



بازطراحی و ساخت چاپگر سه‌بعدی رسوب‌گذار ذوبی با هدف افزایش دقت چاپ و کاهش ارتعاشات

امید سرابی^۱، فرزاد چراغپور سموتی^{۲*}

۱. گروه پژوهشی سامانه‌های مکانیکی هوشمند، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* نویسنده مسول: samavati@pardisiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

چکیده

چاپ سه‌بعدی از نوع رسوب‌گذار ذوبی از سریع‌ترین نوع در حال رشد فن‌آوری نمونه‌سازی سریع است. در چاپ سه‌بعدی شی فیزیکی از یک مدل دیجیتالی سه‌بعدی، با قراردادن لایه‌های متوالی نازکی از یک ماده ایجاد می‌شود. کیفیت و خواص مکانیکی چاپ رسوب‌گذار ذوبی متأثر از پارامترهای مختلف چاپ و ساختار چاپگر است. هدف این مقاله بازطراحی زیربخش‌هایی از چاپگر سه‌بعدی نظیر مناسب‌ترین قطر نازل و همچنین سازه مکانیکی چاپگر است، که در نهایت منجر به ارتقا دقت چاپ در قطعه نمونه‌سازی شده شوند. بدین منظور، ابتدا در طراحی سازه چاپگر، هندسه مقطع و متریکال پروفیل‌های مورد استفاده بهبود داده شد، که در نتیجه آن ارتعاشات سازه دستگاه در هنگام پرینت به میزان قابل توجهی برطرف گردید. سپس با طراحی مجدد و ساخت اکسترودر چاپگر، ارتعاشات نازل دستگاه در هنگام پرینت کاسته شد. در نهایت با تنظیم کنترل استپ موتورهای محرک محورهای چاپگر، نیروی ناشی از شتاب حرکت محورها در شروع و توقف کاهش پیدا کرد. اثر این سه اقدام دقت چاپگر را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. تست‌های تجربی روی قطعه استاندارد برای ارزیابی دقت چاپگرها انجام گرفت و صحت نتایج را تصدیق نمودند.

کلمات کلیدی: چاپگر سه‌بعدی، پرینتر سه‌بعدی، مدل‌سازی رسوب مذاب، افزایش دقت چاپ، کاهش ارتعاشات.

مقدمه

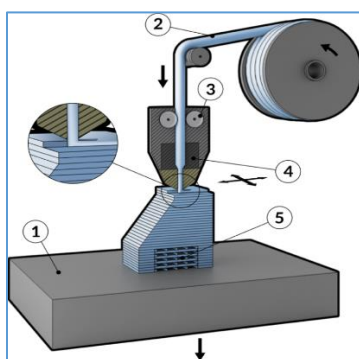
نمونه‌سازی سریع^۱ و ساخت افزایشی^۲ از جمله فناوری‌های نوظهور در ساخت محسوب می‌شوند که عموماً برای انجام عملکردهای ویژه در طراحی و تولید ایجاد شده‌اند [۱]. مطابق تعریف رسمی و استاندارد برای ساخت افزایشی، "ساخت افزایشی فرآیند متصل کردن متریکال برای ساخت قطعات با استفاده از داده‌های مدل سه‌بعدی است، که معمولاً لایه به لایه ایجاد می‌شود؛ این فرآیند در مقابل روش‌های کاهش متریکال و یا شکل‌دهی می‌باشد" [۲]. با رشد فناوری‌های نمونه‌سازی سریع، این روش‌ها استفاده فزاینده‌ای برای تولید قطعات داشته‌اند [۳]. همچنین با روش‌های پرینت سه‌بعدی امکان توسعه هرچه بهتر محصولات در مرحله نمونه‌های اولیه فراهم شده است [۴]. مطابق گزارش گارتنر، مجموعه فناوری‌های موسوم به پرینت یا چاپ سه‌بعدی در طیف گسترده‌ای از کاربردها توسعه یافته‌اند، به طوری که در کاربردهایی همچون مدل‌سازی یا صنایع خودروسازی کاملاً به بلوغ رسیده‌اند و در کاربردهایی چون تولید ربات‌های پوشیدنی در فازهای آغازین توسعه قرار دارند [۵]. عبارت پرینت یا مدل‌سازی رسوب‌گذاری ذوبی^۳ اولین بار توسط شرکت استراسیس^۴ ارائه گردید. در این روش رشته‌ای از ماده ترموپلاستیک ذوب شده توسط یک نازل تزریق می‌شود. نازل ماده ذوب شده را به صورت لایه به لایه بر روی یک سکوی تکیه‌گاهی می‌نشانند به طوری که هر لایه به لایه زیرین خود می‌چسبند و در نهایت نمونه سه‌بعدی لایه‌ای ساخته می‌شود [۶]. در شکل (۱) مکانیزم عملکرد روش پرینت رسوب‌گذاری ذوبی نشان داده شده است.

