



# 3D Printing of Smart PETG Blends with Thermal Stimulation



## ARTICLE INFO

### Authors

Mirasadi K<sup>1</sup>  
Rahmatabadi D<sup>1</sup>  
Ghasemi I<sup>2</sup>  
Baniassadi M<sup>1\*</sup>  
Baghani M<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

### \* Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
m.baniassadi@ut.ac.ir

### How to cite this article

Mirasadi K, Rahmatabadi D, Ghasemi I, Baniassadi M, Baghani M. 3D Printing of Smart PETG Blends with Thermal Stimulation. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):125-130.

## ABSTRACT

Smart materials can react to environmental changes like living organisms and adapt themselves to environmental conditions and changes such as changes in temperature, electric current, magnetic field, light, humidity, etc. Using 3D printing to process smart materials is a new approach known as 4D printing. In this research, processing, manufacturing and 3D printing of PETG-ABS in three weight percentages of 70/30, 50/50 and 30/70 were done. The results of SEM also confirmed the compatibility of these two polymers. In all PETG-ABS mixtures, a combination of sea-island and drop-matrix morphology was observed, and for the 30/70 and 30/70 blends, phase droplets dispersed in the matrix were clearly observed. The results of mechanical properties also showed that as the percentage of ABS in the mixture increases, the tensile strength increases and the elongation decreases. The results obtained from the shape memory test indicate the existence of the ability to program the shape memory property in 4D printing mixtures. As expected, the increase in the weight percentage of ABS was associated with the disorder in the recovery of the mixtures, so the mixture with 70% by weight of PETG and 30% by weight of ABS showed the most favorable shape memory properties.

**Keywords** 3D printing, Shape Memory Polymers, Mechanical Properties and SEM

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۲۵-۱۳۰



## چاپ سه‌بعدی آمیزه‌های هوشمند PETG با تحریک گرمایی



## چکیده

مواد هوشمند می‌توانند مانند موجودات زنده نسبت به تغییرات محیط واکنش نشان دهند و خود را با شرایط و تغییرات محیطی مانند تغییرات دما، جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی، نور، رطوبت و غیره انطباق دهند. استفاده از چاپ سه‌بعدی برای پردازش مواد هوشمند، رویکرد جدیدی است که به عنوان چاپ چهاربعدی شناخته می‌شود. در این پژوهش، فرآوری، ساخت و چاپ سه‌بعدی آمیزه‌های حافظه‌شکلی PETG-ABS در سه درصد وزنی ۳۰/۷۰ و ۵۰/۵۰/۳۰ انجام شد. نتایج حاصل از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز سازگاری این دو پلیمر را تایید کرد. در تمامی آمیزه‌های PETG-ABS ترکیبی از مورفولوژی دریا-جزیره و قطره-ماتریس مشاهده شد و برای ترکیبات ۳۰/۷۰ و ۷۰/۳۰ قطرات فاز پراکنده در ماتریس به طور واضح ملاحظه گردید. نتایج خواص مکانیکی نیز نشان داد هرچه درصد ABS در آمیزه زیاد شود، استحکام کششی بالاتر می‌رود و ازدیاد طول کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده از آزمون حافظه‌شکلی نشان‌دهنده وجود قابلیت برنامه‌ریزی خاصیت حافظه‌شکلی در آمیزه‌های چاپ چهاربعدی شده می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود افزایش درصد وزنی ABS با اختلال در بازیابی آمیزه‌ها همراه بود لذا آمیزه دارای ۷۰ درصد وزنی PETG و ۳۰ درصد وزنی ABS، مطلوب‌ترین خواص حافظه‌شکلی را از خود نشان دادند.

## مشخصات مقاله

### نویسنده‌ها

کیان‌دخت میراسادی<sup>۱</sup>  
داود رحمت‌آبادی<sup>۱</sup>  
اسماعیل قاسمی<sup>۲</sup>  
مجید بنی‌اسدی<sup>۱\*</sup>  
مصطفی باغانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تهران، تهران  
<sup>۲</sup> پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه تهران، تهران  
m.baniassadi@ut.ac.ir

