

Experimental and FEM Investigation of the Mechanical Strength of Parts Printed with a Five-Degree-of-Freedom 3D FDM Printer Based on a Parallel Mechanism

Farhad Khabbazi Barab, Mehran Mahboubkhah* 

Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: June 30, 2025

Revised: August 26, 2025

Accepted: September 07, 2025

ePublished: October 24, 2025

ABSTRACT

In recent years, fused deposition modeling (FDM) has gained widespread use as one of the most advanced additive manufacturing methods due to its availability and ability to manufacture complex parts with relatively good strength. One of the important research challenges in this field is to increase the strength of parts by appropriately selecting manufacturing variables and, in particular, choosing the arrangement of manufacturing layers by utilizing printing capabilities beyond three axes. In this paper, the aim is to print and investigate its parameters with 5-degree-of-freedom (5-Dof) robotic printers. For this purpose, a 5-Dof printer with a parallel mechanism and a delta robot was built and equipped, and Siemens NX software was used to generate five-axis G-code. To investigate the effect of the directions and arrangement of the filaments used on the quality of printing parts, especially with the five-axis printing method, a knee-shaped sample piece made of polylactic acid (PLA) was selected. Then, the necessary G-codes for printing this part with different methods and different orientations were created with common three-axis and five-axis software (Siemens NX) and printed by three-axis and five-axis printers. Experimental tensile and bending tests were performed on the printed samples and the superiority of about 11.5% and 7% of the five-axis printing method in tensile and bending force tolerance was observed compared to the three-axis method. To study the strength and finite element simulation of printed parts, ANSYS software was used and the results obtained from the analyses were compared with experimental results. The results of the experiments showed that the use of the five-axis printing method increases the tensile and bending strength of the printed part.

Keywords: Parallel Mechanism, Fused Deposition Modelling (FDM), 5-Dof Printing, Finite Element Method, 5-Axes G-Code.

How to cite this article

Khabbazi Barab F, Mahboubkhah M, Experimental and FEM investigation of the mechanical strength of parts printed with a five-degree-of-freedom 3D FDM printer based on a parallel mechanism. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(08):543-553.

*Corresponding author's email: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-0275-4837



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Noncommercial terms.



بررسی تجربی و عددی استحکام مکانیکی قطعات چاپ شده با چاپگر FDM سه بعدی پنج درجه آزادی بر پایه ساز و کار موازی

فرهاد خبازی براب، مهران محبوب خواه*

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در طول سال‌های اخیر، روش لایه‌نشانی ذوبی (FDM)، به جهت در دسترس بودن و داشتن قابلیت ساخت قطعات پیچیده مستحکم نسبتاً مناسب، به عنوان یکی از پیشروترین روش‌های ساخت افزایشی، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. یکی از چالش‌های تحقیقاتی مهم در این حوزه، افزایش استحکام قطعات، بواسطه انتخاب مناسب متغیرهای ساخت و بخصوص، انتخاب آرایش لایه‌های ساخت با بکارگیری قابلیت‌های چاپ بیش از سه محور می‌باشد. در این مقاله، هدف، چاپ و بررسی پارامترهای آن با چاپگرهای رباتیک پنج درجه آزادی می‌باشد. برای این منظور، ساخت و تجهیز چاپگر پنج درجه آزادی با ساز و کار موازی و ربات دلتا انجام و برای تولید جی‌کد پنج‌محور، از نرم‌افزار زیمنس NX استفاده شده است. برای بررسی تاثیر جهات و آرایش رشته فیلامنت‌های مورد استفاده در کیفیت چاپ قطعات، مخصوصاً با روش چاپ پنج‌محور، یک قطعه نمونه زانویی از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)، انتخاب شده است. سپس جی‌کدهای لازم برای چاپ قطعه با روش و جهت‌گیری‌های متفاوت با نرم‌افزارهای متداول سه‌محور و پنج‌محور (زیمنس) ایجاد و توسط دستگاه چاپگر سه و پنج‌محور چاپ شده است. آزمایش‌های کشش و خمش تجربی روی نمونه‌های چاپ شده انجام شده و برتری حدود ۱۱/۵٪ و ۷٪ روش چاپ پنج‌محور در تحمل نیروی کششی و خمشی نسبت به روش سه‌محور مشاهده شده است. برای مطالعه استحکام و شبیه‌سازی اجزاء محدود قطعات چاپ شده، از نرم‌افزار انسیس استفاده و نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها، با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از روش چاپ پنج‌محور، باعث افزایش تحمل نیرویی کششی و خمشی قطعه چاپ شده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ساز و کار موازی، چاپ لایه‌نشانی ذوبی، چاپ پنج درجه آزادی، روش اجزاء محدود، جی‌کد پنج-محور.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

نحوه ارجاع به این مقاله

محبوب‌خواه مهران، خبازی براب فرهاد، بررسی تجربی و عددی استحکام مکانیکی قطعات چاپ شده با چاپگر FDM سه بعدی پنج درجه آزادی بر پایه ساز و کار موازی، مهندسی مکانیک مدرس. ۵۴۳-۵۵۳: ۱۴۰۴:۲۵(۰۸)

