



بررسی خواص مکانیکی و حرارتی نمونه‌های تقویت‌شده با سیم فلزی پیوسته در فرآیند لایه نشانی مذاب به منظور عامل تحریک حافظ شکلی

معصومه قائمی سرچشمه^۱، امیر حسین بهروش^{۲*}، سید کاوه هدایتی^۱

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amirhb@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۶ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۵ اسفند ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی
لایه نشانی مذاب
سیم پیوسته فلزی
خواص مکانیکی
کامپوزیت

چکیده

در این پژوهش ساخت نمونه‌های تقویت‌شده با سیم فلزی به‌عنوان جزء پیوسته تقویت‌کننده و همچنین محرک حافظ شکلی، در فرآیند ساخت افزایشی لایه نشانی مذاب (FDM) چاپ شد. مواد حافظ شکلی زیرمجموعه‌ی مهمی از مواد هوشمند هستند که شکل اصلی خود را به خاطر سپرده و پس از اعمال تغییر شکل در پاسخ به یک محرک خاص مانند گرما، مغناطیس، الکتریسیته، رطوبت و غیره، شکل اصلی خود را بازیابی می‌کنند. محرک‌های مواد حافظ شکلی به دودسته کلی مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی می‌شوند. تحریک مستقیم این مواد جهت بازیابی شکلی در برخی موارد ممکن نبوده و معرفی راهکارهایی جهت افزودن قابلیت تحریک غیرمستقیم به این مواد می‌تواند دامنه کاربرد این مواد را افزایش دهد. در این پژوهش سیم فلزی کروم-نیکل به‌عنوان عامل تقویت‌کننده جهت بهبود خواص مکانیکی و همچنین افزودن قابلیت تحریک غیرمستقیم مواد با اعمال اختلاف پتانسیل با استفاده از روش آغشته‌سازی هم‌زمان در فرآیند FDM استفاده شده است. افزودن الیاف پیوسته به روش آغشته‌سازی هم‌زمان در حین چاپ قطعات، افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی نمونه‌های پلیمری را به همراه دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده برای سیم فلزی با قطر ۰/۱۵ میلی‌متری مقدار افزایش استحکام کششی برای نمونه‌های ۵ و ۱۰ درصدی به ترتیب برابر با ۶۳ و ۱۳۴ درصد بوده است. مقدار افزایش استحکام خمشی برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۵ و ۱۰ درصد سیم فلزی به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۰۵ درصد بوده است.

Investigation of mechanical and thermal properties of continuous metal wire reinforced samples in fused deposition modeling for shape memory stimulus

Masoumeh Ghaemi Sarcheshmeh¹, Amir Hossein Behravesheh^{2*}, Seyyed Kaveh Hedayati¹

1- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: amirhb@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 6 January 2024

Accepted: 15 March 2024

Keywords:

Additive Manufacturing
Fused Deposition Modeling
Continuous Metal Wire
Mechanical Properties
Composites

Abstract

In this study, samples reinforced with continuous metal wire as both a reinforcing component and a shape memory actuator were printed via the Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing method. Shape memory materials are a significant subset of smart materials that can recover their original shape in response to a specific stimulus such as heat, magnetism, electricity, moisture, etc. The stimuli for shape memory materials are generally classified into two main categories: direct and indirect. In some cases, direct stimulation may not be possible for shape recovery, and introducing solutions for adding indirect stimulation capability to these materials can expand their application range. In this study, the chromium-nickel metal wire was used as a reinforcing agent to improve the mechanical properties and introduce indirect stimulation capability to the materials by applying voltage simultaneously using the in-situ impregnation method in the FDM process. Adding continuous fibers through the in-situ impregnation method during the printing of parts significantly enhances the mechanical properties of polymeric samples. According to the obtained results for a 0.15 mm diameter metal wire, the increase in tensile strength for 5% and 10% reinforced samples was 63% and 134%, respectively. The increase in flexural strength for samples reinforced with 5% and 10% metal wire was 10% and 105%, respectively.

