

## بهینه سازی بررسی دقت ابعادی ساخته شده به روش FDM و مقایسه آن با روش SLA

روش پرینت سه بعدی FDM از جمله تکنولوژی های پرینت سه بعدی است که به سرعت در حال رشد و گسترش است. با این حال موادی که در این نوع روش پرینت سه بعدی استفاده می شود بیشتر محدود به دو ماده ABS و PLA شده است ولی نیاز به مواد با قابلیت های مکانیکی بهتر منجر به تولید فیلامنت های تازه در حوزه پرینترهای سه بعدی FDM شده است. از آنجا که پارامترهای مختلفی روی کیفیت نهایی قطعات تولید شده با پرینتر سه بعدی تأثیرگذار است، لذا مطالعه و بررسی اثر این پارامترها اهمیت ویژه ای پیدا می کند. فرآیندهای استریو لیتوگرافی و FDM به واسطه دقت ابعادی پایین در مقایسه با فرآیند CNC دارای دامنه کاربرد محدودتری می باشند. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند استریو لیتوگرافی مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب اهمیت شامل: ضخامت لایه، مدل دریچه، فاصله بین دریچه ها، عمق بارگیری دریچه و اضافه بارگیری دریچه است. بعلاوه عوامل مرتبط با دقت ابعادی فرآیند FDM که در اینجا در نظر گرفته شد، به ترتیب اهمیت شامل: ضخامت لایه، درصد تراکم، سرعت حرکت نازل و قطر نازل می باشد که علاوه بر این، چهار عدد نمونه به وسیله فرآیند FDM برحسب ضخامت لایه و درصد تراکم متفاوت استریو لیتوگرافی و FDM ساخته شد. هدف بررسی عوامل مؤثر در فرآیند استریو لیتوگرافی است. نتایج نشان داد که قطعات ساخته شده ۸۵٪ استحکام محصول اصلی را دارا می باشند؛ لذا می توانند به عنوان قطعات عملکردی استفاده شوند.

عیسی حزباوی<sup>۱</sup>

استادیار

بهنام سپهر<sup>۲</sup>

استادیار

واژه های راهنما: استریو لیتوگرافی، دقت ابعادی، ضخامت لایه، نمونه سازی سریع، FDM

### ۱- مقدمه

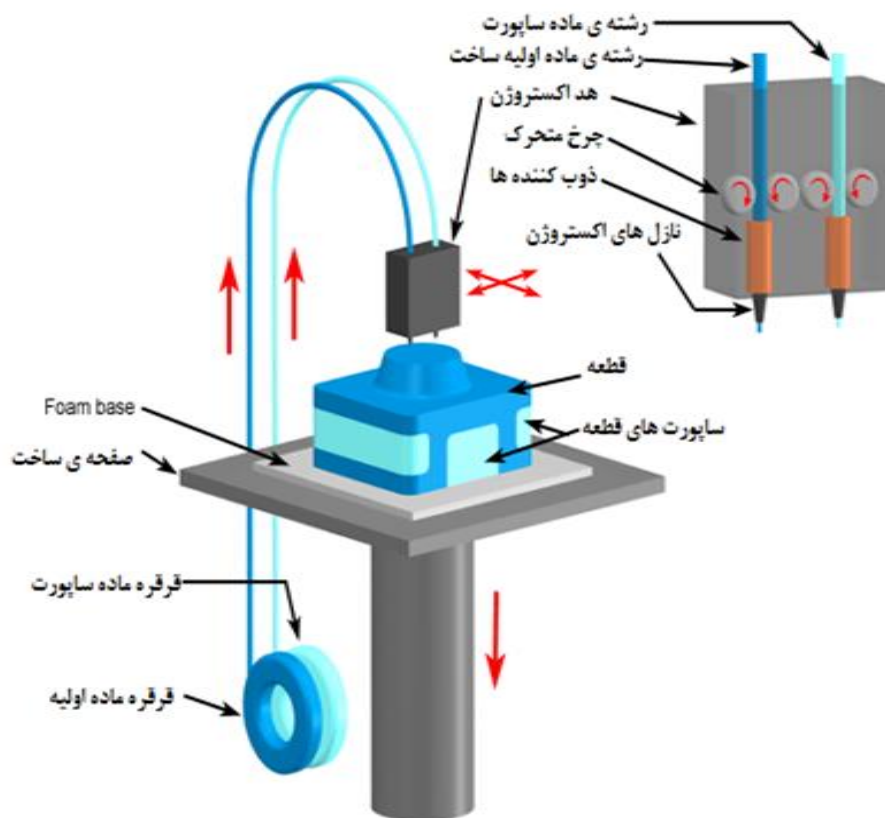
تولید افزایشی سرامیک (CAM) با ارائه طراحی های پیچیده و قابلیت های تولید خودکار، محدودیت های روش های سنتی تولید سرامیک را برطرف نموده است.

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، [hazbawi.i@lu.ac.ir](mailto:hazbawi.i@lu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، [sepehr.b@lu.ac.ir](mailto:sepehr.b@lu.ac.ir)

این فناوری به ساخت قطعات سرامیکی با هندسه‌های پیچیده و متخلخل امکان می‌دهد که در صنایع مختلف کاربردهای گسترده‌ای دارد [۱]. فناوری‌های تولید افزایشی سرامیک (CAM) بر اساس نوع ماده اولیه به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۲]: (۱) روش‌های مبتنی بر پودر مانند SLS و SLM، (۲) روش‌های مبتنی بر جامد مانند LOM، (۳) روش‌های مبتنی بر دوغاب مانند SL و DLP. در میان این روش‌ها، استریولیتوگرافی (SL) به دلیل استفاده از لیزر پالسی و اسکن نقطه‌به‌نقطه، بالاترین وضوح چاپ را ارائه می‌دهد [۳]. مدل‌سازی رسوب جوش خورده (FDM) یکی از روش‌های پرکاربرد تولید افزایشی است که در سال ۱۹۸۸ توسط شرکت استراتاسیس معرفی شد [۴]. در این روش ماده اولیه پلاستیکی یا مومی به صورت لایه‌به‌لایه از طریق ذوب شدن و رسوب‌گذاری روی یک بستر ساخته می‌شود. قطر نازل و سرعت حرکت آن، دقت و کیفیت قطعه نهایی را تعیین می‌کنند. FDM به دلیل سادگی و هزینه پایین، به‌طور گسترده در نمونه‌سازی سریع قطعات مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. فناوری FDM قادر به استفاده از طیف گسترده‌ای از مواد ترموپلاستیک است. این مواد به صورت رشته‌ای در دستگاه قرار گرفته و با ذوب شدن لایه به لایه، قطعه مورد نظر را شکل می‌دهند. شکل (۱) شمای کلی این فرایند را نشان می‌دهد. از جمله مواد قابل استفاده در FDM می‌توان به ABS، پلی‌کربنات، پلی‌سولفون و الاستومر اشاره کرد [۵].

