



بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی برای تولید نانوکامپوزیت‌های CNT/ABS با استفاده از روش تاگوچی

رهام رفیعی^{1*}، هیدی خزمه²، هیراد اموحاجی³

1-استاد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران
3- کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، کد پستی 14399-57131، Roham.Rafiee@ut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله:
<p>در این پژوهش، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی برای تولید نانوکامپوزیت‌های CNT/ABS با استفاده از روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی مطالعه، بهینه‌سازی خواص مکانیکی، وزن، زمان چاپ و مقدار ماده مصرفی در قطعات تولید شده است. در این راستا، پارامترهای کلیدی چاپ شامل زاویه چاپ، درصد پرشوندگی، سرعت چاپ، الگوی پرشوندگی، کسر وزنی نانولوله‌های کربنی (CNT) و ضخامت لایه‌ها به‌صورت سیستماتیک بررسی شدند تا بهینه‌ترین حالت موجود شناسایی شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که درصد پرشوندگی و ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی و مدول یانگ دارند؛ به‌طوری‌که افزایش پرشوندگی و کاهش ضخامت لایه‌ها موجب بهبود قابل توجهی در این خواص شد. همچنین، با بهینه‌سازی این پارامترها و تنظیم دقیق زاویه چاپ، وزن قطعات کاهش یافت و زمان چاپ و مصرف فیلامنت بهینه گردید. علاوه بر این، نسبت استحکام به وزن بر زمان چاپ و مصرف فیلامنت نیز به عنوان شاخصی مؤثر برای ارزیابی عملکرد بهینه چاپ معرفی شد.</p>	<p>دریافت: 1404/04/30 پذیرش: 1404/06/05 کلیدواژگان: چاپ سه‌بعدی، نانوکامپوزیت، روش تاگوچی، بهینه‌سازی فرآیند، استحکام کششی،</p>

Optimization of 3D printing process parameters for the production of CNT/ABS nanocomposites using the Taguchi method

Roham Rafiee^{1*}, Hedi Khezma¹, Hiran Amohaji¹

1-College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
*Postal Code: 1439957131, Tehran, Iran, roham.rafiee@ut.ac.ir

Keywords

3D Printing,
Nanocomposites,
Taguchi Method,
Process Optimization,
Tensile Strength,

Abstract

In this study, the optimization of 3D printing process parameters for the fabrication of CNT/ABS nanocomposites was investigated using the Taguchi method. The primary objective was to optimize the mechanical properties, weight, printing time, and material consumption of the fabricated parts. To achieve this, key printing parameters—including printing temperature, printing angle, infill percentage, printing speed, infill pattern, carbon nanotube (CNT) weight fraction, and layer thickness—were systematically examined to identify the most optimal configuration. Experimental results revealed that infill percentage and layer thickness had the most significant influence on tensile strength and Young's modulus; specifically, increasing the infill percentage and decreasing the layer thickness led to notable improvements in these properties. Furthermore, by optimizing these parameters and precisely adjusting the printing angle, the part weight was reduced, and both printing time and filament consumption were optimized. Additionally, the ratio of strength to the product of weight, printing time, and filament length was introduced as an effective index for evaluating the overall printing performance.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rafiee, R., Khezma, H., Amohaji, H., "Optimization of 3D printing process parameters for the production of CNT/ABS nanocomposites using the Taguchi method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 1, pp. 2681-2692, 2025.
<https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2066556.1930>

1- مقدمه

تولید افزودنی یکی از نویدبخش‌ترین حوزه‌ها در ساخت قطعات از نمونه‌های اولیه گرفته تا سازه‌های کاربردی با هندسه‌های پیچیده است [1-2]. تولید افزودنی از تکنیک‌های تولید سنتی، مانند ریخته‌گری و ماشین‌کاری، با توانایی آن در تولید اشکال پیچیده با انعطاف‌پذیری زیاد و بدون ضایعات معمولی متمایز می‌شود [3-4].

چاپ سه بعدی یکی از روش‌های نمونه‌سازی سریع است که محصول را با استفاده از یک مدل سه بعدی ایجاد شده توسط رایانه، تولید می‌کند. چاپگرهای سه بعدی در صنایع مختلف مانند خودرو، هوافضا، عمران، پزشکی و غیره استفاده می‌شوند [5]. برای مثال از چاپگر سه بعدی می‌توان برای تولید نمونه اولیه، تهیه قالب، ساخت پیچ یا چرخنده‌های مورد استفاده در ربات‌ها، تولید قطعات پلاستیکی برخی ماشین‌آلات، ساخت روکش برخی از پروتزها، تولید کامپوزیت‌های الیافی و غیره استفاده کرد [6-7]. این فناوری با ویژگی‌هایی مانند تولید قطعات با اشکال هندسی پیچیده، کاهش زمان عرضه به بازار و صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلفی یافته است [8]. با این وجود، یکی از چالش‌های عمده چاپ سه بعدی، پایین‌تر بودن خواص مکانیکی قطعات تولید شده نسبت به روش‌های تولید سنتی می‌باشد که این مسأله محدودیت‌هایی در کاربرد صنعتی این فناوری ایجاد کرده است [9].

برای بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپی، استفاده از مواد کامپوزیتی، به ویژه نانوکامپوزیت‌ها، به عنوان یک راهکار مؤثر مورد توجه قرار گرفته است. کامپوزیت‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [10]. در این راستا، نانولوله‌های کربنی¹ به دلیل ویژگی‌هایی چون استحکام کششی بسیار بالا، مدول کشسانی فوق‌العاده و خواص حرارتی و الکتریکی بی‌نظیر، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای تقویت پلیمرهای پایه در تولید نانوکامپوزیت‌ها مطرح شده‌اند. افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس پلیمری مانند آکریلونیتریل بوتادین استایرن² می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی و حتی الکتریکی قطعات را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. با این حال، خواص نهایی قطعات نانوکامپوزیتی تولید شده به روش چاپ سه بعدی، به شدت وابسته به پارامترهای فرآیند چاپ از جمله چگالی پرشوندگی، سرعت چاپ، ضخامت لایه، دمای بستر، الگوی پرشوندگی و زاویه چاپ می‌باشد [11-12]. پارامترهای نامناسب می‌توانند منجر به ایجاد تخلخل، ناپیوستگی بین لایه‌ها و در نتیجه کاهش استحکام قطعات شوند [13].

آمون³ و همکاران در مورد تقویت پلی‌پروپیلن⁴ (PP) با میکرو کپسول‌های اکسید گران کاهش یافته PLA - RGO برای اشیاء چاپ سه بعدی پژوهشی انجام دادند [14]. آن‌ها ویژگی‌های مهمی را بررسی

کردند تا مشخص شود که نانوکامپوزیت‌های جدید چگونه به عنوان مواد اولیه مورد استفاده در چاپ سه بعدی عملکرد خوبی دارند [14]. دال⁵ و همکاران یک مطالعه مقایسه‌ای از اثرات دو نوع نانولوله کربنی، یعنی نانولوله کربنی چندجداره و تک‌جداره بر روی خواص قطعات پرینت سه بعدی تولید شده با اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن (ABS) انجام دادند [15]. موهاناوول⁶ و همکاران اثر افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری پلی لاکتیک‌اسید (PLA) را برای چاپ سه بعدی قطعات نانوکامپوزیت بررسی کردند [16].

دپاک⁷ و همکاران پژوهشی بر نحوه رفتار حرارتی مواد PETG⁸ و ABS ساخته شده از طریق پرینت سه بعدی و تقویت شده با الیاف کربن (CF) و نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) را بررسی کردند [17]. کامیل⁹ و همکاران، مطالعه‌ای را بر روی چاپ سه بعدی پلیمر ABS تقویت شده با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی انجام دادند [18].

حیدری رارانی و همکاران تأثیر سه پارامتر فرآیند چگالی چاپ، سرعت چاپ و ضخامت لایه را بر مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده از PLA بررسی کردند و گزارش کردند که بیشترین مقاومت در چگالی چاپ 80 درصد رخ می‌دهد [19].

