



Optimization of Fracture Performance of 3D-Printed Parts in Cloud Manufacturing for Aerospace Applications Using Statistical Analysis and Decision-Making Methods

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 6, No. 1, pp.: 61-73
2026

DOI:

[10.22034/jsssta.2025.518514.1245](https://doi.org/10.22034/jsssta.2025.518514.1245)

Article Info

Received: 2025-04-22
Accepted: 2025-07-02

keywords

Mode I fracture;
TOPSIS; 3d printing;
Polylactic Acid (PLA)
material; ANOVA

How to Cite this article

A. Rajabi-Kafshgar, M. Mohammad Aliah,
“Optimization of Fracture Performance of 3D-Printed Parts in Cloud Manufacturing for Aerospace Applications Using Statistical Analysis and Decision-Making Methods”,
Journal of Space Science, Technology & Applications,
Vol. 6, No. 1, pp. 61-73, 2026.

Atefeh Rajabi-Kafshgar¹, Mohammad Reza Mohammad Aliah^{2*}

¹ School of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

E-mail: rajabi_atefeh@ind.iust.ac.ir

^{2*} School of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

E-mail: mrm_aliaha@iust.ac.ir

Abstract

Over the past decade, 3D printing technology, particularly Fused Deposition Modeling (FDM), has been widely adopted in distributed manufacturing environments, with a notable increase in its application in cloud-based manufacturing systems. Given the importance of service quality in such networks, it is essential to consider simultaneously the mechanical and economic properties of printed parts. This study investigates the effects of key process parameters, layer thickness, print speed, and infill density, on Mode I fracture behavior in PLA parts fabricated via FDM. A full factorial experimental design with 12 tests and three replications was conducted, measuring fracture toughness (K_{Ic}), fracture energy (G_{Ic}), print time, and material consumption. Statistical analysis revealed that layer thickness had the greatest effect on fracture energy, while infill density most significantly influenced fracture toughness. The novelty of this work lies in employing the TOPSIS multi-criteria decision-making method to select the optimal parameter combination, considering both mechanical and economic criteria, and comparing its outcomes with traditional statistical analysis. According to the results, when mechanical performance is prioritized, the optimal combination consists of a 3000 mm/min print speed, 70% infill density, and 0.3 mm layer thickness. Finally, TOPSIS is proposed as a flexible and effective tool for balancing conflicting objectives and is recommended for high-performance part production in aerospace applications.

بهینه‌سازی رفتار شکست قطعات چاپی سه‌بعدی در تولید ابری، برای کاربردهای هوافضایی با استفاده از تحلیل آماری و روش‌های تصمیم‌گیری

عاطفه رجبی کفشگر^۱، محمدرضا محمدعلیها^{۲*}

۱- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

rajabi_atefeh@ind.iust.ac.ir

۲- گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

mrm_aliha@iust.ac.ir

* نویسنده مسئول

دسترس‌پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال ششم، شماره ۱، صفحه ۶۱-۷۳

بهار و تابستان ۱۴۰۵

DOI:

10.22034/jssta.2025.518514.1245

چکیده

در دهه گذشته فناوری چاپ سه‌بعدی، به‌ویژه مدل‌سازی رسوبی ذوب‌شونده (FDM)، به‌طور گسترده‌ای در محیط‌های تولیدی توزیع شده به‌خصوص در تولید ابری مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهمیت کیفیت خدمات در این شبکه‌های تولیدی، بررسی هم‌زمان ویژگی‌های مکانیکی و اقتصادی قطعات چاپی ضروری است. در پژوهش حاضر، به‌منظور بهبود کیفیت قطعات پلیمری تولیدی با فناوری FDM، تأثیر پارامترهای فرآیند شامل: ضخامت لایه، سرعت چاپ و تراکم داخلی بر رفتار شکست مود I در قطعات PLA بررسی شده است. طراحی آزمایش به‌صورت طرح عاملی کامل با ۱۲ آزمایش و دو تکرار انجام شد و ویژگی‌هایی نظیر چقرمگی شکست (K_{IC})، انرژی شکست (G_{IC})، زمان چاپ و مقدار مصرف ماده اندازه‌گیری شد. نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که ضخامت لایه بیشترین تأثیر را بر انرژی شکست و تراکم داخلی بیشترین تأثیر را بر چقرمگی شکست دارد. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ای تاپسیس برای انتخاب ترکیب بهینه پارامترها با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای مکانیکی و اقتصادی و مقایسه آن با نتایج تحلیل‌های آماری است. بر اساس نتایج، در شرایطی که خواص مکانیکی اولویت دارند، ترکیب بهینه شامل سرعت چاپ ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، تراکم داخلی ۷۰٪ و ضخامت لایه ۰.۳ میلی‌متر است. در نهایت، روش تاپسیس با انعطاف‌پذیری بالا در ایجاد تعادل میان اهداف متضاد، به‌عنوان روشی مؤثر برای تولید قطعات با عملکرد شکست بالا در صنایع هوافضا پیشنهاد می‌شود.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

واژه‌های کلیدی

شکست مود I خالص، روش
تاپسیس، ماده پلی لاکتیک اسید
(PLA)، آنالیز واریانس

نحوه استناد به مقاله

عاطفه رجبی کفشگر، محمدرضا
محمدعلیها، "بهینه‌سازی رفتار
شکست قطعات چاپی سه‌بعدی در
تولید ابری، برای کاربردهای
هوافضایی با استفاده از تحلیل
آماری و روش‌های تصمیم‌گیری"،
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی، جلد ششم، شماره اول،
صفحات ۶۱-۷۳، ۱۴۰۵.

۱- مقدمه

با رشد سریع فناوری‌های ساخت افزایشی به‌ویژه چاپ سه‌بعدی، امکان تولید قطعات پیچیده با هزینه و زمان کمتر نسبت به روش‌های سنتی فراهم شده است [۱]. در سال‌های اخیر کاربرد این فناوری در حوزه‌های پیشرفته‌ای مانند صنایع هوافضایی گسترش یافته است، جایی که نیاز به قطعات سبک، مقاوم و قابل اعتماد به‌ویژه در شرایط بارگذاری شدید وجود دارد [۲-۳].

در صنعت هوافضا، تولید قطعات پلیمری به‌ویژه PLA و ABS با فناوری چاپ سه‌بعدی کاربردهای متعددی دارد که به بهینه‌سازی طراحی، کاهش وزن و تسریع فرآیند تولید کمک می‌کند. در بدنه پهپادها (UAVs)، قطعاتی نظیر پوسته‌ی بیرونی، قاب موتور و اجزای آیرودینامیکی با مواد پلیمری تولید می‌شوند که علاوه بر وزن کم، مقاومت مکانیکی مناسبی نیز دارند و امکان طراحی پیچیده را فراهم می‌کنند. در داخل هواپیماها نیز قطعات غیرسازه‌ای مانند: پانل‌های کابین، پوشش‌های نورپردازی، دریچه‌های تهویه، بست‌ها و نگهدارنده‌ها به‌طور معمول با استفاده از پلیمرهای تولید شده از طریق چاپ سه‌بعدی ساخته می‌شوند تا پاسخگوی نیاز به طراحی خاص و تولید کم‌تیراژ باشند. همچنین، ابزارهای موقتی مانند: جیگ‌ها، فیکسچرها و گیره‌ها که در فرآیندهای مونتاژ و نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرند، با چاپ سه‌بعدی تولید می‌شوند تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. چاپ سه‌بعدی PLA و سایر پلیمرها در نمونه‌سازی سریع نیز بسیار مؤثر است، چراکه امکان تولید نمونه‌های اولیه برای ارزیابی طراحی، ارگونومی و عملکرد قطعات را پیش از تولید نهایی فراهم می‌کند [۴].

