

شبیه سازی عددی و استخراج مدل آماری بیانگر تأثیر قطر پرتو لیزر و ضخامت قطعه کار بر روی توزیع دما در جوشکاری با لیزر در آلیاژ تیتانیوم

حسین نوری* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران، hnoori@iausdj.ac.ir
بابک منافی مربی، گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اوج، آبیک، قزوین، ایران، b.manafi@ooj.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از لیزر در جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم، کاربردهای ویژه‌ای در صنایع با فناوری بالا دارد. هدف از این مطالعه، استخراج مدل آماری بیانگر تأثیر تغییرات قطر پرتو لیزر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار بر روی دمای جوشکاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V می‌باشد. جهت استخراج این مدل، ابتدا آزمایشات مورد نیاز توسط روش تاگوچی، طراحی گردیدند و سپس با استفاده از روش المان محدود، مورد ارزیابی قرار گرفتند. استفاده روش پاسخ سطح، جهت استخراج مدل آماری بر مبنای تغییرات قطر لیزر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار مورد استفاده قرار گرفته است. با آنالیز واریانس بر روی نتایج، خطای مدل آماری در محدوده قابل قبول ارزیابی گردید. بر اساس نتایج ارزیابی شده، فاصله در راستای ضخامت قطعه کار و قطر پرتو لیزر به ترتیب ۷۶/۶۷ و ۱۷/۹۷ درصد بر روی دمای جوشکاری تأثیر دارند و با افزایش قطر پرتو لیزر در صورت ثابت بودن توان جوشکاری، مقدار حرارت جوشکاری کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. جهت جوشکاری آلیاژ Ti6Al4V، بهترین محدوده جوشکاری قطر پرتو لیزر بین ۰/۲۴ و ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری با لیزر، آلیاژهای تیتانیوم، توزیع دما، روش المان محدود، روش پاسخ سطح.

Numerical simulation and extracting the statistical model indicating the effect of laser beam diameter and workpiece thickness on temperature distribution in laser welding in titanium alloy

H. Nouri
B. Manafi

Department of Mechanical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sannadaj, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Ooj Institute of Higher Education, Abyek, Qazvin, Iran.

Abstract

Nowadays, the use of lasers in welding titanium alloys has special applications in high-tech industries. This study aims to extract the statistical model showing the effect of changes in the diameter of laser beam diameter and distance in line thickness welding temperature. At first, For establishing this model, the required experiments were designed by the Taguchi method and then evaluated using the finite element method. The surface response method is used to extract the statistical model based on the variation of laser beam diameter and distance through the workpiece thickness. By the analysis of the variance, the statistical model error was evaluated in an acceptable range. According to the evaluated results, the influence percent of the distance along with the workpiece thickness and the laser beam diameter is 76.67 and 97 %, respectively, on the welding temperature. By increasing the diameter of the laser beam, the amount of the welding temperature is significantly reduced. For laser welding of Ti6Al4V, the best laser beam diameter is between 0.2 and 0.24mm.

Keywords: Laser welding, Titanium alloys, Temperature distribution, Finite element method, Response surface method.

ضخامت ۱ میلی‌متر انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که ریزساختار جوش شامل دانه‌های ستونی در مرز و دانه‌های محوری در مرکز جوش است. در مرز جوش گرادیان حرارتی بالاتر بوده و دانه‌ها در خلاف جهت انتقال گرما رشد می‌کنند. ترک انجمادی از عیوب جوش در Rene80 است که به دلیل حضور فازهای ترد و شکننده کاربیدهای MC در آلیاژهای Rene80 ریخته‌گری شده و همچنین تنش‌های حرارتی ایجاد می‌شود. می‌توان با افزایش پهنای زمانی ضربان و بسامد، همپوشانی ضربانها را افزایش داده که موجب کاهش شیب دمایی و در نتیجه کاهش تنش حرارتی وارده به جوش می‌شود. بنابراین با کنترل میزان تنش‌های حرارتی وارده به جوش می‌توان از ایجاد ترک انجمادی جلوگیری کرد. نتایج آزمون سختی نیز نشان داد که سختی در جوش بالاتر از فلز پایه بوده است و مقدار آن در عرض حوضچه به دلیل تغییر ریزساختار متفاوت است. جهانگرد و اکبری [۲]، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ را مورد بررسی

۱- مقدمه

جوشکاری و برشکاری با استفاده از اشعه لیزر روش‌های نوینی می‌باشند که در دهه‌های اخیر به خاطر کیفیت، سرعت و قابلیت کنترل آن به‌طور وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند جوشکاری با لیزر به‌وسیله متمرکز کردن اشعه لیزر روی فلز، یک حوضچه مذاب تشکیل می‌شود و عملیات صورت می‌پذیرد. جهت بررسی بهتر این روش نوین، ابتدا به مهم‌ترین و جدیدترین تحقیقات در ایران پیرامون بحث جوشکاری با لیزر پرداخته می‌شود. اردکانی و همکارانش [۱] در پژوهشی، متغیرهای مناسب جوشکاری لیزر YAG:Nd ضربانی بر روی آلیاژ Rene80 را به دست آوردند. از این‌رو با استفاده از دستگاه جوشکاری لیزر YAG:Nd با توان ۹۰ وات تحقیقاتی بر روی اثر متغیرهای پهنای زمانی ضربان، بسامد و سرعت جوشکاری بر نمونه‌های آلیاژ Rene80 ریخته‌گری شده به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hnoori@iausdj.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۱

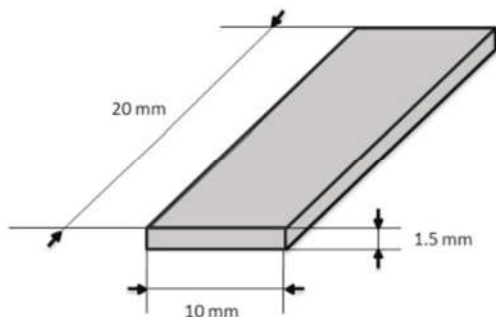
قراردادند. بدین منظور از روش جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG استفاده شد. توان دستگاه مورد استفاده ۹۰ وات بود. ریزساختار فلز جوش با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین سختی نمونه‌ها به روش میکرو سختی بررسی شد. بیشترین سختی، مربوط به ناحیه فلز جوش و برابر با ۲۷۰ ویکرز بود. در نهایت پارامتر بهینه برای جوشکاری همجنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به روش جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG شامل: ولتاژ ۴۳۰ ولت، فرکانس ۵ هرتز، پهنای زمانی ضربان ۴ میلی‌ثانیه و سرعت ۱۵ دور بر دقیقه به دست آمد. راسخ صالح و همکارش [۳] در تحقیقی، به بررسی پارامترهای جوشکاری برای اتصال آلیاژ تیتانیوم با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر با استفاده از لیزر پالس دار Nd:YAG از طریق مرور کار تجربی پرداختند. در این تحقیق مشخص گردید که نسبت بین انرژی پالس و مدت پالس، مهم‌ترین پارامتر در تعیین عمق نفوذ است. هدف این پروژه، دستیابی به جوش‌های قابل اطمینان با حداقل شکستگی و انحراف برای تولید اجزای صنعتی بوده است. با استفاده از لیزر CO و لیزر پالس دار Nd:YAG چندین تکنیک مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌ها، محقق شد که با استفاده از لیزر موج پیوسته، یک جوش رضایت‌بخش حاصل می‌شود. این نوع تکنیک جوشکاری لیزر، به علت دقت و توانایی پردازش سریع، می‌تواند مزیت قابل توجهی برای جوشکاری آلیاژهای تیتانیوم را فراهم کند. برای وضعیت پالس جوشکاری لیزر Nd:YAG، شکل پالس، انرژی، مدت، سرعت تکرار و حداکثر توان، مهم‌ترین پارامترهایی هستند که مستقیماً کیفیت جوش‌های پیوسته پالس دار را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

در پژوهش دیگری [۴]، اتصال ورق‌های تیتانیوم شبه پایدار بتا Ti-15-3 به روش جوشکاری لیزر انجام گردید. تأثیر پارامترهای جوشکاری شامل توان پرتو لیزر و سرعت جوشکاری بر ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که انتخاب توان پرتو لیزر و سرعت جوشکاری بر روی سطح ماکروسکوپی شکست و همچنین ذوب ناقص تأثیر گذار هستند، همچنین اتخاذ توان‌های کمتر از توان اسمی لیزر مورد استفاده، منجر به ایجاد ناپایداری در منطقه جوش می‌گردد و علاوه بر ایجاد عدم یکنواختی در خط جوش، منجر به ذوب ناقص در برخی مناطق می‌گردد.

بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری با لیزر بر روی سوپرآلیاژهای خاص مانند هاستلوی C-276 [۵]، زیرکونیم [۶]، اینکونل [۷] و نایمونیک [۷] نیز در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. هرچند می‌بایست اشاره کرد که با گسترش صنعت پلیمرها، جوشکاری با لیزر بر روی پلیمرها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی [۹] تأثیر پارامترهای فرآیند (توان، محل قرار گرفتن کانون، قطر پرتو، سارعت حرکت پرتو) در جوشکاری لیزر دو ترموپلاستیک پلی‌کربنات و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) انجام گردید. از روش طراحی آزمایشات، جهت کاهش تعداد آزمایشات استفاده شد. نتایج آزمون کشش، نشان دادند که با افزایش توان، ابتدا استحکام افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارتی مهم‌ترین دستاورد این تحقیق، این موضوع می‌باشد که در فرآیند جوشکاری با لیزر، توان لیزر در جوشکاری هر آلیاژ، یک محدوده بهینه را از خود نشان می‌دهد. در خارج کشور نیز تحقیقات گسترده‌ای به ثمر رسیده است.

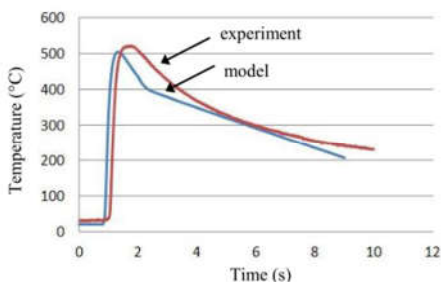
سجورگن و همکارانش [۱۰] جوشکاری لیزر بر روی تیتانیوم در دندانپزشکی را مورد بررسی قرار دادند. ۴۰ میله تیتانیومی (۸ عدد از آلیاژ ASTM B 348 grade 1 و ۳۲ عدد از آلیاژ ASTM B 348 grade 2) با استفاده از متغیرهای جوشکاری غیر همجنس جوش داده شدند. آن‌ها در این تحقیق، مقاومت کششی و درصد ازدیاد طول را مورد بررسی قرار دادند. هنیبل و همکارانش [۱۱]، دما و جریان ماده را در حین جوشکاری با لیزر، در حالت نفوذ کامل شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نتایج عملی را با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دادند و نتایج نشان داد که جریان فلز دلیل اصلی برای سطح مقطع ساعت شنی پروفیل جوش است. بگر و همکارانش [۱۲] پروسه‌های جوشکاری هیبریدی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها جوشکاری با لیزر Nd:YAGd یا CO₂ را نیز مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با بررسی جامع بیان کردند که به صورت عمومی، جوشکاری با لیزر CO₂ بر روی مواد با بازتاب بسیار بالا مانند آلومینیوم، مس و طلا بسیار دشوار و تقریباً غیرممکن است و نیاز است تا این خلأ به صورت ویژه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. آکمن و همکارانش [۱۳] بر روی پارامترهای جوشکاری با لیزر برای اتصال یک ورق آلیاژ تیتانیومی با ضخامت ۳ میلی‌متر کار کردند. در تحقیق آن‌ها مشخص شد که نسبت انرژی پالس و زمان پالس مهم‌ترین پارامتر در تعریف عمق نفوذ است. همچنین این مشخص شد که تغییرات زمان پالس و توان پیک ثابت، تأثیری بر روی قطر نفوذ ندارد. اکبری و همکارانش [۱۴] به صورت تجربی و عددی جوشکاری لیزر آلیاژ تیتانیوم را برای مدل‌سازی توزیع دما جهت پیش‌بینی ناحیه تحت تأثیر حرارت، عمق و عرض حوضچه مذاب انجام دادند. آن‌ها دما را به‌عنوان تابعی از فاصله در سرعت‌های مختلف جوشکاری پیش‌بینی کردند و متوجه شدند که در هر سرعت جوشکاری، پروفیل دما به صورت شدیدی در نقاط نزدیک به مرکز لیزر کاهش می‌یابد و سپس کاهش کمی در نقاط دور از مرکز لیزر دارد. کاسالینو و همکارانش [۱۵]، شبیه‌سازی المان محدود انتقال گرما در فرآیند جوشکاری با لیزر را بر روی آلیاژ تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از نرم‌افزار Ansys استفاده کردند. آن‌ها توزیع دما در حین پروسه دمایی و تغییر فاز را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه بین نتایج عملی و شبیه‌سازی نشان داد که ابزار المان محدود ابزار مناسبی برای بررسی این فرآیند است و دقت مناسبی را در این زمینه دارد. برخارت و همکارانش [۱۶] نشان دادند که اتصال غیر همجنس TNM-Ti6242 با کمک جوشکاری با لیزر و پیش حرارت ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه بدون ترک با وجود خواص ترموفیزیکی مختلف مورد استفاده شده، امکان‌پذیر است. آن‌ها خواص میکرو ساختاری اتصالات را با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که ریزساختار ماده با افزایش حرارت پیش گرم، دانه‌درشت تر می‌شود.

بر طبق تحقیقات گذشته، مشاهده می‌شود که تاکنون پژوهشی در زمینه ارائه یک مدل آماری که بتواند به صورت موثری ارتباط قطر پرتو لیزر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار را بر روی توزیع دما در حین جوشکاری قطعه آلیاژ تیتانیومی صورت بیان کند، انجام نپذیرفته است. از همین رو در این پژوهش، ابتدا فرآیند جوشکاری با لیزر بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V توسط نرم‌افزار Comsol شبیه‌سازی شده است. این نرم‌افزار به‌خوبی می‌تواند مسائل چند فازی مورد تحلیل قرار دهد. از روش تاگوچی جهت طراحی آزمایشات بهره برده شده است.