هدف اصلی این تحقیق بهبودسازی پارامترهای چاپ به منظور رسیدن به بیشترین خواص مکانیکی کششی بر اساس کمترین وزن، زمان و مقدار ماده مصرفی می‌باشد. بدین منظور بعد از ساخت رشته نانوکامپوزیتی، قطعات آزمایشگاهی دمبلی مطابق استاندارد و با توجه به آرایه‌های تاگوچی با چاپگر سه بعدی ساخته شده؛ استحکام آن‌ها با آزمون کشش اندازه‌گیری شده است.

2- مطالعه تجربی

2-1- مواد مورد استفاده

هدف این مطالعه بهبودسازی پارامترهای چاپ با بکارگیری درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربن در پلیمر ABS برای افزایش عملکرد مکانیکی قطعات نانوکامپوزیت‌های تولید شده به روش چاپ سه بعدی است. استفاده از ماده زمینه ABS به دلیل خواص مکانیکی قابل قبول، کاربردهای فراوان در صنایع مختلف، ارزان بودن قیمت و کیفیت چاپ بالا مورد نظر قرار گرفته است. از طریق یک رویکرد سیستماتیک که توسط طراحی آزمایش تاگوچی¹⁰ هدایت می‌شود. تأثیر عواملی همانند دمای چاپ، زاویه مسیر چاپ، درصد پرشوندگی، سرعت چاپ، الگوی پرشوندگی، کسر وزنی نانولوله کربنی و ضخامت لایه‌ها بر استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های چاپ شده بررسی می‌گردد. برای ماده زمینه، از پلیمر ABS، تهیه شده از شرکت فرگل¹¹ چین با چگالی 1.06 الی 1.08 گرم بر سانتی‌مترمکعب، دمای انتقال شیشه‌ای¹² 108 درجه سانتی‌گراد و وزن مولکولی 251 گرم بر مول استفاده شده است. نانولوله کربن نیز از شرکت

7 Deepak Kumar

8 Polyethylene Terephthalate Glycol

9 Kamil

10 Taguchi

11 Fergol Company

12 Glass transition temperature

1 Carbon nanotubes

2 Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

3 Aumate

4 Polypropylene (PP)

5 Dul

6 Mohanavel



Fig. 2 Stirring the solution with a magnetic stirrer

شکل 2 همزدن محلول با همزن مغناطیسی

جهت تفرق مناسب نانولوله های کربن در محلول و جلوگیری از کلوخه شدن، مخلوط بدست آمده در دستگاه التراسونیک پروبی قرار داده می شود. جهت استفاده از دستگاه مورد نظر، زمان روشن شدن دستگاه بر روی 10 ثانیه، زمان خاموش بودن 3 ثانیه، زمان اعمال امواج 15 دقیقه، توان دستگاه 300 وات و دمای دستگاه روی 37 درجه سانتی گراد تنظیم می گردد. برای ممانعت از افزایش بیش از حد دما حین این فرآیند، مخلوط مورد نظر داخل یک ظرف پر از یخ قرار داده می شود. در شکل 3، فرآیند اعمال امواج مافوق صوت صورت نمایش داده شده است.



Fig. 3 Ultrasonic device for proper dispersion of CNTs in ABS resin

شکل 3 دستگاه التراسونیک جهت تفرق مناسب نانولوله های کربن

پس از مرحله پراکنده سازی نانولوله، جهت تبخیر حلال استون باقی مانده در محلول، نمونه ها را به مدت 5 ساعت و در دمای 150 درجه سانتی گراد روی قرار داده می شود. سپس به مدت 36 ساعت نمونه ها را در یک محل خشک قرار داده می شود. بعد از تبخیر حلال باقی مانده در محلول، همانطور که در شکل 4 مشاهده می گردد؛ آمورف نمونه ها به دست می آید.

مواد نانویی پژوهشی آمریکا¹ با خلوصی بیش از 95 درصد وزنی که بیش از 97 درصد آن را نانولوله چندجداره تشکیل می دهد؛ استفاده شده است. نانولوله ها دارای قطر بیرونی 20 تا 30 نانومتر، قطر داخلی 5 تا 10 نانومتر، میانگین قطر 15 نانومتر، طول 10 الی 30 نانومتر و چگالی 2.1 گرم بر سانتی متر مکعب می باشند.

2-2- ساخت فیلامنت

فیلامنت در واقع یک رشته پلاستیکی است که به تغذیه کننده چاپگر وارد می شود با ذوب شدن آن، چاپگر فرآیند لایه نشانی را انجام می دهد. قطر این رشته ها معمولاً بین 1.75 تا 2.85 میلی متر است که هر کدام خواص مختلفی دارند و برای چاپ قطعه به وسیله آن ها به دمای ذوب متفاوتی نیاز هست. در چاپگر سه بعدی، فیلامنت به وسیله اکسترودر² با تنظیم سرعت آن به داخل لوله نازل کشیده شده، سپس با دمای معین ذوب می شود، بعد از طریق نازل³ با قطر کمتری خارج شده و با ایجاد لایه های نازک از فیلامنت روی هم و سپس سرد شدن، شکل نهایی را ایجاد می کند. برای ساخت فیلامنت نانوکامپوزیت، سه کسر وزنی 0.5، 0.8 و 1 درصد از نانولوله کربن بطور مجزا به 200 میلی لیتر محلول استون که حاوی گرانول های ABS است؛ اضافه می شود. هر نمونه شامل 100 گرم ماده بوده که این مقدار تشکیل شده از گرانول ABS و نانولوله کربن است که برای هر نمونه به 200 میلی لیتر استون اضافه می شود که در شکل 1 نمایان است.



Fig. 1 Sample containing multi-walled ABS/CNT in acetone solvent
شکل 1 نمونه حاوی CNT /ABS چند جداره در حلال استون

برای ترکیب نانولوله و گرانول ABS از همزن مغناطیسی⁴ استفاده می شود. برای استفاده از دستگاه مورد نظر، مگنت⁵ 3 سانتی متری بر روی سرعت 1000 دور در دقیقه و برای مدت 4 ساعت تنظیم می گردد تا گرانول در استون ذوب شده و با نانولوله های کربن چندجداره ترکیب شود. که در شکل 2 این فرآیند مشاهده می شود.

⁴ Magnetic stirrer
⁵ Magnet

¹ US Research Nanomaterials, Inc
² Extruder
³ Nozzle

2-3- طراحی آزمایش برای چاپ نمونه‌های نانوکامپوزیتی

در این بخش، اثر پارامترهای مختلف بر خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده نانوکامپوزیتی بررسی می‌شوند. این 7 متغیر عبارت‌اند از: زاویه چاپ، سرعت چاپ، الگوی پرشوندگی، درصد پرشوندگی، ضخامت لایه، دمای صفحه چاپ و درصد وزنی نانولوله‌های کربن. طراحی آزمایش بر اساس روش تاگوچی انجام می‌گیرد که مبنای این روش تحلیل آماری خواص مکانیکی می‌باشد. با توجه به اینکه برای هر پارامتر معرفی شده، 3 سطح متفاوت در نظر گرفته می‌شود؛ در صورت عدم استفاده از شیوه طراحی آزمایش تاگوچی می‌بایستی $3^7=2187$ حالت بررسی می‌گردید که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد. در حالیکه به استفاده از شیوه طراحی آزمایش تاگوچی که در جدول 1 نشان داده شده است؛ تنها 27 حالت مختلف نیاز به بررسی دارد.

2-4- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با چاپگر سه‌بعدی

مراحل اصلی چاپ نمونه آزمایشی دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM D638 تایپ V، تنظیم دمای نازل بر روی 230°C و تنظیم سیار پارامترها مطابق با آرایه‌های طراحی آزمایش تاگوچی مندرج در جدول 1 به شرح ذیل می‌باشد:

- ساخت و طراحی مدل CAD² قطعه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی (سالیدورک، اتوکد و ...)
- تبدیل مدل CAD طراحی شده در محیط نرم‌افزارهای طراحی به فرمت STL
- انتقال فایل STL به نرم‌افزار کیورا و گرفتن G-Code
- انتقال G-Code به دستگاه چاپ سه‌بعدی و اجرای فرآیند
- تمیزکاری نمونه و اتمام فرآیند ساخت قطعه

تصویر نمونه‌های آزمایشی چاپ شده برای 27 مورد مشخص شده در جدول 1، در شکل 6 ارائه شده است.

