



## تحلیل تجربی خواص مکانیکی و میکروسکوپی کامپوزیت ABS-Ni ساخته شده در روش مدل سازی لایه نشانی ذوبی (FDM)

سیاوش مؤیدی مانیزانی<sup>۱</sup>، جمال زمانی اشانی<sup>۲\*</sup>، محمد صالحی<sup>۱</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، zamani@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۲ آذر ۱۴۰۱  
داوری اولیه: ۴ دی ۱۴۰۱  
پذیرش: ۴ فروردین ۱۴۰۲

### چکیده

با توسعه روش های ساخت افزایشی در چند دهه اخیر، تولید قطعاتی با جنس متفاوت نیز اهمیت بسیاری یافته است. روش چاپ سه بعدی ذوبی (FDM) به عنوان یکی از متداول ترین روش های ساخت افزایشی، امکان تولید قطعات پیچیده کامپوزیتی را فراهم می نماید. فیلامنت های مصرفی مورد استفاده در روش لایه به لایه FDM معمولاً به صورت پلیمری و با قطر معین می باشد. در این روش از طریق ذوب فیلامنت در نازل سامانه و پیشروی لحظه ای آن، مواد در راستای حرکت سیستم از نازل سامانه خارج می گردد. مواد میکرو کامپوزیت به دلیل کاربردهای فراوان از این دسته مواد بشمار می روند. در این بین نحوه کامپوزیت سازی بر روی رفتار قطعه تأثیر گذار است به همین منظور در این پژوهش با استفاده از فیلامنت میکرو کامپوزیتی ABS-Ni و چاپ آن با چاپگر سه بعدی FDM ساخته شده توسط محققین همین مقاله و مقایسه آن با دیگر پلیمرهای تولید شده در این روش نظیر PLA، ABS و TPU به بررسی خواص مکانیکی و خواص میکروسکوپی قطعات تولید شده، پرداخته شده است. همچنین، قطعات مشابه با استفاده از روش DLP با این روش مقایسه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش ۱۵٪ پودر نیکل، استحکام کششی به میزان ۱۱/۶۲٪ کاهش یافته که این مقدار برابر با کاهش ۵۰٪ میزان پرشوندگی در قطعه غیر کامپوزیت ABS است. در مقایسه دو روش FDM و DLP، با وجود کیفیت سطح و ساختار یکپارچه تر، عملیات فتوپلیمریزاسیون می تواند استحکام قطعات را تا ۲ برابر کاهش دهد؛ همچنین درازش پلیمر TPU، ۲۶ برابر دیگر مواد برآورد گردید.

### کلیدواژگان:

تولید افزایشی  
فیلامنت کامپوزیتی  
چاپ ذوبی  
کامپوزیت ABS-Ni  
لایه به لایه

## Experimental investigation of mechanical and microscopic properties of ABS-Ni composite made by Fused Deposition Modeling (FDM) method

Siavash Moayedi Manizani, Jamal Zamani Ashani\*, Mohammad Salehi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 23 November 2022  
First Decision: 25 December 2022  
Accepted: 24 March 2023

### Keywords:

Additive manufacturing  
Composite filament  
Fusion printing  
ABS-Ni composite  
Layer by layer

### Abstract

The development of additive manufacturing processes in the last several decades has made the manufacture of parts made of various materials quite significant. Fused deposition modeling, being one of the most widely used additive manufacturing processes, enables the creation of complex composite parts. In this technique, the material comes out of the system's nozzle in the direction of the system's movement due to the melting of the filament in the nozzle and its momentary progress. Because of their numerous applications, micro-composite materials are considered one of these materials. However, the technique of manufacturing the composite has an influence on the behavior of the component; for this purpose, in this research, ABS-Ni micro composite filament was employed and printed with the FDM 3D printer developed by the researchers of this article, and it was compared to other polymers such as PLA, ABS, and TPU. The mechanical and microscopic behavior of the polymers made with this approach, have been investigated. Furthermore, similar parts manufactured using the DLP approach were compared to this method. According to the results, a 15% increase in nickel powder reduced tensile strength by 11.62%, which is equivalent to a 50% drop in the volume of infill in the non-composite ABS part. When comparing the FDM and DLP methods, the photopolymerization operation can diminish the strength of the products by 2 times despite the higher surface quality and more integrated structure. The elongation of TPU polymers was determined to be 26 times higher than that of other polymers.

Please cite this article using:

S. Moayedi Manizani, J. Zamani Ashani, M. Salehi, Experimental investigation of mechanical and microscopic properties of ABS-Ni composite made by Fused Deposition Modeling (FDM) method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 10-20, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.371411.1716>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

الاستومرهای پایه پلی استری) از لحاظ استحکام کاملاً کاربردی نمی باشند؛ بنابراین یکی از روش های بهبود این محدودیت استفاده از ماتریس های پلیمری تقویت شده با الیاف است [۸]. البته در پلیمرهای کامپوزیتی با فاز پراکنده پودری، با وجود کاربردهای متعدد دیگر، استحکام کششی فیلامنت های تولید شده و قطعات چاپ شده کاهش می یابد [۹]. همچنین، این کاهش استحکام کششی در قطعات تولید شده با روش تزریق پلاستیک نیز برای کامپوزیت پلیمری ABS-Cu با پودر مس نیز مشهود می باشد [۱۰]. هانول و همکاران در سال ۲۰۲۰ چاپ قطعات استوانه ای در دو روش FDM و DLP را با زاویه های مختلف از منظر خواص میکروسکوپی بررسی کردند ولی به مقایسه خواص مکانیکی این دو روش نپرداختند و تنها تأثیر الیاف کربنی بر افزایش استحکام و مدول یانگ مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. به تازگی در سال ۲۰۲۲ یولینا مکوویچ و همکاران به ساخت فیلامنت های کامپوزیتی پلیمر-فلزی مورد استفاده در چاپگر سه بعدی FDM پرداختند. در این آزمایش از موادی همچون PLA، پلی وینیل بوتیرال<sup>۱۹</sup> یا ABS به عنوان ماتریس کامپوزیت و از ذرات نیکل به عنوان فاز پراکنده آن با کسرهای حجمی ۵ تا ۲۵ درصد استفاده شد. کاربرد اصلی کامپوزیتی های پلیمری با ذرات نیکل در مواد کاتالیست و توسعه دستگاه های پیچیده تری همچون غشاءها، باتری ها یا سلول های سوختی با ساختارهای متخلخل می باشد؛ همچنین ساختار متخلخل قطعات، انتقال سیالات (گاز یا مایع) و فعالیت سطحی خاص شیمیایی (یا الکتروشیمیایی) را تسهیل می بخشد [۱۲]. در این پژوهش با ساخت و طراحی سامانه تولید فیلامنت های پلیمری، مواد پلیمری گرانول شکل با جنس های متفاوت به فیلامنت های کامپوزیتی به قطر (۱/۷۵-۱/۸۵ میلی متر) تبدیل گردید. پس از ساخت فیلامنت های مدنظر، قطعات استاندارد تست کشش توسط سامانه چاپ سه بعدی طراحی و ساخته شده به روش FDM برای مواد مختلف چاپ گردید. همچنین فیلامنت ABS به دلیل کاربرد فراوان آن در حوزه های مختلف صنعتی به عنوان ماتریس پایه پلیمری و پودر نیکل ۹۹٪ با ابعاد ذراتی در حدود ۱۰ میکرومتر به عنوان فاز پراکنده فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni انتخاب گردید. مدل های استاندارد تست کشش برای مقایسه بهتر دو روش پلیمری پایه فیلامنتی و رزینی در سامانه چاپ سه بعدی DLP نیز در همان زاویه یکسان چاپ گردید. در نهایت قطعات استاندارد پلیمری ساخته شده با قطعه کامپوزیتی از منظر خواص میکروسکوپی و مکانیکی مقایسه و ارزیابی شده است [۱۳، ۱۴].

