



مطالعه تجربی و پیش‌بینی استحکام کششی نمونه نانوکامپوزیتی تولید شده با چاپگر سه‌بعدی

رهام رفیعی*، هیراد اموحاجی

دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Roham.Rafiee@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۸ فروردین ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت

چاپ افزودنی

استحکام

نانولوله کربن

الگوریتم ژنتیک

چکیده

هدف از این پژوهش پیش‌بینی استحکام قطعه نانوکامپوزیت تولید شده با چاپگر سه‌بعدی بر اساس خواص فیلامنت نانوکامپوزیتی استفاده شده برای چاپ است. برای این منظور، ابتدا فیلامنت‌های نانوکامپوزیتی تولید و سپس چاپ سه‌بعدی شدند. سپس استحکام فیلامنت نانوکامپوزیتی تولید شده و همچنین قطعات چاپ شده اندازه‌گیری گردید. در بخش مدل‌سازی، مدل چند مقیاسی مناسب توسعه داده شد. مدل مذکور در مرحله اول به پیش‌بینی استحکام فیلامنت نانوکامپوزیتی پرداخته، سپس استحکام قطعه چاپ شده نانوکامپوزیت را تخمین می‌زند. مدل چند مقیاسی از سه مقیاس میکرو، مسو و ماکرو تشکیل شده است. تأثیر طول و جهت‌گیری نانولوله در ماتریس را در مقیاس میکرو و توزیع آن‌ها در مقیاس مسو در نظر گرفته می‌شود. در نهایت در مقیاس ماکرو به کمک الگوریتم ژنتیک استحکام نهایی فیلامنت محاسبه شده است. همچنین مقادیر به دست آمده از آزمون کشش همخوانی بالایی با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی داشتند. در ادامه با داشتن خواص فیلامنت نانوکامپوزیتی، خواص چسبندگی بین لایه‌ها و مسیرهای چاپ و تخلخل استحکام قطعه چاپ شده در راستای طولی، عرضی و برشی با استفاده از مدل اجزا محدود پیش‌بینی گردید. با مقایسه نتایج مدل‌سازی با مشاهدات آزمایشگاهی مشاهده گردید که مقادیر اختلاف کمتر از ۴٪ است. در ادامه با استفاده از یک معیار تخریب درجه دوم و ترکیب آن با تئوری لایه چینی کلاسیک، استحکام قطعه نانوکامپوزیت چاپ شده در جهت‌های مختلف چاپ، پیش‌بینی گردید. مقادیر استحکام با درصد خطای بین ۵٪ تا ۱۰٪ به نسبت مقادیر تجربی پیش‌بینی می‌گردد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل توسعه داده شده می‌باشد.

Experimental study and predicting the tensile strength of nanocomposite specimens produced with a 3D printer

Roham Rafiee*, Hiran Amohaji

College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: Roham.Rafiee@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 March 2025

Accepted: 7 April 2025

Keywords:

Nanocomposites

Additive Manufacturing

Strength

Carbon Nanotube

Genetic Algorithm

Abstract

This study aims to predict the strength 3D-printed nanocomposite specimens based on the properties of the nanocomposite filament used in the printer's feedstock. For this purpose, nanocomposite filaments were fabricated and then utilized as input material for the 3D printer to manufacture nanocomposite specimens. The strengths of both produced nanocomposite filaments and printed parts were measured. In the modeling section, an appropriate multiscale model was developed. This model first predicts the strength of the nanocomposite filament and then estimates the strength of the printed nanocomposite specimens. The model covers three scales: micro, meso, and macro. The effect of nanotube length and orientation is considered at the microscale, while their agglomeration is taken into account at the mesoscale. Finally, at the macroscale, the final filament strength is calculated using a genetic algorithm. Moreover, the tensile test results exhibited excellent agreement with the numerical modeling outcomes. Finally, using the filament properties, interlayer adhesion properties, print path adhesion properties, and porosity, the strength of the printed part in longitudinal, transverse, and shear directions was predicted using the finite element model. Comparison of the results with experimental values demonstrated that the model provides acceptable accuracy by less than 4% discrepancy with experimental measurement. Employing a second-degree failure criterion and integrating it with classical laminate theory, the strength of the printed nanocomposite specimens with various printing directions was predicted. The levels of discrepancy between estimated values and experimental observations are between 5% to 10% implying on the very accurate performance of the model.

Please cite this article using:

Rafiee R, Amohaji H. Experimental study and predicting the tensile strength of nanocomposite specimens produced with a 3D printer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 May 22;12(3):1-9. doi: 10.22034/ijme.2025.511057.2056 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

امروزه ساخت افزایشی به عنوان یک فناوری پیشرفته، که توانایی ساخت سریع نمونه‌ها با هندسه‌های پیچیده را دارد، گسترش یافته است [۱]. تولید نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از چاپگر سه‌بعدی، به عنوان یک روش جدید در ساخت مواد، با خواص تقویت شده است. این روش ساخت، امکان تولید ساختارهای پیچیده با استفاده از مواد مختلف را فراهم می‌کند [۲، ۳]. افزودن نانوذرات، به‌ویژه نانولوله‌های کربنی، به پلیمرهای رایج در چاپ سه‌بعدی، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، باعث افزایش قابلیت‌های عملکردی این مواد شده است. این فناوری نوظهور در تولید نانو کامپوزیت‌ها، کاربرد گسترده‌ای در صنایع نظامی، پزشکی و خودروسازی دارد [۳].

