo, and D. Guo, "Laser bending of brittle materials", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, NO. 4, April 2010, pp. 405 – 410.
- [10] K. Maji, D. K. Pratihari, and A. K. Nath, "Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modeling", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 53, February 2014, pp. 31 – 42.
- [11] Z. Ji, and S. Wu, "FEM simulation of the temperature field during the laser forming of sheet metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, NO. 1-3, February 1998, pp. 89 – 95.
- [12] C. Liu, and Y. Yao, "FEM-Based Process Design for Laser Forming of Doubly Curved Shapes", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 7, NO. 2, January 2005, pp. 109 – 121.
- [13] H. Shen, Z. Yao, and J. Hu, "Numerical analysis of metal/ceramic bi-layer materials systems in laser forming", *Computational Materials Science*, Vol. 45, 2009, pp. 439 – 442.
- [14] M. Hoseinpour, S. M. Mahdavian, and H. Moslemi, "Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd: YAG laser", *Optics & Laser Technology*, Vol. 43, NO. 3, April 2011, pp. 363 – 367.
- [15] S. Chakraborty, V. Racherla, and A. Nath, "Parametric study on bending and thickening in laser forming of a bowl shaped surface", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, NO. 11, November 2012, pp. 1548 – 1558.
- [16] J. Hu, D. Dang, H. Shen, and Z. Zhang, "A finite element model using multi-layered shell element in laser forming", *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, NO. 4, June 2012, pp. 363 – 367.
- [17] محمد حسین پور، مسعود عباس زاده و ایرج میرزایی، "مدل‌سازی هندسی فوم‌های فلزی سلول بسته به روش تولید سلول‌های اتفاقی"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۴، شماره ۳، ۱۳۹۳، صفحه ۱۲۹ – ۱۳۵.
- [18] D. M. Stefanescu, G. Krauss, and G. F. Vander Voort, "ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys", 10th Edition, ASM International, August 1990.