روش های ساخت افزایشی یا مدل سازی سریع، از نظر نوع مواد به صورت کلی به چهار دسته پایه پلیمری، فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی تقسیم بندی می شوند [۱]. ساخت قطعات پلیمری با ساختاری پیچیده اغلب با فرایندهای رایج تولید افزودنی نظیر ذوب بستر پودر، فتوپلیمریزاسیون<sup>۱</sup>، پاشش مواد و اکستروژن مواد، امکان پذیر است [۲]. روش تفجوشی لیزری انتخابی<sup>۲</sup> زیر مجموعه فرایند ذوب بستر پودر، روش های استریولیتوگرافی<sup>۳</sup>، پردازش دیجیتال نوری<sup>۴</sup>، چاپ پیوسته مایع واسط<sup>۵</sup>، لیتوگرافی محوری محاسباتی<sup>۶</sup> و پلیمریزاسیون دوفوتونی<sup>۷</sup> زیر مجموعه های فناوری فتوپلیمریزاسیون، روش های چاپ جوهر<sup>۸</sup> و ای جت<sup>۹</sup> زیر مجموعه فناوری پاشش مواد و زیر مجموعه های فناوری اکستروژن مواد به منظور ایجاد ساختارهای سه بعدی پلیمری به سه دسته مدل سازی لایه نشانی ذوبی<sup>۱۰</sup>، نوشتن جوهر مستقیم<sup>۱۱</sup> و چاپ الکترویهیدرودینامیک<sup>۱۲</sup> تقسیم بندی می شود [۳]. روش مدل سازی لایه نشانی ذوبی به عنوان روشی بسیار مقرون به صرفه و متداول در جهان شناخته می شود [۴]. این فناوری به عنوان یک رویکرد "پایین به بالا" با استفاده از نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر، مدل های سه بعدی توسط نرم افزارهای برشگر آماده سازی شده و فایل مدنظر به چاپگرهای ذوبی FDM جهت چاپ قطعه به صورت لایه به لایه ارسال می گردد. فیلامنت ها، مواد اولیه مورد استفاده در پرینترهای سه بعدی FDM بوده که با ایجاد حرارت، به حالتی نیمه جامد و شکل پذیر تبدیل شده و از نازل سامانه خارج می شود و با استفاده از مکانیزم های حرکتی همچون کارترین یا قطبی به تولید لایه به لایه قطعات پلاستیکی بر روی یک صفحه می پردازند. فیلامنت های پلیمری از جنس اکریلونیتریل بوتادین استایرن<sup>۱۳</sup>، اسید پلی لاکتیک<sup>۱۴</sup>، ترموپلاستیک پلی آرتان<sup>۱۵</sup>، پلی کربونات<sup>۱۶</sup> و پلی اتیلن ترفتالات گلیکول<sup>۱۷</sup> جزء مواد پر کاربرد در این روش محسوب می شوند [۵-۷]؛ اما اغلب موادی که در این روش مورد استفاده قرار می گیرند (مانند ABS، PC، پلی فنیل سولفون<sup>۱۸</sup> و

<sup>1</sup> Photopolymerization

<sup>2</sup> Selective laser sintering (SLS)

<sup>3</sup> Stereolithography (SLA)

<sup>4</sup> Digital Light Processing (DLP)

<sup>5</sup> Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

<sup>6</sup> Computed Axial Lithography (CAL)

<sup>7</sup> Two-Photon Polymerization (2PP)

<sup>8</sup> Inkjet Printing

<sup>9</sup> E-jet

<sup>10</sup> Fused deposition modeling (FDM)

<sup>11</sup> Direct-Ink-Writing (DIW)

<sup>12</sup> Electrohydrodynamic printing (EHDP)

<sup>13</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

<sup>14</sup> Poly Lactic Acid (PLA)

<sup>15</sup> Thermoplastic Polyurethane (TPU)

<sup>16</sup> Polycarbonate (PC)

<sup>17</sup> Polyethylene terephthalate glyco (PETG)

<sup>18</sup> Polyphenyl Sulfone (PPSU)

<sup>19</sup> Polyvinyl Butyral (PVB)

## ۲- مواد و تجهیزات

### ۱-۱- مواد

خواص مکانیکی قطعات علاوه بر کالیبراسیون دستگاه آزمون کشش نیاز است تا ابعاد نمونه مطابق با استاندارد ASTM D638-10 Type ۷ تهیه گردد. خواص مکانیکی قطعات توسط دستگاه آزمون کشش ۲/۵ تنی شرکت گالدابینی<sup>۵</sup> ایتالیا صورت پذیرفت (شکل ۱).

### ۳- ساخت فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni

به منظور ساخت فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni، ابتدا گرانول ABS (شکل ۳-الف) در ظرفی ریخته شده و سپس مایع آستون به عنوان حلال به آن اضافه می شود. این دو ماده با یک قاشق آزمایشگاهی مخلوط گردیده و سپس در یک دستگاه همزن گریز از مرکز با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شده است تا زمانی که پلیمر کاملاً حل شود. پس از آن پودر نیکل به درصد وزنی ۱۵٪ به محلول ABS اضافه می گردد. مجدداً مواد در همزن تا رسیدن به حالت یکنواختی مخلوط می شود. دوغاب ABS-Ni روی سطح صاف از جنس فویل ریخته شده و به طور یکنواخت پخش می شود. این ماده به مدت ۲ تا ۳ روز رها شده تا آستون حلال در ماده تبخیر شده و ماده جامد کامپوزیتی اولیه تشکیل گردد؛ سپس این ماده به صورت دانه های ریز، جهت استفاده در اکسترودر، تکه تکه می شود. بدین ترتیب گرانول کامپوزیت ABS-Ni با مقدار پودر نیکل ۱۵٪ وزنی تولید می گردد (شکل ۳-ب). ماردون اکسترودر وظیفه انتقال مواد کامپوزیتی خرد شده را تا خروج این مواد از قالب برعهده دارد. مواد کامپوزیتی در طول مسیر انتقال توسط المنت های حرارتی ذوب شده و در انتهای سیلندر فشار زیادی را ایجاد می کنند که در صورت غلبه موتور بر این مواد، رشته کامپوزیتی پیوسته ای از قالبی به خروجی قطر ۲ میلی متر، تولید می گردد (شکل ۳-ج). پس از خروج رشته کامپوزیتی پیوسته، این رشته با عبور از مخزن آب گرم توسط مکانیزم کششی در انتهای مسیر با سرعت معین تبدیل به فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni کاربردی در روش FDM می گردد (شکل ۳-د).

### ۴- روش آزمایش

یکی از متداول ترین روش های ساخت افزایشی قطعات پیچیده پلیمری، روش FDM است. با توسعه و تجاری سازی سامانه های FDM، بسیاری از شرکت ها، مدل های اولیه و قطعات مورد نیاز خود را با استفاده از این روش تولید می کنند. این شرکت ها بر اساس کاربرد هر قطعه، نوع فیلامنت خود را تعیین می کنند. بنابراین، در سال های اخیر تحقیقات بر روی بهبود و کارایی

گرانول های پلیمری ترموپلاستیک مورد استفاده، دارای ترکیبات شیمیایی از گروه های عاملی مختلف هستند. گرانول های پلی PLA، ABS و TPU در این آزمایش استفاده گردید. آستون<sup>۱</sup> به عنوان حلال برای ABS استفاده شد. پودر نیکل ۹۹٪ با ابعاد ذرات ۱۰ میکرومتر مؤسسه شیمیایی پوریان با خلوص بالا به عنوان فاز پراکنده انتخاب گردید. تمامی مواد بدون هیچ گونه خالص سازی بیشتر به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مقاله از رزین های فتوپلیمر خاکستری رنگ شرکت اینکیوبیک<sup>۲</sup> تحت عنوان "Resin A" و رزین مدل سازی صورتی رنگ پرویژن<sup>۳</sup> شرکت بسپار تکنولوژی تحت عنوان "Resin P" استفاده شده است. طول موج پخت به ترتیب برای رزین اینکیوبیک حدود ۴۰۵ نانومتر و برای رزین پرویژن در بازه ۳۸۵-۴۰۵ نانومتر می باشد (شکل ۱).

