



توزیع تنش‌های پسماند در نمونه‌های سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ حاصل شده از فرآیند ذوب گزینشی با لیزر به روش المان محدود

امیر آقابابائی^{۱*}، محسن بدرسمای^۲

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

روش‌های ساخت افزودنی در سال‌های اخیر به دلیل قابلیت‌های زیادشان از جمله مصرف بهینه مواد و کاربردشان در ساخت ساختارهای پیچیده، محبوبیت بسیار خوبی پیدا کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین روش‌ها در این فرآیندها، فرآیند ذوب گزینشی با لیزر است. در تحقیقات پیشین، اندازه‌گیری توزیع تنش‌های پسماند در نمونه‌های اینکونل ۶۲۵ تحت فرآیند ذوب گزینشی با لیزر مورد تحقیق قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق، فرآیند ذوب گزینشی با لیزر به وسیله روش شبیه‌سازی به روش المان محدود، بر روی نمونه اینکونل ۶۲۵ انجام گرفته و سپس توزیع تنش‌های پسماند در نمونه حاصل شده از فرآیند ذوب گزینشی به روش المان محدود بررسی قرار گرفته است. همچنین نحوه تشکیل حوضچه مذاب، ابعاد آن و توزیع دما نیز مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داد که تنش‌های پسماند کششی در مرکز لایه و تنش‌های پسماند فشاری بیش‌تر در لبه‌های نمونه به‌وجود آمده‌اند. همچنین ماکزیمم تنش‌های پسماند در جهت طولی و مینیمم آن‌ها در جهت ضخامت لایه به‌وجود آمده‌اند. نتایج مربوط به تاثیر پارامترهای فرآیند بر توزیع تنش‌های پسماند نشان داد که با افزایش توان لیزر، تنش‌های پسماند کششی و فشاری در هر دو جهت محوری و محیطی افزایش می‌یابد ولی کاهش سرعت اسکن، اطلاعات دقیقی از میزان افزایش یا کاهش این تنش‌ها به ما نمی‌دهد. به منظور اعتبارسنجی نیز نتایج حاصل از روش المان محدود با نتایج حاصل از دیگر محققان مقایسه گردید. اختلاف حاصل شده ۱۳/۹۷٪ بود. در نتیجه توافق خوبی میان آن‌ها برقرار شد.

کلمات کلیدی

ساخت افزودنی، ذوب گزینشی با لیزر، اینکونل ۶۲۵، تنش پسماند، شبیه‌سازی به روش المان محدود

Residual stress distribution in Inconel 625 superalloy samples obtained from the selective laser melting (SLM) process using the finite element method

Aghababaei Amir^{1*}, Badrossamay Mohsen¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan university of technology, Isfahan, Iran

Abstract

Additive manufacturing methods have become very popular in recent years due to their many capabilities, including the optimal use of materials and their use in constructing complex structures. One of the most important methods in these processes is the selective laser melting (SLM) process. In previous research, measuring the residual stress distribution of Inconel 625 samples under the SLM process has not been investigated. Therefore, in this research, the SLM process was carried out on the Inconel 625 sample using the finite element simulation method, and then the residual stress distribution in the sample obtained from the process was investigated in three main directions. Also, the formation of the molten pool, its dimensions, and temperature distribution were investigated. The results showed that tensile residual stresses were formed in the center of the layer and compressive residual stresses were more present at the edges of the sample. Also, the maximum of the residual stresses were formed in the axial direction and their minimum appeared in the layer thickness direction. The results related to the effect of process parameters on the residual stress distribution showed that with increasing laser power, tensile and compressive residual stresses increase in both axial and hoop directions, but decreasing the scanning speed does not give us accurate information about the increase or decrease of these stresses. For validation, the results of the finite element method were compared with the results of other researchers. The obtained difference was 13.97%. Therefore a good agreement existed between them.

Keywords

Additive manufacturing, Selective laser melting, Inconel 625, Residual stress, Finite element simulation.

* امیر آقابابائی، a.aghababaei@me.iut.ac.ir

۱- مقدمه

قطعات آزاد شده و اثرات نامطلوبی روی شکل ظاهری و خواص قطعات بر جای می‌گذارند. از جمله این اثرات می‌توان به تاثیر بر عمر خستگی، پایداری ابعادی، مقاومت سایشی، اعوجاج و تشکیل ریز ترک‌ها اشاره کرد [۱۲ و ۱۳]. روش‌هایی نظیر ریخته‌گری، جوش کاری، ماشین کاری، عملیات حرارتی و مونتاژ می‌توانند باعث ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات شوند.

چالش‌های زیادی در فرآیندهای ذوب گزینشی با لیزر وجود دارد که کاربرد و توسعه آن‌ها را محدود کرده است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تنش‌های حرارتی، تنش‌های پسماند، ریز ترک‌ها، اعوجاج و کم بودن دقت ابعادی اشاره کرد. در میان این چالش‌ها، تنش‌های پسماند یکی از چالش‌های اصلی می‌باشند که باعث ایجاد اعوجاج و ریز ترک‌ها در قطعات می‌شوند. نتایج حاصل از تحقیقات نشان داده است که پارامترهایی نظیر توان لیزر، سرعت اسکن، الگوی اسکن و قطر پرتو بر توزیع تنش‌های پسماند در قطعات ذوب گزینشی با لیزر تاثیر فراوانی دارند [۱۴ و ۱۵]. از این رو آنالیز و ارزیابی تنش‌های حرارتی و پسماند تشکیل شده در قطعات فرآوری شده تحت این فرآیند در حین انجام آزمایشات کار دشواری است.

به منظور آگاهی از نحوه تاثیر پارامترهای فرآیند بر توزیع دما و تنش‌های پسماند در این فرآیندها، تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی انجام شده و اطلاعات ارزشمندی از پیش‌بینی توزیع دما و در نتیجه به‌وجود آمدن تنش‌های پسماند به دست آمده است. هوانگ و همکاران با استفاده از روش عددی، رفتار حرارتی پودرهای فلزی در طی فرآیند ذوب گزینشی با لیزر را با استفاده از توان‌های لیزر و سرعت اسکن‌های مختلف سنجیدند. نتایج نشان داده است که افزایش توان لیزر به همراه کاهش سرعت اسکن، توزیع دمایی زیادی

اینکونل ۶۲۵، سوپر آلیاژی محلول جامد است که به وسیله مولیبدن و نیوبیوم تقویت شده است. این سوپر آلیاژ، به دلیل ویژگی‌هایی از جمله مقاومت کششی، خزشی و خوردگی بالا در صنایع مختلفی مانند صنعت هوافضا، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱ و ۲].

فرآیندهای ساخت افزودنی^۱، داده‌های مجازی مدل سه بعدی فایل کد^۲ حاصل شده از نرم‌افزار را به جسمی واقعی و فیزیکی به وسیله سر هم کردن مواد از طریق مکانیزم لایه‌گذاری تبدیل می‌کند [۳]. این روش‌ها با پیشرفت خود قادر بر ساخت قطعات پیچیده شده‌اند و توانسته‌اند روش‌های سنتی و مرسوم را پشت سر بگذارند [۴]. ساختارهای شبکه‌ای پیچیده نیز با حفظ استحکام نهایی و همچنین کاهش وزن به وسیله کاهش چگالی می‌توانند با این روش‌ها ساخته شوند [۵]. از طرفی در این روش‌ها می‌توان با کنترل پارامترهای فرآیند به ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی مورد نظر رسید [۴ و ۶].

روش‌های ذوب در بستر پودر^۳ یکی از روش‌های فرآیندهای ساخت افزودنی برای ساخت قطعات فلزی از ذرات پودر اولیه به وسیله ذوب کردن آن‌ها با لیزر است. یکی از زیر روش‌های این فرآیندها، ذوب گزینشی با لیزر^۴ بوده که یکی از روش‌های جدید و توسعه یافته در روش‌های ساخت افزودنی است. این روش‌ها در ساخت قطعات با پیچیدگی بالا و به دست آوردن شکلی نزدیک به شکل نهایی قطعه مورد نظر ما، روز به روز جذابیت بیشتری در صنایع مختلف نظیر صنایع هوافضا و خودروسازی پیدا کرده‌اند [۷ و ۸].

تنش‌های پسماند، تنش‌های خود متعادل و غیرهمگن هستند که طی فرآیندهای مختلف تولید داخل قطعات ایجاد می‌شوند [۹-۱۱]. این تنش‌ها در

^۱ Additive Manufacturing (AM)

^۲ CAD

^۳ Powder Bed Fusion (PBF)

^۴ Selective Laser Melting (SLM)

جزیره اسکن قرار گرفته و تنش‌های پسماند محوری بدون تغییر باقی مانده‌اند [۱۹]. رونگرونگ و همکاران نیز در تحقیقی دیگر با استفاده از روش شبیه‌سازی المان محدود برای نوعی از آلیاژ منیزیم، فرآیند مذکور را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها از سه الگوی اسکن متفاوت جهت تحلیل تنش‌های پسماند به‌وجود آمده استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی حاصل، گویای این بوده است که الگوی اسکن متعامد^۱ توزیع تنش پسماند یکنواختی را در هنگام استفاده از الگوی جزیره 4×4 نسبت به دو الگوی دیگر به‌وجود آورده است [۲۰].

به منظور ساخت قطعات، از فایل با فرمت اس تی ال^۲ از داده‌های طراحی کد استفاده می‌شود و سپس عملیات برش یا لایه لایه کردن داده‌های مدل شده جهت اسکن کردن انجام می‌گیرد. پس از آن پرتو لیزر با توان زیاد بر نواحی انتخاب شده مرتبط با داده‌های مدل شده، متمرکز شده و ذرات پودر فلزی را ذوب می‌کند. پس از این که لایه اول ساخته شد، پلتفرم به اندازه ضخامت لایه بعد پایین آمده و مجدد ذرات پودر بر سطح از قبل ساخته شده گسترانده می‌شود و عملیات ذکر شده انجام می‌گیرد. این عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که ساخت قطعه به طور کامل انجام بگیرد [۲۱]. شکل ۱، اصول کلی فرآیند ذوب گزینشی با لیزر را نشان می‌دهد [۲۲]. این عملیات درون یک محفظه ساخت همراه با گاز خنثی انجام می‌گیرد. با این کار از تشکیل لایه اکسیدی بر روی لایه‌ها جلوگیری می‌شود. در هر فرآیند تولیدی میزانی تنش پسماند به‌وجود می‌آید [۲۳]. با این وجود مقادیر تنش پسماند در هر فرآیند تولیدی متفاوت است. از آن جا که در فرآیند ذوب گزینشی با لیزر، به‌وجود آمدن گرادیان‌های حرارتی مختلف باعث به‌وجود آمدن تنش‌های پسماند می‌شوند، آگاهی از نحوه توزیع این تنش‌ها در قطعات تولیدی بسیار مورد اهمیت است. این تنش‌ها

در بستر پودر به‌وجود می‌آورد [۸]. در تحقیقی دیگر، بینگلی و همکاران، با استفاده از روش المان محدود و آنالیز ترمومکانیکی میدان‌های دما و تنش پسماند را در فرآیند ذوب گزینشی با لیزر پیش‌بینی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تنش‌های پسماند در جهت ارتفاع قطعه ساخته شده با افزایش تعداد لایه‌های پرینت شده افزایش می‌یابد [۱۶]. می‌شوروا و همکاران با استفاده از روش پراش اشعه ایکس جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در فرآیند مذور نشان دادند که با کاهش چگالی انرژی، تنش‌های پسماند بیش‌تری در نواحی زیر سطحی نمونه‌های آلیاژ تیتانیومی به‌وجود می‌آید. با استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس نیز متمرکز بودن تخلخل در ناحیه کانتور به جز در موارد سرعت کم لیزر را مشاهده کردند. همچنین نشان دادند که مقادیر کم تخلخل نیز (کم‌تر از ۱ درصد) بر تنش‌های پسماند تأثیر نمی‌گذارد [۱۷]. چنگ و همکاران در این فرآیند از روش المان محدود جهت تحلیل ترمومکانیکی فرآیند و یافتن استراتژی اسکن مناسب جهت کاهش تنش‌های پسماند استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الگوی اسکن خارج به داخل باعث به‌وجود آمدن تنش‌های پسماند بیشینه و الگوی اسکن خطی با زاویه ۴۵ درجه، تنش‌های پسماند کمینه را در دو جهت اصلی حاصل کرده است [۱۸]. در پژوهشی دیگر اماندا و همکاران با تغییر پارامترهای فرآیند ذوب گزینشی با لیزر و استفاده از دو روش مخرب و غیر مخرب در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند یعنی مقطع‌زنی و پراش نوترونی، تنش‌های پسماند به‌وجود آمده در نمونه‌های فولاد ضد زنگ L۳۱۶ را کم‌تر کردند. نتایج حاصل شده به این صورت بوده است که با افزایش انرژی اعمالی بر واحد طول و همچنین کاهش اندازه الگوی جزیره‌ای، تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد. همچنین تنش‌های پسماند درون صفحه تحت‌تأثیر چرخش

^۱ Orthogonal

^۲ STL

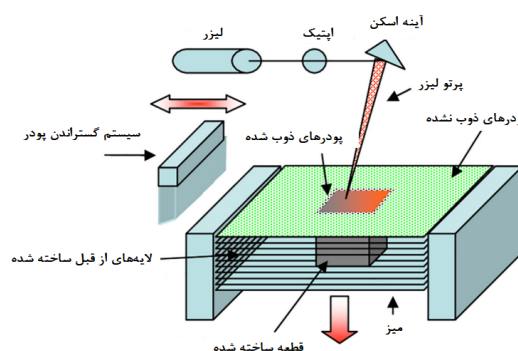
قطعه نهایی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

