



خمکاری لوله دولایه به کمک لیزر با مکانیسم گرادین حرارتی

محمد خدادوستی

دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک _ طراحی کاربردی دانشگاه صنعت نفت آبادان

صادق مزرعه

دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی عمران _ سواحل و بندرسازه های دریایی دانشگاه صنعت نفت آبادان

چکیده

استفاده از لوله های دو جداره در صنایع مهمی مانند هوا فضا دارای کاربردهای خاص می باشد. ایجاد یک خم مناسب و مرتبط با فرآیند طراحی، مستلزم کنترل فرآیند انجام می باشد. استفاده از پرتو لیزر به منظور شکل دهی لوله دوجداره فولادی - مسی بسیار کارآمد می باشد. از این رو بررسی فرآیند شکل دهی لوله دوجداره با استفاده از پرتو لیزر به عنوان محور پژوهش حاضر انتخاب شده است.

در ابتدا با استفاده از فرآیند کشش لوله، ادغام دو لوله فولادی (فولاد ضد زنگ) و مسی انجام شده است. سپس با استفاده از علم آمار استنباطی به طراحی عاملی آزمایشات پرداخته شده و با استفاده از طراحی ۹ آرایه ای به روش تاگوچی، آزمایشات طراحی شده است. پرتو و تعداد پاس لیزر و سرعت چرخش به عنوان پارامترهای ورودی در بررسی زاویه خم لوله، مورد بررسی قرار گرفته اند. دستگاه پرتو لیزر پالسی برای انجام فرآیند تجربی استفاده شده است. بخش چرخشی دستگاه با استفاده از نمونه مشابه، نمونه برداری و ساخته شده است. سپس آزمایشات مطابق طراحی انجام شده و مقدار زاویه با استفاده از یک دستگاه مقیاس سنج نوری اندازه گیری شده است.

نتایج نشان داد که پرتو و تعداد پاس لیزر با زاویه خم رابطه مستقیم خطی دارند؛ این درحالیست که مقدار زاویه خم با سرعت چرخشی دارای رابطه عکس می باشد. کمترین مقدار خم به عنوان معیار سنجش پارامترها در نظر گرفته شده است. کمترین مقدار خم در آزمایش شماره ۷ با پرتو لیزر ۱۷۰ وات، سرعتی معادل ۲۰ (۵ دور بر دقیقه) و در ۲۰ پاس، اندازه گیری شده است.

واژگان کلیدی: خمکاری، لوله دولایه، لیزر، مکانیسم گرادین حرارتی

مقدمه

امروزه فرآیند خمش لوله با لیزر، در زمینه پردازش و ساخت مواد به وسیله لیزر بسیار متداول است. این روش به دلیل توانایی در تولید فرم ها و شکل هایی که به طور عادی به وسیله ابزارهای خم مکانیکی، قابل دستیابی نیستند؛ بسیار کاربردی و قابل استفاده می باشد.



در این روش با استفاده از گرمایش لیزر در محل مشخص شده لوله با استفاده از مکانیزم گرادیان حرارتی به جهت مورد نظر خم شده‌اند. از طرف دیگر با توجه به افزایش خواص مکانیکی در قطعات با دو جنس (همزمان)، استفاده از یک لوله با دو جداره (جداره بیرونی از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ و جداره داخلی از مس) در دستور کار تحقیق حاضر قرار گرفته است.

به همین منظور خمکاری یک لوله دوجداره (فولاد-مس) به منظور شناسایی و بهینه سازی پارامترهای مهم فرآیند شکل دهی با پرتو لیزر مانند توان لیزر، تعداد پاس لیزر و سرعت خمکاری لوله، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش تجربی، از علم آمار استنباطی به منظور بهینه سازی و بررسی آماری پارامترهای موثر بر فرآیند استفاده شده است. جهت تحلیل داده‌ها و بهینه سازی مقادیر مختلف پارامترها، از روش تاگوچی با بررسی مقدار اثر نرخ اغتشاش، استفاده می‌گردد. هریک از پارامترها به عنوان ورودی در سه سطح طراحی شده و مقدار زاویه خم به عنوان خروجی اندازه گیری شده است.

با بررسی نیاز صنایع و با توجه به ویژگی‌های کیفی در فرآیند حاضر، (نظیر کاهش نازک شدگی، کاهش چروکیدگی، کاهش برگشت فتری و بیضی شدن لوله و افزایش دقت در ایجاد زاویه خم مورد نیاز) استفاده از این روش در خمکاری لوله‌های دو جدار ضرورت دارد. همچنین بهینه سازی شرایط آزمایشی در کنار استفاده از لوله‌های دوجداره حائز اهمیت می‌باشد.

فرآیند شکل دهی لوله با لیزر

استفاده از پرتو لیزر در فرآیندهای شکل دهی در پایان قرن بیستم مطرح شد و تاکنون نیز در حال توسعه است (Shen and Vollertsen, 2009). خاصیت حرارتی پرتو لیزر در مواردی که به دلیل فقدان شکل پذیری و تردی ماده، عملیات شکل دهی دچار محدودیت می‌گردد، موجب رفع موانع می‌شود. از مهم ترین مزایای این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

