



## شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند ذوب انتخابی با لیزر برای ساخت یک قطعه نمونه تحت شرایط تکیه گاهی مختلف

مهدی عین بیگی<sup>1</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>2</sup>، جمال ارغوانی هادی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* صندوق پستی 11365-11155، arghavani@sharif.edu، تهران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 دی 1395

پذیرش: 14 اسفند 1395

ارائه در سایت: 19 فروردین 1396

کلید واژگان:

ساخت افزودنی

فرآیند ذوب انتخابی با لیزر

شبیه سازی اجزاء محدود

شرایط تکیه گاهی

تنش های پسماند حرارتی

روش های ساخت افزودنی و یا چاپ سه بعدی به صورت روزافزون در ساخت قطعات سه بعدی مورد توجه قرار گرفته اند و در سال های اخیر توجه ویژه ای به آن دسته از روش هایی شده است که با مواد فلزی کار می کنند. فرآیند ذوب انتخابی با لیزر یکی از روش های ساخت افزودنی در تولید قطعات فلزی محسوب می شود. این روش به صورت خاص برای تولید قطعات فلزی که نیاز است بیش از 99% چگال باشند، توسعه داده شد. در این روش سطح لایه ی پودر فلزی توسط لیزر مطابق یک الگوی مشخص اسکن شده و در محل تابش لیزر، یک حوضچه مذاب موضعی (انتخابی) شکل می گیرد که پس از انجماد یک لایه چگال را نتیجه می دهد. در این پژوهش شبیه سازی نیمه کویل ترمومکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر به روش اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس انجام می شود. برای شبیه سازی شار متحرک لیزر و بروزرسانی خواص مادی، از پودر به جامد چگال، از قابلیت زیر برنامه نویسی در نرم افزار استفاده می شود. بررسی توزیع تنش های پسماند و اعوجاج قطعه ساخته شده به روش ذوب انتخابی با لیزر هدف اصلی از این شبیه سازی است. نتایج که برای دو شرط مرزی مکانیکی مختلف ارائه شده است، نشان می دهد هنگامی که کف لایه گیردار است، سطح فوقانی لایه ساخته شده به صورت مقعر تغییر شکل می دهد و برای حالتی که وجوه جانبی لایه دارای تکیه گاه های ساده باشند و سطح زیرین آن آزاد باشد، قطعه تاب برمی دارد.

## Finite element simulation of selective laser melting process for fabrication of a sample part under various support conditions

Mehdi Eynbeygui<sup>1</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>2</sup>, Jamal Arghavani<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2-Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11365-11155 Tehran, Iran, arghavani@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 January 2017  
Accepted 04 March 2017  
Available Online 08 April 2017

#### Keywords:

Additive manufacturing  
Selective laser melting process  
Finite element simulation  
Support conditions  
Thermal residual stresses

### ABSTRACT

Additive manufacturing methods and/or 3D printing have become increasingly popular with particular emphasis on methods used for metallic materials. Selective Laser Melting (SLM) process is one of the additive manufacturing methods for production of metallic parts. The method was developed specifically to process metal parts that need to be more than 99 percent dense. In this method, according to a predefined pattern, the top surface of the powder layer is scanned by the laser and a local (selective) melt pool is produced in the place of the laser spot which results in a fully dense layer after solidification. In this study, a semi-coupled thermo-mechanical simulation of SLM process is carried out in ABAQUS finite element software. In order to simulate the moving heat flux and update material properties from the powder to the dense solid, the ability of the software for employing user-defined subroutines is used. Investigation of the residual stress distribution and distortion of a part built using SLM process are the main objectives of this simulation. Results presented for two different mechanical boundary conditions show that when the bottom face of the layer is clamped, the top face of the built layer deforms in a concave shape, while the lateral faces of the layer have simply-supported boundary conditions and the bottom face of the layer is free, the part is warped.

### 1- مقدمه

قطعه به صورت لایه لایه تکمیل می گردد و شکل نهایی قطعه ساخته می شود. هر اندازه ضخامت لایه ها کوچک تر باشد، دقت ساخت قطعه و کیفیت سطح نهایی بهبود می یابد. تفاوت اصلی میان روش های مختلف ساخت به روش افزودنی در نوع مواد مورد استفاده، چگونگی ساخت لایه ها و نحوه اتصال آن ها به یکدیگر است. بسیاری از صاحب نظران از فناوری ساخت افزودنی به عنوان

ساخت افزودنی<sup>1</sup> و یا آن چه از آن به تازگی به عنوان ساخت به وسیله چاپگرهای سه بعدی<sup>2</sup> یاد می شود، نوعی روش ساخت است که در آن ساخت

<sup>1</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>2</sup> 3D printing

#### Please cite this article using:

M. Eynbeygui, J. Shahbazi Karami, J. Arghavani, Finite element simulation of selective laser melting process for fabrication of a sample part under various support conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 143-153, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

وجود می‌آید. تنش‌های پسماند سبب اعوجاج قطعه و شکل حوضچه مذاب، صافی سطح نهایی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به نکاتی که اشاره شد بررسی رفتار ترمومکانیکی قطعه در فرآیند ذوب انتخابی با لیزر حائز اهمیت خواهد بود. مدل‌سازی این فرآیند با استفاده از روش‌های عددی چون اجزاء محدود می‌تواند درک روشن‌تری از چگونگی رخداد پدیده‌های متأثر از انتقال حرارت فراهم کند.

دای و شا در سال 2002 میلادی [5] شبیه‌سازی اعوجاج قطعه ساخته‌شده به روش هم‌جوشی انتخابی با لیزر<sup>4</sup> را با استفاده از روش اجزاء محدود انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش با در نظر گرفتن چند مسیر مختلف برای اسکن لیزر اثر این مورد را در تغییر شکل نهایی قطعه مربعی که نقاط گوشه‌ای آن مقید شده بود، بررسی کردند. در توسعه این پژوهش آن‌ها در سال 2004 میلادی [6] اثرات هم‌جوشی با لیزر را برای ساخت قطعه‌ای که از دو ماده با جنس‌های مختلف تشکیل شده است مورد بررسی قرار دادند. پاتیل و یاداو در سال 2007 میلادی [7] به شبیه‌سازی حرارتی فرآیند هم‌جوشی پودرهای فلزی و بررسی اثر توزیع حرارت در اعوجاج قطعه نهایی پرداختند و نتایج خود را با برخی نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه کردند. آن‌ها در این پژوهش اثر پارامترهای متعددی توان لیزر، شعاع باریکه لیزر، مدت‌زمان خاموش و روشن شدن لیزر را بر توزیع حرارت در قطعه مورد مطالعه قرار دادند. دانگ و همکاران در سال 2009 [8] یک مدل اجزاء محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی حرارتی هم‌جوشی انتخابی با لیزر ارائه کردند. آن‌ها در این شبیه‌سازی با استفاده از خواص حرارتی وابسته به دما به بررسی فرآیند تغییر فاز پودرهای پلی کربنات به جامد چگال پرداختند. رابرت و همکاران در سال 2009 [9] شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر در مورد ساخت 5 لایه از پودر فلز Ti-6Al-4V را با تکیه بر روش اجزاء محدود ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از شیوه تولد و مرگ المان<sup>5</sup> فرآیند فیزیکی لایه‌نگاری را شبیه‌سازی کردند. احمد حسین و همکاران در سال 2013 [10] شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند ذوب انتخابی با لیزر را برای یک تک لایه از پودر فولاد ضدزنگ 316L انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش برای حالتی که تک لایه مورد نظر هیچ‌گونه شرط مرزی مکانیکی ندارد به مطالعه تنش‌های حرارتی حاصل از گرادیان‌های دمایی وابسته به زمان پرداختند. فو و گواو در سال 2014 [11]، به بررسی و شبیه‌سازی انتقال حرارت در فرآیند ذوب انتخابی با لیزر پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود شکل حوضچه مذاب در محل تابش لیزر روی پودر فلز را بررسی کردند و نحوه توزیع دما در مسیرهای مختلف روی قطعه را مورد مطالعه قرار دادند. رفتار بارهای حرارتی سیکلی که به واسطه لایه‌گذاری و سپس اسکن مجدد لیزر ایجاد می‌شود را شبیه‌سازی کردند. از دیگر پژوهش‌هایی که به تازگی در راستای شناسایی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر انجام شده است، می‌توان به پژوهش فاطمی و زمانی‌اشنی [12] اشاره کرد که به‌صورت تجربی تغییرات خواص حرارتی پودر فلز نسبت به چگالی نسبی آن را مورد مطالعه قرار دادند و مقدار بهینه چگالی نسبی برای داشتن محصول نهایی باکیفیت را 46% گزارش کردند.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در نوشته‌های محققین پیشین بررسی رفتار ترمومکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر بیشتر معطوف به مدل‌سازی رفتار حرارتی شده و بررسی‌های اندکی در خصوص مدل‌سازی رفتار مکانیکی آن در شرایط مرزی مختلف صورت گرفته است. ضمن این‌که مدل‌های

انقلاب سوم صنعتی یاد می‌کنند و آینده‌پژوهشی در خصوص این فناوری به‌گونه‌ای است که حتی برخی از صنعتگران معتقدند که با پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه ساخت افزودنی و رسیدن به بلوغ در آن، ساخت به شیوه‌ای که امروزه انجام می‌گیرد، دیگر وجود نخواهد داشت و ساخت به این شیوه سبکی نو در طراحی محصول و بازار کسب‌وکار ایجاد می‌کند [2,1].