### ۲-۲- سامانه اکسترودر

سامانه اکسترودر تک ماردون طراحی و ساخته شده در این آزمایش، قابلیت ساخت انواع فیلامنت های پلیمری و کامپوزیتی را با قطر (۱/۷۵-۱/۸۵ میلی متر) برای استفاده در چاپگرهای سه بعدی FDM، دارا می باشد. میزان سرعت و دمای ذوب سامانه برای مواد گرانولی مختلف تنظیم شده است. پس از ساخت فیلامنت های تأیید شده، چاپگر سه بعدی ذوبی کارتزینی طراحی و ساخته شده، توانایی چاپ مدل های سه بعدی استاندارد تست کشش را با قطر نازل ۰/۴ میلی متر و سرعت چاپ ۲۵ میلی متر بر دقیقه برای دماهای ذوب متفاوت تا حداکثر ۲۶۰ درجه سانتی گراد را دارا می باشد. همچنین مدل های سه بعدی استاندارد در روش پردازش دیجیتال نوری DLP با استفاده از سامانه DLP طراحی و ساخته شده برای دو رزین متفاوت با ضخامت برش ۰/۰۵ میلی متر برای هر لایه، چاپ گردید. تمامی سامانه های استفاده شده در این پژوهش توسط تیم دانشجویی آلترا دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تهیه شده است (شکل ۱).

### ۲-۳- تست و آزمایش

خواص مورفولوژی و سطحی قطعات توسط میکروسکوپ نوری متالوژی، مدل MPL-1 شرکت مهندسی بل<sup>۴</sup>، با بزرگنمایی ۵۰x، ۱۰۰x و ۴۰۰x بررسی شده است. برای اطمینان از صحت نتایج

<sup>1</sup> C3H6O

<sup>2</sup> Anycubic

<sup>3</sup> Provision

<sup>4</sup> Bell Engineering

<sup>5</sup> GALDABINI

به صورت رشته های پیوسته تولید می شود. در نهایت با فیلامنت های مورد نظر، قطعات آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM D638-10 Type V توسط سامانه FDM با پارامترهای ورودی مشخص برای هر ماده مطابق جدول ۱ تولید گردید. در ادامه شرایط مورد نیاز برای تولید هر قطعه اشاره می شود.

فیلامنت های مورد نیاز این روش، اهمیت زیادی یافته است. به همین منظور در شکل ۲ با بررسی پلیمرهای پرکاربردی مانند ABS، PLA و TPU در روش مدل سازی لایه نشانی ذوبی به ساخت فیلامنت های پلیمری ذکر شده با قطر معین و استفاده از گرانول های موجود در بازار توسط سامانه اکسترودر تک ماردونی

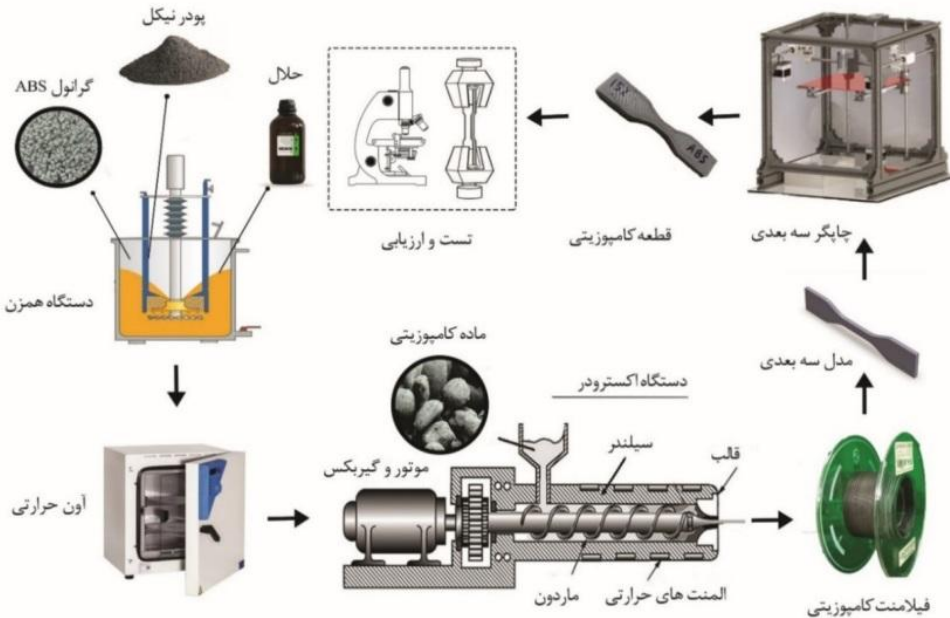


Fig. 1 The steps of making ABS-Ni composite filament for use in FDM 3D printing

شکل ۱ مراحل ساخت فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni به منظور استفاده در روش چاپ سه بعدی FDM



Fig. 3 Production and manufacturing steps of standard ABS-Ni composite part

شکل ۳ مراحل تولید و ساخت قطعه استاندارد کامپوزیتی ABS-Ni

با تنظیم دما و سرعت اکسترودر برای هر ماده، فیلامنت مورد نظر تهیه می شود. پس از ساخت فیلامنت، پارامترهای ورودی سامانه چاپ سه بعدی از قبیل دمای نازل، دمای صفحه چاپ، درصد پرشوندگی، سرعت چاپ و ضخامت هر لایه، برای هر ماده در نرم افزارهای برشگر تعیین می گردد.

Fig. 2 Granules and filaments produced with the extruder

شکل ۲ گرانول و فیلامنت های تولید شده با سامانه اکسترودر

جدول ۲ نتایج حاصل از تست کشش قطعات چاپ شده با درصد پرشوندگی ۱۰۰٪

Table 2 The results of the tensile test of printed parts with a infill percentage of 100%

ABS 100%	PLA 100%	ABS-Ni 100%	قطعه
37.64	49.96	33.72	تنش (N/mm <sup>2</sup> )
459.63	589.64	472.13	بارگذاری (N)
1.29	1.37	1.31	تغییر شکل (mm)
0.3	0.41	0.3	انرژی (j)
4.31	4.57	4.36	درازش (%)

جدول ۳ نتایج حاصل از تست کشش قطعات چاپ شده با درصد پرشوندگی ۵۰٪

Table 3 The results of the tensile test of printed parts with a infill percentage of 50%

ABS 50%	PLA 50%	TPU 50%	قطعه
33.41	45.27	15.06	تنش (N/mm <sup>2</sup> )
422.25	544.43	191.13	بارگذاری (N)
1.21	1.32	32.2	تغییر شکل (mm)
0.26	0.35	5.17	انرژی (j)
4.04	4.41	107.32	درازش (%)

شرایط انجام آزمایش، بر طبق جدول ۱ یکسان است. تنها تفاوت آن در میزان درصد پرشوندگی قطعات می باشد. در این آزمایش قطعات توپر با درصد پرشوندگی ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل افزایش دمای ذوب فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni و وجود ذرات نیکل در آن، دمای ذوب نازل سامانه چاپ سه بعدی از ۲۳۰ درجه سانتی گراد به ۲۴۰ درجه سانتی گراد تغییر یافت تا خروج ماده از نازل دستگاه به آسانی صورت گیرد؛ البته این امر کیفیت سطح و وضوح قطعه را تحت تأثیر قرار می دهد.