به منظور آنالیز فرآیند، از نرم افزار المان محدود آباکوس ورژن ۲۰۲۲ و مدل سه بعدی استفاده شده است. دو بخش زیرلایه^۱ و لایه پودر گسترانده شده بر روی زیر لایه طراحی شده‌اند. برای مدل سازی پودر اینکونل ۶۲۵ از سابروتین یو اس دی اف ال دی^۲ استفاده گردیده است. در این سابروتین کدهای لازم برای حالات وجود پودر، ذوب و انجماد آن در مختصات تعریفی برای مسیر اسکن لیزر در دمای ذوب پودر آلیاژ و سرعت اسکن مشخص اعمال شده‌اند. در نرم افزار آباکوس برای زیرلایه خواص مکانیکی-حرارتی اینکونل ۶۲۵ لحاظ گردید. همچنین در خواص پودر اینکونل ۶۲۵ مورد استفاده، از ۳ متغیر حالت^۳ در سابروتین نویسی استفاده شده است. به این ترتیب که خواص مربوطه برای دماهای متفاوت برای سه حالت پودر اولیه، مذاب و انجماد آن تعریف گردیده است. در نهایت هر کدام از این دو ماده تعریف شده به زیرلایه و پودر گسترانده شده نسبت داده شده است. خواص مکانیکی و حرارتی مورد استفاده در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند [۲۴].

تمامی پارامترهای فرآیند با توجه به تحقیقات قبلی مورد انتخاب قرار گرفته‌اند [۲۵]. ضخامت لایه مورد نظر $30\ \mu\text{m}$ ، توان پرتو لیزر $200\ \text{W}$ ، قطر پرتو لیزر $100\ \mu\text{m}$ و سرعت اسکن کردن نیز $1\ \text{m/sec}$ لحاظ شده‌اند. برای مدل سازی مسیر حرکتی شار حرارتی نیز از سابروتین دی فلاکس^۴ استفاده گردیده است. در این سابروتین از مدل گاوسی برای اسکن پرتو لیزر استفاده شده است. پارامترهای فرآیند نظیر توان پرتو و سرعت اسکن نیز در کدنویسی اعمال شده‌اند. برای انجام فرآیند، با استفاده

می‌توانند باعث اعوجاج و تغییر شکل در قطعات شوند. به عنوان مثال یکی از این مکانیزم‌ها، مکانیزم گرادیان دمایی است که به به وجود آمدن گرادیان‌های حرارتی بزرگ حول پرتو لیزر تابش شده و در نتیجه گرم شدن سریع لایه بالایی (در برابر دمای کم‌تر پودرهای دورتر از ناحیه اسکن شده و همچنین لایه‌های زیرین) برمی‌گردد. مکانیزم دیگر سریع خنک شدن لایه‌های ذوب شده بالایی و در نتیجه به وجود آمدن انقباض در قطعات است.



شکل ۱- شماتیک کلی فرآیند ذوب گزینشی با لیزر

از آن جا که تا به حال توزیع اندازه گیری تنش پسماند در نمونه‌های از جنس اینکونل ۶۲۵ مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است، در این تحقیق این توزیع در سه جهت اصلی نشان داده شده است. همچنین نحوه توزیع دما، تشکیل حوضچه مذاب و تاثیر پارامترهای فرآیند از جمله توان پرتو لیزر و سرعت اسکن بر توزیع تنش‌های پسماند حاصل شده در نمونه ذوب گزینشی با لیزر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

فرآیند ذوب گزینشی با لیزر به منظور ساخت نمونه اینکونل ۶۲۵ توسط روش شبیه سازی به روش المان محدود انجام گرفته و سپس نحوه توزیع تنش‌های پسماند در

۱ Substrate

۲ USDFLD

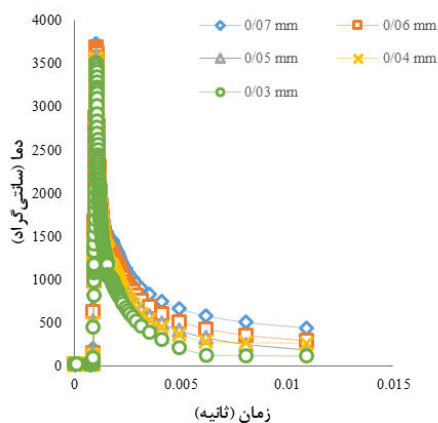
۳ State variable

۴ DFLUX

به منظور درک بهتر پارامترهای جداول ۱ و ۲ مدل المان محدود ترمومکانیکی سه بعدی و گذرا^۵ جهت یافتن میدان‌های دما در این مورد استفاده می‌شود. معادله (۱)، معادله سه بعدی رسانش گرما، با هدف به‌دست آوردن میدان دمایی $T(x,y,z,t)$ را نشان می‌دهد. در این معادله T نشان‌دهنده دما، ρ چگالی، C گرمای ویژه در فشار ثابت، k ضریب هدایت حرارتی و q گرمای درونی در واحد حجم است [۲۶].

$$\rho.C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

به منظور بررسی نحوه توزیع تنش‌های پسماند بر صفحه ذوب گزینشی با لیزر، قطعه تحت فرآیند قرار گرفته شده از تحلیل قبلی به مدلی جدید وارد شده و از حل گر استاتیک، جنرال^۶ و روش برگشت فنری استفاده گردیده است.



شکل ۲- نمودار حساسیت به تغییر مش برای پارامتر دما طی فرآیند ذوب گزینشی با لیزر

از حل گر ترمومکانیکی^۱ دو استپ گرم و سرد کردن به ترتیب به میزان ۰/۰۰۲ و ۱۰ ثانیه تعریف گردیده است و انتقال حرارت‌های جابجایی و تشعشعی لحاظ شده‌اند. از قید تای^۲ نیز جهت اتصال قسمت زیرلایه و لایه پودر استفاده گردیده است. پس از آن شار حرارتی تعریف شده در قسمت ساپروتین در استپ گرم کردن به سطح پودر اعمال شده و در استپ سرد کردن غیر فعال گردیده است. قسمت تحتانی زیرلایه نیز مقید شده است. دمای اولیه نمونه دمای محیط در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین اندازه مناسب المان، نمودار حساسیت در برابر تغییر مش^۳ برای پارامتر دما در شکل ۲ رسم گردید و اندازه مناسب المان برای لایه پودر ۰/۰۵ میلی‌متر انتخاب شده است. نوع المان‌ها نیز به صورت پیوسته، ۸ گره‌ای و مکانیکی حرارتی^۴ است. شکل ۳، نمونه‌ای از مدل طراحی شده در محیط مش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ [۲۴]

مقدار	پارامتر
۰/۳	ضریب پواسون
۲۰۷	مدول الاستیسیته (GPa)
۸۴۴۰	چگالی (Kg/m^3)
۴۶۰	تنش تسلیم (MPa)
۸۸۰	تنش نهایی (MPa)
$1/28 \times 10^{-5}$	ضریب انبساط طولی (k^{-1})