2-5- آزمون کشش

برای انجام آزمون کشش بر روی کلیه نمونه‌های آزمایشی چاپ شده و همچنین فیلامنت تولید شده، از دستگاه آزمون کشش و سرعت کشش یک میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید.



Fig. 4 Amorphous CNT/ABS samples.

شکل 4 آمورف نمونه‌های CNT/ABS

آمورف‌های بدست آمده در دستگاه خرد کن جهت آسیاب کردن قرار داده شده و گرانول مورد نظر از نمونه‌ها حاصل می‌شود. در این مرحله دمای دستگاه را 25 درجه و برای مدت 15 دقیقه تنظیم می‌گردد. گرانول‌های به دست آمده در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

بعد از آسیاب کردن، گرانول‌های بدست آمده به مدت 24 ساعت در دستگاه کوره خلاء¹ قرار داده می‌شود تا استون باقی مانده در زنجیره‌های پلیمری تبخیر شود. تبخیر کامل حلال و خشک شدن گرانول‌ها موجب می‌شود که در مرحله آخر تولید فیلامنت، گرانول‌ها در داخل دستگاه اکسترودر حباب نداشته باشند و این مطلب روی کیفیت فیلامنت نهایی تأثیرگذار است.

در مرحله نهایی برای تولید فیلامنت‌های با قطر 1.75 میلی‌متر، گرانول‌ها را به ترتیب جهت ساخت فیلامنت مورد نظر از هر نمونه به داخل دستگاه اکسترودر تک‌پیچ واردون ریخته می‌شوند. شرایط دمایی اکسترودر و سرعت فرآیند اکسترودر به دقت کنترل می‌گردد با استفاده از کولیس، مقطع فیلامنت خروجی در هر 15 سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌گردد تا اطمینان حاصل شود که قطر فیلامنت تغییر نکرده و سطح فیلامنت کاملاً بصورت مقطعی دایره‌ای ثابت باقیمانده است. فیلامنت‌های تولید شده با استفاده از اکسترودر تک‌ماردون در شکل 5 نمایش داده شده است.

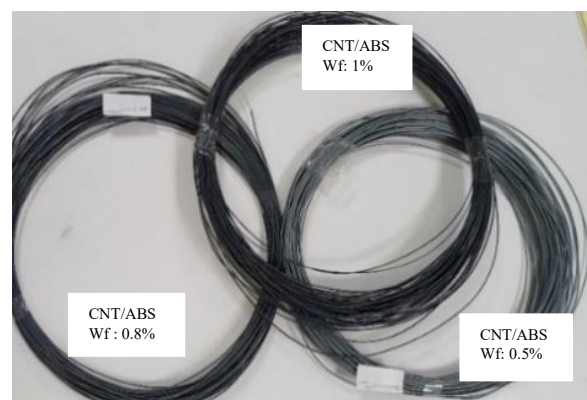


Fig. 5 Filament produced using a single-screw extruder

شکل 5 فیلامنت تولید شده با استفاده از اکسترودر تک‌ماردون

² Computer-aided Design

¹ Vacuum oven

جدول 1 طراحی آزمایش به روش تاگوچی

Table 1 DOE based on Taguchi method

پارامترهای چاپ	1 زاویه چاپ (°)	2 الگوی پرشوندگی	3 دمای صفحه (°C)	4 ضخامت لایه (mm)	5 سرعت چاپ (mm/s)	6 کسر وزنی (%)	7 درصد پرشوندگی (%)
1	[-30,+30]	مسطحی	70	0.1	10	0.5	50
2	[-30,+30]	مثلثی	90	0.2	10	0.5	50
3	[-30,+30]	شبه‌کای	110	0.3	10	0.5	50
4	[-30,+30]	مسطحی	70	0.1	20	0.8	75
5	[-30,+30]	مثلثی	90	0.2	20	0.8	75
6	[-30,+30]	شبه‌کای	110	0.3	20	0.8	75
7	[-30,+30]	مسطحی	70	0.1	30	1.0	100
8	[-30,+30]	مثلثی	90	0.2	30	1.0	100
9	[-30,+30]	شبه‌کای	110	0.3	30	1.0	100
10	[-45,+45]	شبه‌کای	90	0.1	30	0.8	50
11	[-45,+45]	مسطحی	110	0.2	30	0.8	50
12	[-45,+45]	مثلثی	70	0.3	30	0.8	50
13	[-45,+45]	شبه‌کای	90	0.1	10	1.0	75
14	[-45,+45]	مسطحی	110	0.2	10	1.0	75
15	[-45,+45]	مثلثی	70	0.3	10	1.0	75
16	[-45,+45]	شبه‌کای	90	0.1	20	0.5	100
17	[-45,+45]	مسطحی	110	0.2	20	0.5	100
18	[-45,+45]	مثلثی	70	0.3	20	0.5	100
19	[-60,+60]	مثلثی	110	0.1	20	1.0	50
20	[-60,+60]	شبه‌کای	70	0.2	20	1.0	50
21	[-60,+60]	مسطحی	90	0.3	20	1.0	50
22	[-60,+60]	مثلثی	110	0.1	30	0.5	75
23	[-60,+60]	شبه‌کای	70	0.2	30	0.5	75
24	[-60,+60]	مسطحی	90	0.3	30	0.5	75
25	[-60,+60]	مثلثی	110	0.1	10	0.8	100
26	[-60,+60]	شبه‌کای	70	0.2	10	0.8	100
27	[-60,+60]	مسطحی	90	0.3	10	0.8	100

3-نتایج آزمون

نتایج آزمون کشش برای فیلامنت‌های تولید شده در جدول 2 درج گردیده است. مطابق (جدول 2) بدست آمده است. همانطور که از نتایج مشاهده می‌گردد، افزودن CNT به ABS تأثیر قابل توجهی بر استحکام کششی و مدول یانگ می‌گذارد. برای ABS خالص مقدار استحکام کششی 18.34 MPa و مدول یانگ 1619.9 MPa می‌باشد که با افزودن 0.5% وزنی نانولوله کربن، استحکام کششی فیلامنت به 41.06 MPa و مدول یانگ 2050.81 MPa می‌رسد که به ترتیب معرف 20.12% و 26.63% افزایش می‌باشد. انحراف معیار نتایج مربوط به فیلامنت حاوی 0.5% وزنی نانولوله کربن در مقایسه با فیلامنت ABS خالص، نیز افزایش قابل توجهی داشته است که نشان‌دهنده نوسانات بیشتر در خواص است. با افزایش کسر وزنی به 0.8% میزان استحکام و مدول به ترتیب 45.15% و 15.64% نسبت به ABS خالص افزایش داشته، اما نسبت به کسروزی 0.5% کاهش داشته است. همچنین در کسر وزنی 1% CNT میزان استحکام کششی و مدول نسبت به ABS خالص، 11.11% و 5.34% افزایش داشته است. به طور کلی افزودن نانولوله‌های کربنی به ABS تأثیر مثبتی بر استحکام کششی و مدول یانگ داشته‌است. به ویژه

در کسر وزنی پایین 0.5%، بیشترین بهبود در خواص مکانیکی مشاهده می‌شود. با افزایش درصد نانولوله‌ها (0.8%، 1%)، اثر تقویتی کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دلیل تجمع نانولوله‌ها و کاهش پراکندگی یکنواخت در ماتریس باشد. به عبارت دیگر، با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی، احتمال شکل‌گیری کلوخه‌های موضعی حاوی نانولوله کربن افزایش می‌یابد. با توجه به استحکام کششی و مدول یانگ بیشتر می‌توان دریافت که فیلامنت تولید شده با 0.5 درصد وزنی نانولوله کربن، دارای کیفیت مطلوب‌تری نسبت به دیگر فیلامنت‌ها می‌باشد.

نتایج بدست آمده از آزمون کشش برای نمونه‌های دمبلی شکل نیز در جدول 3 ارائه گردیده است. با توجه به اینکه بر هر کدام از حالت‌های 27 گانه، پنج نمونه چاپ گردیده است؛ نتایج میانگین در این جدول ارائه گردیده است.