۴-۱-۲- خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش DLP به منظور مقایسه هر چه بیشتر روش مدل سازی ذوبی FDM با دیگر روش های ساخت افزایشی پلیمری، مدل سه بعدی استاندارد ASTM D638-10 Type V طراحی شده، در سامانه پردازش دیجیتال نوری با مکانیزم غشاء انعطاف پذیر نیز تولید گردید. روش پردازش دیجیتال نوری یکی از روش های ساخت افزایشی پلیمرها بوده که نحوه ساخت هر لایه با استفاده از تابش نور فرابنفش با طول موج معین به یک رزین حساس به نور انجام می گیرد [۱۵].

پارامترهای ورودی چاپ قطعات استاندارد تست کشش در جدول ۱ اشاره شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی چاپ قطعات در روش FDM

Table 1 Printing parameters in the FDM method				
ABS+Ni	TPU	PLA	ABS	جنس فیلامنت
235	193	180	227	دمای اکسترودر
9	9	9	9	سرعت اکسترودر
100	80	50	80	دمای صفحه چاپ
240	196	190	230	دمای نازل چاپ
-	50%	50%	50%	درصد پرشوندگی
100%	-	100%	100%	سرعت چاپ
30	30	30	30	

#### ۴-۱-۱- آزمایش خواص مکانیکی

##### ۴-۱-۱-۴- خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش FDM

پس از ساخت قطعات استاندارد استخوانی توسط سامانه FDM، بر اساس پارامترهای ورودی جدول ۱، قطعات توسط دستگاه آزمون کشش مورد ارزیابی قرار می گیرند (شکل ۴). برای افزایش صحت آزمایش های انجام شده، پارامترهایی همچون سرعت چاپ، ضخامت دیواره ها، الگوی پرشوندگی، قطر نازل و سرعت اکسترودر ثابت در نظر گرفته شده است.

بر طبق جدول ۳ نتایج حاصل از این آزمایش برای هر سه ماده TPU، ABS و PLA با درصد پرشوندگی ۵۰٪ و سرعت چاپ ۳۰ میلی متر بر دقیقه با قطر نازل ۰/۴ میلی متر و الگوی پرشوندگی خطی محاسبه شده است. در نتیجه مقادیر تنش، تغییر شکل، ازدیاد طول و انرژی اعمالی این قطعات پیش از شکست محاسبه می شود. در جدول ۲ نیز، با بررسی تأثیر درصد پرشوندگی ساختار درونی قطعه بر روی خواص مکانیکی و همچنین مقایسه این خواص مکانیکی با قطعه کامپوزیتی ABS-Ni، اندازه گیری شده است.

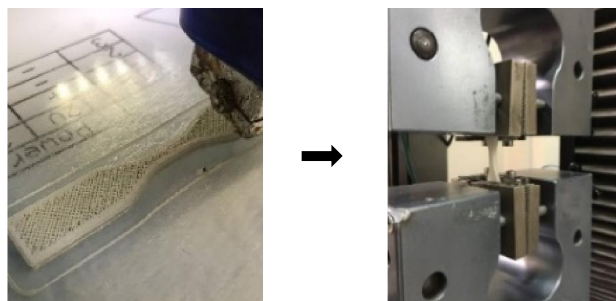


Fig. 4 Uniaxial tensile loading after printing the standard model

شکل ۴ بارگذاری کششی تک محوره بعد از چاپ مدل استاندارد

جدول ۴ نتایج حاصل از تست کشش قطعات چاپ شده با روش پردازش دیجیتال

نوری

Table 4 The results of the tensile test of printed parts with Digital light Processing method

Resin P	Resin A	قطعه
17.27	24.53	تنش (N/mm <sup>2</sup> )
176.75	251.25	بارگذاری (N)
2.04	3.02	تغییر شکل (mm)
0.2	0.5	انرژی (j)
7.79	10.07	درازش (%)

#### ۴-۲- آزمایش خواص میکروسکوپی

جهت تشخیص تغییرات سطوح و ساختار قطعات و مشاهده ذرات ریز در هر سطح، میکروسکوپها بهترین ابزار برای مشاهده هستند. میکروسکوپهای نوری به عنوان یکی از متداول ترین روشهای تصویربرداری و پایش سطوح قطعات شناخته می شوند؛ به همین منظور جهت مشاهده و مقایسه ساختاری پلیمرهای چاپ شده، ریزساختارهای کامپوزیتی و آرایش سطوح، از میکروسکوپ نوری استفاده گردیده است (شکل ۷).

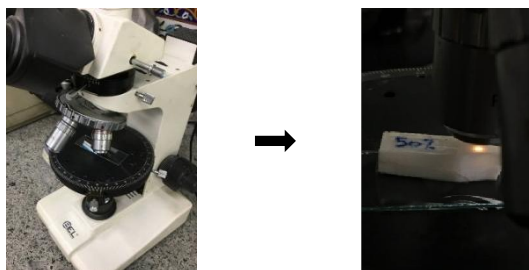


Fig. 7 Imaging of parts surfaces Using optical microscope

شکل ۷ تصویربرداری از سطوح قطعات توسط میکروسکوپ نوری

تصاویر به دست آمده بر اساس جنس پلیمر، روش تولید و ساختار کامپوزیتی دسته بندی می گردند. ابتدا تصاویر میکروسکوپی مدل های سه بعدی چاپ شده به روش FDM که از جنس پلیمرهای PLA، ABS، TPU هستند، ثبت می گردد. جهت بررسی بیشتر دو روش چاپ DLP و FDM، تصاویر میکروسکوپی قطعات تولید شده با این دو روش نیز مقایسه گردید. دلیل این مقایسه پی بردن به تأثیر فرایند چاپ بوده که در روش DLP به صورت صفحه ای و در روش FDM به صورت پیمایشی است. سپس تصاویر گرانول ABS، فیلامنت کامپوزیتی و قطعه کامپوزیتی استخوانی مقایسه می گردد تا تأثیر فرایند کامپوزیت سازی و ذرات میکرو کامپوزیت مشاهده گردد. همچنین تصاویر میکروسکوپی از سطوح این مدل های پلیمری با گرانول ABS، فیلامنت و مدل استخوانی کامپوزیتی ABS-Ni که به همان روش FDM

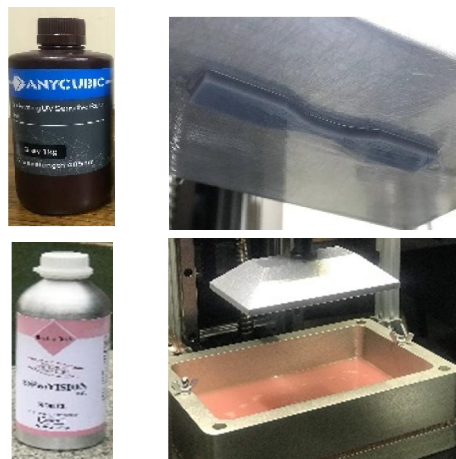


Fig. 5 photopolymer resins and optical digital processing device

شکل ۵ رزین های فتوپلیمر و سامانه پردازش دیجیتال نوری DLP

پس از ساخت هر لایه، سیستم برای چاپ لایه بعدی از غشاء بستر ظرف جدا شده و بر اساس ضخامت لایه تعیین شده در نرم افزار، لایه های بعد را چاپ می نماید. در این پژوهش قطعه استاندارد استخوانی شکل برای دو رزین Resin P و Resin A مطابق شکل ۶ به روش فرایند فتوپلیمریزاسیون با ماسک دینامیکی به صورت لایه به لایه در مدت زمان ۱۹ دقیقه ساخته می شوند؛ به طوری که این مدت زمان در روش مدل سازی ذوبی برای همین قطعه با ضخامت ۳/۲ میلی متر، حدود ۱۷ دقیقه به طول می انجامد. پس از چاپ قطعات در روش پردازش دیجیتال نوری، به دلیل ماهیت رزینی، ابتدا قطعات توسط الکل ایزوپروپیلن شستشو شده و سپس به مدت زمان ۱ ساعت برای انجام مراحل پایانی در معرض نور فرابنفش با طول موج ۴۰۵ نانومتر، قرار داده می شوند. پس از این مراحل و انعقاد کامل قطعات، انجام آزمون کشش و بررسی خواص مکانیکی ممکن می گردد (شکل ۶).