در مطالعه انجام شده توسط چودهری [۵]، پنل ساندویچی تولید شده با تکنولوژی چاپ سه‌بعدی برای کاربردهای فضایی بررسی شده است. در این مطالعه، اثر ضخامت دیواره هسته و طراحی هسته بر عملکرد پنل ساندویچی تولید شده با روش چاپ سه‌بعدی، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی مدول فشاری، استحکام فشاری، بیشینه نیرو (F_{peak})، جذب انرژی (EA) و جذب انرژی ویژه (SEA)، نشان داده شد که با افزایش ضخامت دیواره هسته، عملکرد فشاری به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. همچنین در مطالعات انجام شده توسط وحیدشاد [۶-۷]، تاثیر پارامترهای

چاپ بر خواص مکانیکی قطعات مورد استفاده در صنایع فضایی تولید شده توسط تکنولوژی تولید افزایشی بررسی شده است. یکی از مواد پرکاربرد در فرآیند چاپ سه‌بعدی، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) است که به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر زیست‌تجزیه‌پذیری، فراوانی و فرآیندپذیری آسان مورد توجه قرار گرفته است [۸]. با این حال، برای استفاده از قطعات PLA در کاربردهای حساس، به‌ویژه در تجهیزات فضایی که ممکن است تحت تنش‌های متمرکز یا بارهای سیکلی قرار گیرند، نیاز به درک رفتار شکست این ماده وجود دارد [۹].

در این راستا، بررسی ضریب شدت تنش در مود اول (K_{Ic}) به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل مکانیزم شکست مواد شکننده، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۰]. مطالعات بسیاری با هدف بررسی تجربی این ضریب در نمونه‌های PLA چاپ‌شده با پارامترهای متفاوت چاپ و همچنین ارائه دیدگاه عمیق‌تری نسبت به عوامل مؤثر بر مقاومت شکست این قطعات انجام شده است.

مطالعات اولیه در این حوزه، به‌طور عمده بر تأثیر ویژگی‌های مکانیکی و پارامترهای ساخت بر مقاومت به شکست، متمرکز بوده‌اند. برای مثال، در [۱۱] نشان می‌دهد که در چاپ قطعات ABS توسط تکنولوژی FDM، جهت چاپ و زاویه نوارهای چاپ ($raster\ angle$)، تأثیر مستقیمی بر مقدار مقاومت به شکست دارد. همچنین زاویه شطرنجی $45^{\circ}/45^{\circ}$ عملکرد بهتری نسبت به زاویه $90^{\circ}/0^{\circ}$ دارد. ولین و همکاران [۱۲]، اثر وجود و نوع شیار در نمونه‌های چاپ‌شده از جنس پلیمر PLA را مورد بررسی قرار داده‌اند و توصیه کردند که ویژگی‌های هندسی پیش از چاپ باید در طراحی لحاظ شوند زیرا قطعاتی که شیار در آن‌ها به صورت دستی ایجاد شده بود نسبت به قطعاتی که شیار در آن‌ها طراحی شده بود چقرمگی شکست کمتری داشته‌اند.

همچنین، مطالعاتی نظیر پژوهش‌های انجام شده در منابع [۱۳-۱۴]، نیز به بررسی رابطه بین پارامترهای چاپ مانند درصد پرشوندگی، زاویه رشته‌های چاپ شده و دمای نازل با رفتار شکست در مدهای مختلف پرداخته‌اند. این تحقیقات نشان داده‌اند که پارامترهای چاپ، تأثیر عمیقی بر رفتار شکست دارند و امکان ایجاد ترک‌های میکروسکوپی به‌دلیل ضعف در اتصال بین لایه‌ها بالا است. از سوی دیگر، برخی مطالعات همچون مطالعه انجام شده توسط عامری و همکاران [۱۵]، به تحلیل و

استحکام کششی، استحکام ضربه پذیری، استحکام خمشی و زبری سطح جهت بهینه‌سازی پارامترهای چاپ استفاده کرده است.

باتوجه به مطالعات فوق، پارامترهای چاپ نقش به‌سزایی در تعیین کیفیت، استحکام و یکپارچگی ساختاری این قطعات دارند. بنابراین، هنوز نیاز جدی به یک رویکرد جامع برای بهینه‌سازی همزمان شاخص‌های شکست مانند ضریب شدت تنش (K_{Ic}) و انرژی شکست در قطعات PLA چاپی وجود دارد.

تولید ابری به عنوان یک سیستم تقاضا محور و مشتری‌گرا، مستلزم درنظر گرفتن عواملی فراتر از تنها خواص مکانیکی قطعات تولیدی است [۲۹]. در چنین بسترهایی شاخص‌هایی نظیر زمان ساخت و میزان مصرف ماده اولیه نیز از اهمیت بالایی برخوردار هستند، چرا که به‌طور مستقیم بر بهره‌وری، هزینه و قابلیت پاسخ‌گویی سریع به نیازهای بازار تأثیر می‌گذارند.

در فرآیندهای تولیدی مانند چاپ سه‌بعدی، تصمیم‌گیری تنها بر اساس پارامترهای مکانیکی (مانند استحکام و انرژی شکست) ممکن است به انتخاب شرایطی منجر شود که از نظر هزینه، زمان یا مصرف مواد به‌صرفه نباشد. علاوه بر این، تولید در بستر تولید ابری که بستری شامل ارائه دهندگان سرویس توزیع شده است و هزینه‌ها (اعم از زمان اجرا، مصرف مواد اولیه و هزینه سرویس‌دهی) نقش مهمی در انتخاب شرایط بهینه دارند [۳۰].

از این رو، در کنار شاخص‌های مکانیکی، معیارهایی نظیر زمان چاپ و میزان مصرف ماده اولیه به‌عنوان معیارهای اقتصادی در نظر گرفته شده‌اند تا مدل ارزیابی جامع‌تری ارائه شود. این رویکرد امکان انتخاب شرایط فرآیند بهینه را با درنظر گرفتن هم‌زمان عملکرد مکانیکی و کارایی اقتصادی فراهم می‌سازد، که در کاربردهای صنعتی نوین بسیار حائز اهمیت است.

بنابراین در این پژوهش، علاوه بر بررسی تأثیر چهار پارامتر اصلی فرآیند چاپ شامل: تراکم چاپ، سرعت چاپ و ضخامت لایه علاوه بر رفتار شکست در مود I قطعات PLA، تأثیر این پارامترها بر زمان و میزان مواد مصرفی نیز بررسی می‌شود. مقادیر چقرمگی شکست (K_{Ic}) و انرژی شکست (G_{Ic}) به عنوان خروجی‌های آزمایش شکست محاسبه شده است و تحلیل آماری و بهینه‌سازی آن‌ها انجام می‌پذیرد.

در نهایت، با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهینه‌سازی هم‌زمان معیارهای مکانیکی و اقتصادی به منظور دستیابی به بهترین ترکیب از خواص شکست، زمان

مدل‌سازی رفتار شکست با استفاده از ابزارهای پیشرفته‌تری نظیر روش XFEM-CZM پرداخته‌اند.

ایلیایی و همکاران [۱۶]، شکست مود ترکیبی I/III در داربست‌های متخلخل PLA چاپی را با استفاده از نمونه‌های CT بررسی کردند. این روش‌ها کمک می‌کنند تا بین پارامترهای هندسی و خواص شکست رابطه دقیق‌تری برقرار شود. در مطالعاتی مشابه، ناظم زاده و همکاران [۱۷]، رفتار شکست در مود I و II در PLA چاپ‌شده را با استفاده از آزمایش‌های DCB و SLS بررسی کردند و مقادیر انرژی شکست بحرانی G_I و G_{II} را برای طراحی‌های مختلف تعیین نمودند. همچنین عالیها و همکاران [۸]، با در نظرگیری شرایط محیطی متفاوت همچون گاماستریلیزاسیون به بررسی خواص شکست نمونه‌های چاپی پرداخته‌اند.