نانوکامپوزیت‌ها موادی هستند که نانوذرات را در یک ماتریس قرار داده تا خواص آن‌ها را بهبود بخشند. اغلب خواص مکانیکی برتری مانند افزایش استحکام و مدول الاستیسیته را نشان می‌دهند، ضمن اینکه آن‌ها خواص حرارتی بهبود یافته‌ای دارند که برای کاربرد در دماهای بالا مناسب است [۴، ۵]. در ادامه به طور خلاصه، به پژوهش‌هایی که نانو کامپوزیت‌های تولید شده با چاپگر سه‌بعدی را به روش نظری و تجربی بررسی کرده‌اند، اشاره می‌شود.

گوتیرز و همکاران [۶] با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره با کسر وزنی‌های ۵ و ۷/۵ و ۱۰ درصد به پلیمر ABS مشاهده کردند که استحکام و مدول الاستیسیته فیلامنت نانو کامپوزیتی، نسبت به پلیمر خالص افزایش زیادی پیدا کرده است. همچنین مشاهده شد که خواص مکانیکی نانو کامپوزیتی که ماده تقویت کننده آن نانولوله کربنی تک جداره بوده است، بسیار بیشتر از حالتی بوده که نانو لوله کربنی چند جداره به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شده است. فراتوگلو و همکاران [۷] نانو لوله کربنی را در سه کسر وزنی ۲، ۴ و ۶ درصد به پلیمر ABS (آکریلونیتریل - بوتادین - استایرن) اضافه کرده و مشاهده کردند که مدول الاستیسیته و استحکام نانوکامپوزیت تا کسر وزنی ۴ درصد افزایش پیدا کرده است. در کسر وزنی ۶ درصد مقدار کاهش پیدا می‌کند. رفیعی و ذهتاب زاده [۸] یک مدل‌سازی چند مقیاسی پایین به بالا به منظور تخمین استحکام نانوکامپوزیت حاوی نانولوله‌ی کربن را توسعه دادند که عدم قطعیت‌های ناشی از فرایند تولید را با مدل‌سازی تصادفی لحاظ می‌نماید. مدل‌سازی از مقیاس میکرو آغاز گردیده و پس از گذار از مقیاس مسو به مقیاس نهایی ماکرو ختم می‌گردد.

از آنجایی که نیاز روزافزون صنعت به نمونه‌سازی سریع، دقت بالا و هزینه کم مدنظر است، لایه نشانی ذوبی یکی از روش‌های پیشرفته ساخت افزایشی است که امکان تولید قطعات پیچیده هندسی از مواد ترموپلاستیک را فراهم می‌کند [۹، ۱۰]؛ از این رو مطالعه تجربی قطعات از این روش ساخت کمک گرفته شده است.

با توجه به تحقیقات پیشین، لازم به‌ذکر است که اشاره شود بیشتر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه به‌صورت تجربی بوده و تحقیقات بسیار کمی به صورت تئوری انجام‌شده‌است که آن هم در زمینه پیش‌بینی مدول کششی بوده است [۸].

هدف اصلی این تحقیق، بررسی استحکام قطعه نانوکامپوزیتی تولید شده در چاپگر سه‌بعدی به منظور ساخت افزایشی، مبتنی بر فرایند ساخت فیلامنت ذوب شده است. برای این منظور علاوه بر اندازه‌گیری استحکام نمونه نانوکامپوزیتی تولید شده، به توسعه مدل چند مقیاسی مناسب برای تخمین استحکام آن پرداخته خواهد شد. با توجه به ماهیت تصادفی برخی پارامترهای حاکم بر مسئله همانند جهت‌گیری، طول و میزان تفرق آن در ماده زمینه رزین، مدل‌سازی به صورت تصادفی با شیوه نوینی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک تحقق خواهد یافت. که در آن با تولید داده‌های تصادفی استحکام نهایی فیلامنت نانوکامپوزیت تخمین زده می‌شود. در مرحله بعد با در نظر گرفتن تداخل و چسبندگی بین لایه‌ها، استحکام طولی، عرضی و برشی ماده پیش‌بینی گردیده، و با استفاده از معیار تخریب مناسب استحکام در راستاهای مختلف پیش‌بینی شده است. و در نهایت با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌ها، استحکام نهایی قطعه در جهت چاپ مختلف پیش‌بینی می‌گردد.

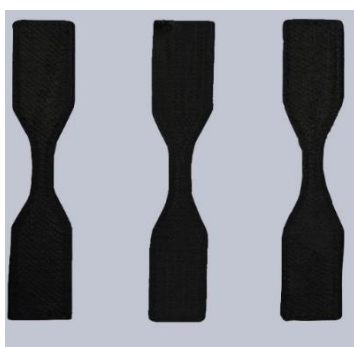
۲- مطالعه تجربی

در این تحقیق از پلیمر ABS به دلیل برخورداری از خواص نسبتاً خوب مکانیکی و کاربردهای فراوان آن در صنایع مختلف، استفاده شده است. گرانول ABS با چگالی ۱/۰۶ الی ۱/۰۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، دمای انتقال شیشه‌ای $108-109^{\circ}\text{C}$ و وزن مولکولی ۲۵۱ گرم بر مول استفاده شده است و نانولوله کربن نیز با خلوصی بیش از ۹۵ درصد وزنی که بیش از ۹۸ درصد آن نانوذره تک دیواره است، با چگالی ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. نانولوله کربن در کسر وزنی‌های مختلف به طور جداگانه به محلول آب مقطر که حاوی