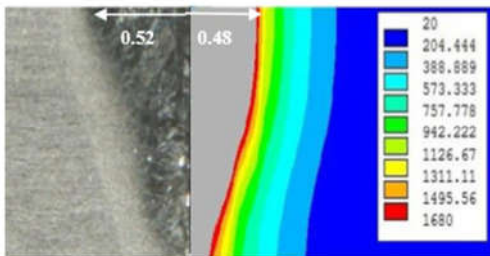
شکل ۱- قطعه مورد آزمایش [۱۵]

دمای جوشکاری، توسط آرایه‌ای از ترموکوپل‌ها اندازه‌گیری گردید و در بیشترین حالت، مقدار آن در حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس گزارش شده است. نمودار مقایسه بین دما و زمان در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار دما- زمان در فرآیند جوشکاری [۱۵]

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در زمان اول جوشکاری، دما به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد، این افزایش ناگهانی به عبارتی آغاز جوشکاری است که در ادامه آن شروع به کاهش می‌کند. این قله دمایی در زمان ۲ ثانیه اول اتفاق می‌افتد. مقدار بیشینه دما در حالت جوشکاری به صورت عملی برابر با ۵۱۰ درجه سلسیوس که در تبدیل به کلوین برابر با ۷۸۳ کلوین است. مدل‌سازی تجربی و نمونه تست‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مدل‌سازی تجربی و نمونه تست‌شده در کنار یکدیگر [۱۵]

جهت انجام آزمایشات، از روش طراحی آزمایشات بر مبنای روش تاگوچی بهره گرفته شد، با توجه به اینکه پارامترهای ورودی مورد بررسی در فرآیند، قطر پرتو لیزر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار

محدوده تغییرات قطر پرتو لیزر بر مبنای آزمایشات عملی مقادیر بین ۰/۲ و ۰/۶ میلی‌متر بوده است. همچنین فاصله عمودی در راستای ضخامت قطعه کار، در محدوده صفر تا ۱/۵ میلی‌متر بررسی شده است. سپس با استفاده از روش آنالیز واریانس، نتایج مورد ارزیابی دقیق قرار گرفتند تا درصد و چگونگی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی دمای جوشکاری مورد ارزیابی قرار گیرد. مدل آماری برای پیش‌بینی تغییرات دما در راستای ضخامت قطعه کار برحسب قطر پرتو لیزر ارائه گردیده است. برای استخراج این مدل آماری از روش پاسخ سطح استفاده شده است. هدف نهایی از انجام این پژوهش، بررسی رابطه بین پارامترهای قطر پرتو لیزر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار در فرآیند جوشکاری آلیاژ تیتانیوم بر روی توزیع دما در قطعه کار است که در این پژوهش نحوه تاثیر، درصد تاثیر و مدل آماری بیانگر تغییرات پارامترهای ورودی بر روی دمای جوشکاری ارائه گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

فرآیند جوشکاری لیزر بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V به صورت اتصال لب‌به‌لب با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر انجام گردیده است [۱۵]. مشخصات شیمیایی آلیاژ موردنظر در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ تیتانیوم [۱۵]

	c	Fe	N2	O2	Al	V	H2	Ti
Ti6Al4V	0.08	0.25	0.05	0.2	5.5	3.5	0.0375	balance

علاوه بر آزمایش عملی، مسئله به صورت عددی نیز تحلیل شده است که در محاسبات، خواص ترموفیزیکی ماده به صورت ایزوتروپیک تعریف شده است. لیزر مورد استفاده در آزمایش تجربی Ytterbium است. بیشترین قدرت خروجی آن در حدود ۴ کیلووات است و منبع لیزر توسط فیبرهایی با قطر ۲۰۰ میکرومتر انتقال پیدا کرده است. پرتو لیزر با طول موج ۱۰۷۰/۶ نانومتر توسط عدسی با فاصله کانونی ۲۵۰ میلی‌متر متمرکز می‌شود که در نهایت یک ناحیه با قطر ۰/۴ میلی‌متر بر روی سطح قطعه کار ایجاد می‌کند. در سرعت‌های جوشکاری مختلف، فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. اما در این پژوهش یکی از سرعت‌ها مدنظر خواهد بود و آن سرعت ۳۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه است. می‌توان نشان داد که در سرعت بالاتر جوشکاری، عمق نفوذ کاهش می‌یابد، زیرا زمان کمتری برای نفوذ شار به داخل قطعه وجود دارد. با توجه به این‌که در این پژوهش فقط نفوذ حرارت در قطعه مدنظر بوده است در یک سرعت ماشین‌کاری ثابت فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. آرگون نیز به عنوان گاز محافظ به کاررفته است. قطعه موردنظر برای آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر تعریف شده بر مبنای آزمایش عملی [۱۵] انجام شده است. پارامترهای لیزر قابل تغییر نمی‌باشند و بر مبنای نوع دستگاه به کاربرده شده، تعریف می‌شوند. اگرچه می‌بایست مدنظر داشت که فاصله کانونی در اکثر دستگاه‌های لیزر قابل تغییر است. در فاصله کانونی ۲۵۰ میلی‌متر با توجه به طول موج لیزر به کاربرده شده، می‌توان قطر پرتو لیزر را به ۰/۴ میلی‌متر رساند. با تغییر فاصله کانونی این قطر تغییر می‌کند.

می باشند، برای هر متغیر، ۳ سطح تغییرات در نظر گرفته شد که در جدول ۲ نشان داده شده است و بر مبنای روش تاگوچی، آرایه L9 برای طراحی آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا از نرم افزار آماری 4- Qualitek استفاده گردید. سپس، روش آنالیز واریانس [۱۷ و ۱۸] بر روی نتایج جهت ارزیابی چگونگی تاثیر پارامترهای فرآیند بر روی خروجی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- پارامترهای ورودی فرآیند و مراحل تغییرات آن ها

پارامترهای فرآیند	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم
قطر پرتو لیزر (mm)	۰/۲	۰/۴	۰/۶
فاصله در راستای ضخامت قطعه کار (mm)	۰	۰/۵	۱

۳- مدل سازی آماری انرژی حرارتی

جریان فلز مایع در حوضچه مذاب از رابطه (۱) قابل استخراج است [۱۹ و ۲۰].

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_j \quad (1)$$

که در آن ρ ، چگالی، t زمان، x_i فاصله i ام در راستای قائم، u_j سرعت در راستای j و μ لزجت مؤثر می باشد. در این رابطه S_j از رابطه (۲) به دست می آید.

$$S_j = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - C \left(\frac{(1-f_L)^2}{f_L^3 + B} \right) u_j + \rho g \beta (T - T_{ref}) - \rho U \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن p فشار، U سرعت جوشکاری و β ضریب انبساط حجمی می باشد. جمله سوم معادله (۲) بیانگر اتلاف اصطکاکی در منطقه قارچی شکل بر اساس معادله Carman-Kozeny می باشد. که در آن، f_L کسر مایع، B ضریب محاسباتی بسیار کوچکی برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر می باشد و C ثابت محاسباتی برای مرفولوژی منطقه قارچی شکل است. چهارمین جمله، عبارت منبع شناوری است. جمله آخر معادله بیانگر حرکت نسبی بین منبع لیزر و قطعه کار است. جهت شناسایی سطح جامد-مایع در حوضچه جوش، مقدار کل آنتالپی (H)، برابر می شود با مجموع گرمای قابل اندازه گیری (h) و گرمای نهان (ΔH) می باشد. گرمای نهان برابر می شود با:

$$\Delta H = f_L L \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، L گرمای نهان همجوشی است. کسر مایع f_L به گونه ای تعریف می شود تا برای ساده تر کردن معادلات حاکم بر مسئله، رابطه خطی با دما داشته باشد. [۲۱]

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_L \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & T_L \gg T \gg T_S \\ 0 & T < T_S \end{cases} \quad (4)$$

با به کار بردن مفهوم آنتالپی که مجموع گرمای قابل اندازه گیری (h) و گرمای نهان می شود. معادله (۵) قابل دستیابی است.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (5)$$

که بیانگر انرژی گرمایی منتقل شده در قطعه جوشکاری شده می باشد. در رابطه (۵) k برابر با رسانایی گرمایی می باشد. جمله منبع S_h از رابطه (۶) قابل دستیابی می باشد.

$$S_h = -\rho \frac{\partial (\Delta H)}{\partial t} - \rho \frac{\partial (u_i \Delta H)}{\partial x_i} - \rho U \frac{\partial h}{\partial x_i} - \rho U \frac{\partial \Delta H}{\partial x_i} \quad (6)$$

مقدار انرژی گرمایی انتقال داده شده در قطعه جوشکاری شده به صورت کامل برای قطعه، توسط روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه است.

