



## اثر درصد وزنی آلومینا بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت تولید شده به روش ساخت افزایشی پردازش نور دیجیتال

حسین ملکی<sup>۱</sup>، پرویز اسدی<sup>۲\*</sup>، زهرا کریمی<sup>۱</sup>، آرمان صدقی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: asadi@eng.ikiu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۶ آذر ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

پردازش نور دیجیتال

رزین استاندارد

نانوکامپوزیت

آلومینا

خواص مکانیکی

در این مطالعه تولید نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از فرایند پردازش نور دیجیتال (DLP) مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تأثیر ضخامت لایه چاپ در سه مقدار ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میکرومتر روی خواص کششی نمونه‌های رزینی خالص و کامپوزیتی و نیز مدت زمان چاپ بررسی شد. در ادامه با افزودن مقادیر مختلف نانو پودر آلومینیوم اکسید با اندازه‌ی ذرات ۵۰ nm به رزین، تأثیر درصد‌های مختلف نانو پودر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله استحکام کششی و مقاومت به سایش بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های با ضخامت لایه کمتر استحکام بهتری نسبت به نمونه‌های با ضخامت لایه بیشتر دارند. با کاهش ضخامت لایه از ۱۰۰ به ۷۵ و ۵۰ میکرومتر استحکام کششی در نمونه‌های خالص به ترتیب ۴ و ۸/۵۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش آلومینا تا ۲ درصد وزنی استحکام کششی ابتدا کاهش و سپس با ادامه افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده، استحکام کششی بهبود می‌یابد، به طوری که در نهایت با ۸ درصد وزنی آلومینا استحکام کششی نزدیک به ۱۶٪ نسبت به نمونه رزین خالص افزایش نشان می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش درصد وزنی آلومینا در نانوکامپوزیت، مقاومت به سایش ابتدا تضعیف و سپس بهبود می‌یابد و در نهایت (همانند استحکام کششی) در ۸ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، نرخ سایش ویژه نزدیک به ۶۷٪ نسبت به نمونه رزین خالص کاهش می‌یابد.

## Effect of weight percentage of alumina on mechanical properties of nanocomposite produced by additive manufacturing method of digital light processing

Hossein Maleki<sup>1</sup>, Parviz Asadi<sup>2\*</sup>, Zahra Karimi<sup>1</sup>, Arman Sedghi<sup>3</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3-Associate Professor, Materials Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

\* Corresponding Author's Email: asadi@eng.ikiu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 24 October 2023

Accepted: 27 November 2023

#### Keywords:

Digital Light Processing

Standard Resin

Nanocomposite

Aluminum

Mechanical Properties

### Abstract

In this study, the production of nanocomposite samples was investigated using digital light processing (DLP). First, the effect of the thickness of the printing layer in three values of 50, 75, and 100 micrometers on the tensile properties of neat and composite resin samples as well as the printing time was investigated. Next, by adding different amounts of aluminum oxide nanopowder with a particle size of 50 nm to the resin, the effect of different percentages of nanopowder on the mechanical properties of the samples, including tensile strength and wear resistance, was investigated. The results showed that samples with less layer thickness have better strength than samples with more layer thickness. By reducing the thickness of the layer from 100 to 75 and 50 micrometers, the tensile strength in neat samples increases by 4 and 8.55%, respectively. Also, with the increase of alumina up to 2% by weight, the tensile strength first decreases, and then with the continued increase in the number of reinforcing particles, the tensile strength improves, so that finally, with 8% by weight of alumina, the tensile strength shows an increase of nearly 16% compared to the neat resin sample. In addition, with the increase in the weight percentage of alumina in the nanocomposite, the wear resistance first weakens and then improves, and finally (similar to the tensile strength) at 8 weight percent of reinforcing particles, the specific wear rate decreases by nearly 67% compared to the neat resin sample.