Please cite this article using:

Ghaemi Sarcheshmeh M, Behravesheh A H, Hedayati S K. Investigation of mechanical and thermal properties of continuous metal wire reinforced samples in fused deposition modeling for shape memory stimulus. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 November 22;10(9):51-58. doi: 10.22034/IJME.2024.434021.1898 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

مواد حافظه شکلی زیرمجموعه‌ی مهمی از مواد هوشمند هستند. این مواد، مواد خاصی هستند که پس از تغییر شکل، شکل اصلی خود را به خاطر می‌سپارند و در پاسخ به یک محرک خاص مانند گرما، مغناطیس، الکتروسیسته، رطوبت و غیره به دلیل اثر حافظه شکلی، شکل اصلی را بازمی‌یابند [۱]. پلیمرهای حافظه شکلی زیرمجموعه‌ای از مواد هوشمند هستند که شکل موقت خود را تحت نیروهای خارجی حفظ کرده و هنگام تحریک تغییر شکل داده و از شکل موقت به شکل اولیه خود بازمی‌گردند تا یک چرخه حافظه شکلی را تکمیل کنند. پلیمرهای حافظه شکلی دارای ویژگی‌های وزن سبک‌تر، عملکرد بازیابی قوی‌تر، شرایط بازیابی ملایم‌تر، زیست‌تخریب‌پذیری، ماهیت سمی کم و حتی بدون سمی بودن نسبت به آلیاژهای حافظه شکلی هستند [۲]. در حال حاضر SMPs ها در زمینه‌های مختلف مانند هوافضا ساخت افزودنی، پوشاک، علم زیست پزشکی استفاده می‌شوند [۲].

فن‌آوری‌های ساخت افزایشی در طی بیست سال گذشته گسترش یافته‌اند. در سال‌های اخیر تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای بر روی فرایندهای ساخت افزایشی صورت گرفته که موضوع اصلی این پژوهش‌ها کنترل فرآیند و بهبود خواص مواد مربوطه بوده است [۳]. از میان فرایندهای ساخت افزایشی، فرآیند لایه نشانی مذاب که به اختصار FDM نامیده می‌شود، به دلیل ارزان بودن و سادگی مورد توجه صنایع و همچنین عموم قرار گرفته است [۴، ۵]. با توجه به ماهیت فرایندهای ساخت افزایشی و تشکیل قطعات به صورت لایه-لایه و همچنین مواد مورد استفاده در فرآیند FDM استحکام نهایی این قطعات نسبت به ماده خام و تهیه شده از روش‌های ساخت مرسوم نظیر تزریق پلاستیک پایین‌تر است. محققین مختلف موارد متعددی از قبیل بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند، افزودن مواد مختلف و استفاده از الیاف کوتاه را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطابق نتایج ارائه شده هیچ‌یک از این روش‌ها علی‌رغم بهبود خواص مکانیکی، قابلیت افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی را نداشته‌اند. در مقابل استفاده از الیاف پیوسته در سال‌های اخیر به‌عنوان روش قابل اطمینان مورد استفاده قرار گرفته شده است [۶].

در زمینه بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته آخوندی و همکاران [۷] با تغییرات ایجادشده در سیستم تغذیه و آغشته‌سازی هم‌زمان الیاف شیشه همراه با پلیمر PLA موفق به چاپ قطعات با درصد‌های مختلف الیاف و با هندسه پیچیده شدند. الگوهای چینش و پرشدگی مختلف الیاف مورد بررسی قرار گرفته و بیشترین مقدار درصد الیاف قابل جایگذاری در ماتریس پلیمری را به صورت تئوری محاسبه کردند. قطعات کامپوزیتی با حداکثر درصد الیاف ۴۹/۳ چاپ شده و درصد الیاف بالاتر به دلیل کاهش حجم پلیمر زمینه و اتصال ضعیف بین رشته‌ها قابلیت تولید نداشتند. افزودن ۴۹/۳ درصد الیاف به زمینه پلیمری استحکام و مدول کششی را با ترتیب به میزان ۴۸۰ مگاپاسکال و ۲۹/۴ گیگاپاسکال افزایش داد.