¹ Rapid Prototyping: RP

² Additive Manufacturing: AM

³ Fused Deposition Modeling: FDM

⁴ Stratasys



شکل ۱: شماتیک روش پرینت رسوب‌گذاری ذوبی؛ (۱) بستر، (۲) فیلامنت، (۳) اکسترودر، (۴) نازل، (۵) قطعه پرینت شده

از جمله کاربردهای قطعات ساخته شده به روش پرینت رسوب‌گذاری ذوبی می‌توان به: ساخت مدل‌های تجسمی مانند مجسمه‌سازی، ساخت نمونه‌هایی برای طراحی، آنالیز و تست‌های عملکردی در صنایعی چون خودروسازی و هواپیماسازی، ساخت مدل برای قالب‌سازی و به‌ویژه ساخت قالب‌های سریع به وسیله این مدل‌ها، و ساخت مدل برای انواع ریخته‌گری نظیر نمونه‌های از جنس موم در ریخته‌گری اشاره کرد. با توجه به قابلیت ساخت قطعات پیچیده توسط این روش، استفاده از آن در صنایع مختلف در حال گسترش است. ائتلاف پایین مواد مصرفی، سهولت در جداسازی مدل پرینت شده از تکیه‌گاه در پایان فرآیند، و همچنین امکان تغییر سریع و ساده نوع متریال پرینت با تعویض قره قره رشته ترموپلاستیک، از سایر مزایای این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پرینت سه بعدی است. مواد استفاده شده برای رسوب‌گذاری ذوبی، فیلامنت‌های ترموپلاستیک هستند. پایه این فیلامنت‌ها از موادی چون نایلون، پلی لاتیك اسید^۱ و اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۲ هستند که در دسته بندی پلیمرهای مواد گرمانرم طبقه بندی می‌شوند.

فرآیند پرینت رسوب‌گذاری ذوبی و منابع خطا

فرآیند کلی پرینت رسوب‌گذاری ذوبی را می‌توان به صورت یک روند گام به گام در ۷ مرحله به شرح زیر بیان نمود:

۱. از مدل گد^۳ سه‌بعدی که با نرم‌افزار طراحی تولید شده، فایل استریو با فرمت اس‌تی‌ال^۴ تولید می‌شود. این فایل حاوی مش‌بندی مثلثی است که اطلاعات هندسی لازم برای برش مدل سه‌بعدی را دارد.
۲. فایل استریو در یک نرم‌افزار چاپ سه‌بعدی خوانده شده و یک روند برش‌دهی لایه به لایه از مدل سه‌بعدی تنظیم می‌شود که در آن طراحی گد برای پرینت به چند لایه تقسیم می‌شود.
۳. برش‌ها (لایه‌ها) به مجموعه‌ای از کدهای حرکتی پرینتر تبدیل می‌شوند. این کدها جی-کد^۵ نامیده می‌شوند و فرامین حرکتی پرینتر را ایجاد می‌کنند.
۴. پارامترهای فرآیند برای پرینتر عبارتند از: قطرنازل، ضخامت لایه، سرعت چاپ، درصد پرشدگی و ساپورت که به عنوان دستورالعمل برای اجرای عملیات چاپگر خوانده می‌شوند.
۵. جی-کدها به پرینتر ارسال می‌شوند. آماده‌سازی و راه‌اندازی پرینتر انجام شده و موادی چون کالیبره کردن صفحه ساپورت، بررسی دمای اکسترودر و مقاومت گرمایی بسته به اندازه طراحی، و زمان چاپ تنظیم می‌شود.
۶. فرآیند پرینت انجام می‌گردد.
۷. برداشت محصول نهایی از صفحه چاپ و تمیزکاری قطعه و حذف بخش‌های اضافی از آن صورت می‌گیرد.

¹ Poly Lactic Acid: PLA

² Acrylonitrile Butadiene Styrene: ABS

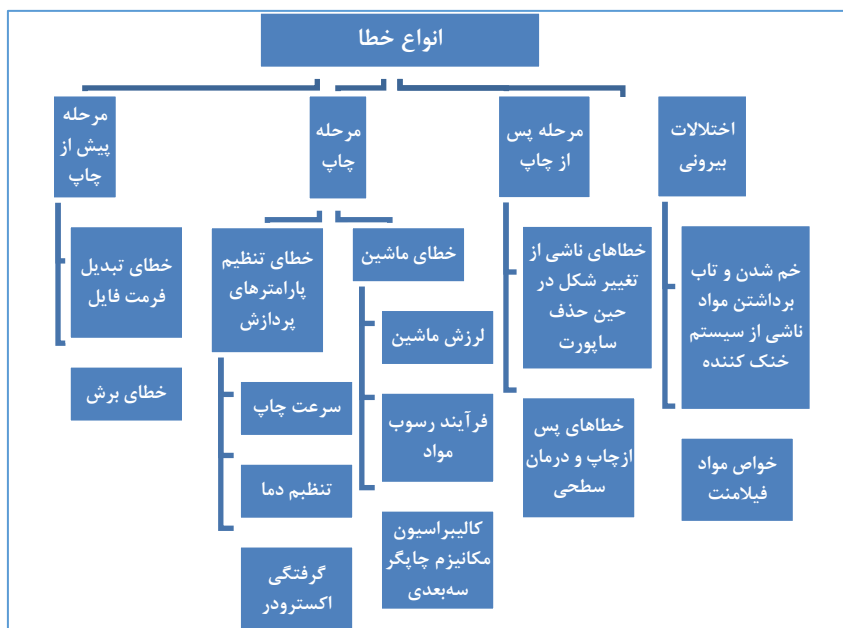
³ CAD

⁴ Stereolithography: STL

⁵ G-Code



در شکل (۲) انواع اصلی خطاهای مربوط به فرآیند چاپ سه‌بعدی در چهار دسته نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار انواع خطا در فرآیند پرینت سه‌بعدی