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

*شناسه اרקید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0003-0275-4837



۱- مقدمه

روش لایه‌نشانی‌ذوبی یک از روش‌های پرکاربرد و مهم بر پایه اکستروژن است که در حال توسعه، بهبود و پیشرفت است. برنامه‌های کاربردی مدل‌سازی، نمونه‌سازی و ساخت به طور فزاینده‌ای از لایه‌نشانی ذوبی استفاده می‌کنند. در این روش، قطعات سه بعدی به صورت لایه به لایه ایجاد می‌شوند. لایه‌های مدل کد (CAD) با ذوب مواد فیلامنت در یک سر گرمکن به حالت مایع درآمده و سپس به طور انتخابی از طریق نازل که در سر گرمکن قرار دارد رسوب می‌کند و با ادامه این روش و تولید لایه‌های دیگر کل قطعه مورد نظر که نقشه مسیر حرکت آن به چاپگر داده شده است تولید می‌شود [۱]. چاپگرهای سه بعدی معمولاً در دو نوع کارت‌زین و دلتا در صنعت استفاده می‌شوند. سرعت چاپ در چاپگر سه بعدی معمولاً یک چالش بزرگ است و چاپگری که بتواند سرعت چاپ و حرکت بالاتری داشته باشد بسیار مطلوب است. چاپگرهای سه بعدی که در حرکت خود از یک ساز و کار موازی سه محور استفاده می‌کنند، به طوریکه هیچ یک از محورهای حرکتی آنها در راستای حرکت منتجه نیست، به چاپگرهای دلتا معروف هستند. دانشگاه میشیگان پیش‌بینی کرده است که چاپگرهای دلتا به طور کلی جای تمام چاپگرهای کارت‌زین را می‌گیرند. زیرا دارای مزایای قابل توجهی هستند که مهمترین آن سرعت بالای چاپگرهای دلتا است. پیکربندی ربات دلتا برای سرعت بیشتر مناسب است، زیرا نازل چاپگر سه بعدی سبک‌تر بوده و همچنین برای حرکت از یک نقطه به نقطه دیگر از کوتاه‌ترین مسیر استفاده می‌کند [۲]. چاپگرهای پنج‌محور دارای برخی مزایا هستند از جمله، می‌توانند قطعات را با هندسه‌های پیچیده‌تری چاپ کنند، قطعات دارای انحناء و ویژگی‌های پیچیده‌ای که تولید آنها با چاپگر سه‌محور مشکل و یا غیرممکن است و یا برای چاپ نیاز به تکیه‌گاه دارد را می‌توان با چاپگرهای پنج‌محور بدون نیاز به تکیه‌گاه تولید کرد [۳]. قابلیت تنظیم جهت چاپ (به کمک چاپگر پنج محور) می‌تواند به کاهش مشکل اثر پله‌ای کمک کرده و در نتیجه قطعه چاپ شده سطحی صاف‌تر و یکنواخت‌تر داشته باشد [۴]. با استفاده از درجات آزادی اضافی در یک چاپگر سه بعدی پنج‌محور، چاپ قطعات پیچیده با مواد تکیه‌گاهی کمتر و یا به کلی حذف می‌شود، زیرا نازل چاپگر می‌تواند به سطوحی دسترسی داشته باشد و روی سطوحی چاپ کند که در چاپگرهای سه‌محور غیرممکن است. همچنین با بکارگیری این روش می‌توان جهت‌گیری لایه‌های چاپ را طوری تنظیم کرد که استحکام مکانیکی قطعات چاپ شده در بهترین وضعیت ممکن بدست آید. سونگ و همکارانش [۵] 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. ژیاو و همکارانش [۶]، روشی را که امکان تغییر جهت قطعه در حین ساخت با استفاده از یک دستگاه پنج

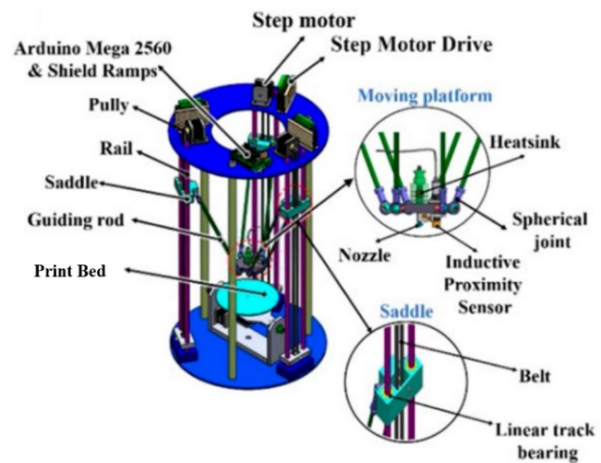
محور را فراهم می‌کند، پیشنهاد دادند. مزیت دیگر کار آن‌ها، ارزیابی امکان ساخت قطعه به روشی بدون نیاز به تکیه‌گاه است. این نتیجه می‌تواند بازخوردی را در مورد قابلیت ساخت قطعه بدون نیاز به تکیه‌گاه به طراح ارائه دهد. آن‌ها برای تأیید اثربخشی الگوریتم-ها، نمونه‌قطعاتی را با استفاده از این روش تولید کرده‌اند. چاپگر پنج‌محور که توسط محقق چینی [۷] به نام سنژن در سال ۲۰۲۰ طراحی شد، شامل یک مکانیزم حرکتی کارت‌زین می‌باشد و درجات دورانی این چاپگر ساده، در کلگی دستگاه چاپگر طراحی شده است. گراتل [۸]، با افزودن یک سکو روی چاپگر سنتی کارت‌زین، یک سیستم پنج‌محور جهت چاپ پنج‌بعدی طراحی و مورد استفاده قرار داده است. در این تحقیق روی اثر پلکانی بررسی شده است. چاپگر پیشنهادی توسط آنها، پتانسیل بالایی در حل و حذف مشکل تکیه‌گاه دارد. عیسی و همکارانش [۹]، یک دستگاه مکانیزم موازی کم‌هزینه برای بررسی اثر پلکانی ایجاد کردند. آنها از چرخش کلگی دستگاه برای افزایش درجات آزادی حرکتی بهره‌برده‌اند. پنتارود [۸] چاپگر پنج‌محوری است که در دانشگاه اسلو ساخته شده است. این دستگاه قابلیت چاپ در پنج‌محور مختلف را دارد و سطوحی با کیفیت بالا و بدون نیاز به ساخت تکیه‌گاه را تولید می‌کند. در این چاپگر از ساختار کارت‌زین استفاده شده است. درحالی که در سازه چاپگر با ساز و کار موازی، قطعات پیچیده، با سرعت بالاتری می‌توانند ساخته شوند که این شیوه، باعث کاهش هزینه تولید می‌شود. نوع و کاربردهای دیگری از این نوع ربات موازی پنج‌محور نیز توسط محبوب‌خواه و همکارانش [۱۰ و ۱۱] بعنوان چاپگر لایه‌نشانی-ذوبی و ماشین فرز بکارگرفته شده است. در کار مشابهی به مقاله حاضر، فتحی و همکارانش [۱۲]، با استفاده از یک نوع چاپگر جدید لایه‌نشانی ذوبی پنج درجه آزادی، قطعات مختلفی با روش پنج محور چاپ و از نظر دقت‌های ابعادی، صافی‌سطح و سرعت چاپ مورد مقایسه و مطالعه قرار داده‌اند. در مقاله مذکور، بر روی استحکام مکانیکی قطعات چاپ شده، اطلاعاتی ارائه نشده است. در این مقاله، ضمن استفاده از یک چاپگر متفاوت پنج درجه آزادی و در تکمیل همان تحقیق، به بررسی نحوه تولید جی‌کدهای پنج-محور برای چاپ یک قطعه زانویی و روش چاپ آن با دستگاه چاپگر پنج‌محور پرداخته شده و هدف مطالعه، استفاده از این روش چاپ و مقایسه آن با روشهای چاپ متداول سه‌محور، بخصوص از نظر استحکام کششی و خمشی می‌باشد. با توجه به اینکه، موضوع بررسی استحکام قطعات چاپ، عمده‌تاً بدون مدل‌سازی دقیق رشته‌های لایه‌نشانی (Filaments) تشکیل دهنده قطعات، انجام شده است، مدل‌سازی دقیق و واقعی رشته‌ها و استفاده از آن در تحلیل اجزاء محدود و در تکمیل آن، انجام آزمایش‌های تجربی برای مقایسه استحکام قطعات در روش سه و پنج محور را می‌توان، از نوآوری‌های این مقاله برشمرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به معرفی سخت‌افزار و نرم‌افزارهای استفاده شده در این تحقیق، پرداخته شده و سپس، روش چاپ قطعات، به‌روش سه و پنج محور توضیح داده شده است. در ادامه روش تحلیل اجزاء محدود بیان و روش انجام آزمایش‌های تجربی ذکر شده است.