مالنکا و همکارانش [۸] خواص کششی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کولار و پلیمر زمینه نایلون را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج به دست آمده مدول کششی نمونه‌های تقویت‌شده به ترتیب برابر با ۱/۶۷، ۶/۹۲ و ۹ گیگاپاسکال به دست آمده و همچنین اختلاف ۷۵/۵، ۲/۶ و ۰/۱ درصدی با مقادیر تئوری ثبت گردید.

بلاک و همکارانش [۹] به مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته و الیاف کوتاه پرداختند. دستگاه مارکوان جهت چاپ نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده شده و فیلامنت تقویت شده با الیاف کوتاه به متوسط طول کمتر از ۱۰۰ میکرون استفاده شده است. استحکام نمونه تقویت شده با الیاف پیوسته و کوتاه به ترتیب برابر با ۹۶۸ و ۳۳/۵ مگاپاسکال بوده و مقدار مدول کششی برای این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۶۲/۵ و ۱/۸۵ گیگاپاسکال به دست آمد. این نتایج قابلیت استحکام بخشی الیاف پیوسته نسبت به الیاف کوتاه را نشان می‌دهد.

هدایتی و همکارانش [۱۰] در ادامه پژوهش پیشین خود به بررسی اثر درصد الیاف و افزودن نانو ذرات nHA به زمینه پلیمری PCL پرداختند. الیاف PGA، USP4-0 انتخاب شده و نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت (nHA) نیز با دو مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد جهت بهبود خواص مکانیکی و سطحی PCL مورد استفاده قرار دادند. استحکام کششی نمونه تقویت‌شده با درصد حجمی ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصدی الیاف USP4-0 نیز به ترتیب به میزان ۲۷۵، ۵۷۹ و ۸۵۲ درصد افزایش داشته و این مقادیر برای مدول کششی نیز برابر با ۴۲۹، ۹۴۶ و ۱۱۳۸ درصد است.

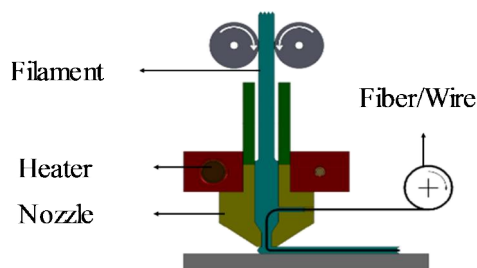
در رابطه با ساخت کامپوزیت‌های پلیمری به منظور بهبود خواص مواد حافظه شکلی و یا تغییر محرک‌ها، چو و همکارانش [۱۱] اثر افزودن نانوتیوب‌های کربنی چند جداره به پلیمر حافظه شکلی پلی اورتان بر خواص مکانیکی و حافظه شکلی را بررسی کردند. در این

