

Effect of Printer Process Parameters of Fused Filament Fabrication on the Tensile Strength and Density of Polylactic Acid/Nanoclay Nanocomposites

Rezgar Hasanzadeh¹, Taher Azdast^{1*}, Peyman Mihankhah¹

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University,
P.O. Box: 15311-57561, Urmia, Iran

Received: 12 September 2023, accepted: 27 February 2024

ABSTRACT

Hypothesis: Fused filament fabrication (FFF) method is widely used in additive manufacturing due to its benefits, such as ease of use, cost-effectiveness, and availability. The mechanical properties of polylactic acid (PLA) printed by the FFF method can be significantly improved by combining them with nanomaterials such as nanoclay and optimizing the printing process parameters such as printing temperature and raster angle.

Methods: In order to investigate and optimize the multi-objective 3D printing process of PLA nanocomposite samples reinforced by nanoclay, the response surface method (RSM) was used as one of the methods of design of experiments. Nozzle temperature (190, 210 and 230°C), raster angle (0, 45 and 90°) and nanoclay weight percentage (0, 2 and 4% by wt) were studied to optimize output responses. Melt mixing of PLA with nanoclay particles was done using a twin-screw extruder machine and a granulator machine. The composite granules of PLA were prepared with 2 and 4% (by wt) of nanoclay. The prepared composite granules were entered into a single-screw extruder and composite filaments were produced.

Findings: The analysis of parameter participation in the density data reveals that the weight percentage of nanoclay and the nozzle temperature exhibit the most substantial influence, while raster angle has the least impact. Conversely, when considering tensile strength results, the weight percentage of nanoclay is the dominant factor, while the interaction between the weight percentage of nanoclay and raster angle has the smallest influence among the parameters under investigation. The multi-objective optimization results revealed that the optimal process conditions to achieve maximum strength are a nanoclay weight percentage of 4% (by wt), a nozzle temperature of 230°C, and a raster angle of about 25.5°. The tensile strength of the parts produced is 33.78 MPa, and their density is at least 1.089 g/cm³.

Keywords:

fused filament
fabrication (FFF),
3D printing parameters,
polylactic acid/nanoclay
composite,
mechanical properties,
optimization

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: t.azdast@urmia.ac.ir

Please cite this article using:

Hasanzadeh R., Taher Azdast T., Peyman Mihankhah P., Effect of Printer Process Parameters of Fused Filament Fabrication on the Tensile Strength and Density of Polylactic Acid/Nanoclay Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 539-549, 2023-2024.

اثر پارامترهای فرایندی چاپگر ساخت رشته ذوبی بر استحکام کششی و چگالی نانوکامپوزیت‌های پلی(لاکتیک اسید)-نانورس

رزگار حسن زاده، طاهر ازدست*، پیمان میهن خواه

ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۵۳۱۱-۵۷۵۶۱

دریافت: ۱۴۰۲/۶/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۸

چکیده

فرضیه: روش ساخت رشته ذوبی به دلیل مزایای آن، از جمله سادگی استفاده، مقرون به صرفه بودن و دسترسی پذیری، پرکاربردترین روش تولید افزودنی است. خواص مکانیکی پلی(لاکتیک اسید) چاپ شده با روش ساخت رشته ذوبی را می‌توان با ترکیب آن‌ها با نانومواد نظیر نانورس و بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی چاپ مانند دمای چاپ و زاویه رستر، به‌طور شایان توجهی بهبود بخشید.

روش‌ها: برای بررسی و بهینه‌سازی چندهدفی فرایند چاپ سه‌بعدی نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی(لاکتیک اسید) تقویت شده با نانوذرات رس از روش سطح پاسخ به‌عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها، استفاده شد. دمای افشانک (۱۹۰، ۲۱۰ و ۲۳۰°C)، زاویه رستر (۰، ۴۵ و ۹۰°) و مقدار نانورس (۰، ۲ و ۴٪ وزنی) برای بهینه‌سازی پاسخ‌های خروجی مطالعه شدند. اختلاط ذوبی پلی(لاکتیک اسید) با نانوذرات رس با اکسترودر دوپیچی انجام شد و به کمک دانه‌ساز، دانه‌های کامپوزیتی پلی(لاکتیک اسید) دارای ۲ و ۴٪ وزنی نانورس تهیه شدند. دانه‌های کامپوزیتی تهیه شده وارد اکسترودر تک‌پیچی شده و رشته‌های کامپوزیتی تولید شدند.

یافته‌ها: براساس نتایج بررسی مشارکت پارامترها بر داده‌های چگالی اثر متقابل درصد وزنی نانورس و دمای افشانک به ترتیب بیشترین مشارکت و زاویه رستر کمترین اثرگذاری را بر داده‌های چگالی داشته و برای نتایج استحکام کششی، مقدار درصد وزنی نانورس بیشترین اثرگذاری و اثر متقابل درصد وزنی نانورس و زاویه رستر کمترین اثرگذاری را در بین پارامترهای بررسی شده داشتند. همچنین نتایج مربوط به بهینه‌سازی چندهدفی نشان داد، بیشترین سطح درصد وزنی نانورس (۴٪ وزنی)، بیشترین سطح دمای افشانک (۲۳۰°C) و زاویه رستر حدود ۲۵/۵°، بهینه شرایط فرایندی برای دستیابی به بیشینه استحکام کششی ۳۳/۷۸ MPa و کمینه چگالی ۱/۰۸۹ g/cm³ است.

واژه‌های کلیدی

ساخت رشته ذوبی،

پارامترهای چاپ سه‌بعدی،

کامپوزیت پلی(لاکتیک اسید)-

نانورس،

خواص مکانیکی،

بهینه‌سازی

مقدمه

با توجه به مزایای فناوری مقرون به صرفه بودن و قابلیت‌های صرفه‌جویی در زمان، ساخت افزایشی توجه مهندسان را جلب کرده است [۱،۲]. امروزه بسیاری از فناوری‌های ساخت افزایشی در دسترس هستند، اما روش ساخت رشته ذوبی به دلیل سادگی فرایند، دسترس‌پذیری و هزینه سرمایه‌گذاری کم بسیار محبوب است [۳-۵]. در این روش از رشته‌های (filaments) گرمانرم پیوسته به‌عنوان مواد اولیه استفاده می‌شود که نقش مهمی در کارایی روش ساخت رشته ذوبی دارند. اساس کار آن‌ها بدین ترتیب است که رشته از یک افشانک گرم عبور می‌کند و مواد ذوب‌شده بر اساس الگوی از پیش تعیین‌شده روی بستر داغ قرار می‌گیرد. در نهایت، نمونه با طراحی مدنظر چاپ می‌شود [۶].