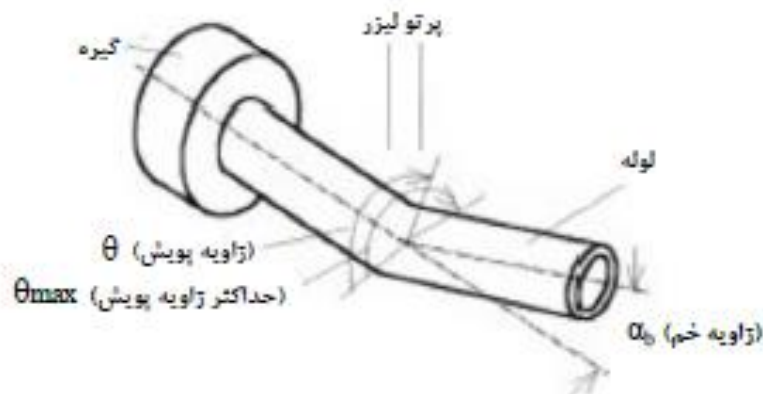
- عدم تماس ابزار و قطعه کار در طول انجام فرآیند (Magee and De Vin, 2002)
- امکان شکل دهی با دقت و کنترل بالا نسبت به تورچ گازی (Magee and De Vin, 2002)
- انعطاف پذیری بالا (تنها پارامترهای فرآیند تغییر می‌کنند و نیازی به ساخت قالب جدید نیست) (Shen and Vollertsen, 2009)

اگرچه منشأ روش شکل دهی با لیزر را می‌توان در شکل دهی با شعله ردیابی نمود؛ این فرآیند روشی تمیزتر و دارای کنترل پذیری بالاتری است که امکان کاربردهای منحصر به فردی را فراهم می‌کند. شکل-دهی لوله‌ها از اهمیت ویژه‌ای در صنعت برخوردار است و جهت تولید قطعات موجود در صنعت مانند لوله‌های سیال آگاز، مخازن تحت فشار، خودرو، مبدل‌های حرارتی، دستگاه‌های هیدرولیک و دیگ بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیندهای سنتی شکل دهی لوله، انواع مختلفی از قالب‌ها جهت دستیابی به شکل موردنظر مورد نیاز است؛ که این امر هزینه‌های زمان و بودجه را در برمی‌گیرد. از این رو، توسعه روش‌های شکل دهی انعطاف پذیر بدون قالب، جهت کاهش هزینه‌های یک محصول اهمیت ویژه‌ای دارد (Hao and Li, 2005).

در مقایسه با دیگر منابع حرارتی، به عنوان مثال در مقایسه با شعله پلاسما^۱، پرتو لیزر را با دقت بیشتر می‌توان کنترل کرد. با این حال برخلاف شکل دهی ورق‌ها، پژوهش‌هایی که در زمینه شکل دهی لوله با لیزر صورت گرفته، بسیار محدود است؛ بنابراین انجام پژوهش بیشتر در این زمینه می‌تواند به پیشرفت این فرآیند و رفع موانع استفاده از آن در صنعت کمک کند. پیچیدگی فرآیند، یکی از مهم ترین دلایل عدم گستردگی انجام پژوهش در این زمینه است. از این رو پیچیدگی و نیاز به تخصص بالا، از مهم ترین معایب این فرآیند است (Hsieh and Lin, 2005).

دو روش اصلی برای شکل دهی لوله با لیزر، پوشش دایروی و پوشش محوری می‌باشند (Zhang, 2006) (Safdar et al, 2007).

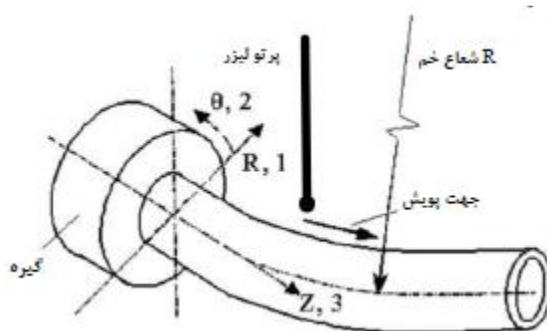
^۱ - Plasma torch



شکل ۱- نمای کلی فرآیند شکل دهی لوله با لیزر به روش پویش دایروی

روش پویش دایروی

نمای کلی روش پویش دایروی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش پرتو غیرمتمرکز لیزر روی سطح خارجی لوله ای که با سرعت مشخص در حال چرخش است، تابیده می شود. زاویه چرخش لوله معمولاً ۱۸۰ درجه در نظر گرفته می شود. اندازه پرتو لیزر بسیار بزرگ تر از ضخامت لوله در نظر گرفته می شود. در نتیجه، ناحیه پویش شده به صورت تقریباً همگن در جهت ضخامت لوله حرارت داده می شود. محدودیت اعمالی بر روی ناحیه تحت پویش، از سوی ناحیه ای که تحت تأثیر حرارت قرار ندارد؛ موجب تغییر شکل پلاستیک فشاری در ناحیه پویش می گردد. در حقیقت مواد اطراف ناحیه پویش شده، از انبساط آزادانه مواد در آن ناحیه، جلوگیری می کنند. کوتاه شدگی مواد در ناحیه پویش در جهت محوری موجب خم شدن لوله به سمت پرتو لیزر می گردد (Li and Yao, 2001). لازم به ذکر است که میزان زاویه خم به دست آمده در فرآیند شکل دهی لوله با لیزر در مقایسه با شکل دهی ورق ها بسیار کمتر است (Zhang, 2006).



شکل ۲- نمای کلی فرآیند شکل دهی لوله با لیزر به روش پویش محوری

روش پویش محوری

در این روش، پویش پرتو لیزر در راستای محور لوله انجام می گیرد. نمای کلی این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. در مقایسه با پویش دایروی که در آن لوله متحرک است (در حقیقت پویش توسط حرکت لوله انجام می گیرد)، ثابت بودن لوله در این روش سبب کاهش پیچیدگی فرآیند می گردد.

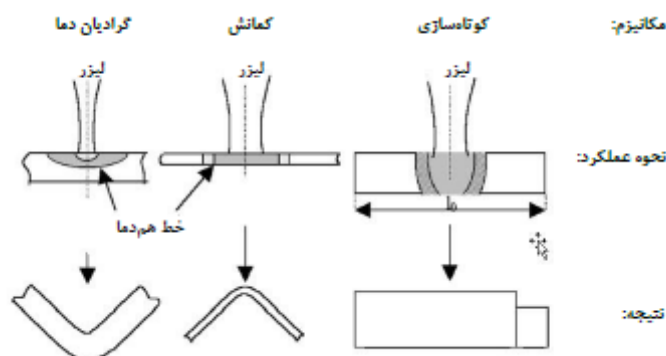
مکانیزم های شکل دهی با لیزر

فرآیند شکل دهی با لیزر به وسیله اعمال تنش های حرارتی به سطح قطعه کار از طریق گرمایش سطح با پرتو لیزر به وجود می آید. این تنش های داخلی، موجب کرنش های پلاستیک و در نهایت منجر به کمانش الاستیک- پلاستیک در قطعه کار می شوند.