پژوهش نانوتیوب‌ها به قطر ۱۰ تا ۲۰ نانومتر و طول ۲۰ میکرومتر با انجام اصلاحات شیمیایی سطحی به‌خوبی و به‌طور یکنواخت در پلیمر پراکنده شدند. رسانایی نمونه‌ی شامل ۵ درصد وزنی نانوتیوب کربنی اندازه‌گیری شده و تحت سه ولتاژ ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ولت تغییرات دمایی آن بررسی شد. ولتاژ ۶۰ موجب افزایش دما تا ۳۵ درجه (دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر) در ۸ ثانیه می‌شود. جهت بررسی خواص حافظه‌شکلی و بازیابی، نمونه‌ای حاوی ۵ درصد نانوتیوب کربنی را از شکل اصلی خود (مارپیچ) به حالت صاف تغییر شکل داده و تحت ولتاژ ۴۰ ولت در ۱۰ ثانیه شکل اصلی بازیابی شده است. بهبود خواص مواد از جمله خواص مکانیکی و حافظه‌شکلی از جمله درصد بازیابی شکلی جهت بهبود عملکرد آن‌ها در کاربردهای مختلف از اهمیت بالایی برخوردار بوده و روش‌های متعددی از جمله ترکیب مواد مختلف به‌صورت کامپوزیتی و مخلوط، افزودن ذرات پرکننده، تغییر فرآیندهای ساخت و متغیرهای هرکدام در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است. در این میان روش ساخت افزایشی به دلیل سرعت بالاتر، کنترل‌پذیرتر بودن فرآیند و منعطف بودن آن مورد توجه قرار گرفته است. در فرآیند لایه نشانی مذاب که جز پر کاربردترین روش‌های ساخت افزایشی است، به دلیل ماهیت قطعات روش‌های متنوعی جهت بهبود خواص آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. الیاف پیوسته در قطعات چاپ‌شده با این فرآیند به‌عنوان کارآمدترین روش جهت افزایش استحکام قطعات تولیدی معرفی شده است. بررسی الیاف پیوسته در فرآیند لایه نشانی مذاب فقط محدود به بخش استحکام مکانیکی بوده است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده مواد حافظه‌شکلی، محدودیت محرک است. زیرا طیف عظیمی از این مواد نیاز به محرک حرارت دارند و این حرارت عمدتاً از طریق جریان سیال تأمین شده است. محرک‌های مواد حافظه‌شکلی به دو دسته کلی مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی می‌شوند. تحریک مستقیم این مواد جهت بازیابی شکلی در برخی موارد ممکن نبوده و معرفی راهکارهایی جهت افزودن قابلیت تحریک غیرمستقیم به این مواد می‌تواند دامنه کاربرد این مواد را افزایش دهد. در این پژوهش با استفاده از تکنولوژی ساخت افزایشی به روش لایه نشانی مذاب الیاف پیوسته فلزی در پلیمر حافظه‌شکلی حین تولید به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و همچنین تغییر محرک‌ها با استفاده از رسانایی الکتریکی الیاف و حساسیت کامپوزیت به محرک الکتریکی جایگذاری شده است.

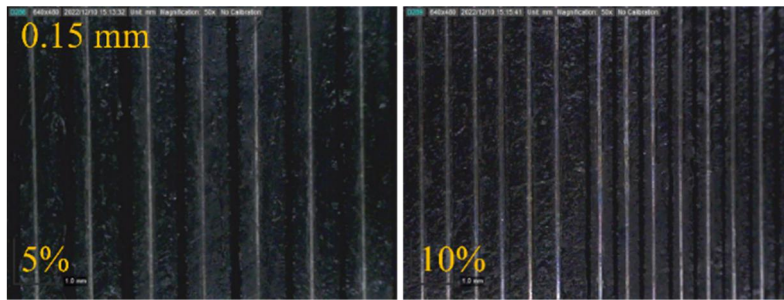
۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

در این پژوهش از فیلامنت PLA برند ZF ساخت کشور چین استفاده شده است. الیاف فلزی کروم-نیکل با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر ساخت کشور چین نیز به‌عنوان فاز تقویت‌کننده و تحریک‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. برای چاپ نمونه‌ها از دستگاه چاپ سه‌بعدی Quantum ۲۰۲۰ با ابعاد کاری ۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰ و جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی از دستگاه Santam STM-۲۰ ساخت ایران استفاده شده است. روش آغشته سازی هم‌زمان جهت چاپ قطعات کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته به‌نحوی که در این روش الیاف به‌صورت مجزا از ورودی خود وارد حوضچه مذاب شده و آغشته سازی در آن صورت گرفته و از خروجی نازل بر روی سطح میز و یا لایه پیشین مطابق مسیر از پیش طراحی شده روزن‌رانی می‌شود (شکل ۱).



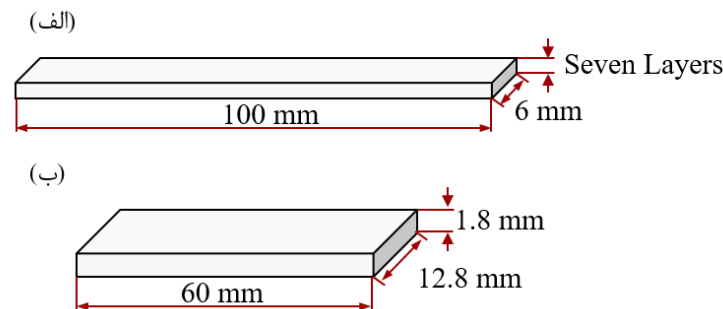
شکل ۱ شماتیک سیستم آغشته سازی هم‌زمان الیاف در فرآیند لایه نشانی مذاب [۷]

به‌منظور بررسی اثر افزودن سیم فلزی بر روی خواص مکانیکی (کشش و خمش)، نمونه‌های تقویت شده با درصد حجمی ۵ و ۱۰ درصد الیاف فلزی چاپ شده است. نتایج ارائه شده در این گزارش به‌صورت میانگین حداقل ۳ نمونه برای کلیه نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده گزارش شده است (شکل ۲).