**کلیدواژه‌ها** پرینت سه بعدی، پلیمرهای حافظه‌شکلی، خواص مکانیکی، میکروسکوپ الکترونی روبشی

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از روش ساخت افزودنی که به عنوان چاپ سه‌بعدی شناخته می‌شود، گسترش زیادی یافته است. این فناوری را که بر اساس ساخت لایه به لایه مواد برای رسیدن به یک هندسه سه‌بعدی می‌باشد، می‌توان برای ساخت اجسام با هندسه‌های پیچیده با استفاده از انواع پلیمرها، فلزات و سرامیک‌ها در مدت زمان کوتاه از طریق مدلسازی به کمک کامپیوتر به کار برد [۱]. امروزه انواع مختلفی از روش‌های پرینت سه‌بعدی با عملکردهای مختلف توسعه یافته‌اند [۲]. مدل سازی رسوب ذوب‌شده یکی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های ساخت افزودنی از طریق اکستروژن مواد برای تولید مواد افزودنی است که از طریق یک نازل اکستروژن شده و برای ایجاد اشیاء سه‌بعدی به یکدیگر متصل می‌شوند [۳].

مفهوم چاپ چهاربعدی نخستین بار در سال ۲۰۱۳ در کنفرانس TED توسط تیبیتس معرفی شد [۴]. در چاپ چهاربعدی، شکل سه‌بعدی حاصل می‌تواند در پاسخ به محرک‌های محیطی به اشکال مختلف تبدیل شود و پس از چاپ تغییر شکل وابسته به زمان داشته باشد. در واقع بعد چهارم همان زمان می‌باشد. بنابراین ماده هوشمند قابل برنامه‌ریزی پس از فرآیند ساخت، چاپ‌شده و با پارامترهای محیطی (رطوبت، دما، ولتاژ و غیره) واکنش نشان می‌دهد و شکل خود را بر این اساس تغییر می‌دهد [۵]. از این رو رفتار وابسته به زمان مواد هوشمند هنگامی که در معرض محرک‌های خارجی قرار می‌گیرند، حائز اهمیت می‌باشد. در ساختارهای پرینت‌شده چهاربعدی حداقل دو حالت پایدار وجود دارد و ساختار می‌تواند با استفاده از تحریکات خارجی بین این دو حالت جابه‌جا شود. در برخی از مواد تعداد حالات پایدار به سه حالت و حتی بیشتر هم می‌رسد [۶].

در بین مواد هوشمند که قابلیت چاپ چهاربعدی را دارند، پلیمرهای حافظه‌شکلی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند زیرا پس از ایجاد تغییر شکل، تحت تاثیر محرک خارجی، قابلیت بازگشت به شکل اولیه خود را دارند. محرک خارجی می‌تواند حرارت، الکتریسیته، مغناطیس، نور و رطوبت باشد [۷]. اثر حافظه‌شکلی القاشده توسط گرما متداول‌تر است که در آن بازگشت به شکل اولیه با گذشتن از یک دمای بحرانی (دمای انتقال شیشه‌ای) انجام می‌شود. خاصیت حافظه‌شکلی ایجادشده از طریق این روش را اثر حافظه‌شکلی القاشده گرمایی می‌نامند. در این روش، ابتدا نمونه تا دمای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای گرم شده و در آن تغییر شکل ایجاد می‌شود. سپس، دمای ماده تا دمایی پایین‌تر از دمای انتقال شیشه‌ای کاهش داده می‌شود تا

ساختار آن تثبیت و با گرم شدن مجدد ماده، شکل اولیه آن بازیابی شود [۸].

پلیمرهای حافظه‌شکلی دارای دو فاز سخت و فاز نرم هستند. فاز سخت این پلیمرها به شکل شبکه فیزیکی یا نیمه بلوری است که سبب استحکام ماده شده و کنترل‌کننده خواص مکانیکی پلیمر است و در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای، انعطاف پذیر خواهد بود و الاستیسیته آنتروپیک را در خود جای می‌دهد. بنابراین شکل اصلی پلیمر را حین اعمال قید حفظ می‌کنند. در نتیجه شبکه‌های پلیمری در دمای بالاتر از دمای انتقال رفتار الاستیک آنتروپیک نشان می‌دهند. فاز نرم نیز اغلب بی‌شکل است و کنترل‌کننده رفتار گرماکشسانی پلیمر می‌باشد و به علت حساسیت زیاد به محرک، شکل موقت را ثابت کرده و نیرو را ذخیره می‌کند [۹].