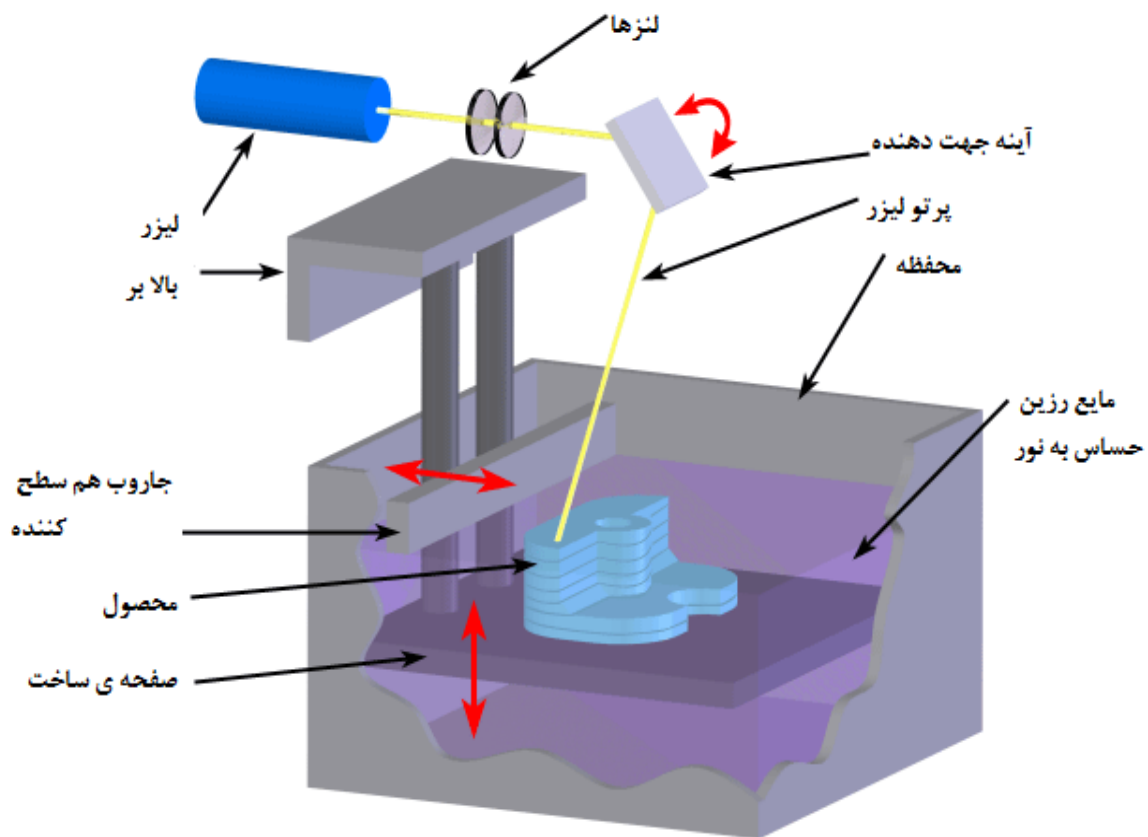
فناوری FDM از یک ربات CNC برای ساخت قطعات استفاده می‌کند. این ربات با کنترل دقیق، مواد مذاب را لایه به لایه روی هم قرار می‌دهد تا قطعه نهایی شکل بگیرد. در برخی سیستم‌ها، از دو نازل استفاده می‌شود؛ یک نازل برای پاشش ماده اصلی و دیگری برای ایجاد ساختار پشتیبان. قابلیت‌های کلیدی FDM در جدول (۱) ارائه شده است [۵].



شکل ۱- نمای شماتیک ماشین FDM [۵]

جدول ۱- قابلیت‌های فرآیند FDM [۵]

نام فرآیند	Fdm or fused deposition modeling
نوع ماده	جامد (رشته‌ای)
مواد	Thermoplastic such as ABS, polycarbonate, and polyphenylsulfone; elastomers
حداکثر ابعاد قطعه	۳۶/۰۰*۲۴/۰۰*۳۶/۰۰ in
حداقل جزء قطعه	۰/۰۰۵ in
حداقل ضخامت لایه	۰/۰۰۵ in
تلورانس	۰/۰۰۵ in
پرداخت سطح	زبر
سرعت ساخت	کم
کاربردها	آزمایش ابعادی یا هندسی، آزمایش عملکرد، ابزارسازی سریع، قطعات کوچک با جزئیات، مدل‌های نمایشی، صنایع غذایی و پزشکی، کاربرد در حرارت بالا



شکل ۲- نمای شماتیک ماشین SLA [۵]

استریولیتوگرافی (SLA) اولین فناوری چاپ سه بعدی بود که به صورت مستقیم از مدل‌های CAD، اشیاء سه‌بعدی تولید می‌کرد. در این روش، یک لیزر UV به صورت لایه‌به‌لایه بر روی یک مخزن حاوی رزین مایع تابیده می‌شود. با برخورد لیزر، رزین جامد شده و به تدریج قطعه ساخته می‌شود. در طی این فرایند، رزین دچار افت حجمی می‌شود که منجر به افزایش چگالی قطعه نهایی می‌شود (شکل (۱)) [۴].

میزان افت حجم به شدت تحت تأثیر خود رزین، مدل ساخت قطعه و پارامترهای انتخابی قرار دارد. با اینکه استریو لیتوگرافی قادر به تولید اشکال هندسی پیچیده در کوتاه‌ترین زمان ممکن است که در شرایط عادی غیرممکن بوده و ساخت آن نیازمند مدت زمان طولانی در فرآیندهای ماشینی معمولی می‌باشد؛ اما دقت ابعادی و پایداری فیزیکی نمونه‌های تولیدشده توسط این فرآیند در مقایسه با فرآیندهای ماشینی معمولی دارای حجم ایده آل لازم نمی‌باشد که کاربرد آن را محدود می‌کند [۶].

ماشین SLA با استفاده از فایل‌های SLC به جای STL، مشکل تخمین سطوح سه‌بعدی را حل کرده است. همچنین، با معرفی رزین‌های اپوکسی XB5170، خطای ناشی از رزین‌های آکریلات برطرف شده و دقت ابعادی بهبود یافته است. بنابراین، بهینه‌سازی پارامترهای آماده‌سازی برای دستیابی به بالاترین دقت ابعادی در بخش‌های مختلف SLA، از اهمیت ویژه‌ای برای محققان برخوردار است (شکل (۲)) [۷]. انحراف قطعات تولید شده توسط دستگاه SLA تحت تأثیر پارامترهای متعددی از جمله ضخامت لایه، سرعت اسکن و فاصله تیغه قرار دارد. محققان با انتخاب پارامترهای کلیدی و بررسی روابط پیچیده بین آن‌ها، به دنبال بهینه‌سازی فرآیند تولید و کاهش انحراف قطعات هستند [۵].

ضخامت لایه به عنوان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر دقت ابعادی قطعات تولید شده توسط دستگاه SLA شناخته شده است. کاهش ضخامت لایه منجر به کاهش قرارگیری لایه در معرض لیزر و در نتیجه کاهش افت حجمی و افزایش دقت ابعادی می‌شود [۸]. رحمتی و قدمی [۴] در تحقیقات خود این رابطه را به دست آوردند:

$$E_{MAX} = E_C \exp[(l_t + h_0)/D_p] \quad (1)$$

که  $E_C$  مواجهه حساس و  $D_p$  عمق نفوذ می‌باشد و هر دو پارامتر مقادیر ثابت مواد رزین هستند. برای تبلور موفقیت‌آمیز در فرایند SLA، میزان قرارگیری لایه در معرض لیزر باید از  $E_C$  بیشتر باشد. افزایش این میزان قرارگیری، منجر به افزایش افت حجمی و خطای ابعادی می‌شود. از سوی دیگر، کاهش ضخامت لایه به منظور کاهش این میزان قرارگیری، زمان ساخت را افزایش داده و هزینه تولید را بالا می‌برد.

مطالعه لی و همکاران نشان می‌دهد که ضخامت لایه، اضافه بارگیری درپچه و فواصل بین درپچه‌ها، سه پارامتر کلیدی تأثیرگذار بر دقت ابعادی قطعات SLA هستند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که کاهش ضخامت لایه، کاهش اضافه بارگیری درپچه و افزایش فواصل بین درپچه‌ها به بهبود دقت ابعادی کمک می‌کند [۹].