۳-۱- روش انجام شبیه سازی

به منظور تحلیل عددی، مسئله مذکور از نرم افزار Comsol استفاده گردیده است. ابتدا در شبیه سازی عددی، هندسه قطعه کار می بایست تعریف گردد. در مسئله مورد نظر، به خوبی می توان جهت بالا بردن دقت در شبیه سازی، از مدل دوبعدی استفاده کرد. که علاوه بر تعداد المان های کمتر، خطای حاصل از شبیه سازی به خوبی کاهش می یابد. دلیل استفاده از مدل دوبعدی این است که اولاً دقت مسئله بالاتر برده می شود، زیرا در حالت سه بعدی مسئله برای حل رایانه ای دشوارتر است و اما دلیل دوم که دلیل اصلی حل مسئله به صورت دوبعدی است، این می باشد که در این پژوهش، تغییرات و توزیع دما در راستای ضخامت ماده مدنظر است و نیازی نیست که مدل در راستای سه بعد بررسی گردد و فقط مقطع ماده می تواند مورد تحلیل قرار گیرد.

بر طبق آزمایش های تجربی، مدل دوبعدی قطعه، یک مستطیل با عرض و طول ۱،۵ میلی متر و ۲۰ میلی متر است. همچنین یک قسمت از بالای جسم به صورت جداگانه تعریف شده است که شار گرمایی در آن قسمت تعریف می شود. طول این قسمت برابر با قطر پرتو لیزر است. با توجه به اینکه قطر پرتو لیزر می بایست بر روی قطعه کار تعریف گردد تا آن ناحیه را بتوان مورد انرژی تابشی قرارداد، می بایست یک ناحیه بر روی قطعه مختص آن تعریف گردد. این ناحیه خطی با ضخامت قطر پرتوی لیزر است. با توجه به اینکه سرعت جوشکاری ثابت است و مسئله در حالت دوبعدی می گردد، می توان در یک ناحیه ثابت، شار گرمایی لیزر را اعمال کرد. سپس تعریف شرایط مرزی حائز اهمیت است. پیرامون قطعه با هوا در تماس است. بنابراین دمای اولیه قطعه همان دمای اتاق است. در ناحیه ای که پرتو لیزر تابیده می شود بر طبق پارامترهای پیش تر توضیح داده شده، شار گرمایی تعریف می شود تا انرژی تابشی لیزر به قطعه در حین جوشکاری منتقل گردد.

سپس نوع و خواص ماده می بایست تعریف گردد که بر طبق تحقیق پیش رو، آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V است. خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر در جدول ۳ نشان داده شده است. قبل از تحلیل نهایی مسئله، آزمون حساسیت مش انجام می گردد. آزمون حساسیت مش به این صورت طراحی گردیده است تا تعداد المان های ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ عدد بررسی گردد. در پایان مشاهده شده است که دمای بیشینه قطعه در شبیه سازی از عدد ۷۸۳ کلون پس از تعداد

اینکه برحسب یک تابع چندجمله‌ای بیان می‌شود می‌تواند در معادلات پیچیده به کار رود که البته برای شروع از چندجمله‌ای درجه دوم مانند رابطه (۷) استفاده می‌شود که اگر دقت مدل‌سازی آماری مناسب باشد، آن کفایت می‌کند اما اگر دقت مناسبی حاصل نشود از درجات بالاتر چندجمله‌ای استفاده می‌شود. در مدل‌سازی آماری ابتدا از چندجمله‌ای درجه دوم استفاده شده است. در رابطه (۷)، Y پاسخ، X_i و X_m متغیرهای مسئله و دیگر متغیرها ضرایب خطی و غیرخطی معادله می‌باشند.

$$Y = b_0 + \sum_{i=0}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k b_{im} X_i X_m + \sum_{i=0}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k b_{im} X_i X_m X_k + \varepsilon \quad (7)$$

برای استخراج معادله آماری به صورت زیر عمل می‌شود:

- ابتدا با استفاده از نمودارهای دما-فاصله عرضی در قطعه در حال جوشکاری به ازای قطرهای مختلف لیزر، مقادیر دما و فاصله در راستای ضخامت قطعه استخراج می‌گردد.
- سپس این مقادیر نرم‌افزار Mathematica می‌شود و معادله (۷) بر روی اطلاعات اعمال می‌شود و در نهایت ضرایب معادله توسط نرم‌افزار ارائه و معادله نهایی ساخته می‌شود.
- در پایان، معادله نهایی مورد آزمایش قرار می‌گیرد تا مقدار خطای آن در پیشگویی عددی مورد بررسی قرار گیرد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی

مطابق با اطلاعات برگرفته از آزمایش عملی [۱۵]، فرآیند به صورت دویعدی شبیه‌سازی شده است. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که توزیع دما در قطعه چگونه است. در شکل ۵ فقط ناحیه متأثر از گرما نشان داده شده است. به صورت تقریبی می‌توان ذکر کرد که طول ناحیه متأثر از گرما در حدود ۲ میلی‌متر است. که این ناحیه کوچک، خود حاکی از مزایای این نوع روش جوشکاری است.

نمودار توزیع دما در راستای عرضی قطعه در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمودار توزیع دما به صورت کاهشی است. بیشترین دما در محل جوشکاری است. با حرکت به سمت پایین در راستای ضخامت قطعه کار، مشاهده می‌شود که دما کاهش می‌یابد. این کاهش یافتن به صورت خطی نیست. البته این موضوع از معادلات انتقال گرما کاملاً مشخص است. لازم به ذکر است که واحد محور افقی برحسب متر است و در نرم‌افزار Comsol محاسبات دمایی همواره بر اساس کلونین محاسبه می‌شود.

المان ۶۰۰۰ عدد تجاوز نکرده است و ثابت مانده است. بنابراین برای صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی تعداد المان برای تحلیل عددی مسئله در حالت دویعدی ۶۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده است.

۳-۲- روش سطح پاسخ

متدولوژی سطح پاسخ^۱ یک مجموعه از فن‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در این‌گونه طرح‌ها بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است. [۲۲]

در اصل این روش برای مدل پاسخ‌های تجربی توسعه داده شده است و سپس به سمت مدل کردن آزمایش‌های عددی سوق پیدا کرده است. یک جنبه مهم آن، طراحی آزمایش‌ها^۲ است. استراتژی در اصل برای برازش مدل‌های آزمایشی توسعه داده شد اما می‌تواند برای آزمایش‌های عددی نیز به کار رود.