پلی(لاکتیک اسید) به دلیل داشتن مزایای فراوانی از جمله زیست‌تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری، چاپ آسان، دمای ذوب کم و مقرون به صرفه بودن، رایج‌ترین رشته خام مصرفی در فرایند چاپ سه‌بعدی بر پایه روش ساخت رشته ذوبی است. اما، به دلیل برخی کاستی‌ها نظیر پنجره فرایندی کوچک و خواص مکانیکی نسبتاً کم، کاربرد آن در روش ساخت رشته ذوبی با موانعی مواجه شده است [۷،۸]. به‌منظور کاهش این محدودیت‌ها در استفاده از پلی(لاکتیک اسید) می‌توان از روش‌های مختلفی مانند ایجاد اتصال عرضی، کوپلیمر شدن و اختلاط استفاده کرد. در اختلاط پلیمری، تغییرات فیزیکی برای تولید خواص جدید انجام می‌شود. از این‌رو، برای بهبود خواص پلی(لاکتیک اسید) چاپ‌شده با ساخت رشته ذوبی، پژوهشگران تهیه کامپوزیت‌های پلی(لاکتیک اسید) با افزودنی‌های مناسب را توصیه می‌کنند [۹]. تعدادی از مطالعات درباره توسعه خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی قطعات کامپوزیت پلی(لاکتیک اسید) چاپ‌شده با استفاده از فناوری ساخت رشته ذوبی با مواد افزودنی مانند پودرهای فلزی، مواد معدنی و الیاف طبیعی انجام شده است [۱۰].

Pavan و همکاران [۱۱] بررسی و تحلیلی درباره استحکام ضربه‌ای و برشی نمونه‌های کامپوزیتی پلی(لاکتیک اسید)-مس انجام دادند که با روش ساخت رشته ذوبی تهیه‌شده بودند. پژوهشگران از آزمایش‌های بر پایه آرایه متعامد L9 تاگوجی استفاده کردند تا تعیین کنند، شرایط چاپ، از جمله دمای افشانک، دمای صفحه داغ و ارتفاع لایه، چگونه بر خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی اثرگذارند. آن‌ها دریافته‌اند، استحکام ضربه‌ای و برشی نمونه‌های کامپوزیتی تحت تأثیر جابه‌جایی ذرات مس در داخل لایه‌ها و استحکام پیوند میان لایه‌ها قرار دارد. پژوهشگران همچنین دریافته‌اند، دمای افشانک و ارتفاع لایه به ترتیب اثر شایان توجهی بر شرایط بار ضربه‌ای و برشی دارد. Zhang و

همکاران [۱۲] نمونه‌های کامپوزیتی پلی(لاکتیک اسید) خالص و نیز تقویت‌شده با الیاف مس را با روش ساخت رشته‌ذوبی چاپ کرده و خواص مکانیکی آن‌ها را مقایسه کردند. انواع زاویه رستر (Raster angle) برای چاپ نمونه‌ها بررسی شد. پژوهشگران دریافته‌اند، استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت پلی(لاکتیک اسید) با افزودن الیاف مس کاهش می‌یابد، در حالی که ازدیاد طول در نقطه شکست به دلیل کشسانی بیشتر و استحکام کششی کمتر الیاف مس افزایش می‌یابد. نمونه‌های پلی(لاکتیک اسید) و کامپوزیتی پلی(لاکتیک اسید)-الیاف مس با زاویه رستر صفر درجه، بیشترین استحکام کششی را داشتند، در حالی که نمونه‌ها با زاویه رستر 90° کمترین استحکام کششی را نشان دادند. همین پژوهشگران در پژوهش دیگری، نتایج مشابهی را درباره افزودن الیاف آلومینیم و زوایای رستر بر خواص مکانیکی نمونه‌های پلی(لاکتیک اسید) چاپ‌شده، مشاهده کردند [۱۳]. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، پلی(لاکتیک اسید) تقویت‌شده با الیاف آلومینیم استحکام کششی و مدول کشسانی کمتری در مقایسه با پلی(لاکتیک اسید) خالص دارد. Vinay و همکاران [۱۴] خواص مکانیکی پلی(لاکتیک اسید) با درصد‌های مختلف پودر آلومینیم (۱۰ و ۲۰٪ وزنی) را با روش ساخت رشته ذوبی مطالعه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها مشخص کرد، سختی، استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم با افزودن پودر آلومینیم افزایش می‌یابد، در حالی که درصد ازدیاد طول با گنجاندن پودر آلومینیم کاهش می‌یابد. افزون بر افزایش استحکام کششی ۴۶٪، پس از افزودن ۲۰٪ وزنی آلومینیم به پلی(لاکتیک اسید) استحکام تسلیم نیز افزایش ۸۴٪ نشان داد. همچنین آن‌ها بیان کردند، شکل‌پذیری پلی(لاکتیک اسید) نیز با اضافه‌شدن تدریجی پودر آلومینیم کاهش می‌یابد. Hanon و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای درباره اثرهای چاپ و افزودن ذرات برنز بر خواص تریبولوژیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های پلی(لاکتیک اسید)-برنز را با چاپ سه‌بعدی به روش ساخت رشته‌ذوبی انجام دادند. نتایج نشان داد، جهت چاپ اثر شایان توجهی بر رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی محصولات دارد، با جهت‌گیری در حالت روی لبه بیشترین تنش کششی حاصل شد. افزودن ذرات برنز خواص تریبولوژیکی را بهبود بخشید و همچنین اثر شایان توجهی بر خواص مکانیکی داشت. نویسندگان پیشنهاد کردند، با افزایش خواص تریبولوژیکی پلی(لاکتیک اسید) می‌توان از آن‌ها در قطعات مختلف صنعتی مانند یاتاقان‌ها استفاده کرد. Liu و همکاران [۱۶] خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی(لاکتیک اسید) بر پایه موادی از جنس سرامیک، چوب، فیبر کربن و فلز را بررسی کردند. بدین منظور، آن‌ها آثار کامپوزیت‌های مختلف پلی(لاکتیک اسید)، جهت ساخت و زاویه رستر را بر خواص مکانیکی مطالعه کردند. نشان داده شد،

تجربی

مواد

در پژوهش حاضر، از پلی (لاکتیک اسید) محصول شرکت Chemieka اتریش به شکل دانه و با شاخص جریان مذاب $1/2 \text{ g}/10\text{min}$ (190°C) و $2/16 \text{ kg}$ و چگالی $1/25 \text{ g}/\text{cm}^3$ به عنوان فاز ماتریس و نانورس مونت موریلونیت محصول شرکت Sigma-Aldrich آمریکا با متوسط اندازه ذرات 1 nm تا 2 nm و چگالی متوسط $0/6 \text{ g}/\text{cm}^3$ به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد.

