



## Design and fabrication of a 3D printer based on the selective laser sintering (SLS) technology



### ARTICLE INFO

#### Authors

AbdolAlizade M.<sup>1</sup>,  
Parvaz H.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

#### \* Correspondence

Address: Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, 7 Tir Sq., Shahrood, Iran  
h.parvaz@shahroodut.ac.ir

#### How to cite this article

AbdolAlizade M, Parvaz H. Design and fabrication of a 3D printer based on the selective laser sintering (SLS) technology. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):219-226.

### ABSTRACT

With the development of additive manufacturing technology, the quantity of devices that can be used in small office with the commercial or educational purposes increases. In this research, the goal is to build a desktop 3D printer with selective laser sintering technology, which can be used for research purposes. The main concentration is focused on fabrication with parts that can be manufactured in the country or can be procured from the domestic market. It is also tried to make the 3D printer compatible with the common open-source additive manufacturing softwares. The fabricated 3D printer has the ability to work with all kinds of common polymer powders. In addition, it is easy to update the device's firmware according to the researcher's needs. The capabilities of the device was tested with Glucose powder, paraffin wax powder, and thermoplastic-ceramic material combinations. It is currently used for research on fabricating ceramic parts with indirect laser sintering.

**Keywords** Additive Manufacturing, Laser, Selective Laser Sintering, 3D Printing, Ceramic.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژهنامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۲۱۹-۲۲۶.



## طراحی و ساخت دستگاه چاپ سه بعدی برپایه فناوری تف جوشی لیزر (SLS)



### چکیده

با گسترش فناوری ساخت افزایشی، تنوع دستگاههایی که بتوان در محیط های کوچک اداری و تجاری و یا آموزشی مورد استفاده قرار داد بیشتر می‌شود. در این پژوهش هدف ساخت یک چاپگر سه بعدی رومیزی با فناوری تف جوشی انتخابی لیزر است که برای امور پژوهشی قابل استفاده بوده، قطعات آن ساخت داخل بوده و یا از بازار داخلی قابل تهیه باشد و همچنین با نرم افزارهای متن باز رایج چاپگرهای سه بعدی سازگار باشد. چاپگر سه بعدی ساخته شده توانایی کار با انواع پودرهای پلیمری رایج را دارد. علاوه براین به راحتی می‌توان میان افزار دستگاه را با توجه به نیاز پژوهشگر بروزرسانی کرد. این دستگاه با پودر گلوکز، پودر موم پارافین و ترکیبات مواد گرمانرم - سرامیک تست شده و در حال حاضر برای پژوهش‌های ساخت قطعات سرامیکی با تف جوشی انتخابی غیر مستقیم لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده‌ها

مصطفی عبدالعلی‌زاده<sup>۱</sup>  
هادی پروزا<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، میدان هفت تیر، شاهرود، ایران

h.parvaz@shahroodut.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** ساخت‌افزایشی، لیزر، تف‌جوشی انتخابی لیزر، چاپ سه بعدی، سرامیک.

## ۱- مقدمه

ایده‌ی اولیه روش تف‌جوشی انتخابی لیزر توسط دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک دانشگاه تگزاس در آستین ایالات متحده به نام کارل دکارت مطرح شد. این طرح زیر نظر استاد وی دکتر جو بیمان شروع شد و تا رسیدن به نتیجه تقریباً حدود ۶ سال به طول انجامید. در سال ۱۹۸۷ اختراعی تحت عنوان «دستگاه و روشی برای تولید قطعات به وسیله‌ی تف‌جوشی انتخابی» به ثبت رسید [1]. اولین نمونه‌ی تجاری این دستگاه در سال ۱۹۹۰ به بازار عرضه شد توسط شرکت DTM عرضه شد.

پرینت‌های سه بعدی با روش تف‌جوشی انتخابی لیزر همانند سایر روش‌ها در حال توسعه‌اند. اکنون طیف وسیعی از مواد را می‌توان در این پرینت‌ها استفاده کرد. از مواد گرما نر می شامل انواع پلاستیک‌ها مانند نایلون و مومها تا فلزات و سرامیک‌ها که در حال حاضر برای تولید قطعات متنوع با کاربردهای متفاوت استفاده می‌شود. با توجه به اینکه استفاده از این فناوری رو به رشد است زوایای ناشناخته زیادی چه در حیطه‌ی کاربردها و مواد اولیه و چه در اصلاح ساختار دستگاهها وجود دارند. بنابراین داستند دستگاهی که بتوان برای استفاده در پژوهش‌ها مورد استفاده قرار داد ضروری به نظر می‌رشد.

در فرایند چاپ سه‌بعدی، محدوده‌ی مشخصی از یک بستر پودر توسط انرژی گرمایی انتخاب، تف‌جوشی و یا ذوب می‌شود. انرژی گرمایی مورد نیاز برای این فرایند توسط پرتو لیزر و یا پرتو الکترون حاصل می‌گردد. برای سرامیک خالص تنها از پرتوهای لیزری استفاده شده و پرتو الکترون صرفاً برای فلزات استفاده می‌شود. تابش اشعه‌ی لیزر بر بستر پودر ممکن است باعث ذوب کامل ذرات پودر، ذوب جزئی ذرات پودر، سخت شدن ذرات پودر، تف‌جوشی ذرات پودر به صورت جسم صلب، واکنش شیمیایی ذرات پودر، یا واکنش ژله‌ای شدن (به عنوان مثال به دام انداختن ذرات پودر در یک ساختار سه‌بعدی) گردد. اگر پودر به طور کامل ذوب شود، فرایند جزء گروه ذوب انتخابی لیزر (SLM) قرار دارد. تمام فرایندهای دیگر بستر ذوب پودر لیزر-پایه را می‌توان جزء گروه تف‌جوشی انتخابی به‌وسیله لیزر قلمداد کرد [2]. به همین دلیل ساخت دستگاهی که سه شرط زیر را داشته باشد پیشنهاد شد.