علاوه بر نتایج بدست آمده از آزمون کشش، وزن قطعات چاپ شده، مدت زمان صرف شده برای چاپ هر نمونه، و مقدار فیلامنت مصرفی نیز در جدول 3 گزارش شده است. همچنین در این جدول، نسبت استحکام به حاصل ضرب وزن قطعه در زمان چاپ در طول فیلامنت مصرفی ($\frac{S}{W \cdot t \cdot l}$) نیز گزارش شده است.

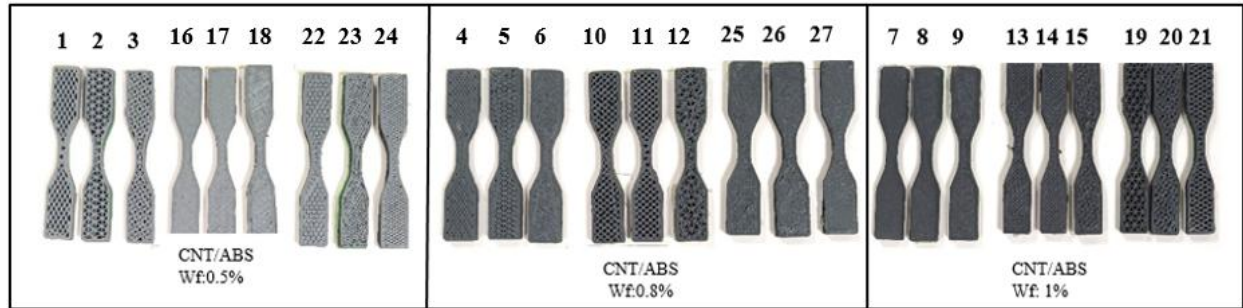


Fig. 6 Printed nanocomposite samples containing multi-walled carbon nanotubes

شکل 6 نمونه های نانوکامپوزیتی چاپ شده حاوی نانولوله کربن چندجداره

جدول 2 نتایج آزمون کشش فیلامنت

Table 2 Filament tensile test results.

مدول یانگ (E(MPa))		استحکام کششی (σ_{max} (MPa))		
انحراف معیار (MPa)	مدول یانگ نهایی میانگین (E^{avg} (MPa))	انحراف معیار (MPa)	استحکام کششی نهایی میانگین (σ_{max}^{avg} (MPa))	نوع فیلامنت
161.9	1619.90	3.42	34.18	ABS
205	2050.81(+26.63%)	4.11	41.06(+20.12%)	CNT/ABS 0.5%
187.2	1872.99 (+15.64%)	3.95	39.46(+15.45%)	CNT/ABS 0.8%
170.6	1706.51 (+5.34%)	0.80	37.97(11.11%)	CNT/ABS 1 %

جدول 3 نتایج آزمون کشش، وزن، زمان چاپ و فیلامنت مصرفی نمونه های چاپ شده

Table 3 Results of tensile tests, weight, printing time and consumed filament of 3D-printed specimens

S WxTxL	مقدار طول فیلامنت مصرفی (متر)	مدت زمان چاپ (دقیقه)	وزن قطعه (گرم)	انحراف معیار مدول کششی	میانگین مدول کششی (مگاپاسکال)	انحراف معیار استحکام کششی	میانگین استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	نوع نمونه
2.01	0.47	21	1	80.8	1060.19	1.37	19.88	1
2.73	0.53	12	1	109.4	986.85	0.77	17.35	2
3.55	0.6	10	0.9	86.3	1190.11	0.56	19.16	3
1.30	0.59	26	1.2	203	1389.08	1.95	23.86	4
2.19	0.65	15	1.1	190.6	1554.82	0.44	23.49	5
1.97	0.73	12	1.3	38.8	1567.34	0.53	22.41	6
0.88	0.71	29	1.5	126.3	1827.11	1.08	27.11	7
1.27	0.77	17	1.7	124.9	2209.88	0.82	28.19	8
1.53	0.85	13	1.5	156.3	2140.12	2.29	25.30	9
0.95	0.47	51	0.9	194.7	979.82	0.47	20.60	10
1.54	0.52	27	1	159.5	1277.18	1.06	21.68	11
1.84	0.62	19	0.9	162.8	1157.82	0.60	19.52	12
0.45	0.6	66	1.5	141.4	1419.24	0.72	26.74	13
0.83	0.65	33	1.2	57.9	1643.85	0.90	21.32	14
1.08	0.73	24	1.4	194.3	1635.50	0.81	26.38	15
0.33	0.72	76	1.6	155.5	1858.56	2.03	28.92	16
0.72	0.77	40	1.5	139.5	1755.42	1.64	33.25	17
0.75	0.85	28	1.2	91.3	1186.45	1.04	21.32	18
1.23	0.6	28	1	170.3	1056.38	0.53	20.60	19
2.26	0.59	16	1.1	111.8	1566.3	1	23.49	20
1.97	0.65	13	1	112.5	864.35	0.86	16.62	21
1.05	0.6	35	1.1	100.6	1255.58	2.30	24.22	22
1.59	0.66	20	1.1	81.6	1524.08	1.17	23.13	23
2.01	0.73	15	1.1	202.8	1532.23	1.94	24.22	24
0.80	0.71	40	1.4	162.9	2259.2	0.43	31.81	25
1.37	0.77	22	1.4	39.9	2259.68	1.51	32.53	26
1.43	0.85	17	1.4	150.9	2143.25	0.62	28.92	27

4-تحلیل نتایج به روش تاگوچی

در این بخش، نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مدول کششی و استحکام کششی قطعات نانوکامپوزیتی تولید شده به روش چاپ سه‌بعدی، با استفاده از شیوه تاگوچی، تحلیل می‌گردند.

4-1-اثر اصلی

اثر اصلی¹، تأثیر یک متغیر مستقل را بر روی یک متغیر وابسته بدون توجه به تأثیر سایر متغیرهای مستقل بررسی می‌نماید. همانطور که قبلاً ذکر گردید، در این تحقیق اثر 7 متغیر مختلف مشتمل بر زاویه چاپ، سرعت چاپ، الگوی پرشوندگی، درصد پرشوندگی، ضخامت لایه، دمای صفحه چاپ و درصد وزنی نانولوله‌های کربن بر روی مدول و استحکام کششی نمونه‌های چاپ شده ارزیابی گردیدند. 7 متغیر ذکر شده، متغیرهای اصلی و مدول و استحکام کششی، 2 متغیر مستقل برای بررسی اثر اصلی می‌باشند.

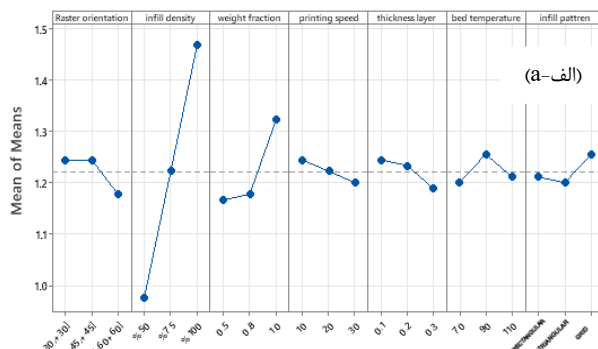
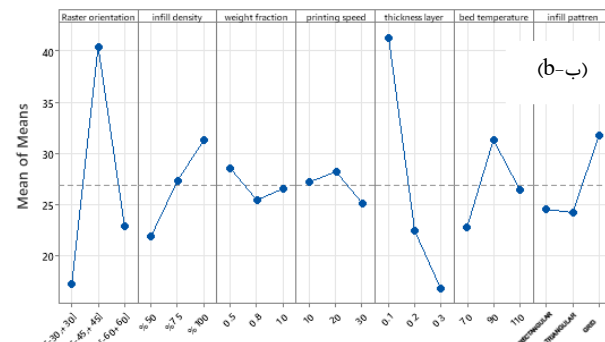
نمودارهای بررسی اثر اصلی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تپ و بر اساس ورود مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل 7 ارائه شده‌اند. نمودارها نشان می‌دهند که چگالی و الگوی پرشوندگی بیشترین تأثیر را دارند؛ در حالی که دمای بستر و زاویه چاپ کمترین تأثیر را دارند. افزایش چگالی پرشوندگی موجب کاهش فضاهای خالی و بهبود استحکام می‌شود. سرعت بالای چاپ و ضخامت زیاد لایه‌ها استحکام را کاهش می‌دهند، زیرا پیوند بین لایه‌ها ضعیف‌تر می‌شود. الگوی شبکه‌ای با توزیع یکنواخت تنش، عملکرد بهتری دارد. استفاده از نانولوله‌های کربنی نیز باعث بهبود چسبندگی لایه‌ها و افزایش مقاومت نهایی قطعات می‌شود. افزایش دمای بستر و نازل باعث کاهش ویسکوزیته مذاب و بهبود نفوذ زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌ها می‌شود که مستقیماً استحکام کششی و مدول یانگ را تقویت می‌کند. سرعت چاپ پایین‌تر نیز زمان تماس مذاب را افزایش داده و فرصت بیشتری برای ایجاد پیوند بین لایه‌ها فراهم می‌کند.