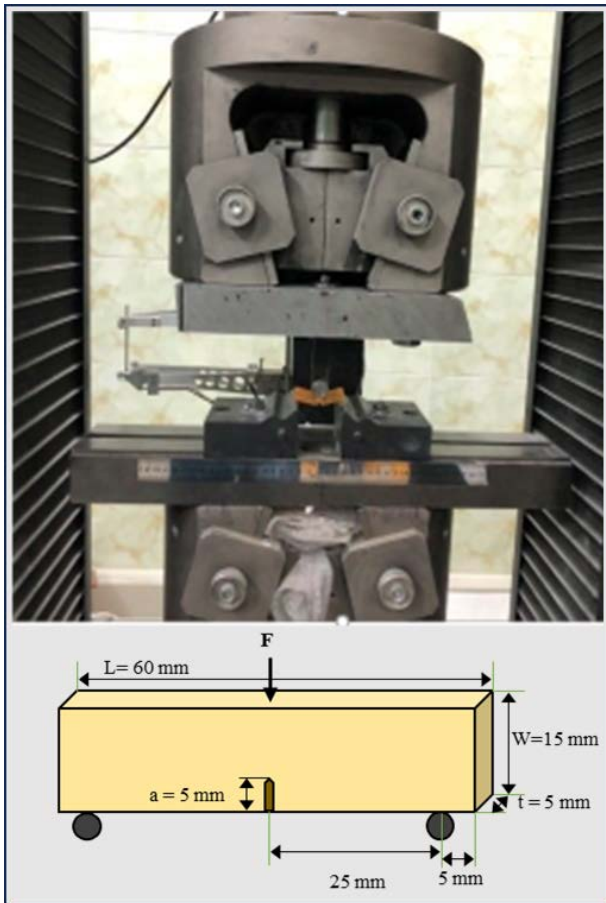
همان‌طور که در مقاله [۱۸] بیان شده است، بررسی اثرگذاری پارامترهای چاپ نیازمند بررسی‌های بیشتر توسط روش‌های آماری است. از این رو در کنار این مطالعات، دسته‌ای از تحقیقات تمرکز خود را بر تحلیل و بهینه‌سازی آماری پارامترهای چاپ گذاشته‌اند. در ادامه به بررسی روش‌های به‌کار برده شده جهت بررسی خواص مکانیکی (خواص کششی یا شکست) قطعات پلیمری تولیدی با استفاده از چاپ سه بعدی بررسی شده است. برای مثال، در برخی از مطالعات از روش طراحی آزمایش (DOE) برای بررسی اثرگذاری پارامترهای چاپ استفاده شده است. مطالعاتی مانند [۱۹-۲۳]، با به‌کارگیری روش تاگوچی نشان داده‌اند که می‌توان با تعداد محدودی آزمایش به نتایج مؤثری در بهینه‌سازی پارامترهای چاپ رسید.

مطالعاتی مانند [۲۴-۲۶]، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) به مدل‌سازی و تحلیل آماری پاسخ‌های مکانیکی مانند بار شکست پرداخته‌اند. از سوی دیگر، مطالعاتی نظیر [۲۷-۲۸] از ترکیب روش‌های آماری مانند سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی ویژگی‌هایی مانند مقاومت خمشی استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که پارامترهایی نظیر: ضخامت لایه، دمای نازل، درصد پرشدگی، زاویه رشته‌های چاپ و الگوی پرکنندگی بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی دارند.

مطالعات دیگری به در نظرگیری هم‌زمان چند خاصیت مکانیکی قطعات چاپ شده پرداخته‌اند. مطالعه انجام شده در [۲۶]، با به‌کارگیری بهینه‌سازی چند هدفه به بررسی هم‌زمان استحکام کششی و مدول یانگ پرداخته است. همچنین [۲۵]، از ترکیب الگوریتم ژنتیک و تاپسیس جهت بررسی هم‌زمان

شکل (۱) نشان‌دهنده جزئیات ابعاد نمونه‌ها و تنظیمات آزمایش شکست است. همچنین شکل (۲) نشان‌دهنده فرایند چاپ و آزمایش شکست قطعات چاپ شده است. جهت بررسی رفتار شکست، نمونه‌های چاپ شده ضریب شدت تنش و بار شکست به عنوان خروجی‌های آزمایش‌های شکست اندازه‌گیری شد. از معادله (۱) برای محاسبه ضریب شدت تنش استفاده شد. همچنین میانگین نتایج این خروجی‌ها برای هر آزمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های شکست در جدول (۳) خلاصه شده است. در این جدول، در آزمایش‌هایی که دارای مقادیر برابر ضخامت لایه و تراکم داخلی هستند، مقدار ماده مصرفی یکسان است زیرا تنها این دو پارامتر به‌طور مستقیم بر حجم مواد مصرفی تأثیرگذار هستند.

$$K_I = \frac{3PS}{tW^2} \sqrt{\pi a Y_I} \quad (1)$$



شکل (۱) ابعاد نمونه‌ها و تنظیمات آزمایش شکست

ساخت و میزان ماده مصرفی انجام می‌شود تا چارچوبی مؤثر برای ارتقای کیفیت و بهره‌وری در تولید قطعات چاپ سه‌بعدی در بستر تولید ابری ارائه شود.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای چاپ بر خواص شکست، نمونه‌هایی با ضخامت لایه، تراکم چاپ و سرعت چاپ مختلف تولید شد. سطوح پارامترهای انتخاب شده در جدول (۱) ارائه شده است.

با در نظر گرفتن تمام ترکیب‌های ممکن با استفاده از طرح عاملی کامل، ۱۲ آزمایش بر اساس سطوح جدول (۱) طراحی شد. برای بررسی خواص شکست نمونه‌ها در مود I، دو نمونه برای هر آزمایش (۲۴ نمونه) تولید شده است. جدول (۲) نشان‌دهنده جزئیات چاپ قطعات در هر کدام از آزمایش‌ها است. در طراحی آزمایش، به‌منظور بررسی تأثیر همزمان سرعت و تراکم، هر سطح از تراکم با دو سطح متفاوت از سرعت ترکیب شده است. اگر چه در شرایط عملی ممکن است با افزایش تراکم، نیاز به کاهش سرعت وجود داشته باشد، اما در این آزمایش هدف بررسی مستقل و ترکیبی اثر پارامترها بوده است.

جدول (۱) سطوح پارامترهای چاپ

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
ضخامت لایه (mm)	۰.۱	۰.۲	۰.۳
تراکم چاپ (%)	۵۰	۷۰	-
سرعت چاپ (mm/min)	۲۰۰۰	۳۰۰۰	-

جدول (۲) تنظیمات آزمایش‌ها

آزمایش	ضخامت لایه (mm)	تراکم چاپ (%)	سرعت چاپ (mm/min)
۱	۰.۱	۵۰	۲۰۰۰
۲	۰.۱	۵۰	۳۰۰۰
۳	۰.۱	۷۰	۲۰۰۰
۴	۰.۱	۷۰	۳۰۰۰
۵	۰.۲	۵۰	۲۰۰۰
۶	۰.۲	۵۰	۳۰۰۰
۷	۰.۲	۷۰	۲۰۰۰
۸	۰.۲	۷۰	۳۰۰۰
۹	۰.۳	۵۰	۲۰۰۰
۱۰	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰
۱۱	۰.۳	۷۰	۲۰۰۰
۱۲	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰

بین گروهی به مقدار بسیار کوچکی می‌رسد یا به صفر میل می‌کند و در نتیجه مقدار F نیز صفر به دست می‌آید.

در این پژوهش، بررسی خروجی‌ها نشان داد که میانگین ضریب شدت تنش برای سرعت‌های چاپ ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ mm/min به ترتیب برابر با ۱.۷۵۲ و ۱.۷۵۳ است که بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. این موضوع سبب می‌شود که با توجه به اثر سرعت چاپ به تنهایی نمی‌توان تأثیرگذاری این عامل را بررسی کرد. با این حال، اثر متقابل این عامل با تراکم داخلی تقریباً معنادار است. به همین دلیل، انتخاب سطح مناسب برای سرعت چاپ، در بخش بعد، با اتکا به نمودار اثرات متقابل انجام شده است.

بررسی تأثیر ورودی‌ها بر انرژی شکست، اهمیت و تأثیر عامل ضخامت بر این خروجی را نشان می‌دهد. با این حال، انرژی شکست تحت تأثیر اثرات متقابل چگالی-سرعت و ضخامت-سرعت نیز قرار می‌گیرد. این اثرات را در بخش بعد با استفاده از نمودار اثرات متقابل بیشتر بررسی خواهیم کرد. همچنین نمودارهای پارتو اثرات پارامترهای چاپ بر خروجی‌های آزمایش شکست در شکل (۳) نشان داده شده است.