- ابعاد دستگاه به گونه‌ای باشد که بتوان به صورت رومیزی از آن استفاده کرد.
- قابلیت پیش گرمایش برای مواد پلاستیک را تا دمای ۳۰۰ درجه داشته باشد.
- ابعاد بستر پودر به گونه‌ای باشد که برای تست حجم مواد اولیه زیادی لازم نداشته باشد.
- قیمت تمام شد دستگاه مناسب بودجه‌ی در نظر گرفته شده باشد.

- دستگاه قابلیت برنامه ریزی نرم افزاری را به طور کامل داشته باشد.
- تمامی قطعات را بتوان از بازار داخلی تهیه نمود.

مواد استفاده‌شده در فرآیندهای لایه افزودنی، طیف وسیعی را بسته به نوع و روش چاپ در برمی‌گیرد. برای چاپ ایمپلنت سرامیکی و فلزی، از روش‌های SLS و SLM استفاده می‌شود [3]. همچنین، در چاپ سرامیک به روش پردازش نوری دیجیتال از افزودن پودر آن به رزین فوتوپلیمر استفاده می‌کنند، که در پژوهش‌های انجام شده تا کنون از انواع پودرهای سرامیک از قبیل  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{ZrO}_2$  استفاده شده است [4]. در فرآیند چاپ به روش‌های SLS و DLP، می‌توان قطعه‌ی مورد نظر را در دمای معینی پیش گرم کرده تا انرژی مورد نیاز لیزر یا نور تابیده شده به سطح کاهش یابد. قطعه تولید شده با این روش‌ها، قطعه نهایی نبوده و نیاز به پخت در کوره با دمای مشخصی برای هریک از جنس‌های فلز یا سرامیک دارد. دیکرز و همکاران [5] با یک لیزر دو وات و پیش گرمایش پودر آلومینا با دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد عملیات تف‌جوشی را انجام دادند. کومار و همکاران [6] در پژوهشی با بررسی متغیرهای چاپ SLS نشان دادند که قدرت لیزر، دما و جهت چاپ قطعه، بر روی کیفیت قطعه تاثیر دارد. در میان این سه متغیر قدرت لیزر و دما تأثیر عمده‌ای بر روی دقت ابعادی داشته و دما نیز در سختی میکروسکوپی نمونه نقش به‌سزایی دارد. دینزانا و همکاران [7] با استفاده از بهینه سازی ذرات پودر، تغییر متغیرهای لیزر (از قبیل سرعت، قدرت، فشار محیط و روش اسکن) و ارتفاع لایه‌ها توانستند شکافهای میکروسکوپی در قطعات تولید شده به روش SLS را کاهش دهند.

عثمان و همکاران [8] ایمپلنت دندان را با استفاده از روش DLP طراحی و چاپ کرده و محصول نهایی را مورد ارزیابی قرار دادند. جهت‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه برای چاپ سه‌بعدی ایمپلنت دندان مورد استفاده قرار گرفت که بهترین قطعه از لحاظ خواص مکانیکی، در زاویه ۹۰ درجه بدست آمد. نتایج پژوهش نشان-دهنده دقت ابعادی مناسب قطعه نهایی ایمپلنت بود. وجود ترک‌های میکروسکوپی در ساختار قطعه چاپ‌شده مشهود گزارش شده که می‌تواند منجر به مشکلات بهداشتی در محیط تماس ایمپلنت با دهان و رشد میکروبه‌ها در مرز تماس شود. تانسل و همکاران [9] در یک تحقیق بالینی، به بررسی و پایش وضعیت ایمپلنت‌های دندان تیتانیومی که به روش فناوری لایه افزودنی تولید شده بودند، پس از کاشت به مدت سه سال نمود. این پژوهش روی هشتاد و دو بیمار (۴۴ مرد، ۳۸ زن، محدوده‌ی سنی ۲۶-۶۷ سال) صورت گرفت. نتایج این پژوهش، بیانگر موفقیت آمیز بودن طرح در ۹۴٪ از موارد و قابلیت استفاده از این ایمپلنت‌ها به عنوان یک شیوه‌ی درمانی مناسب گزارش گردید.

مخزن خوراک دهی پودر که وظیفه‌ی آن تامین پودر مورد نیاز برای سطح تف جوشی است. بسته به نوع طراحی مقداری پودر از مخزن روی سطح قرار می‌گیرد.

غلطک یا تیغه که پودر را روی سطح تف جوشی پهن می‌نماید.

### ۲-۳- مازول پیش گرم

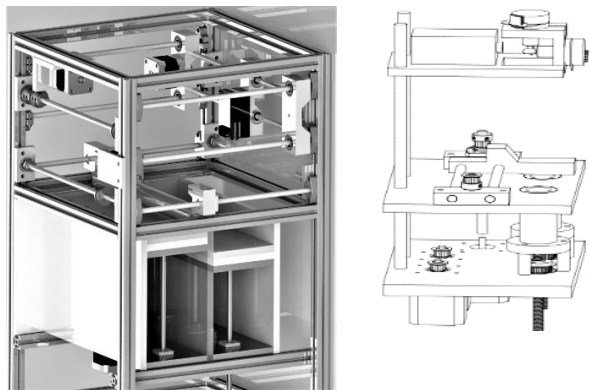
معمولا برای جلوگیری از تغییر شکل و خراب شدن سطوح اسکن شده از پیش گرم استفاده می‌کنند. معمولا دمای پودر را به در محدوده‌ی نزدیک به ذوب نگه می‌دارند. تا اختلاف دمایی بین ذوب شدن و کریستالیزه شدن را تا حد امکان کم کنند. این مازول ممکن است با المنت تامین حرارت را انجام دهد و همینطور ممکن است از لیزر ثانویه برای گرمایش سطح اسکن کمک بگیرد.