در بررسی اثر پارامترهای چاپ بر وزن قطعه، مشخص شد که زاویه چاپ تأثیر قابل توجهی ندارد، اما چگالی پرشوندگی و کسری وزنی عوامل

اصلی در افزایش وزن و استحکام هستند، چرا که باعث مصرف بیشتر مواد و کاهش فاصله بین لایه‌ها می‌شوند. همچنین، ضخامت لایه نیز با افزایش، منجر به وزن بیشتر و کاهش چسبندگی می‌شود. در مقابل، سرعت چاپ و دمای بستر تأثیر اندکی بر وزن دارند، اما چسبندگی لایه اول و جلوگیری از تاب برداشتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. الگوی پرشوندگی شبکه‌ای بیشترین استحکام و وزن را در میان الگوها ایجاد می‌کند. در مورد زمان چاپ، پارامترهایی نظیر زاویه چاپ، چگالی پرشوندگی، کسری وزنی و ضخامت لایه موجب افزایش زمان می‌شوند. زاویه ± 45 مسیر نازل را طولانی‌تر می‌کند و تراکم بیشتر نیز موجب افزایش خطوط چاپ می‌شود. سرعت چاپ به‌طور واضح زمان چاپ را کاهش می‌دهد، اما ممکن است به قیمت کاهش چسبندگی تمام شود. ضخامت کمتر لایه‌ها نیز به دلیل افزایش تعداد لایه‌ها، زمان چاپ را بالا می‌برد. در کل، برای کاهش زمان چاپ باید سرعت را بالا برد، چگالی پرشوندگی و ضخامت لایه را کاهش داد و تنظیم مناسب کسری وزنی را لحاظ کرد.

در تحلیل مقدار فیلامنت مصرفی، مهم‌ترین عوامل مؤثر شامل زاویه چاپ، چگالی پرشوندگی، ضخامت لایه و کسری وزنی هستند. افزایش این پارامترها موجب افزایش قابل توجه مصرف فیلامنت می‌شود. در مقابل، دمای بستر و نوع الگوی پرشوندگی تأثیر محدودی دارند، هرچند در الگوی مثلی به دلیل مسیرهای پیچیده‌تر، مصرف بیشتر مشاهده شد. در نتیجه، برای کاهش مصرف مواد، کاهش چگالی پرشوندگی و ضخامت لایه‌ها پیشنهاد می‌شود؛ بی‌آنکه کیفیت ساختاری قطعه فدا شود.

نمودار اثر اصلی در شکل 8 نسبت استحکام به وزن را در برابر زمان چاپ و میزان فیلامنت مصرفی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار این نسبت در زاویه چاپ (± 30) دیده می‌شود. در این زاویه مسیر چاپ موازی‌تر با جهت تنش اعمالی است و در نتیجه استحکام کششی بالاتر به دست می‌آید. کسری وزنی 0.5% بهترین عملکرد را نشان می‌دهد که ناشی از میزان کمتر شکل‌گیری کلوخه‌های موضعی نانولوله کربنی می‌باشد. با افزایش کسری وزنی نانولوله کربن، به علت تشکیل کلوخه‌های موضعی و کاهش استحکام، نسبت مورد بررسی نیز کاهش می‌یابد.

Main Effects Plot for Means
Data MeansMain Effects Plot for Means
Data Means¹ Main effect

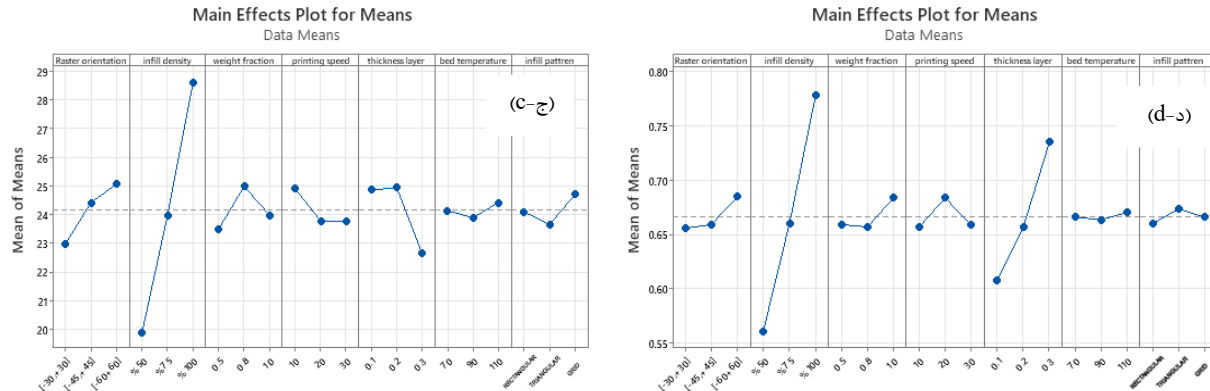


Fig.7 Main effect diagrams: a) weight, b) printing time, c) tensile strength and d) Amount of utilized filament used

شکل 7 نمودار اثر اصلی (الف) وزن قطعات، (ب) زمان چاپ، (ج) استحکام کششی و (د) مقدار فیلامنت مصرفی

دمای بستر 90 درجه سانتی‌گراد بیشترین کارایی را دارد و از ترک‌خوردگی جلوگیری می‌کند. در دمای 70 درجه چسبندگی لایه اول کمتر است و احتمال تاب برداشتن افزایش می‌یابد، که در نهایت باعث کاهش استحکام کلی قطعه می‌شود. افزایش دما به 90 درجه، چسبندگی بهتر و کیفیت سطحی بالاتری ایجاد می‌کند. دمای 110 درجه نیز اگرچه ممکن است منجر به کاهش خنک‌کاری و بروز خطای ابعادی شود، ولی در این نمودار هنوز عملکرد خوبی دارد. با این حال، تفاوت بین سطوح آن قدر زیاد نیست که دمای بستر به عنوان یک پارامتر بحرانی در نظر گرفته شود. این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر چسبندگی لایه اول دارد ولی تأثیرش بر وزن، زمان و مصرف ماده اندک است، بنابراین از نظر نسبت کلی، تأثیر محدودی دارد.

همچنین بالاترین نسبت برای الگوی پرشوندگی در سطح شبکه‌ای دیده می‌شود، سپس مستطیلی و کمترین مقدار مربوط به مثلثی است. الگوی شبکه‌ای با ساختار هندسی مقاوم‌تر، توزیع تنش بهتری در قطعه ایجاد می‌کند و مقاومت مکانیکی بالاتری ارائه می‌دهد. مستطیلی نیز به دلیل ساختار مارپیچی سه‌بعدی، چسبندگی لایه‌ای خوبی دارد ولی در زمان و مصرف ماده به‌صرفه‌تر از مثلثی است. حالت مثلثی ساده‌ترین الگوست؛ ولی از لحاظ انتقال تنش و مقاومت مکانیکی عملکرد ضعیف‌تری دارد. اگرچه ممکن است وزن و زمان چاپ را کاهش دهد، اما به دلیل استحکام پایین‌تر، نسبت نهایی کاهش می‌یابد. بنابراین این پارامتر به‌طور چشم‌گیری بر عملکرد نهایی تأثیر دارد و انتخاب الگوی مناسب یکی از مهم‌ترین تصمیم‌ها در چاپ قطعه مقاوم با حداقل مصرف است.