همان گونه که اشاره شد، روش سنتی شکل دهی با شعله سال های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در کشتی سازی مورد استفاده قرار می گیرد و در آن تنش های حرارتی به وسیله گرمایش با یک شعله ایجاد می شود. روش گرمایش با مشعل، چند تفاوت مهم با شکل دهی با لیزر دارد. تفاوت اول این است که لیزر شار حرارتی ثابتی را به سطح اعمال می کند؛ در نتیجه یک دمای بالا در سطح تولید می گردد که منجر به یک گرادیان حرارتی بالا می شود. در مقابل، یک مشعل دمایی ثابت را در سطح قطعه کار تولید می کند. شار حرارتی به دمای ورق نیز وابسته است؛ بطوریکه دمای سطح ورق نمی تواند از دمای شعله بیشتر شود. این امر امکان ایجاد گرادیان دمایی عمیق توسط یک مشعل در مواردی که هدایت حرارتی ماده بالا است را غیرممکن می سازد. دومین تفاوت مهم بین شکل دهی با شعله و لیزر مربوط به قابلیت کنترل فرآیند است. قطر پرتو و توان انتقال لیزر به راحتی قابل تنظیم است (Ready, 1997) (Magee et al, 1998) در صورتی که کنترل یک شعله بسیار مشکل است. شار حرارتی یا دمای شعله تابع میزان مخلوط اکسیژن و گاز است که به سختی قابل کنترل است. علاوه بر این قطر شعله نسبت به قطر پرتو لیزر بسیار بزرگ تر است که منجر به کنترل بسیار سخت آن می شود.

به دلیل کنترل بسیار خوبی که به وسیله پرتو لیزر ارائه می شود، انواع مختلفی از میدان های دمایی را می توان تولید نمود که به مکانیزم های مختلف شکل دهی منجر می شود.

سه مکانیزم اصلی برای شکل دهی با لیزر ورق ها، لوله ها و مقاطع اکستروژن وجود دارد. این مکانیزم ها که در شکل ۳ نشان داده شده اند؛ مکانیزم گرادیان دما^۲، مکانیزم کمانش^۳ و مکانیزم کوتاه سازی یا ضخیم سازی^۴ می باشند.



شکل ۳- مکانیزم های شکل دهی با لیزر

مکانیزم گرادیان دما وابسته به برقراری یک گرادیان دمایی بالا در طول ضخامت ورق است. مکانیزم کمانش هنگامی فعال می شود که گرادیان دمایی در طول ضخامت ورق کوچک شود و عرض ناحیه حرارت دیده، بزرگ تر شود. در این مکانیزم ورق یا به

² - Temperature Gradient Mechanism (TGM)

³ - Buckling Mechanism (BM)

⁴ - Shortening Mechanism or Upsetting Mechanism (SM or UM)



سمت پرتو لیزر خم و یا از آن دور می شود. کنترل جهت خم در این مکانیزم بسیار مهم است (Abed et al, 2007) (غدیری، ۱۳۸۹).

مکانیزم کوتاه سازی بر اثر گرمایش تقریباً یکنواخت در جهت ضخامت ماده، ایجاد می شود. اگر از کمانش به سبب شکل هندسی یا به وسیله موانع فیزیکی جلوگیری شود، یک کوتاه سازی ساده (همراه با افزایش در ضخامت)، در ماده اتفاق می افتد (غدیری، ۱۳۸۹) (Dearden and Edwardson, 2007).

مکانیزم گرادیان دما

مکانیزم گرادیان دما طی مراحل زیر اتفاق می افتد:

گرمایش سطح و انبساط حرارتی در برابر حجم ماده سرد

گسترش ضد خم^۵

گرمایش بیشتر و فشردگی پلاستیکی سطح

گسترش زاویه خم

شرایط لازم برای ایجاد مکانیزم گرادیان دما، پارامترهای انرژی هستند که منجر به یک گرادیان حرارتی شدید در جهت ضخامت ورق می شوند. قطر پرتو عموماً در محدوده ضخامت ورق یا کمی کمتر است. سرعت پویش پرتو، باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود تا بتوان به یک گرادیان دمایی شدید رسید. اگر ماده مورد استفاده، دارای ضریب هدایت حرارتی بالا باشد، سرعت پویش را می توان افزایش داد. مسیر پویش لیزر بر روی سطح ورق به طور نمونه می تواند یک خط مستقیم در طول ورق باشد. این خط مستقیم به یک لبه خم کاری منجر می شود.

اولین مرحله مکانیزم گرادیان دما گرمایش سطح است که به کرنش های الاستیک خالص منجر می شود. اگر گرمایش در این مرحله متوقف شود، کرنش های الاستیک به حالت اول بازخواهند گشت و فرآیند کاملاً برگشت پذیر خواهد بود و هیچ کرنش پلاستیکی در قطعه کار باقی نخواهد ماند. به علت انبساط حرارتی لایه های سطحی، یک ضد خم یا خمش منفی^۶ به وجود می آید که منجر به خم شدن در جهت دور شدن از پرتو لیزر می شود. میزان ضد خم بسیار کوچک است.

اثر ضد خم جهت گسترش زاویه خم اصلی، یک اثر منفی است. ضد خم از این جهت یک اثر منفی است که همانند یک آزادسازی تنش های سطحی عمل می کند که در این هنگام، بخشی از کرنش های حرارتی که به کرنش های پلاستیک تبدیل می شوند، صرف انجام عمل ضد خم می شود؛ بنابراین از مقدار زاویه خم اصلی کاسته می شود.