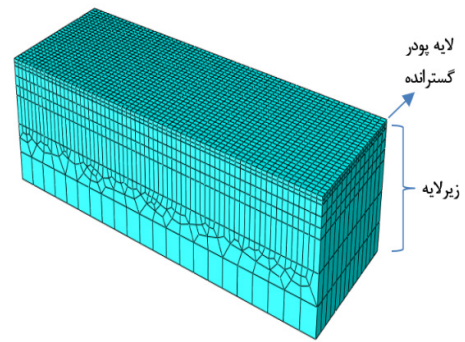
جدول ۲- خواص حرارتی سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ [۲۴]

مقدار	پارامتر
۹/۸	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)
۰/۴۱۰	گرمای ویژه ($\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$)
۸۴۴۰	چگالی (Kg/m^3)
۱۳۵۰	دمای لیکوئیدوس ($^\circ\text{C}$)
۱۲۹۰	دمای سالیدوس ($^\circ\text{C}$)

۱ Coupled temperature displacement
 ۲ Tie
 ۳ Mesh Sensitivity Diagram
 ۴ C3D8T
 ۵ Transient
 ۶ Static, General

به استپ گرم کردن و (د) مربوط به استپ سرد کردن در پایان فرآیند است). لازم به ذکر است که دما در تمامی کانتورها بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین نمودارهای شکل ۵، توزیع دما را در برابر زمان سپری شده نشان می‌دهد. در این نمودارها، تاریخچه حرارتی نقاطی در ابتدا، وسط و پایان لایه تحت اسکن نسبت به زمان مورد بررسی قرار گرفته است. دماهای ماکزیمم، مینیمم و میانگین، به ترتیب در سه مکان متفاوت شروع، پایان و اواسط مسیر حرکت پرتو لیزر به وجود آمده است. مشاهده می‌شود که در شروع تشکیل و اسکن لایه، دما بسیار بالا بوده است و یکی از دلایل این موضوع، حضور حوضچه مذاب در این مکان است. با گذشت زمان، این نقطه سردتر می‌شود. نقطه در نظر گرفته شده در پایان لایه تحت اسکن، در ابتدا دمای پایینی داشته و با گذشت زمان و رسیدن لیزر به آن نقطه و ذوب شدن این محدوده، دما بالا رفته است. به همین ترتیب، نقطه میانی لایه با رسیدن لیزر دمایش بالا رفته و با دور شدن لیزر سرد شده است.

شکل ۶، ابعاد حوضچه مذاب تشکیل شده در ابتدای فرآیند و تشکیل لایه را نشان می‌دهد. ابعاد این حوضچه تاثیر بسزایی در دقت ابعادی و کیفیت محصول نهایی دارد. افزایش توان و کاهش سرعت اسکن، نقش مهمی در افزایش این ابعاد دارد و می‌توان با بهینه کردن این پارامترها به محصول عاری از هر گونه عیب و با کیفیت بالا رسید. حوضچه مذاب تشکیل شده در این قسمت دارای ابعاد طولی ۰/۱۶۱، پهنا ۰/۱۳۶ و عمق ۰/۰۶۸ میلی‌متر است. طبق جدول ۵ می‌توان با مقایسه اندازه پهنای حوضچه مذاب تشکیل شده در تحقیق حاضر با نتایج تجربی حاصل از پژوهش انجام شده توسط اوزل و همکاران به ارتباط خوبی میان نتایج این دو تحقیق رسید و در نتیجه به صحت اعتبارسنجی تحلیل انجام شده پی برد [۲۵]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان اختلاف



شکل ۳- مدل طراحی شده در محیط مش (زیرلایه و پودر گسترانده شده بر روی زیرلایه)

به طور کلی پارامترهای ورودی و خروجی در این تحقیق در جدول ۳ مشخص گردیده است.

جدول ۳- پارامترهای ورودی و خروجی برای فرآیند ذوب گزینشی با لیزر اینکونل ۶۲۵

پارامترهای ورودی	پارامترهای خروجی
توان پرتو لیزر: ۲۰۰ W	توزیع دما
قطر پرتو لیزر: ۱۰۰ μm	اعتبارسنجی نتایج
سرعت اسکن: ۱ m/sec	ابعاد حوضچه مذاب به وجود آمده حاصل از فرآیند
ضخامت لایه: 30 μm	توزیع تنش‌های پسماند کششی و فشاری

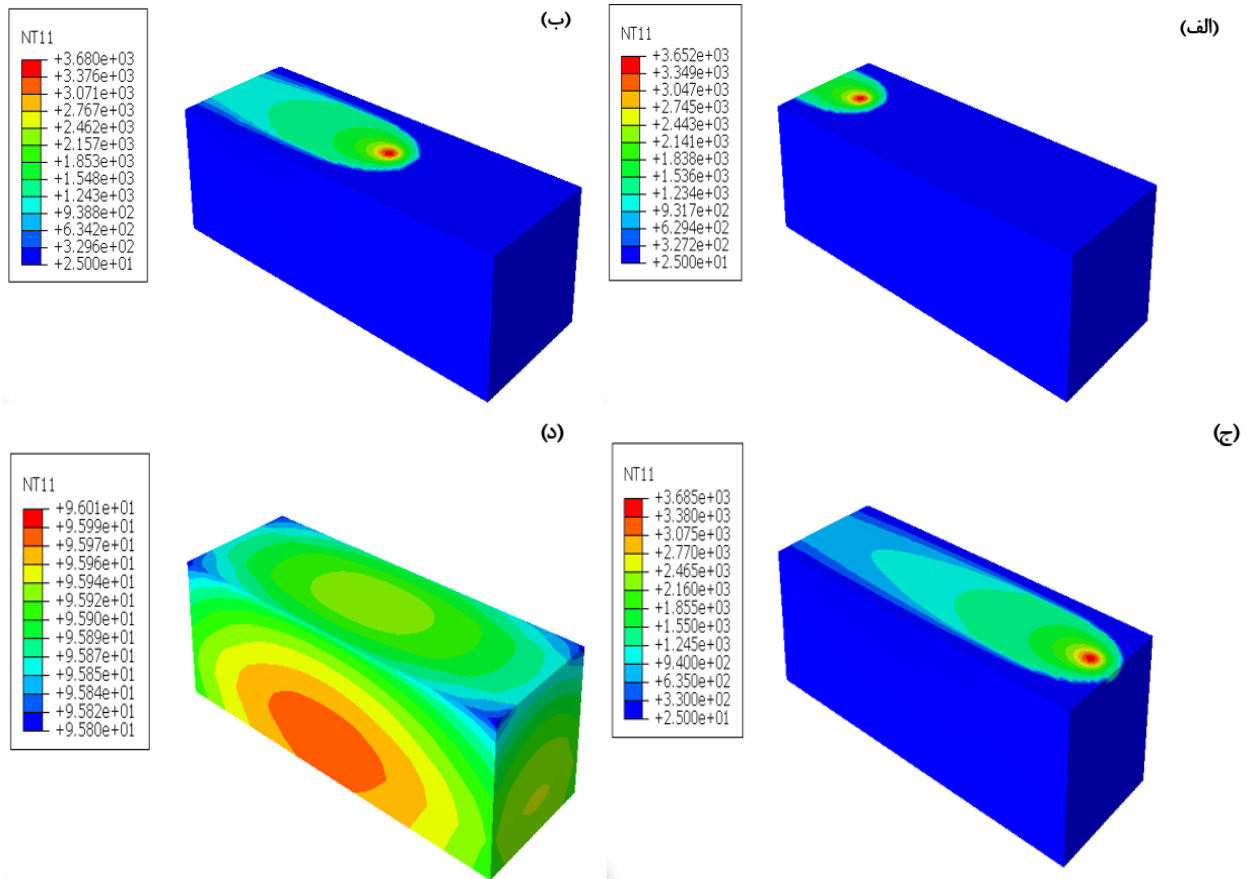
در ادامه با تغییر توان پرتو لیزر و سرعت اسکن، تاثیر این دو پارامتر مهم بر توزیع تنش‌های پسماند در نمونه اینکونل ۶۲۵ در فرآیند ذوب گزینشی با لیزر تشریح شده است. این مقادیر به شرح جدول ۴ است.

