



تأثیر اعمال فیلتر بر روی دقت قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی حجمی

محمد مهدی غفاری، امیر حسین بهروش*، امید کردی، محمد علی یوسفی، احمد رضا طهماسبی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: amirhb@modares.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این پژوهش، فرایند ساخت افزایشی حجمی با تمرکز بر ساخت دستگاه و برنامه نویسی برای تولید قطعات با این روش بررسی شده است. ساخت افزایشی حجمی به عنوان یک فناوری نوین، برخی از مشکلات روش های ساخت افزایشی دیگر نظیر زمان بالای تولید و خواص ناهمسان گرد بودن قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی را برطرف می سازد. در این مطالعه، نقش تجهیزات و تأثیر اعمال فیلتر در حالت های مختلف بر کیفیت نهایی قطعات در فرایند پردازش و ساخت تصاویر رادون گیری شده مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج بررسی این پارامتر نشان می دهد که استفاده از فیلترها تأثیر چشمگیری در بهبود کیفیت و دقت قطعات تولید شده دارد همچنین، یک کدنویسی جامع در نرم افزار متلب برای تبدیل فایل های سه بعدی طراحی شده توسط نرم افزارهای مدل سازی سه بعدی به ویدئوهای قابل پخش جهت ساخت قطعات با روش ساخت افزایشی حجمی طراحی شده که در نهایت کد نهایی نوشته شده جهت استفاده به صورت گرافیکی برای کاربری آسان تر ارائه شده است. به طور کلی می توان گفت این روش مسیری نوین برای تولید قطعات در زمان بسیار کوتاه نسبت به روش های مشابه را فراهم می آورد.</p>	<p>مقاله پژوهشی دریافت: ۱۸ تیر ۱۴۰۴ پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۴</p> <p>کلیدواژگان: ساخت افزایشی ساخت افزایشی حجمی توموگرافی کامپیوتری</p>

Effect of applying filters on the visual accuracy of parts produced by volumetric additive manufacturing

Mohammad Mahdi Ghaffari, Amir Hossein Behravesht*, Omid Kordi, Mohammad Ali Yusefi, Ahmad Reza Tahmasebi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: amirhb@modares.ac.ir

Article Information	Abstract
<p>Original Research Paper Received: 9 July 2025 Accepted: 22 August 2025</p> <p>Keywords: Additive Manufacturing Volumetric Additive Manufacturing Computer Tomography</p>	<p>In this study, the volumetric additive manufacturing (VAM) process is examined with a focus on the development of a fabrication device and programming for part production using this method. As an innovative technology, VAM addresses several limitations of other additive manufacturing techniques, such as long production times and the anisotropic properties of fabricated components. This study investigates the role of equipment and the impact of applying filters in various configurations on the final quality of components during the Radon-based image processing and fabrication process. The results indicate that the application of filters significantly improves the quality and dimensional accuracy of the produced components. Additionally, a comprehensive MATLAB-based programming solution has been developed to convert three-dimensional models designed using CAD software into playable videos suitable for VAM-based fabrication. The finalized code integrates a user-friendly graphical interface to enhance accessibility and ease of use. Overall, this approach provides a novel pathway for the rapid and precise fabrication of complex components, enabling efficient production within shorter timeframes.</p>

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ghaffari MM, Behravesht AH, Kordi O, Yusefi MA, Tahmasebi AR. Effect of applying filters on the visual accuracy of parts produced by volumetric additive manufacturing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):13-24. doi: 10.22034/ijme.2025.529713.2094 [In Persian]

۱- مقدمه

فناوری چاپ سه بعدی از زمان شروع خود در دهه ۱۹۸۰ به طور قابل توجهی گسترش یافته است. امروزه، تکنیک‌های ساخت افزایشی در زمینه‌های مختلفی برای ساخت سازه‌هایی استفاده می‌شوند که اغلب قادر به تولید آن‌ها توسط فرایندهای سنتی کاهش‌دهنده نیستند. کاربردهای آن از ساخت داربست‌های زیستی برای کشت بافت در آزمایشگاه گرفته تا مواد میکروساختاری با ساختارهای میکروسکوپی طراحی شده برای تولید خواص مواد بهبودیافته یا جدید را شامل می‌شود [۱]. بیشتر روش‌های چاپ سه بعدی امروزه به شکلی مشابه عمل می‌کنند، جایی که یک مقدار کوچک از بخش نهایی سه بعدی در یک عملیات واحد تولید می‌شود. این عملیات ممکن است شامل اکستروژن از طریق یک نازل یا شکل‌دهی از طریق تعامل با نور باشد. در این فناوری‌ها، یک بخش سه بعدی معمولاً با تکرار عملیات چاپ واحد به صورت نقطه به نقطه در سراسر هندسه سه بعدی تعریف شده توسط کاربر، ساخته می‌شود. بنابراین، عملیات چاپ واحد می‌تواند به عنوان یک عملیات صفر بعدی در نظر گرفته شود، زیرا تنها یک نقطه (واحد کوچک سه بعدی) از حجم سه بعدی را چاپ می‌کند. بعداً این روش‌ها، تکنیک‌های با توان تولید بالا مبتنی بر استریولیتوگرافی با پروجکشن ظاهر شده‌اند [۲، ۳]. این روش‌ها با چاپ یک مقطع عرضی از قطعه در یک عملیات چاپ واحد، سرعت چاپ را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند. این کار با استفاده از پروژکتورها برای تولید یک تصویر دوبعدی انجام می‌شود که سپس بر سطح یک رزین حساس به نور متمرکز می‌شود. عملیات واحد سپس می‌تواند به عنوان یک عملیات دوبعدی (با ضخامت محدود) در نظر گرفته شود. این عملیات باید مجدداً به صورت سریالی تکرار شود تا یک بخش سه بعدی از مقاطع عرضی نازک و موازی ساخته شود [۴].

فناوری ساخت افزایشی حجمی^۲ یک تکنیک نوین ساخت سه بعدی بدون لایه گذاری است که امکان تبدیل سریع رزین‌های فتوکتیو به ساختارهای پیچیده سه بعدی را در مدت زمانی کوتاه فراهم می‌کند. این فناوری به طور قابل توجهی با روش‌های مرسوم تولید افزایشی نظیر استریولیتوگرافی^۳ و پردازش نور دیجیتال^۴ متفاوت است؛ در حالی که روش‌های سنتی برای تولید ساختارهای مشابه ممکن است چند دقیقه تا چند ساعت زمان ببرند، VAM قادر است این فرایند را تنها در چند ثانیه به پایان برساند [۵، ۶].