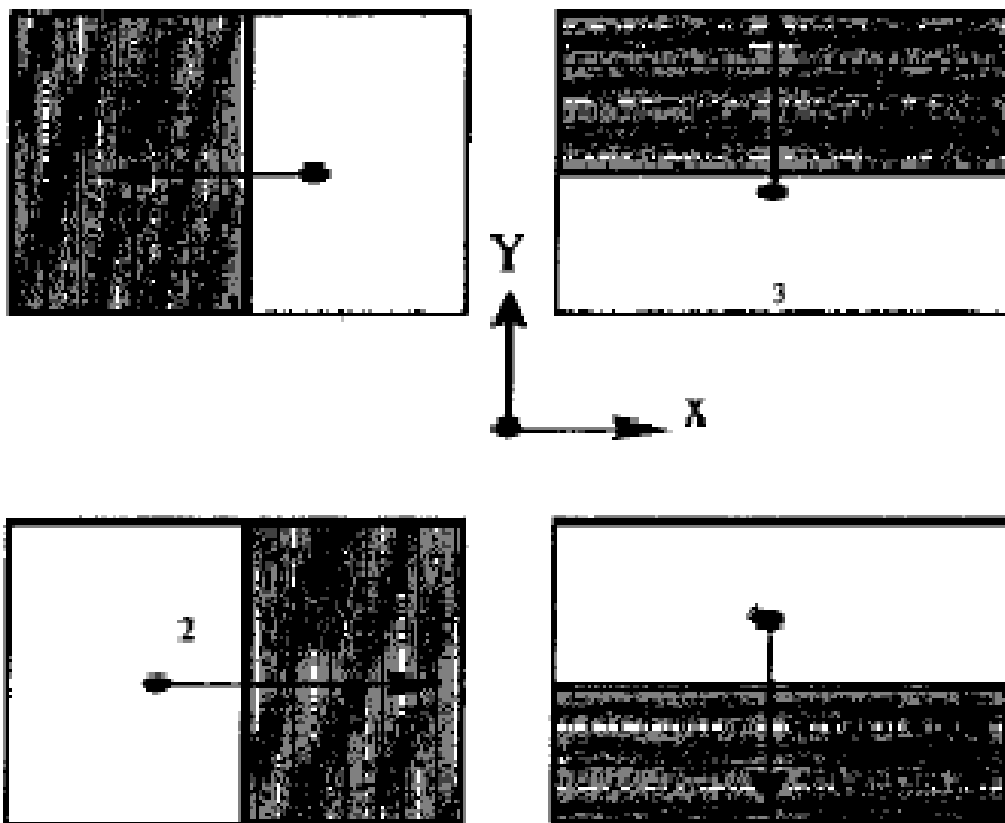
مطالعه راجو و همکاران نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن دقت ابعادی، خواص مکانیکی و هزینه تولید، ضخامت لایه ۱۰۰ میکرومتر به عنوان بهترین گزینه برای چاپ سه‌بعدی با فناوری SLA انتخاب شده است [۱۰].

مطالعه ژو و همکاران نشان می‌دهد که ضخامت لایه به عنوان مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر دقت ابعادی قطعات تولید شده توسط دستگاه SLA شناخته شده است. به طوری که کاهش ضخامت لایه به طور قابل-توجهی به بهبود دقت ابعادی کمک می‌کند. همچنین، پارامترهای اضافه بارگیری حفره و فاصله تیغه نیز تأثیر قابل توجهی بر دقت ابعادی دارند [۷].

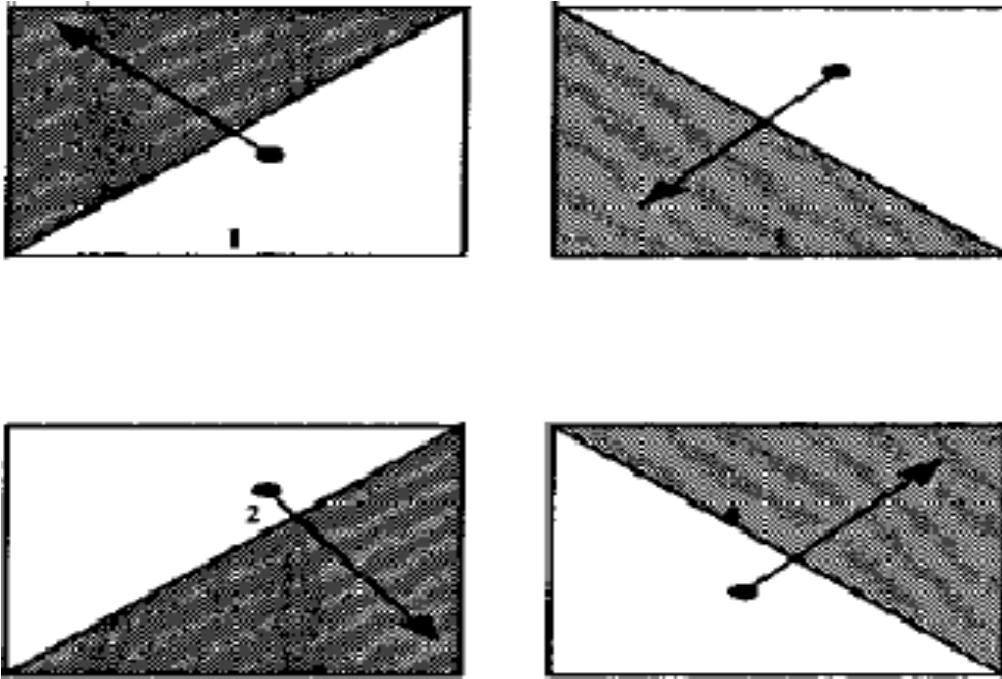
آنا و هون با استفاده از یک مدل حفره جدید و ضخامت لایه ۱۹۰ میکرومتر، موفق به بهبود دقت ابعادی و کاهش زمان ساخت قطعات رزین آکریلات شدند. کاهش عمق نفوذ نوار بردار به لایه زیرین (اضافه بار حفره) منجر به کاهش قرارگیری در معرض لیزر و در نتیجه کاهش افت حجمی و افزایش دقت ابعادی می‌شود [۱۱].

مطالعه لی و همکاران نشان می‌دهد که برای دستیابی به بهترین نتیجه در فرآیند لیزر، میزان تابش لیزر باید بهینه باشد، به طوری که نه بیش از حد باشد تا باعث اشباع شود و نه کمتر از حد لازم باشد تا اتصال لایه‌ها را تضمین کند [۹]. مطالعه ژو و همکاران نشان می‌دهد که علاوه بر میزان اضافه بارگذاری حفره، فاصله بین حفره‌ها (hs) نیز نقش مهمی در دقت ابعادی قطعات تولید شده دارد و وجود فاصله‌ای بهینه بین حفره‌ها برای دستیابی به بهترین دقت ضروری است [۷].

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که فاصله بین حفره‌ها و عمق بارگذاری حفره، دو پارامتر کلیدی در دستیابی به دقت ابعادی مطلوب در فرآیند استریولیتوگرافی هستند. فاصله بهینه بین حفره‌ها و عمق بارگذاری مناسب، به همراه انتخاب استراتژی حفره‌گذاری مناسب (مانند Star-Weave با تغییرات مورد نیاز)، منجر به کاهش تاب‌خوردگی و بهبود دقت ابعادی قطعات تولیدی می‌شود [۹ و ۱۲]. استراتژی حفره‌گذاری واگرا ستاره‌ای (DSW) با شروع حفره‌گذاری از مرکز قطعه و حرکت به سمت کناره‌ها، به ایجاد ساختاری منجر می‌شود که باعث کاهش تاب‌خوردگی یک‌طرفه و افزایش دقت ابعادی قطعه می‌شود. این استراتژی بر اساس نتایج مطالعات قبلی و با هدف ایجاد تعادل در فشارهای جانبی اعمال شده بر قطعه طراحی شده است (شکل (۳)) [۱۱ و ۱۳].



شکل ۳- STAR-WEAVE واگرا [۱۱]



شکل ۴ - STAR-WEAVE واگرای قطری [۱۱]

روش اسکن واگرای قطری (STAR-WEAVE DDSW) که توسط آنا و هون ارائه شده، نسخه اصلاح شده‌ای از روش اسکن واگرا (DSW) است. تفاوت اصلی این دو روش در جهت اسکن قطعه است؛ در روش DDSW، اسکن به صورت قطری و در زاویه ۴۵ درجه انجام می‌شود که باعث می‌شود نیمی از قطعه قبل از نیمه دیگر اسکن شود (شکل (۴)) [۱۱].