یافتن مبدأ زمانی دقیق فناوری‌های مرتبط با ساخت افزودنی کار آسانی نیست، ولی می‌توان بیان کرد که آغاز فعالیت‌های بارز در این حوزه به سال‌های بین 1950-1960 میلادی برمی‌گردد. ظهور رایانه‌ها و ارتقاء آن‌ها، توسعه لیزرها، کنترلرها و دیگر تجهیزات مرتبط با فناوری ساخت افزودنی، تاریخ پیدایش این فناوری را به دهه 1980 میلادی مرتبط می‌کند. با تحقیق و توسعه در اوایل دهه 1980 به‌صورت موازی اختراعاتی در خصوص روش ساخت افزودنی در کشورهای مختلف به ثبت رسید که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کشور ژاپن، توسط موراتانی، کشور فرانسه، توسط آندره و همکاران و کشور ایالات‌متحده آمریکا توسط مسترس و چاک هال اشاره کرد [1]. در تمامی این اختراعات نکته‌ای که به‌صورت مشترک مورد توجه قرار گرفته بود، ساخت یک قطعه سه‌بعدی با افزودن مواد به‌صورت لایه به لایه است. شروع فناوری چاپ سه‌بعدی بر بستری از پودر توسط گروهی از محققین دانشگاه ویلیتی<sup>1</sup> در سال 1989 ثبت شد [1] و مقاله پژوهشی مرتبط با آن در سال 1992 به چاپ رسید [3]. در این شیوه آن‌ها برای اتصال پودرها از یک ماده چسبناک که توسط نازل روی پودرها پاشیده می‌شود، استفاده کردند. امروزه خیلی از شرکت‌های تولیدکننده ماشین‌های ساخت افزودنی با استفاده از شیوه‌هایی مبتنی بر این اختراع فعالیت خود را توسعه داده‌اند.

روش ذوب انتخابی با لیزر<sup>2</sup> یکی از شیوه‌های ساخت افزودنی است که عموماً برای ساخت قطعات فلزی استفاده می‌شود. در این شیوه بستری از پودر فلز فراهم شده و از لیزر برای اتصال آن‌ها و ایجاد لایه استفاده می‌شود [1]. این روش ساخت چندین بخش و مکانیزم اساسی دارد؛ حضور یک یا چند منبع حرارتی که عمل پیش گرم کردن و ذوب میان پودرها را انجام دهند، روشی برای کنترل و هدایت منبع حرارتی لیزر و مکانیزمی برای پخش پودر روی بستر ساخت اساسی‌ترین بخش‌های ماشین‌های ذوب انتخابی لیزر محسوب می‌شوند. اساس کار این روش بدین‌صورت است که لایه‌ای نازک از پودر بر صفحه دستگاه توسط یک رولر دوران-معکوس<sup>3</sup> پخش شده و به درون اتاقک حاوی گاز نیتروژن یا آرگون فرستاده می‌شود. در این اتاقک پودرهای فلزی پیش‌گرم می‌شوند. زمانی که ذرات به میزان کافی گرم شدند، باریکه لیزر مستقیماً روی بستر پودر می‌تابد و با حرکت کردن در موقعیت‌های برنامه‌ریزی‌شده، سطح پودر را اسکن می‌کند. در محل تابش لیزر یک حوضچه میکرونی مذاب تشکیل می‌شود که سبب اتصال پودرها به هم و تشکیل لایه سخت از جامد می‌شود. پس از این‌که ساخت لایه اول به اتمام رسید، صفحه ساخت دستگاه به اندازه ضخامت یک‌لایه پایین می‌آید و مجدد پودر پاشیده می‌شود و عملیات ساخت از سر گرفته خواهد شد. این عمل تکرار می‌شود تا هنگامی که لایه‌ها به اتمام برسند و قطعه تولید شود [4].

شکل حوضچه مذاب و توزیع درجه حرارت در کیفیت قطعه ساخته‌شده به روش ذوب انتخابی با لیزر تأثیر بسیاری دارد. در این شیوه که قطعه دائم در معرض حرارت قرار گرفته و سپس خنک کاری می‌شود به دلیل رویارویی با بارگذاری سیکلی و نامتقارن مقادیر قابل‌توجهی از تنش‌های پسماند در آن به

<sup>4</sup> Selective laser sintering (SLS)<sup>5</sup> Element death and birth<sup>1</sup> MIT<sup>2</sup> Selective laser melting (SLM)<sup>3</sup> Counter-rotating powder leveling roller

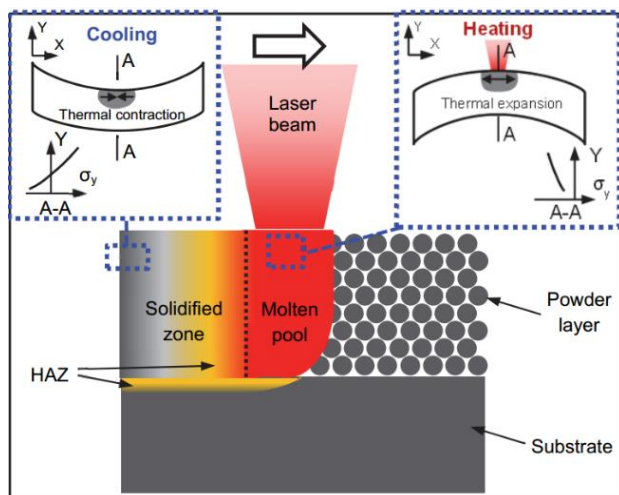


Fig. 1 Formation of the thermal residual stresses in selective laser melting process [11]

شکل 1 شکل‌گیری تنش‌های پسماند حرارتی در فرآیند ذوب انتخابی با لیزر [11]

محصور شده است یک تنش فشاری را در قطعه به وجود می‌آورد. اگر این تنش بیش از حد تسلیم ماده باشد قطعه دچار اعوجاج می‌شود. در ادامه ناحیه فوقانی پس از دور شدن لیزر و سرد شدن ناحیه ذوب شروع به انقباض می‌کند که نتیجه آن ایجاد تنش پسماند کششی است. تنش‌های پسماند کششی در لایه در هر مرحله اسکن روی هم جمع می‌شوند که خود می‌تواند عامل ایجاد ترک و گسیختگی در قطعه شود. علاوه بر این حضور تنش‌های پسماند کششی سبب اعوجاج قطعه خواهد شد به گونه‌ای که سطح فوقانی لایه نسبت به سطح تحتانی کوچک‌تر شده و انحنا ی قطعه به سمت لیزر (سطح مقعر) را موجب می‌شود. در این پژوهش چند مورد اساسی جهت مدل‌سازی اجزاء محدود فرآیند ذوب انتخابی با لیزر مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه هر یک از این موارد بررسی خواهند شد.

## 2-1- مدل‌سازی شار حرارتی ناشی از لیزر

مدل گوسی از رایج‌ترین روابط ریاضی است که معمولاً برای مدل‌سازی توزیع شار حرارتی ناشی از لیزر استفاده و به صورت رابطه (1) بیان می‌شود.

$$q(r) = \left( \frac{AP}{\pi r_0^2} \right) \exp \left( \frac{-Br^2}{r_0^2} \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا  $q$  بزرگی شار حرارتی لیزر،  $A$  ضریب جذب تشعشعات لیزر توسط سطح پودر،  $P$  توان لیزر،  $r_0$  شعاع تابش لیزر روی سطح و  $B$  ضریب شکل توزیع گوسی است که معمولاً مقدار آن 2 است.  $r$  متغیری است که فاصله شعاعی از مرکز تابش لیزر را نشان می‌دهد. برای ایجاد شار متحرک از زیربرنامه دی‌فلاکس<sup>6</sup> در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

زیربرنامه دی‌فلاکس هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هدف ایجاد شار حرارتی یا جرمی با توزیع غیرهمگن به ترتیب در مسئله انتقال حرارت و یا انتقال جرم باشد. این شار می‌تواند به عنوان نمونه تابعی از موقعیت مکانی نقاط انتگرال‌گیری، زمان، دما، شماره المان و یا شماره نقطه انتگرال‌گیری باشد. ساختار کلی زیر برنامه دی‌فلاکس را می‌توان از راهنمای نرم‌افزار آباکوس یافت. درایه اول آرایه Flux مهم‌ترین متغیری است که در زیربرنامه دی‌فلاکس باید مقداردهی شود. (1) Flux مقدار شار حرارتی را تعیین می‌کند. با تعیین کردن مدل تابش لیزر یعنی معادله (1) ملاحظه می‌شود که وضعیت

حرارتی با فرضیات ساده‌شونده زیادی همراه بودند.

در پژوهش کنونی هدف مدل‌سازی رفتار ترمومکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر است که به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار این پدیده از ابزار اجزاء محدود برای حل عددی معادلات آن استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی اجزاء محدود از نرم‌افزار آباکوس<sup>1</sup> استفاده شده است. جهت ارائه شبیه‌سازی دقیق‌تر این فرآیند نسبت به پژوهش‌های پیشین از خواص وابسته به دما و دو زیربرنامه برای مدل‌سازی رفتار شار حرارتی متحرک لیزر و برورسانی خواص مادی از جامد پودری به جامد توپر استفاده شده است. در ادامه در بخش 2 مدل‌سازی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر تشریح شده و سپس در بخش 3 روند شبیه‌سازی مورد نظر اعتبارسنجی خواهد شد. در انتها در بخش 4 نتایج ترمومکانیکی فرآیند ذوب انتخابی برای یک تک‌لایه و برای دو شرط مرزی مکانیکی مختلف بررسی می‌شود.