### ۲-۴- کنترلر

این قسمت وظیفه کنترل موتورها و انتقال کدهای لازم را برای حرکت آینه‌ها و تنظیم توان، سرعت، ارتفاع لایه‌ها، سرعت حرکت غلطک، دمای پیش گرم و به عهده دارد.

### ۳- طرح‌های اولیه دستگاه

طرح اولیه دستگاه با محوریت دو ایده کلی در شکل ۲ بنا شده است.



شکل ۲) طرح‌های اولیه برای ساخت، سمت راست مکانیزم گالوو اسکنر، سمت چپ مکانیزم دکارتی

این دو طرح در ساخت دستگاه‌های مشابه با تغییراتی مورد استفاده قرار گرفته است که طراحی‌های بعضی از آنها به صورت متن باز در دسترس عموم است و بقیه دستگاه‌های تجاری است. از جمله‌ی این طرح‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

### ۳-۱- نمونه‌هایی از دستگاه‌های تف جوشی انتخابی لیزر

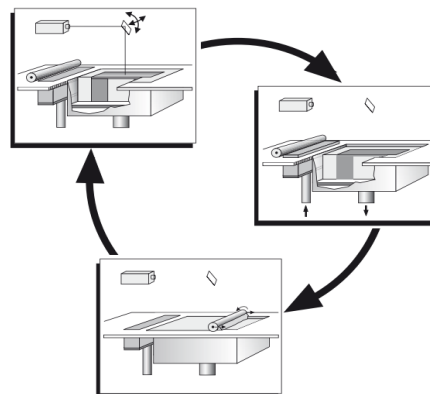
#### ۳-۱-۱- دستگاه اوپن اس ال اس (Open SLS)

در شکل ۳ چاپگر تف جوشی انتخابی لیزر با تبدیل یک دستگاه برش لیزری ۸۰ واتی ساخته شده است [12].

هوشمند و همکاران [10] در یک پژوهش بافت‌شناسی، به این نتیجه رسیدند که ۲۹ ماه پس از کاشت ایمپلنت زیرکونیا، این ایمپلنت‌ها در طولانی مدت ممکن است دچار تخریب شوند. از این رو بایستی در تحقیقات بالینی بلند مدت، پایداری زیرکونیا در بدن انسان مورد بررسی قرار گیرد تا از آن بتوان به عنوان جانشینی مطمئن برای ایمپلنت‌های تیتانیومی استفاده نمود.

### ۲- ساختار کلی دستگاه

پرینترهای سه بعدی تف جوشی انتخابی لیزر از بستر پودر برای چاپ استفاده می‌کنند و همانطور که از نام‌شان پیداست برای عملیات تف جوشی یا ذوب از انرژی لیزر استفاده می‌کنند. به طور کلی دستگاه دارای سه قسمت اصلی است.



شکل ۱) مراحل مختلف و اجزای اصلی تف جوشی انتخابی لیزر [11]

### ۲-۱- لیزر و متعلقات

لیزر وظیفه تامین انرژی لازم برای عملیات ذوب یا تف جوشی را فراهم می‌کند همینطور در بعضی موارد از لیزر دوم برای پیش گرمایش سطح مواد از لیزر دوم استفاده می‌کنند. برای سطح اسکن از دو مکانیزم کارتیزین و یا گالوو اسکنر استفاده می‌شود. مکانیزم کارتیزین خطای کمتری نسبت به گالوو اسکنر دارد اما سرعت پایینی دارد و همینطور در سرعت‌های بالا با ایجاد ارتعاشات ناخواسته به خصوص در لبه تیز منحنی‌ها می‌شود.

درمقابل گالوو اسکنر سرعت بالا و نویز کمی ایجاد می‌کند اما به دلیل غیر خطی بودن رابطه حرکت آینه‌ها نسبت به سطح اسکن مقداری خطا در نقاط اسکن ایجاد می‌کند. این نقص معمولا با لنزهای مخصوص کاهش پیدا می‌کند و الگوریتم‌های اسکن به کار گرفته شده به صورت سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری تاحد ممکن اصلاح می‌گردند.

### ۲-۲- بستر پودر

بستر پودر از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود. سطحی که پودر تف جوشی می‌شود این سطح پس از هر بار اسکن شدن توسط لیزر به اندازه‌ای که تعریف شده است پایین می‌رود تا با لایه‌ی جدیدی از پودر پوشانده شود.

افزار مربوطه ممکن است سرعت پایین تر از این باشد). همینطور فضای بستر پودر برای اسکن محدود شده تا مواد مصرفی کمتری برای هر بار پرینت لازم باشد. برای پیش گرم با دو المنت کمربندی و چهار حسگر دما به راحتی دمای پیش گرم تا حداکثر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را فراهم نمود. همینطور میزان مصرفی انرژی در این دستگاه با توجه به سایز المنتها بسیار کاهش یافته است.

### ۳-۳- نتایج گیری

با توجه به اینکه حجم ماشین کاری مکانیزم گالوو اسکنر نسبت به مکانیزم دکارتی کاهش یافته و همینطور مونتاژ دستگاه ساده و دقیق‌تر انجام می‌شود. مکانیزم گالوو اسکنر برای ساخت دستگاه مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳-۴- اجزای دستگاه ساخته شده

#### ۳-۴-۱- لیزر و متعلقات

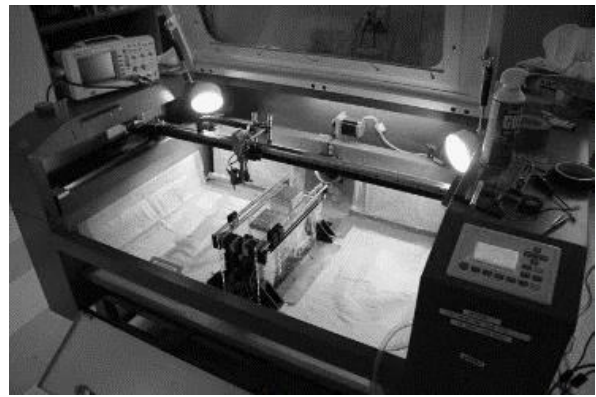
ماژول لیزر مورد استفاده در این دستگاه ۱۰ وات نامی و توان واقعی ۸/۵ وات با طول موج ۴۰۵ نانومتر است و با وردی عرض پالس ۰ تا ۵ ولت قابل تنظیم است. برای فوکوس لیزر از لنز ماژول استفاده می‌شود. فاصله کانونی ۱۱۲.۵ میلی‌متر است.