نمودار پارتو اثرات استاندارد شده، اهمیت نسبی عوامل و تعامل‌های مؤثر بر پاسخ مورد بررسی را به صورت تصویری نمایش می‌دهد. در این نمودار، میله‌هایی که از خط آستانه معنی‌داری عبور می‌کنند نشان‌دهنده عوامل معنادار آماری هستند که بیشترین تأثیر را بر خروجی دارند. در نمودارهای ارائه شده در شکل (۳)، عامل‌های اصلی شامل ضخامت لایه، تراکم و سرعت چاپ به ترتیب به صورت A، B و C و اثرات متقابل به صورت AB، AC و BC نشان داده شده است. نتایج این نمودار با یافته‌های تحلیل واریانس (ANOVA) به طور کامل همخوانی دارد و تصویری روشن از اهمیت هر یک از پارامترهای فرآیندی و تعاملات آنها ارائه می‌دهد.

جدول (۴) نتایج آنالیز واریانس ضریب شدت تنش

منبع	F-value	P-value
ضخامت	۱۴.۹۷	۰.۰۶۳
تراکم	۲۰.۹۵	۰.۰۴۵
سرعت	۰.۰۰	۰.۹۵۲
ضخامت * تراکم	۱۳.۷۹	۰.۰۶۸
ضخامت * سرعت	۹.۱۳	۰.۰۹۹
تراکم * سرعت	۴.۱۲	۰.۱۸۵

جدول (۵) نتایج آنالیز واریانس انرژی شکست

منبع	F-value	P-value
------	---------	---------



شکل (۲) فرایند ساخت و آزمایش شکست قطعات تولید شده با

تکنولوژی FDM

جدول (۳) نتایج آزمایش شکست در مود I

شماره آزمایش	ضریب شدت تنش (MPa√m)	انرژی شکست (J)	زمان (min)	مواد مصرفی (gr)
۱	۱.۴۸	۰.۹۴	۲۹	۳.۳۱
۲	۰.۹۶	۰.۵۷	۲۰	۳.۳۱
۳	۱.۹۰	۰.۳۴	۳۵	۴.۱۷
۴	۱.۸۵	۰.۴۹	۲۵	۴.۱۷
۵	۱.۶۹	۰.۴۵	۱۵	۳.۴۹
۶	۱.۹۶	۰.۲۹	۱۱	۳.۴۹
۷	۱.۵۳	۰.۲	۱۸	۴.۲۸
۸	۱.۹۱	۰.۳۲	۱۳	۴.۲۸
۹	۱.۸۶	۰.۵۴	۱۱	۳.۷۴
۱۰	۱.۷۶	۰.۷۹	۸	۳.۷۴
۱۱	۲.۰۵	۰.۳۸	۱۳	۴.۴۸
۱۲	۲.۰۸	۱.۱۲	۹	۴.۴۸

۲-۱- تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از آزمون‌های آماری

در این بخش در ابتدا اهمیت پارامترهای ورودی بر خروجی‌های به دست آمده با استفاده از آنالیز واریانس بررسی می‌شود. تحلیل‌های آماری تعیین می‌کند که آیا تغییر در سطوح یک عامل، می‌تواند تأثیر معناداری بر متغیر وابسته داشته باشد. در این روش فرض صفر (H_0) بیان می‌کند که هیچ تفاوت معناداری بین میانگین سطوح مختلف یک عامل وجود ندارد. به عبارت دیگر، اثر عامل بر متغیر وابسته ناچیز است و هیچ تعامل معناداری بین عوامل وجود ندارد. در صورتی که مقدار P -value کمتر از سطح معناداری (۰.۰۵) باشد، فرض صفر رد شده و نتیجه می‌گیریم که تأثیر عامل معنادار است.

جداول (۴) و (۵) به ترتیب نشان‌دهنده جدول آنالیز واریانس ضریب شدت تنش و انرژی شکست است. با توجه به نتایج به دست آمده، تراکم چاپ بیشترین تأثیر را بر ضریب شدت تنش دارد و پارامتر ضخامت تقریباً اثرگذار است. در خصوص مقدار F که برای عامل سرعت چاپ در در جدول (۴) صفر گزارش شده است، توضیح این نکته ضروری است که F -value نسبت واریانس بین گروهی به واریانس درون گروهی را نشان می‌دهد. اگر میانگین اعداد گزارش شده برای ضریب شدت تنش در سطوح مختلف این عامل تقریباً برابر باشد، واریانس

تراکم	۱۸۳۴.۱۶	۰.۰۰
سرعت	۰.۰۰	۱.۰۰

۲-۲- نمودار اثرات اصلی و اثرات متقابل

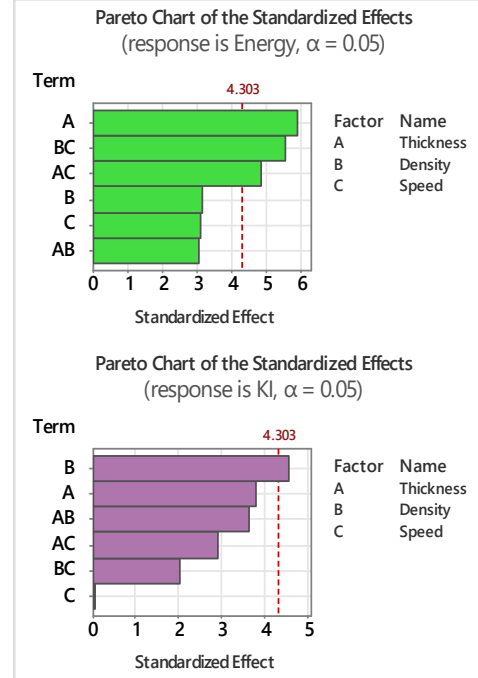
شکل (۴) و شکل (۵) به ترتیب نشان‌دهنده نمودارهای اثرات عامل‌های اصلی و نمودار اثرات متقابل بر متغیر خروجی را نشان می‌دهند. نمودار اثرات اصلی نشان می‌دهد که چگونه تغییر در یک عامل خاص (ضخامت، تراکم و یا سرعت) بر میانگین پاسخ تأثیر می‌گذارد. در این نمودار، شیب مثبت به این معنی است که افزایش عامل باعث افزایش پاسخ و شیب منفی به معنی افزایش عامل باعث کاهش پاسخ شده است. نمودار اثرات متقابل نحوه تأثیر متقابل دو یا چند عامل بر پاسخ را نشان می‌دهد. اگر خطوط به طور واضحی متقاطع شوند، یعنی بین عوامل اثر متقابل وجود دارد.

در بخش قبل تأثیر چشمگیر عامل اصلی تراکم بر ضریب شدت تنش نشان داده شد. با توجه به نمودار اثرات اصلی، می‌توان سطح ۷۰ درصد را برای این عامل انتخاب کرد تا این خروجی را ماکزیمم کرد. جهت تعیین مقدار سطح مناسب برای ضخامت لایه، نمودار اثر اصلی و همچنین نمودار اثرات متقابل تراکم-ضخامت در سطح ۷۰ برای تراکم، مقدار ۰.۳ را می‌توان پیشنهاد داد.

همچنین جهت تعیین سرعت چاپ با توجه به افقی بودن نمودار، اثرات متقابل نمی‌تواند در انتخاب سطوح کمک‌کننده باشد. نمودار اثر متقابل تراکم-سرعت در سطح ۷۰ برای تراکم، نشان می‌دهد با انتخاب سرعت ۳۰۰۰ می‌توان به ضریب شدت تنش بالاتری دست یافت. بنابراین سطوح پیشنهادی برای حداکثرسازی ضریب شدت تنش برابر با ۰.۳ و ۷۰ و ۳۰۰۰ به ترتیب برای ضخامت، تراکم و سرعت است.

