

بررسی تجربی کیفیت و مدت زمان چاپ بدون تکیه گاه با دستگاه چاپگر FDM سه بعدی پنج درجه آزادی بر پایه مکانیزم موازی

مهران محبوب خواه*
 استاد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، mahboobkhah@tabrizu.ac.ir
 فرهاد خبازی براب
 دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، fkhabbazi@gmail.com
 سینا اخباری
 دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s_akhbari@tabrizu.ac.ir

چکیده

مدل سازی رسوب ذوبی (FDM) امروزه به عنوان پیشروترین روش ساخت افزایشی به جهت در دسترس بودن و داشتن قابلیت ساخت قطعات پیچیده و با استحکام نسبتاً مناسب، کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده است. برای چاپ برخی از شکل‌های پیچیده به ساختار تکیه‌گاه نیاز است. ساختارهای تکیه‌گاهی با استفاده از درجات آزادی حرکتی بیشتر از سه محور مثلاً با پنج محور، قابل حذف می‌باشند. برای نیل به این هدف، ساخت و تجهیز چاپگر پنج درجه آزادی با استفاده از ربات دلتا انجام و کنترلر مناسبی برای سازگاری با فرامین و دستورات متناسب با نرم‌افزارهای متداول چاپگرهای سه‌بعدی توسعه داده شده است. همچنین برای تولید جی‌کد پنج‌محور، از نرم‌افزار زیمنس NX استفاده شده است. در چاپ یک قطعه نمونه، پارامترهایی مانند زمان، وزن و صافی سطح ماده مصرفی قطعات مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری صافی سطح قطعه نمونه نشان داد که روش پنج‌محور، بدلیل نظم موجود در لایه‌ها، از زبری سطح پائینتری به میزان حداقل ۱۰۰٪ برخوردار است. همچنین با برتری زمانی روش چاپ پنج‌محور، سرعت چاپ برای یک نمونه منتخب، به ترتیب ۶۲٪ و ۱۹۰٪ نسبت به حالت سه‌محور بدون تکیه‌گاه و باتکیه‌گاه بیشتر است. در خصوص ماده مصرفی نیز، بدلیل عدم استفاده از تکیه‌گاه در روش پنج‌محور، ۶۸٪ مواد کمتری مصرف می‌شود. همچنین نتایج تست کشش روی قطعات نمونه چاپ شده برتری ۴٪ و ۱۱٪ روش چاپ پنج‌محور را به ترتیب نسبت به روش سه‌محور بدون تکیه‌گاه و باتکیه‌گاه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: چاپگر سه‌بعدی پنج درجه آزادی، فرآیند FDM، مکانیزم موازی، نمونه‌سازی سریع، زیمنس NX، چاپ بدون تکیه‌گاه.

Experimental investigation of the quality and time of supportless printing by 5Dof FDM 3D-printer based on parallel mechanism

M. Mahboubkhah
 F. Khabazi Barab
 S. Akhbari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The Fused Deposition Modeling (FDM) process has nowadays become the leading method of additive manufacturing due to its accessibility and ability to produce complex parts with relatively good strength, gaining special significance. For printing some complex shapes, support structures are needed. Support structures can be eliminated using additional degrees of freedom of movement beyond the standard three axes, such as five-axis systems. To achieve this goal, a 5-Dof printer was built and equipped using a delta robot, along with an appropriate controller developed to be compatible with commands and instructions commonly used in 3D printer software. Additionally, Siemens NX software was used to generate five-axis G-code. In a sample part print, parameters such as time, weight, and surface finish and consumable material of the parts were compared. The results of measuring the surface roughness of the sample piece showed that the five-axis method, due to the order in the layers, has a lower surface roughness of at least 100%. Also, with the time advantage of the five-axis printing method, the printing speed for a selected sample is 62% and 190% higher than the three-axis mode without support and with support, respectively. Regarding the consumable material, due to the lack of support in the five-axis method, 68% less material is consumed. Also, the tensile test results on the printed sample parts showed a 4% and 11% superiority of the five-axis printing method over the three-axis method without support and with support, respectively.

Keywords: 5-Dof 3D Printer, FDM Method, Parallel Mechanism, Rapid Prototyping, Siemens NX, supportless printing.

مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM) به عنوان پیشروترین روش ساخت افزایشی به جهت در دسترس بودن و داشتن قابلیت ساخت قطعات پیچیده با استحکام نسبتاً مناسب، کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده است [۱].

