

مدلسازی فازی ضخامت لایه در فرایند لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی و بهینه‌سازی آن با الگوریتم

اجتماع ذرات

مجید آذرگمان^۱، ابوالفضل فورگی نژاد^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، foorginejad@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۹

چکیده

امروزه آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی همچون استحکام بالا، چگالی کم نسبت به فولاد، مقاومت عالی در برابر خوردگی و قابلیت جوشکاری بالا در صنعت مورد توجه قرار گرفته است. یکی از کاربردهای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V که منجر به بهبود خواص مکانیکی قطعات فولادی می‌گردد، استفاده از آن در فرایند لایه‌نشانی است. در مقاله حاضر از منطق فازی برای مدلسازی فرایند لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی و از الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی آن استفاده شده است. پارامترهای دور و زمان به عنوان پارامترهای ورودی فرایند و ضخامت لایه به وجود آمده به عنوان پارامتر هدف در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل فازی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان از قابلیت مناسب مدل فازی پیشنهادی در پیش‌بینی ضخامت لایه نشانده شده دارد. همچنین نتایج نشان از توانایی الگوریتم اجتماع ذرات در بهینه‌سازی ضخامت لایه در فرایند لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی دارد.

واژگان کلیدی: لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی، آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، منطق فازی، الگوریتم اجتماع ذرات، بهینه‌سازی

۱. مقدمه

استفاده می‌شود [۲]. هدف این روش اصلاح کیفیت و خواص سطح است. برای ایجاد تغییرات مطلوب می‌توان از روش‌های شیمیایی یا فیزیکی استفاده کرد یا تغییرات را با پاشش یک فیلم نازک از ماده روی سطح فلز پایه ایجاد نمود [۳]. لایه‌نشانی با استفاده از لیزر پالسی (PLD) روشی برای ایجاد لایه روی ماده پایه فولادی محسوب می‌شود. در این روش، بخار حاوی یون‌ها و الکترون به عنوان یک توده پلاسما توسط لیزر تولید و بر قطعه لایه‌نشانی می‌شود و انرژی لیزر عامل اصلی ایجاد آن می‌باشد

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی از قبیل صنایع دریایی، پتروشیمی و حوزه انرژی استفاده می‌شود. از خواص مناسب آن می‌توان به نسبت استحکام به وزن و مقاومت زیاد در برابر خوردگی اشاره کرد [۱]. در سال‌های اخیر، روش لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. از این روش برای ایجاد پوشش کامپوزیتی که دارای ویژگی‌های فوق‌العاده تریبولوژیکی همچون سختی بالا، ساختار مناسب و نرخ خنک‌کاری بالاست

[۴]. فشار گاز پس‌زمینه و درجه حرارت ماده پایه متغیرهایی هستند که اجازه می‌دهند خواص لایه دچار تغییر شوند [۵]. کلهپوریا و همکاران (۲۰۱۶) نیز روی رسوب‌دهی اکسید تنگستن بر بستر فلزی با در نظر گرفتن پارامترهای درجه حرارت فلز پایه، فشار جزئی اکسیژن و نفوذ انرژی پرتو لیزر، تغییرات خواص فیزیکی را مورد بررسی قرار دادند [۶]. نتایج حاصل توسط میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داد که زبری و کشیدگی به‌وجود آمده در فیلم به درجه حرارت فلز بستر در طول رسوب بستگی دارد. کو و همکاران (۲۰۰۵) فرایند لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی اکسید روی را با استفاده از شبکه عصبی پایه شعاعی و شبکه عصبی چندلایه پرسپترون مدلسازی نمودند [۷]. نتایج به‌دست آمده از مدل آنها قابلیت بهینه‌سازی فرایند تولید نیمه‌هادی‌ها را داراست. یان یانگ و همکاران (۲۰۱۶) ترکیب مدلسازی و مطالعه تجربی برای لایه‌نشانی اتمی با استفاده از تری‌متال آلومینیوم به‌عنوان فلز پایه و آب به‌عنوان منبع اکسیژن‌ساز را انجام دادند [۸]. نتایج عددی افزایش تولید آلومینا و کاهش دورریز تری‌متال آلومینیوم را نشان می‌داد. از جمله مواردی که بر کیفیت و عملکرد لایه نشانده‌شده تأثیر مستقیم دارد، ضخامت لایه نشانده‌شده است. بنابراین پیش‌بینی ضخامت این لایه و رسیدن به وضعیت بهینه با توجه به پارامترهای ورودی فرایند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا یکی از اهداف پژوهش‌های کاربردی می‌تواند تعیین پارامترهای ورودی برای رسیدن به مقادیر بهینه باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در این مقاله که مدل فرایند لایه‌نشانی لیزر به‌همراه آسیاب مکانیکی ایجاد خواهد شد، سرعت دوران آسیاب (غربال) که پودر کاربید تیتانیوم را روی سطح قطعه پایه می‌باشد و زمان دوران آسیاب پارامترهای ورودی و ضخامت لایه نشانده‌شده پارامتر خروجی محسوب می‌شود.