همچنین با توجه به تأثیر بسیار بالای عامل ضخامت در انرژی شکست، ابتدا سطح این عامل تعیین شد. با توجه به نمودار اثرات اصلی، افزایش ضخامت از سطح ۰.۱ به ۰.۲ نشان‌دهنده کاهش انرژی شکست است، اما تغییر سطح این عامل از ۰.۲ به ۰.۳ نشان می‌دهد به انرژی شکست بیشتری برای شکست قطعه نیاز است. همچنین با توجه به تأثیر چشمگیر اثر متقابل ضخامت-سرعت، می‌توان از نمودار اثرات متقابل جهت تعیین عامل سرعت استفاده کرد. با توجه به انتخاب ضخامت در سطح ۰.۳، انتخاب سرعت در سطح ۳۰۰۰ می‌تواند تأثیر مثبت بر خروجی بگذارد. در نهایت با توجه به تأثیر چشمگیر اثر متقابل

ضخامت	۳۵.۹۶	۰.۰۲۷
تراکم	۱۰.۰۹	۰.۰۸۶
سرعت	۹.۸۲	۰.۰۸۹
ضخامت * تراکم	۱۰.۰۷	۰.۰۹۰
ضخامت * سرعت	۲۴.۳۵	۰.۰۳۹
تراکم * سرعت	۳۱.۰۶	۰.۰۳۱



شکل (۳) نمودار پارتو اثر عامل‌های اصلی و متقابل برای انرژی شکست و ضریب شدت تنش

با توجه به اهمیت زمان و مقدار مواد مصرفی در تحلیل‌های مرتبط با ساخت و تولید، تأثیر پارامترهای فرایند چاپ بر این دو خروجی نیز بررسی شد. جدول (۶) و (۷) به ترتیب نشان‌دهنده نتایج آنالیز واریانس اثرات اصلی بر روی زمان ساخت و مواد مصرفی است. با توجه به نتایج به‌دست آمده همانطور که انتظار داشتیم، ضخامت لایه‌ها، تراکم و سرعت چاپ هر سه بر زمان ساخت موثر هستند. همچنین بر میزان مواد مصرفی تنها ضخامت و تراکم نیز موثر هستند.

جدول (۶) نتایج آنالیز واریانس زمان

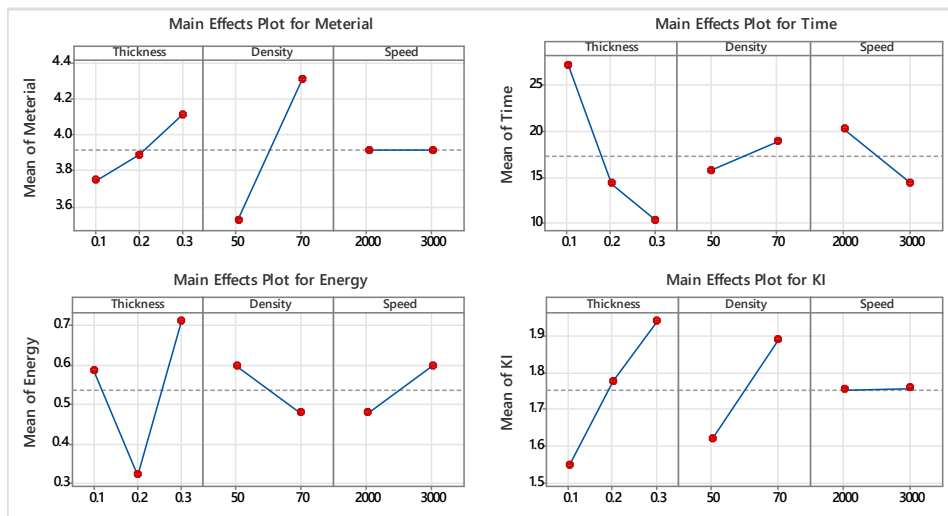
منبع	F-value	P-value
ضخامت	۷۳.۵۳	۰.۰۰
تراکم	۷.۰۰	۰.۰۳۳
سرعت	۲۳.۷۵	۰.۰۰۲

جدول (۷) نتایج آنالیز واریانس مواد مصرفی

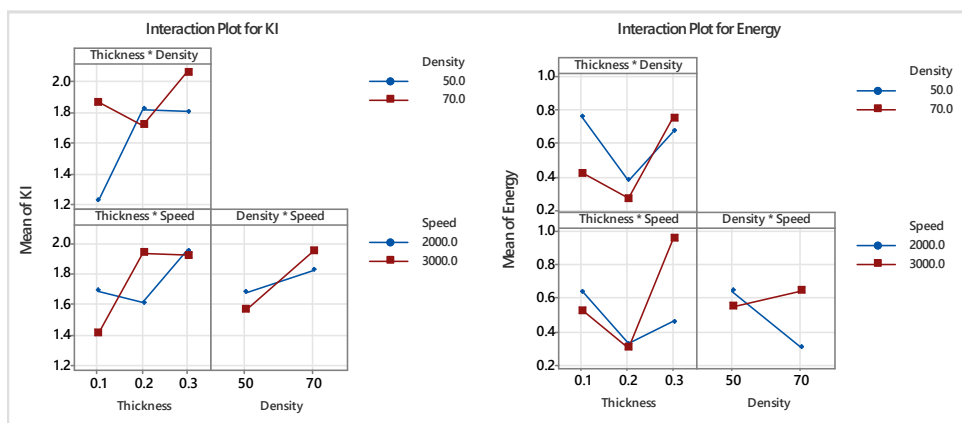
منبع	F-value	P-value
ضخامت	۱۳۳.۹۳	۰.۰۰

نمودار عوامل اصلی را مد نظر قرار دهیم امکان انتخاب سطح ۵۰ برای این عامل وجود داشت.

تراکم- سرعت و انتخاب عامل سرعت در سطح ۳۰۰۰، سطح ۷۰ برای عامل تراکم انتخاب می‌شود. این در حالی است که اگر تنها



شکل (۴) نمودار اثرات اصلی برای زمان، مواد مصرفی، انرژی شکست و ضریب شدت تنش



شکل (۵) نمودار اثرات متقابل برای انرژی شکست و ضریب شدت تنش

شده (Fit) در صورت انتخاب سطوح پیشنهادی و همچنین بازه اطمینان (بازه‌ای برای میانگین متغیر پاسخ) و بازه پیش‌بینی (بازه‌ای برای یک مشاهده جدید) گزارش شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترکیب پیشنهادی منحصر به فرد جهت بهینه‌سازی همزمان تمام متغیرهای پاسخ وجود ندارد. جهت پیشنهاد یک ترکیب برای تمامی خروجی‌ها، تمامی آن‌ها به‌طور همزمان در نظر گرفته شد. چهار مدل بهینه‌سازی با اهمیت متفاوت خروجی‌ها مطابق جدول (۹) بررسی شده است. در مدل (۱)، اهمیت تمامی خروجی‌ها برابر در نظر گرفته شده است. در مدل (۲)، اهمیت خصوصیات اقتصادی بیشتر از خصوصیات مکانیکی و در مدل‌های (۳) و (۴) اهمیت خصوصیات مکانیکی بیشتر از خصوصیات اقتصادی در نظر گرفته شده است.

برای دو خروجی زمان و مواد مصرفی، ترجیح بر انتخاب سطوحی است که سبب کاهش این دو خروجی شود. برای عامل زمان، سطح ۰.۳، ۵۰ و ۳۰۰۰ برای ضخامت، تراکم و سرعت چاپ پیشنهاد می‌شود. همچنین برای مواد مصرفی، ضخامت ۰.۱ و تراکم ۵۰ درصد پیشنهاد می‌شود و سرعت تأثیری بر مواد مصرفی ندارد.

۳-۲- بهینه‌سازی عامل‌ها

در این بخش، هدف ارزیابی بهترین ترکیب ورودی‌ها برای هر خروجی، با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Minitab است. جدول (۸) ترکیب بهینه برای هر پارامتر را ارائه می‌دهد. همچنین در این جدول، مقدار برآورد

۲-۴- انتخاب پارامترهای ورودی با روش تاپسیس

در این مطالعه، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (TOPSIS) استفاده شده است تا بتوانیم یک ارزیابی کلی از شرایط بهینه‌سازی فرآیند با در نظر گرفتن همه خروجی‌ها به‌طور هم‌زمان ارائه دهیم. در واقع، تاپسیس نقش مکمل را ایفا کرده است و انتخاب بهینه‌ترین ترکیب پارامترها را با توجه به تمام شاخص‌ها امکان‌پذیر ساخته است. بنابراین، استفاده از این روش ترکیبی، دید جامع‌تری برای بهینه‌سازی فراهم می‌سازد. این روش توسط هوانگ و یون (۱۹۸۱) جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس معیارهای تصمیم‌گیری ارائه شد [۳۱]. در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره (MADM)، روش تاپسیس به‌دلیل سادگی و مفهوم اساسی آن که بهترین راه‌حل، نزدیک‌ترین گزینه به راه‌حل ایده‌آل مثبت و دورترین گزینه از راه‌حل ایده‌آل منفی است، بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. در ادامه، ابتدا مسئله کلی تصمیم‌گیری چند معیاره معرفی شده است و سپس مراحل روش تاپسیس شرح داده می‌شود.