توان لیزر با توجه به خروجی ۱۲ بیتی بین عدد ۰ تا ۴۰۹۵ تنظیم می‌شود. از آنجاییکه بیشترین ولتاژ خروجی ۳/۳ ولت است، حداکثر توان لیزر ۵/۶ وات بوده و دلیل عدم تغییر قدرت خروجی آن به ۸/۵ وات افزایش طول عمر ماژول لیزر می‌باشد.

ماژول لیزر روی صفحه‌ای قرار گرفته که گالوو اسکنر هم روی آن سوار می‌شود. ماژول گالوو اسکنر از دو آینه متعامد که با موتورهای گالوو که زاویه ای بین ۲۰- تا ۲۰ درجه دوران می‌کنند تشکیل شده است. این ماژول دارای راه اندازی است که با ولتاژ ۱۵-، ۰، ۱۵ ولت تغذیه می‌شود. ورودی آنالوگ آن ۵- تا ۵ ولت برای حرکت آینه‌ها ۰/۵ ولت بر درجه بوده و بیشترین دامنه‌ی زاویه‌ای آن بین ۱۰- تا ۱۰ درجه است. شکل ۵ ماژول لیزر، گالوو اسکنر و راه انداز مربوطه را نشان می‌دهد.



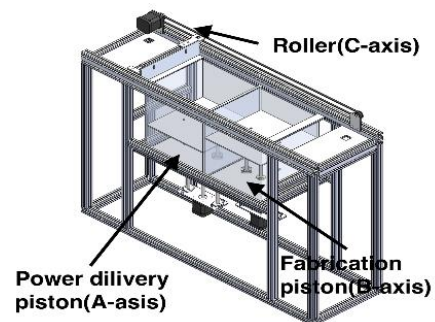
شکل ۵) ماژول لیزر و گالوو اسکنر



شکل ۳) دستگاه اوپن اس ال اس.

### ۳-۱-۲- دستگاه اوپن ام جی اس ال اس (openMGSLS)

این دستگاه برخلاف دستگاه قبلی از گالوو اسکنر برای اسکن سطح پودر استفاده می‌کند. در شکل ۴ نمای کلی شاسی دستگاه مشاهده می‌شود [13].



شکل ۴) طرح کلی دستگاه

### ۳-۲- انتخاب طرح اولیه

#### ۳-۲-۱- مکانیزم دکارتی و شاسی پروفیل

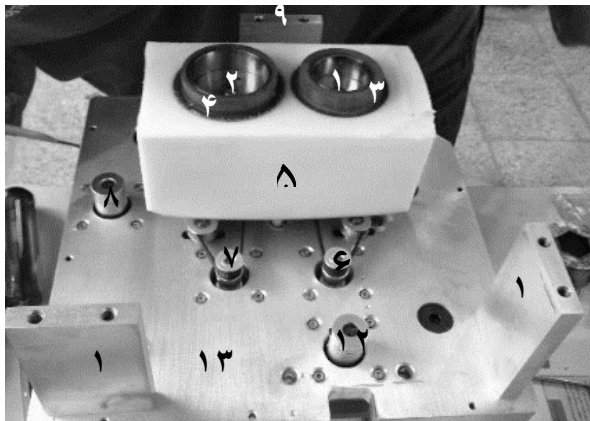
طرح شاسی سمت چپ (شکل ۲) از مکانیزم دکارتی برای جابجایی لیزر استفاده می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود دارای دو صفحه اسکن بزرگ بوده که با توجه به ابعاد ماژول لیزر مورد استفاده، صفحه‌ی چاپی به بزرگی ۱۰ در ۱۲ سانتی‌متر فراهم می‌کرد. اما سرعت اسکن سطح پودر کاهش پیدا کرده و همچنین میزان مصرف مواد اولیه را به خصوص برای چاپ قطعات کوچک افزایش می‌دهد. باید در نظر داشت از آنجا که طراحی این دستگاه برای داخل آزمایشگاه و یا دفتر کار باید مناسب باشد. حرکت مداوم محورها برای جابجایی لیزر صدای زیادی ایجاد کرده و به واسطه‌ی آنکه برای چاپ قطعات ساعتها دستگاه روشن باشد آلودگی صوتی آزار دهنده‌ای ایجاد می‌کند. با در نظر گرفتن اینکه باید دستگاه دارای سیستم پیش گرم باشد با توجه به ابعاد بستر پودر میزان انرژی مصرفی زیادی برای گرمایش لازم است. همینطور هزینه عایق کاری و نصب المنت ها را افزایش می‌دهد.