جدول ۳- خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V^۳

۳۴۹	سختی ویکرز
۴/۴۲ g/cc	چگالی
۶۲۰ MPa	مقاومت کششی در دمای ۴۲۷°C
۹۵۰ MPa	مقاومت کششی نهایی
۸۸۰ MPa	تنش تسلیم کششی
۱۴ درصد	افزایش طول در شکست
۲۵ درصد	کاهش سطح مقطع
۱۱۳/۸ GPa	مدول الاستیسیته
۹۷۰ MPa	تنش تسلیم فشاری
۰/۳۴۲	ضریب پواسون
۰/۵۲۶۳ J/g-°C	ظرفیت گرمایی ویژه
۶/۷۰ W/m-K	رسانایی گرمایی
۱۶۶۰-۱۶۰۴ °C	نقطه ذوب
۱۶۰۴ °C	دمای جامد
۱۶۶۰ °C	دمای مایع

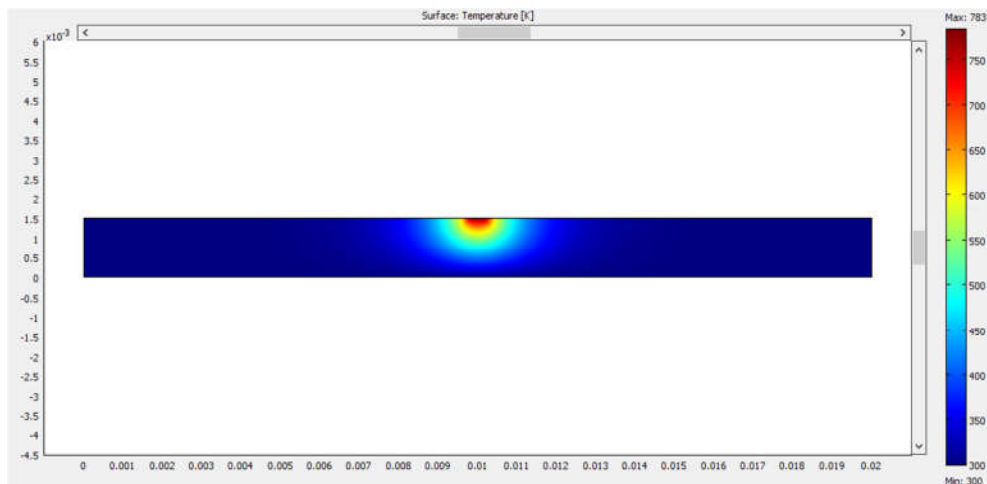
در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Mathematica از روش پاسخ سطح استفاده گردیده است و یک معادله ریاضی استخراج شده است که می‌تواند تغییرات دما در حین جوشکاری در راستای ضخامت را به خوبی پیش‌بینی کند. برای این منظور از رابطه (۷) برای استخراج معادله نهایی استفاده شده است. [۲۳]

معادله موردنظر معادله عمومی برای روش پاسخ سطح است که در آن یک رابطه چندجمله‌ای بیان می‌شود که تابع و ضرایب آن بر آن اساس تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که این تخمین به علت

^۱Response Surface Methodology

^۲ Design of Experiment

^۳ www.matweb.com

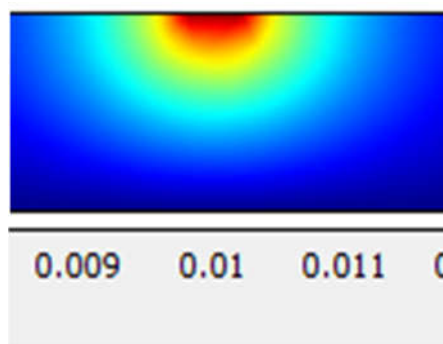


شکل ۴- قطعه مورد شبیه‌سازی برای اعتبارسنجی

است.

جدول ۴- نتایج عملی و شبیه‌سازی عددی

درصد خطا	عددی	عملی	
۰/۰۸	۷۸۳	۷۸۳/۱۵	بیشینه دمای جوشکاری

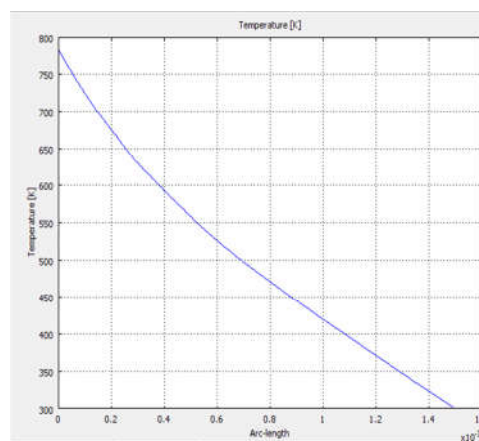


شکل ۵- ناحیه متأثر از گرما

۲-۴- شبیه‌سازی‌ها

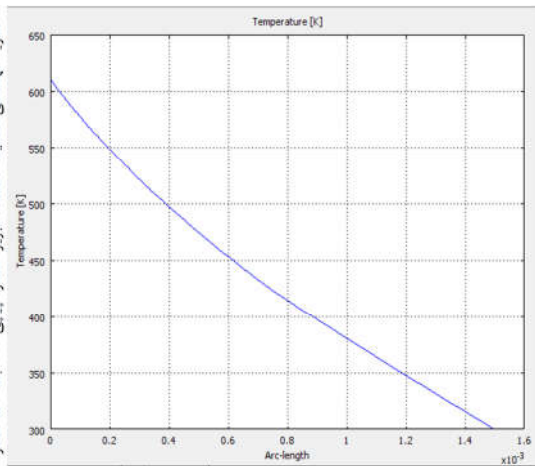
چنانچه پیش‌تر ذکر شد، شبیه‌سازی در سه قطر مختلف لیزر بررسی شد. در این شبیه‌سازی‌ها، خروجی فرآیند توزیع دما در قطعه در حین جوشکاری است. شبیه‌سازی با قطر لیزر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ انجام شده است.

توزیع دما در قطعه در راستای ضخامت در حالت جوشکاری با قطر لیزر ۰/۲ میلی‌متر در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با حرکت در راستای ضخامت قطعه، دما کاهش می‌یابد و در پایان به عدد دمای اتاق می‌رسد. این خود نشان می‌دهد که در قطعه با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر، منطقه متأثر از گرما به قدری کوچک است که در فاصله ۱/۵ میلی‌متری از منطقه جوشکاری عملاً حرارت متأثر از جوشکاری وجود ندارد و دمای قطعه همان دمای اتاق است. در ناحیه ابتدایی جوش، در حدود ۰/۴ میلی‌متر در راستای ضخامت، مقدار تغییرات دما، به صورت منحنی است. اما از فاصله ۰/۴ میلی‌متر به بعد، تقریباً کاهش دما به صورت خطی اتفاق می‌افتد.

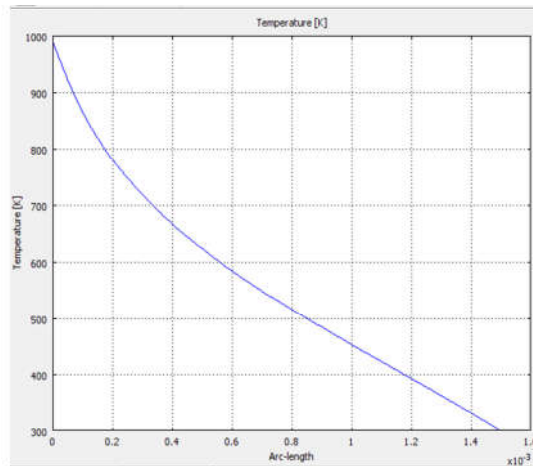


شکل ۶- نمودار توزیع دما در راستای ضخامت قطعه

حال به بررسی نتایج عملی با المان محدود پرداخته می‌شود. در نتایج عملی [۱۵]، مقدار دمای بیشینه جوشکاری ۵۱۰ درجه ذکر شده است که معادل ۷۸۳/۱۵ کلوین است. در نتایج شبیه‌سازی نیز مقدار بیشینه دمای جوشکاری ۷۸۳ درجه کلوین مشاهده شده است. اختلاف نتایج بسیار ناچیز است. مقایسه نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار درصد خطای شبیه‌سازی در محدوده ۰/۰۸ درصد بیان شده



شکل ۸- نمودار تغییرات دما در راستای قطعه کار جوشکاری شده با قطر پرتو ۰/۶



شکل ۷- توزیع دما در قطعه در حال جوشکاری با قطر لیزر ۰/۲ میلی‌متر

در شکل ۸ می‌توان نکته بسیار مهمی را مشاهده کرد. با مقایسه نمودار تغییرات دما برحسب جابه‌جایی در راستای ضخامت بین قطرهای لیزر مختلف مشاهده می‌شود که هرچه پهناي قطر پرتو لیزر بزرگ‌تر باشد، کاهش دما در راستای ضخامت قطعه به‌صورت خطی‌تر است. این نتیجه‌گیری مهمی است زیرا به شناخت رفتار تابع منجر می‌شود و در زمانی که مدل آماری پیش‌بینی کننده برای جوشکاری با لیزر در آلیاژ تیتانیوم استخراج شود، باید مدل آماری نیز از این رفتارها در واقعیت پیروی کند.