۲-۱- معرفی چاپگر پنج درجه آزادی

چاپگر مورد استفاده در این مقاله مطابق شکل ۱، از نوع چاپگر دلتا است که دارای سه محور حرکت خطی می‌باشد. با تجهیز این چاپگر به یک میز دورانی با دو محور متحرک حول محورهای Y و Z، چاپگر در پنج محور حرکتی مطابق فرمان‌هایی که از کنترلر دستگاه دریافت می‌کند، حرکت می‌نماید. در این شکل، تصویر طرحواره و واقعی دستگاه چاپگر و همچنین میز دورانی ساخته و استفاده شده در این مقاله نشان داده شده است.



(a)



(b)

شکل ۱ (a) مدل طرحواره و (b) واقعی چاپگر پنج درجه آزادی
Fig. 1 (a) Schematic Model (b) Real 5Dof Printer

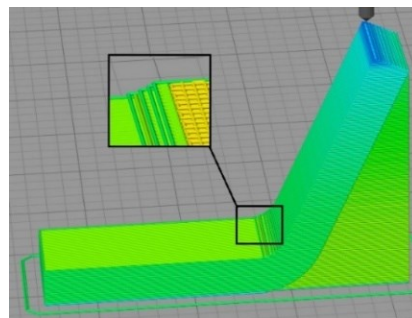
۲-۲- نرم افزارهای لایه‌بندی برای چاپ سه‌بعدی

بطوریکه گفته شد، یک چاپگر سه‌بعدی پنج‌محور با امکان حرکت هم‌زمان در امتداد سه محور خطی و دو محوردورانی قابلیت‌های پیشرفته‌ای را ارائه می‌دهد. این ویژگی، چاپگر را قادر می‌سازد هندسه‌های پیچیده‌ای بسازد و مسیرهای چاپ را با تنظیم نازل چاپ یا جهت میز، بهینه کند. با این حال، برای استفاده کامل از این قابلیت‌ها، نرم‌افزار لایه‌بندی (Slicing) پنج‌محور ضروری است.

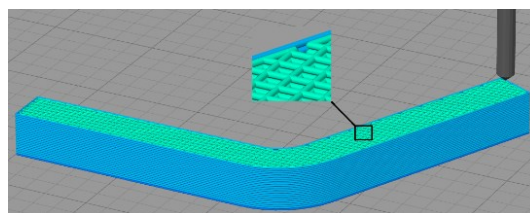
نرم‌افزارهای لایه‌بندی معمول که برای چاپگرهای سه‌محور طراحی شده‌اند، جی‌کد را بر اساس جهت‌گیری‌های ثابت محوردورانی تولید می‌کنند، که توانایی آن‌ها را برای کنترل محورهای چرخشی یک سیستم پنج‌محور، محدود می‌کند. در حالی که یک نرم‌افزار لایه‌بندی پنج‌محور، مدل کامل سینماتیک چاپگر را به‌شمار آورده و می‌تواند مسیرهای ابزار را که دارای چرخش هستند، محاسبه کند و از چاپ دقیق و کارآمد طرح‌های پیچیده، اطمینان حاصل کند. سیمپلیفای‌تری‌دی (Simplify 3D) و رپیتایر (Repetier) جزء نرم‌افزارهای لایه‌بندی چاپ سه‌بعدی مرسوم هستند که عمدتاً برای چاپگرهای سه‌محور طراحی شده‌اند.

با این حال، این نرم‌افزارها به تولید جی‌کد برای سیستم‌های سه محور محدود می‌شوند و فاقد قابلیت کنترل محورهای چرخشی اضافی مورد نیاز برای چاپ پنج محور هستند. یکی از روش‌های ایجاد جی‌کد برای چاپگرهای پنج‌محور، نوشتن نرم‌افزارهای لایه‌بندی پنج‌محور و اضافه کردن کدهای دورانی به صورت دستی است. این روش بسیار محدود و صرفاً می‌تواند به صورت محدود جی‌کد چهار محور اضافه نماید. روش پیشنهادی در این مقاله، استفاده از نرم‌افزار زیمنس NX است. این نرم‌افزار یک ابزار یکپارچه تشکیل شده از CAD/CAM/CAE است که به طور گسترده در صنایع تولیدی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به طور خاص برای تولید افزایشی، از تولید جی‌کد پنج‌محور پشتیبانی می‌کند. فرآیند تولید جی‌کد با ایجاد مدل سه‌بعدی دقیق با استفاده از نرم‌افزار کتیا انجام و سپس این مدل برای عملیات برش و لایه‌بندی به نرم‌افزار سیمپلیفای‌تری‌دی و یا زیمنس NX وارد می‌شود، جایی که قطعه به لایه‌هایی با ضخامت مشخص و مناسب برای تولید افزودنی تقسیم می‌شود.

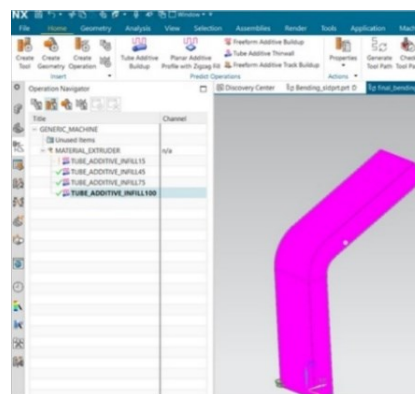
در برای چاپ قطعه در حالت سه‌محور همانطوریکه پیش‌تر ذکر شد، از نرم‌افزار سیمپلیفای‌تری‌دی استفاده شده است. تنظیمات و پارامترهای انتخابی برای ایجاد مسیر حرکت ابزار چاپگر و جی‌کد برای این حالت، به دو روش باتکیه‌گاه و بدون تکیه‌گاه-خوابیده انجام شده است (شکل‌های ۲ و ۳). همچنین برای حالت پنج‌محور با نرم‌افزار زیمنس شکل ۴ انجام شده است. متغیرهای چاپ مطابق جدول ۱ که معمولاً برای جنس PLA متداول هستند، انتخاب شده‌اند.



