



مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای موثر بر خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی PP/Cu چاپ‌شده با استفاده از فرایند LDM

حسنعلی محمدی جزی^۱، مهدی وحدتی^{۲*}، امیر مهدوی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: vahdati@shahroodut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۳ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع

کامپوزیت

پلی‌پروپیلن

مس

بهینه‌سازی

برای تولید کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، می‌توان از فرایند چاپ مستقیم بدون نیاز به ساخت فیلامنت، بهره برد. این فناوری با عنوان مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع (LDM) شناخته می‌شود. در این فرایند، مواد پلیمری آمیخته‌شده با میکرو ذرات، به صورت گرانول وارد سیلندر چاپگر شده و پس از رسیدن به دمای ذوب، بر روی بستر ماشین، چاپ می‌شوند. در این پژوهش، کامپوزیت‌های پایه پلیمری از جنس پلی پروپیلن با افزودن میکروذرات مس با استفاده از فناوری LDM تولید شدند. بدین منظور، طراحی آزمون‌های تجربی بر مبنای طرح عاملی کامل انجام شد. در ادامه، نمونه‌های کامپوزیتی منطبق بر هندسه نمونه آزمون کشش تحت تنظیمات معینی از متغیرهای ورودی مشتعل بر: ضخامت لایه، اندازه میکروذرات و درصد وزنی میکروذرات، چاپ شدند و استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها بر مبنای آنالیز واریانس، ارزیابی شدند. نتایج حاصل از تحلیل آماری نشان داد که ضریب تغییرات مدل‌های رگرسیون به منظور پیش‌بینی استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها به ترتیب مساوی ۹۸.۸۵ درصد و ۹۸.۶۳ درصد می‌باشند. همچنین، بهینه‌سازی دو هدفه با استفاده از روش مطلوبیت به منظور بهینه‌سازی پارامترهای پاسخ انجام شد و ترکیب بهینه متغیرهای ورودی با مقدار تابع مطلوبیت ۹۶.۱ درصد تعیین گردید. مقادیر بهینه ضخامت لایه، اندازه میکروذرات و درصد وزنی میکروذرات به ترتیب مساوی ۱۸۰ میکرون، ۴۵ میکرون و ۱۰ درصد، استخراج شدند.

Modeling and optimization of variables affecting tensile properties of printed PP/Cu composite samples using LDM process

Hassanali Mohammadi Jazi¹, Mahdi Vahdati^{2*}, Amir Mahdavi³

1- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* Corresponding Author's Email: vahdati@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 July 2024

Accepted: 24 August 2024

Keywords:

Liquid Deposition Modeling

Composite

Polypropylene

Copper

Optimization

Abstract

To produce polymer matrix composites, direct printing can be used without the need to make filament. This technology is known as liquid deposition modeling (LDM). In this process, polymer materials mixed with microparticles enter the printer cylinder in the form of granules and after reaching the melting temperature, they are printed on the machine bed. In this research, polymer-based composites made of polypropylene were produced by adding copper microparticles using LDM technology. For this purpose, experimental tests were designed based on a full factorial design. In the following, the composite samples conforming to the geometry of the tensile test sample were printed under certain settings of the input variables including: layer thickness, microparticle size and weight percentage of microparticles, and the yield strength and flexibility of the samples were evaluated based on ANOVA. The results of the statistical analysis showed that the coefficient of variation of the regression models to predict the yield strength and flexibility of the samples are equal to 98.85 % and 98.63%, respectively. Also, dual-objective optimization was performed using the desirability method in order to maximize the response parameters, and the optimal combination of input variables was determined with the desirability value of 96.1%. The optimal values of layer thickness, microparticle size and weight percentage of microparticles were extracted as equal to 180 micron, 45 micron and 10% respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammadi Jazi H, Vahdati M, Mahdavi A. Modeling and optimization of variables affecting tensile properties of printed PP/Cu composite samples using LDM process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):10-19. doi: 10.22034/ijme.2024.470528.1989 [In Persian]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع^۱ به عنوان یکی از روش‌های جدید در حوزه چاپ سه‌بعدی معرفی شده است [۱]. در این فرایند که به اختصار LDM نامیده می‌شود، مواد پلیمری یا کامپوزیتی به صورت گرانول آماده شده و در سیلندر چاپگر ریخته می‌شوند. سپس، مواد به تدریج گرم و ذوب شده و تحت فشار پیستون، از طریق نازل بر روی بستر دستگاه، چاپ می‌شوند. امروزه، مطالعات بسیاری توسط محققان در زمینه بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری چاپ شده، انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