جدول ۴- تغییر مقادیر پارامترهای سرعت اسکن و توان پرتو لیزر

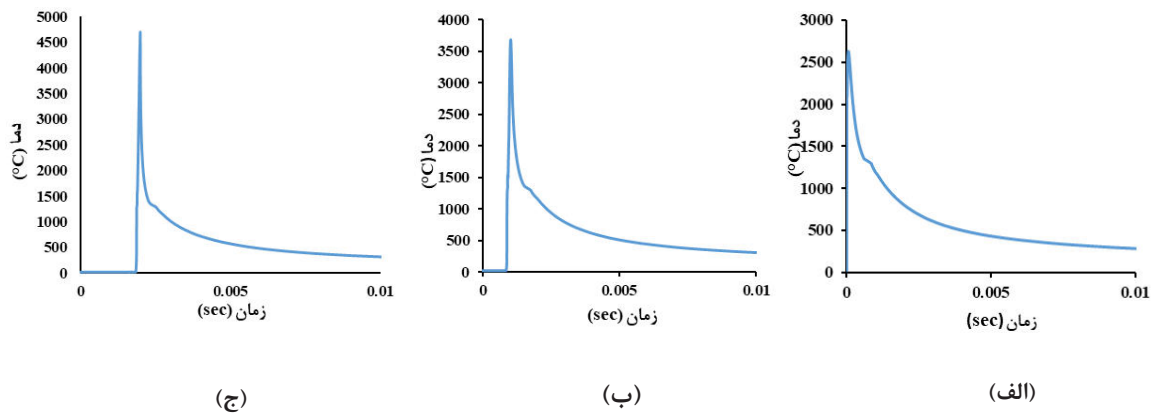
پارامتر	مقدار ۱	مقدار ۲	مقدار ۳
سرعت اسکن (m/sec)	۱	۲	۳
توان لیزر (W)	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰

۳- نتایج و بحث

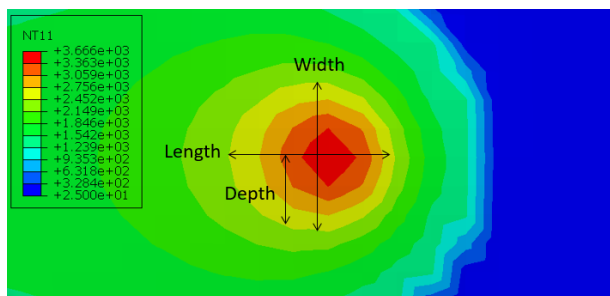
با حرکت لیزر در مسیر مشخص شده، محدوده دمایی وسیعی به وجود آمده است. شکل ۴ (الف تا د) کانتورهای توزیع دما را در ابتدای شروع اسکن توسط لیزر تا پایان فرآیند نشان می‌دهد (شکل‌های (الف)، (ب)، و (ج) مربوط



شکل ۴- حرکت شار حرارتی بر روی مسیر تعیین شده و توزیع دما در دو استپ گرم و سرد کردن



شکل ۵- نمودارهای توزیع دما در برابر زمان سپری شده در نقاط ابتدایی، میانی و پایانی لایه اسکن شده



شکل ۶- حوضچه مذاب به وجود آمده در قسمت ابتدایی فرآیند ذوب گزینشی با لیزر و ابعاد حاصل شده از آن

نکته قابل توجه این است که ابعاد حوضچه مذاب در هنگام ساخت لایه اول بیش تر بوده و در نتیجه با ساخت لایه‌های بعدی، امکان به وجود آمدن غیر یکنواختی در ضخامت نیز وجود دارد. علت به وجود آمدن این غیر یکنواختی به به وجود آمدن گرادیان‌های حرارتی ناشی از ساخت لایه جدید و لایه قبلی و در نتیجه ای ساد تنش‌های پسماند بین این لایه‌ها برمی‌گردد.

شکل ۷ کانتورهای تنش پسماند بر حسب پاسکال در سه جهت اصلی طولی، عرضی و ضخامت لایه را پس از مرحله سرد شدن لایه تشکیل شده نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، اصل خود متعادل بودن تنش‌ها ثابت می‌شود. به این معنی که میان تنش‌های پسماند کششی و فشاری به وجود آمده، تعادل وجود دارد. همچنین توزیع و بزرگی تنش‌های پسماند در هر سه جهت اصلی بسیار بزرگ است و این مورد از به وجود آمدن گرادیان‌های حرارتی زیاد در طول فرآیند ذوب گزینشی با لیزر ناشی می‌شود.

آشکار و مشخص است که بزرگی مقادیر تنش‌های پسماند در جهت طولی بزرگ‌تر از جهات عرضی و ضخامت است. علت بزرگ بودن تنش‌های پسماند طولی نیز به جهت هم‌راستا بودن با شار حرارتی اعمال شده قابل توجیه است. همچنین مینیمم این تنش‌ها در جهت ضخامت لایه به وجود آمده‌اند. بنابراین تنش‌های

