

بررسی اثر سرعت لیزر در خمش ورق فلزی توسط لیزر با استفاده از تحلیل عددی و تجربی در مکانیزم گرادیان حرارتی

حسن مسلمی نائینی^{۱*}، ولی اله پناهی زاده^۲، محمد حسین پور گللو^۳، سیامک مزدک^۴

* نویسنده مسئول: Moslemi@Modares.ac.ir

چکیده

در این مطالعه فرایند گرمایش خطی با لیزر برای سه سرعت مختلف به صورت تحلیل عددی و آزمایش تجربی بررسی شده است. تحلیل عددی از نوع تحلیل کوپله (حرارتی- مکانیکی) و با استفاده از نرم افزار ANSYS صورت گرفته است. همچنین برای آزمایشهای تجربی ورقهای فلزی به کمک لیزر توان پائین، شکلدهی شده اند. قبل از انجام آزمایشها، ابتدا روش طراحی آزمایشهای عاملی کامل (Full Factorial Design) انتخاب و با توجه به این طراحی، قطعههای مورد نیاز با اندازهها و ضخامتهای معین تهیه شد. این آزمایشها با لیزر CO₂ با بیشترین توان (۲۰۰ وات) انجام و پس از آن برای افزایش دقت اندازه گیری زوایا، با استفاده از دستگاه CMM قطعات شکلدهی شده، اندازه گیری شدند. سپس تحلیل آماری روی نتایج آزمایشهای تجربی صورت گرفت. نتایج بدست آمده تطابق خوبی بین نتایج آزمایشهای تجربی و تحلیل عددی را نشان می دهد. از نتایج بدست آمده می توان گفت که رابطه عکس بین افزایش سرعت و زاویه خمش وجود دارد. در ضمن با افزایش سرعت لیزر نرخ کاهش زاویه خمش آهسته تر می شود. همچنین برای نقاط نزدیک به مسیر حرکت لیزر، با افزایش سرعت لیزر، شدت افت دما بیشتر می شود.

واژه های کلیدی: شکل دهی ورق با لیزر- تحلیل عددی- مکانیزم گرادیان حرارتی- لیزر

۱- استاد دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

فرایند گرمایش خطی با لیزر یکی از فرایندهای شکل‌دهی گرم ورقهای فلزی است. در این روش ورق به کمک پرتو لیزر، در راستای مورد نظر، حرارت داده می‌شود و در اثر نیروهای بین لایه‌ها لنگر نسبتاً بزرگی ایجاد و باعث خم شدن ورق چون در این روش ابزار با قطعه کار تماس فیزیکی ندارد به روش شکل‌دهی با ابزار مجازی نیز موسوم است. امروزه فرایند شکل‌دهی با لیزر برای شکل دادن اجزاء فلزی به یک وسیله کارآمد تبدیل شده است. از جمله که با لیزر در ارتباط هستند صنایعی که با لیزر در ارتباط هستند می‌توان صنایع هوافضا، صنعت خودرو سازی، کشتی سازی و میکرو الکترونیک را نام برد. از مزایای لیزر می‌توان به انعطاف پذیری، قابلیت اتوماسیون و استفاده در دیگر روش‌های ساخت مانند برش اشاره کرد [۱-۳].

به علت اینکه اشعه لیزر را به راحتی می‌توان کنترل و میزان دماهای متفاوتی را در قطعه ایجاد نمود، مکانیزم‌های شکل‌دهی متفاوتی را می‌توان ایجاد کرد. انواع مکانیزم‌هایی که با استفاده از لیزر تولید می‌شود عبارت‌اند از:

- مکانیزم گرادیان حرارتی (TGM)
- مکانیزم کمانش (BM)
- مکانیزم کوتاه کردن (UM)