شکل ۲ نمونه قطعه چاپ‌شده PLA تقویت‌شده با سیم فلزی

نمونه‌های آزمون کشش به مشخصات عرض ۶ و طول ۱۰۰ میلی‌متر و هفت لایه به ضخامت هر لایه ۰/۳ میلی‌متر طراحی و چاپ شدند. نمونه‌های آزمون خمش نیز به ابعاد $60 \times 12.8 \times 1.8$ میلی‌متر مربع چاپ شدند. در شکل ۳ مشخصات و ابعاد نمونه‌های آزمون کشش و خمش نشان داده شده است. جدول ۱ متغیرهای چاپ قطعات در فرآیند لایه نشانی مذاب را نشان می‌دهد. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف به دلیل حضور سیم فلزی و جهت اطمینان از جانمایی صحیح الیاف در موقعیت نهایی خود، سرعت چاپ نمونه‌ها کم‌تر از نمونه‌های تقویت نشده در نظر گرفته شده است. سایر مقادیر و متغیرهای چاپ بر اساس مقادیر تجربی و متناسب با پلیمر انتخابی تنظیم شده است. نرخ جابجایی فک متحرک نیز برای آزمون‌های کشش و خمش به ترتیب برابر با ۲ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.



شکل ۳ ابعاد نمونه‌های آزمون الف) کشش و ب) خمش

جدول ۱ متغیرهای چاپ برای تولید نمونه‌های آزمون کشش

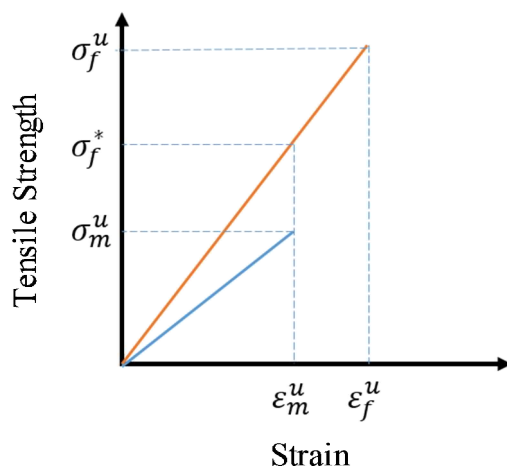
مقدار متغیر	متغیر
1 mm	قطر نازل
-0.02 mm	فاصله هوایی بین رشته‌ها
0.3 mm	ارتفاع لایه‌ها
65 °C	دمای بستر
210 °C	دمای نازل
10 mm/s	سرعت چاپ نمونه‌های تقویت شده
50 mm/s	سرعت چاپ نمونه‌های تقویت نشده

قانون اختلاط در کامپوزیت‌ها جهت مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده با مقادیر تئوری محاسبه شدن استحکام و مدول کششی مورداستفاده قرار گرفته شده است. میزان استحکام و مدول کششی تئوری با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند [۱۱]:

$$\sigma_c = \sigma_f^* V_f + \sigma_m^u (1 - V_f) \quad (1)$$

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

که در این روابط σ و E به ترتیب بیانگر استحکام و مدول کششی، V کسر حجمی و اندیس‌های c ، f و m به ترتیب بیانگر کامپوزیت، سیم‌های فلزی و زمینه پلیمری هستند. روابط ۱ و ۲ همان‌طور که اشاره شد در بررسی شکست مواد مرکبی که پلیمر زمینه تردتر از الیاف باشند استفاده می‌شود. σ_f^* بیانگر استحکام کششی الیاف در کرنش شکست پلیمر بوده که از نتایج آزمون کشش پلیمر زمینه و الیاف مورد استفاده استخراج می‌شود.