اکثر پژوهش‌های پیشین در زمینه چاپ چهاربعدی ترموپلاستیک‌های حافظه‌شکلی با روش FDM، مبتنی بر PLA و PU بوده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و [۱۳]. PLA و PU دو ترموپلاستیک با خاصیت حافظه‌شکلی مطلوب و قیمت نسبتاً پایین نسبت به سایر ترموپلاستیک‌ها هستند. از جمله برجسته‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه می‌توان به مطالعات بارلتا و همکارانش [۱۰] در زمینه بررسی اثر پارامترهای متغیر و دمای بازیابی در فرآیند چاپ چهاربعدی PLA، پژوهش‌های لیو و همکارانش [۱۴] در زمینه بررسی رفتار حافظه‌شکلی و نیروی بازیابی سازه‌های اوربگامی چندبعدی چاپ‌شده تحت بارگذاری فشاری، پژوهش‌های بداعی و همکارانش [۱۵] در زمینه پرینت چهاربعدی فراماده مکانیکی با قابلیت تنظیم خواص حافظه‌شکلی بر پایه PU اشاره نمود.

باتوجه به نوین بودن حوزه چاپ چهاربعدی ترموپلاستیک‌های حافظه‌شکلی با روش FDM، چالش‌های مهمی در بخش‌های مختلف آن وجود دارد. از جمله این چالش‌ها وجود محدودیت در ترموپلاستیک‌های حافظه‌شکلی قابل پرینت با خواص حافظه‌شکلی مطلوب می‌باشد زیرا اثر حافظه‌شکلی جزء خواص ذاتی همه ترموپلاستیک‌ها نیست. عملکرد ضعیف ترموپلاستیک‌های حافظه‌شکلی PLA و PU در مرحله بازیابی (مخصوصاً نرخ آسودگی تنش بالا) را می‌توان از خلاءهای موجود در این زمینه تحقیقاتی ذکر کرد. از این رو ترموپلاستیک‌هایی نظیر PVC [۱۶]، [۱۷] و PETG [۱۸]، [۱۹]، [۲۰] و [۲۱] به عنوان مواد جدید مورد استفاده در چاپ چهاربعدی به روش FDM معرفی شدند و رفتار حافظه‌شکلی آن‌ها در شرایط مختلف از جمله دمای برنامه‌ریزی و مود بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود، عواملی چون عملکرد ضعیف اثر حافظه‌شکلی در بحث تثبیت شکل موقت این مواد که به علت ضعف در نقاط شبکه‌ای این ترموپلاستیک‌ها

پلاستیک خرد شد تا هندسه آن به گرانول تبدیل شود. در مرحله بعد، جهت اطمینان از نداشتن رطوبت مواد اولیه، گرانول‌ها در آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت رطوبت زدایی شدند.

## ۲-۲- تهیه آمیزه‌ها

به منظور تهیه آمیزه‌های پلیمری PETG-ABS با درصدهای وزنی ۷۰-۳۰، ۵۰-۵۰، ۳۰-۷۰ از روش اختلاط مذاب استفاده شد. اختلاط مذاب مواد ورودی به صورت گرانول با استفاده از دستگاه مخلوطکن داخلی<sup>۳</sup> از شرکت برابندر<sup>۴</sup> ساخت کشور آلمان، انجام شد. در طی این فرآیند، ابتدا گرانول PETG به درون مخلوطکن داخلی ریخته شده و پس از ذوب کامل آن (دو دقیقه) در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۶۰ دور بر دقیقه، گرانول‌های ABS اضافه شدند. مواد خروجی، آمیزه‌های پلیمری به شکل کلوخه بودند. تهیه ورق‌های نازک از مواد اختلاط یافته با استفاده از دستگاه پرس گرم در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه و پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه دیگر نیز تحت فشاری معادل ۶۰ کیلوپاسکال در دستگاه پرس سرد انجام شد. بدین ترتیب ورق‌های نازک با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر از مواد اولیه تهیه شدند. در آخر نیز ورق‌های تولید شده جهت آماده‌سازی برای پرینت در ابعاد میلیمتری خرد شدند.