#### ۳-۲- مکانیزم گالوو اسکنر

دستگاه با استفاده از مکانیزم گالوو اسکنر می‌تواند تا سرعت ۲۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه اسکن کند (بسته به نوع گالوو اسکنر و سخت

### ۳-۴-۳- شاسی اصلی

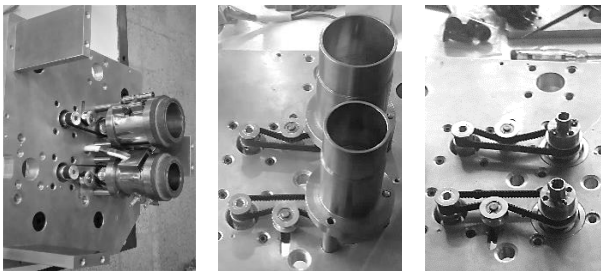
یک صفحه آلومینیومی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر است که تمامی قطعات مخزن پودر، موتورها، پایه‌ها و منابع تغذیه روی آن سوار می‌شود. و سطح بستر پودر نیز با سه تسمه‌ی آلومینیومی رو این صفحه سوار شده است. در شکل ۸ می‌توانید جزییات اتصال قطعات را مشاهده کنید.



**شکل ۸** نمای بالایی شاسی، ۱- مخزن تف‌جوشی، ۲- مخزن خوراک پودر، ۳-۴- واشر عایق حرارتی، ۵- قالب سیلیکونی عایق المنتها، ۶- موتور و متعلقات حرکت پیستون مخزن تف‌جوشی، ۷- موتور و متعلقات حرکت پیستون مخزن خوراک پودر، ۸- موتور و کویلینگ حرکت انتقالی غلطک، ۹ و ۱۰- پایه‌های نگه دارنده صفحه سطح بستر پودر، ۱۲- موتور و کویلینگ فوکوس لیزر، ۱۳- شاسی اصلی آلومینیومی

### ۳-۴-۴- مخازن پودر

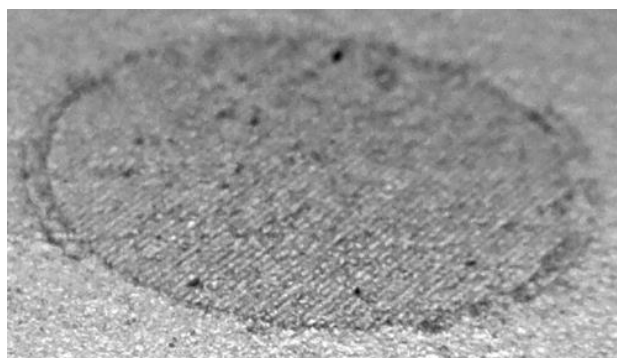
پرینتر دارای دومخزن است که در شکل ۹ دیده می‌شود، یکی زیر لیزر قرار دارد که فرآیند تف جوشی پودر روی آن انجام می‌شود و دیگری نزدیک غلطک که خوراک پودر را تامین می‌کند. هر دو دارای پیستونهایی هستند که با موتورپله‌ای و پیچی ۴ نخ گام ۸ به بالا و پایین حرکت می‌کند. درایور استپ موتورها از میکرو استپ یک به ۱۶ پشتیبانی می‌کند. به همین دلیل دقت کافی برای حرکت آنها وجود دارد. ضمن آنکه با تسمه و پولی قدرت موتور و دقت افزایش می‌یابد. به طوریکه هر استپ معادل ۱/۳۹ میکرومتر می‌شود.



**شکل ۹** از چپ به راست، مکانیزم حرکت پیستون‌های مخازن، مخازن تف جوشی، المنت کمربندی مخازن

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود لیزر گالوو اسکنر و راه انداز آن روی صفحه آلومینیومی سوار شده است، این صفحه با دو شفت راهنما و پیچ لیداسکروی ۴ نخ با گام ۸ به طور دستی و یا خودکار ارتفاعش تنظیم می‌شود. علت متغیر بودن ارتفاع تنظیم دقیق فوکوس لیزر است و همینطور هنگام تمیز کاری سطح نیاز است که از بستر پودر به اندازه کافی فاصله داشته باشد. تا باغبار پودر آلوده نگردد.

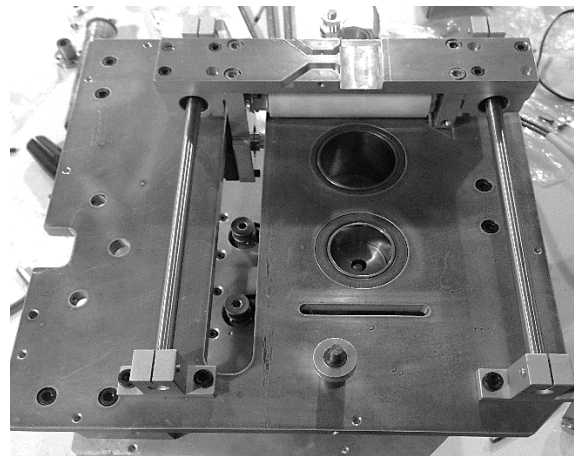
در این دستگاه ارتفاع لیزر از سطح بستر پودر ۱۰۴ میلی‌متر و فاصله‌ی آینه‌های گالوو اسکنر ۸ میلی‌متر است. در شکل ۶ می‌توانید سطح اسکن شده بستر پودر توسط لیزر را ببینید.



**شکل ۶** سطح اسکن شده بستر پودر توسط لیزر

### ۳-۴-۲- سطح بستر پودر

یک صفحه آلومینیومی ماشینکاری شده به ضخامت ۱۵ میلی‌متر است که غلطک روی آن سوار شده و روی مکانیزمهای حرکت پیستونها و موتورها را می‌پوشاند. غلطک دارای حرکت خطی و دورانی است. چرخش غلطک خلاف جهت حرکت خطی است. این کار باعث می‌شود که ذرات پودر زیر غلطک نمانند و پودر به درستی و یکنواخت روی بستر چاپ پخش شود. سرعت خطی و دورانی قابل تنظیم است و بسته به نوع ماده مورد استفاده معمولاً نیاز به تنظیم دارد. در شکل ۷ می‌توان صفحه بالایی همراه با مکانیزم غلطک را دید.