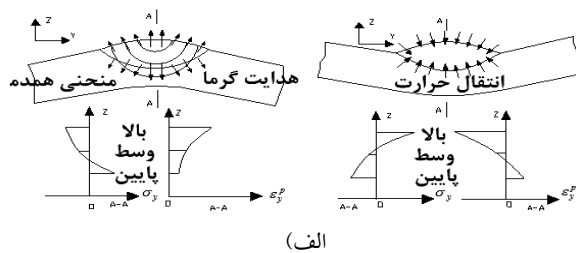
همانطور که از عنوان مکانیزم گرادیان حرارتی یا TGM پیداست، این مکانیزم وابسته به ایجاد شیب حرارتی زیاد در ضخامت ورق و در نتیجه خمیدگی مثبت ورق است [۳-۶]. مکانیزم کمانش یا BM هنگامی ایجاد می‌شود که شیب حرارتی در عرض ورق کوچک باشد و به دلیل کم بودن ضخامت ورق، قطر ناحیه گرم شده بزرگتر از ضخامت ورق است. نتیجه این مکانیزم خمیدگی منفی ورق است. مکانیزم UM از نظر شکل‌دهی با دو مکانیزم دیگر متفاوت است. در حالت کلی هرگاه به دلیل زیاد بودن ضخامت ورق، قطری از ناحیه گرم شده برابر ضخامت ورق باشد این مکانیزم رخ می‌دهد که باعث کاهش طول ورق می‌شود ولی خمشی را ایجاد نمی‌کند [۳-۷].

۲- فرایند گرادیان حرارتی یا TGM

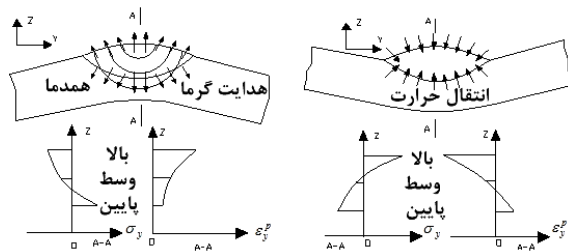
مراحل خمش ورق در مکانیزم TGM به ترتیب زیر است:

- گرمایش سطح ورق و انبساط حرارتی منطقه‌ای از ورق و خمش در جهت مثبت
- شروع کمانش یا خمش
- ادامه حرارت دهی و افزایش تنش فشاری
- سرد کردن سطح و ایجاد انقباض حرارتی
- آزاد شدن تنش الاستیک و گسترش زاویه خمش

متغیرهای مربوط به انرژی، شرایط تعیین کننده مکانیزم TGM هستند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. قطر اشعه لیزر معمولاً به اندازه ضخامت ورق یا کمتر از آن است که در بیشتر مواقع باید کمتر از ضخامت ورق باشد تا شرایط مکانیزم TGM برقرار شود. اگر موادی که استفاده می‌شوند هدایت حرارتی بالایی داشته باشند، باید قطر لیزر افزایش یابد. مسیر لیزر روی سطح ورق نیز معمولاً مستقیم است و از کل ورق می‌گذرد [۱-۳].



(الف)



(ب)

شکل (۱). مراحل فرایند مکانیزم TGM

(الف) فرایند گرمایش (ب) فرایند سرماش

فرایند TGM با گرم کردن سطح تا رسیدن به کرنش‌های الاستیک کامل می‌باشد. اگر گرمایش در این مرحله متوقف شود، کرنش الاستیک قابل بازیابی بوده و فرایند کاملاً برگشت پذیر است و هیچ گونه کرنش پلاستیکی در قطعه کار باقی نمی‌ماند. به خاطر انبساط گرمایی لایه سطحی، یک خمش معکوس یا منفی در قطعه کار بوجود می‌آید. اگر فقط ناحیه گرم شده در نظر گرفته شود، مقدار خمش مطابق شکل (۱-الف) خیلی کوچک

• تعداد پاس

از میان متغیرهای وابسته که بیشتر مورد توجه اکثر محققین بوده است و در این مقاله نیز بررسی شده است، می توان به زاویه خمش ورق اشاره کرد. در این بررسی برای تحلیل از برنامه نویسی APDL در نرم افزار ANSYS استفاده شده و مراحل انجام تحلیل با استفاده از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۲) انجام شد. خصوصیات مواد طبق جدول (۱) وارد نرم افزار ANSYS شد.