حاصل ۹۷/۱۳٪ است و در نتیجه توافق خوبی برقرار است. این اختلاف در نتایج نیز به ساده‌سازی‌ها و فرضیات در نظر گرفته شده در روش عددی برمی‌گردد. لازم به ذکر است که اندازه پهنای حوضچه مذاب به وجود آمده در تحقیق اوزل و همکاران مربوط به قسمت ابتدایی مسیر اسکن لیزر بوده و در نتیجه عدد مربوط به پهنای حوضچه مذاب در این شبیه‌سازی نیز مربوط به همین بخش از مسیر اسکن است. در حوضچه مذاب انواع مختلفی از نیرو به وجود می‌آید که می‌توان به نیروهای مارانگونی، بویانسی (ارشمیدسی) و جاذبه مذاب اشاره کرد. افزایش یا کاهش این نیروها، باعث تغییر شکل حوضچه مذاب شده که این موارد نیز به انتخاب بهینه پارامترهای فرآیند برمی‌گردد [۲۸-۳۰]. از آن‌جا که توزیع شدت انرژی لیزر در حوضچه یکنواخت نیست و در مرکز بیش‌تر از کناره‌ها می‌باشد، دما در مرکز بالا رفته و کشش سطحی و در نتیجه ویسکوزیته آن کم‌تر می‌شود. در نتیجه آن ماده تمایل به جاری شدن پیدا می‌کند و نیروهای مارانگونی باعث می‌شوند، ماده به سمت بیرون کشیده شود و سطح حوضچه مذاب پهن شود. از آن جایی که دما در قسمت مرکزی بالایی ماده بیش‌تر از قسمت مرکزی پایینی است، در نتیجه جرم حجمی قسمت بالایی کم‌تر می‌شود و مذابش سبک‌تر است. در این جا نیروی بویانسی یا ارشمیدسی به سمت بالا ایجاد می‌شود. نیروی جاذبه دیگری نیز داریم که به دلیل افزایش چگالی قسمت بالایی، به سمت پایین حوضچه اعمال می‌شود که به آن نیروی جاذبه مذاب می‌گویند. نیروهای بویانسی در عمق‌های حوضچه مذاب از ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر اثر چندانی ندارند ولی نیروهای مارانگونی به شدت اثر خود را بر جای می‌گذارند [۳۱].

جدول ۵- مقایسه اندازه پهنای حوضچه مذاب تشکیل شده در تحقیق حاضر با دیگر محققان

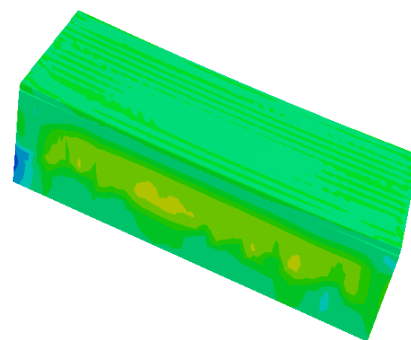
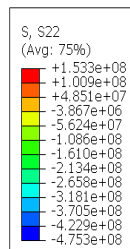
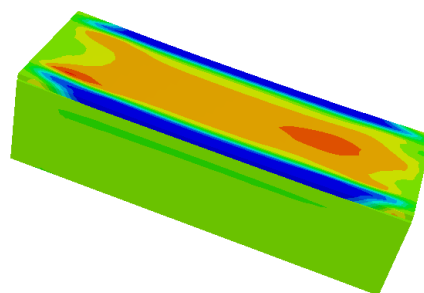
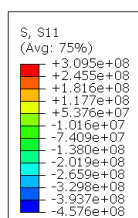
۱۳۶/۰	اندازه پهنای حوضچه مذاب تشکیل شده در تحقیق حاضر
۱۵۵/۰	اندازه پهنای حوضچه مذاب تشکیل شده توسط اوزل و همکاران [۱۷]
۱۳/۹۷٪	اختلاف

با بهینه کردن پارامترهای فرآیند و تاثیر آنها بر روی توزیع تنش‌های پسماند، می‌توان تنش‌های پسماند در قطعه نهایی را کم‌تر کرد و در نتیجه به بهبود عملکرد و خواص قطعه کمک زیادی کرد.

در این پژوهش اثر تغییر دو پارامتر مهم فرآیند یعنی توان لیزر و سرعت اسکن بر روی توزیع تنش‌های پسماند نیز نشان داده شد. بدین منظور مسیر دلخواهی از قسمت وسط لبه‌های نمونه انتخاب گردید. سپس نمودار تنش‌های پسماند در دو جهت محوری و محیطی برای دو حالت تغییر توان پرتو لیزر و سرعت اسکن در طول این مسیر حاصل گردید. شکل‌های ۸ و ۹ (الف) و (ب) نمودارهای مذکور را نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش روش تحقیق بیان شد، از سه توان لیزر مختلف ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات و همچنین سه سرعت اسکن ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه در این بخش استفاده شده است.

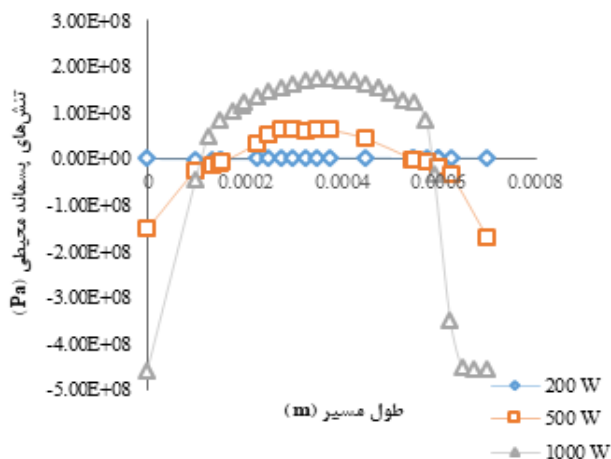
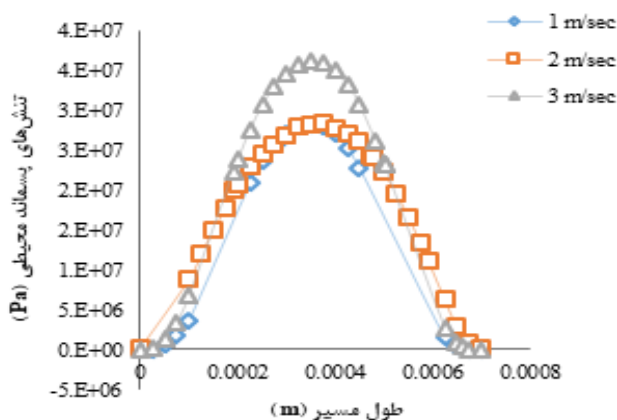
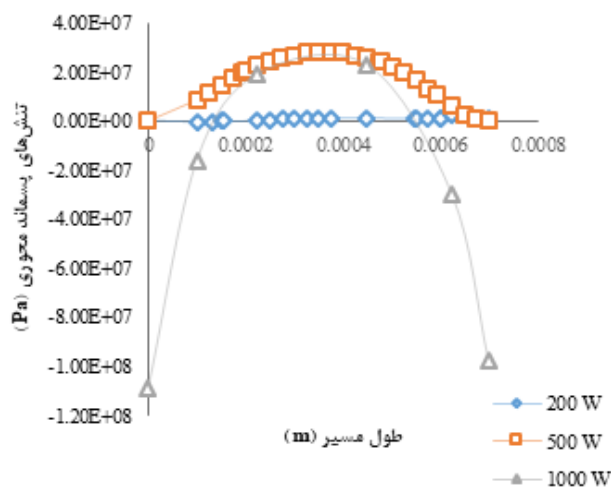
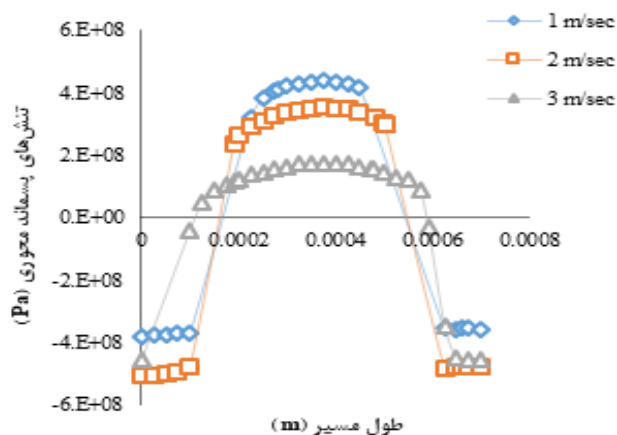
اصل خود متعادل بودن تنش‌های پسماند در این نمودارها آشکار می‌شود. شکل ۸ (الف) و (ب) نمودار تنش‌های پسماند محوری و محیطی را در طول مسیر در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در هر دو نمودار با افزایش توان لیزر، مقدار تنش‌های پسماند کششی و فشاری بیشتر می‌شود. دلیل این موضوع به افزایش گرادیان‌های حرارتی ناشی از افزایش توان لیزر و در نتیجه زیاد شدن انرژی مربوط می‌شود [۳۲]. این تاثیر برای تنش‌های پسماند فشاری بیشتر و چشم‌گیرتر است.