۲-۴-۱- فرموله‌سازی مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره

تصمیم‌گیری چند معیاره با هدف ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها $A_i (i=1,2,...,I)$ بر اساس معیارهای معین $C_j (j=1,2,...,J)$ تعریف می‌شود. مجموعه گزینه‌ها A_i ، انتخاب‌های موجود برای تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهند که نیاز به رتبه‌بندی دارند. مجموعه معیارها C_j ، عوامل مؤثر بر انتخاب‌های تصمیم‌گیرنده هنگام رتبه‌بندی گزینه‌ها هستند. بردار وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی معیارها است. وزن‌های معیارها $W_j (j=1,2,...,J)$ را می‌توان به‌صورت یک بردار مطابق معادله (۲) ارائه کرد.

$$W = W_j \quad (2)$$

ترجیح تصمیم‌گیرنده برای هر گزینه در برابر هر معیار به عنوان امتیاز عملکرد $x_{ij} (i=1,2,...,I; j=1,2,...,J)$ شناخته می‌شود. همان‌طور که در معادله (۳) نشان داده شده است، این امتیازات عملکرد می‌توانند در قالب یک ماتریس تصمیم ارائه شوند.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \dots & x_{IJ} \end{pmatrix} \quad (3)$$

جدول (۸) نتایج بهینه‌سازی خروجی‌ها به صورت انفرادی

خروجی	ضخامت	تراکم	سرعت	برآورد	بازه اطمینان	بازه پیش‌بینی
شدت تنش	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰	۲.۱۰۹	(۱.۷۱۱, ۲.۵۰۸)	(۱.۵۱۹, ۲.۷۰۰)
انرژی شکست	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰	۱.۱۰۵	(۰.۸۴۴, ۱.۳۶۷)	(۰.۷۱۸, ۱.۴۹۳)
زمان	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	۵.۷۵۰	(۲.۵۹۰, ۸.۹۱۰)	(۰.۰۰, ۱۱.۵۸۰)
مواد مصرفی	۰.۱	۵۰	۳۰۰۰	۳.۳۴۲	(۳.۲۹۲, ۳.۳۹۱)	(۳.۲۵۱, ۳.۴۳۲)

جدول (۹) مدل‌های بهینه‌سازی خروجی‌ها به طور همزمان

خروجی	هدف	مقدار اهمیت خروجی			
		مدل (۱)	مدل (۲)	مدل (۳)	مدل (۴)
شدت تنش	بیشینه‌سازی	۱	۱	۵	۱۰
انرژی شکست	بیشینه‌سازی	۱	۱	۵	۱۰
زمان	کمینه‌سازی	۱	۵	۱	۱
مواد مصرفی	کمینه‌سازی	۱	۵	۱	۱

نتایج بهینه‌سازی در جدول (۱۰) ارائه شده است. مطلوبیت ترکیبی (Composite Desirability) در بهینه‌سازی خروجی‌ها به طور هم‌زمان، یک معیار کلی است که برای ارزیابی کیفیت کلی یک مجموعه از پاسخ‌ها در فرآیندهای چندهدفه به‌کار می‌رود. این معیار به صورت میانگین مطلوبیت فردی هر کدام از خروجی‌ها به‌دست می‌آید. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول (۱۰)، ترکیب (۰.۳، ۵۰ و ۳۰۰۰) به عنوان یک راه‌حل مناسب در تمامی مدل‌ها پیشنهاد شده است.

جدول (۱۰) نتایج بهینه‌سازی خروجی‌ها به طور همزمان

شماره مدل	سطوح پیشنهادی			مطلوبیت ترکیبی
	ضخامت	تراکم	سرعت	
مدل (۱)	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	٪۷۳.۸۲۲
مدل (۲)	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	٪۷۸.۵۵۷
مدل (۳)	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	٪۶۹.۳۷۳
مدل (۴)	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	٪۶۸.۳۹۹

این در حالی است که انتظار داریم با افزایش اهمیت خواص مکانیکی، تغییری در سطوح پیشنهادی تراکم چاپ ایجاد شود. تاثیر تغییرات وزن‌ها، تنها سبب کاهش مطلوبیت ترکیبی شده است. این به این معنی است که با افزایش وزن خواص مکانیکی، انتخاب این سطوح سبب کاهش مطلوبیت ترکیبی می‌شود اما سطح پیشنهادی در خروجی تغییری نکرده است. در بخش بعد جهت بررسی بیشتر از روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب بهترین ترکیب ورودی‌ها استفاده شد.

مرحله ۲: در این مرحله وزن معیارها با امتیازات نرمال شده ادغام می‌شود تا امتیاز عملکرد نرمال شده و وزن دار v_{ij} از ترکیب معادلات (۲) و (۶) مطابق معادله (۷) محاسبه شود. این امتیازات برای تشکیل ماتریس تصمیم نرمال شده و وزن دار در معادله (۸) به کار می‌روند.

$$v_{ij} = W_j * y_{ij}; (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J) \quad (7)$$

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{I1} & \dots & v_{IJ} \end{pmatrix} \quad (8)$$

مرحله ۳: در این مرحله مجموعه‌های راه حل ایده آل مثبت A^+ و ایده آل منفی A^- به ترتیب مطابق معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$A^+ = [v_1^*, v_2^*, \dots, v_J^*] \quad (9)$$

$$A^- = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_J^-] \quad (10)$$

$$v_j^* = \begin{cases} \max v_{ij}, & \text{if } j \text{ is a benefit attribute} \\ \min v_{ij}, & \text{if } j \text{ is a cost attribute} \end{cases} \quad (11)$$

$$v_j^- = \begin{cases} \min v_{ij}, & \text{if } j \text{ is a benefit attribute} \\ \max v_{ij}, & \text{if } j \text{ is a cost attribute} \end{cases} \quad (12)$$

مرحله ۴: در این مرحله فاصله امتیاز هر گزینه از راه حل های ایده آل مثبت و منفی با استفاده از تئوری فاصله اقلیدسی محاسبه می‌شود. معادلات (۱۳) و (۱۴) فرآیند محاسبه این معیار را نشان می‌دهند.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (13)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (14)$$

مرحله ۵: در آخرین مرحله، امتیاز ترجیح کلی V_i برای هر گزینه مطابق معادله (۱۵) محاسبه می‌شود. رتبه بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر بالاتر انجام می‌شود [۳۰].

$$V_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (15)$$

در این مطالعه، آزمایش‌های شکست انجام شده عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری و خروجی‌های آزمایش شکست (ضرب

با توجه به ماتریس تصمیم و بردار وزن‌ها در معادلات (۲) و (۳)، مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره φ مطابق معادله (۴) تعریف می‌شود.

$$\varphi = \{X, W\} \quad (4)$$

این مسئله با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره همچون تاپسیس حل می‌شود. به‌طور کلی، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نیازمند (الف) یک فرآیند نرمال سازی و (ب) یک تکنیک تجمع امتیاز هستند. نرمال سازی، امتیاز عملکرد را به یک واحد اندازه‌گیری قابل مقایسه تبدیل می‌کند. یک امتیاز وزنی کلی $V_i = (i = 1, 2, \dots, I)$ برای هر گزینه با به کارگیری تکنیک تجمع محاسبه می‌شود که وزن‌ها را با امتیازات عملکرد ترکیب می‌کند. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس این امتیاز کلی انجام می‌شود.