شکل ۲ مدل لایه‌بندی‌شده با سیمپلیفای‌تری‌دی در حالت ایستاده
Fig. 2 Sliced Model by Simplify 3D with support



شکل ۳ مدل لایه‌بندی‌شده با سیمپلیفای‌تری‌دی در حالت خوابیده
Fig. 3 Sliced Model on Edge by Simplify 3D



شکل ۴ مدل لایه‌بندی‌شده با زیمنس NX در حالت ایستاده
Fig. 4 Sliced Model by Siemens NX with support

۲-۴- مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود نمونه‌های چاپ شده
با توجه به تنظیمات نرم‌افزار لایه‌بندی تولید مسیر، جهت‌های لایه-نشانی در چاپ قطعات متفاوت است و این مسیرهای ساخته شده، در استحکام کششی و خمشی قطعات ساخته شده موثر است. در این مقاله برای اولین بار با انتخاب و طراحی شرایط مختلف چاپ در نرم‌افزارهای لایه‌بندی اشاره شده، تلاش شده که تاثیر جهت ساخت و لایه‌نشانی قطعه مورد نظر در استحکام مکانیکی قطعه ساخته شده به روش تحلیل اجزاء محدود مطالعه شود. برای انجام مدلسازی قطعه، در ابتدا مدل کد قطعه که در نرم‌افزار کتیا (CATIA) طراحی شده و بعد به نرم‌افزار سیمپلیفای‌تری‌دی وارد می‌شود، سپس تنظیمات لازم برای تولید مسیر حرکت چاپگر برای ساخت قطعه در این نرم‌افزار انجام و فایل جی‌کد ساخت قطعه استخراج می‌گردد. پس از آماده شدن فایل جی‌کد، فایل مورد نظر به نرم‌افزار سیمکو (CIMCO Edit2024) منتقل و در آنجا در قسمت (Back Plot) با فرمت DXF ذخیره می‌شود. سپس در محیط نرم‌افزار راینو (Rhino 8) فایل با پسوند DXF که شامل تمام مسیرهای حرکتی ایجاد شده در فایل جی‌کد است باز شده و عملیات لازم برای ساخت شکل فیلامنت‌های ساخته شده در مسیر چاپ دقیقاً مطابق حالت تجربی ایجاد می‌شود. (شکل ۵) در این نرم‌افزار از دستور جوینت (Joint) برای اتصال منحنی‌ها به یکدیگر استفاده می‌شود. ضمناً از دستور پایپ (Pipe) برای ساختن فیلامنت‌ها به شکل میله‌هایی به صورت مسیر بسته یا باز با انتهای کروی شکل استفاده می‌شود. پس از انجام مدلسازی، فایل‌ها با فرمت استپ (STEP) ذخیره و به نرم‌افزار کتیا (Catia 20V5) منتقل و در محیط این نرم‌افزار، مونتاژ قسمت‌های مختلف مدلسازی شده انجام و با همان پسوند کت‌پارت (CatPart) مختص کتیا ذخیره می‌شوند. این مرحله پایان کار مدلسازی بوده و فایل آماده انتقال به محیط نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس (Ansys) برای انجام تحلیل‌های لازم می‌باشد.

جدول ۱ متغیرهای ورودی چاپ قطعه نمونه

Table 1 Samples Printing Input variables

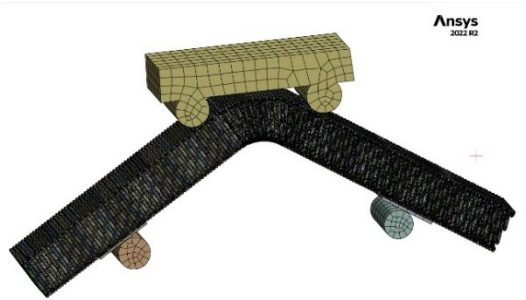
Filament Material	PLA
Raster Angles	0° - 90°
Infill Pattern	Grid
Layer Height	0.8 (mm)
Print Speed	1000 (mm/min)
Nozzle Temperature	200 ° (C)
Nozzle Diameter	0.8 (mm)
Infill Percent	75%

۲-۳- چاپ قطعه نمونه در حالت سه و پنج محور



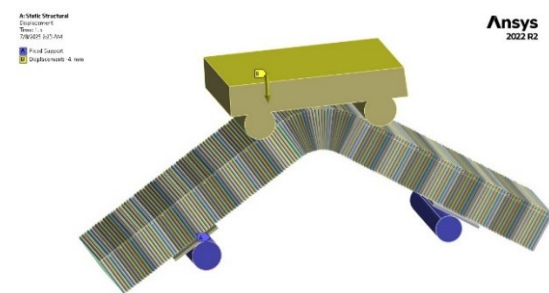
شکل ۷ شرایط اولیه در قطعه (بدون تکیه‌گاه-پنج‌محور) در آزمایش کشش

Fig. 7 Image of mesh in the part (without support-5Dof) in tensile test



شکل ۸ تصویر مش‌بندی در قطعه (بدون تکیه‌گاه-پنج‌محور) در آزمایش خمش

Fig. 8 Image of mesh in the part (without support-5Dof) in bending test

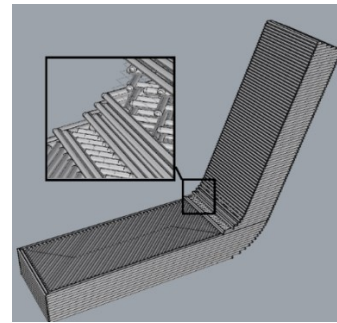


شکل ۹ شرایط اولیه در قطعه (بدون تکیه‌گاه-پنج‌محور) در آزمایش خمش

Fig. 9 Initial conditions in the part (without support-5Dof) in the bending test

۲-۵- آزمایش‌های تجربی کشش و خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های چاپ شده

برای بررسی و مقایسه کیفیت استحکام قطعات مختلفی که با سه روش مختلف چاپ قبلی توضیح داده شد، آزمایش تجربی کشش و خمش چهار نقطه‌ای با دستگاه آزمایش کشش شرکت SPICO مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ انجام شده است. دستگاه کشش یونیورسال تفکیک‌پذیری ۰/۰۱ میلی‌متری و ۰/۲۵ نیوتنی داشته و ظرفیت آن ۲۵ KN می‌باشد. برای کشش قطعه زانویی، قید و بندهای مخصوص که بتواند قطعه زانویی ساخته شده را دقیقاً در راستای عمودی بکشد و استحکام کششی قطعه خم‌دار را اندازه‌گیری کند، ساخته شده است (شکل ۱۰). این قید و بندها به‌صورت مفصلی