پسماند محوری و محیطی نقش اساسی در تعیین خواص و عملکرد نمونه نهایی دارند. ماکزیمم تنش‌های پسماند کششی در دو جهت محوری و محیطی به ترتیب ۳۰۹/۵ و ۱۵۳/۳ مگاپاسکال به دست آمده است. همچنین ماکزیمم تنش‌های پسماند فشاری نیز در این دو جهت به ترتیب ۴۵۷/۶ و ۴۷۵/۳ مگاپاسکال حاصل شده است.



شکل ۷- کانتورهای تنش پسماند به وجود آمده در سه جهت اصلی طولی، عرضی و ضخامت نمونه اینکونل ۶۲۵ پس از ساخت لایه اینکونل ایجاد شده

نکته قابل توجه دیگر این است که تنش‌های پسماند کششی عموماً در مرکز و تنش‌های پسماند فشاری در لبه‌های لایه ایجاد شده در هر سه جهت اصلی به وجود آمده‌اند.



شکل ۹- نمودار تنش‌های پسماند (الف) محوری و (ب) محیطی در برابر طول مسیر در سرعت اسکن‌های مختلف و توان ثابت ۲۰۰ W

شکل ۸- نمودار تنش‌های پسماند (الف) محوری و (ب) محیطی در برابر طول مسیر در توان‌های مختلف برای لیزر و سرعت اسکن ثابت ۱ m/sec

حالات متفاوت و پیچیده‌ای دارد و علت این امر را می‌توان به وجود آمدن میدان‌های حرارتی پیچیده حاصل از سرعت‌های اسکن مختلف ربط داد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یکی از مهم‌ترین روش‌های ساخت افزودنی، فرآیند ذوب گزینشی با لیزر به منظور ساخت نمونه اینکونل ۶۲۵ با استفاده از روش شبیه‌سازی به روش المان محدود انجام گرفته شد. سوپر آلیاژهای اینکونل ۶۲۵، به دلیل خواص فراوانشان از جمله مقاومت به خزش و خوردگی بالا، استفاده فراوانی در حوزه ساخت افزودنی دارند. از آن‌جا که در تحقیقات پیشین، توزیع تنش‌های

شکل ۹ (الف) و (ب)، نمودارهای تنش پسماند محوری و محیطی در طول مسیر با سرعت‌های اسکن مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۹ (الف) با کاهش سرعت اسکن تنش‌های پسماند محوری فشاری و کششی بیش‌تر شده است. با این حال در شکل ۹ (ب)، با کاهش سرعت اسکن برعکس حالت قبل تنش‌های پسماند محیطی کاهش یافته است. در نتیجه از این موضوع می‌توان چنین برداشت کرد که تاثیر سرعت‌های اسکن مختلف بر تنش‌های پسماند

که تنش‌های محیطی نتایج عکس داشته و در نتیجه از روی تغییرات سرعت اسکن نمی‌توان به افزایشی یا کاهش‌ی شدن تنش‌ها پی برد. این موضوع را نیز می‌توان به به‌وجود آمدن میدان‌های حرارتی پیچیده ناشی از تغییرات سرعت اسکن ربط داد

۵- منابع

- [1] Paul ,C.P ,.Ganesh ,P ,.Mishra ,S.K ,.Bhargava, P ,.Negi ,J.A .and Nath ,A.K“. 2007 ,.Investigating laser rapid manufacturing for Inconel 625-components.”*Optics & Laser Technology* ,(4)39 ,pp.800-805.
- [2] Shankar ,V ,.Rao ,K.B.S .and Mannan ,S.L., “2001 Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy .”*Journal of nuclear materials*(2-)288 , (3pp.222-232.
- [3] Bayley ,C .and Kopac ,M“. 2018 ,.The Implications of Additive Manufacturing on Canadian Armed Forces Operational Functions.”
- [4] Murr ,L.E ,.Martinez ,E ,.Amato ,K.N ,.Gaytan, S.M ,.Hernandez ,J ,.Ramirez ,D.A ,.Shindo ,P.W ,.Medina ,F .and Wicker ,R.B“. 2012 ,.Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing :examples of 3D materials science .”*Journal of Materials Research and technology* ,(1)1 ,pp.42-54.
- [5] Yan ,C ,.Hao ,L ,.Hussein ,A ,.Bubb ,S.L ,.Young, P .and Raymont ,D“. 2014 ,.Evaluation of light-weight Al-Si10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering .”*Journal of Materials Processing Technology* ,(4)214 ,pp.856-864.
- [6] Yan ,F ,.Xiong ,W .and Faierson ,E.J.2017 ,. “Grain structure control of additively manufactured metallic materials .”*Materials* ,(11)10 ,p.1260.
- [7] Hussein ,A ,.Hao ,L ,.Yan ,C .and Everson ,R., “2013 Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting .”*Materials & Design*,52 ,(1980-2015) pp.638-647.
- [8] Huang ,Y ,.Yang ,L.J ,.Du ,X.Z .and Yang ,Y.P.,

پسماند نمونه‌های سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ تحت فرآیند ذوب‌گزینشی با لیزر مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است، در این تحقیق فرآیند مذکور توسط روش شبیه‌سازی به روش المان محدود بر روی نمونه اینکونل انجام گرفته و توزیع تنش‌های پسماند و تاثیر پارامترهای فرآیند بر این تنش‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین توزیع دما و حوضچه مذاب به‌وجود آمده در این فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

۱- به دلیل ایجاد گرادیان‌های حرارتی زیاد در هر سه جهت اصلی محیطی، محوری و شعاعی توزیع بزرگی از تنش‌های پسماند در نمونه اینکونل ۶۲۵ ذوب‌گزینشی با لیزر به‌وجود آمده است.