## 2-2- مدل‌سازی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر

همان‌طور که پیشتر در بخش 1 بیان شد در فرآیند ساخت به روش ذوب انتخابی، لیزر سطح لایه پودر را اسکن می‌کند؛ طوری که در محل تابش لیزر یک حوضچه میکرونی مذاب تشکیل می‌شود. ابعاد حوضچه مذاب به شدت تحت تأثیر مقدار انرژی در واحد حجمی است که اعمال می‌شود. این مقدار انرژی را می‌توان از طریق پارامترهای لیزر چون قدرت و سرعت اسکن لیزر کنترل کرد. حوضچه مذاب با افزایش سرعت اسکن لیزر کشیده‌تر می‌شود؛ طوری که نسبت طول به قطر آن افزایش می‌یابد. اگر نسبت یادشده از عدد  $\pi = 3.14$  بیشتر شود حوضچه مذاب پس از انجماد گلوله‌هایی شبه کروی را نتیجه می‌دهد که اصطلاحاً عیبی به نام گلوله‌ای شدن<sup>2</sup> به وقوع پیوسته است [13]. این عیب یک پارچگی و صافی سطح قطعه نهایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای جلوگیری از رخداد این پدیده سرعت اسکن لیزر باید به درستی تنظیم شود [14].

مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت یعنی رسانش حرارتی<sup>3</sup>، جابه‌جایی<sup>4</sup> و تابش<sup>5</sup> در توزیع حرارت در فرآیند تابش لیزر روی سطح پودر مؤثر است. نکته حائز اهمیت وضعیت انتقال حرارت در لایه پودر و لایه جامد توپر بوده که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باهم متفاوت است. دلیل نخست جذب حرارت ناشی از لیزر در بستر پودر به دلیل فرم دانه‌ای آن نسبت به لایه جامد بیشتر است و دیگر این که ضریب انتقال حرارت رسانشی در بستر پودر نسبت به سطح جامد توپر پایین است. رسانش حرارتی پایین در پودر ناشی از به دام افتادن هوا در بین ذرات پودر و وجود سطح تماس اندک میان ذرات است [15]. مواردی که بیان شد موجب می‌شود تا مقدار رسانش حرارتی و توزیع حرارت در و نه‌بایت کیفیت سطح نهایی قطعه با تغییر قطر ذرات پودر و تغییر تراکم پودرها تغییر کند [12]. شکل 1 نحوه شکل‌گیری لایه جامد و چگونگی رخداد تنش پسماند حرارتی را نشان می‌دهد. در فرآیند ذوب انتخابی، دمای سطح پودر در محل تابش لیزر به‌سرعت افزایش می‌یابد و از آن جایی که پودرهای مجاور و زیرین دارای ضریب انتقال حرارت بسیار کوچکی هستند، گرادیان‌های حرارتی شدیدی بین نقطه تابش با نقاط مجاور پدیدار می‌شود [13]. اعمال یک گرادیان حرارتی شدید در راستای ضخامت لایه موجب می‌شود تا سطح فوقانی لایه پودر منبسط شود و کرنش حرارتی این ناحیه که از اطراف

<sup>1</sup> ABAQUS

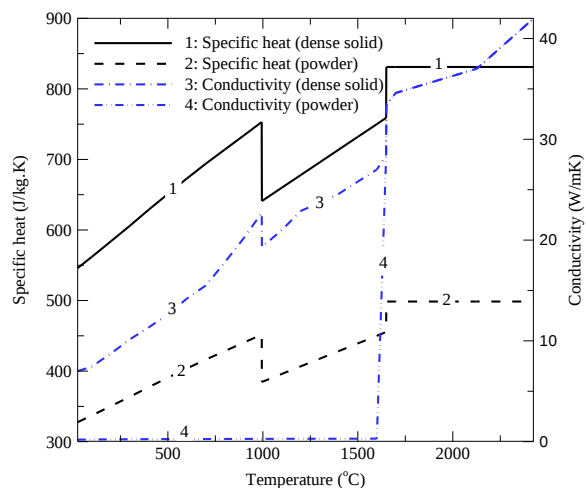
<sup>2</sup> Balling effect

<sup>3</sup> Conduction

<sup>4</sup> Convection

<sup>5</sup> Radiation

<sup>6</sup> DFLUX



**Fig. 3** Variation of specific heat and thermal conductivity coefficients versus temperature for Ti-6Al-4V alloy in dense solid phase and powder phase with 40 percent porosity [9, 16]

شکل 3 تغییرات ضرایب حرارت مخصوص و رسانش حرارتی با دما برای آلیاژ فلزی Ti-6Al-4V در فاز جامد توپر و فاز پودر با تخلخل 40 درصد [9, 16]

**جدول 1** خواص ترمومکانیکی آلیاژ فلزی Ti-6Al-4V در فاز جامد توپر و فاز پودر با تخلخل 40% [17,16,11,9]

**Table 1** Thermo-mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy in dense solid phase and powder phase with 40 percent porosity [9,11,16,17]

| خواص ترمومکانیکی                     | جامد توپر            | پودر                 |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| مدول الاستیک (Pa)                    | $1.1 \times 10^{11}$ | $1.1 \times 10^{10}$ |
| ضریب پواسون (m/m)                    | 0.41                 | 0.41                 |
| حد تسلیم (Pa)                        | $8.25 \times 10^8$   | $8.25 \times 10^7$   |
| دمای کمینه ذوب <sup>(*)</sup> (°C)   | 1605                 | 1605                 |
| دمای بیشینه ذوب <sup>(**)</sup> (°C) | 1650                 | 1650                 |
| گرمای نهان ذوب (J/kg)                | 286000               | 286000               |
| ضریب انبساط حرارتی (1/°C)            | $1.1 \times 10^{-5}$ | $6.6 \times 10^{-6}$ |

<sup>(\*)</sup> دمای کمینه ذوب یا Solidus temperature

<sup>(\*\*)</sup> دمای بیشینه ذوب یا Liquidus temperature

رفتار ماده در حالت پلاستیک، پلاستیک کامل<sup>1</sup> فرض شده است. در مورد سایر پارامترهای فیزیکی که مربوط به اندرکنش های بین سطح پودر و هوا است مقدار  $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  برای ضریب جابه جایی حرارتی، مقدار 0.76 برای ضریب جذب تشعشعات لیزر (پارامتر A در رابطه (1)) و مقدار 0.19 برای ضریب نشر<sup>2</sup> (گسیل) سطح جسم در نظر گرفته شده است.

### 3-2- الگوریتم بروزرسانی خواص مادی

هنگامی که لیزر سطح لایه پودر را اسکن می کند در محل تابش لیزر و نواحی مجاور آن پودرها به دلیل حرارت بالا ذوب شده و با اتصال آنها به یکدیگر حفرات حذف شده و یک جامد توپر با خواص متفاوت حاصل خواهد شد؛ بنابراین با عبور لیزر از سطح پودر و ذوب کردن موضعی محل تابش نیاز است تا خواص مادی از پودر به ماده چگال بروزرسانی شود. این کار در نرم افزار آباکوس از طریق زیربرنامه USDFLD که برای تعریف متغیرهای میدان استفاده می شود، قابل انجام است.

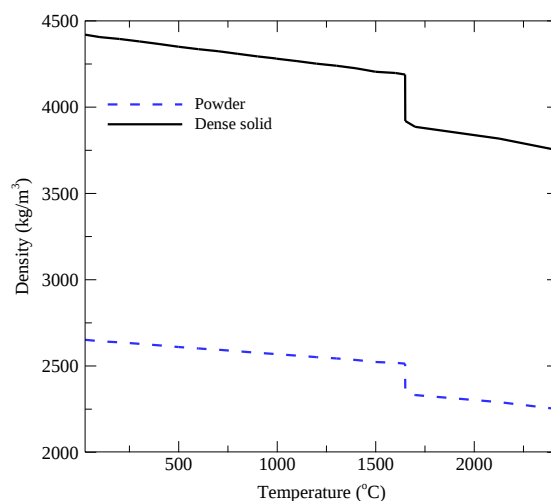
زیربرنامه USDFLD این امکان را در اختیار کاربر قرار می دهد تا

شار حرارتی به مختصات فضایی وابسته است. این مختصات را می توان به سرعت و زمان ارتباط داد و یک شار متحرک با زمان به عنوان مدلی از حرکت لیزر ایجاد کرد. تمامی متغیرهای رابطه (1) در زیر برنامه دی فلاکس باید تعریف و مقدار دهی شوند.

### 2-2- تعیین خواص مادی و پارامترهای فیزیکی مسئله

با توجه به این که در فرآیند ساخت ذوب انتخابی با لیزر تغییرات دمایی شدیدی اتفاق می افتد باید ملاحظات دمایی در تعیین خواص ماده در نظر گرفته شوند. آلیاژ پایه تیتانیوم Ti-6Al-4V ماده مورد بررسی در این پژوهش است که یکی از مواد رایج در بحث سازه های هوافضایی و ساخت تجهیزات پزشکی محسوب می شود. از میان خواص ترموفیزیکی ماده برخی نسبت به دما وابستگی شدیدی دارند و از این رو برای داشتن یک شبیه سازی واقعی باید این گونه موارد به درستی مورد توجه قرار گیرند. در بحث شبیه سازی حرارتی هنگامی که دما به اندازه ای باشد که تغییر فاز در ماده مشاهده شود ضرایب رسانش حرارتی و گرمای ویژه تغییرات شدیدی با دما دارند. نکته دیگر تفاوت ضریب رسانش حرارتی برای پودر و جامد توپر است. ضریب رسانش حرارتی برای پودرهای فلزی با قطر مؤثر بین  $10 - 50 \mu\text{m}$  که هوا در میان حفرات آنها به دام افتاده معمولاً حدود  $0.1 - 0.2 \text{ W/mK}$  است [9]. با این حال این ضریب با ذوب شدن پودر، حذف هوا و برقراری پیوستگی به صورت ناگهانی افزایش می یابد. این نکات باید در شبیه سازی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر لحاظ شود. شکل های 2 و 3 خواص فیزیکی - حرارتی مربوط به جامد توپر و پودر آلیاژ فلزی Ti-6Al-4V را نشان می دهد. در این پژوهش برای پودر فلز مقدار تخلخل 40% لحاظ شده است.