رُزنتال و همکاران [۱] به مطالعه استحکام مکانیکی قطعات چاپ‌شده با استفاده از مواد مبتنی بر چوب در فرایند مدل‌سازی لایه-نشانی مایع پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن چوب و نمک موجب کاهش استحکام می‌شود. از سوی دیگر، افزودن الیاف باعث بهبود خواص خمشی شده و افزودن سیمان باعث بهبود مقاومت فشاری خواهد شد. شوئه و همکاران [۲] تأثیر پارامترهای مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب را بر خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید^۲ و پلی اتیلن ترفتالات گلیکول^۳ چاپ شده، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای چاپ، استحکام کششی و فشاری نمونه‌های چاپ‌شده افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش سرعت چاپ، خواص مکانیکی پلی لاکتیک اسید و پلی اتیلن ترفتالات گلیکول به ترتیب افزایش و کاهش یافت.

آفروس و همکاران [۳] تأثیر زاویه چاپ بر خواص کششی پلی لاکتیک اسید تولید شده با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های چاپ‌شده در امتداد اعمال نیروی کشش، از استحکام کششی به میزان ۳۸،۶۵ مگاپاسکال برخوردارند. از سوی دیگر، نمونه‌هایی که جهت چاپ آن‌ها با امتداد اعمال نیروی کشش، به میزان ۹۰ درجه اختلاف داشتند، دارای استحکام کششی ۳۱،۴۳ مگاپاسکال بودند. همچنین، نمونه‌هایی که تحت زاویه ۴۵ و ۴۵- درجه نسبت به امتداد اعمال نیروی کشش، چاپ شده بودند، دارای استحکام کششی به میزان ۳۳،۶۳ مگاپاسکال بودند. سپهی و همکاران [۴]، خواص مکانیکی نمونه‌های پلی اتیلن ترفتالات گلیکول چاپ شده با استفاده از مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش، چقرمگی، استحکام کششی، ازدیاد طول در نقطه شکست، استحکام تسلیم و مدول کششی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پلی اتیلن ترفتالات گلیکول چاپ‌شده از استحکام کافی و شکل پذیری بالا برخوردار هستند. از سوی دیگر، مواد پلی اتیلن ترفتالات گلیکول در طی آزمون کشش و بر اساس تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴، شکنندگی جزئی از خود نشان دادند.

گروه دیگری از محققان، با استفاده از فیلامنت‌های کامپوزیتی مبتنی بر اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۵، خواص مکانیکی و حرارتی قطعات چاپ شده در فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب را مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. نتایج نشان داد که افزودن ۲۰ درصد حجمی از آلومینا به فیلامنت، باعث کاهش ۷۰ درصدی استحکام کششی می‌شود. همچنین، افزودن ۱۰ درصد حجمی از آلومینا، باعث افت ۷۴ درصدی استحکام فشاری خواهد شد. از سوی دیگر، افزودن آلومینا به فیلامنت‌های کامپوزیتی موجب افزایش پایداری حرارتی قطعات چاپ‌شده می‌شود. سرائیان و شکوری [۶] رفتار خستگی و خزشی نمونه‌های چاپ‌شده با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، فیلامنت پلی لاکتیک اسید برای چاپ نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که درصد پرشوندگی و ضخامت لایه به عنوان موثرترین عوامل بر افزایش عمر خستگی و کاهش نرخ خزشی نمونه‌ها می‌باشند.

ورما و همکاران [۷] با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب، اقدام به چاپ ترکیبی از پلیمرهای اکریلونیتریل بوتادین استایرن و پلی کربنات^۶ نمودند. آن‌ها تأثیر کوپلیمر استایرن-ایزوپرن-استایرن^۷ بر قابلیت چاپ و خواص مکانیکی نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن کوپلیمر، نه تنها سازگاری دو فاز ترکیبی را افزایش می‌دهد، بلکه قابلیت چاپ مواد ترکیب‌شده را نیز افزایش خواهد داد. از سوی دیگر، افزایش محتوای کوپلیمر، باعث کاهش استحکام کششی، استحکام تسلیم، مدول الاستیک و سختی نمونه‌های چاپ‌شده می‌شود. کوهفر و وحدتی [۸] با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب و بر اساس تحلیل

¹ Liquid Deposition Modeling (LDM)

² Polylactic Acid (PLA)

³ Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)

⁴ Scanning Electron Microscope (SEM)

⁵ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

⁶ Polycarbonate (PC)

⁷ Styrene-Isoprene-Styrene (SIS)

واریانس، استحکام تسلیم و استحکام شکست نمونه‌های چاپ‌شده از جنس فیلامنت پلی اتیلن ترفتالات گلیکول را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مدل‌های رگرسیون معتبری به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی نمونه‌ها ارائه کردند. همچنین، ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب با هدف بیشینه‌سازی استحکام تسلیم و استحکام شکست نمونه‌های چاپ‌شده، استخراج و تعیین شدند.