روش لایه‌نشانی ذوبی یکی از روش‌های بسیار ساده و در دسترس می‌باشد که برای شناخت متغیرها و تنظیمات فرایند تولید آن، تحقیقات بسیاری در حال اجرا می‌باشد. اگرچه این چاپگرها دارای ساختاری ساده و عملکرد آسان هستند، ولی استفاده از آن‌ها مشکلاتی

۱- مقدمه

تولید افزودنی یا چاپ سه بعدی از زمان شروع آن در دهه ۱۹۸۰ به طور مداوم رشد کرده است. با بررسی مقالات محققین و جستجو در روش‌های ساخت پیشرفته، اهمیت حرکت و توجه به این زمینه کاملاً مشهود می‌شود. در طول سال‌های اخیر، چندین فرآیند ساخت افزایشی اختراع، معرفی و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که از این میان،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

دارد. یکی از این مسائل نیاز به استفاده بسیار زیاد از مواد تکیه‌گاهی برای ساخت شکل‌های پیچیده است. استفاده از مواد تکیه‌گاهی، باعث افزایش زمان فرآیند و افزایش هزینه ساخت به دلیل استفاده از آن‌ها به عنوان تکیه‌گاه در فرآیند ساخت می‌شود. یکی دیگر از مشکلات استفاده از مواد و سازه‌های تکیه‌گاهی، باقی ماندن اثرات مخرب زدودن قسمت‌های تکیه‌گاهی بر روی سطح قطعه تولید شده و کاهش کیفیت سطح نهائی می‌باشد. ساختارهای تکیه‌گاهی، با تغییر جهت میز یا نازل در حین ساخت لایه به لایه قطعات، قابل حذف هستند. ولی این کار مستلزم استفاده از درجات آزادی حرکتی بیشتر از سه محور و دستگاه چاپگر دارای درجات آزادی چهار، پنج و یا شش محور می‌باشد [۲] و [۳]. همچنین ربات‌های موازی بدلیل ساختار مستحکم و صلب، دارای دقت و سفتی بالاتری نسبت به مکانیزم‌های سری یا دکارتی می‌باشند و استفاده از آنها می‌تواند دقت ساخت قطعات را افزایش دهد [۴] و [۵].

در کارهای مشابهی که در زمینه این تحقیق انجام شده، سونگ و همکارانش [۶] یک چاپگر سینماتیک کم هزینه برای چاپ چند جهته پیشنهاد کردند که در آن بهبود فرآیند چاپ با کیفیت ابعادی و هندسی قطعات مختلف نشان داده شده است. فیور و همکارانش [۷] بهینه‌سازی یک ربات پنج درجه آزادی با سینماتیک موازی برای تولید مواد افزودنی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها سینماتیک ربات را مورد مطالعه قرار داده و از یک الگوریتم، برای بهینه‌سازی پارامترهای دستگاه استفاده کردند. چاپگر سه‌بعدی پنج‌درجه آزادی آنها، امکان تولید کارآمد و مقرون به صرفه قطعات فلزی را فراهم می‌کند. لی و همکارانش [۸] یک الگوریتم جدید برای اسلایس مدل و تولید افزودنی ارائه کرده‌اند که برای چاپگرهای بیش از سه‌محور طراحی شده است. الگوریتم آنها، روش جدید اسلایس قطعات پیچیده بدون نیاز به تکیه‌گاه را ایجاد می‌کند که اثر پله‌ای در آن‌ها، به طور گسترده کاهش می‌یابد. گراتل [۹] با افزودن یک پلتفرم روی چاپگر سنتی دکارتی، یک سیستم پنج‌محور جهت چاپ پنج‌بعدی طراحی و مورد استفاده قرار داده است. در این تحقیق روی اثر پلکانی مطالعه شده است. چاپگر پیشنهادی توسط آنها، پتانسیل بالایی در حل و حذف مشکل تکیه‌گاه دارد. ژیان و همکارانش [۱۰]، یک روش را که امکان تغییر جهت قطعه در حین ساخت با استفاده از یک دستگاه پنج محور را فراهم می‌کند، پیشنهاد دادند. آن‌ها همچنین الگوریتم‌هایی برای تعیین زیر حجم‌ها، جهت‌گیری‌ها و ترتیب ساخت که از اجزای اصلی برنامه فرآیند تولید است را نیز ارائه داده‌اند. مزیت دیگر این روش، ارزیابی امکان ساخت قطعه، به روشی بدون نیاز به تکیه‌گاه است. لی و جی [۱۱] با ادغام یک چاپگر معمولی سه‌محور و یک میز چاپ دو محور، سیستم پنج‌محور افزایشی را پیشنهاد کردند. علاوه بر این، یک الگوریتم اسلایس یا پارتیشن‌بندی خودکار برای ساخت ویژگی‌های برجسته قطعه مورد نظر برای چاپ در کار آنها توسعه داده شده است. اشاق و همکارانش [۱۲] یک پلتفرم بازوی رباتیک افزایشی برای ساخت قطعات پلاستیکی توسعه دادند و آن را با موفقیت برای چاپ چندمحور به کار بردند. ریگر و همکارانش [۱۳] یک ربات شش محور برای تولید قطعات پیچیده، طراحی کردند و امکان تغییر ایستگاه رباتیک چاپ سه‌بعدی را با تغییر جهت محور اکستروژن، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در پژوهش آن‌ها نشان داده شده که ایستگاه رباتیک چاپ سه‌بعدی، توانایی حذف نیاز به تکیه‌گاه را در سطوح آزاد دارد، اما جنبه‌های دیگر (به عنوان