گرانول ABS است، اضافه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه التراسونیک، نانولوله به‌خوبی در محلول توزیع می‌گردد. در ادامه نمونه‌ها به طور جداگانه در دستگاه مخلوط‌کن قرار می‌گیرند. مخلوط کردن در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت دوران ۹۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه انجام شده است. سپس مخلوط وارد دستگاه پرس داغ شده و به وسیله خردکن به تکه‌های کوچک تقسیم می‌شود. برای اینکه به تکه‌ها آسیبی وارد نشود، در این مدت دمای پرس روی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌گردد. در نهایت تکه‌ها را در دستگاه اکسترودر تک‌پیچ قرار داده و با تنظیم سرعت و دمای مناسب، فیلامنت تولید می‌شود. برای تولید قطعات با روش ساخت افزایشی، ابتدا هندسه استاندارد مربوطه در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و سپس فایل با فرمت STL استخراج می‌شود. اینفایل در مرحله بعد به نرم‌افزار کیورا وارد می‌شود. در ادامه، پارامترهای چاپ تنظیم می‌شوند. باید توجه داشت که تنظیم دقیق این پارامترها یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های فرایند ساخت افزودنی محسوب می‌شود. جهت ساخت برای همه نمونه‌ها تخت است و ضخامت لایه برای ۰/۱ میلی‌متر است، چگالی پر کردن در مواد ۱۰۰ درصد با الگوی پر کردن مستطیلی و سرعت چاپ ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه است. مقادیر مذکور بر اساس سعی و خطا و توانمندی‌های چاپگر مورد استفاده در تطابق با فیلامنت مورد استفاده استخراج شده است. برای چاپ قطعات در حالت ایستاده و تخت از استاندارد ASTM-D638 در حالت IV استفاده شده است. در انتها با استفاده از آزمون کشش و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه، نمونه‌ها آماده شده و برای هر حالت چهار نمونه آماده شده و میانگین آن‌ها قرار داده شده است. در جدول ۱ مقادیر استحکام فیلامنت نانو کامپوزیتی و قطعه چاپ‌شده در جهت‌های چاپ مختلف نمایش داده شده است. در شکل ۱ قطعات چاپ شده، فیلامنت ABS خالص و نانوکامپوزیتی CNT/ABS قابل مشاهده است.

جدول ۱ استحکام فیلامنت نانو کامپوزیتی و قطعه چاپ شده در جهت چاپ مختلف

ماده	استحکام فیلامنت (مگاپاسکال)	جهت چاپ (درجه)	استحکام کششی قطعه در جهت ساخت (مگاپاسکال)	استحکام کششی قطعه در جهت ساخت ایستاده و جهت چاپ ۹۰ درجه (مگاپاسکال)	استحکام برشی در صفحه (مگاپاسکال)
CNT/ABS (wt=0.1%)	۳۵/۷	۰	۳۵/۷۴		۱۴/۴۴
		۹۰	۲۴/۹۱		
		[۰/۹۰]	۳۰/۱۴	۱۳/۹۷	
		[۳۵/-۳۵/۰]	۳۱/۰۴		
		[۴۵/-۴۵/۰]	۳۰/۷۷		



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱ نمونه‌های تولید شده (الف) فیلامنت ABS، (ب) فیلامنت CNT/ABS و (ج) نمونه‌های دمبلی تولید شده با چاپگر

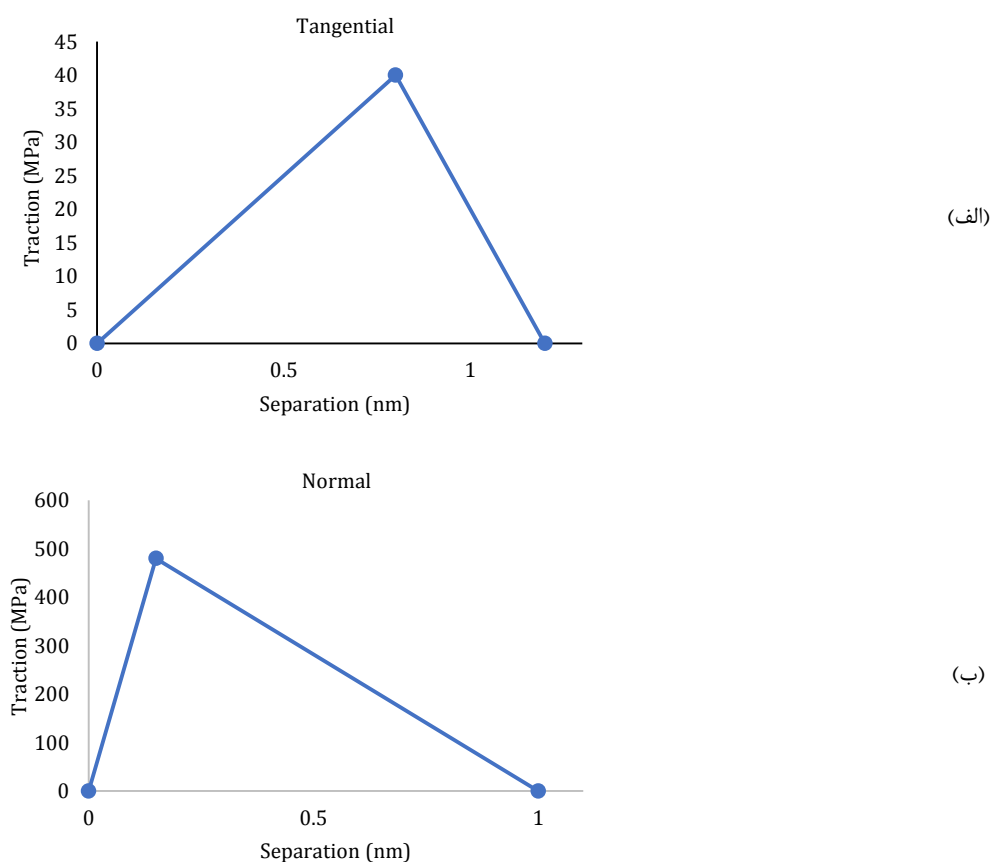
لازم به ذکر است که برای محاسبه چسبندگی نرمال بین لایه‌ها و مسیرهای چاپ قطعات در جهت چاپ ۹۰ درجه و با جهت ساخت ایستاده و تخت تولید شدند. در انتها برای محاسبه چسبندگی برشی بین لایه‌ها و مسیرهای چاپ از آزمون برشی مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D1002 استفاده شده است. در هنگام آزمون مشاهده گردید که لایه‌ها روی هم سر نخورده‌اند و نشان‌دهنده این است که قطعه چاپ‌شده با چاپگر سه‌بعدی دارای چسبندگی برشی کامل است.