در پژوهشی دیگر، محققان دریافتند که استحکام فشاری نمونه‌های چاپ‌شده از جنس پلی اتیلن ترفتالات گلیکول به طور مستقیم با چگالی پرشوندگی متناسب است [۹]. علاوه بر این، به ازای تراکم ۲۵ درصدی از پرشوندگی، استحکام کششی و خمشی بالاتری برای نمونه‌ها حاصل شد. همچنین، تنظیم سرعت چاپ در مقدار ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه موجب افزایش استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها می‌شود. با مروری بر پیشینه تحقیقات انجام شده در حوزه کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان دریافت که اکثر روش‌های ساخت افزایشی برای تولید این گروه از محصولات، مبتنی بر فناوری مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب هستند. بنابراین برای دسترسی به فیلامنت‌های کامپوزیتی به عنوان مواد اولیه فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مذاب، بایستی اقدام به تأمین تجهیزات اکسترودر^۱ نمود تا فیلامنت مورد نظر در طول و قطر استاندارد، تولید شود. این امر، باعث افزایش هزینه تولید مواد اولیه (فیلامنت کامپوزیتی) خواهد شد و از سوی دیگر، زمان چاپ نمونه‌های کامپوزیتی نیز افزایش خواهد یافت. از این‌رو، به کارگیری فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع و اکستروژن مستقیم مواد کامپوزیتی بر روی بستر چاپ، مشکلات فوق‌الذکر را مرتفع خواهد نمود. بنابراین در این پژوهش، فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع برای چاپ کامپوزیت‌های PP/Cu (پلی‌پروپیلن ترکیب‌شده با میکروذرات مس) به کار گرفته خواهد شد. بدین منظور، نمونه‌های کامپوزیتی منطبق بر مشخصات نمونه استاندارد آزمون کشش تحت تنظیمات مشخصی از متغیرهای ورودی همچون: ضخامت لایه، اندازه میکروذرات و درصد وزنی میکروذرات، بر مبنای طرح عاملی کامل و با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع، چاپ شدند و استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها بر مبنای تحلیل واریانس، مورد مطالعه قرار گرفتند. چاپ نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع، استخراج مدل‌های رگرسیون به منظور پیش‌بینی استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌های چاپ‌شده و دستیابی به ترکیب بهینه متغیرهای ورودی فرایند جهت بیشینه‌سازی پارامترهای پاسخ، بخشی از جوانب نوآوری پژوهش پیش‌رو می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از پلی‌پروپیلن [550 مشهور به پلی‌پروپین^۲، به عنوان پلیمر پایه استفاده شد [۱۰]. علاوه بر این، پودر مس با خلوص ۹۹ درصد و در دو اندازه ۲۰ و ۴۵ میکرون به عنوان میکروذرات تقویت‌کننده، تأمین و تهیه شد (شکل ۱). برای ترکیب پلی‌پروپیلن با میکروذرات مس از روش محلول‌سازی استفاده شد. بدین منظور، پلی‌پروپیلن در دمای نزدیک به ۱۴۰ درجه سانتیگراد در حلال زایلن، حل می‌شود. برای ترکیب محلول پلیمری و میکروذرات از همزن مغناطیسی استفاده شد تا محلول خمیری همگن حاصل شود. سپس در دمای نزدیک به ۱۷۰ درجه سانتیگراد، محلول خمیری را در قالب‌هایی از جنس فویل آلومینیومی ریخته تا تبخیر حلال انجام شود و ترکیب پلی‌پروپیلن و میکروذرات باقی بماند (شکل ۲).