مثال، کیفیت سطح) مورد بررسی قرار نگرفته است. عیسی و همکارانش [۱۴] یک دستگاه مکانیزم موازی کم‌هزینه برای بررسی اثر پلکانی ایجاد کردند. این مکانیزم یک ربات دلتا با یک میز دو درجه آزادی می‌باشد که در این مقاله نیز از ساختار سخت‌افزاری مشابه استفاده شده است. جیان و همکارانش [۱۵] با توسعه سیستم کنترل چاپگر سه‌بعدی بر اساس میکروکنترلر آردوینو، به مسائل مربوط به چاپگرهای سه‌بعدی معمول، مانند دقت کم، قیمت بالا و سرعت کم چاپ پرداخته‌اند. حاصل کار آنها توسعه موفقیت‌آمیز یک محیط یکپارچه بر روی میکروکنترلگر آردوینو یونو و یک رابط کاربری گرافیکی بر روی کامپیوتر صنعتی با استفاده از نرم‌افزار کیوتی (Qt) است که امکان کنترل، افزایش بازدهی انرژی و تنظیم پارامترها را فراهم می‌کند.

با توجه به اولویتهایی که در حوزه روش ساخت افزودنی FDM در مراجع مشهود است، یکی از چالش‌های بزرگ، توسعه کنترلگر مناسب و ارزان قیمت مخصوص چاپگرهای بیش از سه‌محور و همچنین نیاز به تولید جی‌کدهای حرکتی پیچیده و بهینه بیش از سه‌محور می‌باشد. در این مقاله به هر دو مورد پرداخته شده و برای اولین بار از یک کنترلگر آردوینو ساده برای اعمال حرکت و کنترل پنج محور حرکتی به همراه یک درایو تغذیه فیلامنت استفاده شده است. همچنین برای اولین بار از نرم‌افزار زمینس NX برای ایجاد استراتژی حرکتی پنج‌محور با روش FDM استفاده شده است. همچنین تلاش شده تا امکانات سخت‌افزاری، شامل ساخت و تجهیز چاپگر پنج درجه آزادی با استفاده از مکانیزم موازی و ربات دلتا توسعه داده شود. برای بررسی و مقایسه کارایی روش چاپ پنج‌محور نسبت به روش متداول سه‌محور، یک قطعه نمونه زانویی و خم‌دار که امکان چاپ آن بدون نیاز به تکیه‌گاه توسط روش چاپ پنج‌محور وجود دارد طراحی و با روش‌های متعددی چاپ شده است. برای مطالعه تأثیر پارامترهای ورودی متعدد تأثیرگذار در کیفیت خروجی قطعات چاپ شده، حالت‌ها و ورودی‌های مختلفی برای چاپ قطعه نمونه در نظر گرفته شده و قطعات متعددی با دستگاه چاپگر مذکور ساخته شده است. از آنجا که استراتژی چاپ به صورت سه یا پنج محور در چاپ قطعات، کاملاً در صافی سطح، سرعت چاپ، مواد مصرفی و استحکام کششی قطعه ساخته شده موثر هستند، قطعانی که با آنها بتوان این خروجی‌ها را مطالعه کرد، چاپ شده است. پارامترهایی مانند زمان چاپ، وزن ماده مصرفی، صافی سطح و استحکام کششی قطعات ساخته شده مورد مطالعه قرار گرفته و مقایسه شده است.