۲-۴-۲- روش تاپسیس

این روش بر اساس این اصل استوار است که بهترین گزینه، کوتاه‌ترین فاصله را از راه حل ایده آل مثبت و طولانی‌ترین فاصله را از راه حل ایده آل منفی دارد. رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از یک شاخص کلی که بر اساس فاصله آن‌ها از راه حل‌های ایده آل محاسبه می‌شود، انجام می‌گیرد. روش تاپسیس در قالب مراحل زیر توضیح داده می‌شود:

مرحله ۱: ابتدا، هر امتیاز عملکرد x_{ij} در ماتریس ارائه شده در معادله (۳)، بر نرم آن تقسیم می‌شود تا نرمال شود. امتیازات نرمال شده $y_{ij} = (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J)$ مطابق معادله (۵) محاسبه می‌شوند.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I x_{ij}^2}} \quad (5)$$

با توجه به اینکه وجود مقیاس‌های نابرابر برای امتیازات عملکرد ممکن است چالش‌هایی در مقایسه مستقیم ایجاد کند، این فرآیند تبدیل، مقایسه بین معیارها را با واحدهای بدون بعد آسان‌تر می‌کند. امتیازات عملکرد نرمال شده را می‌توان به صورت ماتریس ارائه شده در معادله (۶) نمایش داد.

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{I1} & \dots & y_{IJ} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ایده‌آل مثبت و منفی، قادر است بهینه‌ترین تعادل را در شرایط چندمعیاره برقرار کند. در شرایط واقعی انعطاف روش تاپسیس در ارائه راه‌حل‌های متفاوت با توجه به تغییر وزن‌ها، آن را برای شرایط صنعتی واقعی که اولویت‌های طراحی، هزینه و عملکرد متغیر هستند، مناسب‌تر می‌کند.

۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، خواص شکست قطعات تولیدی با استفاده از تکنولوژی FDM بررسی شد. هدف، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند چاپ سه‌بعدی به طوری است که سبب بیشینه‌سازی دو معیار مکانیکی (ضریب شدت تنش و انرژی شکست) و کمینه‌سازی دو معیار اقتصادی (زمان چاپ و میزان مصرف ماده) شود. در ابتدا خروجی‌ها با استفاده از آزمایش‌های آماری بررسی شدند. نتایج آنالیز واریانس نشان‌دهنده تاثیر چشمگیر پارامتر تراکم بر ضریب شدت تنش و پارامتر ضخامت لایه‌های چاپ بر انرژی شکست است. همچنین جهت ارائه یک ترکیب از سطوح پیشنهادی، داده‌ها با بهینه‌ساز مینی‌تب و روش تاپسیس بررسی شد. نتایج بررسی‌ها با روش تاپسیس نشان می‌دهد، در صورتی که معیارهای اقتصادی از اولویت بالاتری برخوردار باشد ترکیب بهینه پارامترها به صورت ضخامت لایه ۰.۳ (mm)، تراکم داخلی ۵۰ درصد و سرعت چاپ ۳۰۰۰ (mm/min) پیشنهاد می‌شود. اما در صورت برابری اهمیت معیارهای اقتصادی و اجتماعی و یا افزایش اهمیت معیارهای اقتصادی، ترکیب پیشنهادی پارامترها شامل ضخامت لایه ۰.۳ (mm)، تراکم داخلی ۷۰ درصد و سرعت چاپ ۳۰۰۰ (mm/min) موجب دستیابی به بالاترین ضریب شدت تنش (۲۰۰۸ MPa $\sqrt{m}$) و انرژی شکست (۱.۱۲ J) شد. از نظر اقتصادی نیز این ترکیب زمان چاپ ۹ دقیقه و مصرف ماده ۴.۴۸ گرم را به همراه داشت. در مقایسه بین روش‌ها، بهینه‌ساز مینی‌تب همواره ترکیب ثابتی را برای مقادیر مختلف اهمیت معیارهای اقتصادی و مکانیکی پیشنهاد داد، در حالی که روش تاپسیس بسته به اولویت معیارها پاسخ‌های متفاوتی ارائه کرد و از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بود.

این رفتار حاکی از آن است که بهینه‌ساز مینی‌تب ممکن است در شرایط تصمیم‌گیری چندمعیاره ناتوان باشد. در مقابل، روش تاپسیس با ارائه جواب‌های متفاوت در شرایط تغییر اهمیت معیارها، انعطاف‌پذیری بیشتری نشان داد. این ویژگی بیانگر قدرت این روش در ایجاد تعادل میان معیارهای متضاد است که

شدت تنش، انرژی شکست، زمان و مقدار ماده مصرفی) به عنوان معیارهای تصمیم هستند. امتیازات عملکرد، مقادیر خروجی‌های به‌دست آمده (معیارهای اقتصادی و مکانیکی) برای هر آزمایش است. بنابراین روش تاپسیس برای رتبه‌بندی ۱۲ گزینه براساس ۴ معیار استفاده شد. همچنین، رتبه‌بندی گزینه‌ها تحت وزن‌های مختلف برای بررسی حساسیت معیارهای انتخاب‌شده نسبت به اهمیت معیارهای تصمیم انجام شد. این وزن‌ها براساس مقادیر داده شده در جدول (۹) انتخاب شد تا نتایج با نتایج ارائه شده در بخش قبل مقایسه شود. نتایج اجرای روش تاپسیس در جدول (۱۱) خلاصه شده است.

جدول (۱۱) نتایج انتخاب تنظیمات چاپ با استفاده از روش تاپسیس

شماره مدل	سطوح پیشنهادی			امتیاز نهایی روش تاپسیس
	ضخامت	تراکم	سرعت	
مدل (۱)	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰	۰.۸۷۶۸
مدل (۲)	۰.۳	۵۰	۳۰۰۰	۰.۹۰۰۷
مدل (۳)	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰	۰.۹۶۵۳
مدل (۴)	۰.۳	۷۰	۳۰۰۰	۰.۹۸۲۲

نتایج نشان می‌دهد، در صورت برابر بودن اهمیت خروجی‌ها، سطوح ۰.۳، ۷۰ و ۳۰۰۰ جهت تنظیم پارامترهای چاپ پیشنهاد می‌شود. در صورتی که معیارهای اقتصادی (زمان و مواد مصرفی) از اهمیت بیشتری برخوردار باشند، با انتخاب تراکم ۵۰ درصد میتوان در مقدار ماده مصرفی و همچنین زمان صرفه‌جویی کرد. اما با افزایش اهمیت معیارهای مکانیکی که بر کیفیت قطعه چاپی بسیار موثر هستند تراکم ۷۰ درصد پیشنهاد می‌شود. این در حالی است که سطوح پیشنهادی با استفاده از تخمین خروجی‌ها با رگرسیون و بهینه‌سازی در نرم‌افزار مینی‌تب، تحت شرایط مختلف اهمیت تنها یک گزینه پیشنهاد شد.

با در نظر گیری حساسیت این دو روش به تغییر اهمیت معیارها، ارائه نتایج ثابت در مدل‌های ۱-۴، توسط بهینه‌سازی به‌کار گرفته شده نشان‌دهنده عدم حساسیت این روش به تغییر وزن‌ها در مسئله مورد بررسی است. این در حالی است که در روش تاپسیس توانست تأثیر وزن‌دهی را بهتر در نظر بگیرد و پاسخ‌های متناسب‌تری ارائه دهد. این موضوع در شرایطی که اولویت‌های اقتصادی و مکانیکی متغیر باشند، بسیار مهم است. بهینه‌سازی در شرایطی که یک معیار به شدت غالب باشد (به‌طور مثال: فقط معیارهای اقتصادی)، ممکن است به خوبی عمل کند اما در مسائل پیچیده با چند معیار متضاد، انعطاف کمتری دارد. روش تاپسیس با در نظر گرفتن فاصله هم‌زمان از