این تکنیک به دلیل استفاده از اصول توموگرافی کامپیوتری، به طور ویژه در تولید هندسه‌های معلق و گسترده برتری دارد، زیرا نیازی به مواد پشتیبانی کننده ندارد [۷، ۸]. اولین سیستم عملیاتی VAM در سال ۲۰۱۷ معرفی شد و از آن زمان تاکنون، این فناوری شاهد پیشرفت‌های چشمگیری بوده است [۶، ۹، ۱۰]. کلی و همکاران [۱۰]، یک روش جدید چاپ سه بعدی به نام لیتوگرافی محوی کامپیوتری^۵ معرفی می‌کند که به جای ساخت لایه به لایه، قطعات را به صورت یکپارچه و در یک مرحله تولید می‌کند. این روش از بازسازی توموگرافی محوری (CT) و رزین‌های حساس به نور استفاده می‌کند تا با تاباندن تصاویر از زوایای مختلف، هندسه‌های پیچیده را ایجاد کند. نتایج نشان می‌دهند CAL قابلیت ساخت سریع قطعات پیچیده با دقت بالا را دارد. این فناوری کاربردهای گسترده‌ای در تولید قطعات مکانیکی، مدل‌های پزشکی و طراحی مواد جدید دارد. اهمیت این روش در سرعت بالا، توانایی ساخت هندسه‌های توخالی و حذف محدودیت‌های روش‌های مرسوم است. کوک و همکاران [۱۱]، به بررسی رزین‌های حساس به نور پیشرفته مبتنی بر شیمی تیول-ان برای ساخت افزایشی حجمی می‌پردازد. هدف اصلی این پژوهش توسعه موادی با قابلیت تنظیم بالاست که می‌توانند خواص مکانیکی، نوری و شیمیایی متفاوتی ارائه دهند و برای تولید قطعات پیچیده در یک مرحله مناسب باشند. در این روش از شیمی تیول-ان برای ایجاد واکنش‌های سریع و کنترل پذیر در فرایند فتوپلیمریزاسیون استفاده شده است و رزین‌ها برای بهبود خواصی مانند سختی، کشسانی، شفافیت و پایداری حرارتی طراحی شده‌اند. فناوری ساخت افزایشی حجمی، که در این پژوهش به کار رفته، با تابش نور از زوایای مختلف، قطعات پیچیده را بدون نیاز به لایه گذاری تولید می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که این رزین‌ها توانایی تولید قطعاتی با مدول الاستیسیته متغیر از چند مگاپاسکال تا گیگاپاسکال، دقت هندسی بالا، و شفافیت مناسب را دارند. همچنین، این مواد در برابر دما و شرایط محیطی مقاوم بوده و کاربردهایی گسترده در مهندسی مکانیک، از جمله در تولید قطعات سبک و مقاوم برای صنایع هوافضا و خودروسازی، دارند. این پژوهش گامی مؤثر در بهبود مواد چاپ سه بعدی برای تولید قطعات پیچیده و دقیق محسوب می‌شود و می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی مواد و روش‌های جدید در مهندسی مکانیک به کار رود.

¹ Voxel

² Volumetric Additive Manufacturing (VAM)

³ (SLA)

⁴ (DLP)

⁵ Computed Axial Lithography (CAL)

کولپ و همکاران [۱۲]، به بررسی فناوری جدید ساخت افزایشی حجمی برای تولید سرامیک‌های سیلیکون اکسی کاربید می‌پردازد. هدف این پژوهش توسعه روشی کارآمد برای تولید ساختارهای پیچیده سرامیکی با استفاده از تکنولوژی تصویربرداری توموگرافی است که از تابش نور از زوایای مختلف برای پلیمریزاسیون رزین‌های حاوی پیش‌سازهای سرامیکی استفاده می‌کند. روش پیشنهادی امکان تبدیل پیش‌سازهای حساس به نور به سرامیک‌های سیلیکون اکسی کاربید را از طریق فرایند پیرولیز فراهم می‌سازد. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که این روش قادر به تولید قطعات سرامیکی با دقت بالا، استحکام مکانیکی مطلوب و پایداری حرارتی تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. فناوری مذکور قادر است ساختارهایی با تخلخل‌های کنترل شده و پیچیدگی هندسی بالا تولید کند که برای کاربردهایی نظیر کاتالیزورها، فیلترهای سرامیکی، و اجزای مقاوم در برابر حرارت مناسب است. سلاجقه و همکاران [۱۳]، به مدل‌سازی عددی فرایند تهنشینی قطعات در فناوری ساخت افزایشی حجمی می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی و تحلیل رفتار تهنشینی مواد در طول فرایند تولید قطعات سه‌بعدی با استفاده از فناوری VAM است. در این فناوری، مواد حساس به نور در یک محیط رزین پلیمری تابش داده می‌شوند و قطعات به صورت یکپارچه در یک مرحله و بدون لایه گذاری شکل می‌گیرند. برای تحلیل این فرایند، پژوهشگران از مدل‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کرده‌اند. آن‌ها به شبیه‌سازی حرکت و پراکندگی ذرات در رزین پرداخته‌اند، به‌ویژه اینکه چگونه ویژگی‌های فیزیکی مانند ویسکوزیته، چگالی و اندازه ذرات بر رفتار این مواد در طول فرایند ساخت تأثیر می‌گذارند. مدل عددی شامل حل معادلات جریان مایع، پدیده‌های حساس به فتوپلیمریزاسیون، و تعاملات ذرات با نور است. در این مدل، تمرکز بر تهنشینی ذرات در حین فرایند تابش نور و تغییرات ایجاد شده در هندسه قطعات بوده است. نتایج تحقیقات نشان داد که افزایش ویسکوزیته رزین باعث کاهش میزان تهنشینی و یکنواختی توزیع ذرات در قطعه نهایی می‌شود. همچنین، چگالی ذرات بر سرعت حرکت ذرات در داخل رزین تأثیرگذار است که ممکن است موجب عدم یکنواختی در فرایند ساخت گردد. مدل‌سازی نشان داد که پراکندگی مناسب و یکنواخت ذرات در رزین به بهبود کیفیت قطعات تولیدی کمک می‌کند. استفاده از شرایط تابش نور بهینه می‌تواند از تجمع ذرات در نواحی خاص و تغییرات هندسی غیر مطلوب جلوگیری کند. همچنین، شدت تابش نور به‌طور مستقیم بر فرایند پلیمریزاسیون و در نهایت بر دقت هندسی قطعات تأثیر می‌گذارد. در صورتی که شدت تابش نور به‌درستی تنظیم نشود، ممکن است موجب رسوب غیریکنواخت مواد شود و به نتیجه نهایی آسیب بزند.

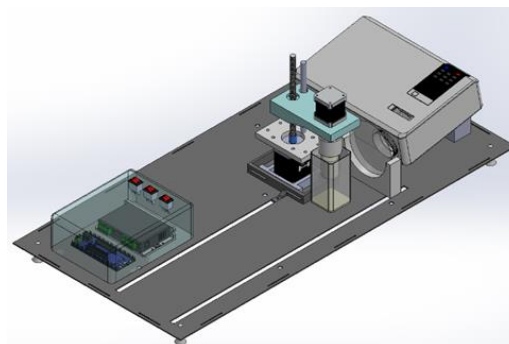
همان‌طور که در مرور پژوهش‌های پیشین آورده شده است، با توجه به نوظهور بودن روش ساخت افزایشی حجمی، این روش هنوز در فاز آزمایشگاهی قرار دارد و بیشتر پژوهش‌ها بر بررسی قابلیت چاپ با مواد مختلف و تلاش برای بهبود کیفیت ظاهری قطعات طراحی شده متمرکز بوده‌اند. در این پژوهش، با توجه به بررسی پارامترهای پردازش تصویر و همچنین اهمیت اعمال فیلتر در تولید ویدیوی نهایی، به موضوع فیلترگذاری پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

فناوری ساخت افزایشی حجمی از مجموعه‌ای از تجهیزات و روش‌های خاص برای تولید سریع و بدون لایه‌گذاری قطعات سه‌بعدی استفاده می‌کند. قسمت‌های اصلی دستگاه VAM شامل: منبع نور، رزین فتواکتیو، ظرف استوانه‌ای، عدسی متمرکزکننده نور، سیستم کنترل‌کننده حرکت و ظرف حاوی موادی جهت جلوگیری از شکست نور است که در ادامه راجع هر قسمت توضیح داده شده است. در VAM از منابع نوری مانند لیزر یا LED استفاده می‌شود. برای تولید الگوهای دقیق، دستگاه‌هایی نظیر آرایه‌های دیجیتال آینه‌ای یا سامانه‌های پردازش نور دیجیتال به کار می‌روند. این ابزارها الگوهای نوری با دقت بالا را بر روی رزین تابانده و با ایجاد میدان نوری حجمی، قطعه موردنظر را شکل می‌دهند که رزولوشن نور تابیده شده توسط سیستم نوری و کیفیت عدسی‌های متمرکزکننده تعیین می‌شود. نکته دیگر رزین مورد استفاده در این فرایند است که باید حاوی فتوپلیمرهایی باشد که با تابش نور به جامد تبدیل شود و همچنین رزین مورد استفاده باید شفافیت لازم جهت عبور نور از درون آن را داشته باشد. رزین در یک ظرف شیشه‌ای شفاف که به صورت مکانیکی می‌چرخد، نگهداری می‌شود. چرخش ظرف باعث می‌شود که میدان نوری با توجه به هر درجه از چرخش ظرف، میزان شدت نور را در حجم رزین تابانده و قطعه نهایی بدون نواقص سطحی تولید گردد. همچنین برای تمرکز و همگرا کردن نور تابیده شده توسط پروژکتور از عدسی‌هایی استفاده می‌شود. همچنین با توجه به شکست نور درون ظرف شیشه‌ای استوانه‌ای که حاوی رزین است، از یک ظرف مکعبی که حاوی ماده‌ای نزدیک به ویسکوزیته رزین ما باشد استفاده شده که اتفاق شکست نور را درون ظرف استوانه‌ای جبران کند که در زمان انجام فرایند ظرف استوانه‌ای درون ظرف مکعبی قرار داده شده شروع به چرخیدن می‌کند.