جدول (۱) خصوصیات مواد برای شبیه سازی عددی

۴۹/۸	ضریب هدایت حرارتی (w/m K)
۱۲/۲	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}/K$) $20^{\circ}C$
۱۳/۵	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}/K$) $250^{\circ}C$
۱۴/۲	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-6}/K$) $500^{\circ}C$
۴۴۸	گرمای ویژه ($^{\circ}C$ (J/Kg K)) $50-100$
۵۳۶	گرمای ویژه ($^{\circ}C$ (J/Kg K)) $250-300$
۶۴۹	گرمای ویژه ($^{\circ}C$ (J/Kg K)) $400-450$
۸۲۵	گرمای ویژه ($^{\circ}C$ (J/Kg K)) $650-700$

بوده و تقریباً برابر با اندازه قطر اشعه لیزر روی سطح است. این عامل نیروهایی را ایجاد می کند که باعث خمش منفی در کل ورق می شود. خمش منفی متناسب با تنشهای آزاد شده سطحی در ناحیه گرم شده است. بنابراین انبساط گرمایی منجر به تنشهای سطحی پایین تر می شود و از این رو میزان کرنش حرارتی که به کرنش پلاستیک تبدیل می شود، کمتر از حالتی است که فرایند بدون خمش منفی انجام می شود [۴-۸].

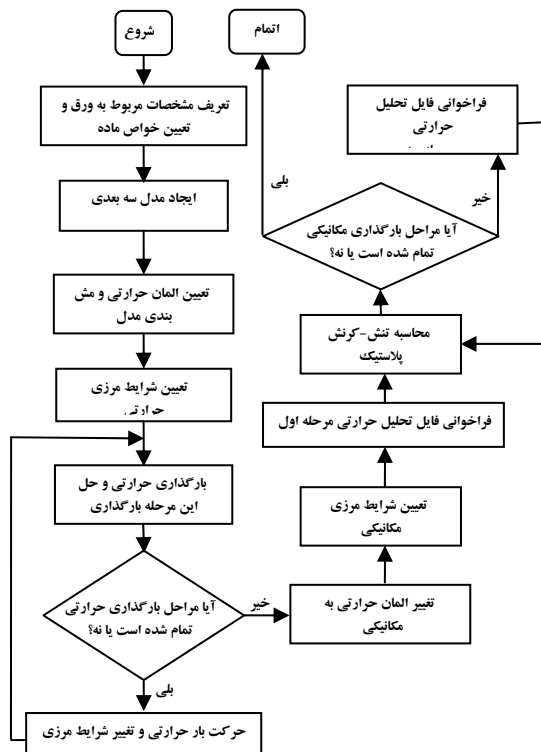
۳- نحوه مدلسازی در نرم افزار ANSYS

در فرایند شکل دهی با لیزر که معمولاً با تغییر شکلهای زیادی همراه است پارامترهای زیادی موثر است. بنابراین نمی توان روشی کاملاً تئوری یا عددی برای تحلیل آن ارائه داد، اما می توان از روشهای عددی برای بازبینی طراحی و رفع اشکالات احتمالی آن کمک گرفت. برای شبیه سازی فرایند شکل دهی با لیزر از تحلیل حرارتی- مکانیکی با نرم افزار ANSYS استفاده شد. در تحلیل حرارتی از المان Solid۴۵ و در تحلیل مکانیکی از المان Solid۷۰ استفاده شد. در نرم افزار ANSYS تحلیل حرارتی- مکانیکی به دو صورت امکان پذیر است:

