

Signal-to-Noise Ratio Analysis for Evaluating and Optimizing the Impact Strength of Polyamide/Carbon Fiber Polymeric Composites in the 3D Printing Process

Rezgar Hasanzadeh*

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Postal Cod: 671568542, Kermanshah, Iran

Received: 21 December 2024, accepted: 3 March 2025

ABSTRACT

Hypothesis: Precise control of 3D printing process parameters helps improve the final quality of parts and reduce the likelihood of production defects. Therefore, using the signal-to-noise analysis of Taguchi method can be employed for controlling and optimizing the process conditions of 3D printing of polyamide/carbon fiber polymer composites to improve impact strength.

Methods: In this study, polymeric composite samples of polyamide/carbon fiber were fabricated using the fused filament fabrication (FFF) 3D printing process. Three processing parameters-printing temperature, printing speed, and layer height were considered as the main variables, and their effects on the impact strength of the samples were investigated and optimized using the Taguchi method's signal-to-noise ratio analysis.

Findings: The results indicated that higher printing temperatures improved the adhesion between layers and increased the impact strength. By increasing the printing temperature from 220 °C to 240 °C, the impact strength increased from 52.91 kJ/m² to 107.19 kJ/m², representing a 103% improvement in impact strength. By increasing the printing speed from 20 mm/s to 30 mm/s, the impact strength increased from 68.15 kJ/m² to 88.56 kJ/m², representing a 30% improvement. Finally, increasing the layer height up to a certain value led to a decrease in impact strength, followed by a subsequent increase. A layer height of 0.1 mm resulted in the highest impact strength of 94.92 kJ/m². By analyzing the results and using the Taguchi method, the optimal conditions for achieving maximum impact strength were identified as a printing temperature of 240 °C, a printing speed of 30 mm/s, and a layer height of 0.1 mm. Under these optimal conditions, the impact strength of the polyamide/carbon fiber polymer composite samples was 108.15 kJ/m². This study provides effective optimization strategies to enhance 3D printing processes and develop advanced composite materials for industrial applications.

Keywords:

3D printing,
polymeric composite,
carbon fiber,
optimization,
Taguchi

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

Please cite this article using:

Hasanzadeh R., Signal-to-Noise Ratio Analysis for Evaluating and Optimizing the Impact Strength of Polyamide/Carbon Fiber Polymeric Composites in 3D Printing Process, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 37, 363-375, 2024.

تحلیل نسبت سیگنال به نویز برای بررسی و بهینه‌سازی استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن در فرایند چاپ سه‌بعدی

رزگار حسن‌زاده*

کرمانشاه، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، گروه مهندسی مکانیک، کد پستی ۶۷۱۵۶۸۵۴۲

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

چکیده

فرضیه: کنترل دقیق پارامترهای فرایندی چاپ سه‌بعدی به بهبود کیفیت نهایی قطعات و کاهش احتمال نقص‌های تولیدی کمک می‌کند. بنابراین از تحلیل سیگنال به نویز روش تاگوچی می‌توان برای کنترل و بهینه‌سازی شرایط فرایندی چاپ سه‌بعدی کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن به‌منظور بهبود استحکام ضربه‌ای استفاده کرد.

روش‌ها: در این پژوهش، نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن با استفاده از فرایند چاپ سه‌بعدی (FFF) ساخته شدند. سه پارامتر فرایندی دمای چاپ، سرعت چاپ و ارتفاع لایه به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شدند و با بهره‌گیری از تحلیل سیگنال به نویز روش تاگوچی، اثر این پارامترها بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها بررسی و بهینه‌سازی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، دمای چاپ بیشتر موجب بهبود چسبندگی بین لایه‌ها و افزایش استحکام ضربه‌ای می‌شود. با افزایش دمای چاپ از 220°C به 240°C ، استحکام ضربه‌ای از $52/91\text{ kJ/m}^2$ به $107/19\text{ kJ/m}^2$ افزایش یافت که به معنای بهبود 103% آن است. با افزایش سرعت چاپ از 20 mm/s به 30 mm/s ، استحکام ضربه‌ای از $68/15\text{ kJ/m}^2$ به $88/56\text{ kJ/m}^2$ رسید که حاکی از بهبود 30% است. ارتفاع لایه $0/1\text{ mm}$ بیشترین استحکام ضربه‌ای $94/92\text{ kJ/m}^2$ را در پی داشت. با استفاده از روش تاگوچی، شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر استحکام ضربه‌ای شناسایی شدند که شامل دمای چاپ 240°C ، سرعت چاپ 30 mm/s و ارتفاع لایه $0/1\text{ mm}$ بود. در این شرایط بهینه، استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن $108/15\text{ kJ/m}^2$ حاصل شد. این پژوهش با ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مؤثر، به بهبود فرایندهای چاپ سه‌بعدی و توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته در کاربردهای صنعتی کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی

چاپ سه‌بعدی،
کامپوزیت پلیمری،
الیاف کربن،
بهینه‌سازی،
تاگوچی

* پیام‌نگار:

مقدمه

چاپ سه‌بعدی با ساخت رشته‌ذوبی (fused filament fabrication, FFF) به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته ساخت افزایشی، تحول عظیمی در صنایع مختلف ایجاد کرده است [۱]. این فرایند که بر پایه ذوب و لایه‌به‌لایه ساختن مواد پلیمری قرار دارد، امکان تولید قطعات پیچیده و دقیق را با هزینه کمتر و زمان تولید کوتاه‌تر فراهم می‌سازد [۲]. چاپ سه‌بعدی به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا خواص مکانیکی، گرمایی و ساختاری مواد را به‌دقت مطالعه کرده و با تغییر پارامترهای فرایندی نظیر دمای افشانک، سرعت چاپ و ارتفاع لایه، بهینه‌سازی‌های لازم را برای بهبود کیفیت و عملکرد قطعات چاپ‌شده اعمال کنند [۳]. از جنبه صنعتی، این فناوری با فراهم‌آوردن قابلیت تولید قطعات سفارشی و کم‌حجم بدون نیاز به قالب‌سازی سنتی، نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد، بلکه انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی و تولید محصولات فراهم می‌کند [۴]. به همین دلیل، فرایند چاپ سه‌بعدی بر پایه ساخت رشته ذوبی در حوزه‌های مختلفی مانند خودروسازی، هوافضا، پزشکی و الکترونیک به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود و پژوهش‌های فراوانی برای بهبود و توسعه این فناوری در حال انجام است [۵، ۶].

کامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل خواص مکانیکی عالی، وزن کم و مقاومت زیاد در برابر خوردگی، به‌عنوان مواد پیشرفته در صنایع مختلف شناخته می‌شوند [۷]. یکی از مهم‌ترین انواع این کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن است که ترکیبی از خواص استثنایی مکانیکی و فیزیکی را ارائه می‌دهد. الیاف کربن با داشتن مدول کشسانی زیاد، استحکام کششی بسیار زیاد و وزن کم، به‌طور گسترده‌ای در کاربردهایی که به مواد سبک و قوی نیاز دارند، استفاده می‌شود [۸]. از جنبه چاپ سه‌بعدی، کامپوزیت‌های پلی‌آمید-الیاف کربن با استفاده از فرایند ساخت رشته ذوبی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند، زیرا این فناوری امکان تولید قطعات پیچیده و سفارشی با خواص مکانیکی بهبودیافته را فراهم می‌کند [۹]. مطالعه و بهینه‌سازی فرایند چاپ سه‌بعدی این کامپوزیت‌ها به پژوهشگران و صنعتگران اجازه می‌دهد تا پارامترهای مهمی را کنترل کنند و به بهترین ترکیب خواص مکانیکی دست یابند. این مطالعات می‌تواند به تولید قطعاتی کارآمد و استفاده در شرایط سخت و بحرانی منجر شود. به همین دلیل، بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی در چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن از اهمیت بسیاری برخوردار است و می‌تواند به توسعه فناوری‌های نوین و بهبود کاربردهای صنعتی این مواد کمک کند.