**شکل ۳** سطح بستر پودر و مکانیزم حرکتی غلطک



### ۳-۴-۵- موتورها، منابع تغذیه و بردهای الکترونیک

دستگاه از پنج موتور پله‌ای ۱/۸ درجه به همراه درایورهای میکرو استپ (DRV8825) استفاده کرده است. همینطور دارای برد آپ-امپ برای تبدیل و لئاژ خروجی دیجیتال به آنالوگ دستگاه از بازه ۰/۵۵ تا ۲/۷۵ ولت به ۵- تا ۵ ولت است. برد آردوینو دیو (Due) و شیلد رمپس ۱/۴ برای دریافت فرامین از طریق جی‌کد و ارسال محاسبات مربوطه به گالوو اسکنر و سایر اجزا دستگاه است.

ترانسفورماتور ۱۵-۰-۱۵ ولت ۲ آمپر به همراه برد مربوطه ولتاژ خروجی یکنواخت ۰-۱۵، ۱۵ را برای برد گالوانومتر و برد آپ-امپ را تامین می‌کند. و برای الکتریسیته مورد نیاز ماژول لیزر و بردهای آردوینو از منبع تغذیه سویچینگ ۱۲ ولت ۲۰ آمپر استفاده می‌شود. مزیت استفاده از این منبع تغذیه پایداری ولتاژ خروجی با متغیر بودن ولتاژ ورودی بین ۱۸۰ تا ۲۴۰ ولت است.

### ۳-۴-۶- بدنه و فن‌ها

بدنه از ورق فولادی ۱/۵ میلی‌متری ساخته شده است، بدنه دستگاه را در مقابل ضربه به قطعات حساس محافظت می‌کند و همینطور از خروج نور آبی لیزر که برای چشم مضر است جلوگیری می‌کند. همچنین یک پوشش محافظ برای لیزر و متعلقات در نظر گرفته شده تا از آسیب دیدن گالوو و لیزر در اثر ضربه جلوگیری شود. یک پلکسی شیشه‌ای سبز رنگ به عنوان در استفاده شده تا ضمن امکان دیدن داخل دستگاه از چشم‌ها در مقابل نور لیزر محافظت نماید. سه عدد فن و شکافهایی برای تهویه هوا روی بدنه وجود دارد در شکل ۱۱ نمای کلی دستگاه ساخته شده به دیده می‌شود.



شکل ۵) سمت راست دستگاه ساخته شده و سمت چپ دستگاه طراحی شده

### ۴- نرم افزار

#### ۴-۱- میان افزار

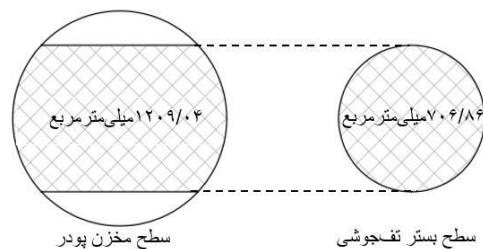
دستگاه از دو میان افزار استفاده می‌کند که هردوی آنها متن باز هستند، یکی برای کنترل دما و نمایش مقدار آن روی نمایشگر است که در بخش ۴-۳-۳ توضیح داده شده است و دیگری میان افزاری است که هدایت گالوو اسکنر و مخازن و همینطور کنترل لیزر را به عهده دارد. میان افزار مورد استفاده اپن‌ام‌جی‌اس‌ال‌اس

سطح پیستون تف جوشی دایره‌ای به قطر ۳۰ میلی‌متر است و تغییر ارتفاعی معادل ۴۰ میلی‌متر را دارد. بنابراین دستگاه قادر است قطعاتی با سطح مقطع دایره به قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر چاپ کند. که برای نمونه‌سازی قطعات کوچک مناسب است. برای پیش گرم از المنت کمربندی ۶۰ واتی استفاده شده است که سیلندر را به طور کامل احاطه کرده و یک حسگر دمایی نزدیک به سطح بستر پودر روی پیستون و دیگری چسبیده به بدنه سیلندر کار گذاشته شده، تا کنترل دما به صورت دقیق تر انجام شود.

سطح پیستون خوراک پودر دایره‌ای به قطر ۴۴ میلی‌متر است، و تغییر ارتفاع ۴۴ میلی‌متری دارد. علت بزرگتر بودن سطح مخزن خوراک اینست که پوشش کاملی برای بستر تف جوشی فراهم آورد. این مخزن هم دارای المنت کمربندی ۸۰ واتی است و مشابه مخزن تف جوشی دارای دوسنسور دمای مجزا است. کنترل دما با سنسورهای چسبیده به سیلندر انجام می‌شود. تا از افزایش ناگهانی دما در لبه‌های مخزن جلوگیری شده و مانع خراب شدن پودر شود. کاربرد تنها دمای سطح پیستونها را می‌بیند و بنابراین وقتی دما به مقدار مطلوب رسید عملیات چاپ انجام می‌شود.

کل مجموعه مخزن‌های پودر با سیلیکون عایق شده تا ضمن جلوگیری از اتلاف حرارتی به قطعات دیگر آسیب نرساند. همینطور یک فن ۸ در ۸ سانتی متری تهویه‌ی هوا را انجام می‌دهد. کنترل دما به عهده یک برد آردوینو مگا۰۲۵۶، شیلد رمپس (Ramps) ورژن ۱/۴ و نمایشگر تک رنگ گرافیکی ۱۲۸ در ۶۴ پیکسل است. همچنین دو عدد رله حالت جامد بوده برای انتقال فرامین از برد شیلد به المنتها به کار گرفته شده، میان افزار متن باز نسخه‌ی ۱/۷ رپیتیر (Repetier) برای برنامه ریزی برد آردوینو استفاده شده است. با استفاده از زیربرنامه تنظیم خودکار دمای میان‌افزار پارامترهای پی‌آی‌دی برای کنترل دمای سیلندرها به دست آمده است.