دستگاه‌ها

از دستگاه اکسترودر دوپیچی ناهمسوگرد مدل ZSK-25 ساخت شرکت Coperion Werner and Pfeidere آلمان با قطر پیچ 25 m و نسبت طول به قطر 48 برای اختلاط مواد استفاده شد. همچنین اکسترودر تک پیچی ساخت شرکت ایران تکنیک با نسبت طول به قطر 25 برای تولید رشته‌های کامپوزیتی به کار گرفته شد. نمونه‌ها با استفاده از چاپگر سه بعدی دلتای ساخته شده توسط پژوهشگران مقاله حاضر چاپ شدند. برای انجام آزمون کشش، دستگاه STM-50 ساخت شرکت ایرانی سنتام با ظرفیت 5 تن و حداکثر خطای $0/5\%$ به کار گرفته شد. از ترازوی جواهرسازی با دقت $0/001 \text{ g}$ ساخت شرکت A&D مدل SHS-FX300G به منظور توزین نمونه‌ها و نیز آب مقطر دوبر تقطیر شده با چگالی $0/998 \text{ g}/\text{cm}^3$ به منظور انجام آزمایش ارشمیدس استفاده شد. برای بررسی پخش و توزیع ذرات نانورس در ماتریس پلی (لاکتیک اسید) آزمون پراش پرتو X انجام شد. بدین منظور، از دستگاه پراش پرتو X ساخت شرکت Bruker آلمان با سرعت پویس $2^\circ/\text{min}$ استفاده شد.

روش‌ها

در پژوهش حاضر، برای بررسی و بهینه‌سازی چندهدفی فرایند چاپ سه بعدی نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی (لاکتیک اسید) تقویت شده با نانوذرات رس از روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش، استفاده شد. از جمله مزایای این روش، پیوسته در نظر گرفتن پارامترهای فرایندی و امکان انجام بهینه‌سازی چندهدفی است. در این راستا، درصد وزنی نانورس در سه سطح 0 ، 2 و 4% به عنوان اولین پارامتر بررسی در نظر گرفته شد. با توجه به اهمیت چشمگیر پارامتر دمای فرایندی، این پارامتر در سه سطح 190 ، 210 و 230°C به عنوان دومین پارامتر فرایندی لحاظ شد. همچنین، به منظور بررسی اثرگذاری زاویه رستر، این پارامتر در سه سطح 0 ، 45 و 90°

نمونه‌های پلی (لاکتیک اسید) بر پایه سرامیک، آلومینیم و مس دارای خواص مکانیکی مشابه یا حتی افزایش یافته در مقایسه با پلی (لاکتیک اسید) خالص هستند. اما، وقتی که چوب و الیاف کربن خرد شده اضافه شد، خواص مکانیکی پلی (لاکتیک اسید) خالص به طور شایان توجهی کاهش یافت. افزون بر این، نمونه‌های کامپوزیت پلی (لاکتیک اسید) چاپ شده در حالت روی لبه با زاویه رستر $45/45$ - درجه بیشترین مدول و استحکام مکانیکی را نشان دادند. میهن خواه و همکاران [17] اثر درصد وزنی نانورس (0 ، 2 و 4% وزنی)، دمای افشانک (190 ، 210 و 230°C)، و زاویه رستر (0 ، 45 و 90°) را بر استحکام کششی قطعات کامپوزیتی پلی (لاکتیک اسید) - نانورس با استفاده رویکرد تاگوچی بررسی کردند. افزودن 2 و 4% وزنی نانورس استحکام کششی را به ترتیب $4/6$ و $15/3\%$ بهبود بخشید. آن‌ها همچنین بیان کردند، شرایط بهینه برای دستیابی به استحکام کششی $38/9$ در غلظت وزنی نانورس 4% ، دمای افشانک 230°C و زاویه رستر صفر درجه حاصل شد.

از مطالعات مرور شده مشهود است، چند پارامتر به عنوان مثال، دمای افشانک، دمای صفحه داغ، زاویه رستر، ارتفاع لایه و سرعت چاپ در فرایند ساخت رشته ذوبی می‌تواند اثر شایان توجهی بر خواص و کیفیت قطعات چاپی داشته باشد [18]. در نتیجه، بررسی اثر پارامترهای فرایند روش ساخت رشته ذوبی بر خواص قطعات چاپی ضروری است. اما، برای بررسی و بهینه‌سازی روش مورد نیاز، آزمایش‌های زیادی لازم است. افزایش تعداد آزمایش‌ها به افزایش هزینه، زمان و مواد مصرف شده در هر آزمایش منجر می‌شود که می‌توان با استفاده از طراحی آزمایش‌ها بر آن غلبه کرد [19-21]. به طور گسترده پذیرفته شده است، یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های طراحی آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی، به ویژه در مسائل مهندسی، روش سطح پاسخ است. روشی برای مدل‌سازی و تحلیل فرایندی است که در آن پاسخ مورد علاقه تحت تأثیر متغیرهای مختلفی قرار می‌گیرد که هدف آن بهینه‌سازی پاسخ است. این روش قادر به ارزیابی آثار عوامل متعدد و تعامل آن‌ها بر یک یا چند متغیر پاسخ است. افزون بر مدل‌سازی ریاضی سامانه، روش سطح پاسخ با کاهش تعداد آزمایش‌ها در زمان و هزینه صرفه جویی می‌کند [22، 23]. این مطالعه از دو جهت می‌تواند به پژوهش‌هایی کمک کند که در این راستا انجام گرفته‌اند. بدین منظور ابتدا اثر سه پارامتر درصد وزنی نانورس، دمای افشانک و زاویه رستر بر دو متغیر پاسخ یعنی چگالی و استحکام کششی کامپوزیت پلی (لاکتیک اسید) - نانورس به طور هم‌زمان بررسی شد. دوم، از روش سطح پاسخ برای بررسی رابطه میان پارامترهای چاپ و مواد و پاسخ‌ها برای تعیین ترکیب بهینه این پارامترها استفاده شد.

خروجی به ترتیب روی ۱۵۰، ۱۷۰، ۱۹۰ و ۲۰۰°C تنظیم شد. در قالب انتهایی اکسترودر، سوراخی با قطر ۲ mm ایجاد شده بود که با تنظیمات دور اکسترودر و سرعت خطی کشنده رشته‌هایی با قطر ۰/۱ mm ± ۱/۷۵ تولید شدند. با توجه به طراحی آزمایش‌های انجام‌شده، نمونه‌ها با استاندارد DIN 53504-S3a به کمک چاپگر سه‌بعدی چاپ شدند. سپس آزمون کشش و چگالی نمونه‌های چاپ‌شده انجام شد. به منظور محاسبه چگالی نمونه‌ها از روش ارشمیدس و استاندارد ASTM D792 استفاده شد. اگر یک ظرف دارای آب با چگالی ρ_w روی ترازوی دقیقی قرار گرفته باشد و جسمی به جرم M_b در آن غوطه‌ور شود، به طوری که تمام سطح آن را آب فرا گیرد، در این صورت ترازو تغییر وزن ΔM را نشان می‌دهد که برابر با جرم آب هم‌حجم جسم غوطه‌ور شده است. در این حالت چگالی نمونه (ρ_i) مطابق معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\rho_i = \frac{M_b}{\Delta M} \cdot \rho_w \quad (1)$$

گفتنی است، تمام آزمایش‌ها با سه مرتبه تکرار انجام شده است تا از دقت نتایج خروجی اطمینان حاصل شود.