۲-۱- دستگاه ساخت افزایشی حجمی

با توجه به توضیحات داده شده در مورد ساختار کلی دستگاه ساخت افزایشی حجمی، در شکل ۱ مدل طراحی شده قسمت‌های مختلف دستگاه توسط نرم‌افزار سالیدورکس و مدل نهایی ساخته شده آورده شده است.



شکل ۱ مدل طراحی شده دستگاه ساخت افزایشی حجمی

همان‌طور که در شکل ۱ آورده شده است در دستگاه از یک پروژکتور DLP جهت تاباندن تصویر استفاده شده است که با توجه به استفاده از پروژکتور در قسمت جلویی عدسی پروژکتور از یک عدسی محدب خارجی جهت متمرکز کردن و همگرا کردن تصویر در نقطه فوکوس تصویر استفاده شده است. برای کنترل سرعت چرخش ظرف حاوی رزین از یک استپرموتور و جهت حرکت در راستای عمودی از یک استپرموتور دیگری استفاده شده است که حرکت محور عمودی جهت داخل بردن ظرف استوانه‌ای به ظرف مکعبی تعبیه شده جهت جلوگیری از شکست نور در زمان چاپ است که بعد از اتمام چاپ با حرکت محور عمودی به سمت بیرون می‌توان ظرف استوانه‌ای را از دستگاه جدا کرده و قطعه چاپ شده را خارج کنید. همچنین دستگاه با توجه به قرار دادن شیارهای مشخص به صورت دستی قابلیت حرکت در محورهای x و y را دارا است که این حرکت جهت تنظیم نقطه فوکوس تصویر تابیده شده است. جهت کنترل دو استپرموتور از برد آردیونو و درایور استفاده شده است که برنامه‌نویسی به طوری انجام شده که توسط سه کلید جهت و شروع حرکت موتورها کنترل شود.

۲-۲- تئوری روش ساخت افزایشی حجمی

الگوریتم تائیس در ساخت افزایشی حجمی شباهت اولیه‌ای به الگوریتم برش سنتی مورد استفاده در فناوری‌های DLP یا SLA دارد. در این روش، هندسه ورودی به صورت آرایه‌ای سه‌بعدی از وکسل‌ها نمایش داده می‌شود. وکسل‌ها مکعب‌هایی هستند که سطح مدل را در برمی‌گیرند و تعداد و اندازه آن‌ها، وضوح تصویر پروجکشن تولید شده را تعریف می‌کند [۱۴]. وکسل‌ها مشابه پیکسل‌های سه‌بعدی عمل می‌کنند و لایه‌های مقطعی دوبعدی مدل را با ضخامت وکسل در راستای محور z توصیف می‌کنند. در این روش، مقاطع دوبعدی مدل ورودی به صورت ماتریس‌هایی نمایش داده می‌شوند. در این ماتریس‌ها، وجود ماده با مقدار ۱ و عدم وجود آن با مقدار ۰ نشان داده می‌شود. این نمایش امکان تحلیل ساده مقاطع را با استفاده از تبدیل رادون و تبدیل رادون معکوس فراهم می‌کند، که در این الگوریتم پروجکشن بسیار ضروری است. برخلاف الگوریتم‌های برش سنتی مانند DLP که تنها به تولید هندسه از طریق نوردهی مقاطع تصویری دوبعدی بسنده می‌کنند، این رویکرد تفاوت چشمگیری دارد.

در فرایند ساخت افزایشی حجمی، پروجکشن‌های تولید شده باید نه تنها توپولوژی مش ورودی بلکه چگالی ماده را نیز شامل شوند. علاوه بر این، از آنجایی که تصاویر در این روش به صورت عمود بر محور z نوردهی نمی‌شوند، بلکه به صورت عمود بر محور چرخش، پروجکشن‌ها باید نمایش کلی و جامع از مدل ارائه دهند. برای دستیابی به این هدف، محاسبات اضافی بر روی مقاطع شیء انجام می‌شود. این محاسبات نه تنها ساختار سطحی مدل را بازسازی می‌کنند، بلکه اطلاعات چگالی حجمی را نیز به تصویر می‌کشند. الگوریتم‌های فرایند DLP در سطح مقاطع دوبعدی محدود می‌شوند، اما استفاده از تبدیل رادون و بازتاب معکوس آن، تحلیل‌های پیشرفته‌ای از ساختار حجمی مدل ممکن می‌سازد. این ابزارها با ارائه پروجکشن‌هایی جامع‌تر، نیازهای پیچیده فناوری ساخت افزایشی حجمی را در بازسازی دقیق قطعات برآورده می‌کنند.

برای بررسی یک مقطع دوبعدی از یک شیء به نام δz که نمای مقطعی از شیء در یک ارتفاع مشخص z را نشان می دهد، حجم با مقدار ۱ نشان داده می شود، و عدم وجود ماده با مقدار ۰ مشخص می گردد. برای این مقطع، تبدیل رادون محاسبه می شود که بیانگر انتگرال خطی از حجم در زاویه نماینده θ است. این تبدیل، یک نقشه شدت تولید می کند که اساساً چگالی شیء را در یک زاویه مشخص بیان می کند [۱۵].

$$p_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (1)$$

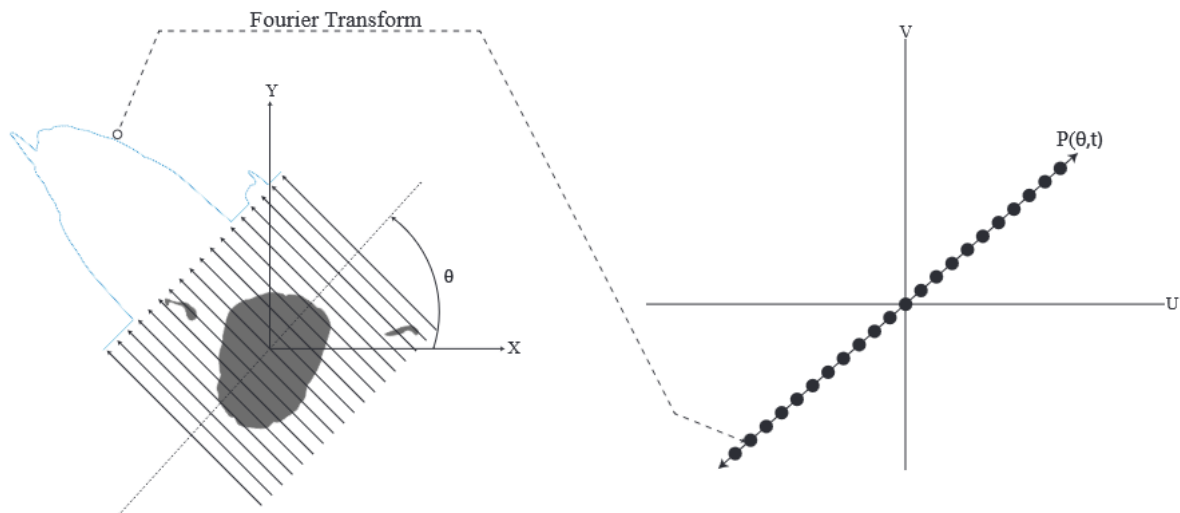
برای توصیف کامل یک برش مقطعی، این فرایند در زوایای افزایشی مختلف در اطراف مقطع تکرار می شود. نتیجه این فرایند، یک تابع پیچیده است که شدت از طریق ضخامت مقطع را در زاویه مشخصی $R(I, \theta, \delta z)$ توصیف می کند. بازسازی این مقطع با استفاده از تبدیل رادون بر اساس معادله اسلایس فوریه انجام می شود. این معادله نشان می دهد که تبدیل فوریه یکبعدی از پروجکشن موازی رادون معادل با مقطعی از تبدیل فوریه دوبعدی شیء اصلی است [۱۵].