۱- حل به وسیله اعمال کوپل و بارگذاری توام مکانیکی و حرارتی
 ۲- حل حرارتی و انتقال گرادیان حرارتی هر گره به حل عددی. از آنجا که روش دوم خطای کمتری نسبت به روش اول دارد، برای تحلیل کوپل از روش دوم استفاده شد که الگوریتم حل در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای آنکه بتوان آزمایشها را به ترتیبی انجام داد که نتایج آن با آنچه از تحلیل عددی به دست آمده است قابل مقایسه باشد، ابتدا باید پارامترهای موثر بر روی شکل دهی فلزات به وسیله لیزر را شناخت. علاوه بر سرعت حرکت لیزر که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است، از مهمترین متغیرهای مستقل دیگر این فرایند که در تحلیل عددی و آزمایش تجربی مورد توجه قرار گرفت می توان به موارد زیر اشاره کرد:

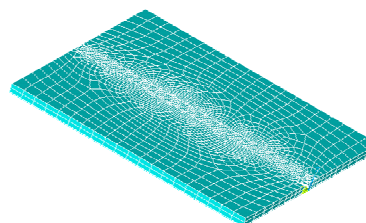
- عرض ورق
- ضخامت ورق
- قدرت لیزر



شکل (۲) دیاگرام حل مسئله

۳- طراحی مدل

طراحی مدل در نرم افزار ANSYS به گونه‌ای صورت گرفت که اندازه آن درست مطابق نمونه آزمایشی باشد. طول و عرض این مدل سه بعدی مطابق نمونه‌ها به ترتیب ۹۰ و ۶۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر و قطر لیزر ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای اینکه بتوان تاثیر حرارت را بهتر مدل سازی کرد سعی شد که قسمتهایی که تحت تاثیر حرارت قرار دارد هنگام مش بندی دارای المان‌های کوچکتر از سایر قسمت‌ها باشد. درشت انتخاب کردن المان سایر قسمت‌ها نیز به دلیل تسریع در همگرایی و حل سریع تر مسئله بود. شکل (۳) مدل مش بندی شده در ANSYS را نشان می‌دهد.



شکل (۳) مش بندی مدل سه بعدی طراحی شده در نرم افزار ANSYS

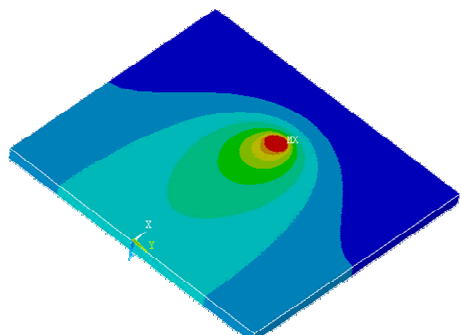
در شکل دهی ورق توسط لیزر قسمتی از ورق که تحت اشعه لیزر قرار دارد گرم شده و حرارت از آن نقطه به سایر قسمت‌ها گسترش پیدا می‌کند و باعث گرم شدن سایر قسمت‌ها می‌شود. برای ایجاد این شرایط در مدل‌سازی با ANSYS از بارگذاری مرحله‌ای استفاده شد. بدین ترتیب که در هر مرحله حرارت به صورت دما بر روی ورق اعمال و هر بار تحلیل انجام می‌شد. برای اعمال سرعت حرکت لیزر مدت زمان هر مرحله با توجه به سرعت مورد نظر تعیین می‌شد. پس از هر مرحله بارگذاری، مسئله حل شده و نتایج هر مرحله ذخیره شده تا در مرحله بعد مورد استفاده قرار گیرد.

با اتمام بارگذاری حرارتی و حل تمام مراحل، المانهای مدل به المان مکانیکی تبدیل شده و پس از اعمال شرایط مرزی و با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل حرارتی، مدل مجدد بارگذاری شده و در نهایت مسئله حل و نتایج تحلیل حرارتی- مکانیکی فرایند به دست می‌آید. توزیع

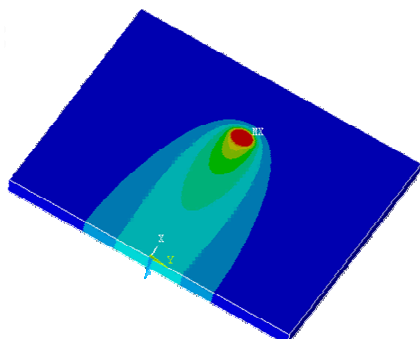
حرارت در ورق برای سرعت‌های ۲، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در شکل (۴) نشان داده شده است.