سایر خواص مکانیکی و حرارتی مربوط به فاز پودر و جامد توپر آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول 1 ارائه شدند. اثرات وابستگی به دما برای کمیت های معرفی شده در این جدول لحاظ نشده است. در جدول 1 مقدار مدول الاستیک و حد تسلیم پلاستیک فاز جامد توپر یک مرتبه بزرگ تر از حالت جامد پودری فرض شده است.



**Fig. 2** Variation of density versus temperature for Ti-6Al-4V alloy in dense solid phase and powder phase with 40 percent porosity [16]

شکل 2 تغییرات چگالی با دما برای آلیاژ فلزی Ti-6Al-4V در فاز جامد توپر و فاز پودر با تخلخل 40% [16]

<sup>1</sup> Perfectly-plastic

<sup>2</sup> Emissivity

توپر، در قسمت تعداد متغیرهای میدان<sup>6</sup> عدد 1 تنظیم می‌شود. نحوه درج داده‌ها به این صورت است که به عنوان مثال سه ستون داده برای خاصیت چگالی وابسته به دما باید وارد شود. ستون اول چگالی، ستون دوم دما و ستون سوم نوع فاز را مشخص می‌کند. در ستون سوم ابتدا اعداد 0 نمایانگر فاز پودر، و سپس 1 نمایانگر فاز جامد توپر نوشته می‌شوند. گزینه میدان تعریف‌شده توسط کاربر<sup>7</sup> باید از منوی عمومی<sup>8</sup> انتخاب شود. این گزینه استفاده از زیربرنامه USDFLD را برای حل گر مسئله آشکار می‌کند. پس از تکمیل اطلاعات خواص مادی با ایجاد بخش<sup>9</sup> جدید خواص به مدل هندسی مورد نظر اختصاص داده می‌شود (مرحله 2).

در ادامه ماژول مونتاژ<sup>10</sup> فعال می‌شود، ولی از آن جایی که مدل هندسی مسئله تنها شامل یک قطعه است نیاز به مونتاژ و یا برهم‌نهی وجود ندارد (مرحله 3).

از آن جایی که روش مورد نظر در این پژوهش بر مبنای تحلیل نیمه‌کوپل است، ابتدا نیاز است حل حرارتی مسئله انجام شود. با توجه به این موضوع المان 8 گره‌ای DC3D8 در ماژول شبکه‌بندی<sup>11</sup> برای مسئله انتقال حرارت<sup>12</sup> انتخاب شده و سپس مدل هندسی با المان‌های مکعبی (آجری) شبکه‌بندی می‌شود (مرحله 4).

در ماژول گام<sup>13</sup> تنظیمات گام‌های مختلف برای حل گر از جمله زمان هر گام و پارامترهای کنترل محاسبات عددی تعیین می‌شود. همان طور که در بخش 4-2 بیان شد با استفاده از فرآیند تولد و مرگ المان در گام 1 تمامی لایه‌ها حذف می‌شوند (می‌میرند). در گام 2 لایه اول متولد می‌شود و عملیات اسکن لیزر روی سطح آن انجام می‌شود. در گام 3 مدت زمانی برای خنک‌کاری لایه ساخته‌شده اختصاص داده می‌شود. این گام‌ها به تعداد لایه‌هایی که باید ساخته شوند تکرار می‌شود (مرحله 5).

در ماژول برهم‌کنش<sup>14</sup> قیود تماسی جامد-جامد، جامد-سیال (هوا) و برخی از پارامترهای مرتبط با شرایط محیطی که در بخش 2-2 تشریح شد، تنظیم می‌شود، همچنین تنظیمات مربوط به فرآیند لایه‌نگاری، تولد و مرگ المان‌ها انجام خواهد شد. در بحث قیود جامد-جامد که هدف برقراری اتصال کامل بین لایه اول با زمینه و سایر لایه‌هاست از قید گره<sup>15</sup> استفاده می‌شود. قیود جامد-سیال شامل تعیین برخی از پارامترهای حرارتی مرتبط با انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی از قطعه به محیط بیرون است. در بحث تنظیمات مربوط به تولد و مرگ المان‌ها از بخش تغییر مدل<sup>16</sup> تمامی لایه‌ها در گام 1 غیرفعال می‌شوند<sup>17</sup>. در گام 2 المان‌های لایه اول فعال شده و سپس لیزر عملیات اسکن را روی آن انجام می‌دهد. برای این منظور گزینه فعال‌سازی مجدد در این گام<sup>18</sup> برای ناحیه مربوط به لایه نخست تنظیم می‌شود. این تنظیم برای سایر لایه‌ها در گام‌های معینی تکرار می‌شود (مرحله 6).

در ماژول بارگذاری<sup>19</sup> تنظیمات مربوط به شار حرارتی ناشی از لیزر و شرایط مرزی و اولیه مسئله انجام می‌شود. از آن جایی که شار حرارتی لیزر در

متغیرهای میدانی<sup>1</sup> جدیدی در نقاط مادی تعریف کند. متغیر میدانی خود تابعی از زمان یا سایر متغیرهای در دسترس و پیش‌تعریف شده است. بخش عمده‌ای از این متغیرها از طریق زیربرنامه دیگری به نام GETVRM به درون زیربرنامه USDFLD انتقال داده می‌شود. زیربرنامه USDFLD در هر نقطه مادی از المان فراخوانی می‌شود و حامل اطلاعات مربوط به متغیرهای میدان در آن نقطه است. با داشتن مقدار متغیر میدان در آن نقاط مادی خواص مادی که وابسته به مقدار متغیر میدان هستند، برای حل گر مشخص خواهند شد.

در زیربرنامه نوشته‌شده بروزسانی خواص در نقاط مادی با استفاده از شرط دمایی انجام شده است؛ طوری که هر نقطه انتگرالی که دمای آن به بیش از دمای ذوب، 1650 درجه سانتی‌گراد، برسد فاز آن از عدد صفر (پودر) به عدد یک (جامد چگال و توپر) تغییر کرده و متناسب با آن خواص حرارتی، مکانیکی و فیزیکی آن به‌روز می‌شود. اطلاعات دمایی و فاز ماده از طریق زیربرنامه GETVRM وارد زیربرنامه اصلی USDFLD می‌شوند.

## 2-4- مدل‌سازی فرآیند لایه‌نگاری

جهت شبیه‌سازی فرآیند لایه‌نگاری در نرم‌افزارهای اجزاء محدود یکی از تکنیک‌های رایج استفاده از قابلیت آن‌ها در تولد و مرگ المان<sup>2</sup> است. به این صورت که لایه‌ای از پودر (مجموعه‌ای از المان‌ها) روی زمینه نگاشته می‌شود و سپس لیزر روی سطح فوقانی لایه می‌تابد. لایه فلز پس از اتمام کار لیزر مدت زمان اندکی خنک می‌شود. فرآیند برای ساخت لایه دوم با فعال کردن دسته دوم از المان‌ها روی سطح لایه اول تکرار می‌شود. پس از عملیات تابش لیزر روی سطح لایه دوم و خنک‌کاری لایه سوم فعال خواهد شد. این عمل تا اتمام فرآیند ساخت تکرار می‌شود. فرآیند لایه‌نگاری به این شیوه را نخستین بار دای و همکاران در سال 2004 میلادی [6] مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از چنین مدلی عملیات لایه‌نگاری انجام خواهد شد.

## 3- روند شبیه‌سازی حرارتی- مکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر

برای شبیه‌سازی حرارتی- مکانیکی از مدل نیمه‌کوپل در این پژوهش استفاده شده است. ابتدا تحلیل حرارتی مسئله در نرم‌افزار اجزاء محدود انجام می‌شود و نتایج آن ذخیره خواهد شد؛ سپس در شبیه‌سازی مشابه دیگری، ولی این بار تحلیل مکانیکی، داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل گذشته (دمای گره‌ای)، به‌عنوان بار حرارتی به مسئله اعمال شده و پس از در نظر گرفتن شرایط مرزی-تکیه‌گاهی حل مسئله تکمیل خواهد شد.

برای آشنایی با روند شبیه‌سازی مسئله در نرم‌افزار آباکوس، ابتدا یک یک مکعب مستطیل با طول، عرض و ضخامت مشخص در ماژول قطعه<sup>3</sup> ترسیم می‌شود (مرحله 1).

