

بررسی اثرات مکانیزم لایه نشانی پودر در فرآیند تفجوشی انتخابی با لیزر

امیرحسین محمودی¹، محمدرضا موحدی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-9567، movahhed@sharif.edu

چکیده

روش های افزایشی گروهی از روش های نوین ساخت هستند که به سرعت در حال توسعه بوده و جایگاه خود را در صنایع خودروسازی و هوافضا و پزشکی باز کرده اند. به گونه ای که بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که این فناوری آینده ساخت و تولید را دگرگون خواهد ساخت. یکی از مهمترین روش های ساخت افزایشی تکنیک تفجوشی انتخابی با لیزر، SLS است که در ساخت قطعات صنعتی کاربرد فراوانی یافته است. دستگاه SLS دربرگیرنده اجزاء و مکانیزم های زیادی است که در عملکرد آن نقش تعیین کننده دارند. یکی از مکانیزم های این دستگاه، مکانیزم لایه نشانی پودر است که کل توزیع پودر و ایجاد لایه هایی با ضخامت در حدود 100 میکرون بر روی بستر دستگاه را انجام می دهد و از این رهگذر، نقش تعیین کننده ای در کیفیت، چگالی و استحکام قطعه ایجاد شده ایفا می کند.

در این جا، نحوه توزیع پودر توسط مکانیزم لایه نشانی مورد بررسی قرار گرفته و اثر عوامل هندسی دستگاه بر آن مطالعه شده است. بدین منظور نحوه توزیع پودر به کمک روش عددی DEM و در بستر نرم افزار PFC2D مدل سازی شده است. در این مدل سازی با استفاده از خواص پودر گرید SLS تجاری PA2200 رفتار ذرات پودر در حین لایه نشانی بررسی شده است. همچنین نتایج شبیه سازی در مقایسه با شرایط واقعی در یک دستگاه SLS صحت گذاری شده است.

کلیدواژگان

ساخت افزایشی - تفجوشی انتخابی با لیزر - روش اجزاء گسسته - مکانیک پودر - توده جامد

Study of the effects of powder dispensing mechanism on selective laser sintering process

Amirhossein Mahmoodi, Mohamad Reza Movahhedy*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, movahhed@sharif.edu

Abstract

Additive manufacturing (Simply called A.M.) is a group of manufacturing technologies that is developing rapidly and is being used widely in some industries like car manufacturing, Aerospace and producing Biomedical devices, In a way that some researchers believe that A.M. methods will change the future of manufacturing. One of the most important A.M. techniques is the Selective Laser Sintering (SLS) method that is mostly used in industrial applications. A SLS machine has a lot of sub systems and mechanisms that have key role in the Laser Sintering process. One of the mechanisms of SLS machine is the Powder Dispensing mechanism that produce layers of unsintered powder as thin as 100 microns on the machine platform and through this, it has a key effect on the quality and strength of the final parts.

Here the procedure of powder dispensing by the mechanism has been investigated and the effects of geometry on the powder layer have been studied. For this, the Powder dispensing dynamics and flow have been modeled using numerical calculations of discrete element method, by the PFC2D software. In this modeling the properties of the PA2200, SLS grade PA12 powder, have been used for to enter in the software and the flow and motion of the powder system investigated while dispensing in the SLS process chamber. Also the results verified by the experimental efforts conducted on a self-developed SLS machine.

Keywords

Additive manufacturing- Selective Laser sintering- Discrete Element Method- Powder mechanics- Bulk Solid

1- مقدمه

آید و توانمندی خاصی در تولید قطعات با هندسه پیچیده، دقت ابعادی خوب و استحکام مکانیکی بالا داشته [1] و همچنین می تواند با دامنه وسیعی از مواد، پلیمرهای مهندسی، فلزات، سرامیک ها و کامپوزیت ها، کار کند [2] از این روی در این جا بر روی این تکنیک تمرکز شده است.

در این مطالعه هدف بررسی پارامترهای یکی از زیر مکانیزم های SLS یعنی زیر مکانیزم لایه نشانی پودر در دستگاه تفجوشی انتخابی با لیزر و اثر آن بر روی کیفیت قطعه تولید شده نهایی می باشد. مکانیزم لایه نشانی پودر، به دلیل تاثیر مستقیمی که بر کیفیت و دقت قطعات تولید شده در دستگاه SLS می گذارد، یکی از مهمترین قسمت ها در دستگاه SLS به شمار می رود. هدف این کار آن است که با شبیه سازی نحوه لایه نشانی پودر و مطالعه اثر پارامتر های آن در کیفیت سطح و قطعه نهایی، به فهم دقیق تری از مکانیزم

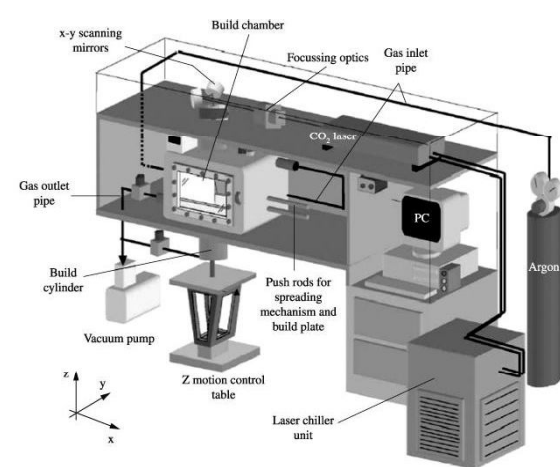
فناوری ساخت افزایشی، فناوری است که از دهه 80 میلادی به تدریج پا به عرصه وجود گذاشته و در ده سال اخیر جایگاه بسیار مهمی در توسعه صنایع ساخت و تولید پیدا کرده است. بگونه ای که بسیاری از پژوهشگران معتقدند که این فناوری، انقلابی در صحنه صنایع ساخت قطعات ایجاد نموده و آینده این صنعت را دگرگون خواهد نمود.

از میان تکنیک های مختلفی که در فناوری ساخت افزایشی وجود دارد، تفجوشی انتخابی با لیزر¹، روشی است که از روش های صنعتی به حساب می

¹ Selective Laser Sintering

نشانی دستیافته و در نتیجه طراحی های موثرتری از این مکانیزم امکان پذیر شود. در این زمینه کارهای صورت گرفته بیشتر در زمینه دستگاه های تجاری و پتنت های ثبت شده در شرکت های تجاری می باشد و مقالات علمی کمتری به این کار پرداخته اند. از سیستم های تجاری می توان به سیستم های تغذیه پودر در دستگاه های تجاری شرکت های EOS GmbH و 3D Systems اشاره کرد. در زمینه پتنت ها می توان به پتنت شرکت EXONE سال 2012 [3] اشاره کرد که در آن یک نوع سیستم توزیع پودر تیغه ای با یک سیستم توزیع پودر غلتکی مخلوط شده است و یکی سیستم جدید به وجود آمده است. همچنین پتنت شرکت United Technologies سال 2012 [4] که در آن از یک لایه پیش تفجوشی شده استفاده شده است و لایه نشانی پودر در دستگاه SLS به صورت کلی تغییر کرده است و دیگر از تیغه و غلتک استفاده نمی شود. همچنین می توان به پتنت شرکت EOS GmbH سال 2014 [5] اشاره کرد که در آن بر روی سیستم تیغه ای توزیع پودر تمرکز شده است و بر روی پودرهای مختلف و با نسبت مخلوط کردن های مختلف پودر نو و دست دوم با شکل و هندسه تیغه نتایجی را به دست آورده است.