گرمایش بیشتر منجر به کاهش تنش جریان در ناحیه گرم شده و افزایش بیشتر انبساط حرارتی لایه های سطحی می شود. در یک دمای خاص که به جنس ماده بستگی دارد و همچنین در ابعاد هندسی و میزان ضد خم مشخص، کرنش های حرارتی به کرنش های الاستیک می رسند. افزایش بیشتر دما، موجب تبدیل انبساط حرارتی به کرنش های فشاری می شود. این کرنش های فشاری پلاستیکی تا هنگامی که گرمایش متوقف شود یا ذوب شدگی اتفاق بیافتد، بر روی هم انباشته می شوند. گرمایش یک نقطه خاص از سطح، بعد از این که پرتو از این نقطه بگذرد متوقف می شود و پس از آن مرحله خنک سازی شروع می شود.

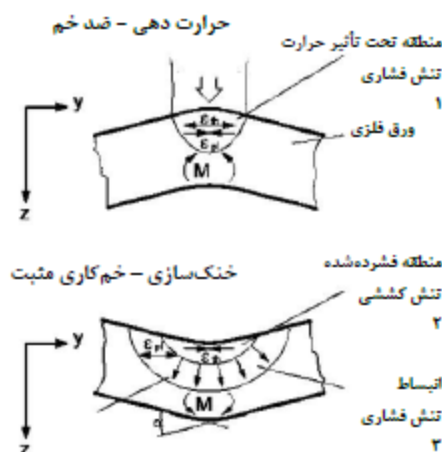
در برابر گرمایش قطعه که در آن جریان حرارت از طریق انرژی تابشی لیزر بر روی سطح انتقال می یابد، خنک سازی به وسیله شرایط حرارتی در قطعه اتفاق می افتد. افت انرژی به وسیله تشعشع و هدایت حرارتی به محیط، کمتر اهمیت دارند و اغلب از آنها صرف نظر می شود. خنک سازی اساساً به علت خود خنک سازی در اثر همرفت طبیعی^۷، اتفاق می افتد که پدیده ای غالب در اکثر فرآیندهای سطحی لیزری است. حرارت محیط، پیرامون ورق فلزی (هوای مجاور) جریان می یابد و منجر به

^۵ - Counter bending

^۶ - Reverse bending

^۷ • Natural convection

خنک سازی ناحیه گرم شده در عرض چند ثانیه می شود. در طول زمان خنک سازی، ماده گرم شده منقبض می شود. به علت اینکه سطح ورق در طول زمان گرم شدن به طور پلاستیکی فشرده شده و بعد از خنک شدن تا دمای محیط، طول لایه های گرم شده ورق در مقایسه با لایه های گرم نشده، کوتاه تر است. به علت اختلاف طول لایه های سطح ورق و لایه های پایین تر ورق، زاویه خمش به طرف پرتو لیزر گسترش پیدا می کند. میزان زاویه خم به انرژی جذب شده، هندسه قطعه کار و خواص حرارتی و مکانیکی ماده بستگی دارد و عموماً بین ۰/۱ درجه تا ۳ درجه بعد از هر بار پویش، است. شکل ۴ اصول مکانیزم گرادیان دما را نشان می دهد (Edwardson, 2004) (غدیری، ۱۳۸۹).



شکل ۴- اصول مکانیزم گرادیان دما

در طی زمان گرم شدن یک جریان حرارتی از سطح ورق به عمق آن، تولید می شود که منجر به افزایش دما در سطح زیرین ورق می گردد و نهایتاً انبساط حرارتی حاصل، به فشرده گی پلاستیکی ماده منجر می شود. از ضد خم به وسیله ماده سردی که دارای مدول الاستیکی بزرگ است، جلوگیری می شود. در طی سرد شدن، حرارت به سمت ماده پیرامون محیط مجاور منطقه حرارت دیده جریان می یابد. ماده در داخل محیط منطقه حرارت دیده نیز به علت گرم شدن میل دارد تا منبسط شود؛ اما این امر به واسطه ماده سرد پیرامون جلوگیری می شود. علاوه بر این مدول الاستیک سطح که تعیین کننده میزان زاویه خم به طرف پرتو لیزر است، اکنون مقدارش کمتر از زمان گرمایش است؛ زیرا حجم بزرگی از سطح مقطع، گرم شده و بنابراین مدول الاستیک در این ناحیه کمتر است (Edwardson, 2004) (غدیری، ۱۳۸۹). مکانیزم گرادیان دما، مکانیزم کمانش و مکانیزم کوتاه سازی، سه مکانیزم اصلی برای شکل دهی لیزری ورق ها، لوله ها و مقاطع اکستروژن می باشند. به طور کلی دو روش برای شکل دهی لوله ها مورد استفاده قرار گرفته است که شامل پویش محیطی و پویش دایروی می باشند. بررسی تحقیقات اخیر نشان می دهد که اکثر محققان به این نتیجه رسیده اند؛ که مکانیزم غالب در شکل دهی لوله ها در هر دو روش، مکانیزم کوتاه سازی است. شکل دهی لوله ها به مراتب پیچیده تر از شکل دهی ورق ها با لیزر و درعین حال زاویه خم به دست آمده ممکن است از لحاظ اقتصادی روشی غیرقابل توجیه در مقایسه با سایر روش های معمول باشد. بنابراین لازم است با بررسی دقیق این روش و تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته، جهت رفع موانع استفاده از این روش در صنعت تلاش بیشتری صورت گیرد. در ادامه پژوهش های انجام گرفته در زمینه شکل دهی لوله با لیزر، مورد بررسی قرار گرفته اند.