## ۲-۳- چاپ سه‌بعدی آمیزه‌ها

چاپ آمیزه‌های پلیمری PETG-ABS با استفاده از روش مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده با استفاده از یک پرینتر نسل جدید انجام شد. در این روش برخلاف روش FDM معمولی، ماده اولیه به صورت گرانول است. بنابراین آمیزه‌های پلیمری فرآوری شده بدون نیاز به فیلامنت گیری چاپ می‌شوند. علاوه بر این سیستم تغذیه متفاوت است و از چرخنده به عنوان نیروی محرکه انتقال ماده به درون نازل استفاده نمی‌شود بلکه گرانول‌ها داخل محفظه حرارتی (کارتریج) وارد شده و پس از ذوب ماده درون کارتریج، با استفاده از فشار هوا پلیمر نیمه مذاب به داخل نازل هدایت می‌شود و از این طریق چاپ نمونه‌ها انجام می‌شود.

در جدول ۱ پارامترهای اساسی چاپ به روش FDM نمونه‌های فرآوری شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱) پارامترهای متغیر در چاپ سه‌بعدی به روش FDM آمیزه‌های پلیمری PETG-ABS

| پارامترهای چاپ | مقدار | واحد              |
|----------------|-------|-------------------|
| سرعت چاپ       | ۲۵۰   | میلی متر بر دقیقه |
| دمای نازل      | ۲۳۰   | سانتی‌گراد        |
| دمای صفحه چاپ  | ۵۰    | سانتی‌گراد        |
| ضخامت لایه     | ۴۵۰   | میکرون            |
| چگالی پرشدن    | ۱۰۰   | درصد              |
| جهت چاپ        | ۰-۹۰  | درجه              |

می‌باشد، یافتن راه حلی مناسب را برای غلبه بر چالش‌های پرینت چهار بعدی به روش FDM، همچنان در دستور کار قرار می‌دهد و یکی از موضوعات جالب پژوهشی می‌باشد.

دستیابی به خاصیت حافظه‌شکلی از طریق ایجاد فازهای سخت و نرم در ریزساختار پلیمرها میسر می‌شود که این امر نیز از طریق سنتز و یا آمیزه‌سازی آن‌ها امکان پذیر است. آمیزه‌سازی پلیمرها برای دستیابی به خاصیت حافظه‌شکلی مطلوب‌تر راه حلی است که اخیراً برای توسعه مواد حافظه‌شکلی و چالش‌های چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که گفته شد در چرخه حافظه‌شکلی فاز سخت برای به خاطر سپردن شکل دائمی مورد نیاز است که تنش تغییر شکل را در خود ذخیره کند تا در مرحله بازیابی شکل، آن را آزاد سازد. لذا تقویت نقاط شبکه‌ای این مواد از طریق آمیزه‌سازی می‌تواند خواص حافظه‌شکلی آن‌ها را تا حد زیادی بهبود بخشد. محققان آمیزه‌های پلیمری جدیدی نظیر [۲۲] PLA-PCL، [۲۳] PLA-PBS، [۲۴] PLA-TPU و غیره را فرآوری و پرینت کردند اما اکثر این آمیزه‌ها بر پایه PLA می‌باشند. بنابراین ترکیبات پلیمری حافظه‌شکلی با قابلیت چاپ عالی نیز همچنان محدود هستند.

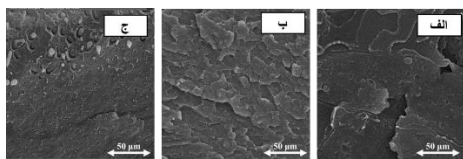
ما در این پژوهش برای اولین بار آمیزه حافظه‌شکلی PETG-ABS را به عنوان ماده اولیه برای چاپ چهاربعدی مورد استفاده قرار دادیم. PETG یک ترموپلاستیک حافظه‌شکلی با قابلیت پرینت‌پذیری عالی و خواص رئولوژیکی بسیار خوب است. فاز سخت در این ماده حاصل از گره‌خوردگی‌های زنجیره‌های مولکولی می‌باشد که در اثر القای گرما (تا دمای انتقال شیشه‌ای) عملکرد ضعیفی دارند و به راحتی دچار لغزش می‌شوند. از آنجایی‌که دمای انتقال شیشه‌ای ترموپلاستیک ABS حدود ۳۰ درجه بالاتر از دمای انتقال PETG می‌باشد، در دماهای بالاتری نسبت به PETG دچار لغزش زنجیره‌ها خواهد شد. از این رو زنجیره‌های مولکولی ABS در کنار زنجیره‌ها و گره‌خوردگی‌های مولکولی PETG به عنوان یک قید عمل کرده و مانع از لغزش آن‌ها تا دماهای بالاتر از دمای انتقال PETG می‌شود. لذا این امر موجب تقویت فاز سخت PETG شده و آمیزه مذکور خواص حافظه‌شکلی، آسودگی تنش و خواص مکانیکی بسیار مطلوبی را دارا می‌باشد. ضمن اینکه با معرفی این ماده، بر دیگر چالش موجود یعنی محدودیت مواد قابل استفاده در زمینه پرینت چهاربعدی با استفاده از روش FDM فائق آمده‌ایم.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد تحقیق