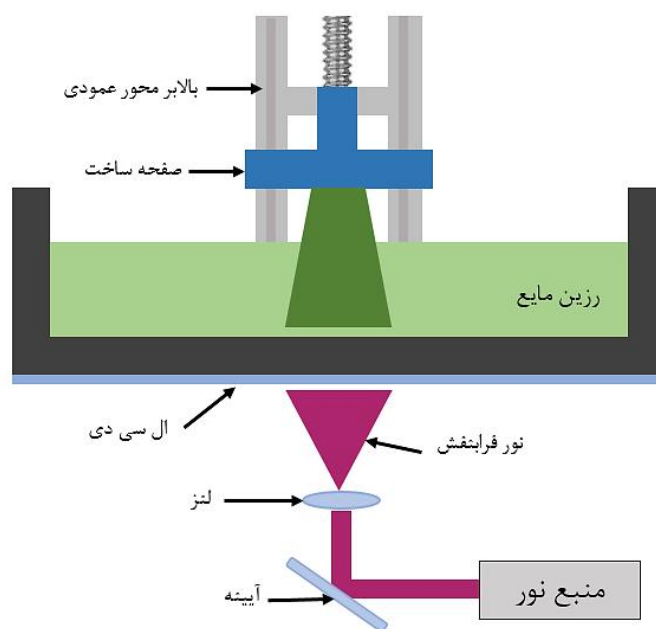
### Please cite this article using:

Maleki H, Asadi P, Karimi Z, Sedghi A. Effect of weight percentage of alumina on mechanical properties of nanocomposite produced by additive manufacturing method of digital light processing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 July 23;10(5):57-67. doi: 10.22034/IJME.2023.419202.1854 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

چاپ سه بعدی<sup>۱</sup> به عنوان یک فناوری توانمند برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای جدید در حال ظهور است [۱]. امروزه با توجه به پیشرفت صنعت، نیاز به قطعات با هندسه‌های پیچیده نیز افزایش یافته است از این رو دستیابی به هندسه مورد نظر با کمترین میزان خطا و بهترین کیفیت اهمیت می‌یابد که در بسیاری از موارد قالب‌گیری و ساخت را با مشکل مواجه می‌کند. در این میان ساخت افزایشی<sup>۲</sup> قادر به کمک به سیستم‌های تولید انبوه سنتی، با بهبود قابل توجه بهره‌وری قالب‌های تزریق است. از جمله دلایلی که سبب تقویت جایگاه چاپ سه بعدی در صنعت می‌شود، قابلیت سفارشی‌سازی محصول نهایی، و همچنین امکان ساخت اندازه کوچک بدون افزایش هزینه‌های ناشی از فرآیند تولید است. علاوه بر این، امکان ساخت قطعات با آزادی تقریباً کامل در طراحی را فراهم می‌کند، بنابراین می‌توان قطعات با پیچیدگی بالایی را به دست آورد. کوتاه شدن زنجیره تأمین و زمان انجام کار و کاهش هزینه‌های مونتاژ را می‌توان به عنوان سایر دلایل برشمرد. از این رو ساخت افزایشی تغییرات قابل توجهی را در هزینه تولید، مصرف انرژی و زمان تولید ایجاد می‌کند [۲]. پردازش نور دیجیتال<sup>۳</sup> یک روش تولید افزایشی مبتنی بر فتوپلیمریزاسیون<sup>۴</sup> است که به دلیل توانایی آن در ساخت محصولات با وضوح بالا و پرداخت سطح عالی و بدون زبری مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۳، ۴]. اما خواص مکانیکی محدود نمونه‌های پلیمری ساخته شده با پرینترهای سه بعدی، استفاده از این روش را محدود به کاربردهای خاص کرده است. کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن خواص خارق‌العاده روز به روز در صنایع مختلف بیشتر استفاده می‌شوند [۵]. از این رو تولید کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باعث بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ شده و در نتیجه باعث توسعه کاربردهای این نوع از پرینترهای سه بعدی در صنایع مختلف شده است. در فرایند پردازش نور دیجیتال، پلتفرم ساخت دستگاه در ظرفی از رزین مایع غوطه‌ور است و یک منبع نور دیجیتال مطابق هر لایه از قطعه نور تنظیم شده را روی فیلمی از رزین که بین سطح شفاف زیرین ظرف پر از رزین و پلتفرم دستگاه است پخش می‌کند. نور تابیده شده باعث سخت شدن رزین روی پلتفرم می‌شود و یک برش جامد از قطعه ایجاد می‌گردد. در لایه‌های بعدی فیلمی از رزین بین سطح شفاف و لایه تولید شده قبلی از قطعه کار قرار می‌گیرد. لایه‌ها روی هم ساخته می‌شوند تا زمانی که چاپ تکمیل شود [۳، ۴]. شکل ۱ نمونه‌ای از دستگاه چاپ سه بعدی پردازش نور دیجیتال و نحوه‌ی عملکرد آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱ دستگاه چاپ سه بعدی پردازش نور دیجیتال