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2)$$

بر اساس این خاصیت، می توان شیء را با اعمال معکوس دوبعدی تبدیل فوریه بازسازی کرد. تبدیل فوریه دوبعدی شیء به صورت $F(u, v)$ تعریف می شود، و پروجکشن با تابع شدت مشخص $P_{\theta}(t)$ و زاویه θ توسط تبدیل فوریه نماینده آن تعیین می شود. با گرفتن پروجکشن های نماینده شیء در زوایای افزایشی $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$ و اعمال تبدیل فوریه یکبعدی بر هر یک از این پروجکشن ها، می توان مقادیر تابع $F(u, v)$ را که بر روی خطوط شعاعی از حوزه فوریه قرار دارند، تعیین کرد [۱۵].

$$S_{\theta}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi w(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (3)$$

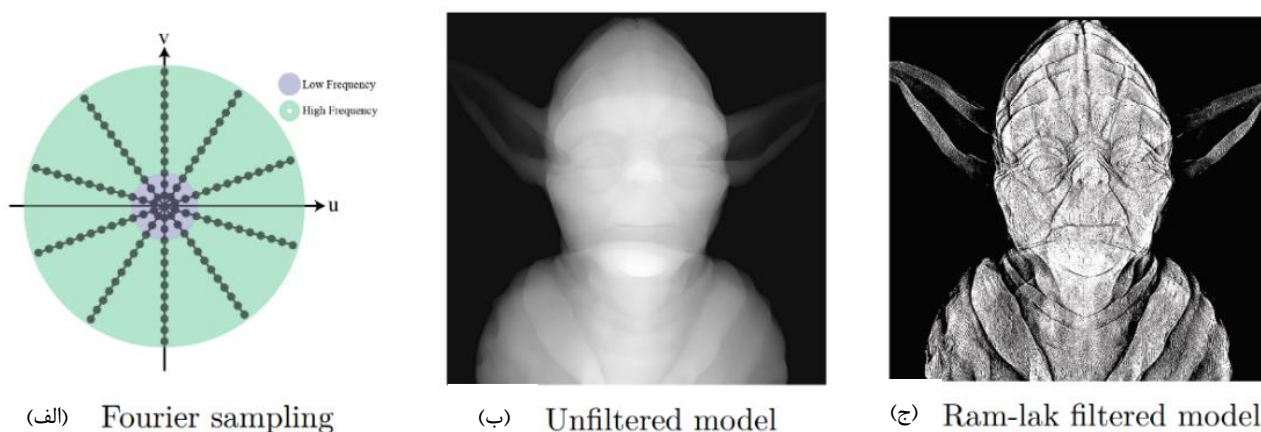
شکل ۲ فرایند استفاده از پروجکشن های یکبعدی تولید شده توسط تبدیل رادون برای ساخت حوزه فوریه دوبعدی را نشان می دهد.



شکل ۲ پروجکشن یکبعدی تولید شده توسط تبدیل رادون [۱۵]

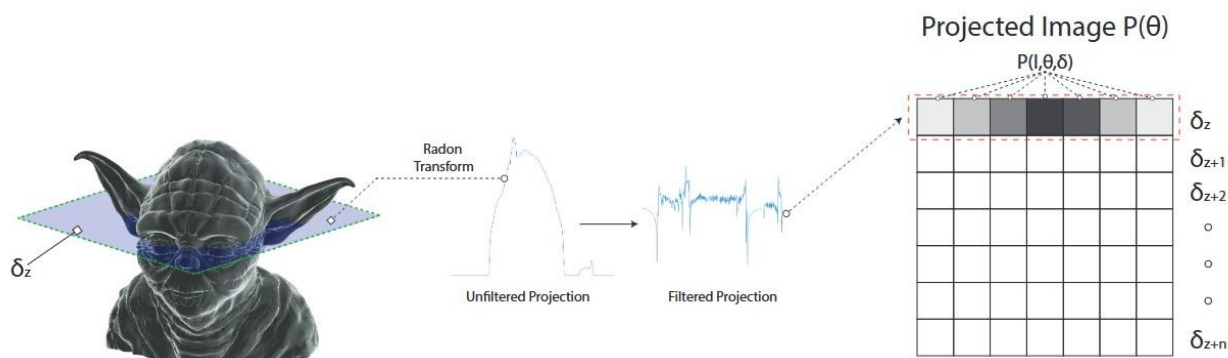
با این حال، بازسازی دقیق مدل از این داده ها با دو چالش اصلی مواجه است. از آنجاکه داده ها تنها بر روی خطوط شعاعی توزیع می شوند، اطلاعاتی که در خارج از این ناحیه قرار دارند، نمایشی پیدا نمی کنند. این منجر به وجود شکاف هایی در بازسازی می شود. همان طور که در نمای دوبعدی حوزه فوریه نشان داده شده، داده های مربوط به فرکانس های پایین بیش از فرکانس های بالا نمونه برداری شده اند. از آنجایی که فرکانس های بالا اغلب نشان دهنده ویژگی های شارپ مانند لبه ها و جزئیات مدل هستند، این کم نمای فرکانس های بالا باعث تولید تصاویری با کنتراست کم می شود. برای استفاده مؤثر از نمای دوبعدی حوزه فوریه $F(u, v)$ ، لازم است که مقادیر اضافی که توسط معادله اسلایس فوریه تولید می شوند، بازسازی شوند. یکی از رایج ترین روش ها برای حل این مشکل، درون یابی خطوط شعاعی

به یک شبکه یکنواخت است. با فاصله گرفتن از مرکز حوزه فوریه، تراکم نقاط شعاعی کمتر شده و خطای درون‌یابی افزایش می‌یابد. این مسئله باعث ایجاد خطاهای بیشتر در بازنمایی داده‌های فرکانس بالا (ویژگی‌های شارپ) نسبت به داده‌های فرکانس پایین می‌شود که به طور ذاتی به تخریب تصویر منجر می‌گردد. این عدم تعادل و خطاهای درون‌یابی باعث تولید تصاویری می‌شود که جزئیات شارپ و لبه‌های واضح مدل را به خوبی نشان نمی‌دهند؛ در نتیجه، تصاویر به دست آمده از این تکنیک ممکن است کنتراست کمتری داشته باشند (شکل ۳).



شکل ۳ نمایش تصویر ساخته شده با فیلتر و بدون فیلتر [۱۵]

شکل ۳-الف نشان می‌دهد که خطاهای درون‌یابی با افزایش فاصله شعاعی در حوزه فوریه افزایش می‌یابد. در بازسازی مدل‌ها، این خطاها باعث کاهش وضوح تصاویر می‌شوند همان‌طور که در شکل ۳-ب نشان داده شده، کاهش نمایش داده‌های فرکانس بالا وضوح تصویر را کم کرده و ویژگی‌های شارپ مدل را محو می‌کند. استفاده از فیلتر رم‌لاک^۱ (یک فیلتر بالاگذر) داده‌های فرکانس بالا را تقویت کرده و نویز فرکانس پایین را کاهش می‌دهد. این فرایند باعث نمایش واضح‌تر و ویژگی‌های شارپ مدل می‌شود (شکل ۳-ج). برای اصلاح این مشکل و بازسازی تصاویر دقیق‌تر از فیلتر رم‌لاک استفاده شده است که این فیلتر برای تقویت داده‌های فرکانس بالا و تضعیف نویز فرکانس پایین در نمای فوریه $F(u,v)$ به کار می‌رود. پس از اعمال فیلتر، تبدیل فوریه معکوس برای بازسازی تصویر مقطعی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است برای تولید نمای کامل از مدل در ابتدا این فرایند برای هر گام افزایشی δz در امتداد محور z تکرار می‌شود، تا مجموعه‌ای از پروژکشن‌های فیلتر شده تولید گردد سپس پروژکشن نهایی به صورت $P(I, \theta, \delta z)$ نمایش داده می‌شود که I نشان‌دهنده تابع شدت برای ناحیه عبوری است، در ادامه پروژکشن فیلتر شده $P(I, \theta, \delta z)$ در آرایه‌ای قرار می‌گیرد که با اندازه $[\delta z, P(\theta)]$ نمایش داده می‌شود.