- [5] C. J. Choudhari, P. S. Thakare, and S. K. Sahu, "3D Printing of Composite Sandwich Structures for Aerospace Applications," in *High-Performance Composite Structures: Additive Manufacturing and Processing*, pp. 45–73, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-7377-1_3.
- [6] Y. Vahidshad, P. Aalimehr, K. Abrinia, and A. Info, "Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Process Factors for 3D Printing of Maraging 300 Steel Parts via Taguchi Method," *J. Sp. Sci. Technol. Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 52–63, 2024, doi: 10.22034/jssta.2024.417595.1140.
- [7] Y. Vahidshad and F. Ashkan, "Characterization of the Mechanical Properties of Maraging 300 Alloy Produced by Selective Laser Melting Additive Manufacturing Method Used Digital Image Correlation Technique," *J. Sp. Sci. Technol. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 37–48, 2024, doi: 10.22034/jssta.2024.450470.1157.
- [8] M. R. M. Aliha, N. Nazemzadeh, S. M. N. Ghoreishi, and A. R. Kafshgar, "The impact of sterilization, body environment condition and raster orientation on tensile-shear cracking of sub-sized 3D printed specimens," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 126, p. 103953, 2023, doi: 10.1016/j.tafmec.2023.103953.
- [9] D. Veeman *et al.*, "Fracture toughness of innovative material fabricated through additive manufacturing: Experimental and numerical prediction," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1080/15376494.2024.2445219.
- [10] E. Khedri, H. reza Karimi, M. R. M. Aliha, N. Nazemzadeh, B. Talebi, and R. Aleali, "Tensile, flexural, and mode-I cracking behavior of interpenetrating phase composites (IPC), developed using additively manufactured PLA-based structures with different infill densities and epoxy resin polymer as matrix," *Results Eng.*, vol. 22, p. 102162, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102162.
- [11] T. D. McLouth, J. V. Severino, P. M. Adams, D. N. Patel, and R. J. Zaldivar, "The impact of print orientation and raster pattern on fracture toughness in additively manufactured ABS," *Addit. Manuf.*, vol. 18, pp. 103–109, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.09.003.
- [12] C. Vălean *et al.*, "The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 28, pp. 1134–1139, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.128.
- [13] L. Marşavina *et al.*, "Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 274, p. 108766, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108766.
- [14] G. Zhang *et al.*, "Anisotropic and elastoplastic mode-I fracture toughnesses of three additively manufactured polymers fabricated via material extrusion and powder bed fusion," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 46, no. 12, pp. 4776–4782, 2023, doi: 10.1111/ffe.14161.
- [15] B. Ameri, F. Taheri-Behrooz, and M. R. M. Aliha, "Evaluation of the geometrical discontinuity effect on mixed-mode I/II fracture load of FDM 3D-printed parts," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 113, p. 102953, 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.102953.

آن را به رویکردی کارآمدتر برای مسائل نیازمند استراتژی‌های تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر تبدیل می‌کند. بر اساس این یافته‌ها، روش تاپسیس به عنوان تکنیک بهینه‌سازی مناسب‌تر برای انتخاب پارامترهای چاپ سه‌بعدی در شرایطی که اولویت‌بندی بین عملکرد مکانیکی و کارایی اقتصادی متغیر است، توصیه می‌شود.

جهت مطالعات آتی، می‌توان داده‌های مربوط به آزمایش‌های شکست را با استفاده از سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند: تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، ویکور (VIKOR) یا الکتور (ELECTOR) تحلیل کرد. همچنین می‌توان به‌جای تمرکز صرف بر خواص شکست، خواص مکانیکی دیگر مانند خواص کشش و ضربه را نیز مورد بررسی قرار داد. در نهایت، با توجه به اینکه در این پژوهش تنها بارگذاری مود I، مورد بررسی قرار گرفت می‌توان در تحقیقات بعدی، عملکرد قطعات چاپ‌شده تحت مود II (برش) یا ترکیب مود I و II بررسی کرد تا درک کامل‌تری از رفتار مکانیکی در شرایط مختلف بارگذاری به‌دست آید.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [1] Ameri, F. Taheri-Behrooz, and M. R. M. Aliha, "Fracture loads prediction of the modified 3D-printed ABS specimens under mixed-mode I/II loading," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 235, no. May, p. 107181, 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107181.
- [2] M. T. Getachew, M. Z. Shiferaw, and B. S. Ayele, "Recent Advances of Additive Manufacturing for Aerospace Industries: Methods, Materials, Challenges, and Future Outlooks," in *Sustainable Development Research in Manufacturing, Process Engineering, Green Infrastructure, and Water Resources*, 2025, pp. 47–82. doi: 10.1007/978-3-031-77339-6_4.
- [3] B. Ameri, F. Taheri-Behrooz, H. R. Majidi, and M. R. Mohammad Aliha, "Mixed-mode load bearing estimation of the cracked additively manufactured materials using stress/strain-based models," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 29, no. 2, pp. 218–231, 2023, doi: 10.1108/RPJ-11-2021-0316.
- [4] A. Moghanian *et al.*, "New trends in 3D and 4D printed dental and orthopedic Implants: Methods, applications and future directions," *Bioprinting*, vol. 48, p. e00406, 2025, doi: 10.1016/j.bprint.2025.e00406.

- [28] S. Dev and R. Srivastava, "Optimization of fused deposition modeling (FDM) process parameters for flexural strength," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 3012–3016, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.436.
- [29] J. Cui, L. Ren, J. Mai, P. Zheng, and L. Zhang, "3D Printing in the Context of Cloud Manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 74, p. 102256, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102256.
- [30] A. Rajabi-Kafshgar, I. Seyedi, and E. B. Tirkolaee, "Circular closed-loop supply chain network design considering 3D printing and PET bottle waste," *Environ. Dev. Sustain.*, pp. 1–37, 2024, doi: 10.1007/s10668-024-04767-3.
- [31] S. Chakraborty, "TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis," *Decis. Anal. J.*, vol. 2, p. 100021, 2022, doi: 10.1016/j.dajour.2021.100021.
- [16] S. Ilyaei, Y. Abubasir, and R. Sourki, "PLA-based 3D printed porous scaffolds under mixed-mode I/III loading," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 265, p. 108382, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108382.
- [17] N. Nazemzadeh, A. A. Soufivand, and N. Abolfathi, "Computing the bond strength of 3D printed polylactic acid scaffolds in mode I and II using experimental tests, finite element method and cohesive zone modeling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 118, pp. 2651–2667, 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08124-w.
- [18] A. Jaisingh Sheoran and H. Kumar, "Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1659–1672, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.296.
- [19] M. Vishwas and C. K. Basavaraj, "Studies on Optimizing Process Parameters of Fused Deposition Modelling Technology for ABS," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 10, pp. 10994–11003, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.08.057.
- [20] M. Vishwas, C. K. Basavaraj, and M. Vinyas, "Experimental Investigation using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 7106–7114, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.375.
- [21] S. Mahmood, A. J. Qureshi, and D. Talamona, "Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling," *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. 2010, pp. 183–190, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.009.
- [22] A. Alafaghani and A. Qattawi, "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method," *J. Manuf. Process.*, vol. 36, pp. 164–174, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.025.
- [23] A. R. Kafshgar, S. Rostami, M. Aliha, and F. Berto, "Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 34, pp. 71–77, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.12.011.
- [24] A. Shahrjerdi, M. Karamimoghadam, and M. Bodaghi, "Enhancing Mechanical Properties of 3D-Printed PLAs via Optimization Process and Statistical Modeling," *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 4, p. 151, 2023, doi: 10.3390/jcs7040151.
- [25] S. Chinchanihar, S. Shinde, A. Shaikh, V. Gaikwad, and N. H. Ambhore, "Multi-objective Optimization of FDM Using Hybrid Genetic Algorithm-Based Multi-criteria Decision-Making (MCDM) Techniques," *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 105, no. 1, pp. 49–63, 2024, doi: 10.1007/s40033-023-00459-w.
- [26] R. J. R. Pereira, F. A. de Almeida, and G. F. Gomes, "A multiobjective optimization parameters applied to additive manufacturing: DOE-based approach to 3D printing," *Structures*, vol. 55, pp. 1710–1731, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.06.136.
- [27] A. D. Tura and H. B. Mamo, "Characterization and parametric optimization of additive manufacturing process for enhancing mechanical properties," *Heliyon*, vol. 8, no. 7, p. e09832, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09832.