آنا و هون [۱۱] با استفاده از مدل حفره‌ی DSW و DDSW قطعات ساخته‌شده توسط رزین آکریلات را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ضخامت لایه  $190\ \mu\text{m}$  همراه با این استراژی‌های جدید حفره برای دقت ابعادی و زمان ساخت مطلوب بهتر نتیجه می‌دهد. روش اسکن کروی (CSW) با توزیع یکنواخت فشار افت حجمی در طول قطعه نسبت به روش اسکن ستاره‌ای (STAR-WEAVE) منجر به کاهش این فشار و در نتیجه افزایش دقت قطعه تولیدی می‌شود. در این روش، جایگزینی حفره‌های محوری با حفره‌های دایره‌ای و شعاعی و تغییر جهت حفره‌های شعاعی در هر لایه، به کاهش تنش‌های داخلی و بهبود دقت ابعادی قطعه کمک می‌کند [۱۴ و ۱۵]. تحلیل مقایسه‌ای روش‌های اجزای محدود (FEM) و تفاضلات محدود (FDM) نشان می‌دهد که FEM برای هندسه‌های پیچیده و شرایط مرزی متغیر به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر مناسب‌تر است. در مقابل، FDM برای هندسه‌های ساده و مسائل خطی کارایی بالاتری دارد. هر دو روش در سال‌های اخیر با توسعه الگوریتم‌های جدید بهبود یافته‌اند [۱۶]. عیوب سطحی در هسته‌های زیست پزشکی و سرامیکی، به ویژه در مواردی مانند تاج‌های دندان‌ی و ایمپلنت‌های استخوانی، از اهمیت بالایی برخوردار است. ویژگی‌های سطحی مانند زبری، تخلخل و مورفولوژی به‌طور مستقیم بر عملکرد این مواد از جمله سازگاری زیستی، استحکام و زیبایی آن‌ها تأثیرگذار هستند [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱].

با توجه به پیچیدگی مسائل انتقال حرارت و مکانیک سیالات، روش المان محدود (FEM) به دلیل دقت و انعطاف‌پذیری بالاتر نسبت به روش تفاضلات محدود (FDM) انتخاب شده است. هدف اصلی، بررسی تأثیر

پارامترهای مختلف بر دقت ابعادی قطعات تولید شده به روش FDM و SLA و ایجاد رابطه‌ای بین این پارامترها برای افزایش دقت و کاهش انحراف قطعات است. فناوری پرینت سه بعدی FDM به دلیل مزایای متعدد از جمله دقت بالا و هزینه کمتر به‌طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به هزینه بالای این فناوری، شناخت عمیق پارامترهای مؤثر بر کیفیت قطعات تولید شده جهت دستیابی به بهترین نتایج، امری ضروری است. در این پژوهش، با هدف بهبود دقت ابعادی قطعات تولید شده به روش‌های استریولیتوگرافی (SLA) و مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM)، مدلی برای شناسایی و بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی این دو فرآیند ارائه شده است. پارامترهای مؤثر در هر دو روش، از جمله ضخامت لایه، مدل دریچه، درصد تراکم و سرعت حرکت نازل، شناسایی و اهمیت آن‌ها در دقت ابعادی قطعات بررسی شده است. همچنین، نمونه‌هایی با ترکیب پارامترهای مختلف تولید و ارزیابی شده‌اند.

## ۲- مبانی و روش‌ها

در این پژوهش چهار متغیر (ضخامت لایه، فاصله‌گذاری بین حفره‌ها، اضافه بارگیری حفره‌ها و عمق بارگیری حفره‌ها) و تأثیر آن‌ها بر دقت ابعادی مطابق جدول (۲) در سه سطح بررسی شدند. در این پژوهش ضمن تمرکز بر تأثیر متغیرهای منتخب بر خواص مکانیکی نمونه‌های پرینت سه بعدی، پارامترهای فرآیند چاپ مطابق با مقادیر بهینه مشخص شده در جدول (۳) ثابت نگه داشته شدند تا تأثیر سایر متغیرها به صورت مجزا مورد ارزیابی قرار گیرد [۲۲، ۲۳ و ۲۴].

برای طراحی یک آزمایش با آرایه متعامد، محاسبه دقیق درجات آزادی کلیه متغیرها امری ضروری است. تعداد درجات آزادی هر متغیر که به عنوان کمترین تعداد شرایط رفتاری مورد نیاز برای توصیف آن متغیر در نظر گرفته می‌شود، یک واحد کمتر از تعداد سطوح آن متغیر است. این اطلاعات به محققان امکان می‌دهد تا بهینه‌ترین آرایه متعامد را برای بررسی اثرات متقابل بین متغیرها انتخاب کنند [۲۲، ۲۳ و ۲۴].

### جدول ۲- متغیرها و سطوح

پارامتر	مقدار
پر شونده‌گی نمونه‌ها	۱۰۰ درصد
دمای میز پرینت	۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
قطر نازل	۰/۴ میلی‌متر

### جدول ۳- لیست پارامترهای آزمایشی و سطوح عاملی آن‌ها

سطح ۱ (mm)	سطح ۲ (mm)	سطح ۳ (mm)	
۰/۱۲۵	۰/۱۹۰	۰/۲۵۰	ضخامت لایه
۰/۲۱۰	۰/۲۰۰	۰/۲۲۰	فاصله‌گذاری حفره‌ها (A)
-۰/۰۴	-۰/۰۳۵	-۰/۰۲۵	اضافه‌بارگیری حفره‌ها (B)
۰/۲۵۰	۰/۲۰۰	۰/۲۱۰	عمق بارگیری حفره‌ها (C)

با توجه به وجود چهار متغیر مستقل با سه سطح مختلف در این پژوهش، مجموعاً ۸ درجه آزادی طراحی آزمایش تعیین شد. به منظور بهینه‌سازی تعداد آزمایش‌ها و کاهش هزینه‌ها، آرایه متعامد ۹ به عنوان طرح آزمایش مناسب انتخاب گردید [۲۴]. این آرایه با ارائه ۹ آزمایش، امکان بررسی همزمان تأثیر متقابل تمام متغیرها را فراهم می‌آورد.

## ۲-۱-۲ طراحی به روش FDM

این نوع چاپ به دو روش اصلی انجام می‌شود.