مروری بر مطالعات پیشین



در پژوهش هائو و لی جهت شناسایی روابط بین پارامترهای فرآیند شکل دهی لوله با لیزر، یک مدل تحلیلی برای توصیف زاویه خم ارائه شده است. مدل ارائه شده، توصیفی تحلیلی برای زاویه خم به عنوان تابع انرژی (توان لیزر، ضریب جذب، سرعت پویش)، هندسی (قطر لوله، ضخامت لوله و خواص مواد ضریب انبساط گرمایی، چگالی، ظرفیت گرمایی، مدول یانگ و تنش تسلیم می دهد. به منظور تأیید مدل نظری، زاویه خم تخمین زده شده توسط مدل ارائه شده، با استفاده از آزمایش های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است (Hao and Li, 2005).

ژانگ در سال ۲۰۰۶ تأثیر طرح های مختلف پویش بر زاویه خم لوله را با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش چهار طرح پویش جهت شکل دهی لوله پیشنهاد شده است. این چهار طرح شامل؛ پویش دایروی لوله با منبع پیوسته نقطه ای، صفوف منظم از نبض های ۸ پرتو لیزر با منبع خطی در جهت محور لوله، پویش محوری لوله با منبع خطی همراه با سیستم خنک- سازی توسط آب و بدون سیستم خنک سازی می باشند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آباکوس تأثیر پارامترهای مهم فرآیند در این چهار طرح مورد بررسی قرار گرفته است (Zhang, 2006).

بررسی پویش محوری و دایروی در شرایط پارامتری یکسان با توجه مقایسه پویش محوری و دایروی توسط ژانگ و همکاران، صفدر به این نکته اشاره کرده است که مقایسه صورت گرفته با هندسه غیر یکسان، انجام شده است. از آنجا که تنش های حرارتی در طول پویش لیزر به شدت به هندسه پرتو لیزر و جهت پویش وابسته هستند، از این رو نادیده گرفتن سهم هر کدام دشوار است. از این رو در این تحقیق با استفاده از نرم افزار انسیس ۹ به بررسی طرح های پویش محوری و دایروی با شرایط کاملاً یکسان پرداخته شده است. در این پژوهش تنها پویش محوری به دلیل پیاده سازی ساده تر، جهت بررسی صحت شبیه سازی، مورد آزمایش تجربی قرار گرفته است (Safdar et al, 2007).

اهداف و فرضیات پژوهش

شناسایی مقادیر بهینه توان لیزر، تعداد پاس لیزر و سرعت چرخش لوله بر روی زاویه خم شده به عنوان هدف اصلی پژوهش قرار گرفته است. همچنین رتبه بندی پارامترهای موثر بر زاویه خم در تعیین تاثیرگذارترین پارامتر بررسی شده است. در پژوهش حاضر فرض بر ثابت بودن انرژی لیزر در طول هر آزمایش است.

روش و ابزار تحقیق

در پژوهش حاضر با استفاده به شکل دهی لوله دوجداره فولادی-مسی پرداخته شده است. جهت انجام آزمایش های تجربی، ابتدا لوله فولاد ضد زنگ با ابعاد قطر بیرونی ۱۶ میلی متر و قطر داخلی ۱۴ میلی متر و لوله مسی با قطر بیرونی ۱۲ میلی متر و ضخامت ۰/۴ میلی متر تهیه شده اند. با توجه به اختلاف ابعادی موجود، لوله ها به راحتی درون یک دیگ قرار گرفته تا برای ایجاد یک لوله دوجداره آماده شوند.

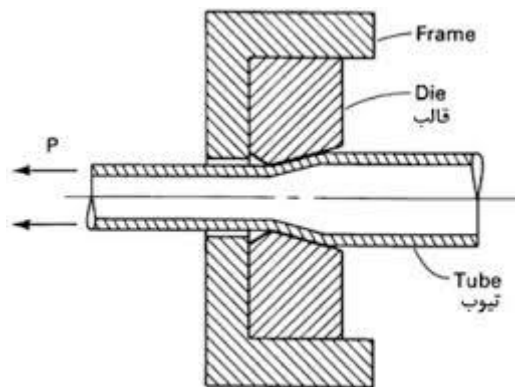
در ادامه با استفاده از فرآیند کشش لوله، این دو لوله با یکدیگر ادغام شده اند. در این راستا، پس از قرار دادن لوله ی مسی درون لوله فولادی، با استفاده از یک چکش ۱۰، یک سر دو لوله به یکدیگر متصل شده است؛ این مهم با لهیدگی دو لوله در یک سمت مشترک انجام شده است. با استفاده از یک عبور دو لوله ایجاد شده از یک قالب کشش، مطابق شکل ۵ این دو لوله به یکدیگر متصل شده اند. انجام تکرار پذیری در عبور لوله از قالب کشش، منجر به حصول اطمینان از ادغام دولوله فولادی-مسی شده است.

این فرآیند منجر به ایجاد یک لوله دوجداره با ضخامت ۱۵ میلی متر با ضخامت ۱/۳ میلی متر (۰/۹ میلی متر فولاد ضد زنگ به علاوه ۰/۴ میلی متر ضخامت مس) شده است که در انجام آزمایشات پژوهش حاضر استفاده می گردد.

⁸ - Pulse

⁹ - ANSYS, Inc.

¹⁰ Hammer



شکل ۵- شماتیک تهیه لوله دوجداره در قالب کشش لوله

در فعالیت‌های تجربی پژوهش حاضر برای کنترل دقیق پارامترها در حین فرآیند شکل دهی، لیزر اتومات Starrett با مدل HE350 استفاده شده است. ماشین مذکور با توجه به قابلیت‌ها و اجرای فرآیند لیزر، دارای صلاحیت مناسب برای انجام آزمایش‌های مرتبط با پژوهش حاضر می‌باشد.