از میان مقالات می توان به مقاله وندر شورن و کروت در سال 1995 [6] اشاره کرد که در آن به صورت کیفی سیستم توزیع پودر تیغه ای و غلتکی و شکافی برای پودر فلزی مقایسه شده است و مزایا و معایب این سیستم ها نسبت به همدیگر بررسی شده است. همچنین در مقاله کولوسف و همکاران در سال 2006 [7] چهار نوع سیستم توزیع پودر مقایسه شده است: توزیع پودر معمولی با تیغه، توزیع پودر به همراه ایجاد فشار ناشی از زاویه نوک تیغه بر روی سطح پودر، توزیع پودر با استفاده از ارتعاشات التراسونیک و توزیع پودر به همراه تعلیق در سیال که با یکدیگر مقایسه شده اند و مقدار یکنواختی سطح پودر ایجاد شده با همدیگر مقایسه شده اند. برخی از مقالات در این میان به بررسی خواص جریانی پودر پرداخته اند و اگر چه به صورت مستقیم به این کار مرتبط نیستند ولی اطلاع پیدا کردن از خواص خود پودر و شناختن آن به صورت صحیح تاثیرات ویژه ای بر روی لایه نشانی پودر دارد و این موضوع در بسیاری از مقالات ذکر شده است. از میان این مقالات می توان به مقاله زیگلیر و همکاران در سال 2013 اشاره کرد که در آن خواص استاتیکی و جریانی پودرهای به کار گرفته شده در SLS بررسی و مقایسه شده اند [8] و همچنین به مقاله برتا و همکاران در سال 2014 که بر روی ریخت شناسی¹ پودر به کار گرفته شده در SLS کار شده است [9].



شکل 62 شمای کلی دستگاه SLS و اجزای اصلی آن [11]

در زمینه تحلیل روش SLS به کمک DEM² کارهای اندکی اخیرا انجام شده است که به پودر در داخل دستگاه SLS نگاه گسسته سازی شده داشته است. البته این کارها بحث حرکت پودر در مکانیزم لایه نشانی را مورد بررسی قرار نداده است اما از آنجا که به روابط و فیزیک حاکم بر مساله پرداخته شده است، اشاره به آنها در اینجا لازم دانسته شده است. در این زمینه به کار گانریوالا و زهدی در سال 2014 اشاره می کنیم [10]. مطابق اطلاعات موجود تا کنون تنها کارهای انجام شده در این زمینه توسط آقای زهدی و دانشجویانش در دانشگاه برکلی انجام شده است.

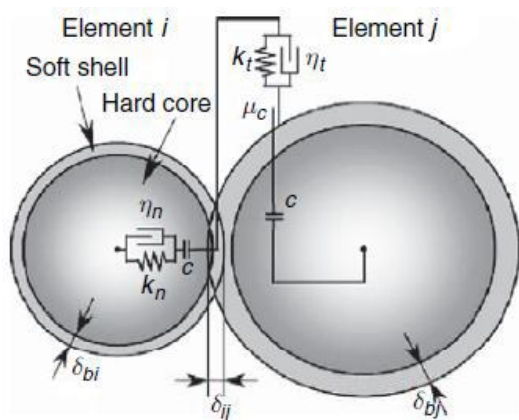
با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی کارهای قبلی انجام شده، به نظر می رسد جای یک کار تحلیلی بر روی مکانیک حرکت پودر در مکانیزم لایه

³ البته به صورت دقیق تر اگر بخواهیم بیان کنیم باید بگوییم که شکل نشان داده شده در واقع دستگاه SLM را نشان می دهد. SLM مخفف Selective Laser Melting می باشد که تفاوت این دستگاه با دستگاه SLS خیلی ناچیز است و اصطلاحا به دستگاه هایی که با فناوری SLS به تولید قطعات فلزی به صورت مستقیم می پردازند SLM گفته می شود، چرا که در آن ها پودر فاز به صورت کامل ذوب می شود.

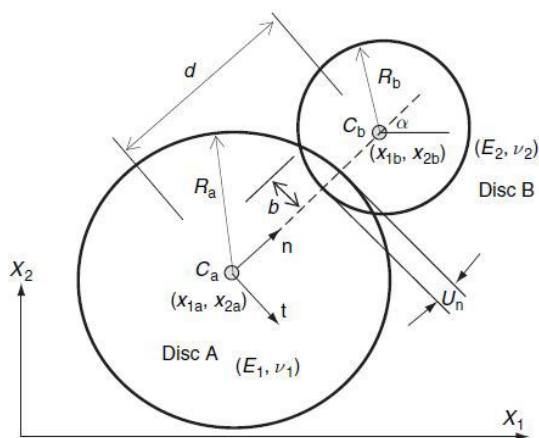
¹ Morphology

² Discrete Element Method

برسد و نه به ذرات دورتر. استفاده از روش صریح باعث می شود تا بتوان تعداد زیادی از ذرات را بدون نیاز به حافظه بزرگ کامپیوتر تحلیل کرد [12]. همانطور که گفته شد دو قانون اصلی در مدلسازی این سیستم قانون دوم نیوتن و قانون نیرو-جابجایی در تماس بین ذرات هستند. قانون نیرو-جابجایی تماس بین ذرات می تواند به صورت های مختلفی بیان شود که ساده ترین آنها به صورت خطی است که در آن نیروی وارده بین دو ذره رابطه خطی با فاصله بین دو ذره خواهد داشت. یک نمونه از این مدلسازی برای قانون نیرو-جابجایی در تماس بین دو ذره در شکل 31 آورده شده است. در این مدل دو ذره دارای یک هسته صلب و پوسته الاستیک هستند که نیروی وارده از سوی آنها در تماس با یکدیگر با دو فنر و دو دمپر خطی برای نیروی عمودی و مماسی مدلسازی شده اند. همچنین حداکثر اصطکاک بین ذرات نیز با ضریب اصطکاک ایستایی بیان شده است.