نتایج تحلیل شده توسط این مدل باید شرایط زیر را داشته باشد:

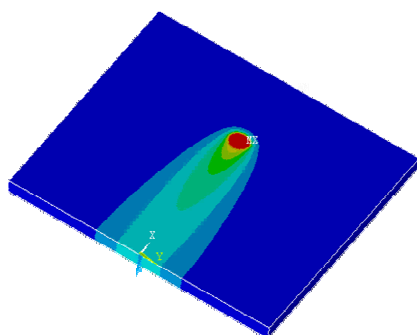
- وجود حلقه‌های بیضی شکل در طی مسیر حرکت اشعه لیزر تراکم به دلیل آن است که خطوط گرادینانی در جلوی اشعه نسبت به عقب اشعه بیشتر است که علت این امر سرد بودن ورق فلزی در جلوی اشعه و گرم بودن ورق فلزی در عقب اشعه می‌باشد.
- تطابق نتایج تحلیل عددی با نمونه‌های تجربی که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



الف) سرعت حرکت لیزر ۲ میلی‌متر بر ثانیه



ب) سرعت حرکت لیزر ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه



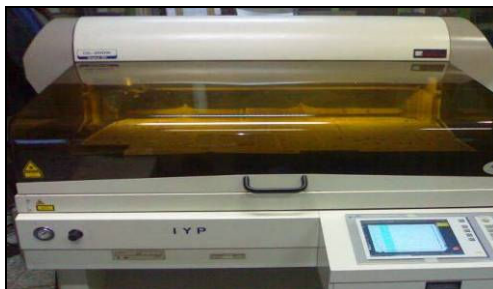
ج) سرعت حرکت لیزر ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه

شکل (۴) شبیه سازی توزیع حرارت در ورق توسط نرم افزار ANSYS برای سرعت‌های مختلف

۴- نحوه انجام آزمایشهای تجربی

به صورت دو بعدی مورد نظر می باشد. در شکل دهی دو بعدی، ورق فقط در یک جهت خم می شود تا به شکل سه بعدی مطلوب برسد. در شکل (۶) قطعاتی که به صورت دو بعدی با استفاده از لیزر شکل دهی شده اند، نشان داده شده است.

برای انجام آزمایشها از ورق فولاد کم کربن (St37) استفاده شده است که مشخصات حرارتی- مکانیکی آن در جدول (۲) نشان داده شده است. سطوح مختلف متغیرهای مستقل فرایند که در انجام آزمایشهای تجربی مورد توجه قرار گرفته و در این مقاله بررسی شده اند نیز در جدول (۲) آمده است.

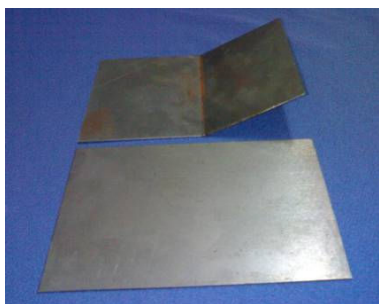


(الف)



(ب)

شکل (۵) الف) دستگاه لیزر CO₂ ب) تورچ دستگاه لیزر حین کار



(الف)



(ب)

شکل (۶) قطعات شکل دهی شده با لیزر به صورت دو بعدی

۷- اندازه گیری با دستگاه CMM

جدول (۲) مشخصات حرارتی- مکانیکی St37 [۹]