۲- مواد و روشها

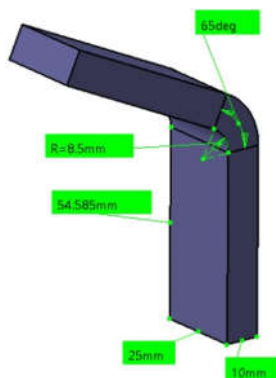
۲-۱ - مشخصه‌های سازه‌ای چاپگر دلتا

چاپگر مورد استفاده در این تحقیق، از نوع چاپگر دلتا می‌باشد (شکل ۱). این چاپگر دارای سه محور حرکت خطی X ، Y و Z در هد چاپگر و دو درجه آزادی دورانی حول محور Y و Z در میز دستگاه که قطعه‌کار روی آن قرار می‌گیرد، است. در واقع با حرکت سه بازوی متوازی‌الاضلاع که از یک طرف به سکوی متحرک و از طرف دیگر به لغزنده‌های روی ستون‌ها متصل هستند، حرکت دکارتی و خطی سکوی متحرک شکل می‌گیرد. همچنین ترکیب حرکات دورانی حول محور Y و Z میز، قابلیت حرکت در پنج‌محور را فراهم می‌کند. کنترلرهای

۲-۴- طراحی قطعه نمونه و جی‌کد چاپ آن در نرم-

افزارها

برای مقایسه تفاوت عملکرد چاپگر سه‌محور و پنج‌محور، یک مدل مطابق شکل ۲ طراحی شده و با حالت‌های مختلف، مطابق جدول ۱ و شکل ۳، ۴ و ۵ چاپ شده است. پرشدگی داخلی قطعه در تمامی حالات ۴۵٪ انتخاب شده است. همچنین دمای چاپ، ۲۰۰ درجه سانتیگراد و سرعت چاپ در تمام حالت‌ها، برای یکسان بودن و مقایسه‌پذیری ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

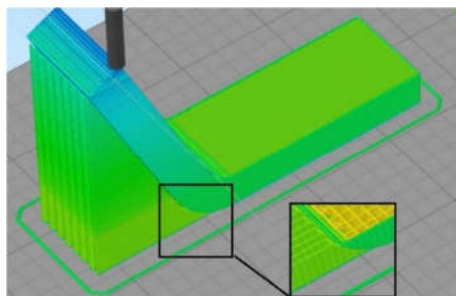


شکل ۲- نمونه قطعه طراحی شده در نرم‌افزار کتیا

جدول ۱- حالت‌های مختلف چاپ قطعه

حالت	درجه آزادی	نوع چاپ
۱	سه‌محور	با تکیه‌گاه
۲	سه‌محور	خوابیده
۳	پنج‌محور	بدون تکیه‌گاه

همچنین برای یکسان‌سازی متغیرهای چاپ در دو نرم‌افزار متفاوت استفاده شده (Siemens NX & Simplify 3D) در این تحقیق، یک قطعه نمونه مکعب با ابعاد مشخص چاپ و وزن شده است. سپس متغیرهای چاپ در نرم‌افزار Siemens NX طوری تنظیم شده که وزن پرشدگی ۴۵٪ آن معادل تنظیمات نرم‌افزار Simplify 3D بدست آید.



شکل ۳- مسیر حرکت چاپگر در قطعه با تکیه‌گاه (سه‌محور)

Mega265 با سیستم عامل آردینو و نرم‌افزار مارلین متن‌باز، قابلیت کنترل حرکتی رباتهای دلتا و همزمان میزهای دورانی را دارند، که در این تحقیق هم از آنها استفاده شده است. فضای کاری دستگاه چاپگر دارای ۲۵۰ میلی‌متر قطر میز و ۲۵۰ میلی‌متر ارتفاع کاری چاپگر می‌باشد. تفکیک‌پذیری حرکتی محورها نیز در حد یک صدم میلی‌متر با استفاده از موتورهای پله‌ای تأمین می‌شود.



شکل ۱- چاپگر پنج درجه آزادی مورد استفاده در این تحقیق

۲-۲- مشخصه‌های سازه‌ای چاپگر دلتا

ماده مصرفی فیلامنت در چاپگر سه‌بعدی که از روش FDM برای ساخت استفاده شده، در این تحقیق از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) ساخت شرکت Eny cubic انتخاب شده است. قطر فیلامنت مورد استفاده ۱/۷۵ و قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر است.