شکل ۵ ایجاد فیلامنت‌های چاپ شده از جی‌کد در نرم‌افزار راینو

Fig. 5 Creating printed filaments from Gcode in Rhino software

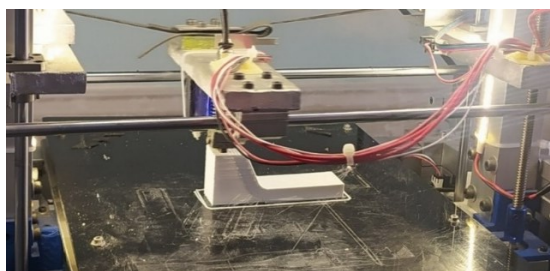
برای انجام تحلیل آزمایش کشش، در ابتدا مدل کد قطعه زانویی به نرم‌افزار انسیس وارد شده و تحلیل آزمایش کشش قطعه با ثابت کردن یکی از گیره‌ها و اعمال جابجائی ۴ میلی‌متری به فک دیگر انجام شده است. پس از انجام مراحل آماده‌سازی، مش‌زنی و تعریف شرایط مرزی، تحلیل استاتیک برای محاسبه مقدار نیروی عکس‌العمل انجام شده است (شکل‌های ۶ و ۷). همچنین برای انجام تحلیل آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، شکل گیره‌های آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در نرم‌افزار کتیا ترسیم و با قطعه سالیید (Solid) مونتاژ شده است. سپس به نرم‌افزار انسیس منتقل شده و مش‌زنی در نرم‌افزار انسیس انجام شده است (شکل ۸). برای بدست آوردن شرایط مادی مسأله اجزاء محدود، یک تست کشش استاندارد تجربی با پرینت نمونه تست کشش مطابق با استاندارد ASTM D638-10 Type IV انجام شده [۱۳] و نتایج آن برای اعمال در تحلیل‌های اجزاء محدود، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج تست کشش قطعه چاپ شده، با پرشوندگی ۱۰۰٪ و همان جنس PLA انتخاب شده در نمونه‌های آزمایش اصلی می‌باشد. همچنین، اتصال بین تمام اجزاء از نوع کانتکت (Contact) در نظر گرفته شده است. در نهایت، مطابق آزمایش تجربی کشش، جابجائی به فک متحرک اعمال شده است (در اینجا جابجائی ۴ میلی‌متری اعمال شده است) و متعاقب آن، نیروی عکس‌العمل وارد شده به فک متحرک مطابق شکل ۹ بدست آمده است.



شکل ۶ تصویر مش‌بندی در قطعه (بدون تکیه‌گاه-پنج‌محور) در آزمایش کشش

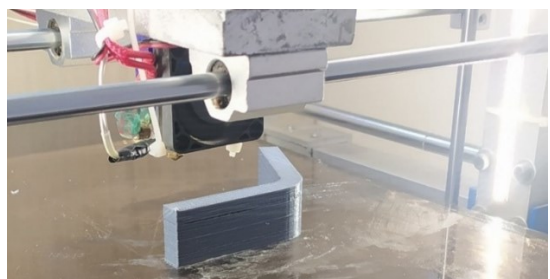
Fig. 6 Image of mesh in the part (without support-5Dof) in tensile test

خروجی‌های مشخص استحکام خمش و کششی یک قطعه پیچیده پرداخته شده است. به‌طوری‌که قبلاً توضیح داده شد، یک قطعه مشخص زانویی با چاپگر کارت‌ترین مرسوم سه‌محور در دو حالت با تکیه‌گاه-ایستاده و بدون تکیه‌گاه-خوابیده مطابق شکل ۱۲ و شکل ۱۳ چاپ شدند. همچنین همان قطعه با چاپگر پنج‌محور بصورت ایستاده-بدون تکیه‌گاه چاپ شدند (شکل ۱۴).



شکل ۱۲ چاپ سه‌محور قطعه نمونه در حالت ایستاده و با تکیه‌گاه

Fig. 12 3D printing of the sample piece in a standing position with support



شکل ۱۳ چاپ سه‌محور قطعه نمونه در حالت خوابیده و بدون تکیه‌گاه

Fig. 13 3D printing of the sample piece on edge position and without support



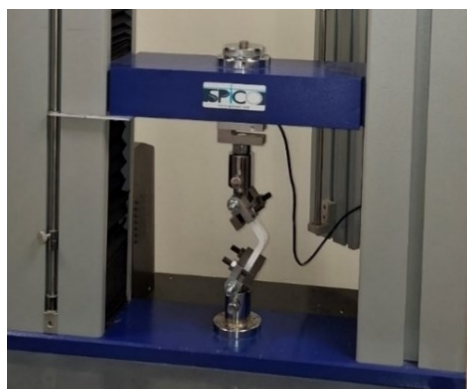
شکل ۱۴ مراحل حین فرآیند چاپ پنج محور نمونه بدون تکیه‌گاه

Fig. 14 Steps during the 5Dof printing process of a supportless sample

۷-۲- نتایج تحلیل اجزاء محدود استاتیکی آزمایش کشش قطعه زانویی

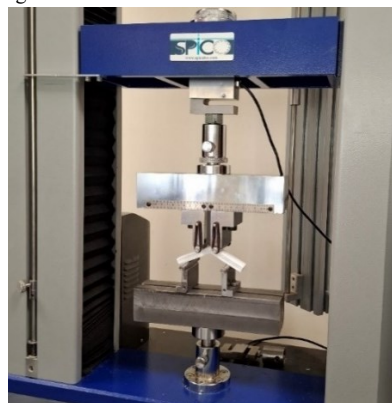
در تمامی حالت‌های تحلیلی که قبلاً توضیح داده شده است، مقدار تغییر شکل و نیروی عکس‌العمل حاصل از کشش در محل فک متحرک گیره برای قطعات چاپ شده محاسبه شده است. این

ساخته شده‌اند، تا نیرو فقط در راستای کشش اعمال گردد. همچنین برای آزمایش خمش هم، قید و بندهای آزمایش خمش چهار نقطه‌ای استاندارد، ساخته شده و در فک‌های دستگاه آزمایش کشش، استفاده شده است (شکل ۱۱). همچنین، سرعت حرکت متداول فک متحرک دستگاه کشش هم در آزمایش کشش و هم خمش، ۲ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است.