### ۲-۱-۱-۲ تعویض دستی فیلامنت

#### ۲-۱-۲-۲ استفاده از پرینترهای چند نازله

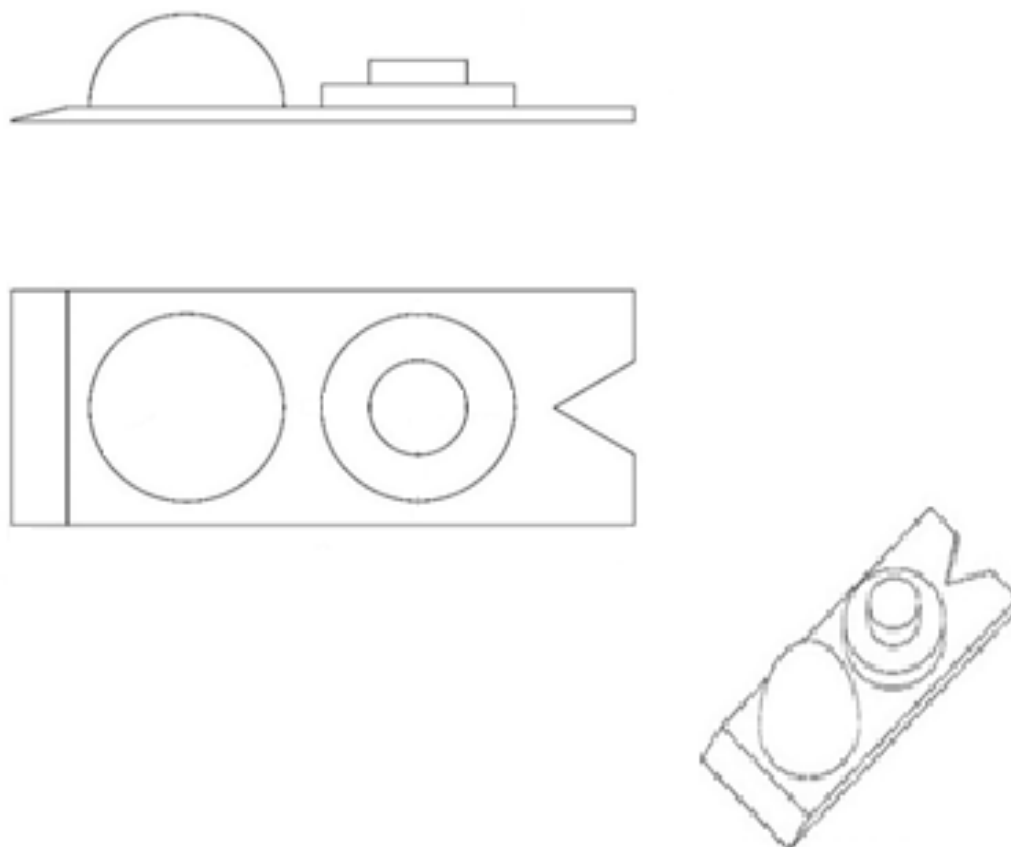
در روش تعویض دستی فیلامنت، در طول فرآیند چاپ، فیلامنت‌های رنگی مختلف به صورت دستی تعویض شدند. این روش نیازمند دقت بالا و نظارت مستمر است؛ اما امکان تولید اشیاء با چندرنگ را فراهم می‌کند. روش دیگر که مؤثرتر بوده و در مادانتکنولوژی نیز از آن بهره گرفته شد استفاده از پرینترهای چند نازله است که به طور خودکار فیلامنت‌های رنگی مختلف را مدیریت و در فرآیند چاپ ادغام می‌کنند. این پرینترهای چند نازله، هرکدام می‌توانند فیلامنت‌های رنگی متفاوتی را ذوب و رسوب کنند. این روش نه تنها دقت بالاتری دارد بلکه امکان تولید اشیاء پیچیده‌تر و حرفه‌ای‌تر را نیز فراهم می‌کند.

## ۲-۲ ساخت به روش FDM

همان‌گونه که اشاره شد در فرآیند FDM پارامترهای متعددی در دقت ابعادی قطعه تأثیرگذار هستند که در این قسمت با ساخت ۴ عدد نمونه به وسیله FDM برحسب ضخامت لایه و درصد تراکم متفاوت و کنترل ابعادی قطعات ساخته شده به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این روش پرداخته و نتایج حاصله با روش استریو لیتوگرافی مقایسه شدند. در اینجا نقشه‌ی قطعه که به روش استریو لیتوگرافی مورد آزمایش قرار گرفت، آورده شده است (شکل (۵)). در این آزمایش سعی شده ۴ نمونه از نقشه مذکور با ضخامت لایه و درصد تراکم متفاوت ساخته شود و نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد (جدول (۴)). تجهیزاتی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت: دستگاه FDM مدل LEAPFROG با قابلیت ساخت بر اساس ضخامت لایه ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ میلی‌متر و در ابعاد ۲۰۰×۲۷۰×۲۰۰ میلی‌متر و همچنین اندازه‌گیری ابعادی قطعات با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات Microscribe (CMM<sup>۱</sup>) مدل G2x با دقت  $\pm 5 \mu m$  انجام شد. قطعات ساخته شده در این پروژه بر اساس جدول (۲) ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفتند. قطعات آزمایشی ساخته شده در شکل (۶) نشان داده شده است.

طراحی نمونه‌ها در نرم‌افزار SolidWorks انجام شد و توسط نرم‌افزار Simplify 3D جی کد نمونه‌ها برای پرینت تهیه گردید. میزان پر شونده‌گی (infill) نمونه‌ها ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و پرینت با نازل ۰/۴ میلی‌متری انجام گرفت.

<sup>۱</sup> Coordinate Measuring Machines



شکل ۵- نقشه مورد آزمایش به روش استریو لیتوگرافی

جدول ۴- ارزیابی قطعات ساخته شده در این پروژه

شماره قطعه	ضخامت لایه	درصد تراکم
۰۱	۰/۲mm	٪۲۰
۰۲	۰/۳mm	٪۲۰
۰۳	۰/۲mm	٪۱۰
۰۴	۰/۳mm	٪۱۰



شکل ۶- مدل‌های آزمایشی ساخته شده

### ۳-۲- تجهیزات مورد استفاده

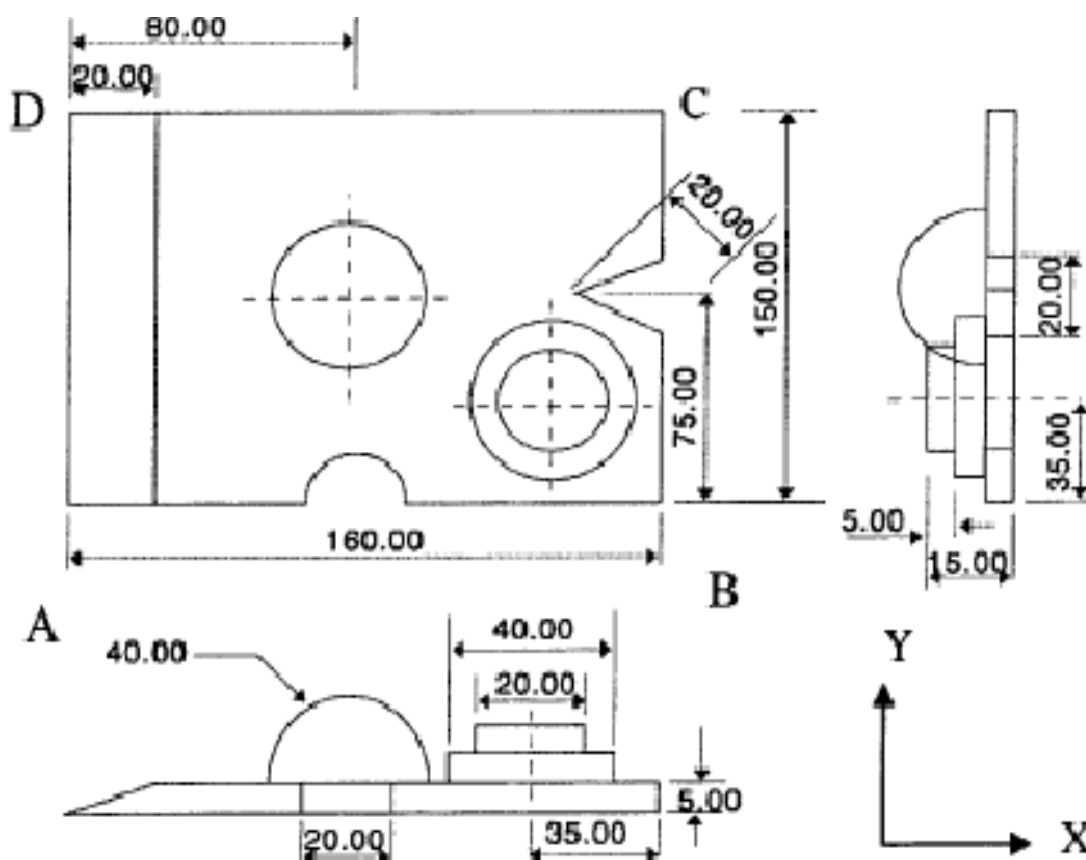
تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش به این قرار است: Sun Sparc 10 و Silicon Graphics Indigo Workstations، دستگاه استریو لیتوگرافی سیستم‌های 3D مدل SLA-250 سری ۴۰ و واحد پس از عمل-آوری (PCU). این پژوهش در مرکز نمونه‌سازی سریع<sup>۱</sup> انجام شد و تمامی اندازه‌گیری‌های ابعادی با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات<sup>۲</sup> CMM، Mitutoyo Machine BHN-706 با دقت  $\pm 5 \mu m$  انجام شد. قطعه آزمایشی مربوطه در شکل (۶) نشان داده شده است [۲۵].