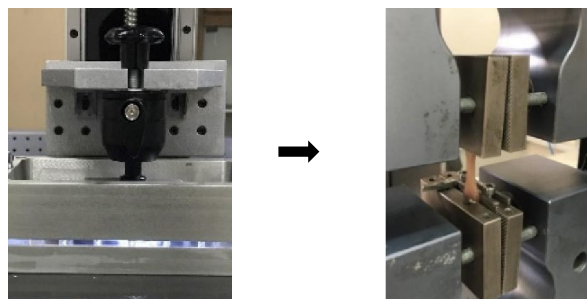


Fig. 6 Uniaxial tensile loading after printing the standard model

شکل ۶ بارگذاری کششی تک محوره بعد از چاپ مدل استاندارد

مطابق جدول ۴ داده های خواص مکانیکی برای قطعات ساخته شده از دو رزین A و P آورده شده است. نتایج اولیه تفاوت در ساختار مولکولی این دو رزین حساس به نور نسبت به هم و نسبت به روش مدل سازی ذوبی را نشان می دهد.

۵-۱-۱- بررسی تأثیر ساختار و جنس ماده پلیمری بر خواص مکانیکی

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، با شروع فرایند کششی و بارگذاری محوری بر قطعات توسط آزمون کشش، افزایش میزان ازدیاد طول در راستای طول قطعه، باعث تغییر شکل ساختاری و ایجاد تنش مکانیکی در مدل می گردد. روند نمودار جدول ۳ برای دو ماده ABS و PLA با درصد پرشوندگی ۵۰٪ تقریباً مشابه بوده و با عبور از ناحیه الاستیک و حد تسلیم، وارد ناحیه پلاستیک می شوند. میزان استحکام کششی برای دو ماده ABS و PLA به ترتیب ۳۳/۴۱ و ۴۵/۲۷ مگاپاسکال محاسبه می شود. در این آزمایش مطابق نمودار شکل ۹، پلیمر TPU، رفتار نسبتاً متفاوتی نسبت به دو ماده دیگر دارد. مطابق جدول ۳ به دلیل انرژی بیشتر پلیمر TPU نسبت به دو پلیمر ABS و PLA تا پیش از شکست، این پلیمر نسبت به دو پلیمر ABS و PLA، به ترتیب ۲۶/۵۶ و ۲۴/۳۳ برابر ازدیاد طول گسترده تری داشته و تغییر شکل و انعطاف پذیری بیشتری را نشان می دهند؛ هرچند که این قابلیت از میزان استحکام کششی مدل کاسته است. به طور کلی، بر اساس رفتار مکانیکی و شکل ظاهری شکست، پلیمرهای ABS و PLA در دسته بندی مواد نیمه-چکش خوار<sup>۱</sup> و پلیمر TPU جزء مواد الاستومر قرار می گیرند.

۵-۱-۲- بررسی تأثیر درصد پرشوندگی قطعات و ذرات نیکل بر خواص مکانیکی

در این آزمایش، مطابق جدول ۲ با افزایش ۲ برابری درصد پرشوندگی، تمامی قطعات کاملاً توپر ساخته شده است. ارزیابی های اولیه افزایش ۱۲٪ و ۹/۳۸٪ میزان استحکام کششی دو پلیمر ABS و PLA با درصد پرشوندگی ۱۰۰٪ را نسبت به مدل های آزمایش شده در جدول ۳ را با ۵۰٪ درصد پرشوندگی کمتر نشان می دهد. همچنین با توجه به شکل ۱۰ کامپوزیت پایه پلیمری ABS-Ni از رفتار مکانیکی ABS خالص پیروی می نماید. بر اساس نتایج حاصل شده از این آزمایش، استفاده از ذرات نیکل در کامپوزیت ABS-Ni استحکام کششی قطعه را به میزان ۱۱/۶۲٪ کاهش داده و تأثیر بسیار ناچیزی (<۱٪) در میزان افزایش ازدیاد طول قطعه مشاهده می شود.

برای درک بهتر این موضوع، در شکل ۱۱ تأثیر افزایش درصد پرشوندگی از ۵۰٪ به ۱۰۰٪ در دو ماده ABS و PLA نمایان گردیده است. بر طبق این شکل تغییر میزان پرشوندگی در تغییر رفتار ماده هنگام آزمون کشش مشهود است. برای مثال

تولید شده است، بررسی می گردد. تمامی تصویربرداری ها توسط میکروسکوپ مذکور، با بزرگنمایی ۵۰x، ۱۰۰x و ۴۰۰x در ناحیه گلوبی مدل های پولیشکاری شده که احتمال شکست در آن بیشتر است، صورت پذیرفته است.

۵- بحث و بررسی نتایج

برای بررسی و مقایسه هر چه بیشتر تأثیر جنس و ساختار مواد بر خواص مکانیکی و میکروسکوپی قطعات، آزمون های مورد نیاز صورت پذیرفت که نتایج آن ها در ادامه به بحث و بررسی گذاشته خواهد شد.

۵-۱- بررسی نتایج خواص مکانیکی

بر طبق شکل ۸ نمونه های آزمون کشش، قبل و بعد از آزمون مشاهده می شود. با توجه به نتایج آزمایش، با عبور از ناحیه الاستیک و پلاستیک قطعات، ناحیه شکست در میانه قطعه صورت گرفته است.

بر اساس مشاهدات مکانیک شکست، شکل ظاهری شکست در پلیمر TPU با دیگر مواد کامپوزیتی و پلیمری متفاوت است؛ اما این مسئله در ماده کامپوزیتی ABS-Ni با درصد ترکیب ۱۵٪ با مواد پلیمری، تفاوت چندانی را نشان نمی دهد. در شکل ۸، چهار نمونه اول به روش مدل سازی ذوبی FDM و دو نمونه آخر به روش پردازش دیجیتال نوری DLP توسط آزمون کشش محوری مورد بررسی قرار گرفته است.

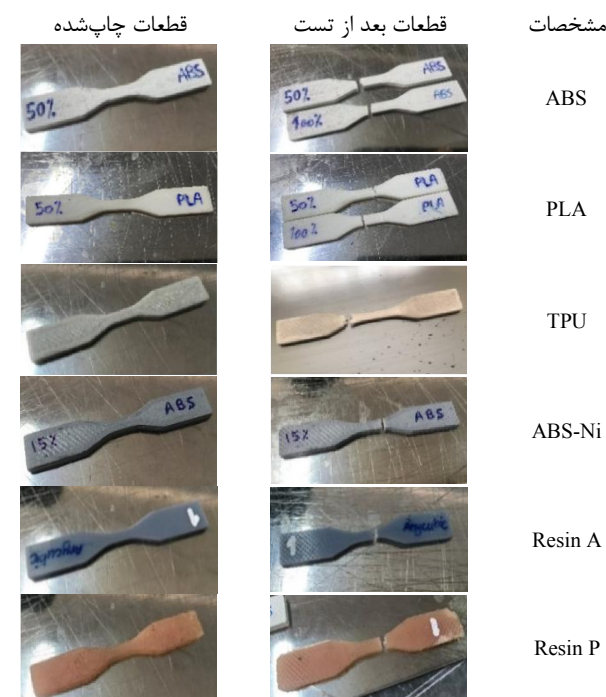


Fig. 8 Images of tensile test samples after loading

شکل ۸ تصاویر نمونه های آزمون کشش بعد از بارگذاری

<sup>۱</sup> Semi-ductile

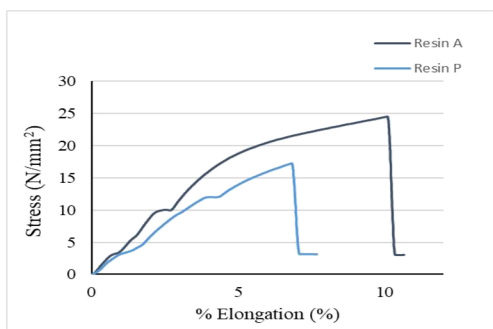


Fig. 12 Changes in elongation according to stress for parts printed in two resins, ResinA and ResinP