در فرآیندهای چاپ سه‌بعدی، همواره موازنه‌ای میان سرعت چاپ و دقت قطعه ساخته شده وجود دارد، بدین ترتیب که چاپ سریع‌تر منجر به دقت پایین‌تر می‌شود و برعکس [۷]. مطابق نمودار خطاهای تولید شده در شکل (۲)، دسته اول خطاها مربوط به خطاهای مرحله پیش چاپ است؛ دسته دوم مربوط به مرحله چاپ و دسته سوم مربوط به مرحله پس از چاپ است. افزون بر خطای ذکر شده، فرآیند چاپ سه‌بعدی نیز تحت تأثیر برخی اختلالات خارجی است که منجر به خطاهای چاپ می‌شود. همه خطاهای عنوان شده تأثیر خود را در کیفیت قطعه چاپ شده نشان می‌دهند.

روش شناسی تحقیق

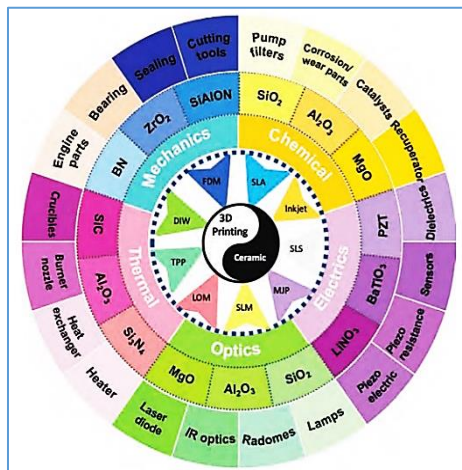
عوامل تاثیرگذار بر کیفیت چاپ را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- انتخاب روش مناسب چاپ سه‌بعدی؛ با توجه به کیفیت مورد نظر طراح، راحتی استفاده، اطمینان‌پذیری، هزینه‌های عملیاتی، باز بودن نرم‌افزاری، سختی و استحکام چارچوب و ساختمان چاپگر و دقت در قطعات چاپ شده.
- راه‌اندازی و اجرای مناسب و کالیبراسیون ماشین: شامل تراز کردن بستر، کالیبراسیون مقاومت‌های حرارتی، موتورها و ماژول سوئیچ برخورد نوری. کالیبراسیون یک فرآیند در حال اجرا است و باید در سرتاسر چاپگر انجام شود.
- نوع و کیفیت فیلامنت ترموپلاست اکسترود شده: فیلامنت ضعیف، پرداخت سطحی و کیفیت را کاهش می‌دهد و می‌تواند موجب خرابی اکسترودر شود که در آن صورت فیلامنت با کیفیت بالا، چاپ‌هایی قوی‌تر و با ظاهری بهتر را انجام خواهد داد. پارامترهای مهم عبارتند: از نوع ماده، تغییرات قطر، گردی فیلامنت، طول قرقره و ذخیره‌سازی فیلامنت. البته موارد ۱ تا ۳ به نوعی با یکدیگر مرتبط هستند. شکل (۳) ارتباط میان انتخاب روش پرینت با نوع متریال (فیلامنت) و همچنین چند کاربرد برای هر یک را نشان می‌دهد.

۴. نرم‌افزار برش‌دهی استریولیتوگرافی: در یک فایل اس تی ال عمدتاً شکل کلی هندسه مدلی که باید چاپ شود با فهرست زیادی از مثلث‌ها نمایش داده می‌شوند. این مثلث‌ها با یکدیگر تناسب پیدا می‌کنند تا مدل را تعریف کنند. هر یک از مثلث‌ها سه لبه در راستای عمود بردار نرمال سطح مثلث دارند که تعیین می‌کند که مثلث رو به بیرون یا داخل است. تبدیل مختصات



نقاط مدل به فرمان‌ها چاپ که چاپگر بتواند آن‌ها را درک کند، نکته مهمی است. البته برای تبدیل اس‌تی‌ال به جی-کد نرم‌افزارهای مختلفی وجود دارد.