میزان ضریب بالا آمدن پیستون مخزن خوراک با ارتفاع لایه‌ها قابل تنظیم است. با توجه به اینکه تفاوت مساحت سطح پیستون خوراک ۱/۷۱ برابر سطح تف جوشی است. می‌توان از ضریب ۰/۵۹ به بالا استفاده کرد. در شکل ۱۰ می‌توانید نسبت مساحت را ببینید.



شکل ۴) سطح مخزن پودر ۱/۷۱ برابر سطح تف جوشی است.

ساخته شد. در شکل ۱۲ چند قطعه ساخته شده دیده می‌شود. برای این قطعات پیش گرم در نظر گرفته شد چون در دمای عادی سطح قطعات خراب می‌شد.

جدول ۱) تنظیمات نهایی ساخت قطعات با پودر شکر

متغیرهای مورد مطالعه	آزمایش شده	مطلوب
ارتفاع لایه	۵۰،۱۳۰،۱۵۰ میکرومتر	۱۰۰ میکرومتر
سرعت	۲۰،۴۰،۶۰ میلی‌متر برثانیه	۲۰ میلی متر برثانیه
چگالی اسکن سطح	۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪	۷۵٪
قدرت لیزر	۵، ۴، ۵، ۶۱ وات	۵ وات
دمای پیش گرم	۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد	۱۲۰ درجه سانتی‌گراد



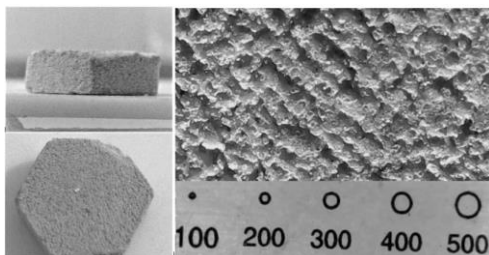
شکل ۶) قطعات ساخته شده با پودر شکر

#### ۲-۶- موم پارافین

در شکل ۱۳ قطعه‌ای را می‌بینید که با موم پارافین ریخته‌گری ساخته شده است. موم پارافین ریخته‌گری آسیاب شده و پس از دوبار الک شدن با الک مش ۱۷۰ (اندازه‌ی ذرات ۸۸ میکرومتر) با تنظیمات جدول ۲ ساخته شد. از آنجاییکه موم در طول موج ۴۰۵ نانومتری لیزر دستگاه جذب ندارد. از اکسید تیتانیوم به میزان ۲ درصد استفاده شده است.

جدول ۲) تنظیمات دستگاه برای سخت قطعات مومی

متغیرهای مورد مطالعه	آزمایش شده	مطلوب
ارتفاع لایه	۱۰۰، ۱۳۰، ۱۵۰ میکرومتر	۱۵۰ میکرومتر
سرعت	۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ میلی‌متر برثانیه	۸۰ میلی متر برثانیه
چگالی اسکن سطح	۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪	۱۰۰
قدرت لیزر	۵/۶۱ وات	۵/۶۱ وات
دمای پیش گرم	۲۵، ۴۰، ۶۰ درجه سانتی‌گراد	۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷) سمت راست، بزرگنمایی سطح قطعه چاپ شده با موم (اعداد قطر دایره‌ها به میکرو متر رانشان می‌دهند) و سمت چپ نمای مجاور و بالای همان قطعه

است. برای حرکت دورانی غلطک، همینطور کنترل قدرت لیزر، سرعت اسکن و سازگاری بیشتر با نرم‌افزارهای مورد استفاده تغییراتی در آن ایجاد شده است.

#### ۲-۴- نرم افزارهای برش و ارسال جی کد

برای این دستگاه تقریباً می‌توان از تمامی نرم‌افزارهای سازگار با پرینترهای افدی‌ام و همینطور تمامی نرم‌افزارهایی که امکان ارسال جی‌کد را دارند، می‌توان استفاده کرد. از جمله می‌توان به نرم‌افزارهای متن باز (slice3r)، (Pronterface)، (Ultimaker Cura)، نرم‌افزار رایگان (MatterControl) و همینطور نرم‌افزار تجاری (Simplify 3D) اشاره کرد. برای ارسال جی‌کد به دستگاه از نرم افزار (Pronterface) و برای برش زدن قطعات، تنظیم سرعت و قدرت لیزر و سایر تنظیمات مربوطه از نرم‌افزار (Slic3r) استفاده شده است.

#### ۳-۴- نرم افزار طراحی

برای طراحی قطعات می‌توان از تمامی نرم‌افزارهایی که توانایی طراحی سه بعدی دارند استفاده کرد، از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به نرم‌افزار متن باز بلندر و فری کد و همینطور نرم‌افزارهای تجاری سالیدورک، اوتوکد، مایا اشاره کرد.

#### ۵- روش کار

مراحل کلی به ترتیب طراحی سپس برش زدن با اعمال تنظیمات مورد نظر و تبدیل آن به جی‌کد و در نهایت چاپ و ساخت نمونه است. برای طراحی با این دستگاه می‌توان پارامترهای زیر را داشت.

ابعاد قطعه نباید از دایره‌ای به قطر ۲۶ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر بیشتر باشد.

باتوجه به نوع ماده اولیه ارتفاع لایه‌ها از ۷۵ تا ۱۵۰ میکرومتر متغیر است و باید برای هر ماده به طور مستقل بررسی و برآورد شود.

تقریباً تمام مواد گرمانرم که قابلیت پودر شدن را داشته باشند و همچنین ترکیبی از سرامیک با مواد گرما نرم هم می‌توانند در این دستگاه مورد استفاده قرار گیرند. از جمله این مواد به نایلون ۱۱، ۱۲، ۶۶ و پروپیلین پودر موم، پلی استایرن و یا ترکیبی از مواد فوق‌الذکر با سرامیک‌هایی همچون زیرکونیا، آلومینا استفاده کرد.