در اینجا می‌توان بررسی نمود که دمای قطعه در حالتی که یک میلی‌متر در راستای ضخامت فاصله دارد برابر با ۳۷۹ کلوین است که بسیار کمتر از حالت‌های دیگر است. به راحتی می‌توان مشاهده کرد که با توجه به نمودار تنها در فاصله ۰/۱ میلی‌متری از ضخامت تغییرات غیرخطی است. که در فاصله ۰/۱ میلی‌متری مقدار دمای قطعه برابر با ۵۷۵ کلوین است. یعنی تغییرات غیرخطی بین ۶۱۰ الی ۵۷۵ کلوین است.

به صورت کلی نتایج طراحی آزمایشات در جدول ۵ بیان شده است. بر روی نتایج طراحی آزمایشات، با استفاده از نرم افزار Qualitek 4، آنالیز واریانس صورت گرفت و نتایج در جدول ۶ بیان شد. به صورت کلی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش قطر پرتو لیزر، دمای حاصل از جوشکاری کاهش پیدا می‌کند. چنانچه از نتایج آنالیز واریانس مشاهده می‌شود، این تاثیر در حدود ۷۶ درصد است. درصد تاثیر پارامتر فاصله در راستای ضخامت نیز در حدود ۱۸ درصد و به صورت کاهشی بر روی دمای جوشکاری گزارش شده است. در جدول آنالیز واریانس مشاهده می‌شود که خطا در حدود ۶ درصد می‌باشد که بسیار مناسب است.

جدول ۴- نتایج آزمایشات طراحی شده بر مبنای روش تاگوچی

شماره آزمایش	قطر لیزر	فاصله در راستای عمودی قطعه کار	دما
۱	۰/۲	۰	۹۹۰
۲	۰/۲	۰/۵	۶۲۴/۴۹
۳	۰/۲	۱	۴۴۴
۴	۰/۴	۰	۷۸۳/۱۵

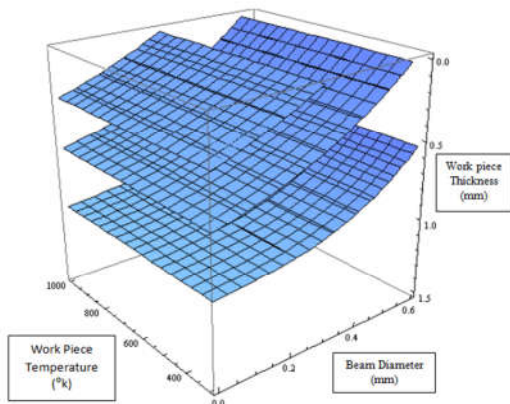
در تحلیل نمودار، به فاصله ۰/۴ میلی‌متر در راستای ضخامت اشاره شد، که تا آن نقطه تغییرات دما به‌صورت تابعی درجه دوم است. اما از آن نقطه به بعد تغییرات به‌صورت خطی می‌شود. در عمق ۰/۴۲ میلی‌متر، دمای جوشکاری برابر با ۶۵۵ کلوین است. در اصل، محدوده تغییرات غیرخطی دما بین ۹۹۰ کلوین الی ۶۵۵ کلوین است و پس‌از آن دما به‌صورت خطی کاهش می‌یابد و از دمای ۶۵۵ کلوین به دمای ۳۰۰ کلوین می‌رسد. لازم به ذکر است که در عمق ۱ میلی‌متر دما برابر با ۴۴۴ کلوین است.

این مقدار می‌تواند با حالت جوشکاری در قطر ۰/۴ میلی‌متر مقایسه شود که پیش‌تر به‌عنوان مدل برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است.

در حالت جوشکاری با قطر لیزر ۰/۴ میلی‌متر، دما در فاصله ۱ میلی‌متری از سطح قطعه کار برابر با ۴۲۲ کلوین بوده است. به عبارتی کاملاً مشخص است که عمق نفوذ جوش و دما رابطه تنگاتنگی با قطر لیزر در جوشکاری دارد. هرچه قطر لیزر کوچک‌تر باشد، مقدار دمای جوشکاری بالاتر است، زیرا انرژی متمرکزتر است. اما باید در نظر داشت که کوچک بودن قطر پرتو لیزر مزایای زیادی از جمله کوچک‌تر بودن ناحیه متأثر از گرما را دارد.

شکل ۸، نمودار تغییرات دما در راستای ضخامت قطعه کار در حال جوشکاری با قطر ۰/۶ لیزر نشان داده شده است. بیشینه دمای جوشکاری در قطعه تولیدی در این حالت برابر است با ۶۱۰ کلوین.

• در آزمون عملی در حالت قطر لیزر ۰/۴ میلی‌متر، مقدار بیشینه دمای جوشکاری ۷۸۳/۱۵ کلوین به‌دست‌آمده است. درحالی‌که با استفاده از مدل آماری این مقدار برابر با ۷۷۶/۶۳ کلوین است. به عبارتی مقدار خطای مدل آماری برابر با حدود ۰/۸ درصد است که مشاهده می‌شود که مقدار خطای مدلسازی بسیار کم است و معادله تقریب بسیار عالی را از مسئله می‌دهد. در این مسئله تابع به‌دست‌آمده دارای بیشترین خطای ممکن ۳/۴ درصد است. در مسائل عمومی خطای زیر ۱۰ درصد قابل‌قبول است. اما برای مدلسازی آماری می‌بایست دقت بیشتری مدنظر باشد که در این پژوهش تابع دارای دقت مناسبی در نقاط موردبررسی است.



شکل ۹- نمودار رویه سطح پاسخ به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی دما در قطعه کار از جنس آلیاژ تیتانیوم در حین جوشکاری

در شکل ۹ نمودار رویه سطح پاسخ موردنظر رسم شده است. محور عمودی فاصله عمودی در راستای ضخامت قطعه کار است. به‌خوبی نمودار نشان می‌دهد که بازه مدل آماری در چه محدوده‌هایی است. نقاط نمودار شامل نقاطی می‌باشند که مدل آماری در بین بازه عملیاتی برای جوشکاری آلیاژ تیتانیوم پیش‌بینی کرده است. از نمودار به‌خوبی تأثیرات پارامترها را می‌توان استخراج کرد. با حرکت در راستای ضخامت قطعه کار، دما کاهش می‌یابد. با کاهش قطر پرتو لیزر دمای اولیه بسیار بیشتر است.

در شکل ۱۰، کانتور مدل آماری رویه سطح پاسخ رسم شده است. محور عمودی ضخامت قطعه کار و محور افقی بیانگر تغییرات پیوسته قطر پرتو لیزر می‌باشد. مشاهده می‌شود که با کاهش قطر پرتو لیزر از محدوده ۰/۳۸ میلی‌متر در حالی که فاصله در راستای عمودی قطعه کار کمتر از ۰/۲ میلی‌متر می‌باشد، در این محدوده مقدار دمای جوشکاری به بالای ۸۰۰ کلوین می‌رسد.