<sup>1</sup> 3D Printing

<sup>2</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>3</sup> Digital Light Processing (DLP)

<sup>4</sup> Photopolymerization

محققان زیادی با توجه به اهمیت تولید قطعات کامپوزیتی به روش پردازش نور دیجیتال و آینده صنعتی آن‌ها به تحقیق و توسعه آن‌ها پرداخته‌اند. جو و چو<sup>۱</sup> [۶] مطالعات مقایسه‌ای را در مورد ساخت و بهینه‌سازی کامپوزیت‌های پلی یورتان<sup>۲</sup> با نانو مواد پلی آنیلین<sup>۳</sup> و ورق گرافن<sup>۴</sup> در چاپ سه‌بعدی نوع پردازش نور دیجیتال ارائه دادند. نانو مواد پلی آنیلین در تقویت انعطاف‌پذیری و چقرمگی کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/پلی‌آنیلین مؤثر بودند. اگرچه هم استحکام کششی و هم مدول یانگ کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/پلی‌آنیلین با افزایش غلظت پرکننده افزایش یافت اما اختلاف بین کامپوزیت‌های پلی‌یورتان و پلی‌یورتان/پلی‌آنیلین قابل توجه نبود. ورق گرافن یک پرکننده مناسب برای دستیابی به نمونه‌های پلی‌یورتان سخت‌تر و قوی‌تر پس از چاپ سه‌بعدی بود و علاوه بر این مدول یانگ کامپوزیت‌ها را افزایش داد. استحکام کششی کامپوزیت پلی‌یورتان/پلی‌آنیلین ۱/۴۱ برابر و کامپوزیت پلی‌یورتان/ ورق گرافن ۲/۱۹ برابر نسبت به پلی‌یورتان خالص افزایش یافت. آلخاندروکورتس<sup>۵</sup> و همکاران [۷] قابلیت‌های مکانیکی و سنجش کرنش کامپوزیت‌های رزین دما بالا (بر پایه آکریلات) تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی<sup>۶</sup> ساخته شده با فناوری چاپ سه‌بعدی پردازش نور دیجیتال و همچنین محتوای نانو لوله‌های کربنی و اثرات پخت ثانویه را ارائه دادند. با توجه به خواص مکانیکی، پخت ثانویه با اشعه ماوراءبنفش به طور قابل توجهی سفتی مواد را افزایش داد که توسط آزمایش‌های کششی و خمشی تعیین شد. از طرف دیگر، افزایش محتوای نانولوله‌های کربنی باعث کاهش مدول یانگ شد. بهترین نتایج از نظر حساسیت به کرنش را نیز برای کمترین محتوای نانو لوله‌های کربنی یافتند. سانو<sup>۸</sup> و همکاران [۸] دریافتند که الیاف شیشه‌ای ناپیوسته و پیوسته به طور قابل توجهی استحکام کششی و مدول یانگ را افزایش می‌دهند. آن‌ها در این مطالعه از پودر شیشه، الیاف شیشه و پارچه بافته شده با الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده برای چاپ نمونه‌ها استفاده کردند. استحکام کششی و مدول یانگ ۷/۲ و ۱۱/۵ برابر اندازه نمونه رزین بود و نشان داده شد افزودن فیبر شیشه و پودر شیشه می‌تواند تا ۵۰٪ وزنی باشد. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از این تقویت‌کننده‌ها در این روش تأثیر قابل توجهی در بهبود خواص دارد، اما الیاف بلند باعث ایجاد عیوب در سطح و مرزهای نمونه می‌شود و نیاز به پس پردازش دارد. ژائو<sup>۹</sup> و همکاران [۹] پرینت سه‌بعدی کامپوزیت‌های کولار را به روش پردازش نور دیجیتال ارائه دادند. این مطالعه کاربرد کولار با اندازه میکرومتر در رزین را برای استریولیتوگرافی<sup>۱۰</sup> ارزیابی کرد و نتایج نشان داد که پس از رسیدن محتوای کولار به ۷٪ وزنی، هنوز هم می‌توان جسم نمونه را چاپ کرد. پس از تابش نور فرابنفش و پخت حرارتی، استحکام و مدول یانگ کامپوزیت ۱/۷۹ برابر و ۱۱/۲ برابر بیشتر از رزین خالص شد. نرخ سایش کامپوزیت حدود ۵۰٪ کاهش یافت. در آزمون نوردی تک لایه، افزودن کولار باعث می‌شود رزین وضوح بهتری داشته باشد. جونگ<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۰] خواص مکانیکی رزین الاستومری مبتنی بر پلی‌اتر<sup>۱۲</sup> با ترکیب نانو ذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید<sup>۱۳</sup> را بررسی کردند. با ترکیب نانوذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید کافی در ماتریس الاستومری، ساختارهای پرینت سه‌بعدی استحکام و دوام بالایی را بدون ایجاد مشکل در پخت نشان دادند. استحکام کششی کامپوزیت با ۲۰٪ وزنی نانو ذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید ۸۸٪ (از ۳/۲۹ به ۶/۱۸ MPa) افزایش یافت. علاوه بر این، سختی به طور هم زمان ۵۲٪ افزایش یافت.