در ماژول خاصیت<sup>4</sup> خواص حرارتی و مکانیکی جامد توپر و متخلخل ماده Ti-6Al-4V براساس داده‌های شکل‌های 2 و 3 و جدول 1، به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود. همان طور که پیشتر هم اشاره شد در میان خواص حرارتی و مکانیکی برخی از خواص وابستگی شدیدتری به دما نشان می‌دهند. در مورد این خواص باید گزینه استفاده از داده‌های وابسته به دما<sup>5</sup> فعال شود، همچنین به واسطه تغییر فاز ناشی از ذوب، از حالت جامد پودری به جامد

<sup>6</sup> Number of field variables

<sup>7</sup> User Defined Field

<sup>8</sup> General

<sup>9</sup> Section

<sup>10</sup> Assembly

<sup>11</sup> Mesh

<sup>12</sup> Heat transfer

<sup>13</sup> Step

<sup>14</sup> Interaction

<sup>15</sup> Tie

<sup>16</sup> Model change

<sup>17</sup> Deactivated in this step

<sup>18</sup> Reactivated in this step

<sup>19</sup> Load

<sup>1</sup> Field variables (FV)

<sup>2</sup> The element birth and death

<sup>3</sup> Part

<sup>4</sup> Property

<sup>5</sup> Use temperature-dependent data

مطابق با شرایط محیطی و جنس مورد بررسی لحاظ شده است. مطالعات پارامتری در خصوص توزیع حرارت در راستاهای مختلف در قطعه و اثرات لایه‌نگاری بررسی خواهد شد. پس از اعتبارسنجی در زیر بخش 4-2 مسئله جدیدی به‌منظور تحلیل ترمومکانیکی یک تک لایه انجام خواهد شد. در این تحلیل تنش‌های پسماند در قطعه، اعوجاج و تغییر شکل قطعه ساخته‌شده به روش ذوب انتخابی برای دو شرط مرزی مکانیکی مختلف بررسی شده و نتایج آن ارائه می‌شود.

#### 4-1- اعتبارسنجی روند شبیه‌سازی

مسئله حاضر شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر است. مدل هندسی مورد نظر از دو بخش زمینه و لایه پودر تشکیل شده است. زمینه مکعب مستطیلی با سطح مقطع  $500 \times 200 \mu\text{m}$  و ضخامت  $500 \mu\text{m}$  و لایه پودر، مکعب مستطیلی با همان سطح مقطع زمینه و ضخامت  $30 \mu\text{m}$  است. جنس هر دو ماده زمینه و لایه پودر از آلایز پایه تیتانیوم Ti-6Al-4V انتخاب شده است.

روند شبیه‌سازی این‌گونه است که لایه پودر روی زمینه می‌نشیند و لیزر با شعاع 26 میکرون و سرعت ثابت  $200 \text{ mm/s}$  روی سطح لایه حرکت می‌کند. سطح لایه پس از اسکن اندکی خنک می‌شود و مراحل برای ساخت لایه بعد تا 5 لایه تکرار می‌شود. قطعه در حالت اولیه در دمای محیط 20 درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

جهت بررسی وضعیت شبکه‌بندی و تعداد المان‌های مناسب در حل اجزاء محدود مسئله سه نوع شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز انتخاب شده است. نتایج توزیع دما در راستای پهنای قطعه و در لحظه شروع اسکن لیزر برای سه نوع شبکه‌بندی مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به شکل 4 ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد المان‌ها نتایج به مقادیر مشخصی همگرا شده است. نتایج حاکی از این موضوع است که حل مسئله با شبکه‌بندی متوسط انتخابی 19000 المان از دقت مناسبی برخوردار است و سعی می‌شود تا این شبکه‌بندی در مطالعات بعدی به‌کار گرفته شود. شکل 5 تغییرات دما از محل تابش لیزر و در راستای عمق قطعه را نشان می‌دهد. داده‌های ارائه‌شده مربوط به حالتی است که تنها یک لایه پودر روی

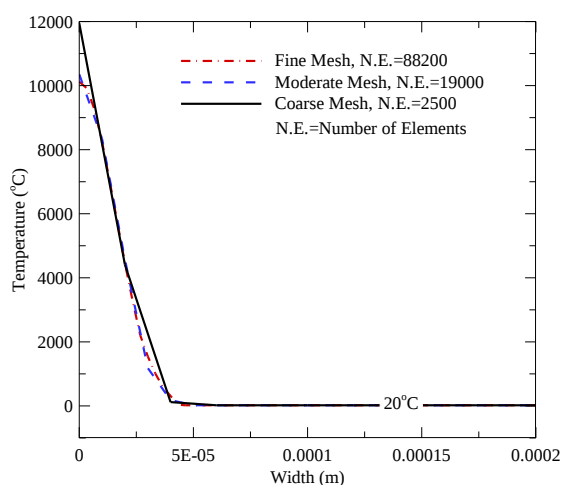


Fig. 4 Comparison of temperature distribution from center of the laser spot to the width direction of the substrate for various mesh size

شکل 4 مقایسه نتایج توزیع دما در راستای عرض زمینه از محل تابش لیزر برای اندازه شبکه مختلف

مسئله حاضر یک شار متحرک بوده تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار قادر به اعمال چنین موردی نیست و نوع توزیع شار تعریف‌شده توسط کاربر<sup>1</sup> انتخاب می‌شود. با این تنظیم نیاز است تا اطلاعات شار در زیربرنامه دی‌فلاکس مشخص شوند، همچنین با توجه به این‌که مسئله انتقال حرارت گذراست باید دمای اولیه مجموعه از قسمت ایجاد میدان پیش‌تعریف شده<sup>2</sup> مشخص شود (مرحله 7).

در منوی اصلی نرم‌افزار ثوابت مربوط به دمای صفر کلویین و ثابت استفان-بولتزمن<sup>3</sup> در اختیار حل‌گر مسئله قرار داده می‌شود و سپس با ایجاد ایجاد یک فضای کاری جدید<sup>4</sup> مسئله برای شروع حل ولیده می‌شود. در تنظیمات این بخش فایل حاوی دو زیر برنامه به حل‌گر آدرس‌دهی می‌شود تا بحث روزرسانی خواص و شار متحرک را اعمال کند (مرحله 8).

پس از این‌که تحلیل حرارتی مسئله تکمیل شد تحلیل مکانیکی مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحلیل نیاز است تا در برخی مراحل اصلاحاتی انجام شود. تمامی گام‌های پیشین در مازول گام حذف شده و نیاز است تا گام‌های جدیدی از نوع دینامیکی-ضمنی<sup>5</sup> انتخاب شود. در مازول بارگذاری بارهای حرارتی پیشین حذف شده و در بخش ایجاد میدان پیش‌تعریف شده، نتایج دمای گره‌ای حاصل از تحلیل حرارتی به نرم‌افزار آدرس‌دهی می‌شود. در مازول بارگذاری نیاز است تا شرایط مرزی-تکیه‌گاهی مسئله نیز مشخص شود. می‌توان حالت‌های مختلفی را برای شرط مرزی لایه متصور شد (گام 9). خلاصه‌ای از مراحل و روند شبیه‌سازی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر در جدول 2 ارائه شده است.

#### 4-2 نتایج و بحث

در این بخش ابتدا در زیر بخش 4-1 روند شبیه‌سازی مسئله اعتبارسنجی شده و بر درستی آن صحت‌گذاری می‌شود. برای این منظور نمونه مورد مطالعه فو و گواو [11] که تحلیل حرارتی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر است با کمی اصلاح و تنظیماتی مشابه در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی می‌شود. در مورد پارامترهایی که داده‌ای برای آن‌ها ارائه نشده مقادیر مناسبی

جدول 2 خلاصه‌ای از روند شبیه‌سازی ترمومکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس

Table 2 Summary of thermo-mechanical simulation procedure of selective laser melting process using ABAQUS finite element software

| مراحل | نوع عملیات                                                                                     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | مدل‌سازی هندسی قطعه                                                                            |
| 2     | تعیین خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما برای فاز پودر و جامد توپر                            |
| 3     | مونتاز قطعات                                                                                   |
| 4     | استفاده از المان DC3D8 و شبکه‌بندی مدل هندسی                                                   |
| 5     | تنظیم گام‌های حل مسئله                                                                         |
| 6     | تنظیم پارامترهای مربوط به قیود تماسی و فرآیند تولد و مرگ المان                                 |
| 7     | اعمال بار حرارتی متحرک و تنظیم دمای اولیه قطعه                                                 |
| 8     | تعیین برخی ثوابت، ایجاد محیط کاری جدید و تنظیم حل‌گر مسئله با آدرس‌دهی فایل حاوی زیر برنامه‌ها |
| 9     | انجام برخی اصلاحات در مازول گام و بارگذاری و اجرای تحلیل مکانیکی براساس داده‌های حرارتی        |

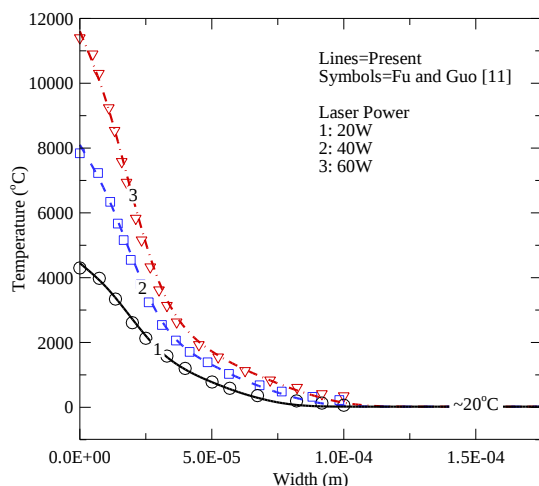
<sup>1</sup> User-defined

<sup>2</sup> Create Predefined Field

<sup>3</sup> Stefan-Boltzmann constant

<sup>4</sup> Job

<sup>5</sup> Dynamic-Implicit



**Fig. 6** Temperature distribution from center of the laser spot to the width direction of the substrate for various laser power

شکل 6 توزیع دما از محل تابش لیزر روی زمینه در راستای پهنای قطعه برای توان لیزر متفاوت

حرارتی بالایی نسبت به پودر دارد. این در حالی است که با حرکت از نقطه تابش لیزر به سمت عرض قطعه تنها لایه پودر با ضریب رسانش پایین حضور دارد؛ بنابراین انتظار می رود که میزان نفوذ حرارت در راستای جانبی کمتر از عمق قطعه باشد.