شکل ۴ مکانیک شکست مواد مرکب (در حالتی که پلیمر زمینه تردتر از الیاف باشد)

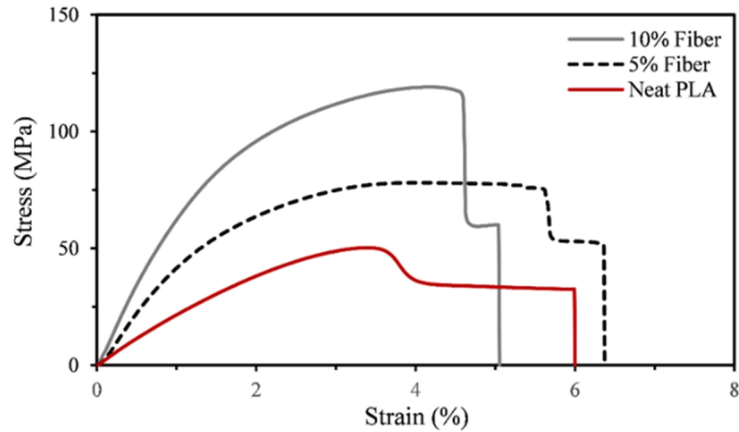
خواص حرارتی و تغییرات دمایی نمونه‌های تقویت‌شده با سیم فلزی ۰/۱۵ میلی‌متری و درصد حجمی الیاف ۵ و ۱۰ درصد با اعمال ولتاژهای ۳۲ و ۴۰ ولت DC بررسی شده و با استفاده از دوربین حرارتی Fluke TIS10 ساخت کشور آمریکا تصاویر مربوطه ثبت و ذخیره شدند.

۳- نتایج و بحث

مطابق نتایج آزمون کشش استحکام کششی و مدول الاستیک الیاف فلزی به ترتیب برابر با ۹۷۴ مگاپاسکال و ۵۲ گیگاپاسکال است. کرنش شکست الیاف نیز برابر با ۱۳ درصد محاسبه شد.

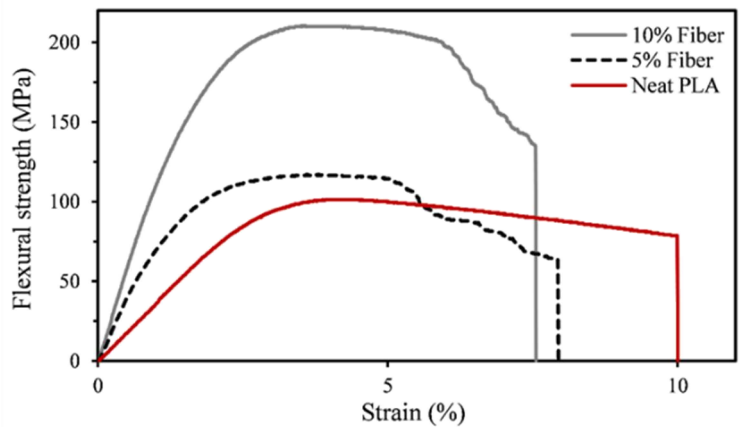
شکل ۵ نمودار تنش-کرنش آزمون کشش نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده PLA با الیاف فلزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، حضور الیاف فلزی افزایش خواص مکانیکی را به همراه داشته است. مطابق نتایج، نمونه‌های تقویت شده با سیم ۰/۱۵، استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی با ۵ و ۱۰ درصد حجمی سیم ۰/۱۵ به ترتیب برابر با ۷۹/۷ و ۱۱۴/۳ مگاپاسکال بوده و مدول کششی برای این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴/۴ و ۶/۹ گیگاپاسکال محاسبه شدند. در مقایسه با نمونه تقویت نشده، مقدار افزایش برای نمونه‌های ۵ و ۱۰ درصدی به ترتیب برابر با ۶۳ و ۱۳۴ درصد برای استحکام کششی و ۸۳ و ۱۸۷ درصدی برای مدول کششی بوده است.