نتایج و بحث

تحلیل نتایج آزمون پراش پرتو X

به منظور بررسی خواص ساختاری، ذرات نانورس، پلی (لاکتیک اسید) و نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی (لاکتیک اسید) دارای ذرات نانورس همگی در آزمون پراش پرتو X قرار گرفتند. طول موج پرتو X تولیدشده ۱/۵۴۰۶ Å بود. برای محاسبه فاصله بین دیواره‌های نانورس از قانون Bragg مطابق معادله (۲) استفاده شد [۱۷]:

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (2)$$

در این معادله n، عددی ثابت؛ λ ، طول موج پرتو X، d فاصله بین دیواره‌ها و θ ، زاویه پراش است [۱۷].

با توجه به شکل ۱ دیده می‌شود، پیک ۲θ معرف نانورس برابر ۲۶/۸۵° است که مطابق رابطه Bragg، نمایانگر فاصله ۱/۷۰۵ nm بین دیواره‌هاست. همچنین تصویر نشان می‌دهد، این پیک در نمودارهای مربوط به نمونه‌های نانوکامپوزیتی محو شده است که نشان از پخش شدن خوب ذرات نانورس در ماتریس پلیمری یعنی پلی (لاکتیک

به‌عنوان سومین پارامتر فرایندی در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار Minitab انجام شده و ۱۵ آزمایش براساس سه پارامتر ورودی و در سه سطح برای آزمایش‌ها تعیین شد که در جدول ۱ آمده است.

در گام بعدی پس از طراحی آزمایش، اختلاط مذاب پلی (لاکتیک اسید) با نانوذرات رس به کمک اکسترودر دویچی انجام شد. ترکیبات پلی (لاکتیک اسید)-نانورس با نسبت‌های وزنی ۹۸ به ۲ و ۹۶ به ۴٪ تهیه شده و دمای نواحی مختلف اکسترودر به ترتیب از ناحیه تغذیه به قالب روی ۱۶۰، ۱۶۵، ۱۷۰، ۱۷۵ و ۱۸۰°C تنظیم شدند. در نهایت، با دانه‌ساز انتهایی اکسترودر، دانه‌های کامپوزیتی پلی (لاکتیک اسید) با ۲ و ۴٪ وزنی نانورس تهیه شدند. همچنین به منظور همسان‌سازی شرایط فرایندی، دانه‌های خالص پلی (لاکتیک اسید) نیز اکسترودر شدند. دانه‌های کامپوزیتی تولیدی به منظور رطوبت‌زدایی به مدت ۴ h درون خشک‌کن با دمای ۶۰°C قرار گرفتند. سپس، دانه‌های کامپوزیتی وارد اکسترودر تک‌پیچی شدند تا رشته‌های کامپوزیتی تولید شوند. از حمام آب برای خنک‌کاری و از کشنده با دور تنظیم‌پذیر طراحی و ساخته‌شده توسط نویسندگان برای دستیابی به قطر مناسب رشته استفاده شد. دمای نواحی مختلف اکسترودر از ناحیه تغذیه به

جدول ۱- طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ.

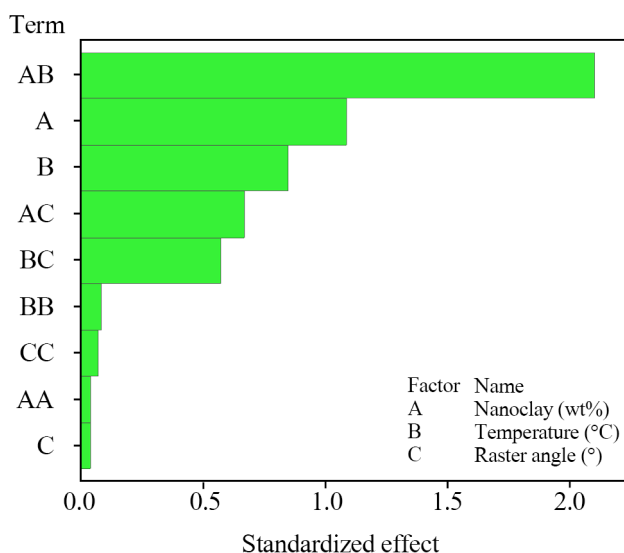
Table 1. Experimental design by response surface method.

Run	Nanoclay content (wt%)	Nozzle temperature (°C)	Raster angle (°)
1	2	210	45
2	0	210	0
3	2	190	0
4	2	190	90
5	4	210	90
6	2	210	45
7	4	230	45
8	0	190	45
9	0	230	45
10	2	230	0
11	2	210	45
12	4	190	45
13	4	210	0
14	2	230	90
15	0	210	90

پیروی می‌کند [۲].

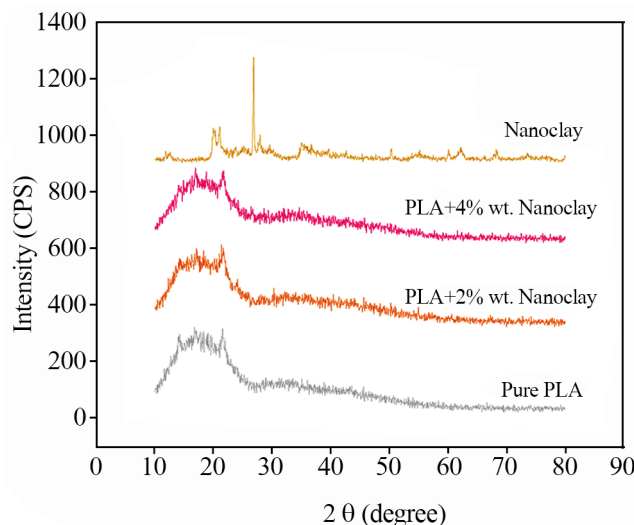
شکل ۲ بررسی مقدار مشارکت پارامترهای در نظر گرفته شده بر داده‌های چگالی را نشان می‌دهد که یکی از خروجی‌های مهم تحلیل واریانس است. براساس این نتایج، اثر متقابل درصد وزنی نانورس و دما (AB) بیشترین مشارکت را بر داده‌های چگالی داشته است. آثار درصد وزنی نانورس و دما به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم اثرگذاری بر داده‌های چگالی قرار گرفته‌اند. اثر متقابل درصد وزنی نانورس و زاویه رستر (AC) و اثر متقابل دما و زاویه رستر (BC) به ترتیب در رتبه‌های بعدی اثرگذاری بر داده‌های چگالی قرار دارند. مطابق نتایج، آثار مرتبه دوم دما (BB)، زاویه رستر (CC) و درصد وزنی نانورس (AA) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نکته حائز اهمیت، اثرگذاری بسیار کم زاویه رستر بر داده‌های چگالی است که براساس نتایج، در رتبه آخر قرار گرفته است.