در این پژوهش، فرآیند تجربی در ابتدا با استفاده از دستگاه لیزر Fiber انجام شده ک منجر به برش لوله دوجداره شد. از این رو، در ادامه ماشین از نوع پرتو دهی پالسی انتخاب شد تا منجر به برش لوله حین فرآیند نگردد.

در ابتدا برای تنظیم اولیه قطعه با استفاده از یک گیره به عنوان فیکسچر، مهار شده و با استفاده از ساعت اندیکاتور در جهات مختصاتی ساعت شده شده است. به منظور تنظیم پارامترهای ورودی فرآیند، فرکانس دستگاه چرخش با استفاده از یک نمایشگر در اعداد مورد نظر تنظیم شده است. این دستگاه نیازمند معادل سازی اعداد به منظور ایجاد واحد مشخصی برای پارامترها دارد؛ تقسیم بندی این اعداد بر اساس فرکانس قابل تنظیم روی دستگاه چرخش بوده است. برای مثال تنظیم عدد ۲۰ معادل با ۵ دور بر دقیقه می‌باشد.

برای اندازه گیری مقادیر زاویه خم، ابتدا باید نقطه‌ای را که بیشترین تغییرات را داشته پیدا کرده و مقدار آن تغییرات اندازه-گیری گردد. با استفاده از یک دستگاه تقسیم ۱۱ رومیزی نمونه ثابت شده است؛ سپس با استفاده از یک ساعت اندیکاتور لبه صاف لوله دوجداره با لبه میز یکسان سازی شده است. با دوران دستگاه تقسیم، نقطه‌ای که بیشترین تغییرات را داشته بررسی و علامت گذاری شده است.

سپس با استفاده از دستگاه مقیاس سنج نوری ۱۲ مقادیر زاویه خم لوله در بالاترین عدد (بیشترین خم) برای هر آزمایش اندازه گیری شده است.

نتایج

در جدول آنالیز واریانس ۱۳ محاسبات تحلیل واریانس به نحوی مرتب و سازماندهی می‌گردند که مجموع مربعات ۱۴ و میانگین مربعات ۱۵ هر یک از پارامترها در آن نشان داده می‌شوند. این جدول به دلیل محاسبات طولانی معمولاً توسط نرم‌افزارهای

¹¹ Indexing machine

¹² Optical comparators machine

¹³ Analysis of Variance Table

¹⁴ Sum of Square



آماري مانند SAS و Minitab ايجاد و محاسبه مي گردد. در جدول آناليز واريانس، هر پارامتر داراي درجه آزادي ۱۶ است كه برابر تعداد سطح آن پارامتر منهاي يك مي باشد.

براي بررسي معني دار بودن تفاوت سطح پارامترها، از آزمون آماري F استفاده مي شود. معني دار بودن سطوح پارامترها، ميزان تاثير گذاري هر متغير بر سطح پاسخ را بيان مي كند.

نسبت اثر به اغتشاش ۱۷ (S/N)، شاخص بسيار متداول در مهندسي برق است و واحد آن دسيبل ۱۸ مي باشد. اين شاخص اطلاعات بيش تري در مقايسه با ميانگين در اختيار محقق مي گذارد. زيرا، مقدار ميانگين و پراكندي نتايج را يك جا در خود جاي مي دهد. همواره بزرگترين مقدار S/N، بهترين پاسخ را در بين سطوح يك پارامتر مشخص مي نمايد و بدين ترتيب سطح بهينه هر پارامتر قابل تشخيص است (Taguchi et al, 2005). همچنين اختلاف بيش ترين و كم ترين مقدار S/N مربوط به سطوح يك پارامتر، ميزان تاثير گذاري آن پارامتر بر روي خروجي فرآيند را تعيين مي كند. هر چه اين اختلاف بيش تر باشد آن متغير در خروجي تاثير گذارتر است.

مقدار S/N از معادله ي زير حاصل مي شود كه در آن MSD ميانگين مربع اختلاف داده ها ۱۹ (X_i) از مقداري خاص (X_0) است. به عبارت ديگر MSD مقياسي براي پراكنش داده ها است (Taguchi et al, 2005).

$$S/N = -10 \log MSD$$

معادله ۱

$$MSD = \frac{(X_1 - X_0)^2 + (X_2 - X_0)^2 + \dots + (X_n - X_0)^2}{n}$$

معادله ۲

در ادامه نمودارهاي مربوط به نسبت اغتشاش (S/N)، جداول آناليز واريانس و S/N، تاثير هر پارامتر بر مقدار زاويه خم پاسخ ارائه شده است.

در شكل ۶ ميزان تاثير هر هريك از عوامل بر زاويه خم، با استفاده از نمودار S/N، نشان داده شده است. جدول ۱ با اشاره به ميزان اختلاف نسب هر پارامتر بر ميزان اغتشاش كل پارامترهاي مورد آمايش را رتبه بندي کرده است؛ به اين ترتيب و با مشاهده شكل ۶، بررسي شيب نمودارها (اختلاف نسبت هر پارامتر) نشان مي دهد كه بيشترين تاثير بر مقدار زاويه خم مربوط به پارامتر تعداد پاس ليزر و كمترين تاثير مربوط به سرعت چرخشي مي باشد.

مقدار بهينه ي زاويه خم مربوط به آمايش شماره ي ۷ با مقدار ۱/۲۲ درجه و با پارامترهاي، توان پرتو ليزر ۱۷۰ وات، تعداد ۲۰ پاس ليزر در فرآيند شكل دهی و سرعت چرخشي معادل ۲۰ به دست آمده است.