بررسی منابع کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که فعالیت‌های چندانی در زمینه مدلسازی فرایند لایه‌نشانی و بهینه‌سازی آن توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام نشده است و عموماً مواردی هم که به بهینه‌سازی فرایند پرداخته‌اند سطوح بهینه پارامترهای فرایند را مشخص ننموده و در پی روش‌هایی برای انجام بهینه فرایند بوده‌اند. در این پژوهش، نظر به اهمیت مدلسازی و بهینه‌سازی فرایند لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی از

منطق فازی برای مدلسازی فرایند و از الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی آن استفاده شده است.

۲-۱. لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی

در سال‌های اخیر روش لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی به‌عنوان یکی از فناوری‌های معمول، برای لایه‌نشانی روی گستره وسیعی از مواد نو، که در کاربردهای نسل آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پدیدار شده است [۹]. به‌طور کلی لایه‌نشانی را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد:

۱. لایه‌نشانی با کاربرد تزئینی؛ شامل صنعت شیشه، اسباب‌بازی، صنایع چوب و دکوراسیون، آینه و شمعدان، قطعات وابسته و ماشین‌آلات، پوشاک، جواهرآلات و جز این‌ها

۲. لایه‌نشانی با کاربردهای صنعتی؛ شامل صنایع خودروسازی و مکانیک، صنایع اپتیک‌لیزر، صنعت برق، صنایع تولیدات ابزار، صنعت قالب‌سازی و بسیاری از صنایع دیگر

اصل لایه‌نشانی به دو صورت فیزیکی و شیمیایی انجام می‌گیرد. روش شیمیایی شامل:

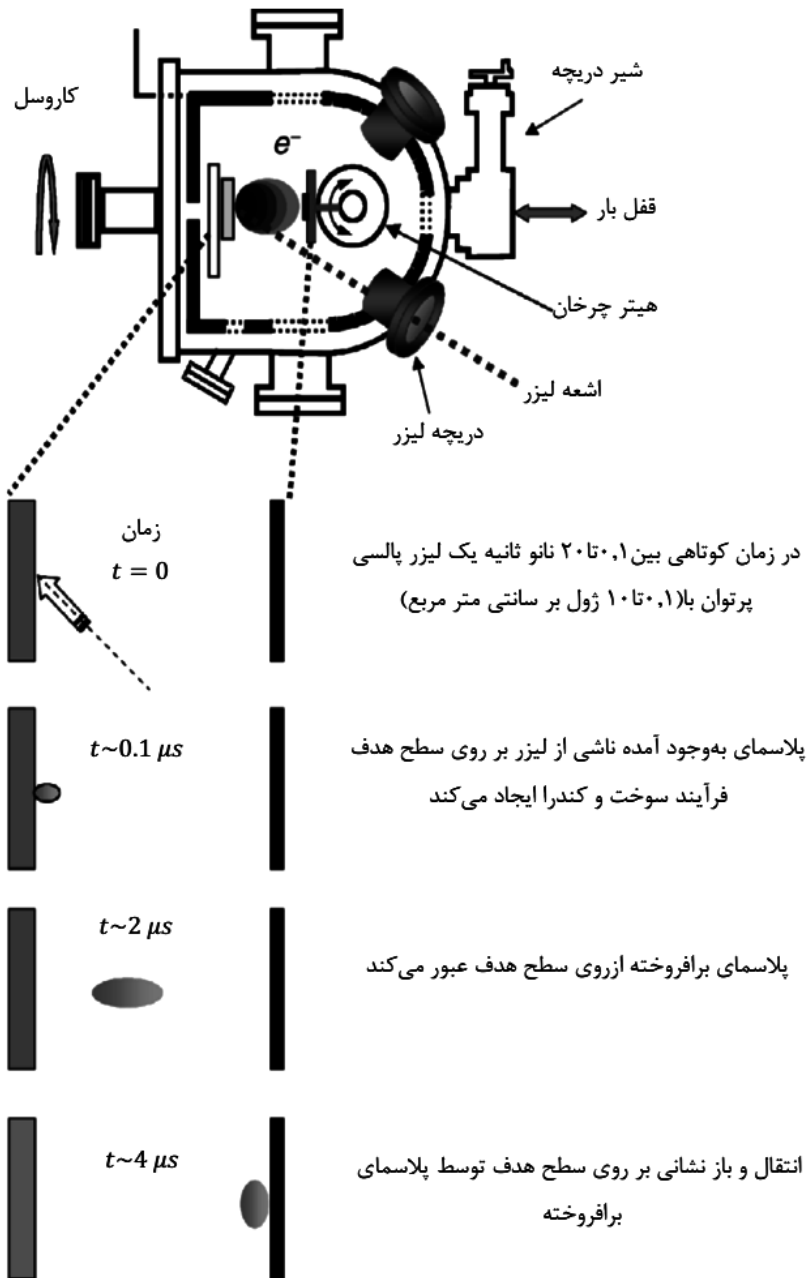
۱. لایه‌نشانی پرتو مولکولی
۲. لایه‌نشانی شیمیایی متالورژیکی
۳. لایه‌نشانی شیمیایی با افزایش پلاسما
۴. لایه‌نشانی شیمیایی در فشار کم
۵. اپیتکسی (پوشش لایه تک‌بلور روی زیرلایه‌ای تک‌بلور) اما روش فیزیکی شامل:

۱. لایه‌نشانی کندو پاش
۲. لایه‌نشانی تبخیری
۳. لایه‌نشانی تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی
۴. لایه‌نشانی تبخیر باریکه الکترونی
۵. لایه‌نشانی اتمی^۲
۶. لایه‌نشانی لیزر پالسی

با توجه به اینکه موضوع مورد مطالعه در این پژوهش درباره لایه‌نشانی با لیزر پالسی است؛ در این بخش اطلاعات کامل‌تری در مورد این روش ارائه می‌گردد. لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی یکی از روش‌های معرفی‌شده فیزیکی است که می‌تواند لایه‌هایی با ضخامت کم ایجاد کند. یکی از ویژگی‌های آن

پنجرهٔ محفظهٔ خلأ و برخورد با سطح هدف، شروع به ایجاد پلاسما می‌کند. به‌واسطهٔ این کار و رسوب مواد آلی ماکرومولکولی امکان دارد بدون هیچ برخوردی با تنهٔ لیزر از سطح جدا شده باشند، که علت غیرکنترلی بودن رسوب را به‌وجود می‌آورند [۹].

سادگی در پیاده‌سازی است. این سیستم ارائه‌شده در یک فضای خلأ با ویژگی‌های فرایندی مشترک با پرتو مولکولی به حالت مغناطیسی و انواع رسوب‌گذاری بیان شده است. در این روش پرتو لیزر همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با عبور از



شکل ۱. نمایی شماتیک از لایه‌نشانی به کمک لیزر [۹]

کاربردی در صنعت است. پویایی روند فرسایش لیزر در نتیجهٔ این است که ستونی متمرکز از مواد از هدف خارج شده باشد. در حالی که این عمل امکان بهره‌وری را ۷۰ درصد نموده است، یکی از مشکلات این روش عدم یکنواختی ضخامت لایه‌های

در این روش اتم‌ها و ملکول‌های مادهٔ فرسایشی با نیروی لیزر از لایهٔ فرسایشی جدا و با انرژی بالا به لایهٔ زیرین برخورد می‌کند و در نتیجه این عمل لایه‌نشانی انجام می‌شود. توسعهٔ اصلی برای استفاده از رسوب لیزر پالسی برای برنامه‌های

نشانه شده در قسمت‌های مختلف است؛ به نحوی که ضخامت لایه در هر چند سانتی‌متر با چند سانتی‌متر قبل از آن متفاوت خواهد بود. برای یکسان‌سازی ضخامت لایه به فرایندهای مکمل نیاز خواهد بود. در این روش عوامل مختلفی چون دمای زیرلایه، چگالی انرژی لیزر و فشار اکسیژن بر خصوصیات فیزیکی لایه تأثیرگذار است. علاوه بر آن، با کنترل تعداد پالس‌های لیزر به خوبی می‌توان ضخامت لایه را کنترل کرد. همان‌گونه که بیان شد، انرژی تابش پرتو لیزر تأمین‌کننده حالت تجزیه ماده در منطقه مورد نظر می‌باشد. از کاربرد آن می‌توان به ساخت لایه‌های کریستالی، سرامیکی و نیتريد اشاره کرد. در این روش چسبندگی ایجادشده بین دو لایه نیاز به گرم کردن لایه زیرین را از بین می‌برد، همین عامل نیز دلیلی برای استفاده این روش در موادی هست که مقاومت به حرارت خوبی ندارند مانند انواع پلیمرها.

مزایای روش لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی عبارت است از:

۱. ترکیب ماده را در لایه انباشته شده حفظ می‌کند
 ۲. بهترین مزیت روش وسعت بالای محدوده مواد کاربردی آن می‌باشد؛ مثلاً می‌توان در این روش از کاربیدها، ابررساناهای دما بالا، اکسیدها، نیتريدها، فلزات و حتی پلیمرها نیز استفاده و لایه‌هایی نازک به صورت انباشت ایجاد کرد
 ۳. دارای سرعت انباشت مواد بالایی می‌باشد
 ۴. انرژی بالا کمک می‌کند که از دماهای پایین لایه زیرین در عمل رشد استفاده شود
 ۵. از نظر نظافت محیط کار چون لیزر بیرون خلأ قرار دارد کار تمیزتر است و می‌توان به بیشترین میزان خلأ رسید
 ۶. لیزر عامل اصلی کنترلر شروع و پایان انباشت مواد می‌باشد
 ۷. هزینه کمتر نسبت به دیگر روش‌های لایه‌نشانی
 ۸. چند کار مختلف را می‌تواند با هم شروع کند
- از طرفی، معایب روش لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی عبارت است از:
۱. بخار مقطع برخورد سایشی [۱۰] محدودیت اندازه‌ای (بازه برمبنای سانتی‌متر است) دارد
 ۲. به دلیل هدف‌گیری روبه جلوی مخروطی میزان یکنواختی قابل کنترل نیست

۳. آهنگ انباشت با گذشت زمان و افزایش ضخامت لایه کمتر می‌شود

۴. به دلیل نرسیدن به ماهیت درستی از پلاسما برای رسیدن به نقطه بهینه به تکرار فراوان نیاز است

۵. به دلیل حرکت بخار مواد ساییده به طرف جلو و جدا شدن نامتوازن اتم‌ها از روی ماده عدم یکنواختی ضخامت لایه نشانه شده به وجود می‌آید

امروزه نیز به دلیل کاهش منابع غیرتجدیدپذیر (نفت، گاز و غیره) و با ارزش شدن منابع تجدیدپذیر صفحات نوری ارزش بیشتری پیدا کرده است. یکی از روش‌های تولید صفحات نوری لایه‌نشانی موادی مانند اکسید روی بر صفحات می‌باشد. حتی از منظر مسائل زیست محیطی نیز روش لایه‌نشانی با لیزر پالسی یکی از بهترین موارد محسوب می‌شود [۱۱].