### ۴-۲- طرح آزمایش‌ها

در این پژوهش با انجام آزمون پایه در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار آزمایش‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS 22 و Excel 2023 انجام شد. کلیه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح پنج درصد با یکدیگر مقایسه شدند.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- مدل سازی



شکل ۷- مدل آزمایشی [۱۱]

<sup>۱</sup> Rapid prototyping center

آنا و هون [۱۱] از روش تاگوچی برای انتخاب پارامترهای آزمایشی کار خود و همچنین آنالیز نتایج استفاده کردند. در پژوهش حاضر، مقادیر انحرافی اندازه‌گیری شده توسط محققان قبلی برای پیش‌بینی صحیح دقت ابعادی و بررسی تأثیر این پارامترها بر خطای ابعادی به وسیله شبکه عصبی مصنوعی ANN<sup>۳</sup> مدل‌سازی شد. مقدار dx1 در امتداد لبه بالایی DC؛ dx2 در امتداد لبه بالایی AB و مقدار dy در امتداد لبه بالایی BC اندازه‌گیری شد که مدل آزمایشی آن در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین، جریان‌های آزمایشی و ترکیب سطحی در جدول (۵) نشان داده شده است که در بخش بعدی چگونگی مدل‌سازی این داده‌های آزمایشی توضیح داده می‌شود.

آنا و هون [۱۱] با هدف بهینه‌سازی پارامترهای ساخت و ارتقای کیفیت قطعات تولید شده به روش استریولیتوگرافی (SLA)، چهار سطح جریان متفاوت را در آزمایش‌های خود مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش با رویکردی تجربی به دنبال تعیین آماری بهترین تنظیمات فرایند ساخت بود تا بتوان به تولید قطعات با کیفیت بالاتر دست یافت.

### ۳-۲- کنترل قطعات

جهت ارزیابی دقت ابعادی قطعات تولید شده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات (CMM) استفاده شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ابعادی کلیدی قطعات در جدول (۶) ارائه شده است.

### جدول ۵- جریان‌های آزمایشی و ترکیب سطحی

سطح عاملی	سطح عاملی	سطح عاملی	جریان‌ها
C	B	A	۱R
۱	۱	۱	۲R
۲	۲	۱	۳R
۲	۱	۲	۴R
۱	۲	۲	

### جدول ۶- ارزیابی قطعات ساخته‌شده در این پروژه (mm)

Specification s of pieces	Parameter A	Parameter B	Parameter ØC	Parameter ØD	Parameter ØE	Parameter F
Density percentage= %۲۰ & layer thickness=۰/۲mm	۱۲۷/۴۶	۴۹/۶۵	Ø۳۹/۵ <sup>ab</sup>	Ø۳۹/۵ <sup>۴a</sup>	Ø۱۹/۹ <sup>a</sup>	۳/۳ <sup>a</sup>
Density percentage= %۲۰ & layer thickness=۰/۳mm	۱۲۷/۱۲	۴۹/۶۵	Ø۳۹/۴۷ <sup>b</sup>	Ø۳۹/۴۱ <sup>b</sup>	Ø۱۹/۸۵ <sup>ab</sup>	۳/۲۵ <sup>a</sup>
Density percentage= %۱۰ & layer thickness=۰/۲mm	۱۲۷/۴۱	۴۹/۷	Ø۳۹/۵ <sup>۹a</sup>	Ø۳۹/۵۱ <sup>a</sup>	Ø۱۹/۸۳ <sup>ab</sup>	۳/۱۹ <sup>a</sup>
Density percentage= %۱۰ & layer thickness=۰/۳mm	۱۲۷/۵۱	۴۹/۶۶	Ø۳۹/۴۸ <sup>b</sup>	Ø۳۹/۴۵ <sup>b</sup>	Ø۱۹/۷ <sup>b</sup>	۳/۲۲ <sup>a</sup>

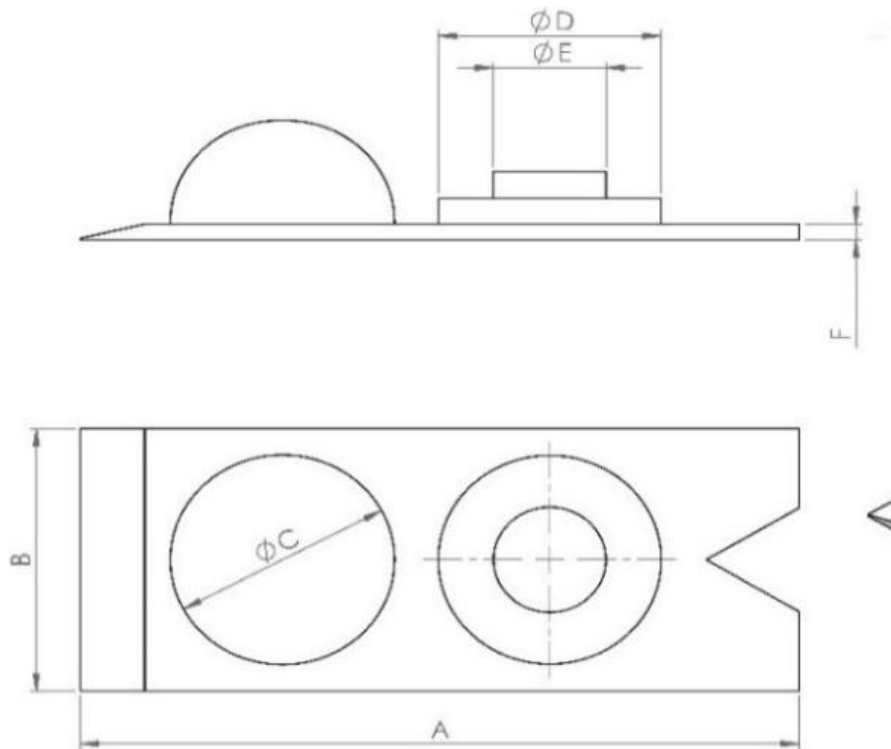
مقادیر با حروف یکسان در سطح ۵ درصد اختلاف معناداری ندارند.

در پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی بر دقت ابعادی قطعات تولید شده به روش مدل‌سازی رسوب ذوب شده (FDM)، مطالعه‌ای جامع انجام شد. چهار پارامتر حیاتی شامل ضخامت لایه، فاصله‌گذاری حفره‌ها، اضافه بارگذاری حفره‌ها و عمق بارگذاری حفره‌ها، در محدوده وسیعی از مقادیر و برای درصدهای تراکم مختلف (همان‌طور که در جدول (۴) ارائه شده است) بررسی شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که هر یک از این پارامترها به‌طور مستقیم بر دقت ابعادی قطعه نهایی بطور معنی‌داری تأثیرگذار است ( $P < 0.05$ ). با تغییر هر یک از این پارامترها، تغییراتی در ابعاد، شکل و کیفیت سطح قطعه مشاهده می‌شود. در ادامه، به تحلیل دقیق‌تر نقش هر یک از این پارامترها در فرآیند تولید و تأثیر آن‌ها بر دقت ابعادی قطعات پرداخته شد (جدول (۶)). نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که حداکثر قطر سوراخ‌ها در نمونه‌های تولید شده با روش استریولیتوگرافی در شرایط بهینه درصد تراکم ۲۰٪ و ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر رخ داده است. تحلیل تصاویر میکروسکوپی حاکی از افزایش قابل توجه خلل و فرج در نواحی C، D و E این نمونه‌ها بوده است. به‌طوری که به ترتیب قطر سوراخ‌ها در این نواحی به ۳۹/۵۴، ۳۹/۵۱ و ۱۹/۹ میلی‌متر رسید. مقایسه با سایر شرایط آزمایش نشان می‌دهد که افزایش درصد تراکم و ضخامت لایه به‌طور مستقیم با افزایش قطر سوراخ‌ها و در نتیجه کاهش کیفیت سطح مرتبط است. نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که کاهش درصد تراکم و ضخامت لایه در کلیه سطوح مورد مطالعه منجر به افزایش قابل توجه خطای ابعادی در قطعات تولیدی به روش FDM شده است. این یافته با نتایج پژوهش‌ها و هون نیز همسو بوده و نشان‌دهنده تأثیر مستقیم این دو پارامتر بر دقت ابعادی قطعات می‌باشد [۱۱].