ضخامت لایه‌ها در سطوح 0.2 و 0.3 میلی‌متر عملکرد خوبی دارند، در حالی که در 0.1 mm، نسبت مورد بررسی کاهش قابل توجهی دارد. در ضخامت‌های زیاد، تعداد لایه‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین زمان چاپ و مصرف فیلامنت کاهش می‌یابد، در حالی که اگر چسبندگی لایه‌ها مناسب باشد، استحکام مطلوبی حفظ می‌شود. در ضخامت 0.1 mm به دلیل افزایش تعداد لایه‌ها، زمان چاپ زیاد شده و احتمال بروز خطای لایه‌ای نیز بیشتر می‌شود. بنابراین با وجود احتمال استحکام بالاتر، تأثیر افزایش زمان و وزن باعث کاهش نسبت شده است. ضخامت 0.2 mm به نظر

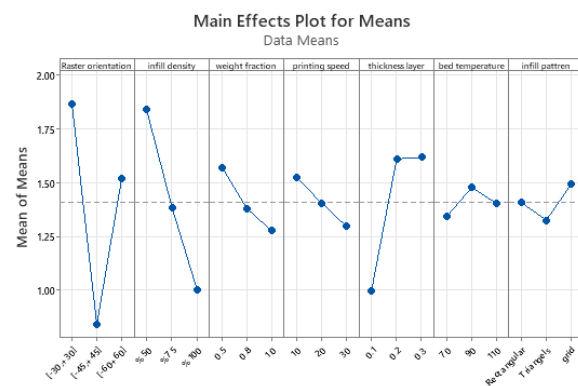


Fig. 8 Main effect diagram for $S/(W \times t \times l)$

شکل 8 نمودار اثر اصلی برای $\frac{S}{W \times t \times l}$. مقدار نسبت در چگالی پرشوندگی سطح 50% بیشترین است، سپس کاهش می‌یابد و در 100% به کمترین مقدار می‌رسد. دلیل این کاهش آن است که با افزایش چگالی، اگرچه استحکام تا حدی افزایش می‌یابد؛ اما وزن قطعه، زمان چاپ و مصرف فیلامنت به شدت بالا می‌رود. در چگالی پرشوندگی 50%، فضاهای خالی زیادی درون قطعه وجود دارد که مصرف فیلامنت و زمان چاپ را کم می‌کند، در حالی که هنوز استحکام قابل قبولی باقی می‌ماند.

در خصوص سرعت چاپ، نسبت مورد بررسی در سرعت چاپ 10 mm/s بیشترین و در سرعت چاپ 30 mm/s کمترین مقدار را نشان می‌دهد. دلیل آن این است که در سرعت‌های بالاتر، نازل زمان کافی برای ذوب کامل و ادغام لایه‌ای ندارد، که باعث کاهش استحکام نهایی می‌شود. با این حال، افزایش سرعت چاپ معمولاً باعث کاهش زمان و مصرف انرژی می‌شود، اما در اینجا اثر منفی آن بر استحکام بیشتر از اثر مثبت آن بر کاهش زمان بوده است. بنابراین، سرعت‌های پایین‌تر اگرچه ممکن است زمان چاپ را افزایش دهند، ولی باعث افزایش چسبندگی بین لایه‌ها و در نهایت افزایش مقدار نسبت مورد نظر می‌شوند. سرعت چاپ پارامتر حساسی است که نیاز به تنظیم دقیق دارد تا تعادل میان کیفیت چاپ و زمان حفظ شود.

چاپ است. بالاترین مقدار S/R مربوط به نمونه آزمایشی شماره 3 با مقدار 10.98 dB است، که نشان‌دهنده بهترین عملکرد در بهینه‌سازی نسبت استحکام به وزن می‌باشد. این مطب در سازگاری کامل با تحلیل اثر اصلی ارائه شده در قسمت قبلی می‌باشد. از سوی دیگر، کمترین مقدار S/R در نمونه آزمایشی شماره 16 با مقدار 9.63 dB- مشاهده می‌شود. این مطلب نشان می‌دهد که این نمونه کمترین کارایی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته است. این اختلاف در S/R میان آزمایش‌ها، بیانگر تأثیر تغییرات پارامترهای چاپ بر روی خروجی نهایی است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تنظیم دقیق پارامترها می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را بهینه کرده و استحکام به وزن، در مدت زمان چاپ در مقدار فیلامنت مصرفی نمونه‌ها را به حداکثر برساند. برای درک بهتر این تأثیرات، می‌توان از تحلیل آماری تحلیل واریانس استفاده کرد تا میزان معناداری هر پارامتر در تغییرات S/R مشخص شود.

جدول 4 نسبت سیگنال به نویز $\frac{S}{W \times t \times l}$.
Table 4 Signal-to-noise ratio $S/(W \times t \times l)$.

نسبت سیگنال به نویز	نمونه آزمایشی
6.06	1
8.69	2
10.98	3
2.21	4
6.81	5
5.85	6
-1.21	7
2.01	8
3.64	9
-0.45	10
3.75	11
5.30	12
-6.94	13
-1.72	14
0.59	15
-9.63	16
-2.97	17
-2.62	18
1.73	19
7.08	20
5.85	21
0.34	22
4.03	23
6.06	24
-1.94	25
2.73	26
3.0	27

3-4- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس در آزمایش تاگوچی روشی آماری برای تعیین و اندازه‌گیری تأثیر عوامل (پارامترها) و سطوح آن‌ها بر روی معیار عملکرد سیستم است. این تحلیل با استفاده از طراحی آرایه‌های متعامد تاگوچی، واریانس کل داده‌های حاصل از آزمایش را به اجزاء مختلف تقسیم می‌کند تا سهم هر عامل در تغییرات نتایج مشخص شود. هدف اصلی شناسایی عوامل

می‌رسد تعادل خوبی میان چسبندگی، وزن و زمان برقرار کرده است، و مقدار نسبت در آن بیشتر است. این پارامتر اثر چشم‌گیری بر زمان و وزن دارد و باید برای کیفیت و بهره‌وری به‌خوبی انتخاب شود.

در نهایت، الگوی پرشوندگی شبکه‌ای با ساختار پیوسته، بهترین نسبت استحکام به وزن را ارائه می‌دهد. ترکیب بهینه تمام این پارامترها منجر به قطعه‌ای با بیشترین کارایی و کمترین مصرف فیلامنت می‌شود.

2-4- نسبت سیگنال به نویز

تحلیل نسبت سیگنال به نویز¹ برای انتخاب بهترین ترکیب پارامترها و افزایش قابلیت اطمینان فرآیند استفاده می‌شود. این نسبت نشان‌دهنده تأثیر متغیرهای کنترل‌ناپذیر (نویزها) بر خروجی و چگونگی کمینه کردن اثرات آن‌هاست. هدف از این تحلیل شناسایی ترکیب پارامترهایی است که بیشترین کیفیت و کمترین حساسیت به نویز را فراهم کنند. هرچه قدر نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد مطلوب‌تر است، زیرا مقادیر بیشتر سیگنال به نویز مقادیر کوچک‌تر واریانس نتایج را حول مقادیر هدف نشان می‌دهد. در اینجا زمان تحلیل آماری مشخصه بزرگتر-بهتر² انتخاب شده است. به منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز از روابط (1) و (2) استفاده شده‌است:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10}(MSD) \quad (2)$$

در این روابط MSD میانگین مربع انحرافات، y_i خروجی هر آزمایش، n تعداد آزمایش‌ها و S/N بیانگر نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. در این پژوهش، آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفته و نسبت سیگنال به نویز فقط برای پارامتر هدف $\frac{S}{W \times t \times l}$ محاسبه شده است. در آزمون کشش، معیار اصلی استحکام کششی نهایی بوده و برای تحلیل داده‌ها از روش بزرگتر-بهتر استفاده شده است. مقدار S/N بالاتر در این آزمون نشان‌دهنده پایداری بهتر نتایج و حساسیت کمتر به تغییرات تصادفی است. جدول 4 مقادیر سیگنال به نویز را برای آزمایش‌های $\frac{S}{W \times t \times l}$ انجام شده نمایش می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر بزرگ و نزدیک به هم بیانگر تأثیر بالای عوامل قابل کنترل بر عوامل غیر قابل کنترل می‌باشند و هرچه این نسبت بیشتر باشد، تنظیمات عوامل سیگنال موجب کمینه شدن اثر عوامل نویز می‌شود.