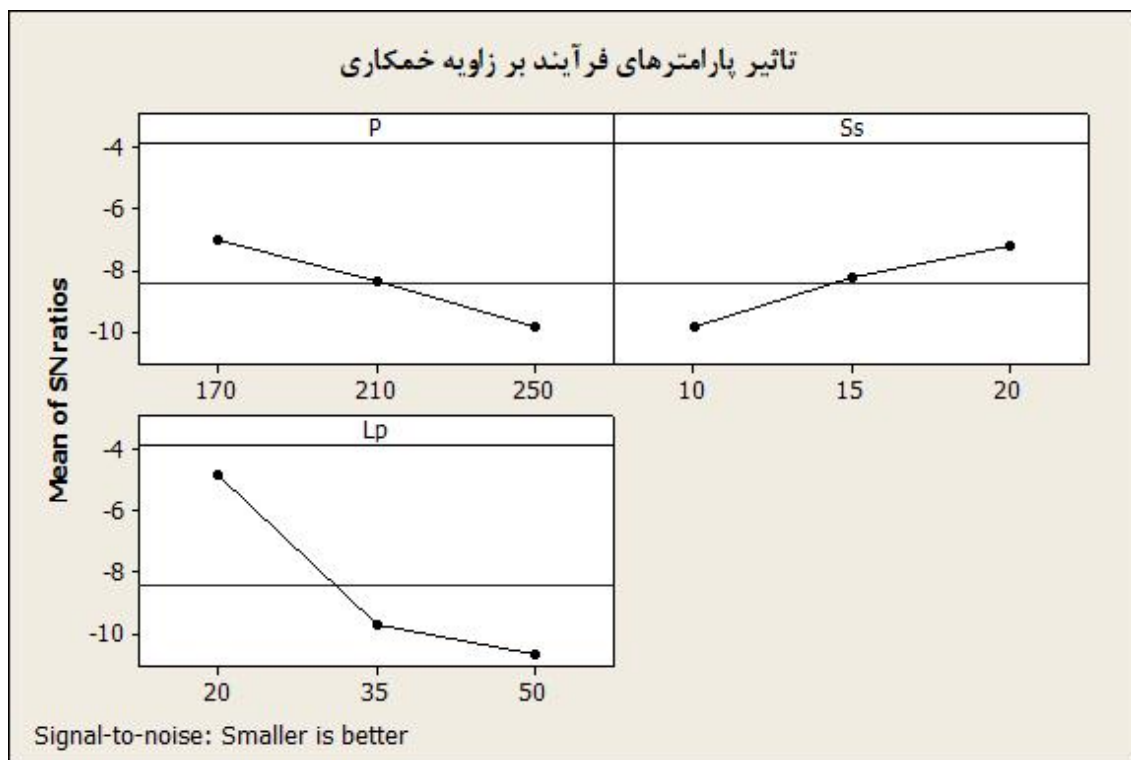
¹⁵ Mean of Square

¹⁶ Degree of Freedom

¹ The Signal to Noise Ratio

¹⁸ Decibel

¹⁹ Mean Square Displacement



شکل ۶- میزان تاثیر هریک از پارامترها بر زاویه خم در مقابل نرخ اغتشاش

جدول ۱- جدول S/N مربوط به میانگین زبری زاویه خم

Level	P	Ss	Lp
1	2.463	3.213	1.787
2	2.73	2.633	3.123
3	3.233	2.58	3.517
Delta	0.77	0.633	1.73
Rank	2	3	1

جدول نشان دهنده آنالیز واریانس پارامترها بر زاویه خم لوله دوجداره می باشد. با توجه به آماره F در جدول (جدول ANOVA) بیشترین تاثیر گذاری مربوط به تعداد پاس لیزر می باشد.



جدول ۲- آنالیز واریانس مرتبط با زاویه خم

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
P	2	0.9174	0.9174	0.4587	0.63	0.613
Ss	2	0.7404	0.7404	0.3702	0.51	0.662
Lp	2	4.9343	4.9343	2.4671	3.4	0.227
Error	2	1.4507	1.4507	0.7253		
Total	8	8.0427	8.0427			

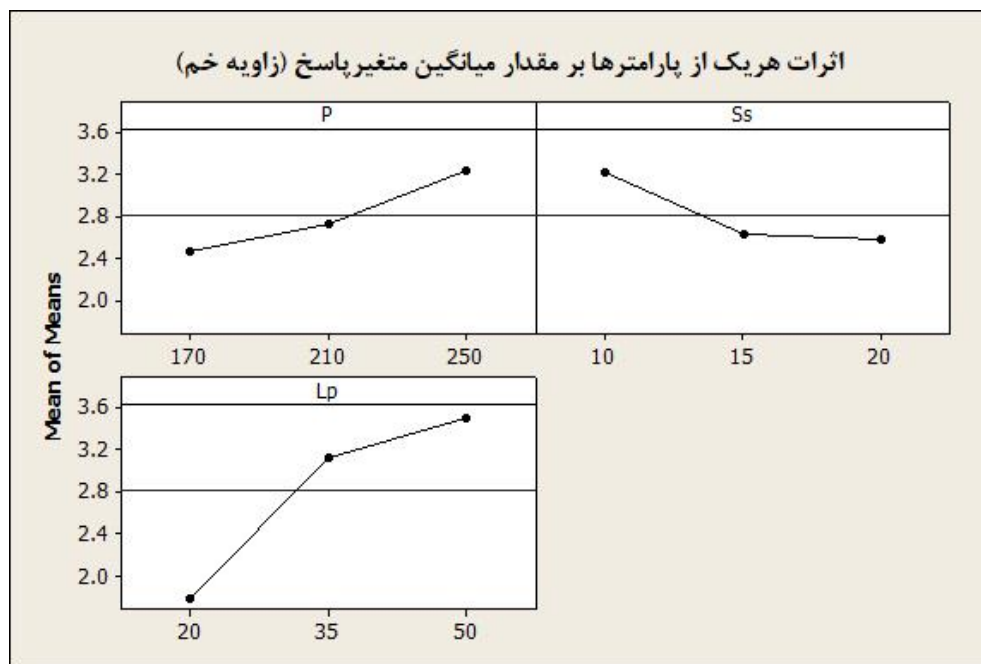
با توجه به مطالب ذکر شده در این بخش، معادله نشان دهنده رفتار هریک از پارامترها بر مقدار زاویه خم می باشد. در این معادله A زاویه خم (متغیر پاسخ)، P توان پرتو لیزر، Ss سرعت چرخش، Lp تعداد پاس لیزر می باشند.