شکل ۳: انواع روش‌های پرینت سه‌بعدی، متریال و کاربردهای هر روش [۸]

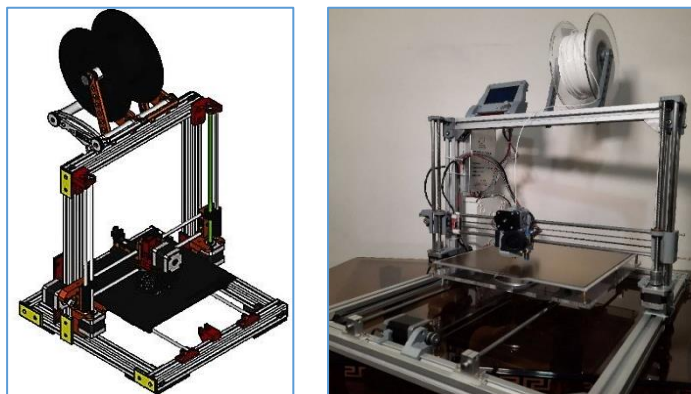
- تنظیمات پرینتر: این تنظیمات اندازه و انحراف صفحه چاپ، ارتفاع Z حداکثری، تعداد اکسترودرها، قطر نازل آن‌ها را شامل می‌شود.
 - تنظیمات فیلامنت: قطر فیلامنت باید دقیقاً محاسبه شود و همچنین تناسب آن با اندازه و کیفیت قطعه در نظر گرفته شود. دمای اکسترودر و صفحه نیز باید مورد توجه قرار گرفته و فن خنک‌کننده برای اکسترودر وجود داشته باشد.
 - تنظیمات چاپ: ارتفاع لایه، تعداد پوسته‌های محیط پیرامونی، تعداد و ضخامت لایه‌های بالا و پایین، درصد پرشدگی، الگوی پرشدگی، و سرعت چاپ، همه خصوصیتی هستند که تنظیمات چاپگر را تشکیل می‌دهند.
- با توجه به موارد عنوان شده، برای بهبود دقت و کیفیت قطعه پرینت شده می‌بایست روی هر یک از موارد تغییرات مناسب ایجاد کرد تا به نتیجه مطلوب رسید.

معرفی ست‌آپ آزمایش: چاپگر سه‌بعدی ساخته شده:

چاپگرهای سه‌بعدی افدی‌ام کارترین از سه محور X ، Y و Z برای تشخیص موقعیت و جهت نازل چاپگر استفاده می‌کنند. در این نوع چاپگر، صفحه‌ی چاپ معمولاً در راستای Z و اکسترودر در راستای X و Y حرکت می‌کند. این چاپگر از چندین بخش مانند سیستم مکانیکی، سیستم کنترل تشکیل شده است. اجزای تشکیل دهنده چاپگر در نقشه سه‌بعدی شکل (۴) نشان داده شده است. که شامل محورهای حرکت خطی، موتورها، کنترل بوردها، سیستم منبع تغذیه، اسکلت فلزی و صفحه‌ی چاپ می‌باشد. برای محورهای حرکت خطی چاپگر از محورهای راهنما و بلوک‌های آلومینیومی بلبرینگ به همراه لید اسکرو استفاده شده است. برای افزایش دقت چاپگر همچنین می‌توان از محور خطی ریل و واگن استفاده نمود. در اینجا از لیداسکرو ۸ میلی‌متر با گام ۲ استفاده شده است که با توجه به قیمت و فراوانی آن در بازار، از دقت لازم برای طرح برخوردار است. برای ایجاد حرکت در محورها از موتورهای پله‌ای با سایز جهانی نیما ۱۷ و یا همان ۴۲ میلی‌متر استفاده شده است. برای کنترلر چاپگر از یک برد آردیونو مگا استفاده گردیده که با یک شیلد مخصوص کنترلر استپر موتورها، کار خود را انجام می‌دهند. همچنین برای موتورها از درایورهای موجود در بازار استفاده شده تا محصول قیمت تمام شده‌ی کمتری داشته باشد. برای ارتباط راحت‌تر کاربر با چاپگر از یک مانیتور استفاده شده است. برای تغذیه الکتریکی چاپگر از یک منبع تغذیه سویچینگ استفاده گردیده است. این انتخاب باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی چاپگر، و نیز یکنواختی در ولتاژ ورودی به دستگاه می‌شود. برای اطمینان از کالیبره‌بودن چاپگر در هر پرینت، در نرم‌افزار کنترلر آردیونو، تعدادی از نقاط چک کالیبره تعریف می‌شود؛ قبل از هر چاپ، کد جی ۲۸ برای آغاز حرکت محورها از مختصات مرجع دستگاه و کد جی ۲۹ برای کالیبره کردن چاپگر استفاده می‌شود. برای اطمینان از

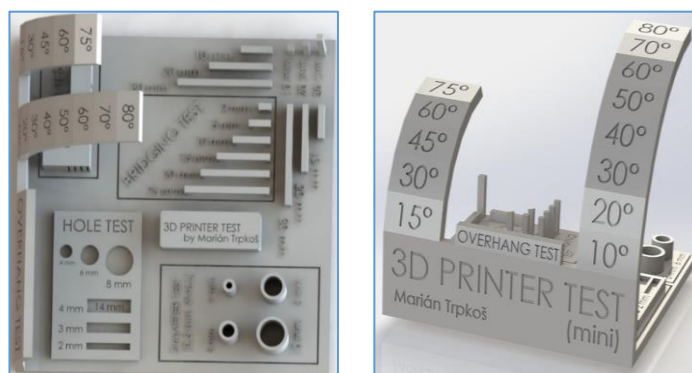


کالیبراسیون دمای نازل اکسترودر، در شروع هر چاپ، نازل چند دور اطراف قطعه مورد نظر فیلامنت تزریق می‌کند تا از دقت دمای تعیین شده و هم از میزان فیلامنت خارج شده اطمینان حاصل شود. برای ارزیابی عملکرد پرینترهای سه‌بعدی، عموماً آزمایش استاندارد پرینت قطعه گواه انجام می‌شود.