۳. منطق فازی

منطق فازی برای طراحی و مدلسازی سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود. منطق فازی توسط لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان سیستم‌های فازی به صورت رسمی معرفی شد [۱۲] لطفی‌زاده بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تأکید داشته و از این جهت با سامانه‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد [۱۲-۱۳]. منطق کلاسیک هر چیزی را براساس یک سامانه دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، صفر یا یک)، اما در منطق فازی، درستی یا نادرستی هر چیزی با درجه عضویت نشان داده می‌شود که مقدار آن بین صفر و یک است.

۳-۱. سامانه‌های استنتاج فازی

استنتاج فازی روش بیان رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم با استفاده از منطق فازی است. در واقع استنتاج فازی، یک مبنا از اینکه تصمیم ما چه می‌تواند باشد، یا اینکه الگوی تصمیم‌گیری چه باشد را فراهم می‌کند. دو نوع سامانه استنتاج فازی پرکاربرد شامل: ممدانی و اسیلیان [۱۴]، و سوگنو [۱۵] وجود دارد. این دو نوع سامانه در بسیاری از موارد شبیه هستند، اما مهم‌ترین تفاوت بین این دو در خروجی آنهاست. در سامانه ممدانی، خروجی به صورت یک مجموعه فازی است که باید غیرفازی‌سازی شود. اما در سامانه سوگنو، خروجی به صورت خطی یا ثابت است. پس از انتخاب سامانه استنتاج فازی مورد

استفاده، مهم‌ترین مرحله دسته‌بندی داده‌ها و تعریف توابع عضویت برای مجموعه داده‌های ورودی و خروجی است. در ادامه نیز با در نظر گرفتن دسته‌بندی ایجادشده، مجموعه‌ای از قوانین "اگر - آنگاه" برای ایجاد رابطه‌ای منطقی بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تولید می‌شود.

۳-۲. دسته‌بندی داده‌ها

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در منطق فازی، اعمال دسته‌بندی به‌منظور تعریف توابع عضویت می‌باشد. فرایند دسته‌بندی سعی دارد که یک مجموعه داده را به چندین دسته تقسیم کند، به‌طوری‌که داده‌های قرار گرفته در یک دسته با هم شبیه بوده و با دسته‌های دیگر متفاوت باشند. پس از دسته‌بندی مناسب اطلاعات، می‌توان با کمترین تعداد قوانین، رفتار داده‌ها را مدل کرد. ذکر این نکته نیز قابل اهمیت است که یافتن تعداد بهینه قوانین، یکی از مهم‌ترین نکات منطق فازی می‌باشد که به‌طور مستقیم متأثر از نحوه دسته‌بندی پارامترهاست. در واقع تعداد کم قوانین "اگر - آنگاه"، نمی‌تواند مسئله را پوشش دهد و برای دستیابی به مدل فازی متناسب باید تعداد قوانین متناسبی تعریف گردند.

۴. مدل فازی ارائه شده

در این تحقیق از جعبه‌ابزار منطق فازی نرم افزار متلب (نسخه ۲۰۱۴) جهت مدلسازی ضخامت لایه نشانده‌شده در فرایند لایه‌نشانی به‌کمک لیزر استفاده شده است. شکل ۲ مراحل طراحی مدل فازی ارائه‌شده در این مقاله را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳، مدل فازی طراحی‌شده در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد. در سیستم فازی طراحی‌شده، مقادیر ورودی دور غربال و زمان به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند و با استفاده از توابع فازی، یک درجه عضویت را به خود اختصاص می‌دهند. به‌منظور دسته‌بندی مقادیر مختلف دور غربال و زمان از تابع مثلثی استفاده شده است. همچنین تابع مورد استفاده در دسته‌بندی مقادیر ضخامت لایه نشانده شده تابع مثلثی می‌باشد. توابع به‌کار رفته در دسته‌بندی پارامترهای ورودی و خروجی، بهترین عملکرد را در بین توابع موجود در جعبه ابزار منطق فازی نرم‌افزار متلب داشته‌اند. تعداد دسته‌های فازی به‌کار گرفته شده جهت دسته‌بندی دور غربال و زمان به