در این تحقیق، فیلامنت PETG با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و گرانول ABS که به ترتیب از شرکت eSUN (سنژن، چین) و پتروشیمی گلپایگان (ایران) تهیه شدند، به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. برای سهولت در انجام کار، فیلامنت PETG توسط دستگاه آسیاب

Co-continuous, island و Matrix-droplet مشاهده می‌شود. عدم مشاهده اختلاف سطح در تصاویر فوق بیانگر چسبندگی قوی میان این دو ماده و کیفیت خوب اتصال ذرات آمیزه می‌باشد. این نتایج کاملاً با مطالعات قبلی نیز مطابقت دارد [۲۵].



شکل ۱) تصاویر سطح مقطع شکست از آمیزه‌های PETG-ABS با درصدهای وزنی متفاوت: الف) PETG70، ب) PETG50، ج) PETG30

### ۲-۳- خواص مکانیکی

شکل ۲ نتایج آزمون مکانیکی کشش تک‌محوره (منحنی‌های تنش-کرنش) برای بررسی تأثیر درصد ترکیبات دوماده PETG و ABS بر رفتار مکانیکی را نشان می‌دهد. هم‌چنین، نتایج کمی استخراج‌شده از نمودارهای تنش-کرنش در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است. مطابق با شکل ۲، درصد ترکیب یک پارامتر اساسی است که می‌تواند برای دستیابی به خواص مکانیکی مورد نظر تغییر یابد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، اثر درصد ترکیب بر رفتار مکانیکی مانند مدول، استحکام و ازدیاد طول کاملاً ملموس است. با افزایش مقدار ABS، شیب ناحیه خطی نمودار افزایش می‌یابد که این امر بیانگر افزایش استحکام تسلیم و مدول الاستیک است. از آنجایی که ABS مدول بالاتر، استحکام بیشتر و ماهیت تردتری نسبت به PETG دارد، لذا نمونه PETG30 که بیشترین درصد وزنی ABS را دارد، بالاترین استحکام و نمونه PETG70 با دارا بودن کمترین درصد وزنی از ABS، پایین‌ترین استحکام کششی را دارد. از طرفی ماهیت ترد ABS نسبت به PETG موجب شده است افزودن این ماده به PETG در ترکیبات PETG-ABS باعث کاهش ازدیاد طول در ترکیبات با درصدوزنی بیشتری از ABS گردد. به همین علت آمیزه PETG30 پایین‌ترین درصد ازدیاد طول را دارد. به طور کلی می‌توان گفت ترکیب‌کردن ABS با PETG منجر به افزایش استحکام نهایی آمیزه‌های ساخته‌شده می‌گردد. این امر نتیجه مطلوبی است که یکی از اهداف این پژوهش را محقق می‌سازد. نتایج تست کشش حاصل از این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین [۲۵] نیز کاملاً مطابقت دارد.

در این پژوهش نمونه‌های چاپ‌شده به کمک آزمون‌های خواص مکانیکی، ریزساختاری و حافظه‌شکلی مشخصه‌یابی شدند.

تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۵</sup> نیز در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vegall ساخت شرکت Tescan طبق استاندارد (ASTM F1877-05) از سطح مقطع شکست نمونه‌ها صورت گرفت. خواص مکانیکی شامل آزمون کشش تک‌محوره نیز، با سرعت جابجایی ۳ میلی‌متر بر دقیقه، در دمای اتاق و با دستگاه سنتام با ظرفیت ۵ تن، لودسل ۱۰۰ کیلوگرم و استاندارد ASTM D638 type ۷ انجام شد. جهت راستی آزمایشی نتایج، این آزمون با تکرار سه نمونه برای هر گروه انجام شد.