شکل ۳ نحوه اثرگذاری پارامترهای در نظر گرفته شده بر داده‌های چگالی را به تصویر کشیده است. بر اساس نتایج، افزایش درصد وزنی نانورس سبب افزایش چگالی شده است که با توجه به چگالی بیشتر نانورس نسبت به پلیمر پایه درک پذیر است. افزایش دما باعث افزایش چگالی نمونه‌های نانوکامپوزیتی شده است. دلیل این موضوع را می‌توان به درهم‌تنیدگی بیشتر زاویه‌های داخل یکدیگر مرتبط دانست که در دماهای بیشتر باعث می‌شود، نمونه چگال‌تر شده و چگالی افزایش یابد. نتایج نشان می‌دهد، تغییرات زاویه رستر بر چگالی نمونه‌های نانوکامپوزیتی اثر چندانی نداشته است که با نتایج شکل ۱ مطابقت دارد. از آنجا که اثر متقابل درصد وزنی نانورس و دما (AB) بیشترین



شکل ۲- بررسی مشارکت پارامترها بر چگالی.

Fig. 2. Analysis of the contribution of parameters on density.



شکل ۱- نتایج آزمون پراش پرتو X.

Fig. 1. X-ray diffraction test results.

اسید) است. همچنین مطابق نتایج آزمون، زاویه پراش $21/35^\circ$ و $16/9^\circ$ به ترتیب برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای ۲ و ۴٪ وزنی نانورس مشاهده شد که در نتیجه فاصله $2/155$ و $2/649$ nm را برای دیواره‌های نانورس به دست می‌دهند. مطابق نتایج، افزایش فاصله‌ای به مقدار $0/45$ و $0/944$ Å در دیواره نانورس به وجود آمده است که به دلیل پخش مناسب زنجیرهای پلیمری میان این دیواره‌هاست. با توجه به نتایج فاصله به دست آمده مشاهده می‌شود، فاصله بین صفحه‌ها در نمونه نانوکامپوزیتی با ۴٪ وزنی نانورس بیشتر از ۲٪ وزنی است که حاکی از پخش شدن خوب نانوذرات و نیز اختلاط خوب ذرات در ماتریس پلیمری است.

همچنین با توجه به زاویه پراش به دست آمده برای پلی (لاکتیک اسید) خالص $16/75^\circ$ و مقایسه آن با مرجع [۱۸] که مقدار زاویه پراش را برای پلی (لاکتیک اسید) خالص $16/8^\circ$ گزارش کردند، درستی نتایج را تأیید می‌کند. گفتنی است، مقدار زاویه پراش نانورس نیز در مقایسه با مرجع [۱۹] مشخص شد که تقریباً به هم نزدیک هستند.

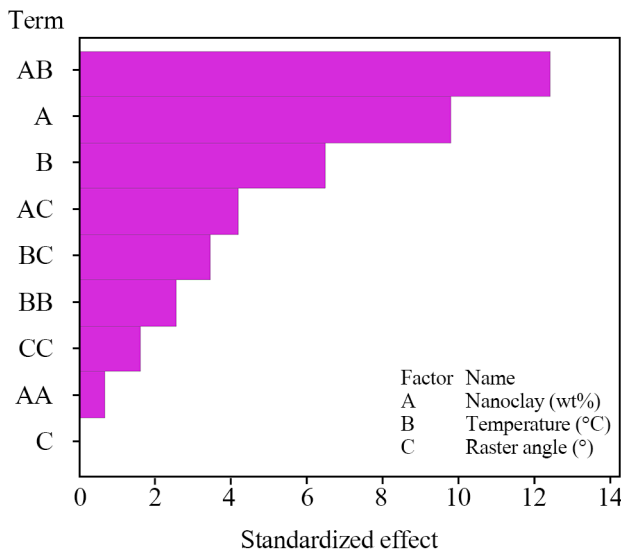
تحلیل نتایج چگالی

توزیع بهنجار داده‌ها پیش شرط انجام تحلیل‌های آماری از جمله تحلیل واریانس است. از این رو، ابتدا احتمال توزیع بهنجار داده‌های چگالی بررسی شد. بررسی احتمال توزیع بهنجار داده‌های چگالی به روش Anderson-Darling نشان داد، مقدار ارزش احتمال (p-value) حدود $0/083$ است و از آنجا که بیش از $0/05$ (خطای آماری لحاظ شده در نرم‌افزار Minitab) است، بنابراین داده‌های چگالی از توزیع بهنجار

شده بود، دستیابی کمترین چگالی در پایین‌ترین سطوح هم‌زمان درصد وزنی نانورس و دما منطقی به نظر می‌رسد. شایان ذکر است، در این حالت، چگالی مقادیر کمتری از $1/06 \text{ g/cm}^3$ خواهد داشت. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین مقادیر چگالی که بیشتر از $1/12 \text{ g/cm}^3$ است، در دو ناحیه حاصل می‌شود. ناحیه اول بیشترین مقادیر دما و کمترین مقادیر درصد وزنی نانورس است و ناحیه دوم بیشترین مقادیر درصد وزنی نانورس و کمترین مقادیر دماست.

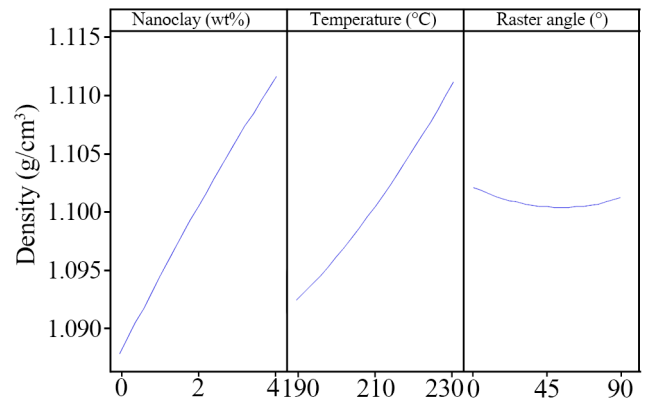
تحلیل نتایج استحکام کششی

بررسی احتمال توزیع بهنجار داده‌های استحکام کششی نشان داد، با توجه به مقدار ارزش احتمال که $0/865$ بوده و بسیار بزرگ‌تر از $0/05$ است، داده‌های استحکام کششی از توزیع بهنجار پیروی می‌کند. شکل ۵ بررسی مقدار مشارکت پارامترهای در نظر گرفته شده بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، پارامترهای درصد وزنی نانورس (A)، دما (B) و زاویه رستر (C) به ترتیب اثرگذارترین پارامترها بر نتایج استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی هستند. آثار مرتبه دوم درصد وزنی نانورس (AA) و زاویه رستر (CC) در رتبه‌های بعدی اثرگذاری بر استحکام کششی قرار می‌گیرند. اثر متقابل دما و زاویه رستر (BC)، اثر مرتبه دوم دما (BB)، اثر متقابل درصد وزنی نانورس و دما (AB) و اثر متقابل درصد وزنی نانورس و زاویه رستر (AC) به ترتیب در رتبه‌های بعدی اثرگذاری بر استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی قرار می‌گیرند.



شکل ۵- بررسی مشارکت پارامترها بر استحکام کششی.