شکل ۴: نمای کلی از چاپگر سه‌بعدی مورد استفاده در این تحقیق

مدل استاندارد استفاده شده برای آزمایش‌های ارزیابی در این تحقیق در شکل (۵) نشان داده شده است، [۹].



شکل ۵: مدل استاندارد سنجش دقت چاپگر

آزمایش‌های ارزیابی عملکرد چاپگر

در آزمایش‌ها، با تغییر سه پارامتر قطر نازل، سرعت چاپ و ضخامت لایه، مدل استاندارد سنجش دقت چاپگر چاپ شده است. با توجه به اینکه ترکیب این پارامترها در عملکرد چاپگر تاثیرگذار است، ترکیب تغییرات دو به دو این پارامترها به صورت هفت آزمایش مجزا تعریف شده‌اند. پارامترهای هر آزمایش چاپ در جدول (۱) آمده است.

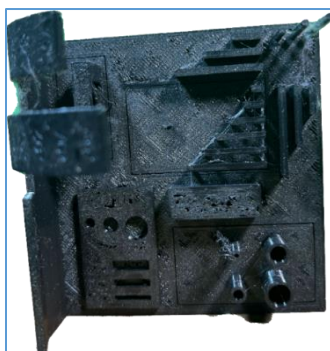
جدول ۱: پارامترهای تست چاپگر

آزمایش	قطر نازل (mm)	سرعت چاپ (mm/s)	ضخامت لایه (mm)
۱	۰/۵	۳۰	۰/۱۵
۲	۰/۵	۶۰	۰/۱۵
۳	۰/۵	۳۰	۰/۳
۴	۱	۳۰	۰/۱۵
۵	۱	۶۰	۰/۱۵
۶	۱	۳۰	۰/۳
۷	۰/۳	۳۰	۰/۳



آزمایش ۱:

با توجه به شکل (۶) در قطعه چاپ‌شده با تنظیمات آزمایش، پل‌ها از کیفیت مطلوبی برخوردار هستند. فقط پل ۲۵ میلی‌متری مقدار دچار ریختگی شده و نیز در کل تارزدگی‌هایی بین پایه‌های پل‌ها وجود دارد. در کوچک‌ترین استوانه، سوراخ داخلی منظم چاپ شده اما در اطرافش زدگی وجود دارد. سطح دچار ریختگی مواد شده و قسمت کوچک عمودی مخدوش چاپ شده است. به علت کوچک بودن سطح مقطع ستون‌ها، بین آنها تارزدگی اتفاق افتاده، که در این مورد مشهود است. زوایای ۱۰ و ۲۰ درجه پشت رو به درستی چاپ شده است. از زاویه ۲۰ درجه، مخدوش شدگی اعداد شروع می‌شود و تا آخر بدتر می‌شود در پشت هم از اوایل ۳۰ درجه مخدوش شدگی شروع می‌گردد تا بالا که بیشترین مقدار را برخوردار می‌شود. زوایای ۱۵ و ۳۰ خوبه ولی از ۳۰ به بعد پشت مخدوش می‌شود.



شکل ۶: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۱

آزمایش ۲:

با تنظیمات این آزمایش در قطعه چاپ شده، همانند آزمایش ۱ با این تفاوت که ریختگی مواد در پل ۲۵ میلی‌متری بیشتر است. علاوه بر زدگی اطراف کوچکترین استوانه، سوراخ نامنظم چاپ شده است که در شکل (۷) قابل مشاهده است. ریختگی مواد ساپورت کمتر از آزمایش ۱ گردید و کیفیت قسمت عمودی بهتر شده است. علاوه بر تارزدگی، ستون بلندتر نیز دچار مخدوشی گردیده است. کیفیت روی لبه‌ها به نسبت آزمایش ۱ بهتر است اما عدد زاویه ۸۰ درجه واضح چاپ نشده است. پشت آن نیز از زاویه ۵۰ درجه مخدوش شده و نیز در زاویه ۷۰ درجه موارد دچار تورم شده است.



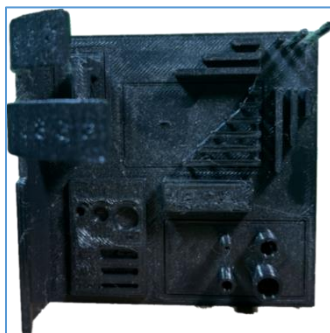
شکل ۷: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۲

آزمایش ۳:

مطابق شکل (۸) و با تنظیمات این آزمایش، تارزدگی و ریختگی مواد در پل ۲۵ میلی‌متری در قطعه چاپ شده، نسبت به آزمایش‌های ۱ و ۲ کمتر شده و در کل کیفیت بهتری دارد. در کوچک‌ترین استوانه، سوراخ کوچک‌تر از آزمایش‌های ۱ و ۲ چاپ گردیده است اما با دقت بهتر و بدون زدگی بیرونی می‌باشد قسمت عمودی ساپورت واضح‌تر چاپ شده اما در مقدار ریختگی موارد تغییر خاصی ایجاد نشده است. ستون تارزدگی نسبت به آزمایش‌های ۱ و ۲ بسیار کمتر بوده که به خاطر سرعت پایین‌تر