تحلیل نتایج نسبت سیگنال به نویز به روش بزرگتر-بهتر برای 27 آزمایش نشان می‌دهد که مقادیر S/N به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر مقدار $\frac{S}{W \times t \times l}$ قرار دارند. هر چه مقدار این نسبت بیشتر باشد، مقدار S/N نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود استحکام به وزن در واحد زمان

¹ Signal to noise ratio

² Larger is better

چاپ، کسر وزنی و سرعت چاپ نیز با مقادیر P-value کمتر از 0.05. تأثیر معناداری دارند، اما میزان اثرگذاری آن‌ها به ترتیب 2.04%، 1.83% و 1.79% است. در مقابل، دمای بستر و الگوی پرشوندگی به دلیل مقادیر P-value بالاتر (0.558 و 0.192) فاقد تأثیر معنادار بر عملکرد نهایی هستند. سهم خطا نیز معادل 1.35% از کل تغییرات است که نشان می‌دهد مدل به خوبی توانسته است تغییرات داده‌ها را تبیین کند. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که برای بهبود پارامتر هدف، تمرکز بر درصد پرشوندگی و ضخامت لایه‌ها بیشترین بازدهی را خواهد داشت.

4-4-آزمایش تأیید

آزمایش تأیید¹ در روش تاگوچی فرآیندی است که به منظور بررسی و اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش‌ها انجام می‌شود. در این مرحله، شرایط بهینه پیشنهادی از تحلیل داده‌ها در عمل اجرا شده و نتایج واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه می‌شود. هدف این آزمایش، اطمینان از صحت مدل و دقت پیش‌بینی‌ها در شرایط واقعی است. به منظور تأیید صحت انجام روش تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، یک قطعه تولید نشده به شیوه آزمایشگاهی که مشخصات آن در جدول 1 وجود ندارد، انتخاب می‌گردد. برای این نمونه، سطوح مشخصه از متغیرها به این صورت می‌باشند که درصد پرشوندگی 100٪، کسروزی 1٪، سرعت چاپ 30 میلی‌متر برثانیه، ضخامت لایه 0.1 میلی‌متر، دمای بستر 110 درجه سانتی‌گراد، الگوی پرشوندگی شبکه‌ای و زاویه چاپ $45^\circ \pm$ در نظر گرفته می‌شود. استحکام کششی مطابق (جدول 8) پیش‌بینی شده است. بعد از پیش‌بینی مدل، نمونه‌ای دقیقاً در تطابق با مشخصات مذکور ساخته و استحکام آن اندازه‌گیری می‌شود. نتایج پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی در قالب آزمون تأیید در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آزمون کشش در جدول 6 مقایسه گردیده است.

تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی آن‌ها در بهبود عملکرد سیستم است. این روش اهمیت آماری تأثیر عوامل را بررسی کرده و به بهینه‌سازی طراحی فرآیند کمک می‌کند. به منظور محاسبه و تحلیل واریانس از روابط (3) و (4) استفاده شده است.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - C.F \quad (3)$$

$$C.F = \frac{T^2}{n} \quad (4)$$

در این روابط SS_T مجموع مربع انحرافات، C.F فاکتور تصحیح و T بیانگر مجموع خروجی آزمایش‌ها می‌باشند. برای نشان دادن میزان تأثیر هر متغیر بر خروجی از مشخصه F استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان شده است:

$$F = \frac{MS_a}{MS_e} \quad (5)$$

در این رابطه MS_a میانگین مربعات برای هر متغیر و MS_e میانگین مربعات خطا می‌باشد. در جدول 5 تحلیل واریانس برای آزمایش‌های آزمون کشش انجام شده نشان داده می‌شود. نتایج تحلیل واریانس از آزمایش تاگوچی برای آزمون کشش نشان می‌دهند که از میان متغیرهای مورد بررسی، درصد پرشوندگی با مقدار مجموع مربعات برابر با 37.0169 و درصد تأثیر 68.80%، بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی دارد. مقدار مشخصه F معادل 304.73 و مقدار P-value برابر با 18.5 نشان‌دهنده تأثیر معنادار و بسیار قوی این پارامتر است. در رتبه دوم، ضخامت لایه‌ها با مجموع مربعات 12.7211 و تأثیر 23.63% قرار دارد که مشخصه F آن 104.72 و P-value آن نیز 6.36 است، این اعداد گویای نقش مهم ضخامت لایه‌ها در بهبود پارامتر هدف هستند. سایر پارامترها از جمله زاویه

جدول 5 تحلیل واریانس S/(W×t×l).

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	میزان تأثیر %
زاویه چاپ (°)	2	4.9055	2.45273	59.11	41.97
درصد پرشوندگی (%)	2	3.1556	1.57847	38.04	27.00
کسروزی (g)	2	0.4017	0.20085	84.84	3.44
سرعت چاپ (mm/s)	2	0.22861	0.11452	2.76	1.96
ضخامت لایه (mm)	2	2.2861	1.14303	27.55	19.57
دمای صفحه (°C)	2	0.0817	0.04083	0.98	0.70
الگوی پرشوندگی	2	0.1250	0.06251	1.95	1.07
خطا	12	0.4979	0.0	-	-
مجموع	26	11.6838	-	-	100

¹ Confirmation test

جدول 6 نتایج آزمون تائید.

Table 6 Restults of confirmation test.

پارامتر	مقدار تجربی	مقدار پیش‌بینی‌شده	درصد خطا
وزن قطعه (گرم)	1.18	1.2	1.67%
مدت زمان چاپ (دقیقه)	26	25	4.00%
فیلامنت مصرفی (متر)	0.60	0.62	3.23%
استحکام کششی (مگاپاسکال)	28.4	28.9	1.73%

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تائید نشان می‌دهد که مدل تاگوچی در پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی و پارامترهای تولید قطعه، دقت بسیار خوب دارد. وزن قطعه که مقدار پیش‌بینی‌شده آن 1.2 گرم بود، در آزمایش تجربی 1.18 گرم اندازه‌گیری شد که تنها با 1.67% اختلاف مواجه بود؛ این نشان می‌دهد که مدل توانسته است به‌خوبی مقدار مواد مصرفی را پیش‌بینی کند. مدت زمان چاپ نیز با مقدار پیش‌بینی‌شده 25 دقیقه، در آزمایش تجربی 26 دقیقه اندازه‌گیری شد که اختلاف 4% نشان‌دهنده انطباق واقعیت است. مقدار فیلامنت مصرفی نیز از مقدار پیش‌بینی‌شده 0.62 متر به مقدار تجربی 0.6 متر تغییر یافت که تنها 3.23% خطا دارد، این موضوع بیانگر صحت مدل در تخمین مصرف مواد اولیه است. از همه مهم‌تر، استحکام کششی که به عنوان معیاری از کیفیت و مقاومت قطعه شناخته می‌شود، از مقدار پیش‌بینی‌شده 28.9 مگاپاسکال به 28.4 مگاپاسکال در آزمایش تجربی رسید که تنها 1.73% اختلاف دارد و نشان‌دهنده همخوانی بسیار خوب مدل تاگوچی با واقعیت است. این نتایج تائید می‌کند که مدل طراحی‌شده با استفاده از روش تاگوچی توانسته است با دقت قابل قبولی ویژگی‌های مکانیکی و تولیدی قطعه را پیش‌بینی کند و برای بهینه‌سازی تولید در شرایط واقعی مناسب است.

4-5- حالت بهینه

در نهایت، حالت بهینه متناظر با نمونه نوع 3 می‌باشد که بر اساس اطلاعات مندرج در جدول 1، این نمونه بر اساس زاویه چاپ $30^\circ \pm$ ، درصد پرشوندگی 50%، کسر وزنی نانولوله 0.5%، الگوی شبکه‌ای، ضخامت 0.3mm، سرعت 10mm/s و دمای 110°C تولید شده است.