۲-۳- نرم‌افزارهای مورد نیاز چاپگر سه‌بعدی

چندین نوع نرم‌افزار برای مراحل مختلف فرآیند چاپ سه‌بعدی نیاز است. این نرم‌افزارها شامل نرم‌افزار طراحی به کمک کامپیوتر (CATIA)، نرم‌افزار اسلایسر سیمپلیفای تری‌دی و زیمنس NX (Siemens NX & Simplify 3D) می‌باشد. از نرم‌افزار کد برای طراحی و مدل‌سازی قطعه و تهیه فرمت STL و از نرم‌افزار اسلایسر برای تولید جی‌کد و مسیر حرکت نازل چاپگر استفاده شده است. سیمپلیفای تری‌دی، جزء اسلایسرهای چاپ سه‌بعدی محبوب است که عمدتاً برای چاپگرهای سه‌محور طراحی شده است. همچنین نرم‌افزار NX توسط صنایع دیجیتال زیمنس توسعه یافته است، که به طور خاص برای تولید افزایشی، از تولید جی‌کد پنج‌محور پشتیبانی می‌کند و امکان ایجاد قطعات پیچیده و با کیفیت بالا با استفاده از فرآیندهای افزودنی چند محور را فراهم می‌کند. در این تحقیق برای تولید جی‌کد سه‌محور از سیمپلیفای تری‌دی و برای پنج‌محور از زیمنس NX استفاده شده است.



شکل ۹- نمونه قطعات چاپ شده به سه روش

۲- ۶- انجام آزمایش تجربی کشش

برای بررسی و مقایسه کیفیت استحکام و تحمل نیرویی قطعات مختلفی که با روش‌های مختلف چاپ، مطابق جدول ۱ تولید شده‌اند، آزمایش تست تجربی با دستگاه تست کشش مطابق شکل ۱۰ انجام شده است. مطابق این شکل، یک فیکسچر مخصوص که بتواند قطعه زانویی ساخته شده را دقیقاً در راستای عمودی بکشد و مقاومت کششی قطعه خم‌دار و تحمل نیرویی آن را اندازه‌گیری کند، ساخته شده و در فک‌های دستگاه تست کشش استفاده شده است. در این شکل همچنین مرحله اتمام تست کشش که منجر به ایجاد ترک و شکست قطعه شده است نشان داده شده است.

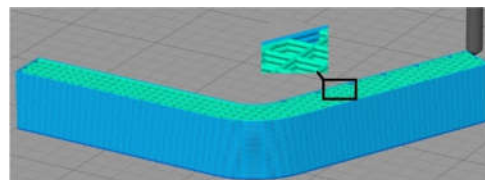


شکل ۱۰- گلوبی شدن در تست کشش نمونه زانویی

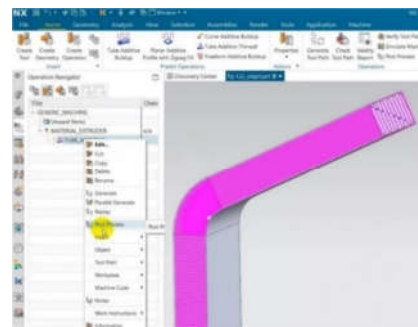
۳- نتایج

۳- ۱- مدت زمان چاپ و وزن مواد مورد استفاده

به عنوان معیاری از مقایسه انتخاب متغیرهای چاپ، وزن قطعات و زمان چاپ آن‌ها اندازه‌گیری شده و در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است. در حین فرایند چاپ، زمان چاپ برای هر مدل با استفاده از کرنومتر اندازه گرفته شده است. همچنین پس از پایان چاپ هر مدل، جرم آن با استفاده از ترازوی دیجیتال (دقت ۰/۱ گرم) اندازه‌گیری شده است.