شکل ۱۰ تنظیمات و انجام آزمایش کشش نمونه زانویی با دستگاه آزمایش کشش

Fig. 10 Setting up and performing a knee specimen tensile test with a tensile testing machine



شکل ۱۱ تنظیمات و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قطعه زانویی با دستگاه آزمایش کشش

Fig. 11 Adjustment and four-point bending test of the knee piece with a tensile testing machine

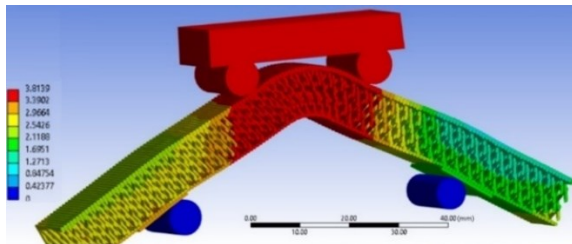
۷- بحث و تحلیل نتایج

در این قسمت به نتایج حاصل از ساخت قطعات در حالت سه و پنج محور و نتایج آزمایشهای تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداخته شده است.

۷-۱- چاپ قطعات در حالت سه و پنج محور

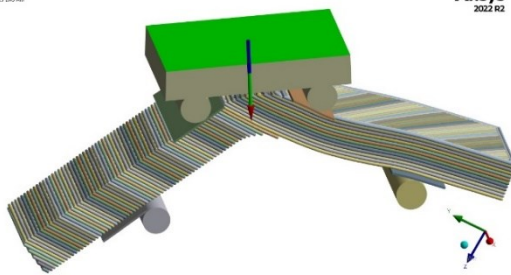
در این مقاله با انتخاب روش‌های مختلف چاپ، شامل استفاده از دستگاه پنج و سه‌محور، استراتژی‌های مختلف چاپ (سه حالت مختلف چاپ)، به بررسی و مطالعه تاثیر هر یک از این عوامل روی

قطعه چاپ شده به روش سه‌محور با تکیه‌گاه، نمایش داده شده است.



شکل ۱۷ تغییر شکل قطعه زانویی بدون تکیه‌گاه-پنج‌محور در آزمایش خمشی استاتیکی

Fig. 17 Deformation of the 3Dof knee support in static bending test



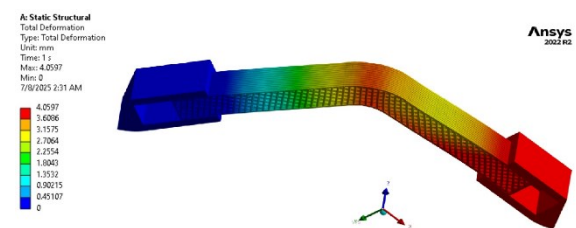
شکل ۱۸ نیروی عکس‌العمل کشش در قطعه زانویی باتکیه‌گاه-سه‌محور در آزمایش خمشی استاتیکی

Fig. 18 Tensile reaction force in a 3Dof knee part in a static bending test

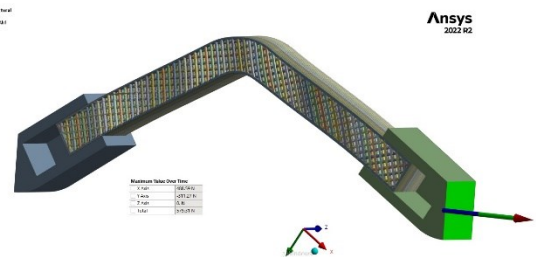
۳-۷- آزمایش‌های تجربی کشش و خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌ها
برای بررسی استحکام و تحمل نیروی قطعات چاپ شده در حالات مختلف تحت کشش و مقایسه شرایط بهینه چاپ از بین حالت‌های مختلفی که در این مقاله برای چاپ قطعه زانویی انتخاب شده است، آزمایش‌های کشش متعددی روی قطعات چاپ شده به سه روشی که قبلاً ذکر شد، انجام شده است. به‌عنوان نمونه، نتایج آزمایش‌های کشش با توضیحاتی که قبلاً برای نمونه‌های زانویی داده شد، برای یکی از حالت‌های چاپ سه‌محور-خوابیده در شکل ۱۹، نمایش داده شده است. در آزمایش کشش، به‌عنوان مثال، منحنی نیرو جابجائی حاصل از کشش قطعه بدست آمده است. از آنجا که محاسبه نیروی عکس‌العمل به‌ازای جابجائی‌های مختلف، فک متحرک در روش اجزاء محدود بسیار زمان‌بر می‌باشد، برای مقایسه روش تجربی آزمایش کشش با روش تحلیل اجزاء محدود، تنها جابجائی ۴ میلی‌متری و نیروی عکس‌العمل حاصل از آن معیار مقایسه قرار گرفته و مقادیر مربوط به آن بدست آمده است. بر مبنای همین محاسبات و آزمایش‌های تجربی انجام شده، در نهایت، در شکل ۲۰، نتایج مقایسه‌ای تمام آزمایش‌های کششی انجام شده برای قطعات زانویی چاپ شده به روش اجزاء محدود و

نیروی عکس‌العمل که در فک متحرک محاسبه می‌شود، تداپی کننده همان نیروی لودسل دستگاه کشش در آزمایش تجربی می‌باشد، که حین کشش، به فک متحرک وارد می‌شود. به‌عنوان نمونه در شکل ۱۵ تغییر شکل بوجود آمده در قطعه زانویی در تحلیل کشش که حاصل از تحلیل استاتیکی است محاسبه شده، که با مقطع برش خورده، تغییر شکل در مناطق مختلف آن، مشاهده می‌شود.

بطوریکه از این شکل مشهود است، جابجائی اعمال شده در فک ثابت صفر و در فک متحرک در راستای همان تغییر شکل اعمال شده به اندازه ۴ میلی‌متر است. همچنین، نیروی عکس‌العمل در محل جابجائی اعمال شده در فک متحرک محاسبه شده است، که به‌عنوان نمونه در شکل ۱۶ برای همان مثال فوق‌الذکر، برای جابجائی ۴ میلی‌متری فک متحرک، نمایش داده شده است.