شکل 63 مدل در نظر گرفته شده برای تماس بین ذرات در روش DEM با هسته صلب و پوسته الاستیک به همراه فنر و دمپر خطی برای مدل سازی نیروی عمود و مماسی [13]



شکل 64 شماتیک دو ذره در کنار یکدیگر و در تماس با یکدیگر در شبیه سازی DEM [14]

فرمول بندی های زیادی برای حل عددی مساله DEM توسط محققین مختلف توسعه پیدا کرده است. در اینجا مثلاً به یک نمونه از کار آقای محمدی اشاره خواهیم کرد [14]. در این کار بدون از دست دادن عمومیت مساله فرمولاسیون DEM برای تحلیل حرکت دو ذره به صورت دو بعدی

صفحه X-Y صفحاتی از قطعه عبور داده می شود و از محل تقاطع این صفحه با لبه های جسم مورد نظر کانتورهای بستهای به دست می آیند. سپس صفحه دیگری بالاتر از صفحه قبلی به اندازه ضخامت یک لایه با جسم قطع داده می شود و این کار تا جایی پیش می رود که به بالاترین قسمت جسم برسد. در پایان، تعداد زیادی کانتورهای بسته که نشان دهنده اطراف جسم هستند به دست می آیند.

پس از به دست آمدن کانتورها به ساخت فیزیکی قطعه پرداخته می شود. در این مرحله، ابتدا یک لایه پودر توسط مکانیزم لایه نشانی بر روی سطح پلاتفورم پخش می شود. ضخامت لایه می تواند متفاوت باشد اما معمولاً عددی در حدود 100 میکرون است که با کم و زیاد شدن آن، سرعت و دقت دستگاه کم و زیاد می شود. پس از پخش شدن پودر سطح آن توسط گرمکن های تابشی دستگاه تا دمای مشخصی پیش گرم می شوند¹. سپس طرح مورد نظر که از کانتورهای دور جسم منشا می گیرند توسط سیستم اسکن لیزر بر روی سطح پودر مارک می شود. توان حرارتی لیزر باعث می شود که ذرات پودر در نقاط مارک شده به یکدیگر جوش بخورند² و یک جسم جامد را تشکیل دهند. سپس این سیکل تکرار می شود و دوباره یک لایه دیگر از پودر بر روی لایه قبلی ریخته می شود و این فرآیند تا آخر و ساخت کامل قطعه ادامه پیدا می کند.

3- شبیه سازی و تحلیل عددی

3-1-3 اصول شبیه سازی و فرمول بندی روش DEM

اصول شبیه سازی در این جا به این گونه است که تعدادی ذره در کنار یکدیگر به سان گوی هایی (در حالت سه بعدی به صورت گوی و در حالت دو بعدی به شکل دیسک) در نظر گرفته شده اند و بین این گوی ها کنش و برهم کنشی از طریق تماس برقرار است. هدف مساله یافتن مکان و زاویه این گوی ها در طول زمان است. این در واقع یک مساله دینامیکی سیستمی از اجسام صلب است که رابطه کلی حاکم بر آن قانون دوم نیوتن می باشد. با حل معادله قانون دوم نیوتن، مکان و زاویه ذرات بر حسب زمان قابل دستیابی می باشد. در این شبیه سازی ذرات به صورت گوی هایی در نظر گرفته می شوند و فرض می شود که این ذرات اجسام صلب هستند و البته رابطه نیروی وارده در تماس بین ذرات بسیار مهم است و در مساله تاثیر گذار خواهد بود. مسلم است که در حالتی که تعداد ذرات زیاد شود حل دقیق تحلیلی برای این مساله وجود ندارد و می بایست با روش های عددی به حل این مساله پرداخت. برای تحلیل عددی این مساله روش بسیار شبیه حل صریح در روش های اختلاف³ محدود می باشد. در این حالت یک مقدار پله زمانی تعیین می شود و سمت دوم معادله در نقطه زمانی بعدی یعنی شتاب ذره، پیرو آن سرعت و مکان ذره، در لحظه بعدی از روی شرایط در لحظه قبلی به دست می آیند و این حل تا مدت زمان مشخصی ادامه پیدا میکند. در روش DEM به این صورت است که پله زمانی به اندازه ای کوچک اتخاذ می شود که اختلال ایجاد شده ناشی از حرکت هر ذره فقط به ذرات در همسایگی خود

¹ البته این مخصوص دستگاه های SLS پاپیری است، در فرآیند SLS قارزی این پیشگرم به دلایل فنی

مورد نیاز نیست.

² این جوش خوردن خود دارای مکانیزم های فیزیکی متفاوتی است، در حقیقت این به فیزیک پدیده تفجوشی بر می گردد که برای مواد مختلف متفاوت است، می تواند به صورت جوش خوردن در حالت جامد، ذوب شدن در حالت مایع و یا جوش خوردن ناشی از فرآیند شیمیایی باشد. برای اطلاعات بیشتر در این مورد خواننده می تواند به مقاله بسیار خوب و پرمغز آقای Kruth در این مورد مراجعه کند که در مرجع [2] به آن اشاره کردیم، مراجعه کند.

³ Explicit Finite Difference Method

(دیسک) توسعه یافته است. تصویر شماتیک این دو ذره در تماس با یکدیگر را در شکل 32 می توان مشاهده کرد. الگوریتم محاسبه مقدار نیروی بین دو ذره بر حسب زمان در جدول 8 و الگوریتم یافتن محل ذرات در طول زمان نیز در جدول 9 نشان داده شده است. در این روابط t زمان، θ زاویه چرخش ذرات، x_{ib} و x_{ia} به ترتیب بردار دو بعدی مکان مرکز دو ذره، R_b و R_a به ترتیب شعاع ذرات A و B، F_b و F_a به ترتیب نیروی تماسی عمودی و مماسی بین ذره ها، n_i و t_i به ترتیب بردارهای یکه در جهات عمودی و مماسی در نقطه تماس، U_n و U_t به ترتیب جابجایی نسبی عمودی و مماسی دو ذره، K_n و K_t به ترتیب ضرایب سختی در راستای عمودی و شعاعی، φ زاویه اصطکاک بین دو ذره، C ضریب چسبندگی، m جرم دو ذره، M ممان کل وارد شده به ذره و در نهایت I ممان اینرسی ذره می باشند. در نهایت پس از یکبار انجام پروسه تعریف شده در جدول 8 و جدول 9 مکان و سرعت جدید ذرات به دست می آیند و دوباره می توان روند گفته شده را انجام داد تا به مکان و سرعت ذره در لحظه بعدی دست یافت و همین گونه تا مدت زمان دلخواه می توان مساله را به پیش برد.