شکل ۱۲ بررسی تغییرات ازدیاد طول برحسب تنش برای قطعات چاپ شده در دو رزین ResinA و ResinP

۵-۱-۳- بررسی تأثیر نوع روش چاپ سه بعدی بر خواص مکانیکی در این پژوهش علاوه بر ساخت قطعات به روش مدل سازی ذوبی، رفتار مکانیکی این روش و تفاوت آن با دیگر روش های ساخت افزایشی پلیمری نیز بررسی گردید. همان طور که در جدول ۴ نیز مشخص است، با استفاده از سامانه ای با روش پردازش دیجیتال نوری، مدل های استخوانی آزمون کشش برای دو رزین متفاوت با مشخصات Resin A و Resin P با سرعت ۱۰ میلی متر بر دقیقه چاپ گردید. نمونه های چاپ شده قبل از انجام بارگذاری کششی برای مدت زمان معینی در محفظه نور فرابنفش قرار داده شده و پس از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمون کشش مطابق شکل ۱۲ نشان می دهد که علی رغم رفتار مشابه مکانیکی دو رزین، رزین مدل Resin A نسبت به رزین مدل Resin P دارای میزان استحکام کششی و ازدیاد طول بیشتری است؛ بنابراین خواص مکانیکی بهتر و کاربردی تر این رزین را نمایان می سازد. بر اساس جدول ۴، میزان استحکام کششی دو رزین A و P به ترتیب ۲۴/۵۳ و ۱۷/۲۱ مگاپاسکال می باشد. مقادیر استحکام کششی در روش DLP نسبت به استحکام کششی قطعات چاپ شده در روش FDM کمتر می باشد. بنابراین، یکی از دلایل استقبال بیشتر صنایع نسبت به روش FDM علاوه بر هزینه کمتر تولید، خواص مکانیکی مطلوب در این روش می باشد.

#### ۵-۲- بررسی نتایج خواص میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی 50x از سطوح سه پلیمر ABS، PLA و TPU در شکل ۱۳-الف-ب-پ پس از آزمون کشش از ناحیه گلوبی مدل استخوانی نشان می دهد که ساختار دو پلیمر ABS، PLA نسبت به پلیمر انعطاف پذیر TPU هموارتر و یکنواخت تر است. همچنین بر طبق تصاویر الف-ب خطوط پیمایشی نازل، در دو پلیمر ABS و PLA به صورت خطوط تیره

شکل نمودار در پرشوندگی ۵۰٪ برای هر دو پلیمر با شکل نمودار در پرشوندگی ۱۰۰٪ متفاوت است. همچنین مطابق انتظار میزان استحکام کششی پلیمر PLA برای هر دو حالت ساختاری نسبت به پلیمر ABS بیشتر می باشد. با توجه به جدول های ۲ و ۳، میزان استحکام کششی به ترتیب برای پلیمر PLA 100 و PLA 50 حدود ۴۹/۹۶ و ۴۵/۲۷ و برای ABS 100 و ABS 50 برابر با ۳۷/۶۴ و ۳۳/۴۱ مگاپاسکال می باشد.

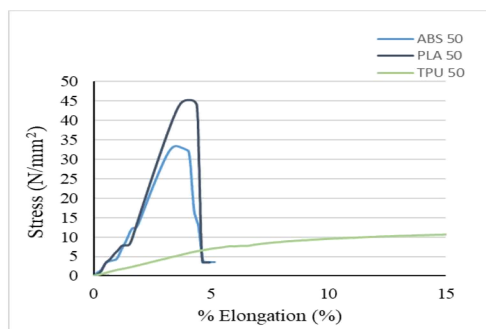


Fig. 9 Changes in elongation according to stress for ABS, PLA and TPU polymers with a infill percentage of 50%

شکل ۹ بررسی تغییرات ازدیاد طول برحسب تنش برای پلیمرهای ABS، PLA و TPU با درصد پرشوندگی ۵۰٪

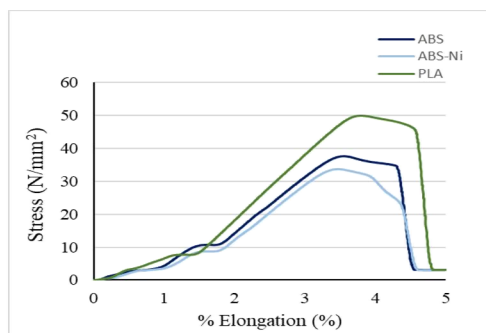


Fig. 10 Changes in elongation according to stress for ABS, PLA and ABS-Ni composite polymers with 100% infill percentage

شکل ۱۰ بررسی تغییرات ازدیاد طول برحسب تنش برای پلیمرهای ABS، PLA و کامپوزیت ABS-Ni با درصد پرشوندگی ۱۰۰٪

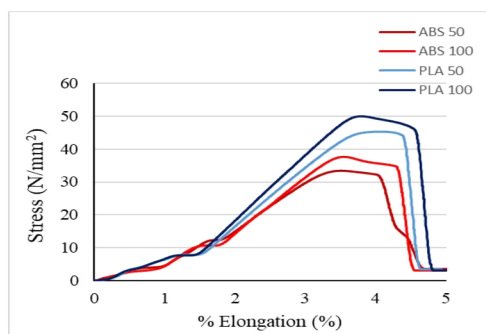


Fig. 11 Examining changes in elongation according to stress for ABS, PLA polymers with 100% and 50% infill percentage

شکل ۱۱ بررسی تغییرات ازدیاد طول برحسب تنش برای پلیمرهای ABS، PLA و با درصد پرشوندگی ۱۰۰٪ و ۵۰٪



تصاویر ۱۳-الف-ب-پ مربوط به روش چاپ پیمایشی FDM بوده و تصاویر ۱۳-ت-ج، مرتبط به روش چاپ صفحه‌ای DLP است. در روش DLP نسبت به روش FDM، تصاویر بدون خطوط پیمایشی دیده می‌شود و همین موضوع بر وضوح و کیفیت قطعات تولید شده در این روش می‌افزاید. همچنین شکل ۱۳-ت-ج، برای دو رزین A و P نشان می‌دهد که سطوح رزین A نسبت به رزین P با کیفیت تر و با اعوجاج کمتری صورت می‌پذیرد. بنابراین روش چاپ سه‌بعدی DLP روشی به نسبت دقیق تر محسوب می‌شود.

رنگی با فاصله در حدود ۴۰۰ میکرومتر مشخص بوده که این میزان فاصله، بر طبق قطر نازل دستگاه و سرعت پیشروی سیستم تنظیم می‌شود. البته در این پژوهش پارامتر سرعت پیشروی در تمامی قطعات چاپ شده در روش FDM ثابت در نظر گرفته شده است؛ اما خطوط پیمایشی نازل با بررسی‌های متعدد از سطوح مدل TPU به خوبی قابل مشاهده نیست. این مسئله، احتمالاً به دلیل خاصیت پلیمر TPU در اثر ازدیاد طول بیش از حد، منجر به کشیدگی و حذف این خطوط از سطح قطعه گردیده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود،