(ب) پودر مس



(الف) پلی‌پروپیلن

شکل ۱ پلیمر و میکروذرات مورد نیاز برای ساخت کامپوزیت

¹ Extruder

² Polypropene

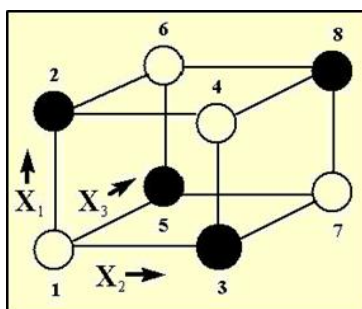


شکل ۲ محلول پلی پروپیلن و میکروذرات مس

جدول ۱، متغیرهای ورودی فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع و سطوح تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد. به منظور طراحی آزمون‌های تجربی از طرح عاملی کامل^۱ استفاده شد (شکل ۳). جدول ۲، آزمون‌های طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ متغیرهای ورودی فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع

سطوح تغییرات		واحد	نماد	متغیر ورودی
+1	-1			
240	180	micron	T	ضخامت لایه
45	20	micron	S	اندازه میکروپودر
20	10	%	W	درصد وزنی میکروپودر



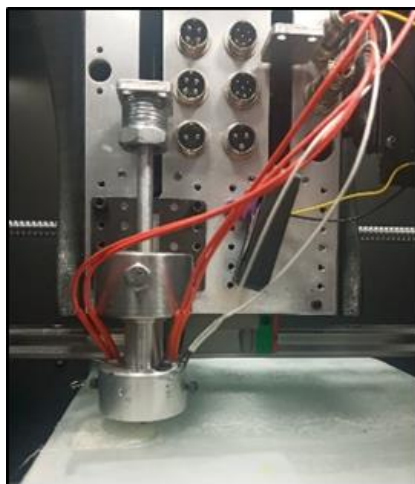
شکل ۳ طرح عاملی کامل

جدول ۲ طراحی آزمون‌های تجربی

پارامترهای پاسخ		متغیرهای ورودی			شماره آزمون
Elongation %	S_y MPa	C (W) %	B (S) micron	A (T) micron	
12.51	7.96	20	20	180	1
17.24	7.34	20	20	240	2
12.18	8.01	10	20	240	3
14.7	7.78	10	45	240	4
21.78	7.03	10	45	180	5
12.37	7.47	20	45	180	6
13.04	6.02	10	20	180	7
13.78	6.22	20	45	240	8

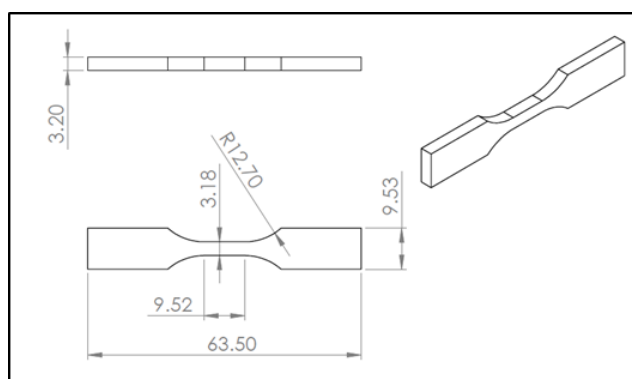
شکل ۴، دستگاه لایه‌نشانی مایع را نشان می‌دهد که برای چاپ نمونه‌های استاندارد آزمون کشش به کار گرفته شد.

^۱ Full Factorial Design (FFD)



شکل ۴ چاپگر لایه‌نشانی مایع

پارامترهای قطر نازل، دمای نازل، درصد پرشوندگی، سرعت چاپ و الگوی پرشوندگی به صورت ثابت و به ترتیب مساوی ۰٫۶ میلی‌متر، ۲۵۵ درجه سانتیگراد، ۱۰۰ درصد، ۷ میلی‌متر بر ثانیه و الگوی هاشور در نظر گرفته شدند. نمونه‌های آزمون کشش با توجه به الزامات مندرج در استاندارد ASTM D638 [۱۱] طراحی شده و سپس چاپ شدند (شکل ۵).



(الف) مشخصات هندسی و ابعادی نمونه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)



(ب) نمونه‌های چاپ‌شده

شکل ۵ چاپ نمونه‌های آزمون کشش مطابق الزامات ASTM D638

۳- نتایج و بحث

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنتام مدل STM-150، تحت آزمون کشش قرار گرفتند و مقادیر استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول آن‌ها، استخراج و ثبت گردید (جدول ۲). تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ [۱۲] و

^۱ Design-Expert

بر مبنای آنالیز واریانس^۱ صورت گرفت. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان پارامترهای پاسخ و متغیرهای موثر در فرایند، تحلیل رگرسیون به کار گرفته شد [۱۳]. جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب نتایج حاصل از تحلیل واریانس استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول را نشان می‌دهد.