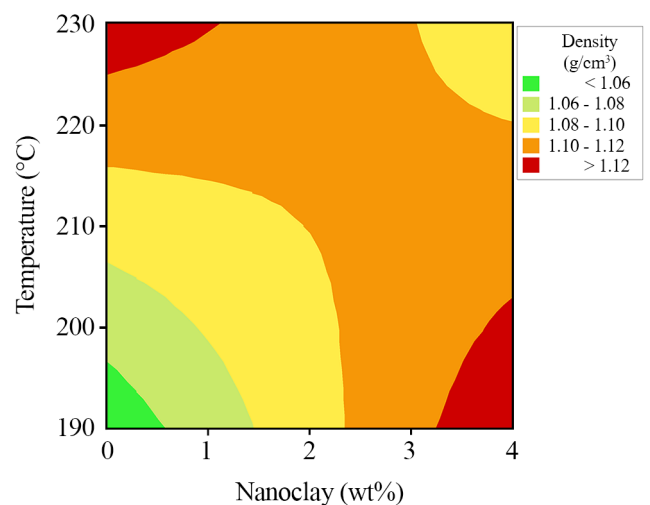
Fig. 5. Analysis of the contribution of parameters on tensile strength.



شکل ۳- بررسی اثر پارامترها بر چگالی.

Fig. 3. Examining the effects of parameters on density.

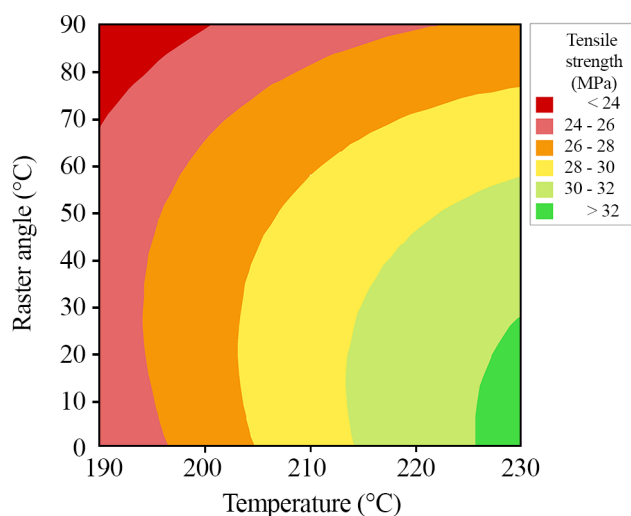
مشارکت را بر داده‌های چگالی داشته است، در ادامه، این اثر بررسی می‌شود. نمودارهای کانتور برای نشان دادن ارتباط بین دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته مفید هستند. این نمودارها بر اساس معادله رگرسیون ترسیم می‌شوند. سطح پاسخ در یک نمودار کانتور به عنوان یک صفحه دوبعدی نشان داده می‌شود که در آن تمام نقاط با پاسخ یکسان به هم متصل می‌شوند تا خطوط کانتور با پاسخ‌های ثابت را تشکیل دهند. طرح کانتور به درک ماهیت پیوند میان دو ورودی و پاسخ کمک می‌کند [۲۰]. شکل ۴ بهینه‌سازی تک‌هدفی چگالی نسبت به درصد وزنی نانورس و دما را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، کمترین چگالی در پایین‌ترین سطوح درصد وزنی نانورس و دما حاصل می‌شود. با توجه به اینکه افزایش درصد وزنی نانورس و دما باعث افزایش چگالی



شکل ۴- بهینه‌سازی تک‌هدفی چگالی نسبت به درصد وزنی نانورس و دما.

Fig. 4. Single-objective optimization of density in relation to nano clay weight percentage and temperature.

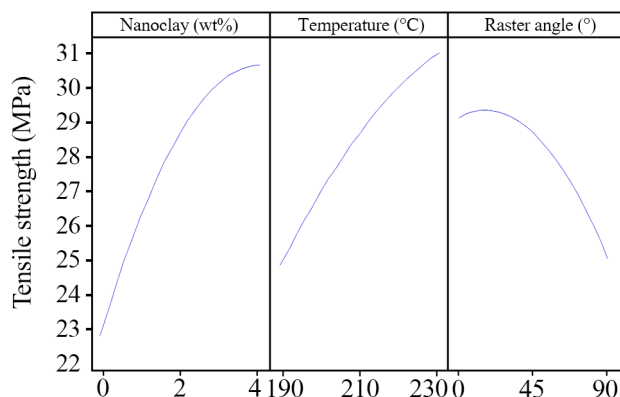
یا کاهش تجمع ذرات نانورس کمک کند. پراکندگی بهبودیافته احتمال تراکم را به حداقل می‌رساند و به ایجاد یک شبکه تقویتی منسجم‌تر و مداوم کمک می‌کند که از استحکام کششی بیشتری پشتیبانی می‌کند. ترکیبی از پراکندگی بهبودیافته و چسبندگی سطحی بهینه می‌تواند به اثرهای هم‌افزایی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت منجر شود. ذرات نانورس تقویت‌کننده به‌طور مؤثرتری با ماتریس پلیمری کار می‌کنند تا در برابر تغییر شکل مقاومت کنند و استحکام کششی کلی را افزایش دهند [۲۴، ۲۵]. از طرفی نتایج نشان می‌دهد، افزایش زاویه‌های رستر از ۰° به ۹۰° باعث کاهش استحکام کششی نمونه‌ها می‌شود. در زاویه رستر صفر درجه، چینش لایه‌ها در راستای نیروی کششی اعمال شده است و در نتیجه تعداد زاویه‌های بیشتری نیروی کششی را تحمل می‌کند. اما، با افزایش زاویه رستر، زاویه چینش لایه‌ها نسبت به نیروی کششی اعمال شده تغییر می‌کند تا در نهایت در زاویه رستر ۹۰° درجه، نیروی کششی اعمال شده عمود بر چینش لایه‌هاست و در نتیجه استحکام کششی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج شکل ۵ از بین آثار متقابل، بیشترین استحکام کششی مربوط به اثر متقابل دما و زاویه رستر است. شکل ۷ بهینه‌سازی تک‌هدفی استحکام کششی را نسبت به دما و زاویه رستر نشان می‌دهد. مطابق نتایج، بیشترین سطوح دما و کمترین سطوح زاویه رستر به بیشترین استحکام‌های کششی منجر می‌شوند که مقادیری بیش از ۳۲ MPa خواهند داشت. کمترین سطوح دمایی و بیشترین سطوح زاویه رستر به کمترین استحکام‌های کششی منجر می‌شود که مقادیری کمتر از ۲۴ MPa به دست می‌آید.



شکل ۷- بهینه‌سازی تک‌هدفی استحکام کششی نسبت به دما و زاویه رستر.

Fig. 7. Single-objective optimization of tensile strength in relation to nanoclay temperature and raster angle.