و ضخامت بیشتر لایه نسبت به موارد مذکور است. لبه‌های زاویه دار ۱۰ درجه‌ای مخدوش‌شدگی بالا - پشت، کمتر از بقیه است. اما به خاطر ضخامت بیشتر لایه، جزئیات کمتر و بی کیفیت‌تر است. لبه‌های زاویه دار ۱۵ درجه‌ای مخدوشی پشت به نسبت آزمایش‌های ۱ و ۲ خیلی کمتر و با کیفیت‌تر هست ولی جزئیات به خاطر ضخامت بیشتر لایه، کمتر است.



شکل ۸: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۳

آزمایش ۴:

باتوجه به شکل (۹)، با تنظیمات این آزمایش در قطعه چاپ شده، پل به طور کلی مخدوش چاپ شده است. استوانه‌های ۴ و ۵ میلی‌متری به طور کامل چاپ نشده‌اند. در استوانه ۸ میلی‌متری زدگی‌هایی وجود دارد که احتمالاً مواد استوانه ۴ میلی‌متری به نوک نازل چسبیده و روی این استوانه باقی مانده است. ساپورت قسمت عمودی چاپ نشده و موارد ریختگی دارد. ستون تارزدگی شدید و چسبیدگی مواد در بین ستون‌ها مشهود است. سرعت بالای چاپ و نیز قطر نازل بزرگتر علت این امر است. لبه‌های زاویه دار ۱۰ درجه‌ای از لبه ۵۰ درجه مخدوشی‌های پشت زیاد شده است. لبه‌های زاویه دار ۱۵ درجه‌ای جزئیات در ۱۵ و ۳۰ درجه خوب بوده اما رفته رفته کیفیت خود را از دست می‌دهند. مخدوش‌شدگی پشت لبه‌ها از زاویه ۳۰ درجه شروع شده و تا آخر شدت می‌یابد.



شکل ۹: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۴

آزمایش ۵:

با تنظیمات دیگر آزمایش در قطعه چاپ شده مطابق شکل (۱۰)، مقداری از هر کدام از پل‌ها چاپ شده اما با آزمایش‌های ۱ تا ۳ اختلاف زیادی دارد به طوری که پایه‌های آنها نامشخص بوده و نیز قسمت‌های پل به یکدیگر چسبیده‌اند. استوانه‌های ۴ و ۵ میلی‌متری کامل چاپ نشده‌اند. در استوانه ۸ میلی‌متری زدگی‌هایی وجود دارد که احتمالاً مواد استوانه ۴ میلی‌متری به نوک نازل چسبیده و روی این استوانه باقی مانده است. ساپورت علاوه بر قسمت عمودی، قسمت افقی نیز نیمه چاپ گردیده و مواد آن به یک سو جمع شده است. برخلاف آزمایش ۴ مواد ستون‌ها به یکدیگر نچسبیده‌اند و تارزدگی‌ها کمتر شده است. در لبه‌های زاویه دار ۱۰ درجه‌ای مخدوشی پشت لبه‌ها زیاد است. حتی بخشی از لبه‌های ۶۰ و ۷۰ درجه سوراخ است. لبه‌های زاویه دار ۱۵ درجه‌ای روی لبه‌ها کیفیت بهتری نسبت به آزمایش ۴ دارند.



شکل ۱۰: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۵

آزمایش ۶:

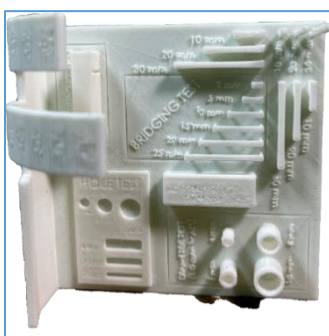
مطابق شکل (۱۱)، با تنظیمات این آزمایش در قطعه چاپ شده، هیچ‌یک از پل‌ها چاپ نشده‌اند و صرفاً مقداری فیلامنت بر سطح قطعه ریخته شده است. استوانه‌های ۴ و ۵ میلی‌متری کامل چاپ نشده‌اند. در استوانه ۸ میلی‌متری زدگی‌هایی وجود دارد که احتمالاً مواد استوانه ۴ میلی‌متری به نوک نازل چسبیده و روی این استوانه باقی مانده است؛ ساپورت قسمت افقی مخدوش چاپ شده و مواد دچار ریختگی شدید شده است. ستون تارزدگی کمتر از موارد ۴ و ۵ است اما مقدار خیلی کمی مواد ستون بزرگ و متوسط به یکدیگر چسبیده است. لبه‌های زاویه‌دار ۱۰ درجه‌ای روی لبه‌ها کیفیت بهتری نسبت به آزمایش‌های ۴ و ۵ دارد اما اعداد و جزئیات چاپ نشده است. مخدوشی نیز کمتر از موارد مذکور است. در لبه‌های زاویه‌دار ۱۵ درجه‌ای، به‌علت افزایش ضخامت لایه، لایه‌های بالایی کلفت شده به طوری که عدد ۷۵ درجه وضوح خوبی ندارد.