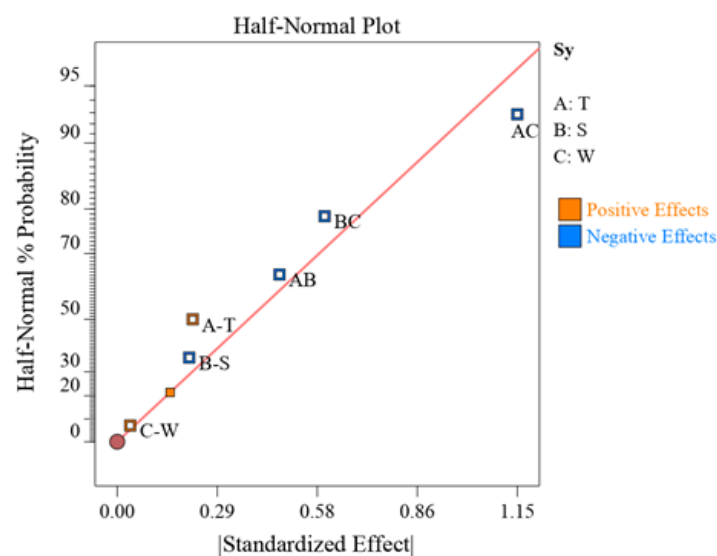
جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس استحکام تسلیم

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییر
0.1997	14.30	0.6652	6	3.99	مدل
0.3893	2.03	0.0946	1	0.0946	A-T
0.4035	1.85	0.0861	1	0.0861	B-S
0.8465	0.0605	0.0028	1	0.0028	C-W
0.2007	9.40	0.4371	1	0.4371	AB
0.0838	57.11	2.66	1	2.66	AC
0.1591	15.35	0.7140	1	0.7140	BC

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس درصد ازدیاد طول (انعطاف پذیری)

P-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییر
0.2174	12.00	12.62	6	75.70	مدل
0.6464	0.3853	0.4050	1	0.4050	A-T
0.2304	6.98	7.33	1	7.33	B-S
0.2952	4.00	4.21	1	4.21	C-W
0.1879	10.82	11.38	1	11.38	AB
0.1293	23.57	24.78	1	24.78	AC
0.1227	26.26	27.60	1	27.60	BC

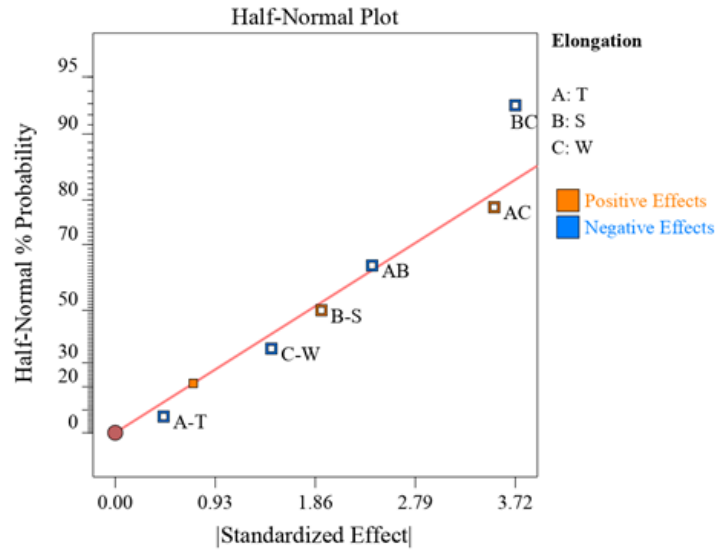
بر اساس کمترین مقدار پارامتر P-value، می‌توان دریافت که عبارت تعاملی حاصل ضرب ضخامت لایه و درصد وزنی میکروپودر دارای بیشترین تأثیر بر استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. از سوی دیگر، عبارت تعاملی حاصل ضرب اندازه و درصد وزنی میکروپودر دارای بیشترین تأثیر بر میزان انعطاف پذیری نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. علاوه بر این، نمودارهای نیمه نرمال^۲ نیز به عنوان یک ابزار گرافیکی و به منظور شناسایی عواملی که تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب نمودارهای نیمه نرمال پارامترهای استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول را نشان می‌دهند.