با هدف بهبود دقت نتایج، میزان تراکم پرینت در سه سطح کاهش یافته و مجدداً داده‌ها تحلیل شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که کاهش بیش از حد تراکم، به ویژه در سطح ۱۰ درصد، منجر به افزایش قابل توجه خطاهای ابعادی در قطعات تولیدی شده است. این امر نشان می‌دهد که وجود یک تراکم بهینه برای دستیابی به تعادل مناسب بین استحکام قطعه و دقت ابعادی ضروری است.

دقت ابعادی بالا و پایداری ساختاری از جمله الزامات اساسی در تولید قطعات با استفاده از فناوری نمونه‌سازی سریع FDM محسوب می‌شوند. این ویژگی‌ها نه تنها بر کیفیت ظاهری قطعه بلکه بر عملکرد آن نیز تأثیر به‌سزایی دارند؛ چه در تولید نمونه‌های اولیه برای آزمایش و ارزیابی طراحی و چه در ساخت ابزارهای تولیدی، دستیابی به قطعاتی با ابعاد دقیق و پایدار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرگونه انحراف از ابعاد طراحی شده می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد قطعه و در نهایت افزایش هزینه‌های تولید گردد. علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری استریولیتوگرافی (SL)، کیفیت سطح پایین قطعات تولید شده با استفاده از رزین‌های اکریلیک، به عنوان یک چالش اساسی در این حوزه مطرح بوده است. این مسئله، علاوه بر کاهش دقت ابعادی قطعات، منجر به افزایش هزینه‌های تولید به دلیل نیاز به استفاده از رزین‌های گران‌تر و زمان ساخت طولانی‌تر شده است. در پژوهش حاضر، با معرفی دو الگوی جدید برای ساخت دریچه‌ها و پیشنهاد یک ضخامت لایه بهینه، تلاش شده است تا کیفیت قطعات تولید شده با روش SL بهبود یابد. نتایج حاصل از این مطالعه با یافته‌های قبلی آنا و هون نیز همسو بوده و نشان از کارایی روش پیشنهادی در ارتقای دقت ابعادی قطعات دارد [۱۱].

در شکل (۸) پارامترهای کنترل‌شده توسط دستگاه CMM نشان داده شده است.



شکل ۸ - پارامترهای کنترل شده توسط دستگاه CMM

نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که در میان پارامترهای مورد بررسی، ضخامت لایه تأثیر قابل توجهی بر دقت ابعادی قطعات تولید شده به روش FDM دارد [۶]. از جمله نتایج بارزی که می‌توان در این آزمایش به آن اشاره کرد کیفیت سطح نامطلوب قطعات ساخته شده به روش FDM می‌باشد. از آنجایی که قطعات ساخته شده به این روش دارای استحکام خوبی نسبت به روش‌های مشابه می‌باشند [۲۶] (حدود ۸۵٪ استحکام محصول اصلی را دارا می‌باشد)؛ لذا می‌توان به عنوان قطعات عملکردی و یا تولید نمونه اولیه جهت ارزیابی طرح و تست قطعات استفاده نمود [۲۷]. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که هر یک از پارامترهای مورد بررسی تأثیر متمایزی بر کیفیت قطعه تولیدی داشته‌اند. با این حال، آنالیز داده‌ها حاکی از آن است که دمای نازل به عنوان یک پارامتر بحرانی، تأثیر یکسانی بر تمامی آزمایش‌ها داشته است. به طور مشخص، دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بهینه برای ذوب فیلامنت و تولید قطعات با کیفیت مطلوب در تمامی موارد شناسایی شد. این یافته حاکی از آن است که در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بهترین شرایط را برای ذوب کامل فیلامنت و اتصال لایه‌ها فراهم می‌نماید.

#### ۴ - نتیجه‌گیری

در روش استریو لیتوگرافی ضخامت لایه مهم‌ترین پارامتر در خصوص دقت ابعادی است و پس از آن مدل حفره، فاصله بین حفره‌ها، عمق بارگیری حفره و اضافه بارگیری حفره قرار دارد و در روش FDM نیز ضخامت لایه در بین پارامترهای مذکور دارای بیشترین اهمیت و پس از آن به ترتیب: درصد تراکم، سرعت حرکت نازل و قطر نازل قرار دارد.

از نتایج آزمایش مذکور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کم بودن ضخامت لایه باعث: استحکام بیشتر، صافی سطح بهتر و دقت ابعادی بالاتر می‌شود.
  - ۲- کم بودن در صد تراکم باعث: استحکام کمتر، صافی سطح کمتر و دقت ابعادی بالاتر می‌شود.
- و در مقایسه با روش SLA نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کم بودن دقت ابعادی قطعات ساخته‌شده روش FDM نسبت به روش SLA.
  - ۲- کم بودن کیفیت سطح قطعات ساخته‌شده روش FDM نسبت به روش SLA.
  - ۳- بالاتر بودن زمان ساخت قطعات ساخته‌شده روش FDM نسبت به روش SLA.
  - ۴- بالاتر بودن استحکام قطعات ساخته‌شده روش FDM نسبت به روش SLA.
- یادآوری و توجه به این نکته بسیار مهم است که هر یک از پارامترها در آزمایش‌ها تأثیر منحصر به فرد خود را داشتند ولی در مورد دمای نازل به منظور ذوب فیلامنت برای تمامی آزمایش‌ها بهترین وضعیت در دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد.

## سپاسگزاری

با تشکر از دانشگاه لرستان و شرکت‌های آبران صنعت و اجزا پمپ ایساتیس که با در اختیار گذاشتن آزمایشگاه و تجهیزات خود، ما را در اجرای این پژوهش یاری فرمودند.

## مراجع

- [1] L. Zhang, H. Liu, H. Yao, Y. Zeng, and J. Chen, "3D Printing of Hollow Lattice Structures of  $ZrO_2$  (3Y)/ $Al_2O_3$  Ceramics by Vat Photopolymerization: Process Optimization, Microstructure Evolution and Mechanical Properties," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 83, pp. 756-767, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.047>.
- [2] Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Liu, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, and Y. He, "3D Printing of Ceramics: A Review," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 39, No. 4, pp. 661-687, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.
- [3] X. Yu, Z. Wang, Y. Wang, Z. Yu, Y. Zhao, and J. Zhao, "Optimization, Formation, and Evolution of The Photo-induced Curing Gradients and In-situ Lamellar Gaps in Additive Manufacturing of  $ZrO_2$  Ceramics: From Curing to Sintering Behaviors," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 43, No. 14, pp. 6279-6295, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.055>.
- [4] S. Rahmati, and F. Ghadami, "Process Parameters Optimization to Improve Dimensional Accuracy of Stereolithography Parts," *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 59-65, 2014, <https://sanad.iau.ir/Journal/admt/Article/873116>.