شکل ۱۱: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۶

آزمایش ۷:

همانطور که در شکل (۱۲) نمایان است، با تنظیمات آزمایش در قطعه چاپ شده، پل‌ها از کیفیت مطلوبی برخوردار و تمام قسمت پل‌ها چاپ شده‌اند. استوانه‌ها به درستی چاپ گردیده‌اند و از کیفیت خوبی برخوردار می‌باشند. تارزدگی‌های اطراف استوانه از بین رفته و ساپورت‌ها نیز کاملاً چاپ شده‌اند. با توجه به اینکه سطح مقطع ستون‌ها کوچک است اما به درستی چاپ شده است زاویه‌ها نیز از دقت خوبی برخوردار هستند و تماماً چاپ شده‌اند.



شکل ۱۲: نمونه استاندارد چاپ‌شده در آزمایش ۷



میزان خطا در آزمایش‌ها

پس از انجام تست‌ها و بررسی آن‌ها برای میزان خطا، با استفاده از کولیس بعضی از قسمت‌ها اندازه‌گیری گردید. مقدار خطای اندازه‌گیری شده در ستون‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: مقدار خطای اندازه‌گیری شده: ستون‌ها

شماره آزمایش	ستون‌ها	اندازه اسمی (mm)	مقدار اندازه‌گیری (mm)	خطا (درصد)
۱	ستون	۱۰	۱۰/۰۸	۰/۸
	محور X	۲۰	۲۰/۰۷	۰/۳۵
		۳۰	۲۹/۹۷	۰/۱
	ستون	۱۰	۱۰/۲۱	۲/۱
	محور Y	۲۰	۲۰/۰۹	۰/۴۵
		۳۰	۳۰/۰۷	۰/۲۳
۲	ستون	۱۰	۹/۹۹	۰/۱
	محور Z	۲۰	۲۰/۰۲	۰/۱
		۳۰	۳۰/۲۱	۰/۷
	ستون	۱۰	۱۰/۱۵	۱/۵
	محور X	۲۰	۲۰/۱۰	۰/۵
		۳۰	۳۰	.
۳	ستون	۱۰	۱۰/۳۱	۳/۱
	محور Y	۲۰	۲۰/۱۸	۰/۹
		۳۰	۳۰/۰۹	۰/۳
	ستون	۱۰	۱۰/۰۵	۰/۵
	محور Z	۲۰	۱۹/۹۶	۰/۲
		۳۰	۳۰/۰۲	۰/۰۶
۴	ستون	۱۰	۱۰/۲۲	۲/۲
	محور X	۲۰	۲۰/۱۲	۰/۶
		۳۰	۳۰	.
	ستون	۱۰	۱۰/۳۵	۳/۵
	محور Y	۲۰	۲۰/۲۹	۱/۴۵
		۳۰	۳۰/۲۱	۰/۷
۵	ستون	۱۰	۹/۹۰	۱
	محور Z	۲۰	۱۹/۸۸	۰/۶
		۳۰	۲۹/۹۰	۰/۳۳
	ستون	۱۰	۱۰/۰۵	۰/۵
	محور X	۲۰	۲۰/۰۷	۰/۳۵
		۳۰	۳۰	.
۶	ستون	۱۰	۱۰/۰۵	۰/۵
	محور Y	۲۰	۲۰/۰۱	۰/۰۵
		۳۰	۳۰/۰۱	۰/۰۳
	ستون	۱۰	۹/۹۶	۰/۴
	محور Z	۲۰	۲۰/۰۵	۰/۲۵
		۳۰	۲۹/۹۵	۰/۱۶



همچنین مقدار خطای اندازه‌گیری شده در استوانه‌ها و دایره در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳: مقدار خطای اندازه‌گیری شده: استوانه‌ها و دایره

شماره آزمایش	هندسه	اندازه اسمی (mm)	مقدار اندازه‌گیری (mm)	خطا (درصد)
۱	استوانه	۱۰	۹/۹۷	۰/۳
		۸	۸/۲۱	۲/۶۲
		۶	۶/۰۲	۰/۳۳
	قطر دایره	۴	۴/۰۷	۱/۷۵
		۸	۸/۴۸	۰/۶
		۶	۵/۶۷	۵/۵
۲	استوانه	۱۰	۱۰/۰۱	۰/۱
		۸	۸/۱۰	۱/۲۵
		۶	۶/۱۶	۲/۶۶
	قطر دایره	۴	۴/۰۵	۱/۲۵
		۸	۸/۸۰	۱۰
		۶	۵/۶۲	۶/۳۳
۳	استوانه	۱۰	۹/۹۸	۰/۲
		۸	۸/۰۷	۰/۸۷
		۶	۶/۰۷	۱/۱۶
	قطر دایره	۴	۴/۰۲	۰/۵
		۸	۸/۱۵	۱/۸۷
		۶	۵/۵۳	۷/۸۳
۷	استوانه	۱۰	۹/۹۸	۰/۲
		۸	۷/۹۳	۰/۸۷
		۶	۵/۹۶	۰/۶۶
	قطر دایره	۴	۴/۰۴	۱
		۸	۷/۸۹	۱/۳۷
		۶	۵/۸۹	۱/۸۳
		۴	۳/۸۹	۲/۷۵