شکل ۶ نمودار نیمه نرمال استحکام تسلیم

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

² Half-Normal Plot



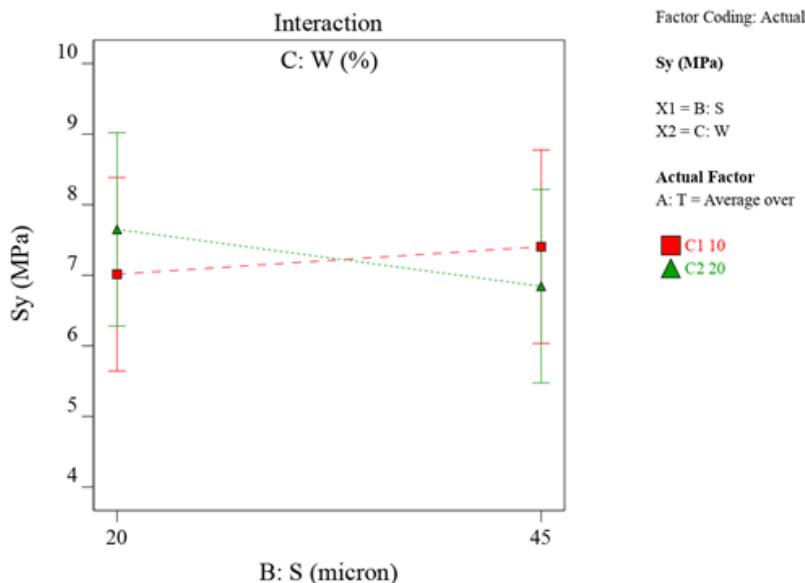
شکل ۷ نمودار نیمه نرمال درصد ازدیاد طول (انعطاف پذیری)

ضریب تغییرات مدل‌های رگرسیون برای استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول به ترتیب مساوی ۹۸,۸۵ درصد و ۹۸,۶۳ درصد حاصل شدند که دلالت بر صلاحیت و کفایت مدل‌های رگرسیون دارد. همچنین، معیار کفایت دقت^۱ برای استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول به ترتیب مساوی ۹,۱۰۸ و ۱۰ به دست آمد که دلالت بر سیگنال کافی مدل‌های رگرسیون دارد و می‌توان از این مدل‌ها برای حرکت در فضای طراحی استفاده نمود. مدل‌های رگرسیون استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول به صورت گذاری شده و مطابق روابط زیر استخراج شدند:

$$S_y = 7.23 + 0.109 T - 0.104 S + 0.019 W - 0.234 TS - 0.576 TW - 0.299 SW \quad (1)$$

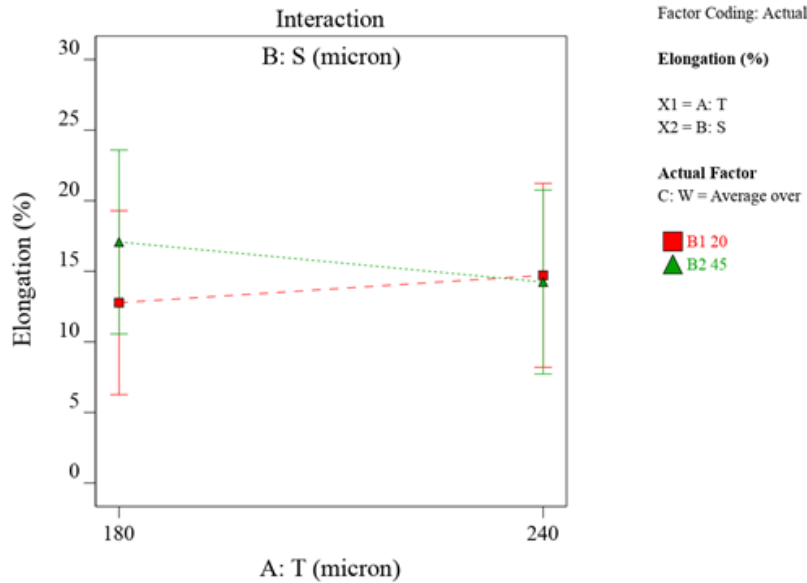
$$Elongation = 14.7 - 0.225 T + 0.958 S - 0.725 W - 1.19 TS + 1.76 TW - 1.86 SW \quad (2)$$

مطابق شکل ۸، کاهش اندازه میکروذرات و افزایش درصد وزنی آن‌ها موجب افزایش استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش اندازه میکروذرات و کاهش ضخامت لایه منتج به افزایش انعطاف پذیری نمونه‌های کامپوزیتی خواهد شد (شکل ۹).