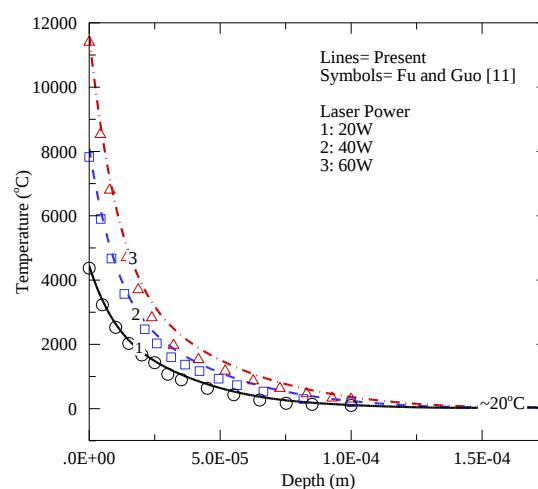
شکل 7 تغییرات دما را در مسیر حرکت لیزر از محل تابش لیزر به عقب را نشان می دهد. ملاحظه می شود که نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر با اختلاف اندکی نتایج پژوهش فو و گواو [11] را پیش بینی می کند. این اختلافات بیشتر به دلیل برخی از پارامترهای نامعلومی است که در پژوهش فو و گواو [11] معرفی نشده اند.

شکل 8 پیشینه و وضعیت تغییرات دما را برای نقطه ای واقع در لبه انتهایی ماده زمینه نشان می دهد. رفتار دمایی این نقطه در طی زمان ساخت 5 لایه روی آن با دو لیزر یکی با توان 20 وات و دیگری با توان 40 وات بررسی شده است. با توجه به شکل رفتار دمایی نقطه مورد نظر دارای 5 قله که هر قله نمایانگر ساخت یک لایه است. در گام نخست پودر لایه شماره 1 روی زمینه می نشیند و لیزر عملیات ساخت را روی آن طی زمان 0.0025 ثانیه انجام می دهد. در این مرحله به محض عبور لیزر از نقطه یاد شده دمای آن به طور ناگهانی افزایش می یابد. نقطه مورد نظر تا پیش از رسیدن لیزر در همان دمای اولیه 20 درجه سانتی گراد قرار دارد. پس از اتمام کار لیزر لایه ساخته شده به مدت 0.01 ثانیه خنک می شود. با اتمام زمان 0.0125 ثانیه فرآیند برای ساخت لایه دوم پودر آغاز می شود. هر مرحله ساخت لایه شامل یک مرحله اسکن لیزر و یک مرحله خنک کاری است که در مجموع کل زمان ساخت 5 لایه 0.0625 ثانیه به طول خواهد انجامید.

#### 4-2- تحلیل ترمومکانیکی تک لایه ساخته شده به روش ذوب انتخابی

##### با لیزر

در این بخش هدف بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی ترمومکانیکی فرآیند ساخت یک تک لایه چگال از پودر آلیاژ فلز تیتانیوم Ti-6Al-4V است. مدل هندسی مسئله مکعب مستطیلی با سطح مقطع  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  و ضخامت 0.5mm است. در این مسئله لیزر با شعاع تابش 100 میکرون، سرعت اسکن 100mm/s و توان 80 وات در نظر گرفته شده است.



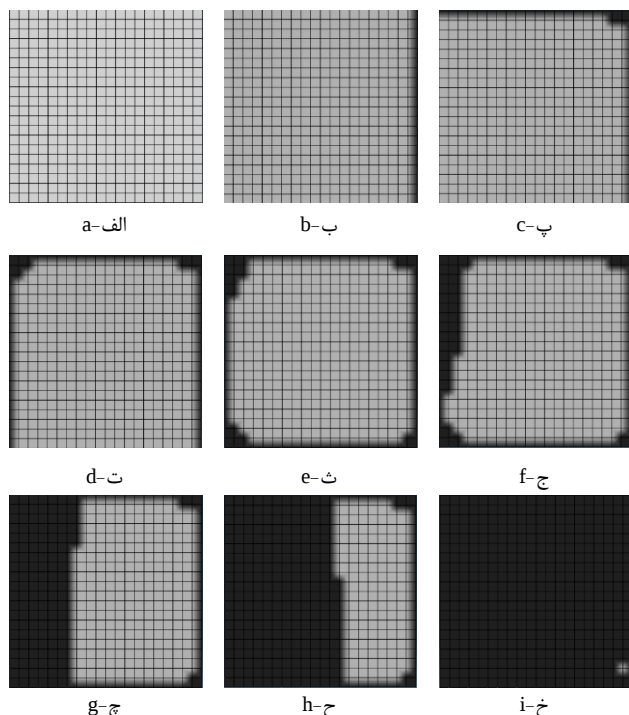
**Fig. 5** Temperature distribution from center of the laser spot to the depth direction of the substrate for various laser power

شکل 5 توزیع دما از محل تابش لیزر روی زمینه، در راستای عمق قطعه برای توان لیزر متفاوت

زمینه قرار داده شده است. ملاحظه می شود که نتایج شبیه سازی حاضر با دقت بسیار خوبی با نتایج ارائه شده توسط فو و گواو [11] تطابق دارد. نخستین تفسیر فیزیکی که می توان از نتایج شکل 5 ارائه کرد این است که دما به صورت نمایی از محل تابش لیزر تا نواحی دوردست در عمق قطعه در حال کاهش است. ملاحظه می شود که حرارت تقریباً حدود 150 میکرون (حدود 3 برابر قطر تابش لیزر) در عمق قطعه نفوذ کرده است و دمای قطعه از عمق 150 میکرون به بعد در همان دمای اولیه خود و برابر دمای محیط انتخاب شده باقی می ماند.

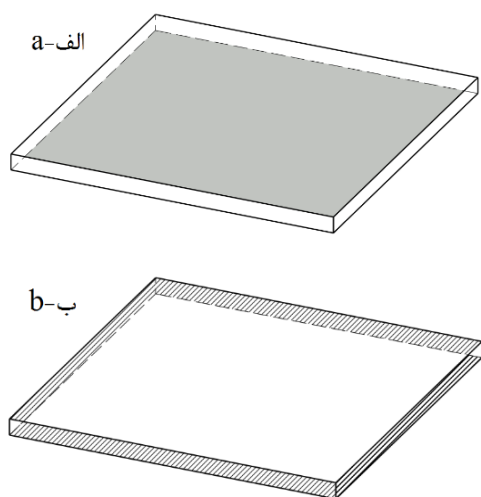
شکل 5 نشان می دهد مقدار بیشینه حرارت ایجاد شده در شبیه سازی عددی با افزایش توان و قدرت لیزر از مقدار 20 وات به مقادیر 40 و 60 وات به ترتیب 2 و 3 برابر شده است. مشاهده می شود که افزایش توان لیزر نفوذ حرارت به عمق بیشتر را موجب نشده است؛ بنابراین با افزایش توان لیزر، گرادیان های دمایی بیشتری در راستای عمق قطعه حاصل خواهند شد. اگرچه دماهای فوق العاده بالا در شبیه سازی عددی این فرآیند حاصل شد، ولی باید دانست که در چنین دماهایی ماده تخییر می شود. به عنوان نمونه تیتانیوم خالص دارای دمای جوشش در محدوده 3300 درجه سانتی گراد است. در شبیه سازی حاضر تغییر فاز مایع به گاز بررسی نمی شود. بررسی وضعیت توزیع دما از محل تابش لیزر و در راستای پهنای قطعه در شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دما از نقطه بیشینه که محل تابش لیزر است تا پهنای حدود 100 میکرون به صورت یکنوا روبه کاهش است، همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که حرارت حاصل از لیزر مستقل از توان لیزر حداکثر تا 100 میکرون (حدود 2 برابر قطر تابش لیزر) در پهنای قطعه نفوذ می کند و از این مقدار به بعد دما همان مقدار اولیه یعنی 20 درجه سانتی گراد باقی می ماند.

با توجه به شکل های 5 و 6 این نتیجه حاصل می شود که میزان نفوذ حرارت در راستای عمق 1.5 برابر میزان نفوذ حرارت در راستای عرض قطعه و دلیل این امر اختلاف ضریب رسانش حرارتی مؤثر در دو مسیر است. با حرکت از محل تابش لیزر به سمت عمق قطعه دو ماده با دو ضریب رسانش حرارتی متفاوت حضور دارند. لایه ای از پودر با ضریب رسانش ناچیز تا عمق 30 میکرونی و از 30 میکرون به بعد زمینه قرار دارد که ضریب رسانش



**Fig. 9** The phase change from the powder state to the dense solid state during SLM process; (a) - (e): the laser moves around the boundaries of the powder layer; (f) - (i): the laser scans the interior area of the powder layer

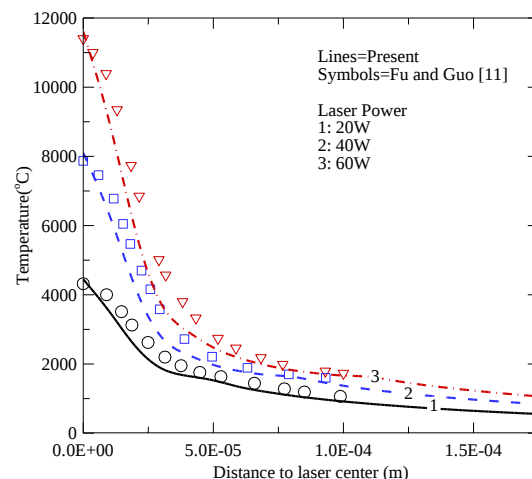
شکل 9 تغییر فاز از حالت جامد پودری (رنگ سفید) به جامد چگال (رنگ مشکی) حین عملیات ساخت به روش ذوب انتخابی با لیزر؛ الف-ث- لیزر مرزهای لایه پودر اولیه را اسکن می‌ندج-خ- لیزر نواحی داخلی لایه پودر را اسکن می‌کند.