نتیجه‌گیری:

دقت ابعادی در چاپگرهای سه‌بعدی عبارت است از این که تا چه حد ابعاد قطعه چاپ شده به مدل سه‌بعدی طراحی شده نزدیک است. هرچقدر این تفاوت اندازه کمتر باشد، دقت چاپگر بیشتر است. بر مبنای آزمایش‌های متوالی انجام شده و به دست آوردن میزان درصد خطا برای هر آزمایش نتایج زیر حاصل شده است:

در آزمایش‌های ۱، ۲ و ۳ از قطر نازل ۰/۵ میلی‌متر، سرعت ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۰/۱۵ و ۰/۳ میلی‌متر استفاده شده است. به طور میانگین مقدار خطای اندازه‌گیری شده برای ستون‌ها از صفر (۰) درصد کمترین تا ۳/۵ درصد بیشترین به دست آمده است. همچنین برای استوانه‌ها و دایره‌ها درصد خطای اندازه‌گیری شده از ۰/۱ درصد کمترین تا ۱۳/۷۵ درصد بیشترین مشاهده گردیده است. برای آزمایش‌های ۴، ۵ و ۶ از قطر نازل ۱ میلی‌متر، سرعت ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر بر ثانیه و



ضخامت لایه ۰/۱۵ و ۰/۳ میلی‌متر استفاده شده است، مقدار خطای اندازه‌گیری شده برای ستون‌ها از ۰/۲ درصد کمترین تا ۳/۹۲ درصد بیشترین به دست آمده است. همچنین برای استوانه‌ها و دایره‌ها درصد خطای اندازه‌گیری شده از ۱/۲۵ درصد کمترین تا ۱۰۰ درصد بیشترین مشاهده گردیده است. با توجه به اینکه قطر کوچک‌ترین استوانه ۴ میلی‌متر و اندازه قطر نازل ۱ میلی‌متر است استوانه به صورت توپر چاپ شده است. در آزمایش ۷ از قطر نازل ۰/۳ میلی‌متر، سرعت ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۰/۱۵ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار خطای اندازه‌گیری شده برای ستون‌ها از صفر (۰) درصد کمترین تا ۰/۵ درصد بیشترین به دست آمده است. همچنین برای استوانه‌ها و دایره‌ها درصد خطای اندازه‌گیری شده از ۰/۲ درصد کمترین تا ۲/۷۵ درصد بیشترین مشاهده گردیده است. با توجه به خطاهای اندازه‌گیری شده برای دقت بیشتر قطعه چاپ شده مشاهده می‌گردد که با انتخاب قطر نازل کوچک‌تر، ضخامت لایه کمتر و سرعت چاپ کمتر دقت قطعه چاپ شده بیشتر می‌شود. اما مدت زمان چاپ نیز افزایش می‌یابد که با توجه به دقت مورد نیاز برای قطعه چاپ شده باید این پارامترها تنظیم گردند. برای بخش دایره‌ها در این آزمایش‌ها با تنظیمات متوالی از ۱۴/۵ درصد به ۲/۷۵ درصد رسیده که این نشانگر ۱۱/۷۵ درصد بهبود می‌باشد.

مراجع

- [1] Alexander, A. E., Wake, N., Chepelev, L., Brantner, P., Ryan, J., Wang, K. C., (2021), A guideline for 3D printing terminology in biomedical research utilizing ISO/ASTM standards, 3D Printing in Medicine 7(1): pp 1-6.
- [2] Lee, J. Y., Nagalingam, A. P., Yeo, S. H., (2021), A review on the state-of-the-art of surface finishing processes and related ISO/ASTM standards for metal additive manufactured components, Virtual and Physical Prototyping 16(1): pp 68-96.
- [3] Groover, M. P., (2020), Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, New York: John Wiley & Sons.
- [4] Cheraghpour, F., Farzad, F., Shahbabai, M. Shahabian Alashti, M. R., (2017), Farat1: an Upper Body Exoskeleton Robot, In 2017 5th RSI IEEE International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), pp 463-468.
- [5] Milewski, J.O., (2017), Additive manufacturing metal, the art of the possible, Springer International Publishing.
- [6] Hiemenz, J., (2011), 3D printing with FDM: How it Works, Stratasys Inc.
- [7] Paetzold, R., Coulter, F. B., Singh, G., Kelly, D. J., O'Carbhaill, E. D., (2022), Fused filament fabrication of polycaprolactone bioscaffolds: Influence of fabrication parameters and thermal environment on geometric fidelity and mechanical properties, Bioprinting Vol. 27.
- [8] Bourell, D. L., Frazier, W. E., Kuhn, H. A., Seifi, M., (2020), ASM Handbook: Additive Manufacturing Processes, ASM International.
- [9] Fabacademy, (2019), 3D scanning and Printing, Accessed on 15 May 2019, <https://fabacademy.org/2019/labs/zoi/students/jorge-correa/assignment-6.html>.