جهت بررسی خواص حافظه‌شکلی، آزمون حافظه‌شکلی در مود بارگذاری خمشی با اعمال سیکل حافظه‌شکلی که دارای دو مرحله اساسی برنامه‌ریزی و بازیابی است، انجام شد. مرحله بازیابی به ترتیب شامل حرارت نمونه تا دمایی بالاتر از دمای انتقال، نگه داشتن در این دما جهت آزادسازی تنش‌های داخلی، بارگذاری، سرد کردن نمونه و تثبیت در این دما و باربرداری است. در انتهای مرحله برنامه‌ریزی پارامتر تثبیت شکل محاسبه می‌شود که از نسبت تغییر شکل ایجادشده به میزان تغییر شکل اعمالی بدست می‌آید. در مرحله بازیابی نیز، نمونه تحت گرمایش مجدد قرار می‌گیرد و به محض رسیدن به نواحی حرارتی انتقال شیشه به لاستیک فرآیند بازیابی شکل انجام می‌شود. میزان بازیابی شکل در این مرحله قابل محاسبه است. دمای برنامه‌ریزی برای هر سه نمونه در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. برنامه‌ریزی نمونه‌ها در محلول آب و ضدیخ انجام شد. زمان گرمایش مرحله اول و سرمایش نیز حدود ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد. هندسه قطعات تحت آزمون خمش به صورت تیری به ابعاد ۱×۴ سانتی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای بازیابی شکل، نمونه‌های تغییر شکل‌یافته تا دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای مجدد گرم شدند تا مرحله بازیابی شکل آنها صورت پذیرد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مورفولوژی

در این بخش تصاویر سطح مقطع شکست آمیزه‌های PETG-ABS پس از چاپ با روش FDM و شکست ترد در نیتروژن مایع به منظور بررسی ریزساختار ترکیبات نام‌برده ارائه می‌شود. شکل ۱ تصاویر سطح مقطع شکست آمیزه‌های PETG-ABS در سه درصد وزنی مختلف را پس از چاپ نشان می‌دهد.

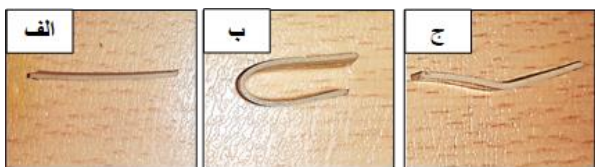
مطابق با تصاویر شکل ۱، دو ماده PETG و ABS سازگاری بسیار خوبی با یکدیگر دارند و جدایش فازی بین این دو ماده به هیچ وجه ملاحظه نمی‌شود. در این آمیزه‌ها ترکیبی از مورفولوژی Sea-

<sup>۵</sup> Scanning electron microscope (SEM)

تقویت قابلیت fixity آمیزه‌های ABS-PETG شود و از طرف دیگر در بازیابی فاز نرم PETG اختلال ایجاد کند. طبق نتایج جدول ۳، به ترتیب دو آمیزه حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی ABS خواص حافظه‌شکلی بسیار عالی را از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که آمیزه حاوی ۷۰٪ وزنی ABS عملکرد حافظه‌شکلی (۳۴٪) مطلوبی ندارد. علاوه بر این، نرخ بازیابی نیز به شدت با افزایش درصد وزنی ABS کاهش می‌یابد و مرحله بازیابی برای آمیزه‌های حاوی ۳۰، ۵۰ و ۷۰٪ PETG به ترتیب در ۱۸ ثانیه ۳۷٪، ۱۴ ثانیه ۹۵/۶٪ و ۱۲ ثانیه ۹۷/۸٪ پایان می‌یابد.

جدول ۳) نتایج کمی استخراج شده از آزمون حافظه شکلی

| ماده             | ثبیت شکل (%) | بازیابی شکل (%) |
|------------------|--------------|-----------------|
| ABS-PETG (30-70) | 100          | 34.01           |
| ABS-PETG (70-30) | 100          | 95.65           |
| ABS-PETG (70-30) | 100          | 97.82           |