جهت مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش و مقادیر تئوری از قانون اختلاط استفاده شد. برای نمونه تقویت شده با سیم ۰/۱۵ میلی‌متری و درصد حجمی ۵ و ۱۰ درصد استحکام کششی برابر با ۹۳/۶ و ۱۳۸/۴ مگاپاسکال و برای مدول الاستیک برابر با ۴/۹ و ۷/۴ گیگاپاسکال محاسبه شده است. اختلاف این مقادیر با نتایج تجربی به ترتیب برابر با ۱۴/۹ و ۱۷/۴ درصد برای استحکام کششی بوده و ۱۰/۲ و ۶/۸ درصد برای مدول کششی بوده است.



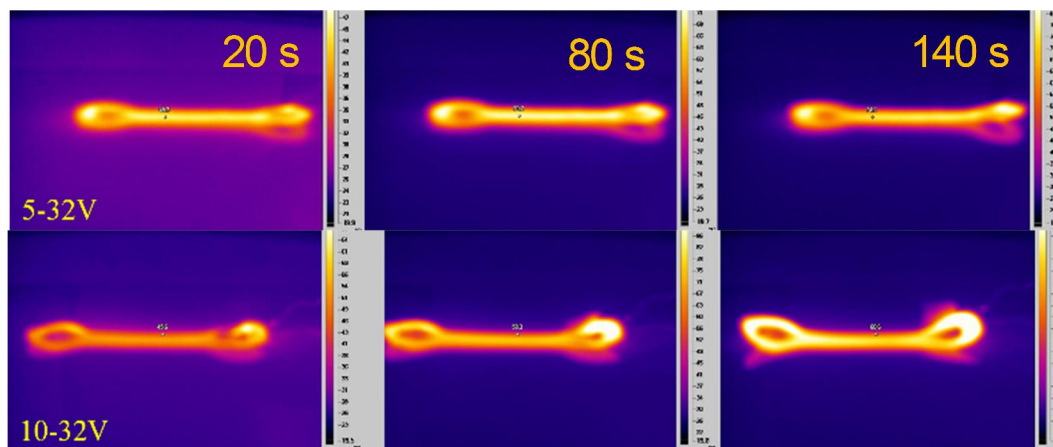
شکل ۵ نمودار تنش-کرنش آزمون کشش نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف و تقویت نشده PLA

شکل ۶ نمودار تنش-کرنش آزمون خمش نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده PLA با الیاف فلزی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی با ۵ و ۱۰ درصد حجمی سیم ۰/۱۵ به ترتیب برابر با ۱۱۲/۴ و ۲۰۹/۷ مگاپاسکال بوده و مدول خمشی برای این نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۸/۳ و ۱۰/۷ گیگاپاسکال محاسبه شدند. در مقایسه با نمونه تقویت نشده، مقدار افزایش برای نمونه‌های ۵ و ۱۰ درصدی به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۰۵ درصد برای استحکام خمشی و ۱۲۴ و ۱۸۹ درصدی برای مدول خمشی بوده است.



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش آزمون خمش نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف و تقویت نشده PLA

با توجه به ماهیت پلیمرهای حافظه‌شکل و نیاز به محرک جهت بازیابی شکل اولیه، گرمای مورد نیاز برای بازیابی این مواد عمدتاً به‌صورت مستقیم از طریق قرارگیری در کوره یا حمام آب تأمین می‌شود. با توجه به کاربرد گسترده این مواد در صنایع مختلف حرارت دهی مستقیم به قطعات غالباً امکان‌پذیر نبوده و حضور الیاف فلزی در زمینه پلیمری این قابلیت را ایجاد می‌کند که با وصل کردن جریان الکتریکی به الیاف، حرارت مورد نیاز از این طریق به پلیمر منتقل شود. شکل ۷ تصاویر دوربین حرارتی نمونه‌های تقویت شده با سیم فلزی ۰/۱۵ میلی‌متری و با دو درصد حجمی ۵ و ۱۰ درصد را نشان می‌دهد. با اعمال اختلاف پتانسیل‌های ۳۲ بیشینه دمای ثبت شده برای نمونه‌های ۵ درصدی برابر با ۶۲/۷ درجه سانتی‌گراد بوده و این مقدار برای نمونه‌های ده درصدی برابر با ۵۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.