معادله ۳

$$A = -0.28 + 0.00963 P - 0.0633 Ss + 0.0577 Lp$$

در بررسی شکل پیداست تمامی پارامترهای موجود در پژوهش حاضر دارای یک رابطه خطی با متغیر پاسخ (زاویه خم) در فرآیند شکل دهی لوله دوجداره فولادی-مسی دارند.

با بررسی شکل و ضرایب معادله رگرسیون بدست آمده مشخص است، روند تغییرات بر روی زاویه خم، در پارامترهای توان مصرفی و تعداد پاس لیزر رابطه مستقیم با متغیر پاسخ برقرار است و این مهم درباره سرعت چرخش رابطه معکوس را نشان می دهد. در نتیجه با افزایش سرعت چرخش و کاهش توان و تعداد پاس لیزر، مقدار زاویه خم کاهش می یابد. در ادامه و در شکل ۷ مقادیر تاثیر هریک از پارامترها بر روی زاویه خم، به صورت مجزا (بدون اثر برهم کنش پارامترها) نمایش داده شده است.



شکل ۷- اثر هریک از پارامترها بر مقدار میانگین متغیر پاسخ

نتیجه گیری و پیشنهاد

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر ارائه می گردد:

۱. در داده های آماری مشخص شد، تعداد پاس لیزر بیشترین تاثیر را بر روی مقدار زاویه خم لوله دوجداره دارد.
۲. در مقایسه با دیگر پارامترهای مورد ارزیابی، سرعت چرخشی کمترین تاثیر را بر زاویه خم دارد.
۳. با افزایش مقدار سرعت چرخشی زاویه خم کاهش می یابد. با افزایش تعداد پاس و پرتو لیزر، زاویه خم با رابطه ای خطی افزایش می یابد.

در این بخش پیشنهادهایی برای ادامه کار و بررسی مرتبط با این پژوهش در آینده ارائه شده است. پیشنهادها عبارتند از:

- مطالعه بهینه سازی دیگر پارامترهای فرآیند شکل دهی لوله دوجداره فولادی - مسی با استفاده از پرتو لیزر
- شبیه سازی عددی فرآیند شکل دهی لوله دوجداره
- بررسی تغییر جنس در لوله ای داخلی به منظور کاهش زاویه خم

غدیری. (۱۳۸۹). بررسی تجربی و تئوری شکل دهی ورق با استفاده از تکنولوژی پرتو لیزر، تهران: پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

- H. Shen and F. Vollertsen, "Modelling of laser forming – An review," *Compute. Mater. Sci.*, p. 834–840, 2009.
- J. Magee and L. J. De Vin, "Process planning for laser-assisted forming," *J. Mater. Process. Technol.*, p. 322–326, 2002.
- N. Hao and L. Li, "An analytical model for laser tube bending," *Appl. Surf. Sci.*, p. 432–436, 2003.
- H. S. Hsieh and J. Lin, "Study of the buckling mechanism in laser tube forming with axial preloads," *Opt. Laser Technol*, p. 402–409, 2005.
- J. Zhang, "Effects of Scanning Schemes on Laser Tube Bending," *J. Manuf. Sci. Eng.*, pp. 20-28, 2006.
- S. Safdar, L. Li and M. A. Sheikh, "Finite element simulation of laser tube bending: Effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution," *Opt. Laser Technol*, p. 101–110, 2007.
- W. Li and Y. L. Yao, "Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction," *J. Manuf. Sci. Eng.*, pp. 674-686, 2001.
- J. F. Ready, *Industrial applications of lasers*, LA: Academic Press, 1997.
- J. Magee, K. G. Watkins and W. M. Steen, "Advances in laser forming," *J. Laser Appl*, pp. 235-238, 1998.
- S. Edwardson, "A Study into the 2D and 3D Laser Forming of Metallic Components," PhD thesis, Laser Group Department of Engineering the University of Liverpool, UK., 2004.
- E. Abed, S. Edwardson and K. Bartkowiak, *Control method for 3d laser forming based on geometrical data*, NY: Laser Mater, 2007.
- G. Dearden and S. Edwardson, *Laser assisted forming for ship building*, VA: Williamsburg, 2003.
- G. Taguchi, S. Chowdhury and Y. Wu, "Introduction to the Signal-to-Noise Ratio," in *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, ASI Consulting Group, 2005.



Mohammad Khodadosti

Applied design of Abadan University of Petroleum Industry

Sadegh Mazrae

Master's student in Marine Structures Engineering, Abadan University of Petroleum Industry

Abstract

The use of double-walled pipes in important industries such as aerospace has special applications. Creating a proper bend related to the design process, the process requires. The use of a laser beam to form a double-walled steel-copper tube is very efficient. From this procedure, the study of forming a double-walled tube using a laser beam has been selected as the present study.

Initially, using a pipe drawing process, two steel (stainless steel) and copper pipes are joined. Then, using inferential statistics science, factor experiment is designed and experiments are designed using 9-array design by Taguchi method. The beam and the number of laser passes and the rotation speed as input are examined in the study of the bending angle of the tube. A pulsed laser beam device was used to perform the experimental steps. The rotating device was sampled and fabricated using a similar sample. Then the experiments were performed according to the design and the amount of angle was measured using an optical measuring device.

The results showed that the beam and the number of laser passes have a direct linear relationship with the bending angle. The point where the value of the bending angle is inversely related to the rotation. The lowest amount of bending is considered as the quality of managers' measurements. The minimum amount of bending was measured in Experiment 7 with a 170-watt laser beam at a speed of 20 (5 rpm) at 20 passes.

Keywords: Bending, double-layer pipe, laser, thermal gradient mechanism