## ۲- مواد و روش‌ها

رزین استفاده شده، رزین استاندارد مشکی اینکیوبیک<sup>۱۴</sup>، ساخته شده از روغن سویا است که سازگار با محیط زیست است و دارای زمان پخت بهینه و حساس به نور فرابنفش (۳۵۵~۴۰۵ نانومتر) است. نانو پودر مصرفی نیز پودر آلومینا بایکالوکس<sup>۱۵</sup> با اندازه دانه ۵۰ nm

<sup>1</sup> Joo and Cho

<sup>2</sup> Polyurethane (PU)

<sup>3</sup> polyaniline (PANI)

<sup>4</sup> Graphene Sheet (GS)

<sup>5</sup> Alejandro Cortes

<sup>6</sup> Acrylate

<sup>7</sup> Carbon Nanotube (CNT)

<sup>8</sup> Sano

<sup>9</sup> Zhao

<sup>10</sup> Stereolithography

<sup>11</sup> Jeong

<sup>12</sup> Polyether

<sup>13</sup> Silicon Dioxide (SiO<sub>2</sub>)

<sup>14</sup> Anycubic

<sup>15</sup> Baikalox

است. وزن مواد مصرفی و نمونه‌های تولید شده با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی رادوگ<sup>۱</sup> با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی با توجه به میزان درصد تقویت‌کننده که در جدول ۱ مشخص شده است، رزین مصرفی و پودر مورد نیاز اندازه‌گیری شد و سپس رزین داخل بشر آزمایشگاهی ریخته و روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. پس از تنظیم دور همزن، پودر به آرامی به آن اضافه شد. بعد از اتمام پودر مورد نیاز، مخلوط رزین و پودر به مدت ۶۰ دقیقه هم زده شد تا مخلوط به خوبی همگن و از اجتماع پودر جلوگیری شود. برای ترکیب مواد از همزن مغناطیسی هایدولف<sup>۲</sup> و سرعت چرخشی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه (rpm) استفاده شد. پرینتر سه‌بعدی استفاده شده برای تولید نمونه‌ها پرینتر سه‌بعدی اینکیوبیک مدل فوتون مونو ایکس<sup>۳</sup> بود. برای شستشو و پخت ثانویه نمونه‌ها از دستگاه شستشو و بازپخت اینکیوبیک استفاده شد. استحکام کششی توسط دستگاه آزمون کشش سنتام<sup>۴</sup> با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام شد و برای قابلیت اطمینان نتایج، پیش بارگذاری ۵۰N در نظر گرفته شد. مقاومت به سایش نمونه‌های تولید شده به روش آزمون سایش پین روی دیسک