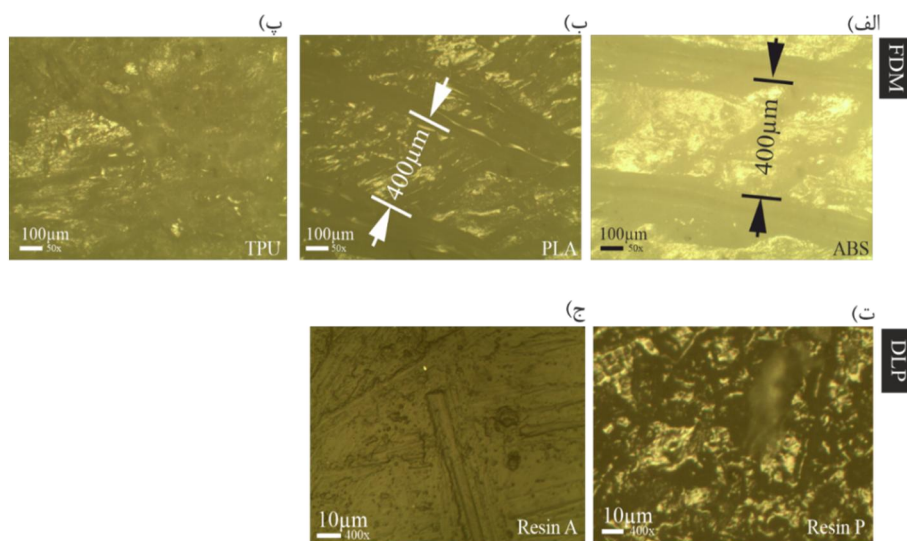


Fig. 13 Microscopic images of polymer parts printed using two FDM and DLP methods

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپی از قطعات پلیمری چاپ شده در دو روش FDM و DLP. الف) تصویر قطعه چاپ شده به روش ذوبی از جنس پلیمر ABS، ب) تصویر قطعه چاپ شده به روش ذوبی از جنس پلیمر PLA، پ) تصویر قطعه چاپ شده به روش ذوبی از جنس پلیمر TPU، ت) تصویر قطعه چاپ شده به روش فتوپلیمریزاسیون با رزین پروژن و ج) تصویر قطعه چاپ شده به روش فتوپلیمریزاسیون با رزین اینکیوبیک

مؤثر است. شکل ۱۴-الف-ب از گرانول ABS تهیه گردیده و در این تصویر تخلخل‌هایی که حاصل از فرایند تولید این گرانول است، بر روی سطح به خوبی مشخص است. در بزرگنمایی ۵۰ برابری به دلیل حالت قوسی گرانول، قسمت‌های بالایی و پایینی ساختار گرانول مشخص نیست به همین دلیل با دو برابر کردن میزان بزرگنمایی، ساختار واضح تر مشخص می‌گردد.

پس از ساخت گرانول‌های کامپوزیتی و تولید فیلامنت، این فیلامنت میکرو کامپوزیت مطابق شکل ۱۴-پ-ت تصویربرداری گردید. به دلیل ذوب مجدد گرانول‌ها توسط اکسترودر، سطح فیلامنت کامپوزیتی نسبت به گرانول ABS دارای یکپارچگی قابل توجهی است. همچنین با بزرگنمایی دو برابری، ذرات نیکیلی که در سطح فیلامنت وجود دارد مشخص گردیده است. شکل ۱۴-ث، تصویری از سطح قطعه استخوانی کامپوزیتی چاپ شده را نشان می‌دهد. به دلیل قطر میکرونی ذرات نیکل و به منظور

در بخش قبل تأثیر میکروذرات نیکل بر خواص مکانیکی قطعه چاپ شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مشاهده تأثیر کامپوزیت‌سازی بر ساختار قطعات چاپ شده، این مهم از دو منظر فرایند کامپوزیت‌سازی و بررسی میکروساختار مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه تصاویر میکروسکوپی به دست آمده از فرایند در دو بزرگنمایی ارائه گردید. جهت استنباط بهتر از این موضوع، فرایند ساخت میکروساختار کامپوزیتی ABS-Ni، شامل گرانول ABS، فیلامنت کامپوزیتی ساخته شده و قطعه استخوانی چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی FDM، با میکروسکوپ نوری مطابق شکل ۱۴ تصویربرداری گردید. شکل ۱۴-الف-پ-ث، به ترتیب تصاویر تهیه شده از سطوح گرانول ABS، فیلامنت کامپوزیت و قطعه چاپ شده است. شکل ۱۴-ب-ت-ج نیز همان تصاویر با بزرگنمایی بیشتر بوده که به منظور مشاهده دقیق تر بخصوص در مواردی که سطح نمونه کاملاً مسطح نیست، بسیار

مشاهده بهتر این ذرات، از بزرگنمایی ۴۰۰ برابری استفاده گردید و ذره نیکلی به قطر ۱۵ میکرون مشاهده و در تصویر

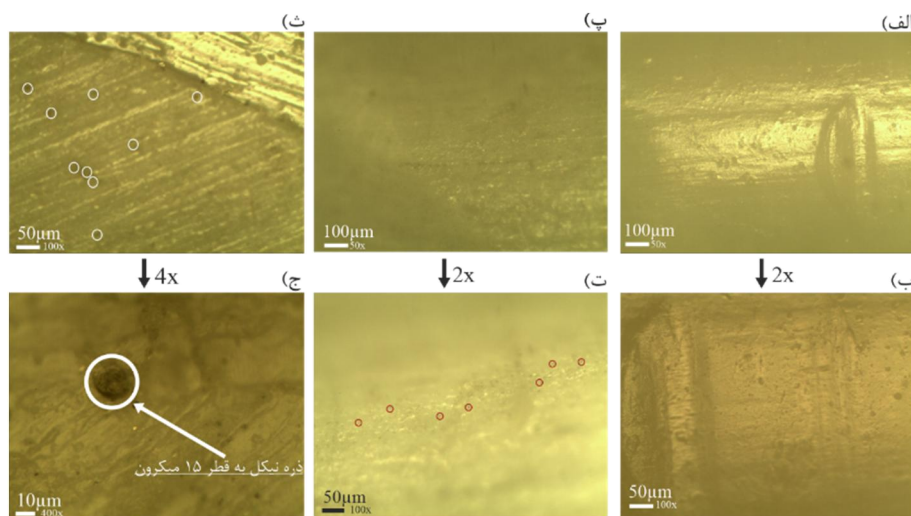


Fig. 14 Microscopic images of the manufacturing process of ABS-Ni micro composite part

شکل ۱۴ تصاویر میکروسکوپی از فرایند ساخت قطعه میکرو کامپوزیت. الف-ب) تصاویر گرانول ABS، پ-ت) تصاویر فیلامنت میکرو کامپوزیت و پراکندگی ذرات نیکل، ث-ج) تصاویر قطعه استاندارد کامپوزیتی ABS-Ni چاپ شده به روش FDM و ذرات نیکل

## ۶- نتیجه گیری

نسبت به مدل ABS غیر کامپوزیت می گردد. همچنین نتایج برآمده از سطح قطعات پلیمری ABS، PLA و TPU با خطوط پیمایشی، در قطعه ABS-Ni نیز مشاهده گردید. این در صورتی است که نتایج میکروسکوپی از سطح قطعات پلیمری در رزین A و P به دلیل ساختار صفحه‌ای، کیفیت مناسب تر روش DLP را نسبت به روش های FDM نشان می دهد.