**Fig. 10** Boundary conditions for two different cases, a- the bottom face is clamped, and b- the lateral faces are simply-supported

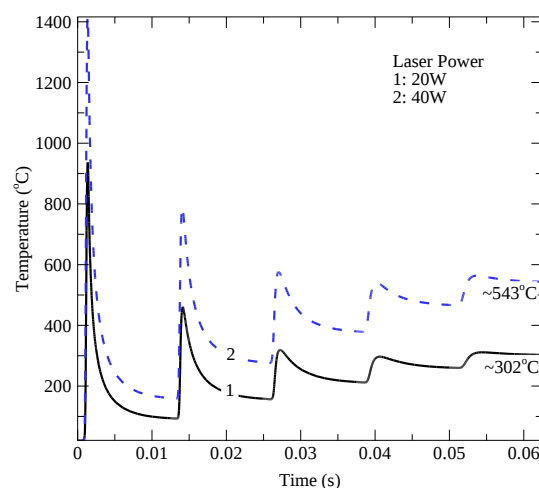
شکل 10 شرایط مرزی برای دو حالت مختلف الف- سطح پایینی ورق گیردار است و ب- سطوح جانبی ورق با تکیه‌گاه ساده مقید باشند

همچنین گوشه‌های تیز مورد انتظار به گوشه‌هایی گرد بدل شده‌اند. در شرط مرزی نوع ب چون تمامی سطوح جانبی با تکیه‌گاه‌های ساده مقید شده‌اند، مرزها صاف باقی می‌مانند، ولی قطعه دچار تغییرشکل‌های خارج صفحه‌ای می‌شود.



**Fig. 7** Temperature distribution along laser scanning direction for various laser power

شکل 7 توزیع دما در امتداد خط اسکن لیزر برای توان لیزر متفاوت



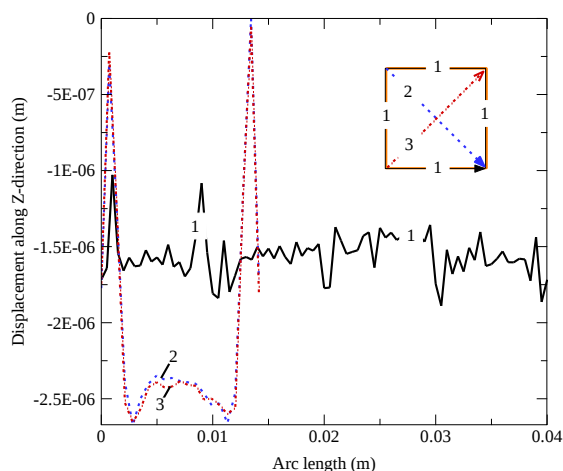
**Fig. 8** Temperature history of a point located in the end of the laser scanning path during fabrication of 5 layers

شکل 8 پیشینه دمایی نقطه‌ای واقع در انتهای مسیر حرکت لیزر پس از ساخت 5 لایه روی آن

روند ساخت قطعه بدین صورت است که ابتدا با حرکت لیزر روی مرز لایه پودر مرز قطعه ساخته می‌شود و سپس نواحی درون لایه پودر اسکن می‌شود. کانتورهای تغییر فاز جامد پودری به جامد چگال که از شبیه‌سازی فرآیند به روش ذوب انتخابی حاصل شده‌اند را می‌توان در شکل 9 مشاهده کرد. ابتدا لیزر با حرکت روی مرزهای قطعه آن نواحی را ذوب کرده و به هم متصل می‌کند؛ سپس اسکن نواحی داخلی به صورت مسیرهای عمودی رفت و برگشتی آغاز می‌شود.

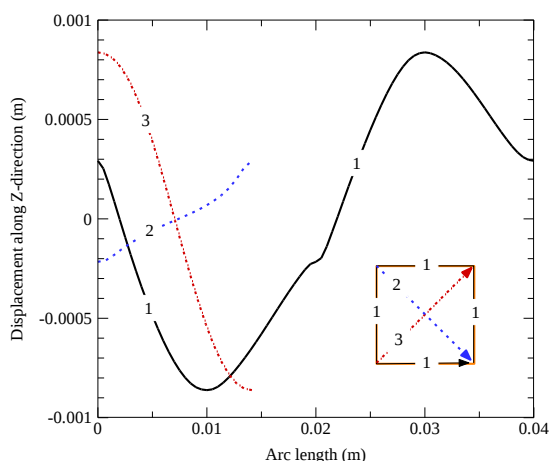
در ادامه پاسخ مکانیکی لایه مورد نظر به بار حرارتی ناشی از لیزر برای دو شرط تکیه‌گاهی مختلف بررسی می‌شود: الف- حالتی که کف لایه به زمینه اتصال کامل دارد و ب- حالتی که مرزهای جانبی لایه دارای شرط مرزی ساده هستند. شماتیکی از شروط مرزی یادشده در شکل 10 نشان داده شده است.

شکل 11 اعوجاج لایه ساخته‌شده برای دو شرط مرزی نوع الف و ب را نشان می‌دهد. سطح فوقانی لایه ساخته‌شده در شرط مرزی نوع الف منقبض شده و بنابراین ابعاد آن نسبت به اندازه ایده‌آل کوچک‌تر به دست می‌آید،



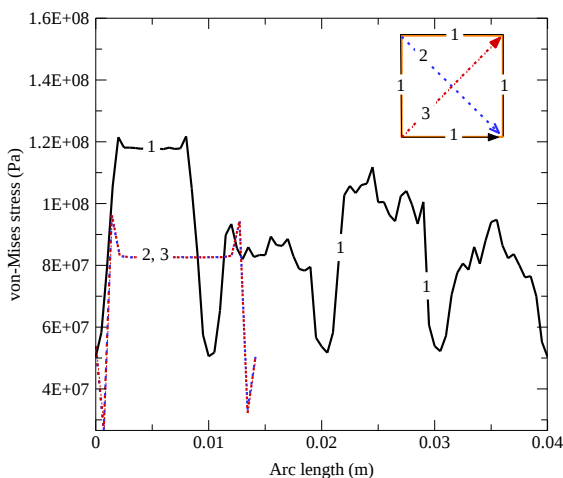
**Fig. 12** Variation of the normal displacement component along several paths on the layer, which is clamped at the bottom face

شکل 12 تغییرات مؤلفه عمودی جابه جایی در راستای مسیرهای مختلف روی لایه در حالتی که وجه پایینی آن گیردار است.



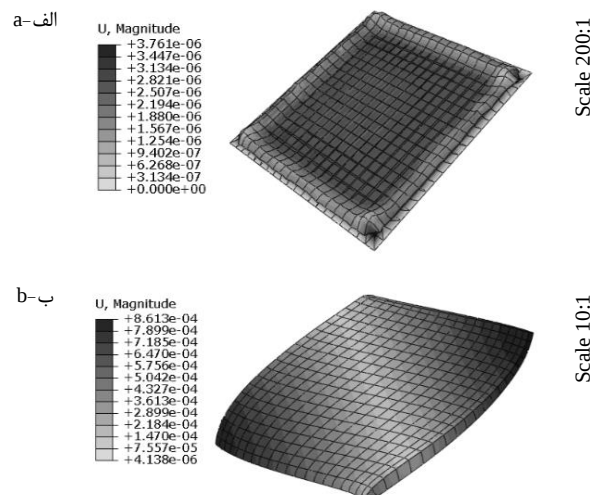
**Fig. 13** Variation of the normal displacement component along several paths on the layer, which is simply-supported at the lateral faces

شکل 13 تغییرات مؤلفه عمودی جابه جایی در راستای مسیرهای مختلف روی لایه در حالتی که در وجوه جانبی با تکیه گاه ساده مقید شده است.



**Fig. 14** Variation of von-Mises stress along several paths on the layer, which is clamped at the bottom face

شکل 14 تغییرات تنش ون مایسز در راستای مسیرهای مختلف روی لایه در حالتی که وجه پایینی آن گیردار است.



**Fig. 11** Distortion of the layer subjected to the laser heat flux for two different boundary conditions; case (a): the bottom face is clamped and case (b): the lateral faces are simply-supported.

شکل 11 اعوجاج لایه تحت شار حرارتی ناشی از لیزر برای دو شرط مرزی مختلف؛ حالت الف- سطح پایینی ورق گیردار است و حالت، ب- سطوح جانبی ورق با تکیه گاه ساده مقید باشند.