شکل ۸ تأثیر اندازه و درصد وزنی میکروپودر بر استحکام تسلیم

¹ Adequate Precision



شکل ۹ تأثیر ضخامت لایه و اندازه میکروپودر بر درصد ازدیاد طول (انعطاف پذیری)

۴- بهینه‌سازی و صحه‌گذاری

در این پژوهش، از روش مطلوبیت^۱ برای بهینه‌سازی متغیرهای ورودی استفاده می‌شود [۱۴]. با توجه به اینکه هدف تابع مطلوبیت، بیشینه‌سازی همزمان استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول می‌باشد، مطلوبیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{U-L}\right)^r & L \leq y \leq U \\ 1 & y > U \end{cases} \quad (3)$$

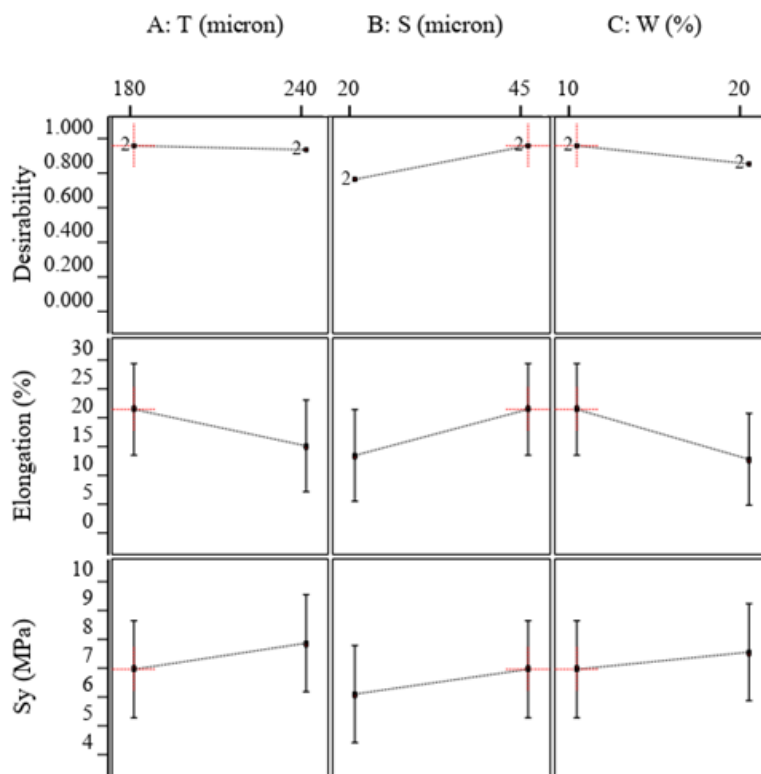
در این رابطه، پارامترهای L و U به ترتیب حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ y می‌باشند. مقدار وزن r مساوی ۰٫۱ در نظر گرفته شد. جدول ۵، ترکیب بهینه متغیرهای ورودی جهت دستیابی همزمان به بیشینه پارامترهای پاسخ را نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی دو هدفه

پارامتر	مقدار
T	180 microns
S	45 microns
W	10%
S_y	6.95 MPa
Elongation	21.42%
Desirability	96.1%

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه ضخامت لایه، اندازه میکروذرات و درصد وزنی میکروذرات به ترتیب مساوی ۱۸۰ میکرون، ۴۵ میکرون و ۱۰ درصد، انتخاب و معرفی شدند. مقدار تابع مطلوبیت نیز برابر با ۹۶٫۱ درصد، حاصل شد (شکل ۱۰). مقایسه نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی و نتایج تجربی مربوط به نمونه ۵ (مندرج در جدول ۲)، نشان می‌دهد که مقادیر استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول به ترتیب دارای اختلاف ۱٫۱ و ۱٫۷ درصدی هستند که بیانگر دقت بسیار خوب مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پارامترهای پاسخ هستند.

¹ Desirability Method



شکل ۱۰ نمایش تأثیر ترکیب بهینه متغیرهای فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع جهت دستیابی به بیشینه پارامترهای پاسخ

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کامپوزیت‌های پایه پلیمری PP/Cu (پلی پروپیلن ترکیب‌شده با میکروذرات مس) با استفاده از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی مایع تحت ترکیبات مشخصی از متغیرهای ضخامت لایه، اندازه میکروذرات و درصد وزنی میکروذرات، چاپ شدند و استحکام تسلیم و انعطاف پذیری نمونه‌های چاپ شده، تحت ارزیابی قرار گرفتند. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- نتایج تحلیل واریانس و نمودارهای نیمه نرمال نشان دادند که عبارت تعاملی حاصل ضرب ضخامت لایه و درصد وزنی میکروپودر دارای بیشترین تأثیر بر استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. همچنین، عبارت تعاملی حاصل ضرب اندازه و درصد وزنی میکروپودر، دارای بیشترین تأثیر بر میزان انعطاف پذیری نمونه‌های کامپوزیتی است.
- ضریب تغییرات مدل‌های رگرسیون برای استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول به ترتیب مساوی ۹۸٫۸۵ درصد و ۹۸٫۶۳ درصد حاصل شد که دلالت بر صلاحیت و کفایت مدل‌های رگرسیون دارد.
- کاهش اندازه میکروذرات مس و افزایش درصد وزنی آن‌ها موجب افزایش استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش اندازه میکروذرات مس و کاهش ضخامت لایه منتج به افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌های کامپوزیتی خواهد شد.
- مقادیر بهینه ضخامت لایه، اندازه میکروذرات مس و درصد وزنی میکروذرات مس جهت بیشینه‌سازی همزمان استحکام تسلیم و انعطاف پذیری، به ترتیب مساوی ۱۸۰ میکرون، ۴۵ میکرون و ۱۰ درصد، تعیین شدند.