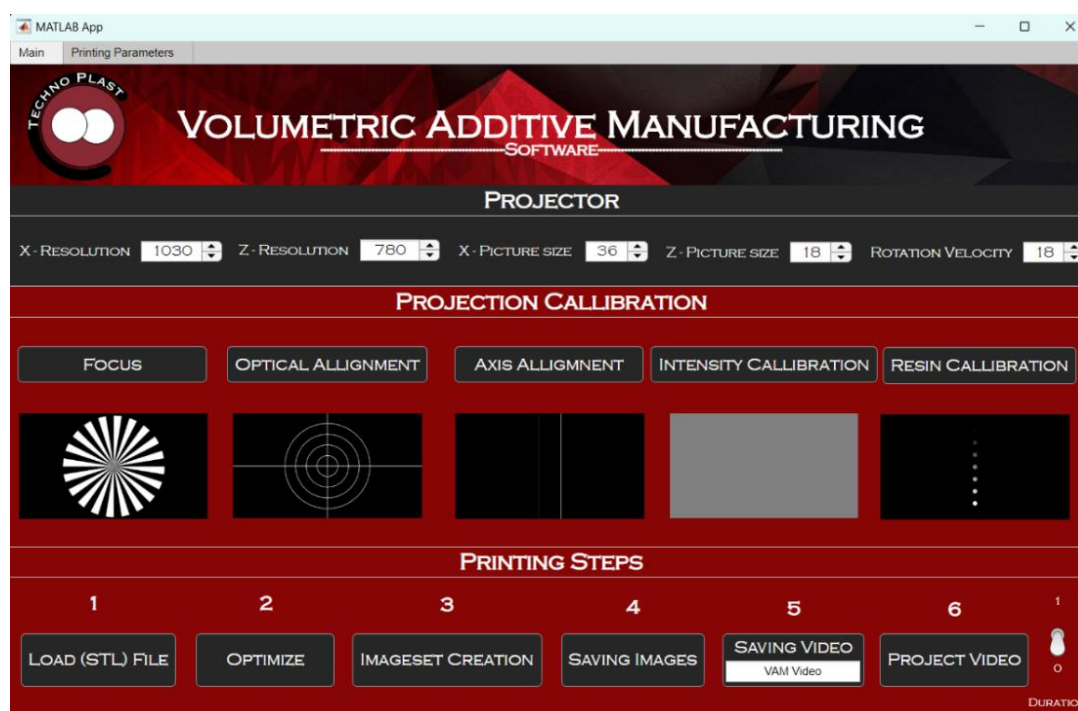


¹ Ram-Lak

در نهایت δz برای کل جسم اعمال می شود و داده های نهایی روی هم چیده شده و خروجی نهایی به صورت یک ویدئو با فریم ریت مشخص در θ های مختلف ساخته می شود [۱۵]. از روابط ارائه شده در این بخش، در برنامه نویسی به منظور تبدیل تصاویر مربوط به هر برش از قطعه طراحی شده به ویدئوی قابل پخش توسط پروژکتور و ساخت هر فریم از ویدئو استفاده می شود. با تابش این ویدئو به ظرف حاوی رزین، قطعه طراحی شده چاپ می شود.

۲-۳- برنامه نویسی و نرم افزار

برای تبدیل فایل سه بعدی طراحی شده به مدل چاپ شده توسط روش ساخت افزایشی حجمی علاوه بر توضیحاتی که در قسمت تئوری مقاله داده شد، در ابتدا نیازمند طراحی مدل توسط یکی از نرم افزارهای طراحی سه بعدی مدل است که بتوان از آن خروجی فایل stl گرفته شود، در ادامه خروجی stl توسط برنامه ای نیازمند اسلایس کردن قطعه است که خروجی های اسلایس شده به تصاویر دوبعدی تبدیل شوند که بر روی آن ها پردازش و فیلترگذاری اعمال شود که بتواند تصاویر پردازش شده را در کنار هم قرار داده و خروجی ویدئویی جهت تاباندن توسط پروژکتور را آماده سازی کند. در این پژوهش توسط نرم افزار متلب که خروجی کدهای نوشته شده به صورت گرافیکی تبدیل به برنامه ای شده است که در شکل ۵ قسمت گرافیکی برنامه نوشته شده آورده شده است.



شکل ۵ برنامه نوشته شده مخصوص روش (VAM) توسط نرم افزار متلب

این برنامه به گونه ای کدنویسی شده است که به طور کلی دارای سه قسمت اصلی است:

قسمت اولیة برنامه مخصوص تنظیمات اولیة پروژکتور و سرعت ویدئو نهایی بخش شده است. قسمت دوم برنامه برای کالیبره کردن تصویر در نقطه مورد نظر و همچنین خواص رزین است. پس از انجام تنظیمات در دو قسمت اولیه، قسمت نهایی برنامه مربوط به فرایند تبدیل فایل سه بعدی طراحی شد به ویدئو نهایی است که این عملیات طی شش مرحله انجام می شود که در ادامه توضیح داده شده است.

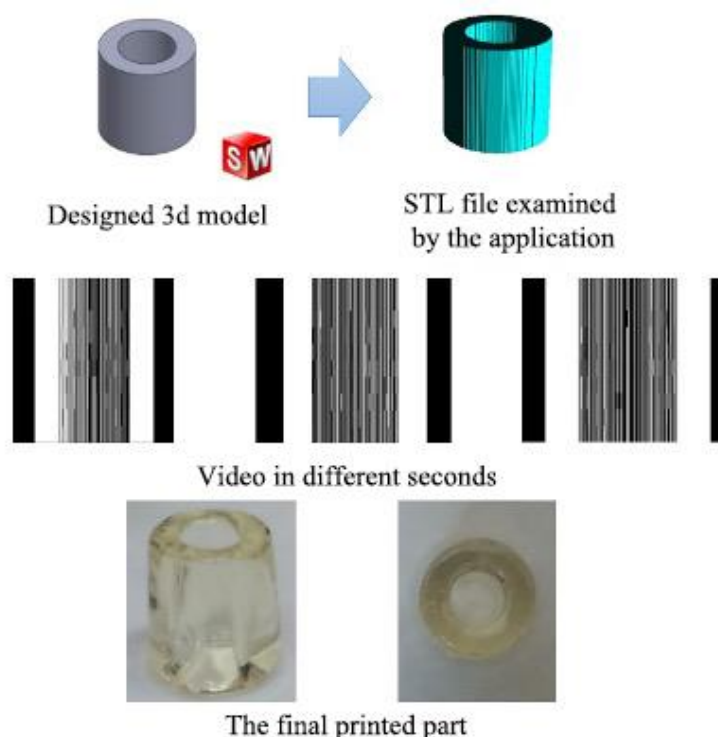
(۱) آپلود کردن فایل stl طراحی شده

(۲) انجام پروسه بررسی و بهینه سازی stl

(۳) ساخت تصاویر بعد از انجام پروسه و فیلترگذاری بر روی آن ها

(۴) تا این قسمت تصاویر به صورت خودکار در برنامه ذخیره شده است؛ ولی در این قسمت می توان تصاویر را جهت مشاهده و بررسی در مسیری جدا ذخیره کرد.