شکل های 12 و 13 مؤلفه جابه جایی در راستای عمود بر صفحه برای مسیرهای مختلف روی قطعه را نشان می دهند. شکل 12 منحنی اعوجاج عمودی را برای تکیه گاه نوع الف نشان می دهد. نخستین نکته ای که از شکل 12 می توان دریافت کرد رخداد تغییر شکل هایی با علامت منفی است. به عبارتی ضخامت قطعه از مقدار ایده آل مورد نظر کمتر شده است. مقدار این تغییر ضخامت در نواحی مختلف قطعه متفاوت است؛ طوری که کاهش ضخامت برای نقاط داخل صفحه بیشتر از نقاط مرزی است که موجب می شود سطح مقعری برای قطعه به دست آید. شکل 13 وضعیت اعوجاج قطعه در راستای عمود بر صفحه را برای تکیه گاه نوع ب نشان می دهد. با توجه به مسیر 1 پس از پایان ساخت قطعه نقاط روی مرز وضعیت تغییر شکل یکسانی ندارند و یک رفتار موجی شکل را از خود به نمایش می گذارند. با مقایسه نقاط شروع و انتهای مسیرهای 2 و 3 یک رفتار پیچشی در قطعه مشاهده می شود؛ بنابراین در مورد قطعه با شرط مرزی نوع ب که از الگوی اسکن مطابق شکل 9 برای ساخت آن استفاده شده است، قطعه اصطلاحاً تاب برمی دارد.

شکل 14 و 15 توزیع تنش های پسماند روی مسیرهای مختلف در قطعه به ترتیب برای شرط مرزی نوع الف و ب نمایش می دهد. همان طور که در شکل 14 ملاحظه می شود توزیع تنش برای نواحی داخلی قطعه (مسیرهای 2 و 3)، یک مقدار تقریباً ثابت را نشان می دهد. مرزهای قطعه با نوسانات تنش همراه هستند. این نوسانات به گونه ای است که توزیع تنش تقریباً متقارنی برای قطعه حاصل می شود، به عبارتی مرزهای راست و چپ و همچنین مرزهای بالا و پایین دارای تنش با شدت تقریباً یکسانی هستند. در شکل 15 وضعیت توزیع تنش های پسماند روی مسیرهای مختلف، بیان گر این موضوع است که تنش ها نسبت به قطر اصلی (مسیر 2) یک رفتار تقریباً تقارنی را نشان می دهند. این نوع توزیع تنش که به دلیل شرط مرزی مسئله و نحوه اسکن لیزر حاصل شده سبب تاب برداشتن قطعه می شود. با مقایسه شکل های 14 و 15 مشاهده می شود که تنش های بزرگتری در قطعه به واسطه شرط مرزی نوع ب نسبت به نوع الف پدید می آید.

مسیرهای رفت و برگشتی عمودی انتخاب شده است. تغییر الگوی اسکن می‌تواند بر رفتار قطعه ساخته‌شده تأثیرگذار باشد.

و- در این پژوهش برای تحلیل ترمومکانیکی قطعه از مدل نیمه‌کوپل حرارتی- مکانیکی استفاده شد. برای تک لایه مسئله ابتدا تحلیل حرارتی انجام شده و سپس تحلیل مکانیکی براساس داده‌های دمای گره‌ای برای دو شرط مرزی 1- حالتی که سطح زیرین لایه گیردار باشد و 2- سطوح جانبی لایه دارای تکیه‌گاه ساده باشند، انجام می‌شود.

ز- در حالتی که سطح زیرین قطعه گیردار است، اسکن لیزر مطابق مسیرهای عمودی رفت و برگشتی یک سطح مقعر را برای قطعه نتیجه می‌دهد. برای حالتی که سطوح جانبی قطعه با مرزهای ساده مقید شده‌اند، مرز قطعه به صورت موجی شکل اعوجاج پیدا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که قطعه تاب برمی‌دارد.

ح- بررسی توزیع تنش روی مسیرهای مختلف در قطعه برای هر دو شرط مرزی نشان داد که تنش‌های بزرگ‌تری در قطعه در حالتی که سطوح جانبی با تکیه‌گاه ساده مقید شده‌اند نسبت به حالتی که سطح پایینی لایه گیردار است، اتفاق می‌افتد.

## 6- مراجع

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, pp. 1-146, New York: Springer, 2014.
- [2] D. Gu, *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*, pp. 15-73, Berlin Heidelberg: Springer, 2015.
- [3] E. Sachs, M. Cima, P. Williams, D. Brancazio, J. Cornie, Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model, *Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 114, No. 4, pp. 481-488, 1992.
- [4] A. Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing*, pp. 40-44, Munich: Hanser Publications, 2012.
- [5] K. Dai, L. Shaw, Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 5, pp. 270-276, 2002.
- [6] K. Dai, L. Shaw, Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 1, pp. 69-80, 2004.
- [7] R. B. Patil, V. Yadava, Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 7, pp. 1069-1080, 2007.
- [8] L. Dong, A. Makradi, S. Ahzi, Y. Remond, Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 700-706, 2009.
- [9] I. Roberts, C. Wang, R. Esterlein, M. Stanford, D. Mynors, A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 12, pp. 916-923, 2009.
- [10] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting, *Materials & Design*, Vol. 52, pp. 638-647, 2013.
- [11] C. Fu, Y. Guo, 3-Dimensional Finite Element Modeling of Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Alloy, *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, United States, America, August 2014.
- [12] S. A. Fatemi, J. Zamani Ashani, Experimental study on interaction of powder apparent density and heat transfer on the quality of parts made in selective laser melting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 153-162, 2016. (in Persian)
- [13] J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 730-759, 2007.

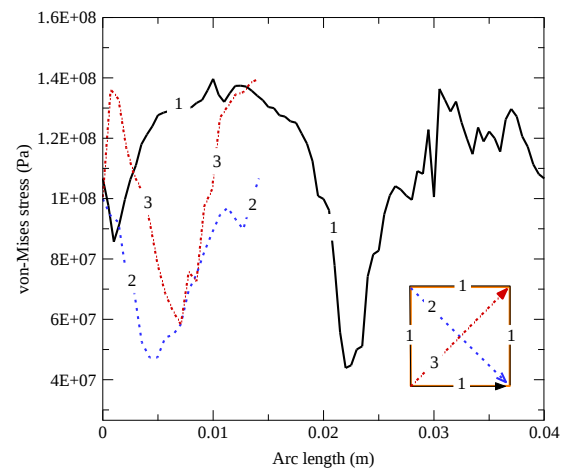


Fig. 15 Variation of von-Mises stress along several paths on the layer, which is simply-supported at the lateral faces

شکل 15 تغییرات تنش ون مایسز در راستای مسیرهای مختلف روی لایه در حالتی که در وجوه جانبی با تکیه‌گاه ساده مقید شده است.

## 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی حرارتی- مکانیکی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر انجام می‌شود. از آنجایی که این فرآیند به دلیل رخداد تغییر فاز و ساخت لایه از پیچیدگی‌های محاسباتی برخوردار است، سعی می‌شود با استفاده از ابزار اجزاء محدود معادلات حاکم بر رفتار آن حل شود. در بخش نتایج ابتدا روند شبیه‌سازی مسئله براساس داده‌های موجود در پژوهش‌های پیشین صحه‌گذاری می‌شود و سپس مسئله حرارتی- مکانیکی برای یک تک لایه مدل‌سازی می‌شود. در ادامه به مهم‌ترین نکات و نتایج این پژوهش اشاره می‌گردد:

الف- شبیه‌سازی حرارتی فرآیند ذوب انتخابی با لیزر برای ایجاد 5 لایه روی زمینه انجام شد. برای فرآیند لایه‌نگاری از مفهوم تولد و مرگ المان استفاده شد و برای شبیه‌سازی شار متحرک لیزر و الگوریتم بروزرسانی خواص مادی از پودر به جامد توپر هنگام عبور لیزر قابلیت زیربرنامه‌نویسی نرم‌افزار آباکوس مورد توجه قرار گرفت.

ب- نتایج حرارتی نشان دادند که با افزایش توان لیزر از مقدار 20 وات به 40 و سپس 60 وات، بیشینه دمای گذرا در قطعه به ترتیب 2 و 3 برابر شدند؛ این در حالی است که عمق نفوذ حرارت به زمینه تغییر نکرده و از این رو با افزایش توان لیزر گرادیان‌های دمایی بیشتری در زیر لایه‌ها اتفاق می‌افتد.

ج- نتایج برای لایه پودر انتخاب‌شده با درصد تخلخل 40 نشان دادند که میزان نفوذ حرارت در راستای عمق 1.5 برابر میزان نفوذ حرارت در عرض قطعه است و دلیل این امر را می‌توان به اختلاف در ضریب رسانش حرارتی در مسیر عمق (جامد چگال) نسبت به مسیر عرضی (جامد پودری) اشاره کرد.

د- بررسی بیشینه دمایی نقطه‌ای واقع بر زمینه در حین ساخت 5 لایه توسط فرآیند ذوب انتخابی با لیزر نشان می‌دهد که نقطه مورد نظر تحت بارهای حرارتی سیکلی قرار خواهد گرفت. در حضور این بارهای حرارتی سیکلی پدید آمدن نقص حین ساخت و رخداد ترک اولیه می‌تواند سبب گسترش ترک در ماده شود.

ه- در ساخت قطعه در روش ذوب انتخابی با لیزر عموماً در ابتدا مرز قطعه ساخته می‌شود و سپس نواحی داخلی آن با حرکت‌های رفت و برگشتی اسکن می‌شوند. در این پژوهش الگوی اسکن نواحی داخلی به صورت

- selected commercial alloys*, pp. 205-217, Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.
- [17] G. Welsch, R. Boyer, E. Collings, *Materials properties handbook: titanium alloys*, pp. 483-487, United States: ASM international, 1993.
- [14] I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, I. Smurov, Single track formation in selective laser melting of metal powders, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 12, pp. 1624-1631, 2010.
- [15] A. Gusarov, E. Kovalev, Model of thermal conductivity in powder beds, *Physical Review B*, Vol. 80, No. 2, pp. 024202, 2009.
- [16] K. C. Mills, *Recommended values of thermophysical properties for*