پنج دسته و تعداد دسته‌های در نظر گرفته شده جهت دسته‌بندی ضخامت لایه نشانده شده، ده دسته می‌باشد. نحوه دسته‌بندی پارامترهای ورودی و خروجی و همچنین توابع مورد استفاده در آنها، در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. تعداد قوانین به‌کار رفته جهت مدلسازی زبری سطح فرایند برش کاری سیمی با تخلیه الکتریکی ۲۵ قانون می‌باشد. جدول ۱، این قوانین را نشان می‌دهد. در این مقاله، موتور استنتاج ممدانی به‌کار گرفته شده است. مقادیر ورودی‌های فازی پس از ورود به موتور استنتاج و با اعمال قوانین فازی موجود، به خروجی‌های فازی تبدیل می‌شوند. در پایان نیز خروجی‌های فازی با استفاده از روش غیرفازی‌سازی محاسبه مرکز جرم، به مقادیر خروجی زبری سطح تبدیل می‌شوند. نمایش گرافیکی مدل فازی ایجاد شده در شکل ۷ نشان داده شده است. خطای نسبی در هر یک از پیش‌بینی‌ها از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

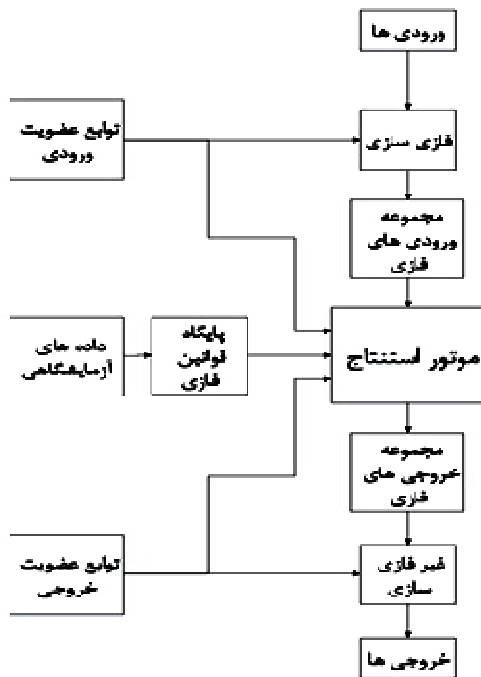
$$\Delta A = |A - A_p| \quad (1) \quad \text{خطای نسبی} = \frac{\Delta A}{A}$$

که در آن A ، مقدار واقعی اندازه‌گیری شده و ΔA خطای مطلق در هر پیش‌بینی می‌باشد که از قدر مطلق اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده مشخصه‌های هندسه شکاف (A_p) به‌دست می‌آید.

۵. بهینه‌سازی با الگوریتم اجتماع ذرات

در الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با استفاده از مفاهیم رفتار اجتماعی یک جمعیت، مانند هجوم پرندگان و فرار ماهی‌های دریایی به روشی برای بهینه‌سازی دست یافته‌اند [۱۶]. بهینه‌سازی با اجتماع ذرات روش بهینه‌سازی جمعیت تشابهی از ابر فضایی ذرات محسوب می‌شود که توسط طراحی مرزهای متغیر برخی از معیارهای تصادفی به سمت ذراتی با بهترین عملکرد پیش می‌روند (معمولاً ذراتی است که نزدیک به نقطه مطلوب می‌باشند) [۱۷-۱۸]. چون گزاره اصلی، الگوریتم اجتماع ذرات با موفقیت در انواع مشکلات مانند برنامه‌ریزی فروشگاه، مسیریابی وسائل نقلیه، بهبود مدار آنالوگ، تشخیص رادار، پردازش تصویر، ربات‌های همراه و بهینه‌سازی شبکه‌های ارتباطی در میان بسیاری دیگر به‌صورت گسترده استفاده شده است [۱۸-۱۹] که مورد بحث پژوهش می‌باشد. بهینه‌سازی با اجتماع ذرات در شناسایی مواد پارامترهای الاستیکی پلاستیکی

مدلسازی فرایند توسط منطق فازی اقدام شد. در مدل ارائه شده پارامترهای دور غربال و زمان به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر لایه‌نشاندگی شده در نظر گرفته شده و با پیاده‌سازی مدل منطق فازی نسبت به مدل‌کردن ضخامت لایه اقدام شد. نمایش گرافیکی مدلسازی انجام‌شده توسط منطق فازی در شکل ۷ نشان داده شده است. سطوح فازی لایه‌نشاندگی براساس پارامترهای دور غربال و زمان در شکل ۸ آمده است.



شکل ۲. مراحل مختلف طراحی و به‌کارگیری مدل فازی

در پژوهش حاضر برای ارزیابی مدل فازی ایجادشده از نتایج تجربی به‌دست آمده توسط سجادیا و صبا [۴] استفاده شده است. مقدار پیش‌بینی شده برای ضخامت لایه‌نشاندگی شده توسط مدل فازی در شکل ۹ نمایش داده شده است. مقدار میانگین خطای به‌دست آمده در پیش‌بینی ضخامت لایه‌نشاندگی شده که در شکل ۹ به‌صورت نمودار نشان داده شده است برابر ۴/۷۵ درصد با استفاده از مدل فازی به‌دست آمده است. مقدار کم خطای مدل پیشنهادی نشان از کاربردی بودن روش ارائه‌شده برای پیش‌بینی پارامتر ضخامت لایه‌نشاندگی شده دارد. از الگوریتم اجتماع ذرات برای به‌دست آوردن مقدار بهینه ضخامت لایه‌نشاندگی شده استفاده گردید. مقدار بهینه با استفاده از این الگوریتم در دور ۳۵۰/۲ در هر دقیقه و زمان ۲۹ ساعت برای ضخامت برابر با ۶۲/۳۶ میکرومتر پس از ۲۰ تکرار به‌دست آمد.