۳- مدل‌سازی چند مقیاسی

با توجه به اینکه نانولوله کربنی در مقیاس نانو است و استحکام نهایی در بالاترین مقیاس مادی، یعنی مقیاس ماکرو اندازه‌گیری می‌شوند، توسعه یک مدل چند مقیاسی مدنظر قرار می‌گیرد. مدل در برگیرنده سه مقیاس میکرو، مسو و ماکرو است. در مقیاس میکرو، برهمکنش بین نانولوله و رزین مورد نظر قرار گرفته است و استحکام فاز میانی (فاز واسط بین رزین و نانولوله) مشخص می‌شود. سپس در مقیاس مسو المان حجمی معرف، حاوی چند نانولوله مدل‌سازی شده و استحکام آن پیش‌بینی می‌گردد. در این مقیاس تأثیر تجمع خوشه‌ای نانولوله کربن در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی مقیاس ماکرو در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، مقادیر خروجی از مقیاس‌های میکرو و مسو تحت عنوان ورودی در نظر گرفته شده و استحکام نهایی فیلامنت نانوکامپوزیتی تخمین زده می‌شود. در نهایت، در مرحله دوم مدل‌سازی مقیاس ماکرو، داشتن مقدار تخلخل و چسبندگی بین لایه‌ها و همچنین استحکام فیلامنت نانوکامپوزیتی، استحکام قطعه نانوکامپوزیتی تولید شده به روش ساخت افزایشی پیش‌بینی می‌گردد.

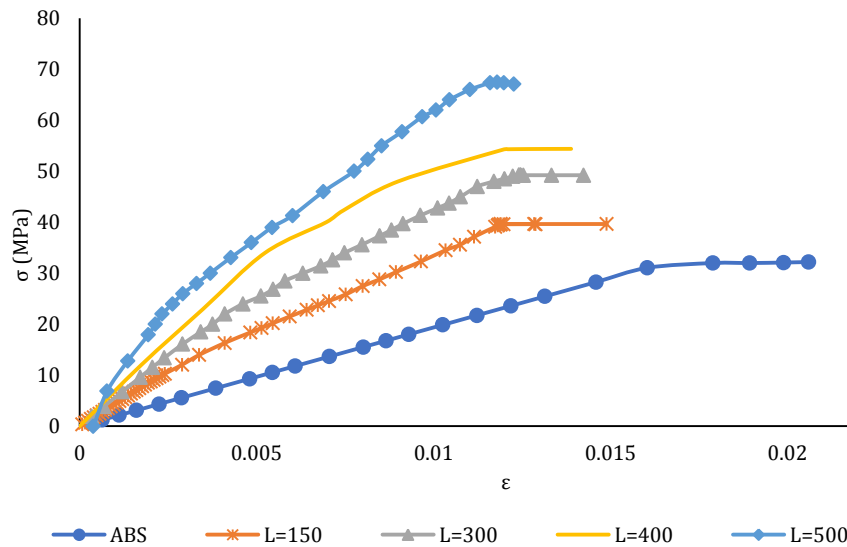
۳-۱- مقیاس میکرو

در این تحقیق نیز برای مدل‌سازی برهم‌کنش بین نانولوله و رزین از مدل‌سازی ناحیه چسبنده استفاده شده است. المان حجمی معرف مقیاس میکرو در برگیرنده نانولوله، رزین و صفحه واسط بین نانولوله و رزین است. برای مدل‌سازی المان حجمی معرف در مقیاس میکرو، از نرم‌افزار المان محدود انسیس استفاده شده است. برای این منظور، نانولوله به‌صورت یک ماده پیوسته و با مدول الاستیک یک تراپاسکال و ضریب پواسون $0/3$ در نظر گرفته می‌شود. رزین احاطه‌کننده نانولوله نیز به‌صورت یک ماده پیوسته و با مدول کششی $1/967$ گیگاپاسکال و ضریب پواسون $0/38$ مدل می‌شود. برهم‌کنش بین نانولوله و رزین نیز با استفاده از ناحیه چسبنده با ضخامت صفر و به‌صورت صفحه واسط بین نانولوله و رزین مدل شده است. رفتار ساختاری ناحیه چسبنده صفحه واسط، با قانون دوخطی نمایش داده‌شده در شکل ۲ مدل گردیده است.