Zhang و همکاران [۱۰] بهینه‌سازی هم‌زمان ساختاری و

جهت‌گیری الیاف برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته را ارائه کردند و نشان دادند، این کامپوزیت‌ها در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی خواص مکانیکی بسیار بهتری دارند. کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی با جهت‌گیری بهینه‌شده الیاف، ۳۰۵٪ استحکام بیشتر و ۲۵۶٪ سفتی بیشتر در مقایسه با کامپوزیت‌های چاپ سه‌بعدی مرسوم داشتند. An و همکاران [۱۱] سامانه چاپ سه‌بعدی جدید برای کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته را با روش تزریق مذاب به‌کمک گیره (pin) در محل توسعه دادند و قابلیت چاپ، درجه تزریق و خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ‌شده را ارزیابی کردند. سامانه چاپ جدید کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته الیاف کربنی به‌طور یکنواخت تزریق‌شده و با خواص مکانیکی برتر، به‌ویژه استحکام کششی بیشتر، در مقایسه با سایر روش‌های چاپ تولید کرد. Abdullah و همکاران [۱۲] روش مقرون‌به‌صرفه‌ای را برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های قابل‌پخت با پرتو فرابنفش توسعه دادند که با الیاف کربن پیوسته تقویت شده بودند و اثر پارامترهای مختلف مواد فراوری را بر کیفیت و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چاپ‌شده بررسی کردند. در این مطالعه، اثر متغیرهای مواد و فراوری (گران‌روی رزین، اندازه افشانک و سرعت چاپ) بر کیفیت و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف پیوسته چاپ سه‌بعدی بررسی شد. Rahman و همکاران [۱۳] فرایند چاپ سه‌بعدی برای کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته با استفاده از رزین‌های موجود در بازار را با هدف بهبود خواص مکانیکی قطعه‌های پلیمری چاپ‌شده سه‌بعدی توسعه دادند. خواص کششی کامپوزیت‌های چاپ‌شده کمتر از حد انتظار بود که احتمالاً به‌دلیل عواملی در مراحل پس‌پخت، فرایند چاپ و برهم‌کنش الیاف-رزین بود. Ramanathan و همکاران [۱۴] رویکرد نوینی برای چاپ سه‌بعدی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن کوتاه و به‌طور یکنواخت پخش‌شده در کامپوزیتی از کربن و نایلون ارائه کردند که خواص مکانیکی و گرمایی بهتری در مقایسه با ساختارهای نایلونی اولیه نشان داد. Yu و همکاران [۱۵] روشی برای ساخت رشته‌های (filament) چاپ سه‌بعدی با عملکرد زیاد و تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته از جنس پلی‌اترکتون را با بهینه‌سازی فرایند تزریق مذاب و اندازه‌دهی الیاف توسعه دادند که به استحکام کششی رشته ۱۵۸۹/۶ MPa منجر شد. بهبودها در استحکام کششی رشته و پیوند بین‌لایه‌ای، از پیشرفت بیشتر فناوری چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته برای کاربردهای مهندسی پشتیبانی می‌کند. Mishra و همکاران [۱۶] برخی الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی را

این پژوهش در آن است که با بررسی جامع و سامانمند اثر این پارامترها بر خواص مکانیکی، راهکارهایی عملی برای بهبود عملکرد قطعات چاپ‌شده ارائه می‌دهد. نوآوری‌های پژوهش شامل استفاده از تحلیل سیگنال به نویز برای شناسایی شرایط بهینه و پیاده‌سازی فرایندهای بهینه‌سازی شده برای دستیابی به حداکثر استحکام ضربه‌ای است. این پژوهش نه تنها به توسعه دانش علمی در حوزه مواد کامپوزیتی و فناوری چاپ سه‌بعدی کمک می‌کند، بلکه با ارائه راهکارهای بهینه‌سازی موثر، می‌تواند به بهبود کارایی و کیفیت محصولات صنعتی نیز منجر شود. از این رو، پژوهش حاضر نه تنها از جنبه علمی، بلکه از دیدگاه کاربردهای صنعتی نیز حائز اهمیت است و می‌تواند به پیشرفت فناوری‌ها و فرایندهای تولیدی در صنایع مختلف کمک کند.

تجربی

مواد و دستگاه‌ها

در این پژوهش از کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید تقویت‌شده با الیاف کربن به‌عنوان ماده لازم برای چاپ نمونه‌ها استفاده شد. الیاف کربن استفاده‌شده که دارای طول $10-3 \mu\text{m}$ و قطر $10-5 \mu\text{m}$ بود با مقدار وزنی ۱۵٪ در ماتریس پلیمری پلی‌آمید مخلوط شد. رشته کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن با قطر $1/75 \text{ mm}$ از شرکت پرمان شاپ خریداری شد. برای چاپ نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن از دستگاه CREALITY CR-10 Smart استفاده شد.

روش‌ها

پارامترهای فرایندی

در این پژوهش، دمای چاپ، سرعت چاپ و ارتفاع لایه‌ها به‌عنوان پارامترهای متغیر برای تحلیل سیگنال به نویز انتخاب شدند که دلایل انتخاب این سه پارامتر در ادامه بیان شده است. دمای چاپ یکی از عوامل کلیدی در فرایند چاپ سه‌بعدی است که اثر مستقیمی بر خواص مکانیکی قطعه‌های تولیدشده دارد [۲۴]. تنظیم دمای چاپ در محدوده مناسب باعث می‌شود، مواد به‌درستی ذوب شده و جریان یکنواختی داشته باشند که در نتیجه به پیوند بهتر لایه‌ها و افزایش استحکام مکانیکی قطعه منجر می‌شود. از سوی دیگر، دمای افشانک نامناسب می‌تواند به مشکلاتی چون ترد شدن و ناهماهنگی در ساختار قطعه منجر شود. بنابراین، بررسی و کنترل دقیق دمای چاپ نه تنها بر کیفیت نهایی قطعات اثرگذار است، بلکه زیربنای شکل‌گیری خواص

برای پیش‌بینی خواص خمشی و فشاری قطعات پلی‌لاکتیک (اسید)-الیاف کربن ساخته‌شده از چاپ سه‌بعدی مبتنی بر تزریق مواد توسعه دادند و به هم‌بستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی دست یافتند. الگوریتم‌ها به‌طور مؤثری روابط بین پارامترهای ورودی چاپ سه‌بعدی (دمای چاپ، ضخامت لایه، الگوی پرشدن و سرعت چاپ) و چقرمگی شکست حاصل از قطعات پلی‌لاکتیک (اسید)-الیاف کربن را به دست آوردند. Ju و همکاران [۱۷] عملکرد کامپوزیت پیوسته الیاف هیبریدی کربن-کولار چاپ سه‌بعدی را در الگوی لانه زنبوری مطالعه کردند و نشان دادند، این الگوها نسبت به کامپوزیت‌های الیاف تکی بهبودهای شایان توجهی در مقاومت به ضربه دارند. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند، کامپوزیت‌های هیبریدی کربن-کولار بهترین جاذب انرژی و مقرون‌به‌صرفه‌ترین هستند، در حالی که کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن بیشترین ظرفیت تحمل بار را دارند.