جدول 18 الگوریتم یافتن نیروی بین ذره ای برای سیستم در ذره ای در روش

[14] DEM	
Relative velocity	$v_i = (\dot{x}_{ia} - \dot{x}_{ib}) - (\dot{\theta}_a R_a + \dot{\theta}_b R_b)t_i$
Relative displacement increments in the normal and tangential directions of contacts	$\Delta U_n = (v_i n_i) \Delta t_i$ $\Delta U_t = (v_i t_i) \Delta t_i$
Contact force increments	$\Delta F_n = K_n \Delta U_n$ $\Delta F_t = K_t \Delta U_t$
Total force at time step j	$F_n^j = F_n^{j-1} + \Delta F_n$ $F_t^j = F_t^{j-1} + \Delta F_t$
Slip condition checking	$F_t \leq F_n \tan \phi + C$

جدول 19 الگوریتم یافتن مکان ذرات در سیستم دو ذره ای در روش [14]

Moment calculations (sum over clusters of particles in contacts)	$M_a = \sum F_n R_{a1}$ $M_b = \sum F_n R_{b1}$
Acceleration calculation (assuming constant force and moments from $t^{(j-1/2)}$ to $t^{(j+1/2)}$) at time step j	$\ddot{x}_i^j = \sum F_i / m_i$ $\ddot{\theta}^j = \sum M / I$
Velocity calculation	$\dot{x}_i^{(j+1/2)} = \dot{x}_i^{(j-1/2)} + \ddot{x}_i^j \Delta t_i$ $\dot{\theta}^{(j+1/2)} = \dot{\theta}^{(j-1/2)} + \ddot{\theta}^j \Delta t$
Displacement calculation (assuming constant velocities from time step t^j to t^{j+1})	$x_i^{j+1} = x_i^j + \dot{x}_i^{(j+1/2)} \Delta t_i$ $\theta^{j+1} = \theta^j + \dot{\theta}^{(j+1/2)} \Delta t$

3-2- اصول شبیه سازی DEM با استفاده از نرم افزار PFC2D

نرم افزار PFC2D یک نرم افزار قوی از محققان دانشگاه مینه سوتا می باشد (تحت عنوان شرکت Itasca) که برای تحلیل محیط های ذره ای با استفاده از روش DEM توسعه یافته است. این نرم افزار همانطور که از عنوان آن پیداست برای تحلیل های دو بعدی (ذرات به صورت دیسک) بوده و یک ورژن PFC3D نیز دارد که برای تحلیل های سه بعدی می باشد. در این پژوهش با توجه به هندسه متقارنی که در مساله وجود دارد از نرم افزار دو بعدی استفاده شده است. این نرم افزار دارای توانمندی های متنوعی می باشد و ابزارهای مدلسازی داخلی زیادی برای تحلیل های DEM در اختیار دارد که به تمامی آن در اینجا نمی توان پرداخت.

3-3- یافتن خواص پودر مورد نظر برای اعمال در نرم افزار PFC2D

با توجه به اطلاعات فوق و جمع بندی نسبت به فیزیک مساله و نحوه حل عددی آن در نرم افزار مورد نظر، باید اشاره شود که در قدم بعد می بایست خواص پودر موجود در واقعیت را با پودر در داخل نرم افزار مشابه سازی کنیم. مشخصاتی از پودر که می بایست برای انجام مدلسازی به نرم افزار شناسانده شوند موارد زیر می باشند:

- توزیع اندازه ذرات پودر

- ضریب اصطکاک ذرات پودر با دیواره

- ضریب اصطکاک بین ذرات پودر با یکدیگر

- نسبت پواسون ذرات پودر

- ضریب برشی ذرات پودر

- چگالی ذرات پودر

- ضریب ویسکوالاستیک ذرات در جهت شعاعی

- ضریب ویسکوالاستیک ذرات در جهت مماسی

پودر مورد نظر این پژوهش به عنوان پودری که قرار است مورد آزمایش و مطالعه قرار بگیرد پودر تجاری PA2200 می باشد که توسط شرکت EOS تولید شده و در دستگاه های تجاری SLS مورد استفاده قرار می گیرد که مشخصات فنی آن را می توان در مرجع [15] مشاهده کرد. این جا در مورد این 8 خاصیت با جستجو های انجام شده اعدادی تخمین زده شده اند که در جدول 20 قابل ملاحظه می باشند.

جدول 20 پارامتر های وارد شده در شبیه سازی تست زاویه آسودگی در نرم افزار PFC2D با تغییر ضریب میرایی بحرانی

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
1	متوسط اندازه ذرات	56	میکرون
2	انحراف از معیار اندازه ذرات	20	میکرون
3	ضریب اصطکاک ذره - ذره	0,332	
4	ضریب اصطکاک ذره - دیواره بالایی	0,1	
5	ضریب اصطکاک ذره - دیواره پایینی	2	
6	نسبت پواسن ذرات پودر	0,408	
7	ضریب برشی ذرات پودر	390	MPa
8	چگالی ذرات پودر	1015	Kg/m3

3-4- کالیبره کردن ضرایب با استفاده از تست زاویه آسودگی¹

در اینجا برای جبران سازی این پارامتر ها از یک تست ساده استفاده شده است که خواص جریان پذیری پودر را نشان می دهد. تست زاویه آسودگی که با مطابق استاندارد ISO 4324 انجام می شود، به این صورت است که مواد پودری شکل از داخل یک قیف در اثر جاذبه به پایین ریخته می شود و یک تپه را تشکیل می دهد، زاویه ای که تپه با سطح افق می سازد اندازه گیری می شود و به آن زاویه آسودگی گفته می شود.

این تست برای پودر تجاری PA2200 در مرجع [9] انجام شده است و مقدار زاویه آسودگی برای پودر PA2200 نو برابر 1.5 ± 33.1 درجه گزارش شده است. همچنین برای اینکه از صحت تست های صورت گرفته بر روی پودر اطمینان حاصل شود تستی نیز در آزمایشگاه با پودری که موجود بوده است انجام گرفته است. پس از انجام این تست زاویه این تپه به وسیله تصاویری که عمود بر جهت جاذبه از تپه ایجاد شده برداشته شد، اندازه گیری گردید و زاویه نهایی میانگین گرفته شده برابر مقدار 39,8 اندازه گیری شده است. این تفاوت با مقداری که در مقالات گزارش شده است به دلیل این است که در مقالات در دمای محیط و در این جا تست در دمای 80 درجه انجام شده است.