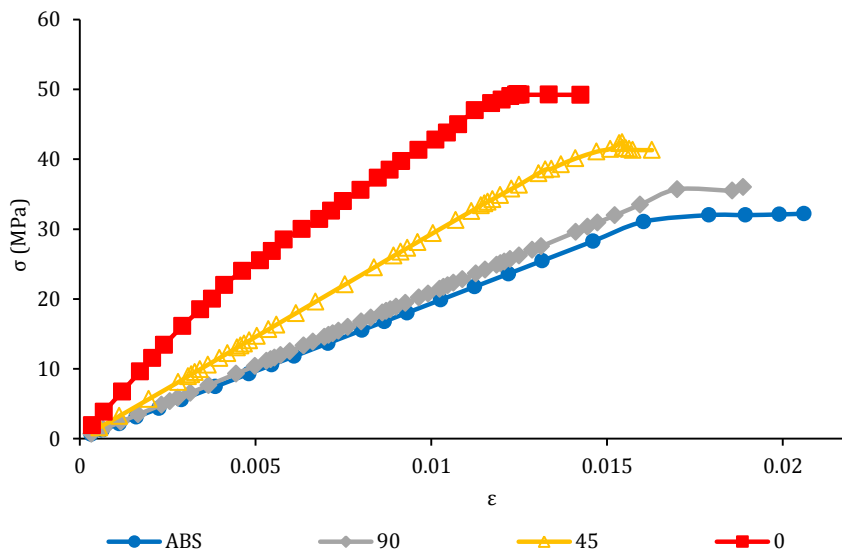


شکل ۲ نمودار کشش - جدایش در راستای الف) عمودی و ب) مماسی

لذا مدل المان محدود المان حجمی معرف در مقیاس میکرو مشتمل بر نانولوله، رزین اطراف و صفحه واسط بین نانولوله و رزین ساخته شده است. در ادامه در این مقیاس تأثیر طول و جهت‌گیری نانولوله بررسی شده است. مشاهده می‌شود که مطابق با شکل ۳ با افزایش طول نانولوله، استحکام آن افزایش یافته و همچنین مطابق با شکل ۳ با تغییر جهت‌گیری نانولوله از صفر به ۹۰ درجه استحکام آن کاهش پیدا می‌کند.



(الف)

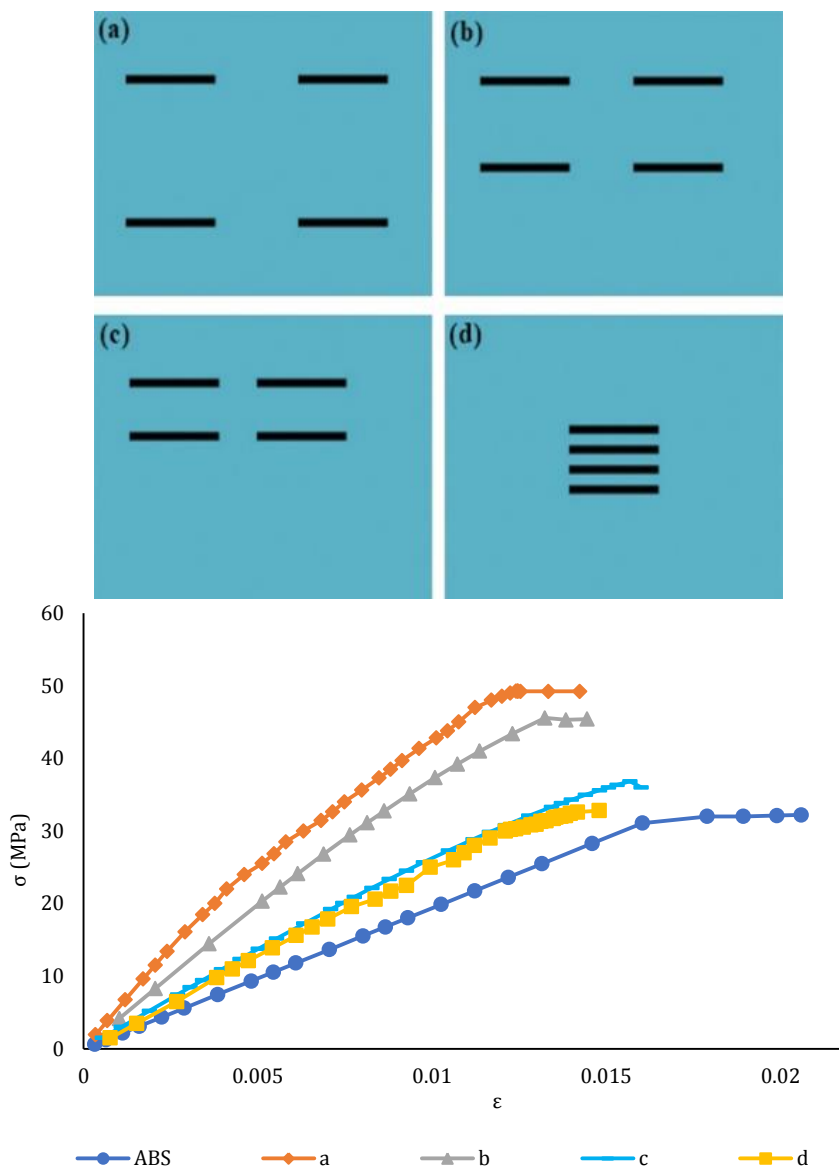


(ب)