در برنامه‌های کاربردی چندین رشته مهندسی به‌کار گرفته و از این روش گزارش شده است، مانند آثار در خرپا [۲۰-۲۱] طراحی مخازن تحت فشار [۲۲]، تجزیه و تحلیل معکوس انتقال‌حرارت [۲۳] در دستگاه‌های چند حسگر [۲۴]؛ و در اکوستیک، بهینه‌سازی با اجتماع ذرات و به‌عنوان یک شبکه عصبی چند کاربردی و پیوند مصنوعی غیرخطی کنترل صدای فعال سیستم استفاده شده است [۲۵].

جدول ۱. قوانین فازی ایجادشده جهت مدلسازی ضخامت

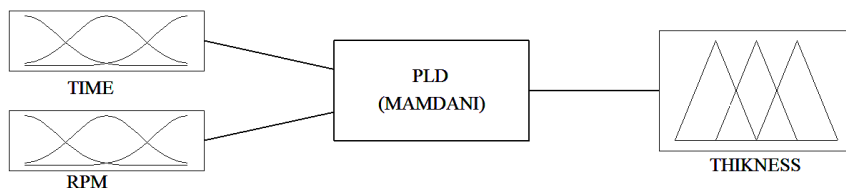
ردیف	زمان (h)	دور RPM	ضخامت	
			(μm)	
1	T1	R3	TH3	
2	T1	R1	TH1	
3	T1	R2	TH2	
4	T1	R4	TH5	
5	T1	R5	TH7	
6	T2	R2	TH3	
7	T2	R4	TH7	
8	T2	R1	TH2	
9	T2	R3	TH6	
10	T2	R5	TH8	
11	T3	R1	TH6	
12	T3	R2	TH7	
13	T3	R3	TH8	
14	T3	R4	TH6	
15	T3	R5	TH6	
16	T4	R2	TH7	
17	T4	R4	TH10	
18	T4	R1	TH5	
19	T4	R3	TH8	
20	T4	R5	TH10	
21	T5	R3	TH3	
22	T5	R1	TH1	
23	T5	R2	TH3	
24	T5	R4	TH5	
25	T5	R5	TH7	

۶. بحث و نتایج

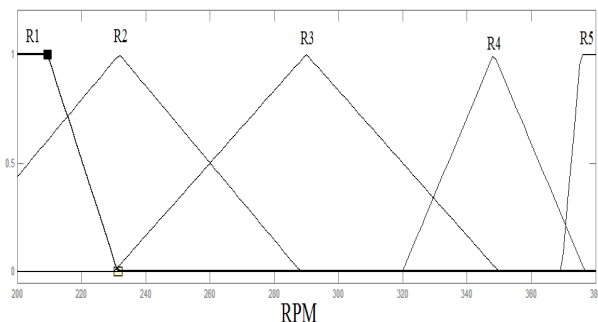
با توجه به اهمیت ضخامت لایه‌نشاندگی شده توسط فرایند لایه‌نشانی به‌کمک لیزر پالسی، در این پژوهش نسبت به

است. با استفاده از روش الگوریتم پیشنهاد شده میزان ضخامت لایه نشانده شده در حد ۴/۱ درصد بهبود پیدا خواهد نمود.

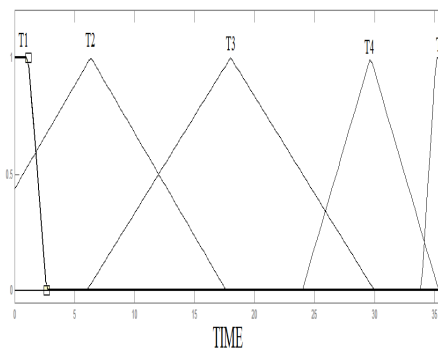
نتیجه به دست آمده از الگوریتم اجتماع ذرات از بهترین مقدار به دست آمده توسط آزمایش‌های تجربی انجام شده بیشتر شده