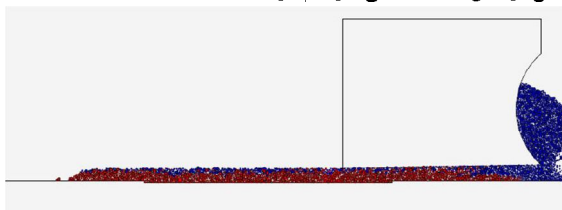
¹ Angle of Repose

جدول 21 نتایج حاصل شده از نرم افزار PFC2D در تست زاویه آسودگی بر اساس مقدار ضریب تصحیح وارد شده در ضریب اصطکاک

اصطکاک	تانژانت زاویه	زاویه
0	0,3344	18,5
0,1	0,3509	19,35
0,2	0,3817	20,9
0,3	0,3968	21,65
0,7	0,4089	22,25
1,2	0,4717	25,27
1,7	0,4921	26,21

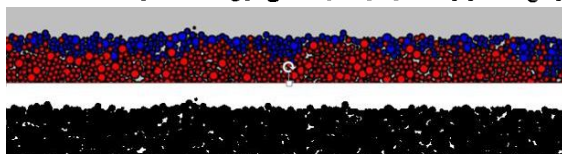
4- شبیه سازی لایه نشانی پودر

در این شبیه سازی ابتدا یک لایه از پودر بر روی سطح زیرین نشانده شده، سطح زیرین به سمت پایین حرکت کرده و دوباره لایه جدیدی از پودر بر روی لایه قبلی نشانده می شود تا به واقعیت مساله دستگاه SLS نزدیک تر باشد نمونه شبیه سازی این قسمت در نرم افزار را در شکل 51 می توان مشاهده کرد. در ابتدا فقط یک شبیه سازی با مقدار ارتفاع تیغه مشابه دستگاه تجاری یعنی مقدار 0.13 mm انجام داده و نتیجه به دست آمده را با نتایج آزمایش صحت سنجی خواهیم کرد.



شکل 67 تصویر نرم افزار PFC در حال نشان دادن پودر بر روی سطح در لایه دوم

در مرحله بعدی پس از پایان شبیه سازی های صورت گرفته به تحلیل نتایج می پردازیم. برای به دست آوردن صافی سطح لایه نشانده شده در این قسمت از نرم افزار رایگان ImageJ استفاده شده است. در این نرم افزار تصویر لایه نشانده شده را باز کرده و آن را به فرمت باینری تبدیل کرده و پروفایل سطح بالایی را گرفته و آن را ترسیم کرده ایم. نمونه لایه نشانده شده با ارتفاع تیغه برابر 0,13 را در شکل 52 می توان مشاهده کرد.



شکل 68 شکل لایه نشانده شده با ارتفاع تیغه 0,13 به صورت تصویر اصلی و به فرم باینری

پروفایل دو بعدی لایه نشانده شده برای ارتفاع نوک تیغه برابر 0,13 میلی متر را در شکل 53 می توان مشاهده کرد. این پروفایل با استفاده از دستور Analyse Line Graph در نرم افزار ImageJ به دست آمده است. با استفاده از نتایج این نمودار می توان مقدار Ra و Rq که پارامترهای نشان دهنده میزان صافی سطح هستند را به راحتی به دست آورد و گزارش کرد. در این حالت با محاسبه متوسط و انحراف از معیار داده های به دست آمده از پروفایل سطحی مقادیر $Ra=18.6 \mu m$ و $Rq=23.6 \mu m$ به دست آمده اند. برای اینکه از شبیه

تست زاویه آسودگی در نرم افزار نیز مشابه سازی شده است. تست در محیط نرم افزار 0,1 ابعاد و اندازه تست واقعی در نظر گرفته شده است. همچنین نکته دیگر این است که تست واقعی به صورت 3 بعدی انجام شده ولی در نرم افزار به صورت 2 بعدی صورت می گیرد که این به دلیل متقارن محوری بودن مساله مشکلی را ایجاد نمی کند و فرض قابل قبولی است. در تخمین اولیه از تعداد 3000 ذره استفاده شده است.

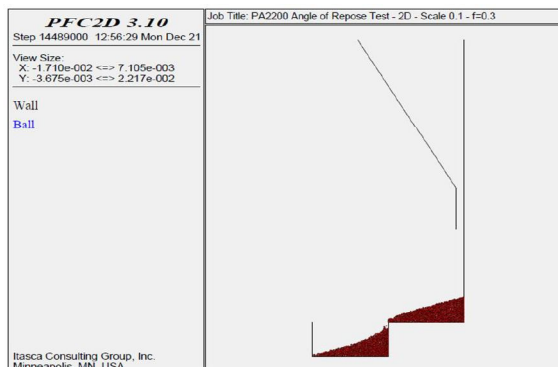
گفته شد که ضریب اصطکاک بین ذرات برابر 0,332 در نظر گرفته شده است. در اینجا سعی می شود با وارد کردن یک ضریب تصحیح، مقدار زاویه آرامش واقعی را به دست آوریم. مقدار ضریب تصحیح در این تست ها برابر مقادیر 0,0، 0,1، 0,2، 0,3، 0,6، 1,2 و 1,7 گرفته شده اند. تصویر صفحه نرم افزار را می توان در شکل 48 مشاهده کرد. نتایج حاصل از این قسمت با استفاده از نرم افزار WebPlot Digitizer تحلیل شده اند و مقدار زوایای آسودگی به دست آمده اند. زوایای آسودگی به دست آمده در جدول 14 گزارش شده است. همچنین تغییرات تانژانت زاویه آسودگی بر اساس تغییر مقدار ضریب اصطکاک بین ذرات پودر در شکل 49 نشان داده شده است. ضمناً یک برازش خطی نیز این نمودار انجام شده است. بر اساس این برازش خطی خواهیم داشت:

$$\tan(\theta) = 0.0891 \times MF + 0.3518$$

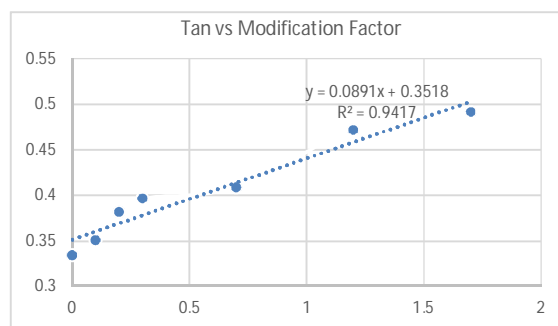
بر این اساس اگر چنانچه بخواهیم مطابق آنچه در تست انجام شده گزارش شده است مقدار زاویه آسودگی برابر با 39,8 درجه به دست بیاید می توان مقدار ضریب اصطکاک مناسب را تخمین زد:

$$\begin{aligned} \tan(39.8) &= 0.0891 \times MF + 0.3518 \rightarrow \\ MF &= \frac{\tan(39.8) - 0.3518}{0.0891} \rightarrow MF = 5.4 \end{aligned}$$

بنابراین می توان برای جبران سازی اثر دیگر خطا ها مقدار ضریب تصحیح را برابر 5,4 در نظر گرفت.