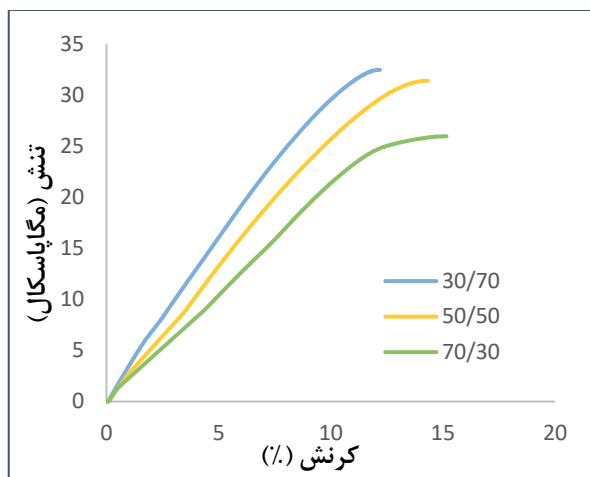
شکل ۳) تصویر نمونه‌های ABS-PETG پس از الف) چاپ، ب) پس از مرحله بارگذاری و محاسبه تثبیت شکل، ج) پس از مرحله بازیابی و محاسبه بازیابی شکل

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آمیزه‌های هوشمند PETG-ABS در سه ترکیب مختلف فرآوری، چاپ سه بعدی و مشخصه‌یابی شد. ارزیابی خواص مکانیکی، ریزساختاری و حافظه شکلی به ترتیب با استفاده از آزمون کشش تک محوره، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون حافظه شکلی در مد بارگذاری خمشی و اندازه‌گیری تثبیت و بازیابی شکل انجام شد. تصاویر سطح مقطع شکست نشان داد که هر سه آمیزه دارای سازه‌گاری قابل قبول و ترکیبی از مورفولوژی قطره-زمینه و جزیره-دریا هستند. نتایج خواص مکانیکی نیز تایید کرد که با افزایش درصد وزنی ABS استحکام کششی و ازدیاد طول به ترتیب زیاد و کم می‌شود. پارامترهای حافظه شکلی تثبیت شکل و بازیابی شکل نیز بیانگر افزایش بازیابی شکل در نمونه‌های PETG بیشتر است. در طرف مقابل هم مقدار تثبیت شکل برای همه نمونه‌ها به صورت کامل مشاهده شد.

#### مراجع

1. Yan, Q., et al., A review of 3D printing technology for medical applications. Engineering, 2018. 4(5): p. 729-742.
2. Shahrubudin, N., T.C. Lee, and R. Ramlan, An overview on 3D printing technology: Technological,



شکل ۲) نمودار تنش کرنش برای آمیزه‌های PETG-ABS

جدول ۲) نتایج کمی استخراج شده از آزمون خواص مکانیکی

| ماده             | استحکام کششی (مگاپاسکال) | ازدیاد طول (%) |
|------------------|--------------------------|----------------|
| ABS-PETG (30-70) | 32.48                    | 12.19          |
| ABS-PETG (70-30) | 31.42                    | 14.33          |
| ABS-PETG (70-30) | 25.98                    | 15.16          |

#### ۳-۱- حافظه شکلی

در این پژوهش، آزمون آنالیز خواص حافظه‌شکلی برای آمیزه PETG-ABS جهت بررسی اثر حافظه‌شکلی این آمیزه‌ها با شرایط برنامه‌ریزی در محلول آب و ضدیخ با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و محلول آب و یخ با دمای کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. شکل ۴ تصویری از آمیزه‌های PETG-ABS قبل و بعد از برنامه‌ریزی و همچنین در مرحله بازیابی را نشان می‌دهد که در مود بارگذاری خمش ۱۸۰ درجه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برنامه‌ریزی شده‌اند.

بر اساس نتایج، این آمیزه‌ها دارای تثبیت شکل عالی (۱۰۰ درصد) می‌باشند. لذا مهم‌ترین هدف این تحقیق که تقویت فاز سخت PETG به سبب ترکیب شدن با ABS برای تقویت خاصیت تثبیت شکل ماده در فرآیند حافظه‌شکلی می‌باشد، محقق شده است. شکل ۴ تصویر مراحل برنامه‌ریزی، تثبیت شکل و بازیابی آمیزه‌های PETG-ABS را از طریق تحریک مستقیم گرمایی نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۳ داده‌های کمی مربوط به عملکرد حافظه‌شکلی این نمونه‌ها ارائه شده است. بر اساس این نتایج، آمیزه PETG70 با دارا بودن بیشترین میزان درصد وزنی از PETG بهترین بازیابی شکل و آمیزه PETG30 با بیشترین میزان درصد وزنی از ABS کمترین درصد بازیابی شکل را از خود نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش درصد ABS در ترکیبات PETG-ABS، خواص بازیابی شکل تضعیف و با افزایش درصد PETG، خواص بازیابی بهبود می‌یابد زیرا افزودن ABS به عنوان ترموپلاستیکی که ماهیت حافظه‌شکلی ندارد، با دمای انتقالی بالاتر از PETG می‌تواند سبب