روش تاگوچی به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی فرایندها، نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت و کارایی فرایندهای ساخت و تولید پلیمری دارد [۲۰-۱۸]. این روش با بهره‌گیری از تحلیل سیگنال یا علامت (signal) به نویز یا نوفه (noise)، به پژوهشگران و صنعتگران اجازه می‌دهد تا اثر پارامترهای مختلف فرایندی بر نتایج نهایی را بررسی و بهینه‌سازی کنند [۲۱]. در حوزه چاپ سه‌بعدی که فرایند پیچیده و حساس به پارامترهای مختلف مانند دمای افشانک، سرعت چاپ و ارتفاع لایه است، روش تاگوچی می‌تواند به شناسایی بهترین ترکیب پارامترها برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب کمک کند. این روش با کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز و تحلیل دقیق‌تر نتایج، باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های پژوهشی و صنعتی می‌شود [۲۲]. اهمیت روش تاگوچی در چاپ سه‌بعدی از آنجا ناشی می‌شود که امکان بهینه‌سازی فرایندهای تولید قطعات پیچیده با دقت زیاد و کیفیت مطلوب را فراهم می‌سازد و این موضوع می‌تواند به کاهش ضایعات، بهبود عملکرد قطعات و افزایش قابلیت اعتماد آن‌ها منجر شود. در نتیجه، روش تاگوچی به‌عنوان ابزاری کارآمد در بهینه‌سازی و کنترل کیفیت فرایندهای چاپ سه‌بعدی، نقش حیاتی در پژوهش‌های پیشرفته و تولیدات صنعتی ایفا می‌کند [۲۳]. از این رو، برای مطالعه حاضر انتخاب شد.

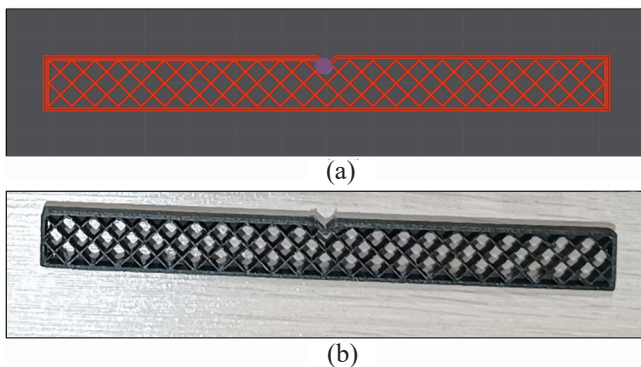
پژوهش حاضر با توجه به ضرورت بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات چاپ سه‌بعدی پلی‌آمید-الیاف کربن، اهمیت بسزایی دارد. در این پژوهش به‌منظور ارتقای استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری از بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی دمای چاپ، سرعت چاپ و ارتفاع لایه، از روش تاگوچی استفاده شده است. اهمیت

چگالی پرشدن ۲۰٪، الگوی پرشدن شبکه‌ای (grid) و دمای صفحه گرم ۶۰ °C برای چاپ نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن استفاده شد. با انتخاب چگالی پرشدن ۲۰٪ و الگوی پرشدن شبکه‌ای، ساختار لایه‌های نمونه‌ها مطابق شکل ۱ حاصل می‌شود.

طراحی آزمایش

برای تولید نمونه‌ها و انجام تحلیل سیگنال به نویز، از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. اهمیت و قابلیت طراحی آزمایش تاگوچی در پروژه‌های تجربی به‌عنوان ابزار حیاتی در بهینه‌سازی فرایندها و محصولات شناخته می‌شود. این روش، با بهره‌گیری از روش‌های آماری و علمی، به پژوهشگران و مهندسان امکان می‌دهد تا اثر عوامل مختلف را بر نتایج بررسی کرده و بهترین ترکیب از این عوامل را شناسایی کنند [۳۰]. طراحی آزمایش تاگوچی با تمرکز بر کاهش واریانس و افزایش کیفیت، به‌طور مؤثری هزینه‌ها و زمان لازم برای آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد و در عین حال دقت و قابلیت تکرار نتایج را افزایش می‌دهد. این رویکرد به‌ویژه در مهندسی، تولید و توسعه محصولات جدید کاربرد فراوانی دارد و به پژوهشگران کمک می‌کند تا به تحلیل عمیق‌تری از داده‌ها برسند و تصمیمات بهینه‌تری برای بهبود عملکرد اتخاذ کنند [۳۱]. قابلیت طراحی آزمایش به شیوه تاگوچی نه تنها ساختار علمی پروژه‌های تجربی را تقویت می‌کند، بلکه موجب افزایش کارایی و موفقیت در دستیابی به نتایج مورد انتظار در هر زمینه‌ای می‌شود [۳۲].

روش تاگوچی به‌عنوان روش آماری در بهبود کیفیت و تحلیل داده‌ها شناخته می‌شود. یکی از مفاهیم کلیدی در روش تاگوچی،



شکل ۱- تصویر چینش لایه‌های نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن: (a) در نرم‌افزار Slicer و (b) حین چاپ.

Fig. 1. Layer arrangement of polyamide/carbon fiber polymeric composite samples: (a) in Slicer Software and (b) during printing.

مکانیکی مطلوب و پایداری آن‌ها در کاربردهای مختلف است [۲۵،۲۶]. پارامتر اثرگذار بعدی سرعت چاپ است و انتخاب سرعت مناسب در چاپ‌های سه‌بعدی ضروری است، زیرا این عامل نه تنها بر دقت و کیفیت محصول نهایی اثر می‌گذارد، بلکه هزینه‌های تولید و زمان تحویل نیز به شدت تحت تأثیر آن قرار دارد [۲۷]. بررسی این پارامتر به مهندسان کمک می‌کند تا با بهینه‌سازی فرایند چاپ، خواص مکانیکی مطلوبی از قطعه‌های تولیدشده به دست آورند. افزایش سرعت چاپ می‌تواند به تغییرات در ساختار داخلی قطعه و کیفیت نهایی آن منجر شود که اثر مستقیمی بر خواص مکانیکی دارد. ارتفاع لایه نیز اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی قطعات تولیدشده دارد و با تنظیم ارتفاع لایه، می‌توان ویژگی‌های فیزیکی قطعات را بهبود بخشید. به‌طور کلی، ارتفاع لایه کمتر به جنبه‌های مثبت از قبیل افزایش دقت و جزئیات در تولید قطعات منجر می‌شود، اما ممکن است زمان چاپ را افزایش دهد. از سوی دیگر، ارتفاع لایه بزرگ‌تر می‌تواند زمان چاپ را کاهش دهد، اما ممکن است به کاهش کیفیت سطح و خواص مکانیکی منجر شود [۲۸،۲۹]. بدین ترتیب، انتخاب ضخامت مناسب لایه نقش کلیدی در تضمین عملکرد و کیفیت نهایی محصولات چاپ سه‌بعدی ایفا می‌کند.

بنابراین سه پارامتر دمای چاپ، سرعت چاپ و ارتفاع لایه به‌عنوان پارامترهای کلیدی برای تحلیل سیگنال به نویز در نظر گرفته شدند و سایر پارامترهای فرایندی چاپ سه‌بعدی مطابق جدول ۱ ثابت در نظر گرفته شدند. از قطر افشانک ۴۰۰ μm، سرعت فن خنک‌کاری ۱۰۰٪،

جدول ۱- پارامترهای فرایندی چاپ سه‌بعدی در نظر گرفته شده برای چاپ نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن.

Table 1. 3D printing process parameters considered for manufacturing of polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

Parameter	Level
Material	Polyamide/carbon fiber polymeric composite
Printer	CREALITY CR-10 Smart
Nozzle diameter (μm)	400
Cooling fan speed (%)	100
Infill density (%)	20
Infill pattern	Grid
Hot bed temperature (°C)	60

جدول ۲- پارامترهای فرایندی و سطوح مربوط برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن.

Table 2. Processing parameters and their levels for manufacturing of polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

Parameter	Level		
	1	2	3
Printing temperature (°C)	220	230	240
Printing speed (mm/s)	20	40	50
Layer height (mm)	0.1	0.2	0.3

الیاف کربن را نشان می‌دهد. شایان ذکر است، برای هر سطح حداقل سه نمونه تولید شده و میانگین نتایج آزمون این سه نمونه به‌عنوان داده نهایی گزارش شد.

برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون ضربه چارپی مطابق استاندارد ASTM-D6110 استفاده شد. شایان ذکر است، طول نمونه‌ها ۱۲۵ mm، عرض نمونه‌ها ۱۲/۷ mm و ضخامت آن‌ها ۷ mm بود. همچنین، نمونه‌ها دارای شکافی به زاویه ۴۵° و به عمق ۲ mm بودند. از دستگاه آزمون ضربه ساخت شرکت نوآوران بسپار با جرم ضربه‌زننده ۲/۰۳۶ kg، طول بازو ۰/۳۹۴۸ m و زاویه بازوی ۱۵۰° استفاده شد.

جدول ۳- آرایه متعامد L9 تاگوچی برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن.

Table 3. L9 orthogonal array of Taguchi for manufacturing of polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

Run	Conditions		
	Printing temperature (°C)	Printing speed (mm/s)	Layer height (mm)
1	220	20	0.1
2	220	30	0.2
3	220	40	0.3
4	230	20	0.2
5	230	30	0.3
6	230	40	0.1
7	240	20	0.3
8	240	30	0.2
9	240	40	0.1

تحلیل سیگنال به نویز است که برای ارزیابی کیفیت و پایداری نتایج استفاده می‌شود [۳۳]. اساس آماری تحلیل سیگنال به نویز بر مبنای نسبت سیگنال (میانگین پاسخ) به نویز (انحراف معیار پاسخ) است. این نسبت نشان‌دهنده مقدار پایداری و کیفیت نتایج در مواجهه با تغییرات و نویزهای موجود در فرایند است [۳۴، ۳۵]. از آنجا که در پژوهش حاضر هدف افزایش خواص مکانیکی است، از تحلیل سیگنال به نویز بزرگ‌تر-بهرتر استفاده می‌شود که به صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۳۶]:

$$\frac{S}{N} \text{ (larger is better)} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

در این معادله، y_i مقدار پاسخ‌ها و n تعداد آزمایش‌هاست. در این نوع تحلیل سیگنال به نویز، هدف افزایش مقدار پاسخ مطلوب است. این معادله به پژوهشگران کمک می‌کند تا کیفیت و پایداری نتایج را ارزیابی کرده و فرایندها را بهینه‌سازی کنند. با استفاده از تحلیل سیگنال به نویز، می‌توان اثر عوامل مختلف بر پاسخ‌ها را شناسایی کرده و بهترین تنظیمات فرایندی را برای دستیابی به نتایج مطلوب تعیین کرد.

مراحل اجرای روش تاگوچی شامل طراحی آزمایش، جمع‌آوری داده‌ها، محاسبات سیگنال به نویز و تحلیل داده‌هاست. در مرحله طراحی آزمایش، انتخاب پارامترهای مؤثر بر فرایند و طراحی سطح‌های مختلف این عوامل صورت می‌گیرد و در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، اجرای آزمایش‌ها براساس طراحی انجام‌شده و جمع‌آوری داده‌های مربوط انجام می‌پذیرد. محاسبات سیگنال به نویز براساس معادله (۱) به صورت بزرگ‌تر-بهرتر انجام می‌شود و در مرحله تحلیل داده‌ها، بررسی نتایج و شناسایی عوامل مؤثر و سطح‌های بهینه انجام می‌گیرد. براساس آزمایش‌های اولیه و شرایط فرایندی پیشنهادی توسط شرکت سازنده رشته، سطوح پارامتر فرایندی دمای چاپ روی ۲۲۰، ۲۳۰ و ۲۴۰ °C، سطوح پارامتر فرایندی سرعت چاپ روی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ mm/s و سطوح پارامتر فرایندی ارتفاع لایه روی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ mm تنظیم شدند. جدول ۲ پارامترهای فرایندی چاپ سه‌بعدی و سطوح مربوط به هر پارامتر را نشان می‌دهد. با واردکردن این پارامترها (سه پارامتر) و سطوح مربوط (هر پارامتر در سه سطح مختلف) در نرم‌افزار Minitab 18 و با استفاده از آرایه متعامد L9 روش تاگوچی، ۹ آزمایش مربوط به صورت جدول ۳ طراحی شدند.

بررسی خواص

شکل ۲ تصویر تعدادی از نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-

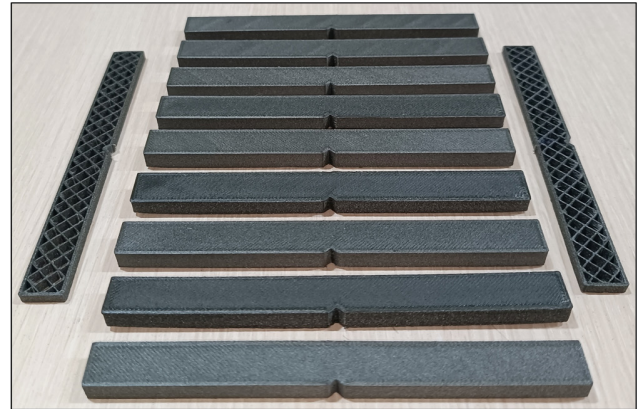
تاگوچی، پیش‌بینی نتایج در حالت‌هایی است که انجام نشده است و می‌تواند شرایط بهینه را بین حالت‌های انجام شده و حالت‌های انجام نشده جست‌وجو کند.

نتایج سیگنال به نویز برای سطوح مختلف پارامترهای فرایندی در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، افزایش دمای چاپ سبب افزایش چشمگیر مقادیر سیگنال به نویز شده است. این مطلب حکایت از آن دارد که افزایش دمای چاپ سبب می‌شود، شرایط استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن بهبود یابد. افزایش مقادیر سیگنال به نویز با افزایش دمای چاپ در تمام سطوح به‌وقوع پیوسته است و بهترین سطح برای دستیابی به شرایط بهینه، دمای چاپ 240°C بوده که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را ارائه داده است. مطابق نتایج، افزایش سرعت چاپ ابتدا باعث افزایش سیگنال به نویز و سپس باعث کاهش آن می‌شود. افزایش سرعت چاپ از 20 mm/s به 30 mm/s سبب می‌شود، مقادیر سیگنال به نویز افزایش یابد که به معنی شرایط بهتر برای استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن است، اما افزایش بیشتر سرعت چاپ به 40 mm/s سبب می‌شود، مقادیر سیگنال به نویز کاهش یابد و این موضوع نشانگر از دست رفتن شرایط مناسب برای دستیابی به استحکام ضربه‌ای مطلوب در نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن است. مطابق نتایج، سرعت چاپ 30 mm/s به دلیل ارائه بیشترین مقدار سیگنال به نویز، بهترین سطح است. از

جدول ۴- نتایج استحکام ضربه‌ای و سیگنال به نویز نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن.

Table 4. Impact strength and signal-to-noise results for the 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

Sample	Impact strength (kJ/m ²)	Signal to noise (dB)
1	71.59 ± 2.75	37.10
2	58.52 ± 1.64	35.35
3	28.63 ± 2.01	29.14
4	25.58 ± 1.16	28.16
5	99.02 ± 2.41	39.91
6	105.02 ± 2.91	40.43
7	107.27 ± 2.70	40.61
8	108.15 ± 3.12	40.68
9	106.15 ± 2.18	40.52



شکل ۲- تصویر تعدادی از نمونه‌های کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن تولیدشده در پژوهش حاضر.

Fig. 2. Representative 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

نتایج و بحث

نتایج استحکام ضربه‌ای نمونه‌های مختلف کامپوزیت پلی‌آمید-الیاف کربن در جدول ۴ آمده است.