شکل ۳ تأثیر (الف) طول و (ب) جهت‌گیری نانولوله بر استحکام المان حجمی معرف مقیاس میکرو

۳-۲- مقیاس مسو

در مقیاس میکرو تأثیرات طول و جهت‌گیری نانولوله در رزین بررسی و در مورد تأثیر آن بر روی استحکام نهایی بحث شد. حال در این مقیاس، تأثیر توزیع نانولوله در رزین بر روی استحکام نهایی بررسی شود. برای این منظور، چهار حالت توزیع مطابق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است که معرف حالت‌های توزیع کاملاً پراکنده (a)، توزیع تقریباً پراکنده (b)، توزیع نسبتاً متراکم (c) و توزیع کاملاً متراکم (d) تغییر می‌کند. تأثیر توزیع نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی و مشاهده شد، که مطابق با شکل ۴ هر چقدر که توزیع نانولوله متراکم‌تر باشد استحکام آن کمتر می‌شود.

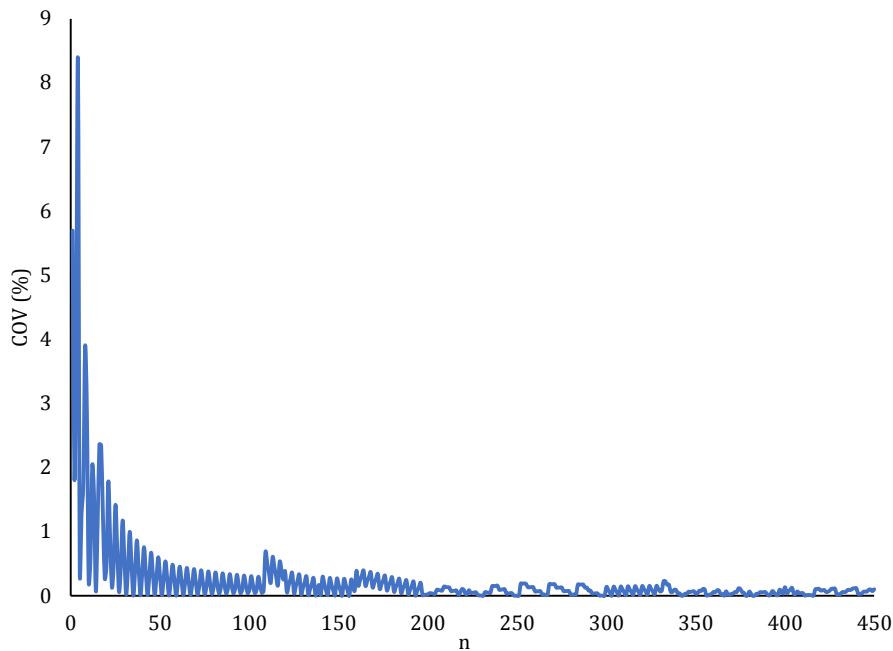


شکل ۴ تأثیر توزیع نانولوله بر استحکام نهایی نانوکامپوزیت

۳-۳-۳- مقیاس ماکرو

۳-۳-۱- استحکام فیلامنت نانوکامپوزیتی

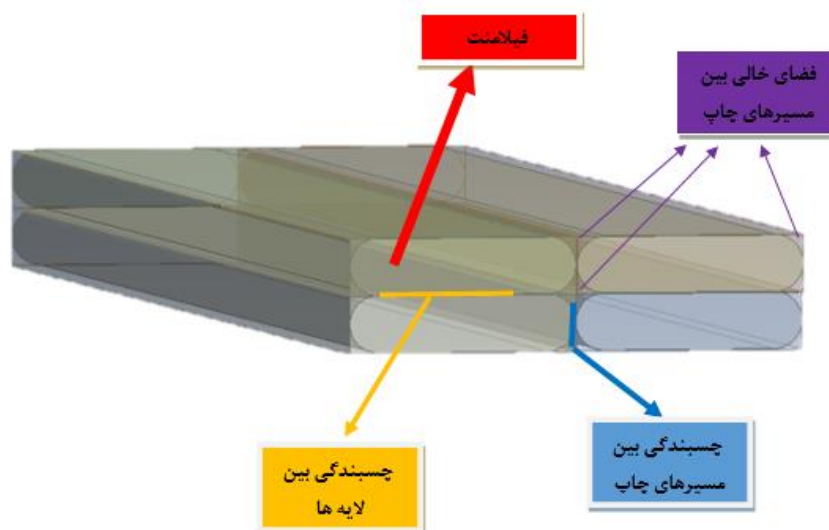
از آنجایی که طول، جهت‌گیری و توزیع نانولوله پارامترهای تصادفی می‌باشند، در این مقیاس تأثیر هم‌زمان این پدیده‌ها به صورت تعاملی و همچنین به صورت تصادفی مدنظر قرار می‌گیرد. برای پیش‌بینی استحکام فیلامنت نانوکامپوزیتی در این مقیاس نیازمند به مدل‌سازی تصادفی است. در این تحقیق مقادیر استحکام نهایی در سه حالتی که جهت‌گیری و توزیع نانولوله در رزین ثابت باشد در چند طول مختلف نانولوله، در حالتی که جهت‌گیری و توزیع نانولوله در رزین ثابت است در چند حالت جهت‌گیری مختلف و در نهایت در حالتی که طول و جهت‌گیری نانولوله در رزین ثابت و توزیع نانولوله در رزین متفاوت است در نرم‌افزار انسیس محاسبه و تحت عنوان مقادیر شبیه‌سازی اصلی به مدل داده شد. این مقادیر به عنوان ورودی به الگوریتم ژنتیک داده شده و در ادامه مدل در هر مرحله با تولید داده‌های تصادفی برای طول، تراکم و جهت‌گیری نانولوله در رزین، استحکام نهایی را تخمین می‌زند. این فرایند تا زمانی که استحکام نهایی میانگین همگرا نشود ادامه پیدا می‌کند. برای بررسی همگرایی، ضریب تغییرات استحکام فیلامنت نانوکامپوزیت بر حسب تعداد نمونه تصادفی رصد می‌گردد و هرگاه روند مذکور به صورت یکنواخت مشاهده گردد، همگرایی حاصل شده است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تقریباً بعد از تولید ۴۰۰ داده استحکام نهایی میانگین همگرا شده است.