چگالی	۷۸۷۰ kg/m ^۳
مدول یانگ	۲۰۴ GPa
استحکام کششی	۲۹۰ MPa
حد تسلیم	۱۹۰ MPa
مدول برشی	۷۲ GPa
مدول حجمی	۱۲۰ GPa
سختی	۹۸ Vickers
نقطه ذوب	۱۵۱۳ °C
هدایت حرارتی	۴۸ W/mK

جدول (۳) سطوح مختلف عاملهای مورد استفاده در آزمایشها

سرعت لیزر (میلیمتر بر ثانیه)	۲، ۱۰، ۲۰
قدرت لیزر (وات)	۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰
ضخامت ورق (میلیمتر)	۱، ۲
عرض ورق (میلیمتر)	۶۰، ۹۰
تعداد پاس	۶، ۱۰

۵- دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایشها از لیزر CO₂ با بیشترین توان (۲۰۰ وات) استفاده شده که در شکل ۵ دستگاه مورد استفاده نشان داده شده است. این دستگاه دارای سه درجه آزادی شامل میزی با یک درجه آزادی در جهت X و تورچ لیزر با دو درجه آزادی در جهت Y و Z می باشد که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. ابتدا قطعات با توجه به طول و عرض مشخص و نیز با ضخامتهای یکسان برای حفظ فاصله کانونی اشعه لیزر روی میز دستگاه کنار هم چیده شده و تورچ لیزر با توجه به سرعتهای مختلف طرح آزمایش حرکت رفت و برگشت را انجام می داد که در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. چنانچه فرایند شکل دهی با لیزر، به دو بخش دو بعدی و سه بعدی تقسیم شود، در این بررسی فرایند شکل دهی با لیزر،

همچنین معنادار بودن یا نبودن این عوامل نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	6.616916	1.643386	3.966544	0.0002
POWER	0.018856	0.004827	3.906531	0.0002
VELOCITY	-0.130125	0.024133	-5.391940	0.0000
PASS	0.613858	0.096993	5.297901	0.0000
THICKNESS	-4.819923	0.386132	-12.41827	0.0000
WIDTH	-0.008443	0.012963	-0.651284	0.5173
R-squared	0.781940	Mean dependent var	3.033750	

شکل (۹) تحلیل‌های آماری به دست آمده با استفاده از نرم افزار MINITAB

با توجه به مقدار t-Statistic می‌توان گفت که از متغیرهای مستقل فرایند شکل دهی با لیزر که روی زاویه خمش تأثیر دارند، ۷۸٪ زاویه خمش از این ۵ پارامتر (توان لیزر، سرعت حرکت لیزر، ضخامت ورق، تعداد پاس و عرض ورق) متأثر می‌شود. با توجه به تحلیل آماری نشان داده شده در شکل (۹) ملاحظه می‌شود که اگر شرایط اولیه در طول آزمایش ثابت باشد، به ازای افزایش یک میلی‌متر بر ثانیه سرعت حرکت لیزر، زاویه خمش به اندازه ۰/۱۳ درجه کاهش می‌یابد.

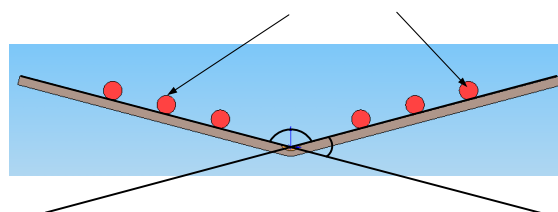
۹- مقایسه نتایج

مقایسه‌ای بین پارامترهای دیگر فرایند، با تجربه انجام شده است که در مقاله [۷] بیان شده است. شکل (۱۰) زاویه خمش ورق را برای سرعت‌های مختلف با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش و تحلیل عددی فرایند نشان می‌دهد. از نمودار می‌توان اینگونه نتیجه گرفت، رابطه عکس بین افزایش سرعت و زاویه خمش وجود دارد و همچنین با افزایش سرعت لیزر نرخ کاهش زاویه خمش آهسته‌تر می‌شود.