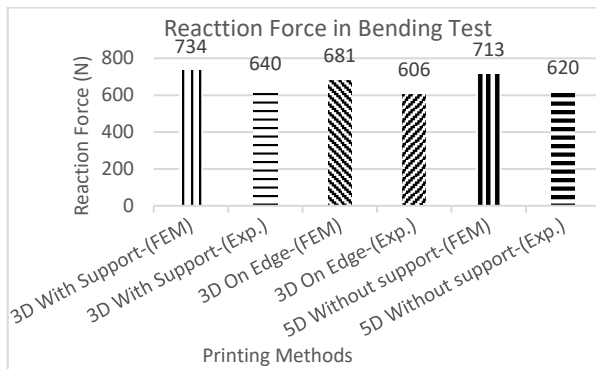


شکل ۱۵ تغییر شکل در قطعه خوابیده زانویی در آزمایش کشش استاتیکی
Fig. 15 Deformation in the knee on edge part in the static tensile test



شکل ۱۶ نیروی عکس‌العمل قطعه زانویی در آزمایش کشش استاتیکی
Fig. 16 Knee joint reaction force in static tensile test

همچنین، در مورد شبیه‌سازی آزمایش خمش چهارنقطه‌ای، همزمان با اعمال جابجائی ۴ میلی‌متری به گیره متحرک بالا، تحلیل تغییر شکل و نیروی عکس‌العمل حاصل از این جابجائی محاسبه شده است. در شکل ۱۷ تغییر شکل بوجود آمده حاصل از تحلیل استاتیکی شبیه‌سازی آزمایش خمشی نمایش داده شده است. به‌طوریکه از این شکل مشهود است جابجائی اعمال شده در فک متحرک به اندازه حدود ۴ میلی‌متر است. همچنین، جابجایی قطعه روی پین‌ها به صورت کامل انجام می‌گیرد و روی پین‌ها سر می‌خورد. برای محاسبه نیروی عکس‌العمل، در مقابل تغییر شکل ۴ میلی‌متری اعمال شده به فک متحرک، که شبیه حالت پیش آمده در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای می‌باشد، نیروی عکس‌العمل در فک متحرک دوم و در قسمت بالای قطعه زانویی در نرم‌افزار انسیس محاسبه شده است، که در شکل ۱۸، به‌عنوان نمونه، برای



شکل ۲۱ مقایسه نیروی عکس‌العمل قطعات در روش اجزاء محدود و آزمایش تجربی خمش

Fig. 21 Comparison of reaction forces of parts in FEM and Experimental 4-Points bending tests

برای بررسی نحوه شکست قطعات چاپ شده، مقطع شکست سه نمونه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲۲، به ترتیب، مقطع شکست نمونه سه‌محور خوابیده، سه‌محور باتکیه‌گاه و پنج‌محور نشان داده شده است. با دقت در شکل ۲۲-الف، مشاهده می‌شود که در نمونه سه‌محور خوابیده، رشته‌ها عمود بر مقطع شکست بوده و کشیدگی و گلوپی شدن رشته‌ها و در نتیجه شکست اتفاق افتاده و شکست نرم آنها کاملاً مشهود است. در نمونه سه‌محور باتکیه‌گاه در قسمت خم زانویی، مقطع شکست به صورت جداشدگی لایه‌ای است. در واقع اتصال بین لایه‌ها، حین گلوپی شدن، در مقطع شکست، از بین رفته و شکست اتفاق افتاده است (شکل ۲۲-ب). در نمونه پنج‌محور نیز، دقیقاً مثل روش سه‌محور باتکیه‌گاه، جداشدگی لایه‌ای دیده می‌شود که لیل شکست قطعه است (شکل ۲۲-ج).



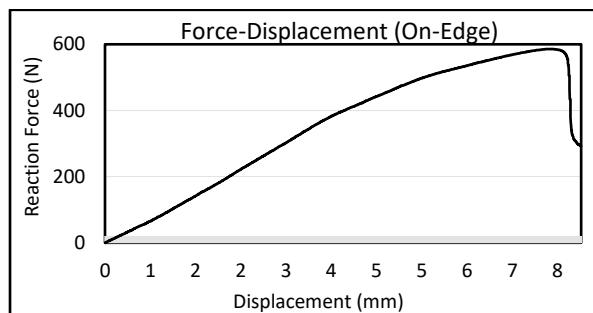
(a)



(b)

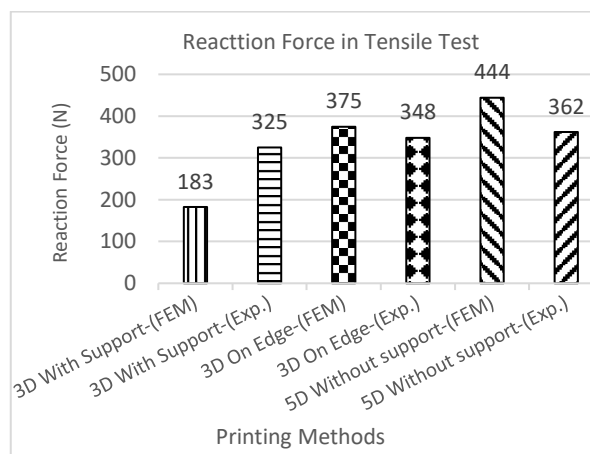
تجربی برای جابجائی ۴ میلی‌متری فک متحرک، آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

در مورد خمش چهار نقطه قطعه زانویی نیز، جابجائی ۴ میلی‌متری اعمال شده به فک متحرک ملاک عمل قرار گرفته و نیروی عکس‌العمل آن از روش تحلیل اجزاء محدود و هم از منحنی نیرو جابجائی آزمایش خمش تجربی محاسبه شده است. برای قطعات چاپ شده تحت خمش در حالات مختلف و مقایسه شرایط بهینه چاپ از بین حالت‌های مختلفی که در این مقاله برای چاپ قطعه زانویی انتخاب شده است، آزمایش‌های خمش متعددی انجام شده است. در نهایت در شکل ۲۱، نتایج مقایسه‌ای تمام آزمایش‌های خمشی برای قطعات زانویی چاپی به روش اجزاء محدود و تجربی، ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. در قسمت نتیجه‌گیری نیز، در مورد نتایج حاصل از آزمایش تجربی و تحلیل اجزاء محدود، توضیحاتی ارائه شده است.



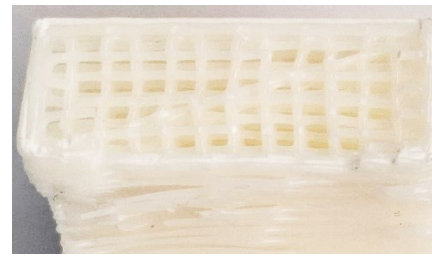
شکل ۱۹ منحنی تجربی نیرو-جابجائی قطعه زانویی خوابیده در آزمایش کشش

Fig. 19 Experimental force-displacement curve of the knee part in the tensile test



شکل ۲۰ مقایسه نیروی عکس‌العمل قطعات در روش اجزاء محدود و آزمایش تجربی کشش

Fig. 20 Comparison of reaction forces of parts in FEM and Experimental tensile tests



(c)

شکل ۲۲ مقطع شکست نمونه‌های چاپ شده - (a) سه‌محور - خوابیده (b) سه‌محور با تکیه‌گاه، (c) پنج‌محور