شکل ۵ همگرایی مدل‌سازی تصادفی

۳-۳-۲- استحکام قطعه نانوکامپوزیتی چاپ شده

المان حجمی معرف در این مرحله به صورت شکل ۶ شامل چهار فیلامنت مجاور است تا فضای خالی بین مسیرهای چاپ و همچنین چسبندگی نرمال و برشی بین مسیرهای چاپ و لایه‌ها در نظر گرفته شود. برای فضای خالی، خواص مکانیکی مقدار خیلی کم و نزدیک به صفر قرار داده شده است. خواص ناحیه چسبیده در راستای عمودی بر اساس اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر روی قطعه چاپ شده ایستاده با زاویه چاپ ۹۰ درجه به دست آمده است. خواص برشی ناحیه چسبیده بین لایه‌ها و مسیرهای چاپ یکسان در نظر گرفته شده است و بر اساس آزمون برشی تک لبه به دست آمده است. بنابراین، مدل المان محدود المان حجمی معرف مقیاس ماکرو در نرم‌افزار المان محدود در تطابق با شکل ۶ ساخته می‌شود. با تحلیل مدل المان محدود ساخته شده تحت بارگذاری‌های طولی، عرضی و برشی، استحکام المان حجمی معرف مقیاس ماکرو در راستای طولی، عرضی و برشی به دست آمده، به عنوان ورودی برای مرحله بعدی استفاده خواهد شد.



شکل ۶ المان حجمی معرف قطعه چاپ شده در مقیاس ماکرو

در نهایت، با استفاده از روابط تئوری کلاسیک لایه‌ها و با استفاده از معیار تخریب رفیعی-عموحاجی [۱۱]، استحکام قطعه نانوکامپوزیت چاپ شده، در راستاهای مختلف پیش‌بینی می‌شود:

$$\sigma_1 = \left(\frac{\cos^4 \theta}{S_X^2} - \frac{\cos^3 \theta \cdot \sin \theta}{4S_X^2} + \frac{\cos \theta \cdot \sin^3 \theta}{4S_X^2} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{S_S^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \theta \leq \theta_{ta} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{\sin^4 \theta}{S_Y^2} - \frac{\sin^3 \theta \cdot \cos \theta}{S_Y^2} + \frac{\sin \theta \cdot \cos^3 \theta}{S_X^2} + \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{S_S^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \theta > \theta_{ta} \quad (2)$$

در روابط فوق، S_S و S_Y ، S_X به ترتیب استحکام در راستای طولی، عرضی و برشی المان حجمی معرف مقیاس ماکرو هستند که با مدل‌سازی المان محدود شکل ۶، حاصل شده است. و θ زاویه بین محور ۱ و محور X در دو مختصات اصلی و فرعی است. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای پیش‌بینی استحکام در راستاهای مختلف، θ_{ta} برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین در ادامه با به دست آوردن کرنش در راستای فرعی و در نهایت با فرض اینکه کرنش معادل، میانگین کرنش همه لایه‌ها است، مقدار استحکام نهایی پیش‌بینی شده است.

۴- نتایج و بحث

ابتدا نتایج به دست آمده حاصل پیش‌بینی تجربی و تئوری، فیلامنت نانوکامپوزیتی صحت‌سنجی می‌شود. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که نتایج تجربی هم با مقدار میانگین حاصل از مدل‌سازی تصادفی و هم با مقدار غالب همخوانی بالایی دارد.

جدول ۲ مقایسه نتایج نظری و تجربی به دست آمده برای استحکام نهایی

استحکام پیش‌بینی شده (مگاپاسکال)		استحکام اندازه‌گیری شده (مگاپاسکال)	کسر وزنی نانولوله کربنی (درصد)
مقدار غالب (درصد خطا)	میانگین (درصد خطا)		
۳۶/۸۴ (۳/۱۹)	۳۶/۷۰ (۲/۸)	۳۵/۷۰	۰/۱

پس از تخمین استحکام فیلامنت نانوکامپوزیت استفاده شده برای چاپ قطعات نانوکامپوزیتی و پیش از پیش‌بینی استحکام قطعات چاپ شده نانوکامپوزیتی، لازم است تا مقادیر به دست آمده برای استحکام طولی، عرضی و برشی المان حجمی مقیاس ماکرو که در روابط ۱ و ۲ استفاده شده‌اند، صحت‌سنجی شوند. مقادیر حاصل از تحلیل المان محدود در مقایسه با آزمون تجربی در جدول ۳ ارائه شده است که نشان دهنده تطابق بسیار مناسبی بین آن‌ها است.