با واردکردن این نتایج در نرم‌افزار Minitab و تحلیل سیگنال به نویز به روش بزرگ‌تر-بهتر، نتایج سیگنال به نویز مطابق داده‌های جدول ۴ حاصل شد. در تحلیل سیگنال به نویز روش تاگوچی، مقدار بیشتر سیگنال به نویز به معنای نسبت بیشتر میانگین پاسخ به واریانس یا نویز پاسخ‌هاست. از نظر آماری، این نسبت بیشترین نشان‌دهنده پایداری و کیفیت بهتر نتایج است، زیرا افزایش سیگنال به نویز نشان می‌دهد، پاسخ‌های سامانه تحت تاثیر نویز و تغییرات کمتر قرار دارند و بهینه‌تر هستند [۳۷]. این مسئله در تمام انواع تحلیل سیگنال به نویز، چه کوچک‌تر-بهتر و چه بزرگ‌تر-بهتر، صدق می‌کند. در حالت کوچک‌تر-بهتر، هدف کاهش پاسخ مطلوب به کمترین مقدار ممکن و در حالت بزرگ‌تر-بهتر، افزایش آن به بیشترین مقدار ممکن است [۳۸]. در هر دو حالت، نسبت بیشتر سیگنال به نویز نشان‌دهنده کاهش واریانس و افزایش میانگین پاسخ به نویز است که به بهبود کیفیت و قابلیت اعتماد نتایج منجر می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار بیشتر سیگنال به نویز به معنای کارایی و پایداری بیشتر در شرایط آزمایشی بوده که نشان‌دهنده تنظیمات فرایندی بهینه است [۳۹]. بنابراین مطابق نتایج در جدول ۵، آزمون ۸ با مقدار سیگنال به نویز بیشتر ($40/68$) شرایط بهتری نسبت به سایر آزمایش‌ها دارد، این ۹ آزمایش انجام شده، ۹ آزمایش از بین ۲۷ حالت ممکن (۳۳) هستند و ممکن است، شرایط بهینه بین این ۹ آزمایش انجام شده نباشد و جزو ۱۸ حالتی باشد که در آرایه‌های متعامد L9 تاگوچی نیست. یکی از قابلیت‌های روش

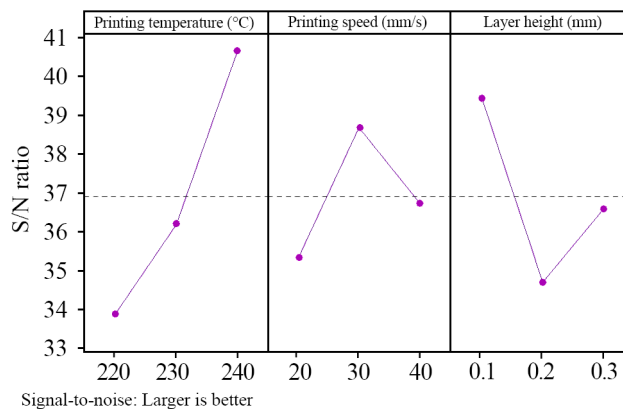
بیشترین و کمترین مقدار سیگنال به نویز است، پارامتر دمای چاپ با دلتای ۶/۷۴ در رتبه یک از لحاظ اثرگذاری بر استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن قرار دارد. پس از آن، ارتفاع لایه با دلتای ۴/۷۳ در رتبه ۲ و در نهایت سرعت چاپ با دلتای ۳/۳۶ در رتبه سه قرار دارند. نحوه اثر این پارامترها بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن در ادامه بررسی می‌شود.

شکل ۴ نحوه اثرگذاری پارامترهای فرایندی چاپ سه‌بعدی شامل دمای چاپ، سرعت چاپ و ارتفاع لایه را بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، افزایش دمای چاپ سبب افزایش استحکام ضربه‌ای می‌شود و این افزایش تقریباً به صورت خطی با افزایش دمای چاپ از ۲۲۰ °C به ۲۳۰ °C و سپس به ۲۴۰ °C رخ می‌دهد. دمای بیشتر چاپ موجب ذوب بهتر و ادغام لایه‌های رشته می‌شود. این موضوع به ایجاد اتصال‌های قوی‌تر بین لایه‌ها منجر می‌شود و احتمال جداشدگی لایه‌ها تحت نیروی ضربه را کاهش می‌دهد [۴۰]. افزایش دما باعث بهبود حرکت زنجیره‌های پلیمری شده که به یکنواختی بیشتر ساختارهای میکروسکوپی منجر می‌شود [۴۰، ۴۱]. این یکنواختی ساختاری به مقاومت بیشتر در برابر ضربه کمک می‌کند. از طرفی دیگر، دماهای زیاد به کاهش تشکیل حفره‌ها و نقص‌ها در ساختار چاپ‌شده کمک می‌کند. تعداد کمتر حفره‌ها و ساختار متراکم‌تر به افزایش استحکام ضربه‌ای منجر می‌شود [۴۲، ۴۳]. نتایج شکل ۴ همچنین نشان داد، افزایش سرعت چاپ ابتدا باعث افزایش استحکام ضربه‌ای و سپس باعث کاهش آن می‌شود. در سرعت‌های

جدول ۵- نتایج تحلیل سیگنال به نویز برای پارامترها و سطوح مختلف.

Table 5. Signal-to-noise ratio results for different parameters and levels.

Level	Signal to noise ratio results for parameters		
	Printing temperature	Printing speed	Layer height
1	33.86	35.29	39.40
2	36.17	38.65	34.67
3	40.60	36.69	36.55
Delta	6.74	3.36	4.73
Rank	1	3	2



شکل ۳- نتایج سیگنال به نویز.

Fig. 3. Signal-to-noise ratio results.

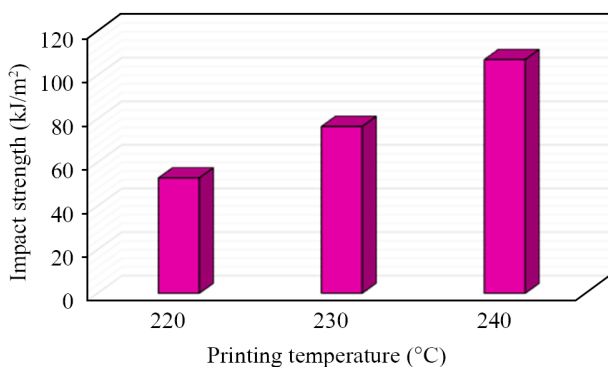
طرفی دیگر، نتایج نشان می‌دهد، با افزایش ارتفاع لایه، مقادیر سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. افزایش ارتفاع لایه از ۰/۱ mm به ۰/۲ mm باعث می‌شود که مقادیر سیگنال به نویز به صورت چشمگیری کاهش یابد که به معنای عدم دستیابی به شرایط مطلوب برای استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن است. افزایش بیشتر ارتفاع لایه به سطح ۰/۳ mm سبب می‌شود که مقادیر سیگنال به نویز تا حدودی افزایش پیدا کند، اما همچنان بهترین سطح ارتفاع لایه با بیشترین مقدار سیگنال به نویز، سطح اول یعنی ۰/۱ mm است.

جدول ۵ نتایج تحلیل سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، بیشترین مقدار سیگنال به نویز در سطح سه دمای چاپ برابر ۴۰/۶۰ حاصل شد که نشان می‌دهد، دمای چاپ ۲۴۰ °C، سطح بهینه برای دستیابی به حداکثر شرایط استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن است. از طرفی دیگر، بیشترین مقدار سیگنال به نویز در سطح ۲ سرعت چاپ حاصل شده که مقدار آن ۳۸/۶۵ است و حکایت از این دارد که سرعت چاپ ۳۰ mm/s سطح بهینه برای رسیدن به حداکثر شرایط استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن است. همچنین نتایج نشان داد، سطح ۱ ارتفاع لایه با مقدار سیگنال به نویز ۳۹/۴۰، سطح بهینه برای دستیابی به حداکثر استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن است. به عبارت دیگر، ارتفاع لایه ۰/۱ mm سطح بهینه ارتفاع لایه با بیشترین مقدار سیگنال به نویز است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد، دمای چاپ ۲۴۰ °C، سرعت چاپ ۳۰ mm/s و ارتفاع لایه ۰/۱ mm شرایط بهینه برای دستیابی به استحکام ضربه‌ای حداکثر در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن است. این شرایط مربوط به نمونه ۸ بوده که استحکام ضربه‌ای آن ۱۰۸/۱۵ kJ/m² است. مطابق نتایج برای مقادیر دلتا که اختلاف بین