- [5] M. Ramnavas, K. Patel, S. Chaudhary, and A. Nagpal, "Cracked Span Length Beam Element for Service Load Analysis of Steel Concrete Composite Bridges," *Computers and Structures*, Vol. 157, pp. 201-208, 2015, <https://doi: 10.1016/j.compstruc.2015.05.024>.
- [6] P. K. Venuvinod, and W. Ma, "Rapid Prototyping: Laser-based and Other Technologies," *Springer Science and Business Media*, 2013, <https://doi: 10.1007/978-1-4757-6361-4>.
- [7] J. G. Zhou, D. Herscovici, and C. C. Chen, "Parametric Process Optimization to Improve The Accuracy of Rapid Prototyped Stereolithography Parts," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 3, pp. 363-379, 2000, [https://doi: 10.1016/S0890-6955\(99\)00068-1](https://doi: 10.1016/S0890-6955(99)00068-1).
- [8] F. P. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, "A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering," *Biomaterials*, Vol. 31, No. 24, pp. 6121-6130, 2010, <https://doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>.
- [9] S. H. Lee, W. S. Park, H. S. Cho, W. Zhang, and M. C. Leu, "A Neural Network Approach to The Modelling and Analysis of Stereolithography Processes," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 215, No. 12, pp. 1719-1733, 2001, <https://doi:10.1177/095440540121501206>.
- [10] B. Raju, U. Chandrashekar, D. Drakshayani, and K. Chockalingam, "Determining The Influence of Layer Thickness for Rapid Prototyping With Stereolithography (SLA) Process," *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 7, pp. 3199-3205, 2010, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552540610652456/full/html>.
- [11] S. Onuh, and K. Hon, "Improving Stereolithography Part Accuracy for Industrial Applications," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, pp. 61-68, 2001, <https://doi: 10.1007/s001700170210>.
- [12] L. Horton, E. Gargiulo, and M. Keefe, "An Experimental Study of the Parameters Affecting Curl in Parts Created using Stereolithography," in *Proceedings Solid Freeform Fabrication symposium*, Texas, USA: Texas Academic Press, pp. 178-185, 1993, <https://hdl.handle.net/2152/65056>.
- [13] W. Konig, I. Celi, and S. Noken, "Stereolithography Process Technology," 1994, <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/172d4bf6-f5fb-4ef6-b675-dadaeb3f9969/details>.
- [14] R. Nosouhi, and S. Rahmati, "Finite Element Analysis of Shrinkage Phenomena in Stereolithography and Development of a New Hatching Method," *Proceedings of 10<sup>th</sup> Iranian Conference on Manufacturing Engineering (ICME)*, Babol, Iran, 2010, [https://research.iaun.ac.ir/pd/nosouhiold/pdfs/PaperC\\_3014](https://research.iaun.ac.ir/pd/nosouhiold/pdfs/PaperC_3014).
- [15] S. Sambu, Y. Chen, and D. W. Rosen, "Geometric Tailoring: A Design for Manufacturing Method for Rapid Prototyping and Rapid Tooling," *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 36231, pp. 149-161, 2002, <https://doi: 10.1115/DETC2002/DFM-34169>.

- [16] X. Yu, Y. Zhao, Z. Wang, K. Zhong, Z. Yu, Y. Wang, and J. Zhao, "Response Mechanisms for the Photopolymerization Profiles, Microstructures, and Properties in Ceramics Prepared by Stereolithography," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 45, No. 1, 116869, 2025, <https://doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116869>.
- [17] X. Yu, Z. Wang, Q. Li, Y. Zhao, and J. Zhao, "Spatial Curing Growth Mechanism and Defect Control of Alumina Green Bodies Manufactured by Stereolithography," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 42, No. 6, pp. 2931-2945, 2022, <https://doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.030>.
- [18] A. Farzadi, M. Solati-Hashjin, M. Asadi-Eydivand, and N. A. Abu Osman, "Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering," *PLoS ONE*, Vol. 9, No. 9, pp. e108252, 2014, [https://doi: 10.1371/journal.pone.0108252](https://doi:10.1371/journal.pone.0108252).
- [19] I. Roohani, A. Entezari, and H. Zreiqat, "Liquid Crystal Display Technique (LCD) for High Resolution 3D Printing of Triply Periodic Minimal Surface Lattices Bioceramics," *Additive Manufacturing*, Vol. 74, 103720, 2023, [https://doi: 10.1016/j.addma.2023.103720](https://doi:10.1016/j.addma.2023.103720).
- [20] I. Roohani, E. Newsom, and H. Zreiqat, "High-resolution Vat-photopolymerization of Personalized Bioceramic Implants: New Advances, Regulatory Hurdles, and Key Recommendations," *International Materials Reviews*, Vol. 68, No. 8, pp. 1075-1097, 2023, [https://doi: 10.1080/09506608.2023.2194744](https://doi:10.1080/09506608.2023.2194744).
- [21] Y. Wang, S. Chen, H. Liang, Y. Liu, J. Bai, and M. Wang, "Digital Light Processing (DLP) of Nano Biphasic Calcium Phosphate Bioceramic for Making Bone Tissue Engineering Scaffolds," *Ceramics International*, Vol. 48, No. 19, pp. 27681-27692, 2022, <https://doi:10.1016/j.ceramint.2022.06.067>.
- [22] B. Sepehr, and H. H. Agha Alizadeh, "Investigating the Performance of a Seed Drill Equipped with Six Different Planting Arrangements for Coarse and Fine Seeds on Wide Ridges," *Agricultural Engineering*, Vol. 45, N. 1, pp. 35-56, 2022, [https://doi: 10.22055/agen.2022.39769.1628](https://doi:10.22055/agen.2022.39769.1628), [In Persian].
- [23] B. Sepehr, and H. H. Agha Alizadeh, "Field Evaluation of Barley Seedbed and Chickpea Protective Tillage with Different Cropping Arrangements," *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*, Vol. 11, No. 2, pp. 83-93, 2022, [https://doi: 10.22034/JRMAM.2022.10137.556](https://doi:10.22034/JRMAM.2022.10137.556), [In Persian].
- [24] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, "Taguchi's Quality Engineering Handbook," Wiley-Interscience, 2004, [https://doi: 10.1002/9780470258354](https://doi:10.1002/9780470258354).
- [25] K. Chockalingam, N. Jawahar, K. Ramanathan, and P. Banerjee, "Optimization of Stereolithography Process Parameters for Part Strength using Design of Experiments," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 79-88, 2006, [https://doi: 10.1007/s00170-004-2307-0](https://doi:10.1007/s00170-004-2307-0).
- [26] D. S. Ingole, A. M. Kuthe, S. B. Thakare, and A. S. Talankar, "Rapid Prototyping – A Technology Transfer Approach for Development of Rapid Tooling," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 280-290, 2009, [https://doi: 10.1108/13552540910979794](https://doi:10.1108/13552540910979794).

[27] R. K. Roy, "A *Primer on the Taguchi Method*," Society of Manufacturing Engineers, 1990,  
[https://books.google.com/books/about/A\\_Primer\\_on\\_the\\_Taguchi\\_Method.html?id=OUI54mrYdqIC](https://books.google.com/books/about/A_Primer_on_the_Taguchi_Method.html?id=OUI54mrYdqIC).

## فهرست نمادهای انگلیسی

Ø قطر (in)

## Optimization of Dimensional Accuracy of Components Made by FDM and Comparison with SLA

\*Corresponding author: **Isa Hazbawi**

Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran  
hazbawi.i@lu.ac.ir

**Behnam Sepehr**

Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran  
Sepehr.b@lu.ac.ir

### Abstract

FDM 3D printing is one of the fastest growing and expanding 3D printing technologies. However, the materials used in this type of 3D printing are mostly limited to ABS and PLA, but the need for materials with better mechanical properties has led to the production of new filaments in the field of FDM 3D printers. Since various parameters affect the final quality of parts produced with a 3D printer, studying and investigating the effect of these parameters is of particular importance. Stereo lithography and FDM processes have a more limited scope of application due to their low dimensional accuracy compared to the CNC process. In this study, the effect of effective parameters in the stereo lithography process was investigated, which in order of importance include: layer thickness, gate model, and distance between gates, gate loading depth, and gate overload. In addition, the factors related to the dimensional accuracy of the FDM process considered here include, in order of importance: layer thickness, density percentage, nozzle speed, and nozzle diameter. In addition, four samples were made by the FDM process according to different layer thickness and density percentage of stereo lithography and FDM. The aim is to find the effective factors in the stereo lithography process. The results showed that the manufactured parts have 85% of the strength of the original product; therefore, they can be used as functional parts.

*Keywords:* Stereo lithography, Dimensional accuracy, Layer thickness, Rapid prototyping, FDM