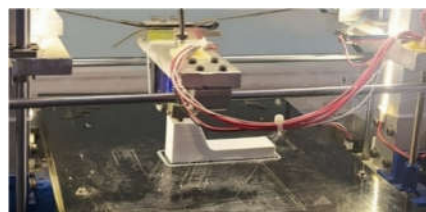
شکل ۴- مسیر حرکت چاپگر در قطعه خوابیده (سه‌محور)



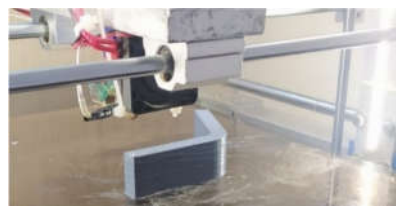
شکل ۵- مسیر حرکت چاپگر در قطعه بدون تکیه‌گاه (پنج‌محور)

۲- ۵- چاپ قطعه در چاپگر سه و پنج‌محور

پس از طراحی مسیر حرکت ابزار و جی‌کدها، مراحل چاپ قطعه نمونه، مطابق سه حالت ذکر شده در جدول ۱ با دستگاه چاپگر دکارتی سه‌محور و دستگاه چاپگر پنج‌محور دلتا مطابق شکل‌های ۶، ۷ و ۸ انجام شده است. نمونه قطعات چاپ شده برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد مطالعه در شکل ۹ نمایش داده شده است.



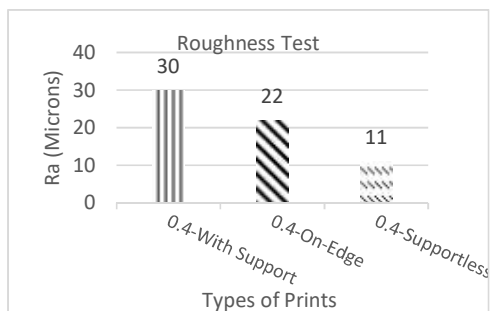
شکل ۶- چاپ قطعه نمونه در حالت ایستاده با تکیه‌گاه (سه‌محور)



شکل ۷- چاپ قطعه نمونه در حالت خوابیده (سه‌محور)



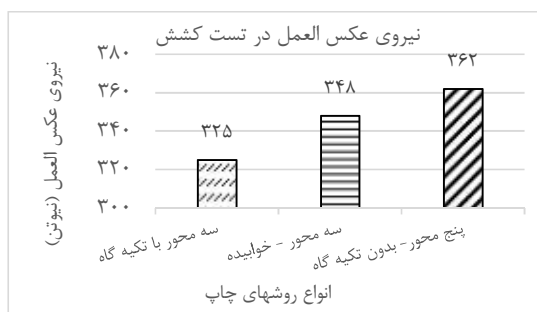
شکل ۸- چاپ قطعه نمونه بدون تکیه‌گاه (پنج‌محور)



شکل ۱۳- میانگین زبری سطح (Ra) اندازه‌گیری شده قطعات

۳-۳- نتایج آزمایش تجربی کشش

بطوریکه گفته شد، برای بررسی استحکام و تحمل نیروی قطعات چاپ شده در حالات مختلف تحت کشش و مقایسه شرایط بهینه چاپ از بین حالت‌های مختلفی که در این مقاله برای چاپ قطعه زانویی انتخاب شده است، آزمایش‌های کشش متعددی انجام شده است. بعنوان نمونه، نتایج آزمایش‌های تست کشش با توضیحاتی که قبلاً برای نمونه‌های زانویی داده شد، برای حالت‌های مختلف چاپ ۱۴ نمایش داده شده است.

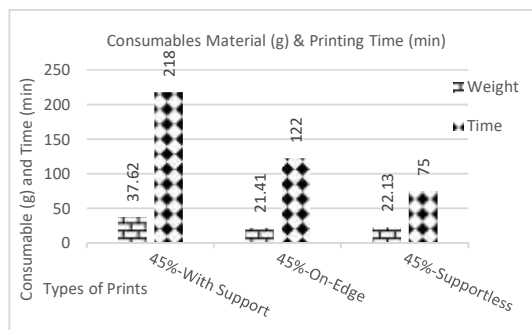


شکل ۱۴- نیروی عکس العمل قطعات در تست خمشی تجربی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش چاپ یک قطعه بعنوان نمونه به روش چاپ سه و پنج‌محور، در سه حالت مختلف و روش لایه‌نشانی ذوبی طراحی و ساخته شده است و از دیدگاه‌های کیفی مختلفی بعنوان نتایج خروجی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین امکان استخراج موفق جی‌کدهای پنج‌محور از نرم‌افزار زیمنس NX و ساخت آن‌ها توسط دستگاه چاپگر پنج‌محور با موفقیت فراهم شده است. با مقایسه پارامترهای خروجی قطعات چاپ شده به روش سه و پنج‌محور، نظیر زمان چاپ، وزن ماده مصرفی و کیفیت صافی سطح بعنوان مهمترین عوامل تولیدی قطعه، نتایج این بررسی‌ها به شرح ذیل خلاصه شده است.