با توجه به نتایج حاصل از خواص میکروسکوپی و مشاهدات ذرات پودر نیکل، به دلیل ایجاد تخلخل حاصل از ترکیب پودر نیکل و پلیمر ABS و با توجه به تأثیر این تخلخل بر خواص مکانیکی قطعه میکرو کامپوزیت، با افزایش میزان درصد اضافه نمودن پودر به ماتریس پلیمری، درصد استحکام کششی قطعه چاپ شده مورد بررسی قرار گرفت. بر طبق نتایج با افزایش ۱۵٪ میزان پودر نیکل، استحکام کششی قطعه ۱۱/۶۲٪ کاهش می یابد. این در صورتی است که این مسئله بر روی میزان درازش تأثیر چندانی ندارد، بنابراین کامپوزیت سازی پودر نیکل در کاربردهایی که میزان استحکام کششی قطعه در اولویت قرار ندارد، می تواند بسیار مؤثر باشد. از دیگر مواردی که بر روی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی مؤثر است، میزان پرشوندگی قطعه بوده که در این پژوهش برای دو پلیمر ABS و PLA بررسی گردید؛ به گونه ای که با تغییر میزان پرشوندگی از ۵۰٪ به ۱۰۰٪، میزان استحکام کششی در هر دو پلیمر به ترتیب ۱۲/۶٪ و ۹/۳۸٪ افزایش می یابد. همچنین

در این پژوهش به منظور دستیابی به ساختارهای متخلخل میکرو کامپوزیت در کاربردهای خاص، قطعه استاندارد ASTM D638 توسط سامانه طراحی و ساخته شده FDM چاپ گردید. قطعه استاندارد میکرو کامپوزیت ABS-Ni، از فیلامنتی با ترکیب ۱۵٪ وزنی پودر نیکل و پلیمر ABS ساخته و به عنوان ورودی به سامانه FDM داده شد. فیلامنت کامپوزیتی ABS-Ni با قطر یکنواخت در محدوده ۱/۷۵ میلی متر، توسط سامانه اکسترودر طراحی و ساخته شده، تولید گردید. به منظور انتقال مطلوب مواد در سیلندر ماردون اکسترودر بهترین روش استفاده از گرانول کامپوزیتی همان ماده است. مراحل ساخت گرانول کامپوزیتی مطابق بخش ۳ تهیه گردید. در نهایت این قطعه میکرو کامپوزیت ABS-Ni ساخته شده به روش FDM برای مقایسه با دیگر پلیمرهای (ABS، PLA و TPU) ساخته شده توسط همین روش و دو پلیمر (Resin A, Resin P) ساخته شده به روش DLP، از منظر خواص مکانیکی و میکروسکوپی بررسی گردید.

بر طبق نتایج به دست آمده از تصاویر میکروسکوپی سطوح نمونه ها و قطعات شکل ۱۴، علاوه بر مشاهده ساختار یکپارچه در فیلامنت میکرو کامپوزیت ABS-Ni، ذرات نیکل نیز در این کامپوزیت پایه پلیمری قابل مشاهده است. ذرات نیکل بر روی سطح قطعه، ذاتاً سیاه رنگ و پلیمر ABS به رنگ روشن بوده که این امر در نهایت منجر به تیره تر ساختن مدل استخوانی ABS-Ni

- printing learning environment for engineering education, *European Journal of Education Studies*. Vol. 7, No. 12, 2020. <http://dx.doi.org/10.46827/ejes.v7i12.3400>
- [5] J. Fernandes, A. M. Deus, L. Reis, M. F. Vaz, M. Leite, editors, Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA, *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*, Singapore, 2018.
- [6] N. A. Nguyen, C. C. Bowland, A. K. Naskar, A general method to improve 3D-printability and inter-layer adhesion in lignin-based composites, *Applied Materials Today*, Vol. 12, pp. 138-52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.03.009>
- [7] S. A. Raj, E. Muthukumar, K. Jayakrishna, A case study of 3D printed PLA and its mechanical properties, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, pp. 11219-26, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.146>
- [8] I. Blanco, The use of composite materials in 3D printing, *Journal of Composites Science*, Vol. 4, No. 2, pp. 42, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/jcs4020042>
- [9] V. Tokdemir, S. Altun, A case study of wood thermoplastic composite filament for 3D printing. *BioResources*. Vol. 17, No. 1, pp. 21, 2022. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.21-36>
- [10] S. V. Raut, A. Bongale, S. Kumar, A. Bongale, editors, Influence of metal powder reinforced polymer composite on the mechanical properties of injection moulded parts, *AIP Conference Proceedings; AIP Publishing LLC*, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0030157>
- [11] M. Hanon, L. Zsidai, editors, Sliding surface structure comparison of 3D printed polymers using FDM and DLP technologies, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing*, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/749/1/012015>
- [12] E. Mackiewicz, T. Wejrzanowski, B. Adamczyk-Cieślak, G. J. Oliver, Polymer-Nickel composite filaments for 3D printing of open porous materials, *Materials*, Vol. 15, No. 4, pp. 1360, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15041360>
- [13] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, A.M. Camacho, The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis, *Materials*, Vol. 11, No. 8, pp. 1333, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11081333>
- [14] T. Vukasovic, J. F. Vivanco, D. Celentano, C. Garcia-Herrera, Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3D printing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, pp. 4207-4218, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04194-z>
- [15] M. Salehi, S. Moayedi, J. Zamani. Investigating the effect of polyester UV absorber on the quality of printed polymer parts in Digital Light Processing method. *Modares Mechanical Engineering*. Vol. 22, No. 10, pp. 259-263, 2022. (in Persian)
- ساخت قطعه ABS با پرشوندگی ۵۰٪ تقریباً استحکامی مشابهی با قطعه میکرو کامپوزیت با پرشوندگی ۱۰۰٪ دارد که این امر به خوبی تأثیر تخلخل بر استحکام را نشان می دهد. پس از ساخت فیلامنت TPU، چاپ سه بعدی قطعه استاندارد به روش FDM و کامل تر شدن طیف مواد پر کاربرد امکان مقایسه رفتار میکرو کامپوزیت ABS-Ni با یک ماده انعطاف پذیر فراهم گشت. بر طبق داده های جدول های ۲ و ۳، استفاده از فیلامنت TPU باعث افزایش ۲۴ برابری در درازش قطعه گردید. از دیگر دستاوردهای این پژوهش مقایسه دو روش FDM و DLP بوده که با مقایسه جدول های ۴ و ۵ مشاهده گردید که قطعات چاپ شده با فناوری چاپ FDM، نسبت به DLP مستحکم تر بوده در صورتی که میزان درازش در قطعات چاپ شده با فناوری DLP بیشتر است. علاوه بر تأثیر نوع فرایند چاپ بر روی این قطعات، در بین دو رزین استفاده شده در این پژوهش، Resin A علاوه بر تولید قطعاتی با استحکام ۲۸/۳۷٪ بیشتر، مطابق شکل ۱۳-ت-ج از نظر کیفی نیز نسبت به Resin P برتر است.
- به عنوان جمع بندی، علاوه بر چاپ سه بعدی سازه استخوانی از ماده میکرو کامپوزیت ABS-Ni و مقایسه آن با طیف گسترده ای از مواد پلیمری از منظر خواص میکروسکوپی و خواص مکانیکی، دو روش FDM و DLP نیز از این نظر مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه با توجه به استفاده از مواد پر کاربرد در این دو روش، PLA به عنوان یک ماده مستحکم قابل استفاده در کاربردی های گوناگون، کامپوزیت ABS-Ni با تخلخل هایی از جنس میکروذرات نیکل و همچنین دمای ذوب بالاتر، و فتوپلیمر Resin A به عنوان دقیق ترین پلیمر با صافی سطح مناسب شناسایی گردید.

## ۷- مراجع

- [1] K. Deshmukh, A. Muzaffar, T. Kovářik, T. Křenek, M. B. Ahamed, S. K. Pasha, Fundamentals and applications of 3D and 4D printing of polymers: challenges in polymer processing and prospects of future research, *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials; Elsevier*, pp. 527-560, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00017-X>
- [2] A. E. Alexander, N. Wake, L. Chepelev, P. Brantner, J. Ryan, K. C. Wang, A guideline for 3D printing terminology in biomedical research utilizing ISO/ASTM standards, *3D Printing in Medicine*, Vol. 7, pp. 1-6, 2021. <https://doi.org/10.1186/s41205-021-00098-5>
- [3] L. Y. Zhou, J. Fu, Y. He, A review of 3D printing technologies for soft polymer materials, *Advanced Functional Materials*, Vol. 30, No. 28, pp. 187, 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.202000187>
- [4] A. Pikkarainen, H. Piili, A. Salminen, The design process of an occupationally safe and functional 3d