۲- ماکزیمم تنش‌های پسماند در جهت طولی و مینیمم آن‌ها در جهت شعاعی یا ضخامت لایه شکل گرفته است و در نتیجه تنش‌های پسماند در جهات محوری و محیطی تعیین‌کننده عملکرد و خواص نمونه‌های نهایی است.

۳- ماکزیمم تنش‌های پسماند فشاری در دو جهت محوری و محیطی به ترتیب ۴۵۷/۶ مگاپاسکال و ۴۷۵/۳ مگاپاسکال و ماکزیمم تنش‌های پسماند کششی ۳۰۹/۵ مگاپاسکال و ۱۵۳/۳ مگاپاسکال به دست آمده‌اند.

۴- تنش‌های پسماند فشاری عموماً در لبه‌های صفحه و تنش‌های پسماند کششی در مرکز آن به‌وجود آمده‌اند.

۵- نتایج حاصل از تغییرات توان لیزر و سرعت اسکن بر روی توزیع تنش‌های پسماند نیز نشان داد که با افزایش توان لیزر، تنش‌های پسماند در هر دو جهت محوری و محیطی افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل زیاد شدن گرادیان‌های حرارتی ایجاد شده ناشی از افزایش توان لیزر است. همچنین با کاهش سرعت اسکن نیز تنش‌های محوری افزایش یافته است. این در حالی است

- ual stress fields in selective laser melting ."International Journal of Mechanical Sciences ,136 ,pp.24-35.
- [17] Mishurova ,T ,Artzt ,K ,Haubrich ,J ,Requena, G .and Bruno ,G .2019 ,.New aspects about the search for the most relevant parameters optimizing SLM materials. Additive Manufacturing ,25 ,pp.325-334.
- [18] Cheng ,B ,Shrestha ,S .and Chou ,K.2016 ,. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting .Additive Manufacturing, ,12pp.240-251.
- [19] Wu ,A.S ,Brown ,D.W ,Kumar ,M ,Gallegos, G.F .and King ,W.E .2014 ,.An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel .Metallurgical and Materials Transactions A ,45 ,pp.6260-6270.
- [20] Xu ,R ,Wang ,W ,Wang ,K .and Dai ,Q.2023 ,. Finite element simulation of residual stress distribution during selective laser melting of Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy. Materials Today Communications ,35 ,p.105571.
- [21] Mohan ,N ,Senthil ,P ,Vinodh ,S .and Jayanth, N" .2017 ,.A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process ."Virtual and Physical Prototyping,(1)12 , pp.47-59.
- [22] Chua ,C.K .and Leong ,K.F3" .2014 ,.D Printing and additive manufacturing :Principles and applications) with companion media pack-(of rapid prototyping." World Scientific Publishing Company.
- [23] Withers ,P.J .and Bhadeshia ,H.K.D.H.2001 ,. "Residual stress ."Part-2 Nature and origins ."Materials science and technology ,(4)17 ,pp.366-375.
- [24] Special Metals INCONEL ®Alloy[625 on-line]site .at:https://www.matweb.com/search/data-sheet_print.aspx?matguid4=a194f59f35a427dbc5009f-043349cb5 [Accessed 15 Jan.2023] .
- [25] Özel ,T ,Arisoy ,Y.M .and Criales ,L.E.۲۰۱۶ ,. "Computational simulation of thermal and spattering phenomena and microstructure in selective laser melting of inconel ."۶۲۵ Physics Procedia ,83 ,pp.1435-1443.
- " .2016Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting ."International Journal of Thermal Sciences ,104 ,pp.146-157.
- [9] Salimianrizi ,A ,Foroozmehr ,E ,Badrossamay ,M .and Farrokhpour ,H .2016 ,.Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 .Optics and Lasers in Engineering ,77 ,pp112-. .117
- [10] Gharehbaghi, H., 2018. Experimental measurements and finite element residual stress caused by welding aluminum sheets and investigating its effect on natural frequency values. Modares Mechanical Engineering, 18(4), pp.174-180. [In Persian]
- [11] Aghababaei ,A .and Honarpisheh ,M .2023 ,.Experimental and numerical investigation of residual stress distribution in Al 6061-tubes under using tubular channel angular pressing process by new trapezoidal channel .The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,(4)58 , pp.332-342.
- [12] Baraheni ,M ,Tabatabaeian ,A ,Amini ,S .and Ghasemi ,A.R .2019 ,.Parametric analysis of delamination in GFRP composite profiles by performing rotary ultrasonic drilling approach :Experimental and statistical study .Composites Part B :Engineering ,172 ,pp.612-620.
- [13] Baraheni, M., Tabatabaeian, A., Ghasemi, A. and Amini S. 2020. Enhancement of Machining Quality in Polymeric CNT-Reinforced Composites Subjected to Thermal Fatigue. Modares Mechanical Engineering, 20(7), pp. 1731-1740. [In Persian]
- [14] Mercelis ,P .and Kruth ,J.P" .2006 ,.Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting ."Rapid prototyping journal.
- [15] Song ,B ,Dong ,S ,Liao ,H .and Coddet ,C.2012 ,. "Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering ."The international journal of advanced manufacturing technology ,61 ,pp.967-974.
- [16] Li ,Y ,Zhou ,K ,Tan ,P ,Tor ,S.B ,Chua ,C.K. and Leong ,K.F" .2018 ,.Modeling temperature and resid-

- [26] Liu ,H .2014 ,.Numerical analysis of thermal stress and deformation in multi-layer laser metal deposition process .Missouri University of Science and Technology.
- [27] Mukherjee ,T ,.Zhang ,W .and DebRoy ,T.2017 ,. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing .Computational Materials Science ,126 ,pp.360-372.
- [28] Chen ,D ,.Wang ,P ,.Pan ,R ,.Zha ,C ,.Fan ,J ,.Liang ,D .and Zhao ,Y .2021 ,.Characteristics of metal specimens formed by selective laser melting :a state-of-the-art review .Journal of Materials Engineering and Performance ,30 ,pp.7073-7100.
- [29] Yu ,W.H ,.Sing ,S.L ,.Chua ,C.K ,.Kuo ,C.N .and Tian ,X.L .2019 ,.Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting :A state of the art review .Progress in Materials Science ,104 ,pp330-.379
- [30] Diegel ,O ,.Nordin ,A .and Motte ,D“ .2019 ,.A practical guide to design for additive manufacturing)”pp. (978-981Singapore :Springer Singapore.
- [31] Bouabbou ,A .and Vaudreuil ,S .2022 ,.Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation :a review .Virtual and Physical Prototyping ,(3)17 ,pp.543-562.
- [32] Li ,Y .and Gu ,D .2014 ,.Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder :Numerical simulation and experimental study .Additive Manufacturing ,1 ,pp.99-109.