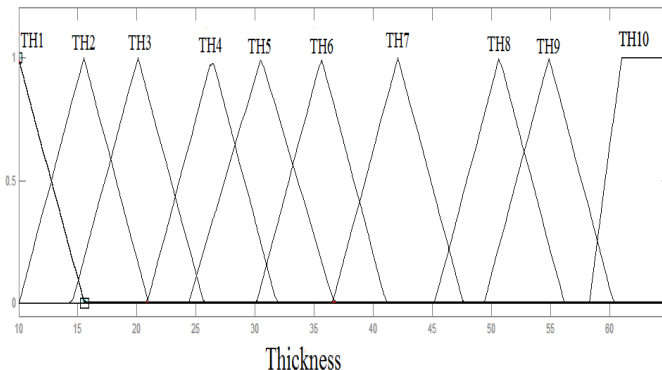
شکل ۳. مدل طراحی شده در نرم‌افزار متلب



شکل ۵. دسته‌بندی پارامتر دور در مدل فازی



شکل ۴. دسته‌بندی پارامتر زمان در مدل فازی

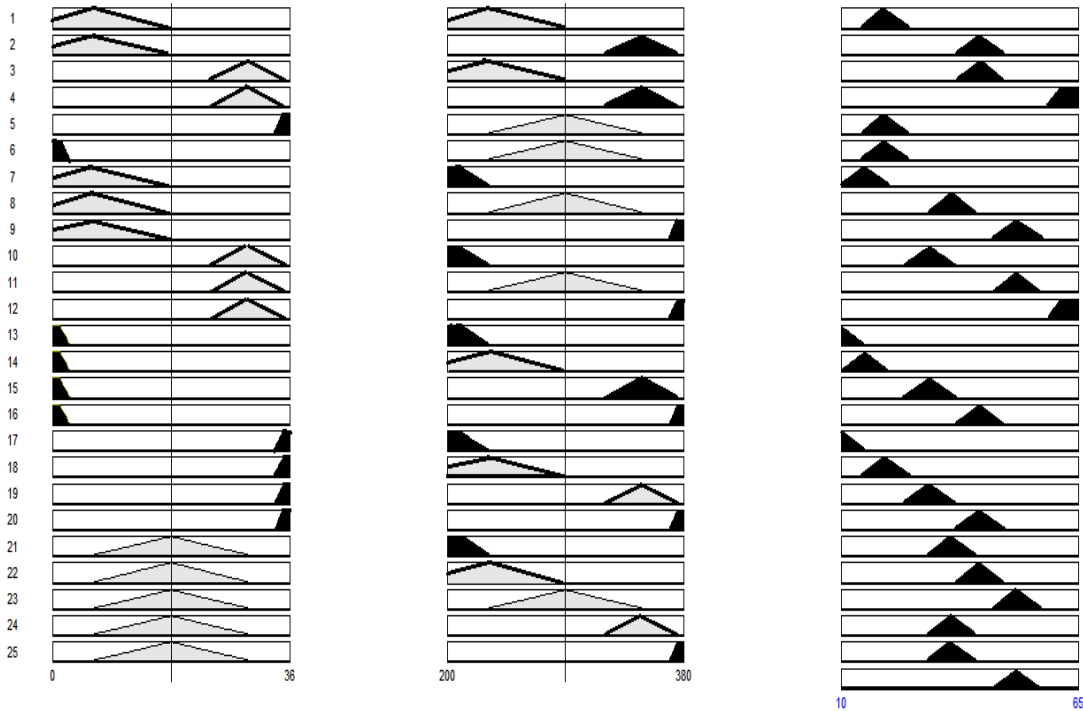


شکل ۶. دسته‌بندی پارامتر خروجی ضخامت در مدل فازی

لایه به کار برده شد. میزان خطای مدل فازی ایجاد شده ۴/۷۵ درصد و بهبود به دست آمده توسط الگوریتم اجتماع ذرات برابر ۴/۱ درصد برای ضخامت لایه نشانده شده است. بررسی نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل فازی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان از قابلیت مناسب منطق فازی در مدلسازی این فرایند و همچنین نتایج بهینه توسط الگوریتم اجتماع ذرات نشان از کاربردی بودن این الگوریتم در بهینه‌سازی فرایند لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی آلیاژ تیتانیوم دارد.

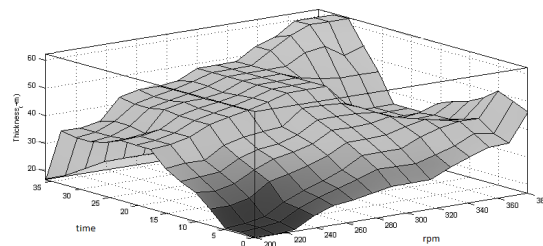
۷. نتیجه‌گیری

ضخامت لایه نشانده شده توسط فرایند لایه‌نشانی با کمک لیزر پالسی جزء پارامترهای کلیدی فرایند محسوب می‌شود که یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر سختی سطح است. با توجه به اهمیت پارامتر ضخامت لایه نشانده در این پژوهش از منطق فازی برای مدل‌کردن اندازه ضخامت نشانده شده در فرایند تخلیه لایه‌نشانی به کمک لیزر پالسی آلیاژ تیتانیوم استفاده گردید و همچنین الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی ضخامت

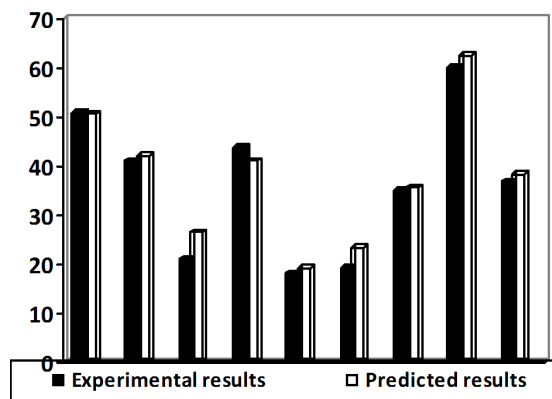


Input: [18,290]	Plot points: 101	Move: left right down up
Opened system PLD, 25 rules		Help Close