۵) در این قسمت نام ویدئو ساخته شده تعیین می شود و توانایی ذخیره ویدئو و بخش آن توسط برنامه های دیگر را دارا است.
 ۶) در قسمت نهایی ویدئو ساخته شده توسط خود برنامه شروع به نمایش کرده و در هر قسمت توانایی توقف آن را دارا است.
 جهت بهتر نمایش دادن این فرایند مدل سه بعدی توسط نرم افزار سالیدورکس طراحی شده و سپس خروجی فایل STL از مدل طراحی شده گرفته شده است در ادامه ویدئو ساخته شده توسط برنامه نوشته شده در زمان های مختلف به صورت تصویر آورده شده است که هر تصویر بیانگر یک زاویه جهت تابش به رزین در حال چرخش است که در نهایت قطعه نهایی با توجه به ویدئو ساخته شده چاپ شده که این روند در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶ طراحی تا چاپ قطعه توسط برنامه نوشته شده

۳- نتایج و بحث

یکی از قسمت های مهم در روش ساخت افزایشی حجمی اعمال فیلتر بر روی صفحات رادون گیری شده جهت تبدیل به ویدئو نهایی برای تاباندن به ظرف حاوی رزین است. فیلتر رم لاک یکی از فیلترهای پر کاربرد در بازسازی تصاویر توموگرافی، به ویژه در روش پروجکشن معکوس فیلتر شده ۱ است. این فیلتر به عنوان یک فیلتر بالاگذر عمل کرده و برای تقویت جزئیات با فرکانس بالا در تصاویر بازسازی شده به کار می رود که در حوزه فرکانس، پاسخ فیلتر رم لاک به صورت معادله ۴ تعریف می شود [۱۵].

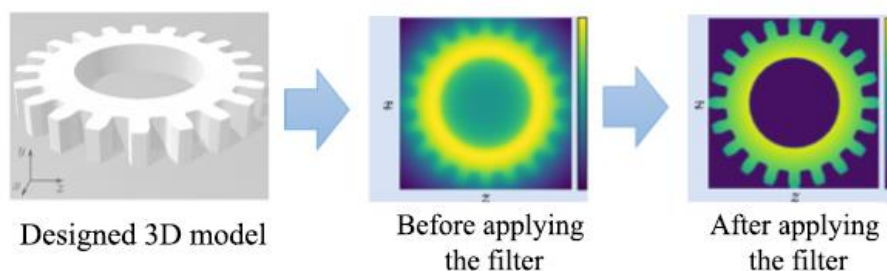
$$f_c \geq |f| = H(f), \text{ برای } |f| \geq f_c \quad (4)$$

$$f_c < |f| = 0 = H(f), \text{ برای } |f| < f_c$$

که در رابطه، f فرکانس و f_c فرکانس قطع و $H(f)$ پاسخ فیلتر در حوزه فرکانس است که نشان دهنده تأثیر فیلتر بر مؤلفه های فرکانسی سیگنال ورودی است. این تابع نشان می دهد که فیلتر رم لاک تا فرکانس قطع، مقدار مطلق فرکانس را عبور می دهد و برای فرکانس های بالاتر از f_c ، پاسخ فیلتر صفر است.

همان طور که در شکل ۷ آورده شده است اعمال این فیلتر باعث مشخص تر شدن مرز قطعه شده، و در زمان چاپ قطعه تأثیر زیادی بر کیفیت قطعه چاپ شده دارد.

¹ Filtered Back Projection(FBP)



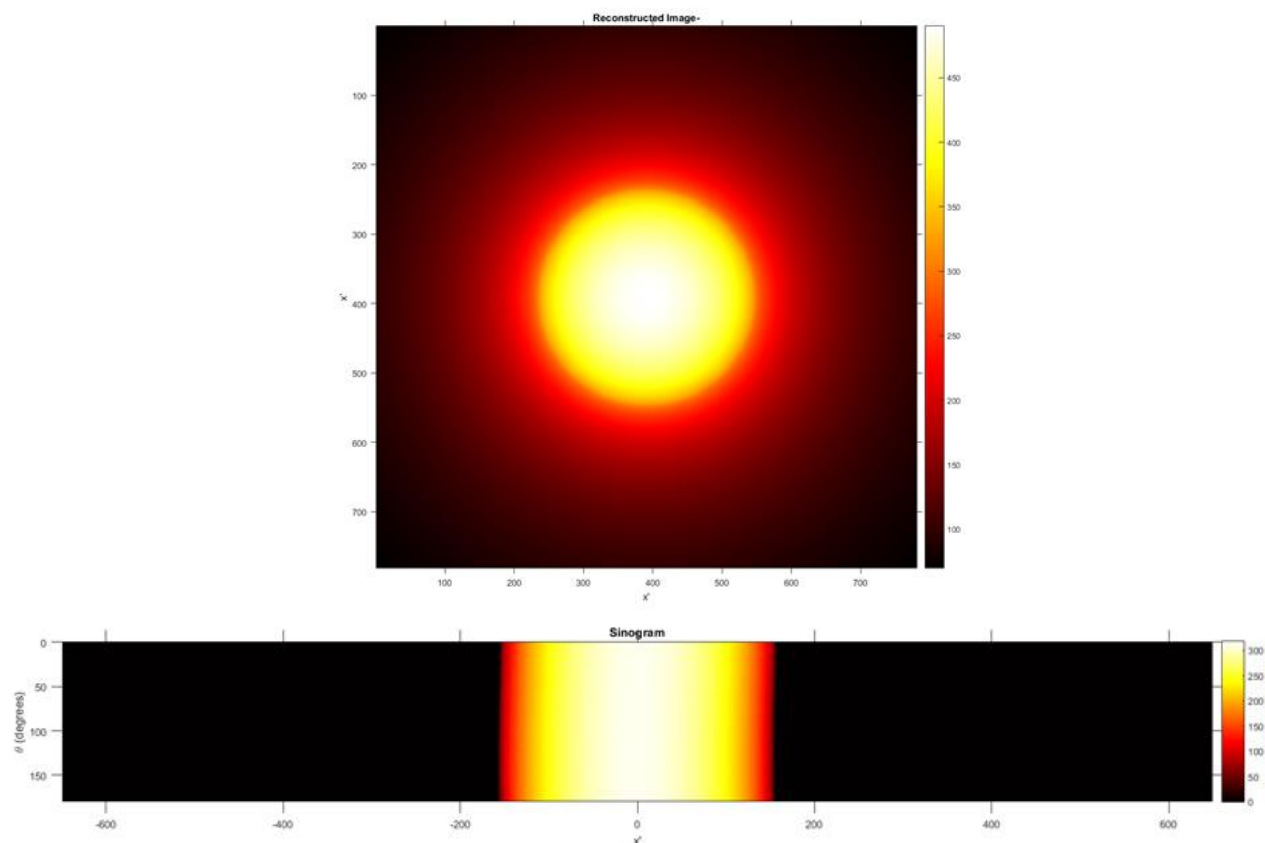
شکل ۷ تأثیر فیلتر بر روی یک برش از قطعه نهایی

در این پژوهش برای بهتر درک کردن این موضوع سه حالت مختلف یک استوانه به قطر ۱۰ میلی متر بررسی شده و بعد از ساخت تصاویر، توسط دستگاه ساخت افزایشی حجمی قطعات چاپ شده است.

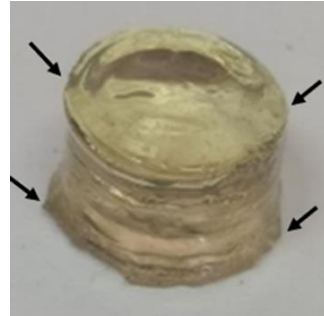
در ابتدا حالت بدون اعمال فیلتر در شکل ۸ آورده شده است که همان طور که مشاهده می شود در این حالت مرز قطعه دایره به درستی مشخص نیست و در اطراف قطعه هاله‌ی نور دیده می شود به طوری که رنگ روشن تر بیانگر شدت نور بیشتر و رنگ تیره تر بیانگر شدت نور کمتر است.