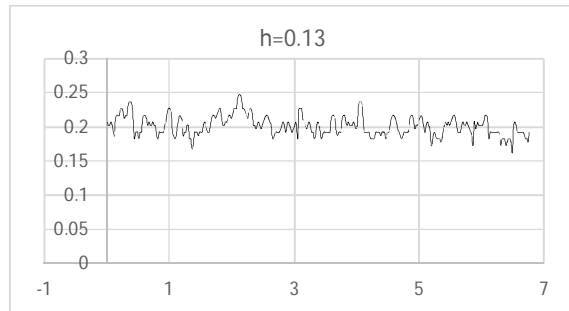


شکل 65 تست زاویه آسودگی در نرم افزار PFC2D در حالت متقارن محوری



شکل 66 نمودار تغییرات تانژانت زاویه آسودگی بر اساس مقدار ضریب تصحیح

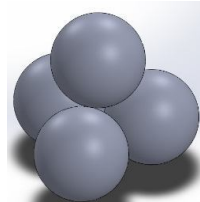
سازی صورت گرفته اطمینان حاصل کنیم می بایست این نتیجه را با مقدار آزمایش شده تطابق دهیم.



شکل 69 پروفایل رسم شده از روی داده های استخراج شده از شکل شبیه سازی برای ارتفاع تیغه برابر 0,13 میلیمتر.

برای یافتن صافی سطح باید توجه داشت که صافی سطح در حالت دو بعدی با صافی سطح در حالت سه بعدی متفاوت است و در حقیقت وقتی مساله را از حالت دو بعدی به حالت سه بعدی تغییر می دهیم لازم است تا ضرایب تصحیحی برای تبدیل صافی سطح دیده شده در حالت دو بعدی به حالت سه بعدی اعمال شود. این ضریب تصحیح بستگی به شکل ذرات و اندازه آنها دارد ولی در ساده ترین حالت و برای اینکه بتوان این ضریب را محاسبه کرد می توان فرض کرد که تعدادی گوی هم اندازه و کروی شکل به صورت منظم در کنار هم چیده شده باشند.

یک شکل ساده از این حالت را می توان در شکل 54 مشاهده کرد. با این فرض اگر به نحوه قرار گیری گوی ها در کنار هم نگاه شود، توجه می شود که در هنگامی که یک مقطع زده شود و به گوی ها به صورت دو بعدی نگاه شود فاصله بالاترین نقطه سطح از پایین ترن نقطه برابر مقدار شعاع گوی ها می باشد. در حالی که اگر به مساله به صورت سه بعدی نگاه کنیم مقدار اختلاف متفاوت می باشد. مثلاً اگر در شکل 54 نگاه شود، اگر سه گوی پایین بر روی یک سطح نشسته باشند، کمترین فاصله آن سطح از گوی بالایی مقدار اختلاف سطح در حالت سه بعدی خواهد بود. این و اندازه با هم یک نسبت برابر داشته و به اندازه گوی ها بستگی ندارند. در این جا برای ساده ترین حالت برای گوی های مساوی این ضریب مساوی مقدار 1,63 محاسبه می شود. این مقدار در محاسبه صافی سطح سه بعدی و تطابق آن با نتایج سه بعدی در این کار مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل 70 شماتیک ذرات پودر در کنار یکدیگر. این تصویر نشان میدهد که صافی سطح در حالت دو بعدی با حالت سه بعدی متفاوت است.

برای صحت سنجی نتایج به دست آمده کافی است در واقعیت با شرایط مشابه یک لایه نشانده شود و میزان صافی سطح آن سنجیده شود. در اینجا بهتر دیده شده است تا از نتایج آزمایش انجام شده توسط مکانیزم ساخته شده در شرکت آسال لیزر در ایران استفاده شود. به این منظور لایه نشانی انجام و از آن تصویر برداری شده است. برای یافتن صافی سطح از روی تصویر

از کار آقای چینگا و همکاران استفاده شده است که برای یافتن صافی سطح یک شبه کد در نرم افزار ImageJ توسعه داده اند [16].

این تست توسط آن دستگاه که یک دستگاه ایرانی نیز می باشد صورت گرفته است. تصویر داخل محفظه ساخت این دستگاه به همراه مکانیزم لایه نشانی آن را می توان در شکل 56 مشاهده کرد. مکانیزم لایه نشانی این دستگاه به شکل تیغه می باشد و ارتفاع نوک تیغه به اندازه 0,13 میلیمتر می باشد. با استفاده از این مکانیزم در دمای 80 درجه سانتیگراد لایه ای از پودر PA2200 نشانده شده است و تصاویر اپتیکی در محل از لایه نشانده شده گرفته شده است. تصویر تهیه شده از لایه نشانده شده را می توان در شکل 57 مشاهده نمود.

بعد از تهیه این تصویر با نرم افزار ImageJ مقدار صافی سطح گزارش شده برابر $Ra=19.15\mu m$ و $Rq=24\mu m$ به دست آمدند و این اعداد نیز مویدی برای مدلسازی صورت گرفته می باشند و بنابراین می توان تا حد قابل قبولی نسبت به صحت تست های صورت گرفته اطمینان حاصل کرد.



شکل 71 محفظه ساخت دستگاه شرکت آسال لیزر به همراه مکانیزم لایه نشانی داخل آن را می توان در این تصویر مشاهده کرد.

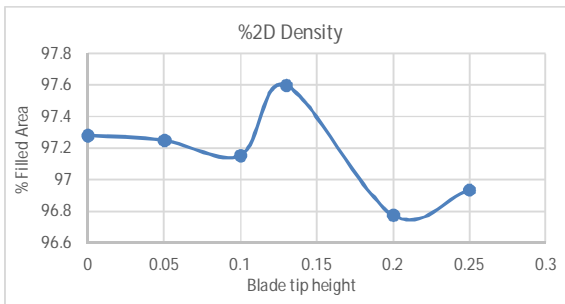


شکل 72 تصویر اپتیکی تهیه شده از لایه نشانده شده با استفاده از دستگاه شرکت آسال لیزر

5- ارائه نتایج شبیه سازی

پس از به دست آوردن نتیجه اولیه و همخوانی آن با نتایج آزمایش های صورت گرفته قبلی می توان از صحت کار اطمینان حاصل کرد. در ادامه با شبیه سازی های بیشتر، علاقه مند به یافتن فهم بیشتر از این مساله هستیم. در اینجا با تغییر زاویه سر تیغه که آن را با تغییر ارتفاع نوک تیغه می سنجیم به دنبال یافتن اثر آن بر روی کیفیت لایه نشانده شده می باشیم. ارتفاع سر

مورد دیگری که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است مقدار فشرده شدن ذرات و ایجاد یک لایه چگال تر را شامل می شود. چگالی را نمی توان به صورت دقیق در حالت سه بعدی محاسبه کرد ولی می توان مقدار سطح پوشیده شده در حالت دو بعدی را با استفاده از نرم افزار ImageJ و با استفاده از دستور Measure به دست آورد. و این می تواند یک معیار برای چگالی سه بعدی نیز باشد. در این جا نیز این کار صورت گرفت. نتیجه آن را می توان در شکل 60 مشاهده کرد. همانطور که دیده می شود، رابطه معنا داری در این جا وجود ندارد و می توان گفت تقریباً تصادفی می باشد.