شکل ۷. نمایش گرافیکی استنتاج فازی جهت پیش‌بینی ضخامت لایه



شکل ۸. سطوح فازی ضخامت لایه نشانده شده در فرایند لایه‌نشانی با لیزر پالسی



شکل ۹. میزان اختلاف داده‌های تجربی با داده‌های فازی در ضخامت

- [1] P. Guoa, B. Zoua, C. Huanga, H. Gaoc, Study on microstructure mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.240, pp.12–22, 2017.
- [2] Y. Zhaia, X. Liua, S. Qiaoa, M. Wanga, X. Lua, Y. Wanga, Y. Chena, L. Yingc, Characteristics of laser clad α Ti/TiC+(Ti,W)C-x/Ti₂SC+TiS composite coatings on TA2 titanium alloy, *Optic & Laser Technology*, Vol. 89, pp. 97-107, 2017.
- [3] F. Sima, C. Ristoscu, L. Duta, O. Gallet, K. AnselmeI, N. Mihailescu, Laser thin films deposition and characterization for biomedical, *applications Techniques and Applications*, pp. 77–125, 2016.
- [4] S. Seyed Abdolkarim, S. Farhad, G. Ali, D. Fabio, Synthesis of TiC coating on Ti substrate using pulsed laser deposition and mechanical milling techniques along with statistical modeling of the process by response surface methodology, *Powder Technology*, Vol. 305, pp.704–713, 2017.
- [5] L. Alvira, P. Cabrerac, Y. Peñaloza Mendozac, M. Martinez Riccid, F. Videla, Pulsed laser deposition of PbTe under monopulse and multipulse regime, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 90, pp. 284–290, 2017.
- [6] H. Kalhoria, S. Portera, A. Esmaeilya, M. Coeya, M. Ranjbar, H. Salamatib, Morphology and structural studies of WO₃ films deposited on SrTiO₃ by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science*, Vol. 390, pp.43–49, 2016.
- [7] Y. Ko, H. Kang, M. Jeong, S. Lee, J. Myoung, Ilgu Yun Neural network based modeling of PL intensity in PLD-grown ZnO thin films, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.159, pp.159-163, 2005.
- [8] Y. uanyuan, D. Pan, L. Ma, C. Yuan, Optimizing the process efficiency of atomic layer deposition of alumina for its sustainability improvement a combined experimental and modeling study, *Journal of Cleaner Production*, vol.133, pp. 338-347, 2016.
- [9] R. Eason, *PULSED LASER DEPOSITION OF THIN FILMS*, New Jersey: John Wiley, 2007.
- [10] A. Eishabini-Riad, F. Barlow, *Thin film Technology*, Handbook. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [11] J. Bruncko, P. Sutta, M. Netrvalova, M. Michalka, A. Vincze, J. Kovac, Comparative study of ZnO thin film prepared by pulsed laser deposition e Comparison of influence of different, *ablative lasers Vacuum*, Vol. 17, 2016.
- [12] A. Zadeh, *Fuzzy sets, Information and control*, pp. 338-353, 1965.
- [13] A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information sciences*, pp.199-249, 1975.
- [14] E. Mamdani, S. Assilian, An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic control, *International journal of man-machine studies*, pp.1-13, 1975.
- [15] M. Sugeno, Industrial applications of fuzzy control, Elsevier publication co, 1985
- [16] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, In: Proc. of the IEEE int. conf. on neural networks, *IEEE Press*, pp.1942–8, 1995.
- [17] C. Blum, Swarm intelligence in optimization. In: Blum C, Merkle D, editors .Swarm intelligence – introduction and applications, *Heidelberg: Springer*, pp. 43–85, 2008.
- [18] V. Jr, M. Cardoso, E. Stahlschmidt, J. Particle, swarm optimization and identification of inelastic material parameters, *Eng Comput: Int J ComputAided Eng Softw*, vol. 30, no. 7, 36–60, 2013.
- [19] P. Behdinin, K. Particle, swarm approach for structural design optimization, *Comput Struct*, vol .85(19), PP.1589–88, 2007.
- [20] A. Kaveh, S. Talatahari, A general model for meta-heuristic algorithms using the concept of fields of forces, *Acta Mech*, vol. 221(1–2), pp. 99–118, 2011.

- [21] A. Kaveh, S.Talatahari, Hybrid charged system search and particle swarm optimization for engineering design problems, *Eng Comput*, vol. 28, no. 4, pp.423–40, 2011.
- [22] N. Tian, J. Sun, W. Lai, C. Estimation, of unknown heat source function in inverse heat conduction problems using quantum-behaved particle swarm optimization, *Int J Heat Mass Transf*, vol. 54(17–18), pp. 4110–16, 2011.

- [23] S. Vakilia Gadala, M. Amodified, sequential particle swarm optimization algorithm with future time data for solving transient inverse heat conduction problems, *Numer Heat Transfer, Part*, vol. 59, no. 12, pp.91-33, 2011.
- [24] R. Barbieri, N. Barbieri, K. Fonseca, d. Lima, Some applications of the PSO for optimization of acoustic filters, *Applied Acoustics*, vol. 89, pp.62–70, 2015.

پی نوشت

1. pulsed laser deposition
2. atomic layer deposition