شکل ۶ بررسی اثر پارامترهای لحاظ‌شده بر استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، افزایش درصد وزنی نانورس سبب افزایش چشمگیر استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی شد که این افزایش را می‌توان با انتقال بار واردشده به نانوذرات مرتبط دانست. نانوذرات می‌توانند تحمل بار بیشتری نسبت به پلی‌(لاکتیک) اسید تحمل کنند، به شرطی که به‌طور یکنواخت در آن پراکنده شوند. نتایج پراش پرتو X حاکی از پراکنش خوب ذرات نانورس در ماتریس پلی‌(لاکتیک اسید) داشت. از طرف دیگر، به دلیل اینکه نمونه‌ها با ۴٪ وزنی نانورس دارای ذرات بیشتری نسبت به نمونه‌ها با ۲٪ وزنی نانورس بودند، بار بیشتری را تحمل می‌کردند و به دلیل هم‌افزایی انتقال بار از ماتریس پلی‌(لاکتیک اسید) به ذرات، استحکام کششی بیشتری نشان دادند. از سوی دیگر مطالعات مختلف نشان می‌دهد، یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند به‌طور شایان توجهی بر سطح پراکندگی نانورس‌ها اثر بگذارد، ساختار اصلاح‌کننده رس است [۲۱، ۲۲]. همچنین، پخش مناسب نانورس در ماتریس پلیمری می‌تواند سبب محدود کردن تحرک زنجیرهای پلی‌(لاکتیک اسید) شود و در نتیجه سفتی نانوکامپوزیت افزایش یابد [۲۳]. نتایج حاکی از آن است که افزایش دمای فرایندی سبب افزایش استحکام کششی می‌شود که این پدیده را می‌توان به چسبندگی میان لایه‌ها و بهبود هم‌جوشی لایه‌ها مرتبط دانست. این هم‌جوشی و چسبندگی تقویت‌شده به برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی بهتر، ایجاد ساختار منسجم‌تر و قوی‌تر منجر شده و در نهایت باعث افزایش استحکام کششی شده است. همچنین دمای زیاد معمولاً گرانروی مذاب پلیمر را کاهش می‌دهد. این افزایش جریان‌پذیری می‌تواند به جریان بهتر در طول فرایند چاپ منجر شده که موجب بهبود پیوند میان زاویه‌های رستر و افزایش استحکام کششی می‌شود. همچنین دماهای زیاد می‌تواند به جلوگیری



شکل ۶- بررسی اثر پارامترها بر استحکام کششی.

Fig. 6. Examining the effects of parameters on tensile strength.

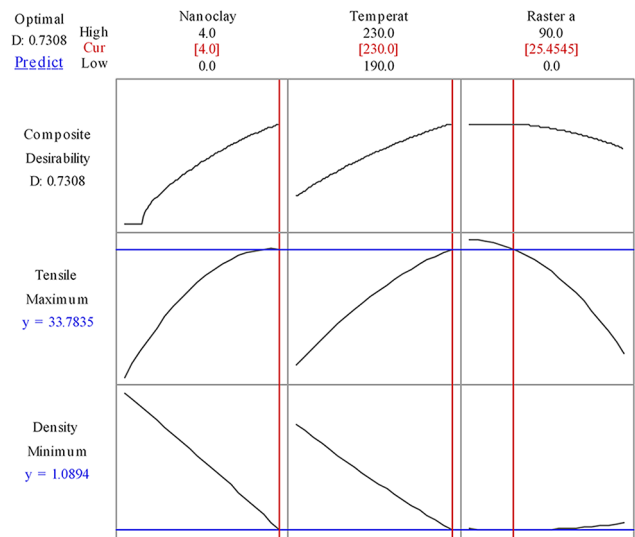
متقابل درصد وزنی نانورس و دمای افشانک به ترتیب بیشترین و زاویه رستر کمترین اثرگذاری مشارکت را بر داده‌های چگالی داشتند. بررسی مشارکت پارامترها بر نتایج استحکام کششی نشان داد، مقدار درصد وزنی نانورس بیشترین اثرگذاری و اثر متقابل درصد وزنی نانورس و زاویه رستر کمترین اثرگذاری را از بین پارامترهای بررسی شده بر استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی دارند. نحوه اثرگذاری پارامترهای در نظر گرفته شده بر داده‌های چگالی نشان داد، افزایش دما باعث افزایش چگالی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌شود، دلیل این موضوع را می‌توان به درهم‌تنیدگی بیشتر زاویه‌های رستر داخل یکدیگر مرتبط دانست که در دماهای بیشتر باعث می‌شود، نمونه چگال‌تر شود و چگالی افزایش یابد. اثر پارامترهای لحاظ شده بر استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاکی از افزایش چشمگیر استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش مقدار نانورس است که علت این موضوع را می‌توان به انتقال بار از ماتریس پلیمری به نانوذرات مرتبط دانست. همچنین، پخش مناسب نانورس در ماتریس پلیمری می‌تواند سبب محدود کردن تحرک زنجیرهای پلیمری پلی (لاکتیک اسید) شود و در نتیجه سفتی نانوکامپوزیت افزایش یابد. نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفی چگالی نسبت به مقدار نانورس و دمای افشانک نشان داد، کمترین چگالی در کمترین مقدار نانورس و دما حاصل می‌شود. بهینه‌سازی تک‌هدفی استحکام کششی نسبت به مقدار نانورس و دما بیشترین استحکام کششی را در بیشترین سطوح هم‌زمان مقدار نانورس و دما نمایان کرد. در این حالت، کانتورها نشان دادند، مقادیر استحکام کششی بیش از ۳۲ MPa به دست خواهد آمد. همچنین مشخص شد، کمترین مقادیر استحکام کششی در کمترین سطوح هم‌زمان مقدار نانورس و دما به وقوع می‌پیوندد که مقادیری کمتر از ۲۰ MPa خواهد داشت. نتایج بهینه‌سازی چندهدفی نیز مشخص کرد، بیشترین سطح مقدار نانورس (۴٪ وزنی)، بیشترین سطح دمای افشانک (۲۳۰°C) و زاویه رستر حدود ۲۵/۵° بهینه شرایط فرایندی را برای دستیابی به بیشترین استحکام کششی ۳۳/۷۸ MPa و کمترین چگالی ۱/۰۸۹ g/cm³ فراهم می‌کند.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از بنیاد ملی نخبگان ابراز می‌دارند.

مراجع

1. Rasaki S.A., Liu C., Lao C., Zhang H., and Chen Z., The



شکل ۸- بهینه‌سازی چندهدفی استحکام کششی و چگالی.

Fig. 8. Multi-objective optimization of tensile strength and density

بهینه‌سازی چندهدفی

نتایج مربوط به بهینه‌سازی چندهدفی استحکام کششی و چگالی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای انجام این بهینه‌سازی، مقدار وزنی نانورس بین ۰ تا ۴٪ وزنی، دمای افشانک بین ۱۹۰°C تا ۲۳۰°C و زاویه رستر بین ۰ تا ۹۰° به عنوان شرایط فرایندی در نظر گرفته شدند و بیشینه استحکام کششی و کمینه چگالی به عنوان اهداف مدنظر قرار گرفتند. نتایج مربوط به بهینه‌سازی چندهدفی نشان داد، بیشترین مقدار نانورس یعنی ۴٪ وزنی، بیشترین سطح دمای افشانک یعنی ۲۳۰°C و زاویه رستر حدود ۲۵/۵° بهینه شرایط فرایندی برای دستیابی به بیشینه استحکام کششی ۳۳/۷۸ MPa و کمینه چگالی ۱/۰۸۹ g/cm³ است.