به 0.3 mm تا حدی استحکام ضربه‌ای را بهبود می‌بخشد که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش بیشتر حفره‌ها و عیوب باشد. اما همچنان به دلیل محدودیت‌ها در کیفیت اتصال و یکپارچگی ساختار به استحکام ضربه‌ای حاصل از کمترین ارتفاع لایه (0.1 mm) نمی‌رسد [۴۶، ۴۷]. ارتفاع لایه‌های بیشتر (0.3 mm) ممکن است، با افزایش احتمال وجود حفره‌ها در قطعه چاپ‌شده و سپس افزایش طول مسیر ترک، سبب افزایش استحکام ضربه‌ای نسبت به ارتفاع‌های لایه متوسط (0.2 mm) شود. با وجود این، خواص مکانیکی کلی به دلیل کاهش اتصال بین لایه‌ها همچنان تحت تأثیر قرار می‌گیرد و کمتر از ارتفاع لایه 0.1 mm است [۴۰، ۴۵].

شکل ۵ اثر دمای چاپ بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، افزایش دمای چاپ از 220°C به 230°C سبب می‌شود، استحکام ضربه‌ای از $52/91 \text{ kJ/m}^2$ به $76/54 \text{ kJ/m}^2$ افزایش یابد که به معنی افزایش 45% آن است. افزایش بیشتر دمای چاپ به 240°C سبب می‌شود که استحکام ضربه‌ای به $107/19 \text{ kJ/m}^2$ برسد که به معنی افزایش 40% نسبت به دمای 230°C و 103% نسبت به دمای 220°C است.

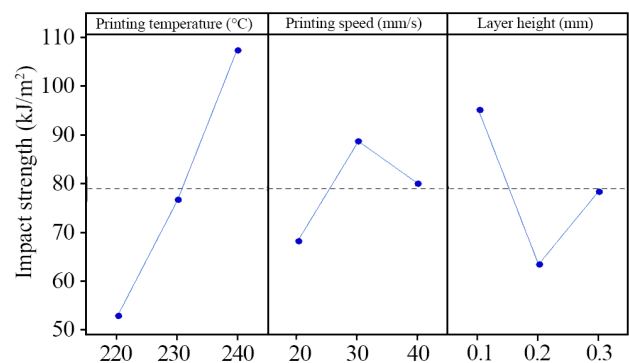
اثر سرعت چاپ بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق نتایج، افزایش سرعت چاپ از 20 mm/s به 30 mm/s سبب می‌شود که استحکام ضربه‌ای از $68/15 \text{ kJ/m}^2$ به $88/56 \text{ kJ/m}^2$ برسد که به معنای بهبود 30% در استحکام ضربه‌ای است. افزایش بیشتر سرعت چاپ به 40 mm/s سبب می‌شود، استحکام ضربه‌ای به $79/93 \text{ kJ/m}^2$ کاهش یابد که نسبت به مقدار حاصل‌شده در



شکل ۵- تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن با افزایش دمای چاپ فرایند چاپ سه‌بعدی.

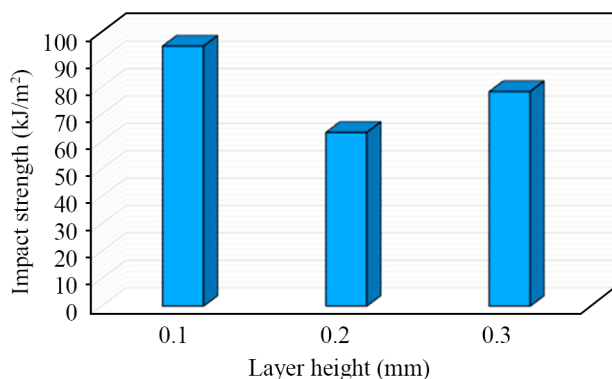
Fig. 5. Variations in impact strength of the 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples versus printing temperature of the 3D printing process.

کمتر چاپ (20 mm/s)، رشته زمان کافی برای ذوب‌شدن کامل و چسبیدن مناسب به لایه قبلی را دارد. این موضوع به ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین لایه‌ها و بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام ضربه‌ای منجر می‌شود. افزایش سرعت چاپ تا 30 mm/s می‌تواند انسجام لایه‌ها را بهبود بخشد، زیرا جریان مواد یکنواخت‌تر است که این به ذوب بهتر بین لایه‌ها و کاهش احتمالی نقص‌ها یا نقاط ضعف منجر می‌شود. در سرعت‌های بیشتر (40 mm/s)، ممکن است، رشته زمان کافی برای ذوب‌شدن کامل و پیوند صحیح با لایه زیرین را پیش از جامدشدن نداشته باشد. این عامل می‌تواند به ایجاد پیوندهای ضعیف‌تر بین لایه‌ها و افزایش حفره‌ها منجر شود که همه این عوامل می‌توانند باعث کاهش استحکام ضربه‌ای شوند. در سرعت‌های بسیار زیاد چاپ، سامانه اکستروژن ممکن است، نتواند جریان مواد را به‌طور یکنواخت حفظ کند که به ناهماهنگی در چاپ و نقص‌های احتمالی مانند اکستروژن ناکافی یا اکستروژن بیش از حد منجر می‌شود. این نقص‌ها به کاهش استحکام ضربه‌ای منجر می‌شوند. نتایج شکل ۴ حکایت از این دارند که افزایش ارتفاع لایه از 0.1 mm به 0.2 mm سبب کاهش استحکام ضربه‌ای می‌شود و با افزایش ارتفاع لایه به 0.3 mm ، استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد. ابتدا، افزایش ارتفاع لایه از 0.1 mm به 0.2 mm باعث کاهش استحکام ضربه‌ای می‌شود که این کاهش به دلیل چسبندگی ضعیف‌تر بین لایه‌هاست. ارتفاع لایه‌های کوچک‌تر معمولاً به چسبندگی بهتر بین لایه‌ها به دلیل سطح تماس بیشتر بین آن‌ها منجر می‌شود [۴۴]. بنابراین افزایش ارتفاع لایه باعث کاهش کیفیت اتصال و یکپارچگی ساختار کلی می‌شود و استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد [۴۵]. افزایش بیشتر ارتفاع لایه



شکل ۴- اثر تغییرات پارامترهای فرایندی بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن.

Fig. 4. Effects of variations of processing parameters on the impact strength of the 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples.

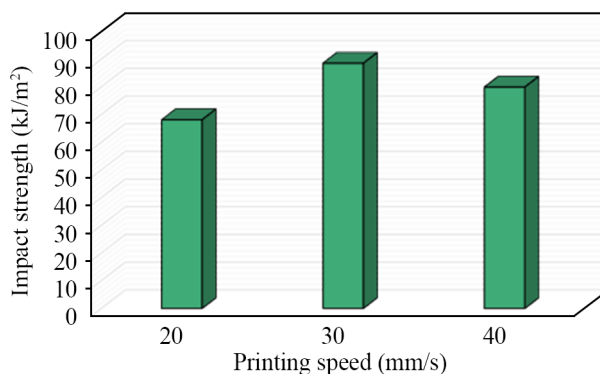


شکل ۷- تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن با افزایش ارتفاع لایه فرایند چاپ سه‌بعدی.
Fig. 7. Variations in impact strength of the 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples versus layer height of the 3D printing process.