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر متغیرهای چاپ، نظیر جهت‌گیری لایه‌های چاپ بر تحمل نیروی عکس‌العمل کششی و خمشی قطعه‌کار، که با انتخاب روش چاپ پنج‌محور و سه‌محور، با تکیه‌گاه و بدون تکیه‌گاه ساخته می‌شوند مطالعه شده است. برای این منظور، قطعه نمونه زانویی با متغیرهای مختلف ذکر شده طراحی، مدلسازی و ساخته شده است. استحکام در مقابل نیروی کششی و خمشی قطعه نمونه، با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود، شبیه‌سازی و محاسبه شده است. آزمایش‌های استاندارد تجربی برای صحت‌گذاری تحلیل‌های انجام شده، اجرا و نتایج آن برای نشان دادن اهمیت جهات چاپ قطعه، مطالعه شده است. نتایج مهمی که بدست آمده، به‌ترتیب زیر خلاصه شده است:

- مدلسازی و تحلیل اجزاء محدود لایه‌ها و ساختار قطعات طراحی شده برای چاپ آن‌ها که برای تمام قطعات نمونه به شکل واقعی و دقیق و برای اولین بار در این مقاله اجرا شده است، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی و طراحی و چاپ بهینه قطعات برای بیشترین تحمل نیرویی ارائه می‌نماید. این روش، راهکاری کم‌هزینه و ابزار قوی مطالعاتی، برای بررسی نقاط ضعف و قوت قطعات طراحی شده، پیش از ساخت آن‌ها می‌باشد.

- با بررسی نتایج حاصل از مقادیر نیروی عکس‌العمل کششی و خمشی قطعات با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود، برتری روش چاپ پنج‌محور نسبت به روش سه‌محور کاملاً مشهود است. در استحکام کششی به‌ترتیب، برتری حدود ۱۸٪ و ۱۴۲٪ روش پنج‌محور، نسبت به روش سه‌محور خوابیده و سه‌محور با تکیه‌گاه دیده می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش تجربی نیز، این نتایج تکرار شده ولی درصدها به ترتیب ۴٪ و ۱۱/۵٪ مشاهده می‌شود. با توجه به تغییر شکل رشته‌های ذوب شده ناشی از حرارت در حین چاپ قطعه بوجود می‌آید، ولی در شبیه‌سازی اجزاء محدود، در نظر گرفته نشده است، قطعاً می‌تواند، یکی از دلایل اختلاف نتایج دو روش نسبت به هم باشد.

- بررسی استحکام خمشی قطعات چاپ شده، نشان می‌دهد که روش پنج‌محور، نسبت به روش سه‌محور، حدود ۷٪ استحکام بیشتری دارد. روش پیشنهادی برای ساخت قطعات و همچنین

روش ارائه شده برای بررسی این کمیت‌ها (روش تحلیل اجزاء محدود) در این مقاله، از نتایج کلیدی این تحقیق می‌باشد.

- برای صحت‌گذاری روش تحلیل اجزاء محدود، آزمایش‌های تجربی لازم و نمونه آزمایش کشش استاندارد، نمونه‌های آزمایش کشش و خمش چهار نقطه‌ای قطعات زانویی مورد مطالعه قرار گرفته و در نمونه‌های مشابه شبیه‌سازی شده با تحلیل اجزاء محدود، هم‌خوانی خوبی دیده می‌شود. این اختلاف در آزمایش‌های کشش ماکزیمم ۳۶٪ و در آزمایش‌های خمش ماکزیمم ۱۵٪ است. اختلافات موردی مشاهده شده، بدلیل اشکالات موجود در قطعه چاپ شده می‌باشد، که در حین چاپ بوجود می‌آید و باعث کاهش نیروی قابل تحمل قطعات می‌شود و امکان شبیه‌سازی این اتفاقات تصادفی در روش اجزاء محدود وجود ندارد.

- در مقایسه نتایج بین روش اجزاء محدود و روش تجربی، مشاهده می‌شود که استحکام کششی و خمشی قطعات مشابه، در روش تجربی، همواره مقداری از روش اجزاء محدود کمتر است. دلیل این اختلاف را می‌توان به اشکالاتی که حین ساخت و در چاپ به‌وجود می‌آید، ولی در روش اجزاء محدود مدل نمی‌شود، مرتبط دانست.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] M. Vlachou, A. Siamidi and C. Protopapa, "3D-printing technologies for pharmaceutical applications," In Elsevier eBooks, pp. 29-46, 2025. <http://doi.org/10.1016/b978-0-443-23645-7.00002-7>.
- [2] M. Enyan, J. N. O. Amu-Darko., E. Issaka and O. J. Abban, "Advances in fused deposition modeling on process, process parameters, and multifaceted industrial application: a review," Engineering Research Express, 6(1), 012401, 2024. <http://doi.org/10.1088/2631-8695/ad32f6>.
- [3] Liam Rudd, I. Matthew, Campbell, and Ghazi Alonayni. "Multi-Axis 3D Printer Design Challenges for In-Situ Additive Manufacturing." International Manufacturing Science and Engineering Conference. Vol. 87240. American Society of Mechanical Engineers, 2023. <http://doi.org/10.1115/MSEC2023-100996>.
- [4] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, and P. D. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," Computer-Aided Design, 69, 65-89, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [5] Song, Xuan, Yayue Pan, and Yong Chen. "Development of a low-cost parallel kinematic machine for multidirectional additive manufacturing." Journal of Manufacturing Science and Engineering 137.2, 021005, 2015, <https://doi.org/10.1115/1.4028897>.

- [6] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. , <http://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- [7] Zhang, H., Liu, D., Huang, T., Hu, Q., & Lammer, H. (2020). Three-Dimensional printing of continuous flax Fiber-Reinforced thermoplastic composites by Five-Axis machine. *Materials*, 13(7), 1678. <http://doi.org/10.3390/ma13071678>
- [8] O. K. Grutle,. 5-axis 3D Printer, Master's thesis, 2015.
- [9] Isa, M. A., & Lazoglu, I. (2018). Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 69–80. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.12.002>
- [10] M. Mahboubkhah, A. Dumlu, F. Khabazi Barab, K. K. Ayten, "Design and Manufacturing of 5-Dof FDM Printer Based on Parallel Mechanism", *Modares Mechanical Engineering Journal*, 22(10): 253-257, 2022.
- [11] M. Mahboubkhah, M. Tayyari, "Calibration and error compensation of a 4-DOF milling machine with parallel mechanism", *Modares Mechanical Engineering Journal*, 23(5): 317-322, 2023, <http://doi.org/10.22034/mme.23.5.317>
- [12] Fathi, A., Mahboubkhah, M., Entezari Maleki, A. *et al.* Enhanced performance in additive manufacturing: a comparative study of multi-axis and 3-axis FDM for tubular parts. *Prog Addit Manuf* (2025). <http://doi.org/10.1007/s40964-025-01219>
- [13] ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Type IV Specimen, 2010.