- مصرف مواد در ساخت قطعات بدون تکیه‌گاه پنج‌محور تقریباً معادل قطعات خوابیده سه‌محور بوده و این قطعات حدود ۷۰٪ مصرف مواد کمتری نسبت به حالت باتکیه‌گاه سه‌محور دارند. علت مصرف مواد بیشتر در حالت باتکیه‌گاه سه‌محور، مربوط به مصرف مواد تکیه‌گاهی است، که البته بعد از ساخت، از قطعه اصلی جدا می‌شوند. همچنین در دو حالت متفاوت سه‌محور، مصرف مواد تقریباً یکسان است.



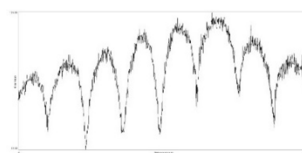
شکل ۱۰- مدت زمان چاپ و وزن قطعات چاپ شده

۳-۲- صافی سطح قطعات چاپ شده

اندازه‌گیری‌های صافی سطح در قسمت‌های حساس قطعه زانویی و خم‌دار قطعات چاپ شده، با سه روش مورد بررسی در این مقاله، انجام گرفته است. با توجه به اینکه امکان اندازه‌گیری صافی سطح با دستگاه‌های متداول تماسی وجود ندارد، اندازه‌گیری توسط دستگاه میکروسکپ دیجیتال انجام شده است. تصویر پروفیل سطح قطعات چاپ شده توسط میکروسکپ دیجیتالی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. محاسبات پارامتر زبری سطح (Ra) توسط نرم‌افزار Image J انجام شده است. برای محاسبه مقدار زبری سطح از استاندارد ISO-4288 استفاده شده است. همچنین، مطابق این استاندارد از کات‌آف (Cut-off) ۸ میلی‌متر و فیلتر ایزو استفاده شده است. شکل ۱۲ یک نمونه از تصویر آنالیز شده با این نرم‌افزار را نشان می‌دهد. نتایج میانگین زبری سطوح اندازه‌گیری شده از سطح قطعات، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی از سطح قطعه چاپ شده



شکل ۱۲- پروفیل اندازه‌گیری شده سطح قطعه چاپ شده

- [3] Crump, Apparatus and method for creating three-dimensional objects. U.S. Patent No. 5,121,329. (n.d.). 1992.
- [4] محبوب‌خواه، م. دانشمند، ب. تحلیل نیرویی ربات ماشین ابزارموازی چهار درجه آزادی، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۱، ۲۳۸-۲۲۹، ۱۳۹۶.
- [5] پدram مهر، س. محبوب‌خواه، م. تحلیل سینماتیک و دینامیک معکوس مکانیزم استوارت، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۳۹، ش. ۲، ۶۷-۷۲، ۱۳۸۸.
- [6] Song X, Yayue P, Yong Ch. Development of a low-cost parallel kinematic machine for multidirectional additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137.2; 2015: 021005
- [7] Fiore E, Hermes G, Luca S. Dimensional synthesis of a 5-DOF parallel kinematic manipulator for a 3d printer. 2015 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM). IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/REM.2015.7380372>
- [8] Li Yamin, et al. multi-axis support-free printing of freeform parts with lattice infill structures. *Computer-Aided Design* 133, 2021: 102986.
- [9] Grutle, ØK., 2015. 5-axis 3D Printer (Master's thesis).
- [10] Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams CB., Wang, CC., Shin YC., Zhang S., & Zavattieri PD(). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89, 2015.
- [11] Lee K, Jee H. Slicing algorithms for multi-axis 3-D metal printing of overhangs. *J Mech Sci Technol* 2015; 29:5139-44.
- [12] Ishak I, Fisher J, Larochelle P. Robot arm platform for additive manufacturing: multi-plane printing. *Proceedings of the 2016 Florida conference on recent advances in robotics*. 2016.
- [13] Rieger M, Johnen B, Kuhlenkotter B. Analysis and development of the fused layer manufacturing process using industrial robots. *ISR 2016 47st International symposium on robotics: proceedings of VDE*. 2016. p. 1-8.
- [14] Isa MA, Lazoglu I. Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018; 50, 69-80.
- [15] Jian L I. U., Jia-li TANG, and Chen-Yu DAI. Design of DLP 3D Printer Control System Based on Arduino. 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). IEEE, 2020