ارتفاع لایه بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن بررسی و بهینه‌سازی شد. نتایج این مطالعه نشان داد، دمای چاپ بیشتر موجب بهبود استحکام ضربه‌ای به دلیل چسبندگی بهتر بین لایه‌ها و کاهش حفره‌ها و نقص‌های داخلی می‌شود. همچنین، سرعت چاپ بهینه باعث بهبود انسجام لایه‌ها و کاهش نقاط ضعف و نقص‌ها می‌شود، هرچند که سرعت‌های بسیار زیاد به کاهش استحکام منجر می‌شود. افزایش ارتفاع لایه نیز تا مقدار معینی استحکام ضربه‌ای را کاهش داد، سپس بهبود مجددی مشاهده شد که این موضوع به دلیل تغییر در تراکم لایه‌ها و کاهش محتوای حفره‌هاست. با استفاده از تحلیل سیگنال به نویز روش تاگوچی، شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر استحکام ضربه‌ای شناسایی شد. این پژوهش نشان داد، بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد قطعات چاپ‌شده کمک کند. نتایج می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای پژوهش‌های آتی و بهبود فرایندهای ساخت افزایشی در صنایع مختلف استفاده شود. این پژوهش با ارائه رویکردی نوین برای بهینه‌سازی فرایندهای چاپ سه‌بعدی، به توسعه فناوری‌های پیشرفته و بهبود کارایی و کیفیت محصولات صنعتی کمک می‌کند.

مراجع

1. Tao Y., Li P., Zhang J., Wang S., Shi S.Q., and Kong F., A Review of Fused Filament Fabrication of Continuous Natural



شکل ۶- تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن با افزایش سرعت چاپ فرایند چاپ سه‌بعدی.
Fig. 6. Variations in impact strength of the 3D printed polyamide/carbon fiber polymeric composite samples versus printing speed of the 3D printing process.

سرعت چاپ ۳۰ mm/s، ۱۰٪ کاهش یافته است. هرچند شایان ذکر است، استحکام ضربه‌ای به‌دست‌آمده در سرعت چاپ ۴۰ mm/s همچنان به مقدار ۱۷٪ (۷۹/۹۳ نسبت به ۶۸/۱۵ kJ/m²) بیشتر از سرعت چاپ ۲۰ mm/s است. شکل ۷ اثر ارتفاع لایه بر استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیت پلیمری پلی‌آمید-الیاف کربن را نشان می‌دهد. نتایج حکایت از آن دارد که افزایش ارتفاع لایه از ۰/۱ mm به ۰/۲ mm سبب می‌شود که استحکام ضربه‌ای از ۹۴/۹۲ kJ/m² به ۶۳/۴۱ kJ/m² کاهش یابد که به معنی کاهش ۳۳٪ استحکام ضربه‌ای است. افزایش بیشتر ارتفاع لایه به ۰/۳ mm باعث می‌شود، استحکام ضربه‌ای به مقدار ۲۳٪ افزایش یابد و از ۶۳/۴۱ kJ/m² به ۷۸/۳۱ kJ/m² برسد. شایان ذکر است، استحکام ضربه‌ای در ارتفاع لایه ۰/۳ mm همچنان به مقدار ۱۷٪ کمتر از استحکام ضربه‌ای در ارتفاع لایه ۰/۱ mm است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر پارامترهای فرایندی دمای چاپ، سرعت چاپ و

- Fiber Reinforced Thermoplastic Composites: Techniques and Materials, *Polym. Compos.*, **44**, 8200-8222, 2023.

2. Soheilpour Z., Rezadoust A.M., Razavi-Nouri M., Garoosi K., and Ghaffarian S.R., Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Tensile Properties and Printing Quality of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 497-507, 2020.
3. Hasanzadeh R., Azdast T., and Mihankhah P., Effect of Printer Process Parameters of Fused Filament Fabrication on the Tensile Strength and Density of Poly(lactic acid)/Nanoclay Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 539-549, 2023.
4. Kechagias J. and Chaidas D., Fused Filament Fabrication Parameter Adjustments for Sustainable 3D Printing, *Mater. Manuf. Process.*, **38**, 933-940, 2023.
5. Hasanzadeh R., A New Polymeric Hybrid Auxetic Structure Additively Manufactured by Fused Filament Fabrication 3D Printing: Machine Learning-Based Energy Absorption Prediction and Optimization, *Polymers*, **16**, 3565, 2024.
6. Kumar S., Singh R., Singh T.P., and Batish A., Fused Filament Fabrication: A Comprehensive Review, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **36**, 794-814, 2023.
7. Wu Z., Dong J., Teng C., Li X., Zhao X., Qin X., Ji C., and Zhang Q., Polyimide-Based Composites Reinforced by Carbon Nanotube-Grafted Carbon Fiber for Improved Thermal Conductivity and Mechanical Property, *Compos. Commun.*, **39**, 101543, 2023.
8. Hu Z., Chen W., Ye X., Ding J., Luo X., Wang S., Ou Y., Zhang Y., and Li X., Superior Strength in the 3D-Printed Polyetherether-Ketone Composites Reinforced by Annealing and Carbon Fibers, *Polym. Compos.*, **45**, 1872-1883, 2024.
9. Xin Z., Ma Y., Chen Y., Wang B., Xiao H., and Duan Y., Fusion-Bonding Performance of Short and Continuous Carbon Fiber Synergistic Reinforced Composites Using Fused Filament Fabrication, *Compos. B: Eng.*, **248**, 110370, 2023.
10. Zhang H., Wang S., Zhang K., Wu J., Li A., Liu J., and Yang D., 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Polymer Composites with Optimised Structural Topology and Fibre Orientation, *Compos. Struct.*, **313**, 116914, 2023.
11. An Y., Myung J.H., Yoon J., and Yu W.R., Three-Dimensional Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites via In-Situ Pin-Assisted Melt Impregnation, *Addit. Manuf.*, **55**, 102860, 2022.
12. Abdullah A.M., Ding Y., He X., Dunn M., and Yu K., Direct-Write 3D Printing of UV-Curable Composites with Continuous Carbon Fiber, *J. Compos. Mater.*, **57**, 851-863, 2023.
13. Rahman M.A., Hall E., Gibbon L., Islam M.Z., Ulven C.A., and La Scala J.J., A Mechanical Performance Study of Dual Cured Thermoset Resin Systems 3D-Printed with Continuous Carbon Fiber Reinforcement, *Polymers*, **15**, 1384, 2023.
14. Ramanathan A., Thippanna V., Kumar A.S., Sundaravadivelan B., Zhu Y., Ravichandran D., Yang S., and Song K., Highly Loaded Carbon Fiber Filaments for 3D-Printed Composites, *J. Polym. Sci.*, **62**, 2670-2682, 2024.
15. Yu X., Zheng J., Chen Y., Fan C., Song W., and Shan Z., Melt-Impregnation and Sizing Optimization for the Fabrication of High-Performance 3D Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Polyetheretherketone Filaments, *Polym. Compos.*, 2025. <https://doi.org/10.1002/pc.29472>
16. Mishra V. and Veeman D., Artificial Neural Network-Based Predictive Models for Analyzing the Flexural and Compressive Strength of PLA/Carbon Parts Fabricated via Material Extrusion-Based 3D Printing, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2025. <https://doi.org/10.1177/08927057251314430>
17. Ju J., Yang N., Yu L., Zhang Z., Jiang H., Wu W., and Ma G., Experiment and Simulation Study on the Crashworthiness of Markforged 3D-Printed Carbon/Kevlar Hybrid Continuous Fiber Composite Honeycomb Structures, *Materials*, **18**, 192, 2025.
18. Sultana J., Rahman M.M., Wang Y., Ahmed A., and Xiaohu C., Influences of 3D Printing Parameters on the Mechanical Properties of Wood PLA Filament: An Experimental Analysis by Taguchi Method, *Prog. Addit. Manuf.*, **9**, 1239-1251, 2024.
19. Alzyod H. and Ficzer P., Optimizing Fused Filament Fabrication Process Parameters for Quality Enhancement of PA12 Parts Using Numerical Modeling and Taguchi Method, *Heliyon*, **9**, 14445, 2023.
20. Khaleghi S., Azdast T., Doniavi A., and Hasanzadeh R., Performance Optimization of Acrylonitrile Butadiene Styrene/Thermoplastic Polyurethane Composite Foams Blown with Carbon Dioxide Using Taguchi Technique, *J. Appl. Polym. Sci.*, **141**, 54996, 2024.
21. Yao B., Zhu Y., Xu Z., Wu Y., Yang L., Liu J., Shang J., Fan J., Ouyang L., and Fan H.J.S., Taguchi Design and Optimization of the PLA/PCL Composite Filament with Plasticizer and Compatibilizer Additives for Optimal 3D Printing, *Polym. Eng. Sci.*, **63**, 3743-3761, 2023.
22. Azerang B., Azdast T., Doniavi A., and Hasanzadeh R., Determination of Electromagnetic Traveling Path in Polymer/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite Foams and Analysis