در این حالت استوانه توسط دستگاه ساخت افزایشی حجمی چاپ شده که همان طور که در شکل ۹ آورده شده است، استوانه چاپ شده دارای قسمت‌های اضافی در بالا و پایین قطعه و همچنین عدم یکنواختی در اطراف استوانه چاپ شده و به طور کلی عدم تطابق با مدل طراحی شده اولیه را دارا است.

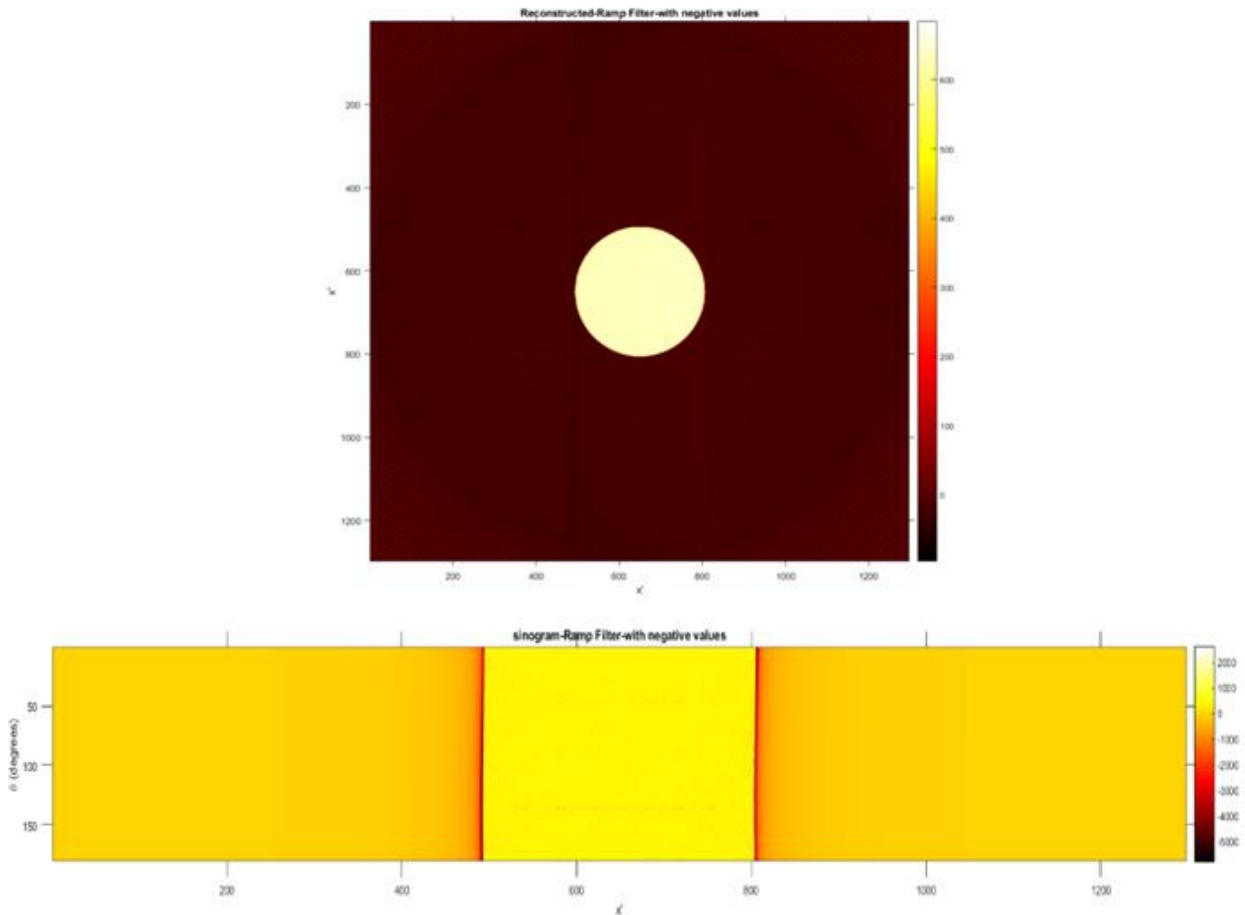
مورد بعدی قابل بررسی در حالتی است که فیلتر روی تصاویر اعمال شده است؛ اما با توجه به اینکه اعمال فیلتر برخی نواحی را در ماتریس تصاویر دارای مقادیر منفی می کند و در واقعیت مقدار نور منفی وجود ندارد؛ به همین دلیل صحت این تصاویر ساخته شده در چاپ قطعات پایین است که در شکل ۱۰ مدل تصویر ساخته شده آورده شده است.