شکل 75 تغییرات مقدار درصد سطح پر شده بر حسب ارتفاع نوک تیغه لایه نشان

مورد دیگری که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است بررسی اثر سرعت مکانیزم لایه نشانی بر روی کیفیت لایه نشاندن شده است. در آزمون قبلی سرعت حرکت تیغه در هنگام لایه نشانی برابر 10 Cm/sec گذاشته شده است. در ادامه این سرعت را تغییر داده و لایه نشانی مجدداً انجام خواهد شد و کیفیت لایه های نشاندن شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سرعت مکانیزم لایه نشانی در این آزمون برابر مقادیر 2 و 5 و 7.5 و 10 و 15 و 20 Cm/sec قرار داده شده است. در این مورد نیز لایه های نشاندن شده با استفاده از نرم افزار ImageJ مورد پردازش قرار گرفته اند و اطلاعات پروفایل سطحی آنها به دست آمده است. اطلاعات صافی سطح در ضریب تصحیح 1.63 نیز ضرب شده اند و این اطلاعات را می توان در جدول 17 مشاهده کرد.

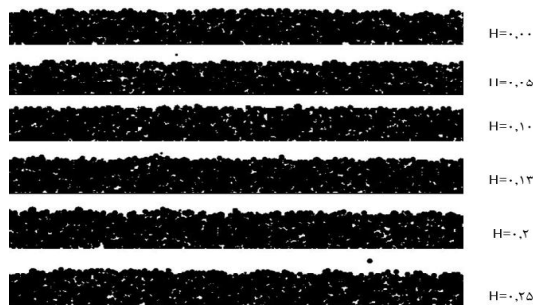
جدول 23 نتایج صافی سطح به دست آمده از لایه ها با سرعتهای متفاوت

Rq(um)	Ra(um)	V (cm/sec)
48	33	20
29	22	15
24	18	10
20	16	7.5
23	18	5
23	18	2

همچنین این نتایج به صورت نمودار نیز گزارش شده اند و آن را می توان در شکل 61 مشاهده کرد از نتایج حاصل شده پیداست که روند نمودار دارای یک نقطه بهینه در لایه نشانی می باشد که در اینجا در سرعت 7.5 cm/sec اتفاق افتاده است. با افزایش سرعت، مقدار صافی سطح به شدت خراب می شود و لایه نشاندن شده اصلاً دارای کیفیت مناسب نخواهد بود. همچنین در سرعت های خیلی پایین نیز لایه نشاندن شد مقداری کیفیت خود را از دست داده است. یکی از مواردی که می تواند در سرعت ساخت قطعات در دستگاه SLS بسیار مهم باشد همین سرعت مکانیزم لایه نشانی است و بنابراین اگر چنانچه بتوان سرعت مکانیزم لایه نشانی را بهبود بخشید و کیفیت لایه نشاندن شده همچنان در حد مطلوب باقی بماند مستقیماً بر روی سرعت

تیغه را برابر مقادیر 0.05, 0.1, 0.13, 0.2 و 0.25 قرار داده و لایه نشانی را انجام می دهیم و نتایج را مقایسه خواهیم کرد.

لایه های نشاندن شده را به فرم تصویر باینری می توان در شکل 58 مشاهده کرد. برای به دست آوردن صافی سطح نیاز به اطلاعات عددی پروفایل سطح وجود دارد. داده های بسیار زیادی به دست آمده که مجال گزارش آن در اینجا نیست و صرفاً به یک نمودار پروفایل سطح که از روی داده ها رسم شده، بسنده می کنیم.



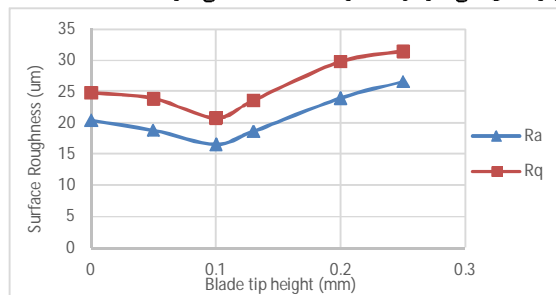
شکل 73 تصاویر باینری لایه های نشاندن شده با ارتفاع های مختلف نوک تیغه

مطابق تعریف، مقادیر Rq و Ra به عنوان معیارهای صافی سطح از روی پروفایل سطح با استفاده از نرم افزار ImageJ محاسبه شده و در جدول 16 گزارش شده اند. همچنین تغییرات مقادیر صافی سطح بر اساس ارتفاع نوک تیغه را می توان در نمودار شکل 59 مشاهده کرد.

جدول 22 مقادیر صافی سطح محاسبه شده از روی داده های پروفایل سطوح لایه های نشاندن شده در شبیه سازی

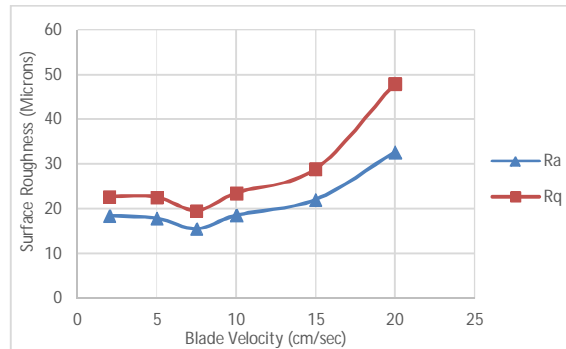
Rq(um)	Ra(um)	H
25	20	0
24	19	0.05
21	16	0.1
24	19	0.13
30	24	0.2
31	27	0.25

همانطور که به وضوح دیده می شود، این نمودار دارای یک نقطه بهینه بوده و نشان دهنده آن است که در ارتفاع نوک تیغه برابر حدود 0.1 mm صافی سطح لایه نشاندن شده بهینه می شود. بنابراین برای انتخاب تیغه در طراحی بهینه می توان از این نتیجه بهینه بهره جست. دلیل آن این است که با افزایش زاویه فشار زیادی به ذرات پودر وارد شده و با برداشته شدن این فشار ذرات پودر به سمت بالا پرتاب می شوند و این باعث به هم ریختگی لایه نشاندن شده می شود. همچنین با کاهش زاویه به هیچ وجه فشاری به ذرات پودر اعمال نمی شود و اصلاً توسط تیغه صاف نمی شوند.



شکل 74 نمودار نشان دهنده تغییر مقادیر صافی سطح لایه نشاندن شده بر اساس مقدار ارتفاع نوک تیغه بر حسب میلیمتر

ساخت قطعات در دستگاه SLS تأثیر خواهد داشت و این می تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی جداگانه بررسی شود.