- در شرایط یکسان از نظر پرشدگی داخلی قطعات، سه حالت مختلف، به ترتیب حالت بدون تکیه‌گاه پنج‌محور، خوابیده سه‌محور و باتکیه‌گاه سه‌محور دارای کمترین زمان لازم برای چاپ می‌باشند. روش بدون تکیه‌گاه پنج‌محور به ترتیب ۶۲٪ و ۱۹۰٪ زمان کمتری نسبت به حالت‌های خوابیده سه‌محور و باتکیه‌گاه سه‌محور صرف می‌کند.

- ذکر این نکته در مورد سرعت چاپ قطعات، بسیار حائز اهمیت است که دستگاه چاپگر پنج‌محور دلتا به دلیل نوع ساختار، سرعت حرکتی حداقل دو برابر بیشتر نسبت به چاپگر دکارتی دارد. ولی در این مقاله برای مقایسه یکسان سایر متغیرهای چاپ، سرعت چاپ قطعات در تمام مراحل به صورت یکسان در نظر گرفته شده است.

- قطعات دارای تکیه‌گاه، به دلیل جدا شدن قسمت تکیه‌گاهی از قسمت اصلی، معمولاً با کاهش کیفیت صافی‌سطح مواجه می‌شوند. همچنین قطعات چاپ شده به روش پنج‌محور به دلیل امکان تنظیم لایه‌ها و عمود قرار گرفتن نازل چاپ بر سطح، عموماً صافی‌سطح بهتری را دارند. بعنوان نمونه، میزان صافی‌سطح قسمت مشخصی از قطعات چاپ شده با روش‌های مختلف، در چاپ پنج‌محور، سه‌محور خوابیده و سه‌محور با تکیه‌گاه، به ترتیب کمترین زبری را دارند. از این نظر چاپ به روش پنج‌محور دارای اولویت بالاتری به ترتیب به میزان ۱۰۰٪ و ۱۷۲٪ می‌باشد.

- همچنین نتایج تست کشش روی قطعات نمونه چاپ شده برتری ۴٪ و ۱۱٪ روش چاپ پنج‌محور را به ترتیب نسبت به روش سه‌محور بدون تکیه‌گاه و باتکیه‌گاه نشان داد.

در نهایت، با جمع‌بندی فاکتورهایی که در زیر به آنها اشاره می‌شود و با توجه به پیشرفت‌های مشابه در روش ماشینکاری، می‌توان آینده بسیار روشنی را برای چاپ به روش بیش از سه‌محور برای قطعات پیچیده متصور شد. بنابراین سرمایه‌گذاری در این حوزه‌ها، می‌تواند منفعت‌های فراوانی برای صنایع به ارمغان بیاورد. این فاکتورها به قرار زیر هستند:

- ساخت یک ربات چاپگر پنج‌محور، خیلی گران نیست و در مقایسه با چاپگر مرسوم دکارتی، نزدیک ۴۰٪ باخاطر تجهیزات بیشتر افزایش هزینه ساخت دارد.

- همانطوریکه در این مقاله مشاهده شد، سرعت چاپ، کیفیت سطحی، صافی‌سطح و مقدار ماده مصرفی به مراتب در روش پنج‌محور نسبت به روش سه‌محور بهتر است و حتی با طراحی جی‌کد مناسب در روش پنج‌محور، مشاهده شد که می‌توان استحکام کششی را نیز باخاطر نظم بکار رفته در رشته‌های تشکیل دهنده قطعه، افزایش داد.

- بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری در نسخه‌های نهایی خود به استحصال جی‌کد برای قطعات پیچیده با تعداد محورهای بیش از سه‌محور پرداخته‌اند و این نشان می‌دهد که اقبال برای استفاده از این روش‌ها، روزبه‌روز افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Vlachou M, Siamidi A, Protopapa C. 3D-printing technologies for pharmaceutical applications. In Elsevier eBooks 2025; 29-46. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23645-7.00002-7>
- [2] Enyan M, Amu-Darko, JNO, Issaka E, Abban, OJ. Advances in fused deposition modeling on process, process parameters, and multifaceted industrial application: a review. *Engineering Research Express*, 2024b; 6(1), 012401. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad32f6>.