شکل ۸ قطعه استوانه‌ای بدون اعمال فیلتر

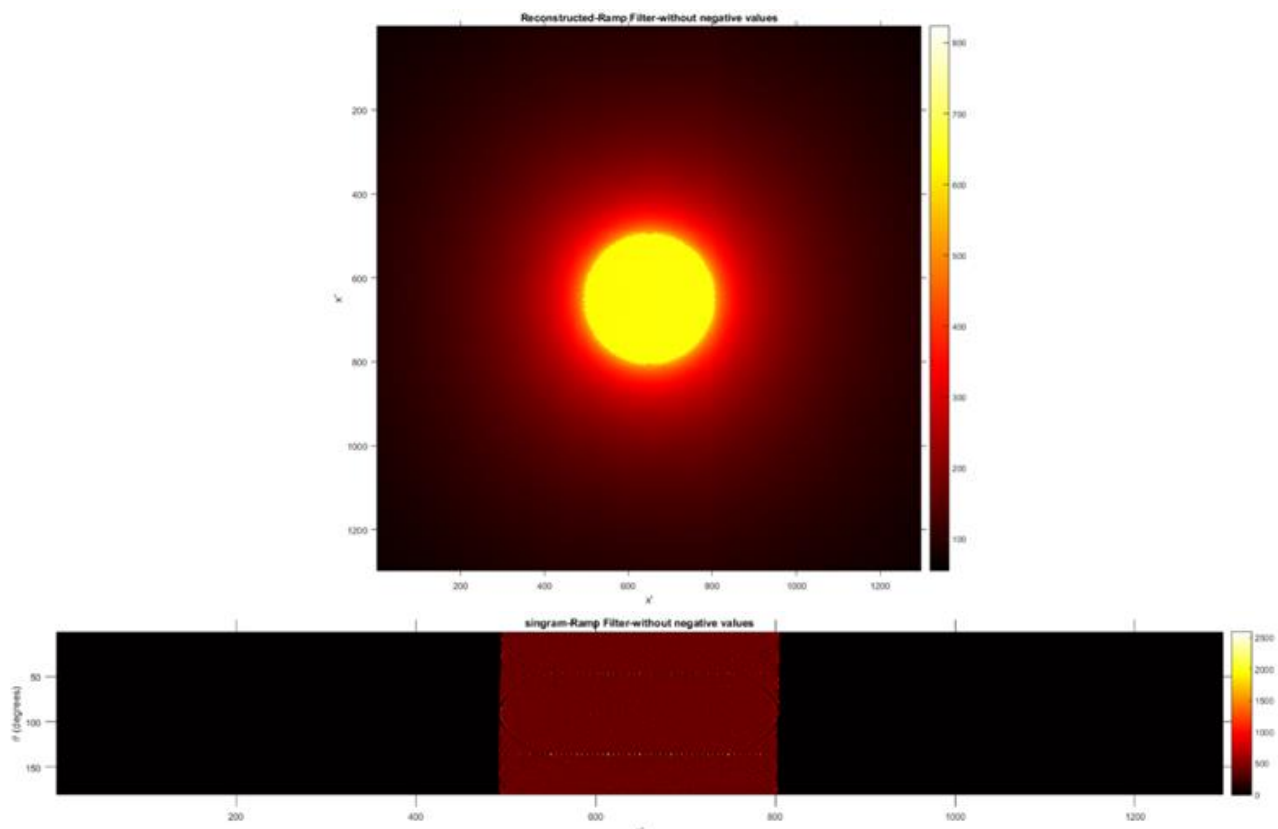


شکل ۹ قطعه استوانه‌ای چاپ شده بدون اعمال فیلتر



شکل ۱۰ قطعه استوانه‌ای با اعمال فیلتر و مقادیر منفی

مدل سومی که ارائه شده است فرایند بازسازی در ساخت افزایشی حجمی با استفاده از فیلتر و بدون مقادیر منفی را نشان می‌دهند. تصویر بالا در شکل ۱۱ بازسازی دوبعدی یک شیء را نمایش می‌دهد که در آن فیلتر اعمال فیلتر به منظور بهبود جزئیات و حذف نویزهای فرکانس پایین اعمال شده است. این فیلتر با افزایش وضوح لبه‌ها و حذف نویزهای ناخواسته، کیفیت بازسازی تصویر را بهبود می‌بخشد. در این تصویر، نواحی روشن (زرد و سفید) نشان‌دهنده شدت بالای داده‌ها در مرکز شیء هستند که به دلیل حذف مقادیر منفی، تصویر واضح‌تر و بدون اعوجاج نمایش داده شده است. تصویر پایین در شکل ۱۱ سینوگرام مرتبط با همین فرایند را نشان می‌دهد. سینوگرام مجموعه‌ای از داده‌های حاصل از تصویربرداری در زوایای مختلف (θ) است که محور افقی (x) موقعیت مکانی و محور عمودی زوایای تصویربرداری را نمایش می‌دهد. اعمال فیلتر بر روی سینوگرام، نویزهای فرکانس پایین را حذف کرده و جزئیات دقیق‌تری از شیء ارائه می‌دهد. در این تصویر، نواحی روشن‌تر (زرد و قرمز) مربوط به داده‌های دارای شدت بالا (تراکم بیشتر) بوده و نواحی تاریک‌تر نشان‌دهنده مقادیر صفر یا حذف شده هستند.



شکل ۱۱ قطعه استوانه‌ای با اعمال فیلتر و بدون مقادیر منفی

در این حالت استوانه توسط دستگاه ساخت افزایشی حجمی چاپ شده که همان طور که در شکل ۱۲ آورده شده است استوانه چاپ شده ویژگی مدل طراحی شده را به درستی مدل طراحی شده چاپ کرده است.



شکل ۱۲ قطعه استوانه‌ای چاپ شده با اعمال فیلتر و بدون مقادیر منفی

نتیجه بررسی فیلتر بعد از تبدیل مدل طراحی شده سه بعدی به ویدئو قابل پخش جهت چاپ قطعات با روش ساخت افزایشی حجمی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ اندازه‌ی قطعات چاپ شده با فیلتر و بدون فیلتر

اندازه قطر قطعه چاپ شده	اندازه قطر قطعه طراحی شده	نوع فیلتر
۱۱/۱۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	بدون اعمال فیلتر
۱۰/۰۶ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	با اعمال فیلتر و بدون مقادیر منفی

۴- نتیجه گیری

فرایند ساخت افزایشی حجمی به عنوان یک تکنیک نوین در حوزه تولید قطعات سه بعدی، گامی بزرگ در بهبود کارایی، سرعت و دقت فرایندهای تولیدی محسوب می شود. این روش توانسته است با رفع محدودیت های روش های سنتی، مانند عدم یکنواختی و زمان بر بودن تولید، کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف پیدا کند. با تمرکز بر کدهای برنامه نویسی شده و استفاده از فیلترهای مناسب در فرایند بازسازی تصاویر، می توان به قطعاتی با دقت بالا و کیفیت مطلوب دست یافت. نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیرگذاری مثبت استفاده از فیلترها بر وضوح و جزئیات قطعات تولید شده است که می تواند راهگشای پیشرفت های آتی در این فناوری باشد. این رویکرد، مسیرهای نوینی برای بهبود مدل سازی و تولید قطعات با ساختارهای پیچیده و عدم نیاز به نگهدارنده کمکی با سرعت بسیار بالا نسبت به روش های مشابه را باز می کند.

References

- [1] Zheng X, Deotte J, Alonso MP, Farquar GR, Weisgraber TH, Gemberling S, Lee H, Fang N, Spadaccini CM. Design and optimization of a light-emitting diode projection micro-stereolithography three-dimensional manufacturing system. *Review of Scientific Instruments*. 2012 Dec 1;83(12). doi: 10.1063/1.4769310
- [2] Shusteff M, Panas RM, Henriksson J, Kelly BE, Browar AE. Additive fabrication of 3D structures by holographic lithography. *Opt Express*. 2016;24(3):2513-20. doi: 10.1364/OE.24.002513
- [3] Tumbleston JR, Shirvanyants D, Ermoshkin N, Januszewicz R, Johnson AR, Kelly D, Chen K, Pinschmidt R, Rolland JP, Ermoshkin A, Samulski ET. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*. 2015 Mar 20;347(6228):1349-52. doi: 10.1126/science.aaa2397
- [4] Leibovici MC, Gaylord TK. Custom-modified three-dimensional periodic microstructures by pattern-integrated interference lithography. *Journal of the Optical Society of America A*. 2014 Jun 17;31(7):1515-9. doi: 10.1364/JOSAA.31.001515
- [5] Loterie D, Delrot P, Moser C. High-resolution tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature communications*. 2020 Feb 12;11(1):852. doi: 10.1038/s41467-020-14599-3
- [6] Kelly BE, Bhattacharya I, Heidari H, Shusteff M, Spadaccini CM, Taylor HK. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction. *Science*. 2019 Mar 8;363(6431):1075-9. doi: 10.1126/science.aau7114
- [7] Bhattacharya I, Toombs J, Taylor H. High fidelity volumetric additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2021 Nov 1;47:102299. doi: 10.1016/j.addma.2021.102299
- [8] Bernal PN, Bouwmeester M, Madrid-Wolff J, Falandt M, Florczak S, Rodriguez NG, Li Y, Größbacher G, Samsom RA, van Wolferen M, van der Laan LJ. Volumetric Bioprinting of Organoids and Optically Tuned Hydrogels to Build Liver-Like Metabolic Biofactories (Adv. Mater. 15/2022). *Advanced Materials*. 2022 Apr;34(15):2270112. doi: 10.1002/adma.202110054
- [9] Shusteff M, Browar AE, Kelly BE, Henriksson J, Weisgraber TH, Panas RM, Fang NX, Spadaccini CM. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures. *Science advances*. 2017 Dec 8;3(12):eaao5496. doi: 10.1126/sciadv.aao5496
- [10] Kelly B, Bhattacharya I, Shusteff M, Panas RM, Taylor HK, Spadaccini CM. Computed axial lithography (CAL): toward single step 3D printing of arbitrary geometries. *arXiv preprint arXiv:1705.05893*. 2017 May 16.
- [11] Cook CC, Fong EJ, Schwartz JJ, Porcincula DH, Kaczmarek AC, Oakdale JS, Moran BD, Champley KM, Rackson CM, Muralidharan A, McLeod RR. Highly tunable thiol-ene photoresins for volumetric additive manufacturing. *Advanced Materials*. 2020 Nov;32(47):2003376. doi: 10.1002/adma.202003376
- [12] Kollep M, Konstantinou G, Madrid-Wolff J, Boniface A, Hagelüken L, Sasikumar PV, Blugan G, Delrot P, Loterie D, Brugger J, Moser C. Tomographic volumetric additive manufacturing of silicon oxycarbide ceramics. *Advanced Engineering Materials*. 2022 Jul;24(7):2101345. doi: 10.1002/adem.202101345
- [13] Salajeghe R, Meile DH, Kruse CS, Marla D, Spangenberg J. Numerical modeling of part sedimentation during volumetric additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2023 Mar 25;66:103459. doi: 10.1016/j.addma.2023.103459
- [14] Jacobs PF. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers; 1992.
- [15] Vidler C. *Volumetric Printing of Arbitrary Geometries via Tomographic Back-projection*. School of Engineering Deakin University. 2020;10.