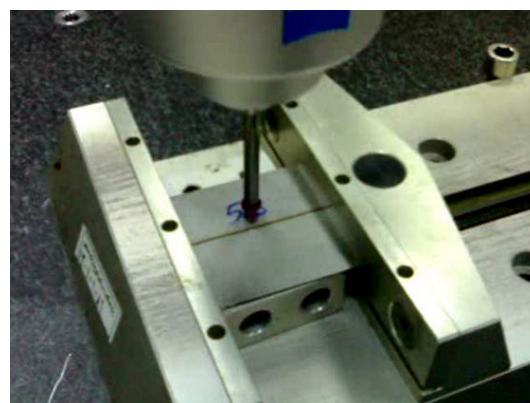
شکل (۱۱) مقدار دمای یک نقطه از سطح ورق را بر حسب فاصله آن نقطه تا مسیر حرکت لیزر برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودار دیده می‌شود برای نقاط نزدیک به مسیر حرکت لیزر، با افزایش سرعت لیزر، شدت افت دما بیشتر است. برای فواصل میانی، تغییرات دما به صورت خطی بوده و هنگام نزدیک شدن به لبه، سرعت سرد شدن ورق کمتر است. همچنین با افزایش

پس از انجام آزمایش‌های برای اندازه گیری زوایای خم از دستگاه CMM استفاده شد. این دستگاه دارای دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر بود که به آسانی می‌توانست زوایای قطعات خم شده را محاسبه کند. علت استفاده از این دستگاه به خاطر کوچک بودن زاویه خمش قطعات بود.

برای اینکه بتوان با دستگاه CMM زاویه قطعات را اندازه گیری کرد، پراب دستگاه، سه نقطه از طرفین قسمتهای خم شده را اندازه گیری می‌کرد. با عبور یک خط راست از هر سه نقطه در طرفین مسیر خم، زاویه بین این دو خط اندازه گیری و در نهایت زاویه خمش بدست می‌آمد. شکل (۷) شماتیک نحوه انتخاب این شش نقطه و اندازه گیری زاویه خمش و شکل (۸) دستگاه CMM در حال اندازه گیری را نشان می‌دهد.



شکل (۷) نحوه انتخاب و اندازه گیری زاویه خمش با دستگاه CMM



شکل (۸) دستگاه CMM در حال اندازه گیری

۸- تحلیل آماری نتایج آزمایش

تحلیلهای آماری و نمودارهای بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار MINITAB انجام شده است. نتایج این تحلیلهای و همچنین میزان تأثیر هر یک از عوامل موثر در فرایند و

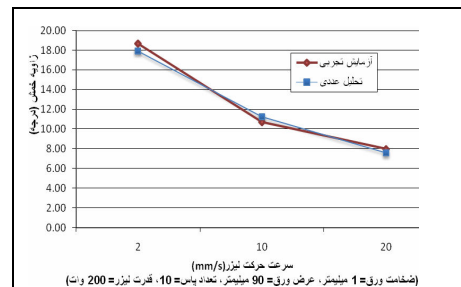
نرخ کاهش زاویه خمش آهسته تر می شود. همچنین برای نقاط نزدیک به مسیر حرکت لیزر، با افزایش سرعت لیزر شدت افت دما بیشتر و برای فواصل میانی، تغییرات دما به صورت خطی است.

هنگام نزدیک شدن به لبه، سرعت سرد شدن ورق کمتر است. ضمن اینکه با افزایش سرعت لیزر، نرخ سرد شدن ورق به ویژه در نقاط نزدیک به مسیر حرکت لیزر بالا می رود.