جدول ۳ استحکام قطعه چاپ شده در راستای طولی، عرضی و برشی

آزمون تجربی [MPa]			اجزا محدود [MPa] (درصد خطا)		
S_X	S_Y	S_S	S_X	S_Y	S_S
۳۵/۷۴	۲۴/۹۱	۱۴/۴۴	- (۳/۵۲) ۳۴/۴۸	+ (۱/۶۸) ۲۵/۳۳	- (۴/۳۶) ۱۳/۸۱

در نهایت، استحکام پیش‌بینی شده برای قطعات نانوکامپوزیتی چاپ شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مدل توسعه‌یافته نه تنها دقت بسیار مناسبی دارد، بلکه محافظه‌کارانه نیز هست که به قطعه ساخته شده اجازه می‌دهد بدون اعمال ضریب ایمنی بالا در یک منطقه امن قرار گیرد.

جدول ۴ استحکام قطعه چاپ شده در راستاهای مختلف

مقدار پیش‌بینی شده [مگاپاسکال] (درصد خطا)	آزمون تجربی [مگاپاسکال]	جهت چاپ [°]
۲۸/۵۰ (۵/۴۴)	۳۰/۱۴	[۰/۹۰]
۲۷/۷۸ (۱۰/۵۰)	۳۱/۰۴	[۳۵/-۳۵/۰]
۲۷/۶۱ (۸/۴)	۳۰/۷۷	[۴۵/-۴۵/۰]

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا، یک مدل چند مقیاسی برای پیش‌بینی استحکام قطعه نانوکامپوزیت تولید شده با چاپگر سه‌بعدی، توسعه یافت که در برگیرنده سه مقیاس میکرو، مسو و ماکرو است. در مقیاس میکرو تأثیر طول و جهت‌گیری نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی شد. در مقیاس مسو تأثیر توزیع نانولوله در رزین بر استحکام نهایی بررسی شد. در نهایت در مقیاس ماکرو با توجه به اینکه پارامترهای متغیر در مقیاس قبلی تصادفی بودند یک مدل‌سازی تصادفی با کمک الگوریتم ژنتیک انجام شد. در ادامه با داشتن مقدار تخلخل و خواص چسبندگی بین لایه‌ها و مسیرهای چاپ، استحکام طولی، عرضی و برشی با استفاده از تحلیل المان محدود پیش‌بینی گردید. در نهایت با استفاده از معیار تخریب درجه دوم، استحکام نهایی کششی در راستاهای مختلف پیش‌بینی شده است. در انتها با فرض اینکه کرنش معادل، میانگینی از کرنش فرعی همه لایه‌ها است، استحکام نهایی در راستاهای مختلف پیش‌بینی شده است. در ادامه قطعات با همان لایه چینی تولید شده و استحکام آن‌ها اندازه‌گیری شده و مشاهده شد که مدل توسعه داده شده با درصد خطای بین ۵ تا ۱۰ درصد با توجه به نتایج تجربی، می‌تواند استحکام قطعات چاپ شده با چاپگر سه‌بعدی در جهات چاپ مختلف را پیش‌بینی کند.

References

- [1] Parupelli S, Desai S. A comprehensive review of additive manufacturing (3D printing): Processes, applications and future potential. *American journal of applied sciences*. 2019 Sep;16(8). doi: 10.3844/ajassp.2019.244.272
- [2] Penumakala PK, Santo J, Thomas A. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Nov 15;201:108336. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108336
- [3] Khan T, Ali M, Riaz Z, Butt H, Al-Rub RK, Dong Y, Umer R. Recent developments in improving the fracture toughness of 3D-printed fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2024 Aug 15;283:111622. doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111622
- [4] Andrews R, Weisenberger MC. Carbon nanotube polymer composites. *Current opinion in solid state and Materials Science*. 2004 Jan 1;8(1):31-7. doi: 10.1016/j.cossms.2003.10.006
- [5] Chen W, Weimin H, Li D, Chen S, Dai Z. A critical review on the development and performance of polymer/graphene nanocomposites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2018 Nov 27;25(6):1059-73. doi: 10.1515/secm-2017-0199
- [6] Gutierrez BJ, Dul S, Pegoretti A, Alvarez-Quintana J, Fambri L. Investigation of the effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes concentration on the properties of ABS nanocomposites. *C*. 2021 Mar 27;7(2):33. doi: 10.3390/c7020033
- [7] Feratoğlu K, Istif I, Gümüş ÖY, Türkes 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*. 2024 Nov;49(11):14927-48. doi: 10.1007/s13369-024-08855-4
- [8] Rafiee R, Zehtabzadeh H, Amini MR. Predicting mechanical properties of 3D printed nanocomposites using multi-scale modeling. *Additive Manufacturing*. 2024 Mar 5;83:104055. doi: 10.1016/j.addma.2024.104055
- [9] Saraeian P, Shakouri E. Study on the effect of thickness of layers, temperature and speed of nozzle on circularity error and surface roughness of holes in parts produced during fused deposition modeling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Sep 22;7(7):38-50. [In Persian]
- [10] Mousavi Kani SM, Sadegh Yazdi M, Hosseinzadeh MH. Influence of infill density and printing pattern on flexural properties of 3D printed short carbon fiber PLA composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Nov 21;7(9):42-51. [In Persian]
- [11] Rafiee R, Amohaji H, Khezma H. Estimating Strength of 3D-Printed Polymers Based on the Appraisal of Available Methods. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025 Feb 24:1-1. doi: 10.1007/s11665-025-10880-9