تولید گردیده است. لازم به توجه است که نمونه نوع 3 به عنوان حالت بهینه، حداکثر استحکام قابل حصول را پیشنهاد نمی‌دهد؛ بلکه نسبت استحکام به وزن، زمان چاپ و فیلامنت مصرفی را به عنوان حالت بهینه ارائه می‌دهد. بعنوان مثال، استحکام‌های نمونه‌های 25 و 26 از نمونه 3 بیشتر می‌باشد، اما صرفه اقتصادی آن‌ها هم به علت مصرف بیشتر مواد و هم به علت زمان چاپ بیشتر، کمتر می‌باشد. نمونه 10 نیز از نمونه 3 استحکام نهایی بیشتری دارد. حتی در نمونه 10، میزان فیلامنت مصرفی کمتر از نمونه 3 می‌باشد؛ ولیکن به علت زمان چاپ بسیار کمتر نمونه 3 نسبت به نمونه 10، بازهم برنده بین این دو حالت، همان نمونه 3 می‌باشد.

5- جمع‌بندی

در این مقاله، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی برای تولید نانوکامپوزیت‌های CNT/ABS با استفاده از روش تاگوچی به منظور

بهبود خواص مکانیکی، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی پژوهش، بهینه‌سازی پارامترهای چاپ سه‌بعدی شامل دمای چاپ، زاویه چاپ، درصد پرشوندگی، سرعت چاپ، الگوی پرشوندگی، کسر وزنی نانولوله‌های کربن و ضخامت لایه‌ها برای دستیابی به قطعاتی با استحکام کششی، مدول یانگ، وزن بهینه، زمان چاپ کمتر و مصرف فیلامنت حداقلی می‌باشد. نتایج نشان داد که در رتبه اول درصد پرشوندگی و در رتبه دوم ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی و مدول یانگ دارند؛ به‌طوری‌که افزایش درصد پرشوندگی و کاهش ضخامت لایه‌ها منجر به افزایش خواص مکانیکی و کاهش مصرف می‌گردد. در مقابل، زاویه چاپ، کسر وزنی نانولوله کربنی و سرعت چاپ تأثیر بسیار کمی بر روی نسبت استحکام به وزن دارد. همچنین تأثیر پارامترهایی همانند دمای چاپ و الگوی پرشوندگی بسیار ناچیز است. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، بررسی نسبت استحکام به وزن، زمان چاپ و فیلامنت مصرفی با معرف کمیته به صورت $S/(W \times t \times l)$ می‌باشد. نتایج نشان داد که در زاویه چاپ $45^\circ \pm$ مقدار این نسبت به بیشترین حد خود رسید؛ چرا که توزیع نیروها بهتر و چسبندگی بین لایه‌ها بهتر بود. همچنین، افزایش درصد پرشوندگی و کاهش ضخامت لایه‌ها نیز این نسبت را افزایش داد که نشان‌دهنده بهینه‌سازی مصرف مواد و زمان چاپ در عین افزایش استحکام است. به‌طور کلی، می‌توان عنوان کرد که با تمرکز بر پارامترهای کلیدی چاپ سه‌بعدی نظیر درصد پرشوندگی، ضخامت لایه‌ها، سرعت چاپ و زاویه چاپ می‌توان به قطعاتی بهینه با استحکام کششی و مدول یانگ مناسب در ازای وزن کم، مصرف بهینه فیلامنت و زمان چاپ کوتاه‌تر دست یافت. توجه به سایر پارامترهای چاپ همانند الگوی چاپ، کسر وزنی نانولوله کربن و دمای صفحه چاپ اهمیت کمتری دارد. به عنوان یک خروجی بسیار مهم، می‌توان به جای افزایش درصد وزنی نانولوله کربن برای دستیابی به خواص بالاتر که احتمال رخداد پدیده کلوخه شدن را به صورت ذاتی افزایش می‌دهد؛ می‌توان با تنظیم درصد پرشوندگی، سرعت چاپ و زاویه چاپ به مقادیر مناسب دست یافت. در نهایت می‌توان گفت که بهینه‌سازی یک قطعه چاپ‌شده با چاپگر سه‌بعدی از نظر استحکام، وزن، زمان و هزینه می‌تواند مزایای اقتصادی و صنعتی قابل‌توجهی ایجاد کند. قطعه سبک‌تر و مقاوم‌تر نه تنها مصرف مواد را کاهش می‌دهد و هزینه تولید را پایین می‌آورد، بلکه زمان ساخت و نیاز به تعمیر یا تعویض را نیز کم می‌کند. این امر در صنایع مختلف مانند هوافضا، خودروسازی و تجهیزات پزشکی به کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و بهبود رقابت‌پذیری محصول منجر می‌شود.

6- مراجع

- [1] Song, Y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K.-Y., Tagarielli, V.L., "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA," *Materials & Design*, Vol. 123, pp. 154-164, 2017.
- [2] Tymrak, B., Kreiger, M., Pearce, J. M., "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 242-246, 2014.

- [17] Deepak, K., Manesh, D., "Experimental Study on Influence of Multiwalled Carbon Nanotubes on Thermal Behavior of ABS & PETG Hybrid Polymer Composites," *Migration Letters*, Vol. 21, No. S1, pp. 847-855, 2024.
- [18] Feratoğlu, K., Istif, I., Gümüş, Ö. Y., Türkeş, E., "Effect of Carbon Nanotube Reinforcement on Creep and Recovery Behavior of Additively Manufactured Polymers: An Experimental and Prediction Study," *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 49, No. 11, pp. 14927-14948, 2024.
- [19] Heidari-Rarani, M., Sadeghi, P., Ezati, N., "Effect of Processing Parameters on Tensile Properties of Fdm 3d Printed of Pla Specimens," in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 855-862, 2020.
- [3] Hofstätter, T., Pedersen, D. B., Tosello, G., Hansen, H. N., "State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 36, No. 15, pp. 1061-1073, 2017.
- [4] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [5] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P., "Effect of various processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed PLA specimens," in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 2, pp. 855-862, 2020.
- [6] Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afrani, M., Zahedi, A. M., "Mechanical Characterization of FDM 3D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, pp. 107-147, 2019.
- [7] Solouki, A., Aliha, M. R. M., Makui, A., "Comparison of flexural strength in rectangular shape 3D-printed PLA samples with different grooves," in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 10, No. 2, pp. 2210-2217, 2023.
- [8] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A. D., De, A., Zhang, W., "Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties," *Progress in materials science*, Vol. 92, pp. 112-224, 2018.
- [9] Penumakala, P.K., Santo, J., Thomas, A., "A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 201, p. 108336, 2020.
- [10] Babazade, A., Hadad, M., Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites," in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.
- [11] Bavafa Bigdilou, M., Eslami-Farsani, R., Ebrahimezhad-Khaljiri, H., "The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar-ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration," in Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 533-540, 2020.
- [12] Singh, S., Ramakrishna, S., Berto, F., "3D Printing of polymer composites: A short review," *Material Design & Processing Communications*, Vol. 2, No. 2, p. e97, 2020.
- [13] Fico, G., Guglielmotti, V., Sorrentino, A., Vitiello, A., Nicolais, L., Pezzella, F., "Mechanical properties of ABS/CNT nanocomposites produced via fused filament fabrication," *Materials Letters*, Vol. 303, p. 130502, 2021.
- [14] Aumnate, C., Potiyaraj, P., Saengow, C., Giacomini, A., "Reinforcing polypropylene with graphene-polylactic acid microcapsules for fused-filament fabrication," *Materials & Design*, Vol. 198, p. 109329, 2021.
- [15] Dul, S., Gutierrez, B. J. A., Pegoretti, A., Alvarez-Quintana, J., Fambri, L., "3D printing of ABS Nanocomposites. Comparison of processing and effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes on thermal, mechanical and electrical properties," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 121, pp. 52-66, 2022.
- [16] Mohanavel, V., Kannan, S., Raman, M., Kulandaivel, A., Seikh, A. H., Iqbal, A., "Impact of CNT addition on surface roughness and dimensional characteristics of polymer nanocomposite fabricated by FDM method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-13, 2023.