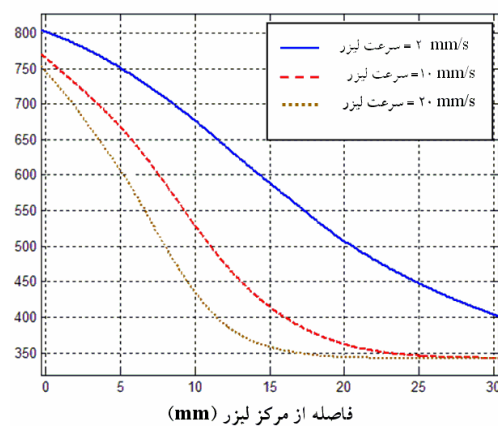
مراجع

- [۱] Shi Y.J., Shen H., Yao Z.Q. and Hu J., Numerical Investigation of Straight-Line laser forming under the temperature gradient mechanism, *Acta Metallurgica Sinica*, Vol. ۱۹ No. ۲, ۲۰۰۶, pp. ۱۴۴-۱۵۰.
- [۲] Magee J., Watkins K.G. & Steen W.M., Advances in Laser Forming, *J. Laser Applications*, Vol. ۱۰, Issue ۶, ۱۹۹۸, pp. ۲۳۵-۲۴۶.
- [۳] Hoseinpour Gollo M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H., Torkamany M. J., Jelvani S., Panahizadeh V., An experimental study of sheet metal bending by pulsed Nd:YAG laser with DOE method, *Int. J. Mater Form*, Springer-online (In press)
- [۴] Wegener K. & Adelhardt M., Shipbuilding experiences a revolution, *Industrial Laser Solutions*, Pennwell Corporation, Tulsa, Vol. ۱۷, No. ۱۲, ۲۰۰۲, pp. ۹-۱۲.
- [۵] Panahizadeh V., Moslemi Naeini H., Mehreban M. and Mazdak S., *Investigation of Bending Angle in TGM Laser Forming Process Using DOE Method*, Tehran International Congress on Manufacturing Engineering (TICME۲۰۰۷), Tehran, Iran, Dec. ۲۰۰۷.
- [۶] Yongjun Shi, Hong Shen, Zhenqiang Yao, Jun Hu, Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates, *Optics & Laser Technology*, Vol. ۳۹, ۲۰۰۶, pp. ۸۵۸-۸۶۳.
- [۷] Moslemi Naeini H., Panahizadeh V., Mazdak S., Mousavi H., *TGM Laser Forming Process for Sheet Metals –an FEM Analysis Approach*, Turkey Int. Congress on Manufacturing Eng. (Diemold۲۰۰۷), Turkey, ۲۰۰۷.
- [۸] Z. Hu, R. Kovacevic, M. Labudovic, Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming, *Int. J. Machine Tools & Manufacture* Vol. ۴۲, ۲۰۰۲, pp. ۱۴۲۷-۱۴۳۹.
- [۹] ASM Metals Handbook, ASM International, ۱۰th Ed. ۱۹۹۰.

سرعت لیزر نرخ سرد شدن ورق به ویژه در نقاط نزدیک به مسیر حرکت لیزر بالا می رود.



شکل (۱۰) تأثیر سرعت لیزر بر روی زاویه خمش برای سرعت های مختلف



شکل (۱۱) دمای یک نقطه از سطح ورق بر حسب فاصله تا مسیر حرکت لیزر

۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق فرایند شکل دهی ورق با لیزر به صورت تجربی و همچنین به روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای مهم در تغییر شکل ورق در کل فرایند بررسی شدند که با انتخاب مناسب این متغیرها می توان به بیشترین زاویه خمش برای ورق دست یافت. پدیده هایی از قبیل انتقال حرارت، پلاستیسیته و تغییرات ریز ساختار در نمونه ها مشاهده شد، که به علت اثرات غیر خطی توزیع تنش، کرنش، دما و خواص مکانیکی ورق در فرایند شکل دهی با لیزر می باشد. اثر سرعت حرکت لیزر در میزان زاویه خمش ورق در طول فرایند مورد بررسی قرار گرفت. با ملاحظه نتایج تحلیل عددی و تجربی می توان اینگونه نتیجه گرفت که؛ رابطه عکس بین افزایش سرعت و زاویه خمش وجود دارد و نیز با افزایش سرعت لیزر،