#### ۶- مواد و نمونه‌های ساخته شده با دستگاه

تا کنون سه ترکیب متفاوت به عنوان ماده اولیه برای ساخت قطعات استفاده شده است.

#### ۱-۶- پودر شکر

پودر شکر به تنهایی قابلیت جذب نور یو-وی را ندارد و به خاطر ساختار خشک آن، با کاکائو به نسبت ۹۸ به ۲ مخلوط و پس از دوبار الک شدن با مش ۱۷۰ مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت با تنظیماتی که در جدول ۱ آمده، قطعاتی با پودر شکر و کاکائو

**منابع مالی:** این طرح با اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به انجام رسیده است و تاریخ‌های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۱۳۹۶/۹/۲۵ و ۱۳۹۸/۹/۲۵ می‌باشد.

### مراجع

- 1- T. Carl R. Deckard, Austin, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering," Oct. 17, 1986.
- 2- R. Trombetta, J.A. Inzana, E. M. Schwarz, S. L. Kates, H. A. Awad. 3D printing of calcium phosphate ceramics for bone tissue engineering and drug delivery. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), pp. 23-44, 2017.
- 3- N. Guo, M. C. Leu. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), pp. 215-243, 2013.
- 4- R. He, W. Liu, Z. Wu, D. An, M. Huang, H. Wu, Q. Jiang, X. Ji, S. Wu, Z. Xie. Fabrication of complex-shaped zirconia ceramic parts via a DLP stereolithography-based 3D printing method. *Ceramics international*, 44(3), pp. 3412-16, 2018.
- 5- J. Deckers, J. Vleugels, J. P. Kruth. Review additive manufacturing of ceramics: A Review. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 5(4), pp. 245-26, 2014.
- 6- N. Kumar, H. Kumar, J. S. Khurmi. Experimental investigation of process parameters for rapid prototyping technique (selective laser sintering) to enhance the part quality of prototype by Taguchi method. *Procedia Technology*, 23, pp.352 - 360, 2016.
- 7- A. Danezan, G. Delaizir, N. T. Doyen, G. Gasgnier, J.M. Gaillard, P. Duport, B. N. Ali. Selective laser sintering of porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(2), pp. 769-775, 2018.
- 8- R. B. Osman , A. J. Van der Veen , D. Huiberts , D. Wismeijer , N. Alharbi. 3D printing zirconia implants; a dream or a reality? An in-vitro study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, (75), pp. 521-528, 2017.
- 9- S. Tunchel, A. Blay, R. Kolerman, E. Mijiritsky, J. A. Shibli. Clinical study 3D printing/additive manufacturing single titanium dental implants: A prospective multicenter study with 3 years of follow-up. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Dentistry*, (2016), pp. 9-18, 2016.
- 10- A. Houshmand, P. Donkiewicz, R. Smeets, O. Jung, M. Barbeck. Incidental finding of a degrading zirconia dental implant 29 months after implantation: Histological and histomorphometrical analysis. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2018 (published online at 7 May 2018).
- 11- Gebhardt A, Understanding Additive Manufacturing. In: Understanding Additive Manufacturing. 2012. p. I-IX. Available from: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446431621>
- 12- OpenSLS - Andreas Bastian: Work [Internet]. [cited 2022 Jul 23]. Available from: <https://andreasbastian.com/openSLS>
- 13- SLS 3D printer | Qiayuan Liao [Internet]. [cited 2022 Jul 23]. Available from: <https://qiayuanliao.netlify.app/project/sls/>

### ۳-۶- زیرکونیای پایدار شده با ۸ مول ایتریا

به علت اینکه سرامیک‌ها برای تف جوشی به انرژی زیادی نیاز دارند و باعث افزایش قیمت تولید و ساخت دستگاه می‌شود، معمولاً به همراه معمولاً یک ماده‌گرمانرم مخلوط شده یا روکش نازکی روی ذرات سرامیک ایجاد می‌شود، تا با تف‌جوشی آن قطعه شکل می‌گیرد، بعد از آنی مرحله ممکن است روی قطعات عملیاتی از قبیل پرس ایزواستاتیک سرد یا گرم صورت گرفته تا چگالی آن افزایش یابد. بعد از آن قطعات را داخل کوره گذاشته و در دمایی حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ماده‌ی گرمانرم را جدا می‌کنند و در نهایت در دمای ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ عملیات تف جوشی کامل می‌شود. در شکل ۱۴ نمونه‌های زیرکونیایی که توسط دستگاه ساخته شده دیده می‌شود، بهینه سازی تولید این قطعات و ترکیبات مواد اولیه آن در دست انجام است.



شکل ۸) از چپ به راست نمونه‌ی درحال چاپ، نمونه ساخته شده و نمونه‌ی نهایی با زیرکونیا-ایتریا ۳ مول

### ۷- نتیجه گیری

با توجه به محدودیت منابع سعی شد تا دستگاه با بودجه مصوب ساخته شود. دستگاه ساخته شده در آزمایش‌های انجام شده موفق عمل کرده است. دستگاه قابلیت این را دارد که مجدداً برنامه ریزی شود و به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که تنظیمات متناسب با نیاز خود را اعمال کند. بخش زیادی از این تنظیمات را می‌توان از طریق جی‌کد به آن ارسال کرد. در نهایت تقریباً تمام قطعات در بازار داخلی یافت می‌شوند که یکی دیگر از مزایای این دستگاه است. در نهایت تمامی اهدافی که برای ساخت دستگاه در نظر گرفته شد، محقق گردید.

### تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود، شرکت محترم شیلگان، شرکت محترم واکرمن، جناب آقای دکتر قطعی و مهندس مهدی دهقان بابت همکاری بی‌دریغ برای ساخت دستگاه کمال تشکر را داریم.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان اصول اخلاقی را در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت نموده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

سهم نویسندگان: اختیاری