۵	۰/۴	۰/۵	۵۶۱/۰۱
۶	۰/۴	۱	۴۲۲
۷	۰/۶	۰	۶۱۰
۸	۰/۶	۰/۵	۴۷۴/۵
۹	۰/۶	۱	۳۷۹

جدول ۶- نتایج آنالیز واریانس

درجات آزادی	قطر پرتو لیزر	فاصله در راستای ضخامت قطعه کار	خطا	مجموع
۲	۲	۲	۴	۸
۵۹۰۰۸/۲۱۱	۲۲۱۱۷۲/۶۷۵	۱۱۴۲	۲۸۱۳۲۲/۸۸۶	
۲۹۵۰۴/۱۰۵	۱۱۰۵۸۶/۳۳۷	۲۸۵/۵		
۱۰۲/۳۴	۳۸۷/۳۴			
۵۰۵۵۶/۰۹۵	۲۱۵۷۲۰/۵۶۲			
۱۷/۹۷	۷۶/۶۸	۵/۳۵		۱۰۰
نسبت F				
مجموع مربعات				
مجموع خالص				
درصد تاثیر				

۳-۴- استخراج معادله آماری

در استخراج معادله آماری، عامل بسیار مهم دقت آن در پیش‌بینی نتایج است. در این مرحله، اگر نتایج مناسب نباشند، درجات بالاتری برای مدل آماری پیش‌بینی کننده در نظر گرفته می‌شوند. همواره در ابتدا برای کاهش حجم محاسبات و همچنین ضرایب مدل آماری از مدل چندجمله‌ای درجه‌ده استفاده می‌شود. برای به دست آوردن مدل آماری کد زیر در نرم‌افزار Mathematica وارد می‌شود. ابتدا اطلاعات نقاط نمودارها در قالب دستور داده وارد می‌شود. سپس مدل موردنظر با دستور Fit به دست می‌آید.

$$\text{fitnessfunction} = \text{Fit}[\text{data}, \{1, d, d^2, y, y^2, d*y\}, \{d, y\}] \quad (8)$$

درنهایت رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$\text{Temp} = 1057.15 - 645.416 d - 125.273 d^2 - 735.996 y + 577.001 d y + 134.832 y^2 \quad (9)$$

درنهایت رابطه موردنظر ساخته شده است.

در رابطه (۹) نظر دمای توزیع شده در قطعه (Temp) برحسب کلوین نشان داده شده است برحسب پارامترهای ورودی قطر لیزر (d) برحسب میلی‌متر و فاصله در راستای ضخامت قطعه کار (y) برحسب میلی‌متر.

۴-۴- اعتبارسنجی مدل آماری

برای اعتبارسنجی برخی نقاط با فرمول توزیع دمای آن‌ها حساب شده است و مقدار خطای مدلسازی ارزیابی شده است. در مقایسه نتایج آزمون عملی با مدل آماری :

¹ Fit

در صورت ثابت بودن توان جوشکاری، مقدار گرمای جوشکاری کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

- در جوشکاری با قطر پرتو لیزر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ میلی‌متر، بیشینه دمای تولیدشده در حین جوشکاری به ترتیب برابر بوده است با: ۷۸۳، ۹۹۰ و ۶۱۰ کلوین. عملاً می‌توان ذکر کرد که با افزایش مقدار قطر پرتو لیزر، از جایی به بعد انجام عمل جوشکاری غیرممکن است.
- معادله آماری با دقت بسیار بالایی می‌تواند دمای حاصل از جوشکاری را برحسب قطر پرتو لیزر و فاصله عرضی آن به دست آورد. فاصله در راستای ضخامت قطعه کار و قطر پرتو لیزر به ترتیب ۷۶/۶۷ و ۱۷/۹۷ درصد بر روی دمای جوشکاری تاثیر دارند
- لازم به ذکر است که نمودارهای تغییرات دما در راستای ضخامت قطعه کار به‌خوبی نشان دادند که نمودار به دو قسمت تغییرات غیرخطی و خطی تقسیم می‌شوند. تغییرات غیرخطی عموماً در نواحی که بارنگ قرمز و زرد نشان داده‌شده است صورت می‌گیرد. در جوشکاری با لیزر تقریباً این ناحیه در حدود کمتر از ۰/۴ میلی‌متر بوده است که عمق نفوذ جوش را نشان می‌دهد. پس‌از آن تغییرات دما و کاهش آن به‌صورت خطی اتفاق افتاده است. شبیه‌سازی‌ها به‌خوبی نشان دادند که ناحیه متأثر از گرما در این فرآیند بسیار کوچک‌تر از فرآیندهای متداول دیگر است که این موضوع خود دقت بالای فرآیند جوشکاری با لیزر را در برابر دیگر فرآیندهای متداول نشان می‌دهد و به‌خوبی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که چرا این نوع جوشکاری برای کارهای حساس و با دقت بسیار موردتوجه است.

• در قطعه‌ای که ضخامت آن ۱/۵ میلی‌متر است، در حین جوشکاری با لیزر در زیر قطعه، دمای قطعه برابر با دمای اتاق است و این موضوع بیانگر کوچک بودن ناحیه متأثر از حرارت است. عمق نفوذ جوش به‌خوبی در شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌شده است.

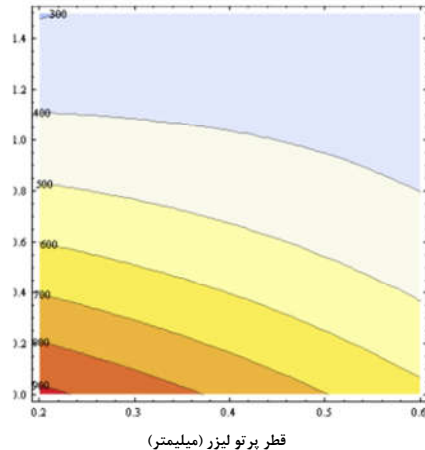
- در آزمون عملی در حالت قطر لیزر ۰/۴ میلی‌متر، مقدار بیشینه دمای جوشکاری ۷۸۳/۱۵ کلوین به‌دست‌آمده است. درحالی‌که با استفاده از مدل آماری این مقدار برابر با ۷۷۶/۶۳ کلوین است. به عبارتی مقدار خطای مدل آماری برابر با حدود ۸ درصد است.
- قطر پرتو لیزر در این فرآیند جهت جوشکاری آلیاژ Ti6Al4V نمی‌تواند بیشتر از ۰/۳۸ میلی‌متر باشد. همچنین بهترین محدوده جوشکاری قطر پرتو لیزر بین ۰/۲۴ و ۰/۲ می‌باشد.

پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، معادله آماری پیش‌بینی‌کننده دمای جوشکاری در قطعات تیتانیومی برحسب تغییرات توان و زمان جوشکاری نیز به دست آید. لازم به ذکر است که در آن صورت معادله آماری می‌تواند استخراج شود که به‌صورت جامع به مهندسان در تنظیم پارامترهای جوشکاری کمک کند. زیرا جوشکاری با لیزر بر روی آلیاژ تیتانیوم بسیار متداول است و از این‌رو کمک بسیار بزرگی به صنعت می‌شود. زیرا تنها با داشتن متغیرهای موردنظر و استفاده از یک ماشین حساب می‌توان از مدل آماری با خطای کمتر از ۵ درصد استفاده کرد تا فرآیند جوشکاری را بهینه‌سازی کرد.

۶- مراجع

- [1] Akhri A. H., Microstructural and Mechanical Properties of 80 Rene Alloy Connection Using YAG: Nd Laser Welding, Journal of Elite Science and Engineering, 2017.