شکل ۷ تصاویر دوربین ترموگرافی نمونه‌های تقویت‌شده با سیم با قطر ۰/۱۵ میلی‌متری

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص مکانیکی (کششی و خمشی) PLA و اثر افزودن الیاف فلزی بر آن مورد بررسی قرار گرفت. افزودن الیاف فلزی به ماتریس پلیمری به روش آغشته سازی هم‌زمان با موفقیت انجام شده و مطابق نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش نشان داد که با افزودن سیم فلزی به پلیمر زمینه خواص کششی و خمشی بهبود پیدا کرده است. به‌نحوی که با افزودن ۵ و ۱۰ درصدی سیم فلزی در زمینه پلیمری استحکام کششی افزایش ۶۳ و ۱۳۴ درصدی و استحکام خمشی افزایش ۱۰ و ۱۰۵ درصدی به همراه داشته است. با اعمال اختلاف پتانسیل ۳۲ ولت بیشینه دمای نمونه تقویت شده برابر با ۶۲/۷ درجه سانتی‌گراد بوده که در بازه دمایی انتقال شیشه‌ای پلیمر PLA قرار دارد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، امکان‌پذیری چاپ کامپوزیت‌های ترموپلاستیک با الیاف پیوسته‌ی فلزی همچنین گرمای تولیدشده با اعمال اختلاف پتانسیل می‌تواند گسترش کاربردهای مواد حافظه‌شکلی را در صنایع مختلف به همراه داشته باشد. از جمله این کاربردها می‌توان به مکانیسم‌ها و عملگرهای حساس به میدان الکتریکی و مغناطیسی اشاره کرد که پیش از این با توجه به خواص پلیمرهای خالص قابل استفاده نبودند.

References

- [1] Yang L, Lou J, Yuan J, Deng. A review of shape memory polymers based on the intrinsic structures of their responsive switches. *RSC Advances*. 2021;11(46):28838-50. doi: 10.1039/D1RA04434F
- [2] Li Y, Zhang F, Liu Y, Leng. 4D printed shape memory polymers and their structures for biomedical applications. *Science China Technological Sciences*. 2020;63(4):545-60. doi: 10.1007/s11431-019-1494-0
- [3] Kabiri A, Liaghat G, Alavi F, Ansari M, Hedayati. A comparative study of 3D printing and heat-compressing methods for manufacturing the thermoplastic composite bone fixation plate: Design, characterization, and in vitro biomechanical experimentation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2021;235(12):1439-52. doi: 10.1177/09544119211034353
- [4] Abidaryan S, Barmouz M, Hedayati. Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7(5):14-23. [In Persian]
- [5] Hedayati SK, Behraves AH, Hasannia S, Saed AB, Akhoundi. 3D printed PCL scaffold reinforced with continuous biodegradable fiber yarn: A study on mechanical and cell viability properties. *Polymer Testing*. 2020;83:106347. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106347
- [6] Kabir SF, Mathur K, Seyam. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*. 2020;232:111476. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111476
- [7] Akhoundi B, Behraves AH, Bagheri Saed. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: in-melt simultaneous impregnation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020;234(1-2):243-59. doi: 10.1177/0954405419843780
- [8] Melenka GW, Cheung BK, Schofield JS, Dawson MR, Carey. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*. 2016;153:866-75. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018

- [9] Blok LG, Longana ML, Yu H, Woods. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*. 2018;22:176-86. doi: [10.1016/j.addma.2018.04.039](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039)
- [10] Hedayati SK, Behravesht AH, Hasannia S, Kordi O, Pourghaumi M, Saed AB, Gashtasbi F. Additive manufacture of PCL/nHA scaffolds reinforced with biodegradable continuous Fibers: Mechanical Properties, in-vitro degradation Profile, and cell study. *European Polymer Journal*. 2022;162:110876. doi: [10.1016/j.eurpolymj.2021.110876](https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110876)
- [11] Cho JW, Kim JW, Jung YC, Goo. Electroactive shape-memory polyurethane composites incorporating carbon nanotubes. *Macromolecular Rapid Communications*. 2005;26(5):412-6. doi: [10.1002/marc.200400492](https://doi.org/10.1002/marc.200400492)