شکل 76 نمودار تغییرات صافی سطح لایه نشاندۀ شده با تغییر سرعت مکانیزم لایه نشانی پودر

6- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا پارامترها و خواص پودر تجاری PA2200 مورد استفاده در این کار به صورت کامل به دست آمده اند. سپس لایه نشانی پودر در دستگاه SLS با همان هندسه در نرم افزار PFC2D شبیه سازی شده است. با تغییر هندسه تیغه لایه نشانی دو پارامتر صافی سطح لایه ایجاد شده و چگالی آن مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شده است که صافی سطح رابطه معنای داری با زاویه سر تیغه دارد و یک نقطه بهینه وجود دارد که در صورتی که مقدار زاویه از آن کمتر و یا بیشتر شود مقدار صافی سطح لایه نشاندۀ شده کمتر خواهد شد. بنابراین تیغه در مکانیزم لایه نشانی، باید به گونه ای طراحی شود که مقدار نوک تیغه 8 میلیمتری در قسمت جلویی به اندازه 0.1 میلیمتر (ضخامت نامی یک لایه در دستگاه SLS پلیمری) بالاتر باشد. همچنین چگالی لایه ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه گیری شده است که رابطه معناداری بین زاویه سر تیغه با مقدار چگالی لایه وجود ندارد.

در شبیه سازی دیگری با تغییر مقدار سرعت حرکت مکانیزم تیغه لایه نشانی، اثر آن بر روی صافی سطح بررسی شده است. در این مورد دیده شده است که یک مقدار بهینه برای سرعت حرکت مکانیزم لایه نشانی وجود دارد. با سرعت مکانیزم در مقدار 7.5 cm/sec صافی سطح لایه نشاندۀ شده به حداکثر خود می رسد و در سرعت های کمتر از این مقدار صافی سطح اندکی کمتر شده ولی با افزایش سرعت مکانیزم لایه نشانی صافی سطح به شدت متاثر می شود و شرایط خیلی بد خواهد شد.

می توان نوآوری های صورت گرفته را به موارد زیر خلاصه کرد:

یافتن خواص بین ذره ای پودر تجاری PA2200 مورد استفاده در دستگاه های تجاری که با استفاده از نتایج تست ها و شبیه سازی هایی صورت گرفت و این اولین قدم در شبیه سازی عددی DEM حرکت این ذرات می باشد.

کار تحلیلی بر روی مکانیزم لایه نشانی در دستگاه SLS با توجه به جستجوی های صورت گرفته قبلاً انجام نشده است و این کار اولین مورد است که به سیستم لایه نشانی پودر به صورت تحلیل دینامیکی نگاه می شود.

شبیه سازی دینامیک و حرکت پودر در مکانیزم لایه نشانی، با استفاده از نگاه ذره ای و حل آن با استفاده از روش DEM.

7- ارائه پیشنهادات

موارد زیر برای ادامه کار پیشنهاد می گردند:

- بررسی مکانیزم های لایه نشانی دیگر از جمله مکانیزم غلتک و مقایسه آن با مکانیزم تیغه با استفاده از تحلیل DEM همچنین توسعه روش های دیگر لایه نشانی بهبود یافته با توجه به نتایج حاصل از این کار.
- انجام لایه نشانی به علاوه تحلیل حرارتی و تابش لیزر از نگاه ذره ای و حل عددی با استفاده از روش DEM همچنین نرم افزار PFC2D قابلیت این را دارد که بتواند تحلیل مکانیکی و حرارتی را به همراه هم انجام دهد.
- تحلیل سه بعدی به جای تحلیل دو بعدی مکانیزم لایه نشانی پودر با استفاده از روش DEM و مقایسه آن با نتایج تحلیل دو بعدی.
- در این کار به ذرات پودر به صورت گوی های کروی نگاه شده است، اما در واقعیت این ذرات به هیچ وجه کروی نیستند، بنابراین ارائه مدلی برای امکان تحلیل ذرات غیر کروی تحلیلی واقعی تر به دست خواهد داد.
- تحلیل دقیق بر روی سرعت حرکت مکانیزم لایه نشانی به منظور طراحی سیستمی که بتوان در آن با حفظ کیفیت لایه نشاندۀ شده سرعت لایه نشانی را بالاتر برد.

8- مراجع

- [1] Bourell, David L., et al. "Performance Limitations in Polymer Laser Sintering." *Physics Procedia* 56 (2014): 147-156 ..
- [2] "Kruth, J-P., et al. "Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 56.2 (2007): 730-759 ..
- [3] "Brunermer, Dan. "Powder spreader." U.S. Patent No. 8,568,124. 29 Oct. 2013 ..
- [4] "Delisle, Robert P., et al. "Additive manufacturing using partially sintered layers." U.S. Patent Application 13/718,385 ..
- [5] "Weidinger, Jochen, Frank Muller, and Florian Pfefferkorn. "Device and Method for a Layerwise Mfg. of a 3-Dimensional Object From a Building Material in Powder Form." U.S. Patent Application 14/150,993 ..
- [6] "Van der Schueren, Bart, and Jean-Pierre Kruth. "Powder deposition in selective metal powder sintering." *Rapid Prototyping Journal* 1.3 (1995): 23-31 ..
- [7] "Kolosov, Seguey, et al. "Homogeneity aspects in selective laser sintering (SLS)." *Journal of materials processing technology* 177.1 (2006): 348-351 ..
- [8] "Ziegelmeier, Stefan, et al. "Characterizing the Bulk & Flow Behavior of SLS Polymer Powders." *Proceedings SFF Symposium, Austin (TX), USA. 2013 ..*
- [9] "Berretta, S., O. Ghita, and K. E. Evans. "Morphology of polymeric powders in Laser Sintering (LS): From Polyamide to new PEEK powders." *European Polymer Journal* 59 (2014): 218-229 ..
- [10] Ganeriwala, Rishi, and Tarek I. Zohdi. "Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes." *Procedia CIRP* 14 (2014): 299-304 ..
- [11] "OLAKANMI, Eytayo Olatunde. Effect of mixing time on the bed density, and microstructure of selective laser sintered

(sls) aluminium powders. Mat. Res. [online]. 2012, vol.15, n.2 [cited ,[14-11-2014 pp. 167-176 ."

- [12] Jing, Lanru, and Ove Stephansson. Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications: Theory and Applications. Vol. 85. Elsevier, 2007 ..
- [13] Maeda, Yasuhiro, et al. "Squeeze molding simulation using the distinct element method considering green sand properties." Journal of materials processing technology 135.2 (2003): 172-178 ..
- [14] Mohammadi, Soheil. Discontinuum mechanics: Using finite and discrete elements. Southampton: WIT press, 2003 ..
- [15] EOS GmbH, PA2200 Material Datasheet .
- [16] Chinga, Gary, et al. "Quantification of the 3D microstructure of SC surfaces." Journal of microscopy 227.3 (2007): 254-265 ..