References

- [1] Rosenthal M, Rüggeberg M, Gerber C, Beyrich L, Faludi J. Physical properties of wood-based materials for liquid deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2023 May 2;29(5):1004-13. doi: 10.1108/RPJ-09-2022-0322
- [2] Hsueh MH, Lai CJ, Wang SH, Zeng YS, Hsieh CH, Pan CY, Huang WC. Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*. 2021 May 27;13(11):1758. doi: 10.3390/polym13111758

- [3] Afrose MF, Masood SH, Nikzad M, Iovenitti P. Effects of build orientations on tensile properties of PLA material processed by FDM. *Advanced materials research*. 2014 Nov 26;1044:31-4. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.31](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.31)
- [4] Sepahi MT, Abusalma H, Jovanovic V, Eisazadeh H. Mechanical properties of 3D-printed parts made of polyethylene terephthalate glycol. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021 Sep;30:6851-61. doi: [10.1007/s11665-021-06032-4](https://doi.org/10.1007/s11665-021-06032-4)
- [5] Gholizadeh Roshan A, Zolfaghari A, Shakeri M. Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):1-9. [In Persian]
- [6] Shakouri E. Evaluation of rotary fatigue bending and creep performance in PLA components during fused deposition modeling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Nov 22;8(9):60-9. [In Persian]
- [7] Verma N, Banerjee SS. Development of material extrusion 3D printable ABS/PC polymer blends: influence of styrene-isoprene-styrene copolymer on printability and mechanical properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023 Mar 4;62(4):419-32. doi: [10.1080/25740881.2022.2121218](https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2121218)
- [8] Koochfar S, Vahdati M. Experimental study and statistical analysis of the effect of FDM parameters on yield strength and fracture strength of printed polymer samples. *32th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME 2024)*. 2024 May 7; Arak, Iran. [In Persian]
- [9] Mallikarjuna B, Mallesh V, Vardhan MS, Vadivudaiyanayak HG, Datta PG. Effect of Process Parameters on Mechanical Properties in Fused Deposition Modelling of Polyethylene Terephthalate Glycol. *Procedia Structural Integrity*. 2024 Jan 1;56:160-6. doi: [10.1016/j.prostr.2024.02.051](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.051)
- [10] Busico V, Cipullo R. Microstructure of polypropylene. *Progress in Polymer Science*. 2001 Apr 1;26(3):443-533. doi: [10.1016/S0079-6700\(00\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00046-0)
- [11] AbouelNour Y, Rakauskas N, Naquila G, Gupta N. Tensile testing data of additive manufactured ASTM D638 standard specimens with embedded internal geometrical features. *Scientific Data*. 2024 May 16;11(1):506. doi: [10.1038/s41597-024-03369-y](https://doi.org/10.1038/s41597-024-03369-y)
- [12] Akram W, Garud N. Design expert as a statistical tool for optimization of 5-ASA-loaded biopolymer-based nanoparticles using Box Behnken factorial design. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021 Dec;7:1-7. doi: [10.1186/s43094-021-00299-z](https://doi.org/10.1186/s43094-021-00299-z)
- [13] Dean A, Voss D. *Design and analysis of experiments*. New York, NY: Springer New York; 1999. doi: [10.1007/0-387-22634-6_15](https://doi.org/10.1007/0-387-22634-6_15)
- [14] Isapour Rudy M, Vahdati M, Mirnia MJ. Statistical Analysis and Optimization of Variables Affecting the End Diameter of AISI 304 Steel Tube Produced by Flaring Process. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2023 Feb 20;54(12):2861-76. doi: [10.22060/MEJ.2022.21622.7479](https://doi.org/10.22060/MEJ.2022.21622.7479) [In Persian]