19. Soleyman, E., et al., Assessment of controllable shape transformation, potential applications, and tensile shape memory properties of 3D printed PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. **11**(8). p. 4201-4215.
20. Soleyman, E., et al., 4D printing of PET-G via FDM including tailormade excess third shape. *Manufacturing Letters*, 2022. **33**: p. 1-4.
21. Aberoumand, M., et al., A comprehensive experimental investigation on 4D printing of PET-G under bending. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. **18**: p. 2552-2569.
22. Liu, H., H. He, and B. Huang, Favorable thermoresponsive shape memory effects of 3D printed poly (lactic acid)/poly ( $\epsilon$ -caprolactone) blends fabricated by fused deposition modeling. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020. **305**(11): p. 2000295.
23. Lin, C., et al., 4D printing of shape memory polybutylene succinate/poly(lactic acid) (PBS/PLA) and its potential applications. *Composite Structures*, 2022. **279**: p. 114729.
24. Jiang, Y., J. Leng, and J. Zhang, A high-efficiency way to improve the shape memory property of 4D-printed polyurethane/poly(lactide) composite by forming in situ microfibers during extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2021. **38**: p. 101718.
25. Li, B., et al., Synergistic enhancement in tensile strength and ductility of ABS by using recycled PETG plastic. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009. **113**(2): p. 1207-1215.
3. Dudek, P., FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of metallurgy and materials*, 2013. **58**(4): p. 1415--1418.
4. Tibbits, S., 4D printing: multi-material shape change. *Architectural Design*, 2014. **84**(1): p. 116-121.
5. Momeni, F. and N. Hassani, SMM; Liu, X.; Ni, J. A Review of 4D Printing. *Mater*, 2017. **122**: p. 42.
6. Momeni, F., X. Liu, and J. Ni, A review of 4D printing. *Materials & design*, 2017. **122**: p. 42-79.
7. Lendlein, A. and S. Kelch, Shape-memory polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 2002. **41**(12): p. 2034-2057.
8. Wischke, C., A.T. Neffe, and A. Lendlein, Controlled drug release from biodegradable shape-memory polymers. *Shape-Memory Polymers*, 2009: p. 177-205.
9. Behl, M. and A. Lendlein, Actively moving polymers. *Soft Matter*, 2007. **3**(1): p. 58-67.
10. Barletta, M., A. Gisario, and M. Mehrpouya, 4D printing of shape memory poly(lactic acid) (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modelling (FDM). *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. **61**: p. 473-480.
11. Wu, P., et al., Effect of printing speed and part geometry on the self-deformation behaviors of 4D printed shape memory PLA using FDM. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022. **84**: p. 1507-1518.
12. Rayate, A. and P.K. Jain, A review on 4D printing material composites and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 2018. **5**(9): p. 20474-20484.
13. Carrell, J., G. Gruss, and E. Gomez, Four-dimensional printing using fused-deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 2020. **26**(5): p. 855-869.
14. Liu, Y., et al., Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading. *Composites Part B: Engineering*, 2018. **153**: p. 233-242.
15. Bodaghi, M. and W. Liao, 4D printed tunable mechanical metamaterials with shape memory operations. *Smart Materials and Structures*, 2019. **28**(4): p. 045019.
16. Aberoumand, M., et al., 4D printing of poly(vinyl chloride) (PVC): A detailed analysis of microstructure, programming, and shape memory performance. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023: p. 2200677.
17. Aberoumand, M., et al., Stress recovery and stress relaxation behaviors of PVC 4D printed by FDM technology for high-performance actuation applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023. **361**: p. 114572.
18. Soleyman, E., et al., Shape memory performance of PETG 4D printed parts under compression in cold, warm, and hot programming. *Smart Materials and Structures*, 2022. **31**(8): p. 085002.