فاصله در راستای ضخامت قطعه کار (میلیمتر)



شکل ۱۰- کانتور سطح پاسخ به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی دما در قطعه کار از جنس آلیاژ تیتانیوم در حین جوشکاری با تغییرات قطر پرتو لیزر و فاصله در راستای عمودی قطعه کار

در ادامه بهینه‌سازی بر روی نتایج انجام پذیرفت و برای جوشکاری آلیاژ تیتانیوم مورد نظر مشاهده می‌شود که با توجه به اینکه برای جوشکاری بهینه به دمای بالایی احتیاج می‌باشد، قطر پرتو نمی‌تواند بیشتر از ۰/۳۸ میلی‌متر باشد (ناحیه نارنجی در نمودار کانتور شکل ۱۰) زیرا دمای جوشکاری برای آلیاژ مورد نظر مناسب نمی‌باشد. همچنین بهترین محدوده جوشکاری قطر پرتو لیزر بین ۰/۲۴ و ۰/۲ می‌باشد، زیرا دمای جوشکاری در این محدوده به بالای ۹۰۰ کلوین می‌رسد و بر طبق آزمایشات عملی [۱۵] محدوده بسیار مناسبی می‌باشد.

به صورت کلی می‌بایست ذکر کرد که در پژوهش‌های مشابه [۲۴]، مشاهده گردیده است که با افزایش توان و پهنای پالس جوش، به دلیل همپوشانی پالس‌ها و حرارت خروجی ابعاد هندسه جوش از جمله پهنای و عمق جوش افزایش می‌یابد. این موضوع در این تحقیق نیز با افزایش حرارت جوشکاری به واسطه افزایش پهنای پرتو لیزر مشاهده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

به‌صورت کلی در این پژوهش نتایج زیر ارائه گردید.

- شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری آلیاژ تیتانیوم با استفاده از نرم‌افزار Comsol و روش المان محدود انجام گرفت و نتایج با آزمایش‌های عملی مقایسه گردید. اختلاف نتایج بسیار اندک بود و شبیه‌سازی با روش المان محدود تقریب بسیار قابل قبولی را در مقایسه با آزمایش عملی ارائه داد. در بیان نتایج می‌توان متذکر شد که در آزمایش عملی مقدار دمای بیشینه جوشکاری در حدود ۵۱۰ درجه سلسیوس بوده است که معادل ۷۸۳/۱۵ کلوین است درحالی‌که در شبیه‌سازی جوشکاری نیز مقدار ۷۸۳ کلوین حاصل شده است.
- با استفاده از قطر لیزرهای مختلف و ثابت بودن توان جوشکاری شبیه‌سازی‌های مختلفی با استفاده از روش المان محدود صورت پذیرفت. قطرهای مختلف لیزر شبیه‌سازی‌شده عبارت بوده است از: ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ میلی‌متر. مشاهده شد که با افزایش قطر پرتو لیزر

- [20] Patankar S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (New York: Hemisphere), 1980.
- [21] Zhang W., Kim C. H., DebRoy T., J. Appl. Phys. 95 5210-19, 2004.
- [۲۲] قریشی م.، ذوالفقاری م. و طهماسبی و. استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، مدل سازی و بهینه سازی آماری پارامترهای مؤثر در رفتار نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۲، از صفحه ۲۲۹ تا صفحه ۲۳۷، ۱۳۹۷.
- [23] Saeidi M., Manafi B., Besharati G. M., Faraji G., Mathematical modeling and optimization of friction stir welding process parameters in AA5083 and AA7075 aluminum alloy joints, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 230(7), 1284-1294, 2016.
- [۲۴] کیانی، پژمان، قریشی، مجید. مقایسه متالورژیکی و مکانیکی جوشکاری لیزر Nd:YAG فولادهای زنگ نزن آستنیتی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹؛ ۱۵۰(۱): ۱۸۹-۱۹۸. doi: 10.22034/jmeut.2020.9849۱۹۸-۱۸۹
- [2] Jahangard H., Study of microstructure and mechanical properties of 316l stainless steel alloy connection by multiplayer Nd: YAG laser welding method, in: the first international conference on the application of engineering sciences in the development and progress of Iran 1404, Mashhad, Saj Gostar Caspian Company, 2017.
- [3] Rasekh S. N., Experimental study of the effect of different parameters of titanium alloy sheet coating on penetration depth and welding quality, in: First National Congress on Application of Materials and Advanced Manufacturing in Industries, Tehran, Iran University of Science and Technology, 2017.
- [۴] اصفهانی ی. و.، تاثیر حرارت ورودی بر ساختار و خواص مکانیکی ورق های تیتانیوم بتا Ti-15-3 متصل شده توسط فرآیند جوشکاری لیزر، بیستمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی و نهمین کنفرانس ملی آزمایش های غیرمخرب، شهرکرد، ایران، ۱۳۹۲.
- [۵] نوروزی لرکی ع.، رنجبر خ.، صدرالسادات م. و رفیعی م.، تاثیر مدت پالس بر خواص اتصال فلز جوش هاستلوی C-276 به روش جوشکاری لیزر پالسی، هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، تهران، ۱۳۹۸.
- [۶] نوروزی لرکی ع.، رنجبر خ.، صدرالسادات م. و رفیعی م.، تاثیر مدت پالس بر خواص اتصال فلز جوش زیرکونیم ۷۰۲ به روش جوشکاری لیزر پالسی، هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، تهران، ۱۳۹۸.
- [۷] رستم آبادی ع.، و اکبری موسوی ع.، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش غیرهمجنس لیزر ضربانی Nd:YAG نسوپرآلیاژهای اینکونل ۷۱۸ و نایمونیگ ۹۰۱ نهمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران و چهاردهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، ۱۳۹۹.
- [۸] شیوانی ح. و اکبری موسوی ع.، بررسی ریزساختاری و مکانیکی اتصال غیرهمجنس اینکونل ۷۱۸ به فولاد زنگ نزن ۳۲۱ با روش لیزر ضربانی Nd:YAG، هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، تهران، ۱۳۹۸.
- [۹] باجلان س. و راسخ صالح ن.، بررسی تجربی پارامترهای جوشکاری لیزر بر استحکام جوش لبه روی هم نمونه های پلی کربنات (PC) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، چهارمین کنگره بین المللی مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، تهران، ۱۳۹۹.
- [10] Sjögren G., Andersson M., Bergman M., Laser welding of titanium in dentistry, Acta Odontologica Scandinavica, 46(4), 247-253, 1988.
- [11] Du H., Hu L., Liu J., Hu X., A study on the metal flow in full penetration laser beam welding for titanium alloy, Computational Materials Science, 29(4), 419-427, 2004.
- [12] Bagger C., Olsen F. O., Review of laser hybrid welding, Journal of Laser Applications, 2005.
- [13] Akman E., Demir A., Canel T., Sınmazçelik T., Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, Journal of materials processing technology, 209(8), 3705-3713, 2009.
- [14] Akbari M., Saedodin S., Toghraie D., Shoja-Razavi R., Kowsari F., Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy, Optics & Laser Technology, 59, 52-59, 2014.
- [15] Casalino G., Mortello M., Contuzzi N., Minutolo F., Finite element model for laser welding of titanium, Procedia CIRP, 33, 434-439, 2015.
- [16] Burkhardt I., Ventzke V., Riekehr S., Kashaev N., Enz J., Laser welding and microstructural characterization of dissimilar γ -TiAl-Ti6242 joints, Intermetallics, 104, 74-83, 2019.
- [17] Moradi, M., & Golchin, E., Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization. Latin American Journal of Solids and Structures, 14(3), 464-484., 2017.
- [18] Abdollahi, H., Mahdavejad, R., Ghambari, M., & Moradi, M., Investigation of green properties of iron/jet-milled grey cast iron compacts by response surface method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 228(4), 493-503., 2014.
- [19] Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N., Transport Phenomena (New York: Wiley), 1960.