نتیجه گیری

در مقاله حاضر استحکام کششی و چگالی به عنوان دو پارامتر مهم خروجی در نظر گرفته شد و اثر پارامترهای ورودی درصد وزنی نانورس، دمای افشانک و زاویه رستر بر این عوامل خروجی در نانوکامپوزیت‌های پلی (لاکتیک اسید)-نانورس با روش شناسی سطح پاسخ بررسی شد. بر اساس نتایج بررسی مشارکت پارامترها، اثر

Innovative Contribution of Additive Manufacturing Towards

- Revolutionizing Fuel Cell Fabrication for Clean Energy Generation: A Comprehensive Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **148**, 111369, 2021.
2. Hasanzadeh R., Mihankhah P., Azdast T., Aghaiee S., and Park C.B., Optimization of Process Parameters of Fused Filament Fabrication of Poly(lactic acid) Composites Reinforced by Aluminum Using Taguchi Approach. *Metals*, **13**, 1013, 2023.
 3. Rasouli A., Azdast T., Mohammadzadeh H., Mihankhah P., and Hasanzadeh R., Morphological Properties and Mechanical Performance of Poly(lactic acid) Scaffolds Fabricated by Novel Fused Filament Fabrication/Gas Foaming Coupled Method, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, **119**, 7463-7474, 2022.
 4. 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.
 5. Hasanzadeh R., Mihankhah P., Azdast T., Rasouli A., Shamkhali M., and Park C.B., Biocompatible Tissue-Engineered Scaffold Polymers for 3D Printing and Its Application for 4D Printing, *Chem. Eng. J.*, 146616, 2023.
 6. Hasanzadeh R., Mihankhah P., Azdast T., Bodaghi M., and Moradi M., Process-Property Relationship in Poly(lactic acid) Composites Reinforced by Iron Microparticles and 3D Printed by Fused Filament Fabrication, *Polym. Eng. Sci.*, **64**, 399-411, 2024.
 7. Tümer E.H. and Erbil H.Y., Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review, *Coatings*, **11**, 390, 2021.
 8. Rasouli A., Azdast T., Mohammadzadeh H., Mihankhah P., and Hasanzadeh R., Introducing a Novel Combined Method of Fused Filament Fabrication (FFF)/Batch Foaming to Improve the Properties of Biodegradable Poly(lactic acid), *Modares Mechan. Eng. (Persian)*, **22**, 15-22, 2021.
 9. Saini P., Arora M., and Kumar M.R., Poly(lactic acid) Blends in Biomedical Applications, *Adv. Drug Delivery Rev.*, **107**, 47-59, 2016.
 10. Banjanin B., Vladić G., Adamović S., and Bošnjaković G., Global Market Structure, In *Polymers for 3D Printing*, William Andrew, 353-367, 2022.
 11. Pavan M.V., Balamurugan K., Srinivasadesikan V., and Lee S.L., Impact and Shear Behavior of PLA/12% Cu Reinforced Composite Filament Printed at Different FDM Conditions, *Arabian J. Sci. Eng.*, **46**, 12709-12720, 2021.
 12. Zhang X., Chen L., Mulholland T., and Osswald T.A., Characterization of Mechanical Properties and Fracture Mode of PLA and Copper/PLA Composite Part Manufactured by Fused Deposition Modeling, *SN Appl. Sci.*, **1**, 1-12, 2019.
 13. Zhang X., Chen L., Mulholland T., and Osswald T.A., Effects of Raster Angle on the Mechanical Properties of PLA and Al/PLA Composite Part Produced by Fused Deposition Modeling, *Polym. Adv. Technol.*, **30**, 2122-2135, 2019.
 14. Vinay D.L., Keshavamurthy R., and Tambrallimath V., Enhanced Mechanical Properties of Metal Filled 3D Printed Polymer Composites, *J. Inst. Eng. (India): Ser. D*, 1-15, 2022.
 15. Hanon M.M., Alshammas Y., and Zsidai L., Effect of Print Orientation and Bronze Existence on Tribological and Mechanical Properties of 3D-Printed Bronze/PLA Composite, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, **108**, 553-570, 2020.
 16. Liu Z., Lei Q., and Xing S., Mechanical Characteristics of Wood, Ceramic, Metal and Carbon Fiber-Based PLA Composites Fabricated by FDM, *J. Mater. Res. Technol.*, **8**, 3741-3751, 2019.
 17. Mihankhah P., Azdast T., Mohammadzadeh H., Hasanzadeh R., and Aghaiee S., Fused Filament Fabrication of Biodegradable Poly(lactic acid) Reinforced by Nanoclay as a Potential Biomedical Material, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **36**, 961-983, 2021.
 18. Teixeira E.D.M., De Campos A., Marconcini J.M., Bondancia T.J., Wood D., Klameczynski A. and Glenn G.M., Starch/Fiber/Poly(lactic acid) Foam and Compressed Foam Composites, *RSC Adv.*, **4**, 6616-6623, 2014.
 19. Shishavan S.M., Azdast T., and Ahmadi S.R., Investigation of the Effect of Nanoclay and Processing Parameters on the Tensile Strength and Hardness of Injection Molded Acrylonitrile Butadiene Styrene-Organoclay Nanocomposites, *Mater. Des.*, **58**, 527-534, 2014.
 20. Gonabadi H., Yadav A., and Bull S.J., The Effect of Processing Parameters on the Mechanical Characteristics of PLA Produced by a 3D FFF Printer, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, **111**, 695-709, 2020.
 21. Weng Z., Wang J., Senthil T., and Wu L., Mechanical and Thermal Properties of ABS/Montmorillonite Nanocomposites for Fused Deposition Modeling 3D Printing. *Mater. Des.*, **102**, 276-283, 2016.
 22. Ebadi-Dehaghani H., Khonakdar H.A., Barikani M., and Jafari

- S.H., Experimental and Theoretical Analyses of Mechanical Properties of PP/PLA/Clay Nanocomposites, *Composites, Part B*, **69**, 133-144, 2015.
23. Perera K.Y., Hopkins M., Jaiswal A.K., and Jaiswal S., Nanoclays-Containing Bio-Based Packaging Materials: Properties, Applications, Safety, and Regulatory Issues, *J. Nanostruct. Chem.*, 1-23, 2023.
24. Rendas P., Figueiredo L., Geraldo M., Vidal C., and Soares B.A., Improvement of Tensile and Flexural Properties of 3D Printed PEEK through the Increase of Interfacial Adhesion, *J. Manufact. Process.*, **93**, 260-274, 2023.
25. Pang R., Lai M.K., Ismail K.I., and Yap T.C., The Effect of Printing Temperature on Bonding Quality and Tensile Properties of Fused Deposition Modelling 3D-Printed Parts, In *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **1257**, 012031, 2022.