- by Taguchi Technique, *Polym. Eng. Sci.*, **64**, 87-100, 2024.
23. Rasheed A., Hussain M., Ullah S., Ahmad Z., Kakakhail H., Riaz A.A., Khan I., Ahmad S., Akram W., Eldin S.M., and Khan I., Experimental Investigation and Taguchi Optimization of FDM Process Parameters for the Enhancement of Tensile Properties of Bi-Layered Printed PLA-ABS, *Mater. Res. Express*, **10**, 095307, 2023.
 24. Van de Voorde B., Katalagarianakis A., Huysman S., Toncheva A., Raquez J.M., Duretek I., Holzer C., Cardon L., Bernaerts K.V., Van Hemelrijck D., and Pyl L., Effect of Extrusion and Fused Filament Fabrication Processing Parameters of Recycled Poly(ethylene terephthalate) on the Crystallinity and Mechanical Properties, *Addit. Manuf.*, **50**, 102518, 2022.
 25. Hasanzadeh R., Mihankhah P., Azdast T., Bodaghi M., and Moradi M., Process-Property Relationship in Polylactic Acid Composites Reinforced by Iron Microparticles and 3D Printed by Fused Filament Fabrication, *Polym. Eng. Sci.*, **64**, 399-411, 2024.
 26. Bakhtiari H., Aamir M., and Tolouei-Rad M., Effect of 3D Printing Parameters on the Fatigue Properties of Parts Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Review, *Appl. Sci.*, **13**, 904, 2023.
 27. Khan I., Abas M., Ahmad S., Al Rashid A., and Koç M., Fabrication of a Low-Cost Fused Filament Fabrication-Based 3D Printer and Investigation of the Effects of Process Parameters on Mechanical Properties of 3D-Printed Samples, *J. Eng. Res.*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.06.018>
 28. Agrawal A.P., Kumar V., Kumar J., Paramasivam P., Dhanasekaran S., and Prasad L., An Investigation of Combined Effect of Infill Pattern, Density, and Layer Thickness on Mechanical Properties of 3D Printed ABS by Fused Filament Fabrication, *Heliyon*, **9**, 16531, 2023.
 29. Frunzaverde D., Cojocar V., Bacescu N., Ciubotariu C.R., Miclosina C.O., Turiac R.R., and Marginean G., The Influence of the Layer Height and the Filament Color on the Dimensional Accuracy and the Tensile Strength of FDM-Printed PLA Specimens, *Polymers*, **15**, 2377, 2023.
 30. Tunçel O., Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method, *Polymers*, **16**, 459, 2024.
 31. Mojaver P., Khalilarya S., Chitsaz A., and Assadi M., Multi-Objective Optimization of a Power Generation System Based SOFC Using Taguchi/AHP/TOPSIS Triple Method, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, **38**, 100674, 2020.
 32. Borra N.D. and Neigapula V.S.N., Parametric Optimization for Dimensional Correctness of 3D Printed Part Using Masked Stereolithography: Taguchi Method, *Rapid Prototyp. J.*, **29**, 166-184, 2023.
 33. Mojaver M., Azdast T., and Hasanzadeh R., Assessments of Key Features and Taguchi Analysis on Hydrogen Rich Syngas Production via Gasification of Polyethylene, Polypropylene, Polycarbonate and Polyethylene Terephthalate Wastes, *Int. J. Hydrogen Energy*, **46**, 29846-29857, 2021.
 34. Lestari W.D., Adyono N., Faizin A.K., Haqiyah A., Sanjaya K.H., Nugroho A., Kusmasari W., and Ammarullah M.I., Optimization of 3D Printed Parameters for Socket Prosthetic Manufacturing Using the Taguchi Method and Response Surface Methodology, *Results Eng.*, **21**, 101847, 2024.
 35. Hasanzadeh R., Mojaver P., Chitsaz A., Mojaver M., Jalili M., and Rosen M.A., Biomass and Low-Density Polyethylene Waste Composites Gasification: Orthogonal Array Design of Taguchi Technique for Analysis and Pptimization, *Int. J. Hydrogen Energy*, **47**, 28819-28832, 2022.
 36. Balasubramainian N.K., Kothandaraman L., Sathish T., Giri J., and Ammarullah M.I., Optimization of Process Parameters to Minimize Circularity Error and Surface Roughness in Fused Deposition Modelling (FDM) Using Taguchi Method for Biomedical Implant Fabrication, *Adv. Manuf.: Polym. Compos. Sci.*, **10**, 2406156, 2024.
 37. Nawaz R., Hussain I., Noor S., Habib T., and Omair M., The Significant Impact of the Economic Sustainability on the Cement Industry by the Assessment of the Key Performance Indicators Using Taguchi Signal to Noise Ratio, *Cogent Eng.*, **7**, 1810383, 2020.
 38. Hasanzadeh R., Mihankhah P., Azdast T., Aghaiee S., and Park C.B., Optimization of Process Parameters of Fused Filament Fabrication of Polylactic Acid Composites Reinforced by Aluminum Using Taguchi Approach, *Metals*, **13**, 1013, 2023.
 39. Awd Allah M.M., Abd El Aal M.I., and Abd El-baky M.A., Optimizing the Crashworthy Behaviors of Hybrid Composite Structures through Taguchi Approach, *Polym. Compos.*, **45**, 7906-7917, 2024.
 40. Tran T.Q., Ng F.L., Kai J.T.Y., Feih S., and Nai M.L.S., Tensile Strength Enhancement of Fused Filament Fabrication Printed Parts: A Review of Process Improvement Approaches and Respective Impact, *Addit. Manuf.*, **54**, 102724, 2022.
 41. Song Y., Li Y., Song W., Yee K., Lee K.Y., and Tagarielli V.L., Measurements of the Mechanical Response of Unidirectional

- 3D-Printed PLA, *Mater. Des.*, **123**, 154-164, 2017.
42. Gao X., Qi S., Kuang X., Su Y., Li J., and Wang D., Fused Filament Fabrication of Polymer Materials: A Review of Interlayer Bond, *Addit. Manuf.*, **37**, 101658, 2021.
43. Kumar N., Jain P.K., Tandon P., and Pandey P.M., The Effect of Process Parameters on Tensile Behavior of 3D Printed Flexible Parts of Ethylene Vinyl Acetate (EVA), *J. Manuf. Process.*, **35**, 317-326, 2018.
44. Abbott A.C., Tandon G.P., Bradford R.L., Koerner H., and Baur, J.W., Process-Structure-Property Effects on ABS Bond Strength in Fused Filament Fabrication, *Addit. Manuf.*, **19**, 29-38, 2018.
45. Huang B., Meng S., He H., Jia Y., Xu Y., and Huang H., Study of Processing Parameters in Fused Deposition Modeling Based on Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Filament, *Polym. Eng. Sci.*, **59**, 120-128, 2019.
46. Gordelier T.J., Thies P.R., Turner L., and Johanning L., Optimising the FDM Additive Manufacturing Process to Achieve Maximum Tensile Strength: A State-of-the-Art Review, *Rapid Prototyp. J.*, **25**, 953-971, 2019.
47. Sood A.K., Ohdar R.K., and Mahapatra S.S., Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts, *Mater. Des.*, **31**, 287-295, 2010