اندازه‌گیری شد. آزمون سایش با سرعت خطی ۰/۲ m/s و نیروی عمودی ۵ N با استفاده از دیسک به قطر ۷ cm و سنبله با مش ۱۰۰۰ در دمای اتاق انجام شد. طراحی نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ISO 527-2 و طراحی نمونه‌های آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM-G99 صورت گرفت. پس از طراحی نمونه‌ها، با استفاده از نرم‌افزار چیتوباکس<sup>۵</sup> مشخصات و شرایط چاپ نظیر ضخامت لایه، مدت زمان تابش، محل قرارگیری نمونه در صفحه دستگاه و سرعت محور عمودی دستگاه هنگام چاپ برای نمونه‌ها مشخص شد و یک فایل خروجی از آن گرفته شد. برای ۵ لایه اول نمونه، مدت زمان تابش ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد تا نمونه به خوبی به صفحه چاپ دستگاه بچسبد و در ادامه مانع جدا شدن نمونه از صفحه شود. شکل ۲ نشان دهنده ابعاد نمونه‌های آزمون کشش و آزمون سایش می‌باشند. شکل ۳ الف فرایند تولید نمونه‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. برای مشاهده تأثیر ضخامت لایه روی استحکام کششی، نمونه‌ها در سه ضخامت لایه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میکرومتر ( $\mu\text{m}$ ) چاپ شدند. در ادامه نمونه‌های سایش در مطلوب‌ترین ضخامت لایه از نظر زمان تکمیل فرایند تولید و کیفیت خروجی تولید شد. زمان تابش برای تمامی نمونه‌ها ۵ ثانیه در نظر گرفته شد.

جدول ۱ مقادیر رزین و پودر تقویت‌کننده برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی مختلف

نمونه	رزین (g)	آلومینا (g)
رزین خالص	۱۰۰	-
۰/۵ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۹/۵	۰/۵
۱ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۹	۱
۱/۵ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۸/۵	۱/۵
۲ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۸	۲
۴ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۶	۴
۶ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۴	۶
۸ درصد وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3$	۹۲	۸

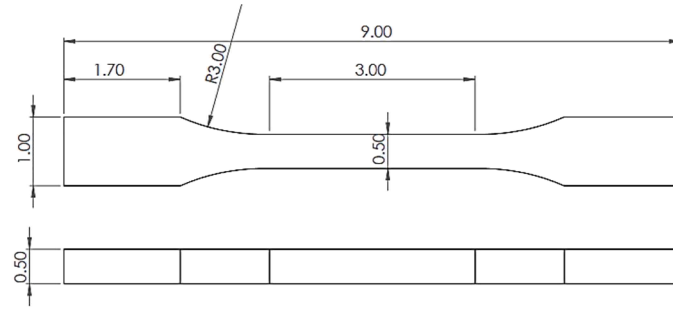
<sup>1</sup> Radwag

<sup>2</sup> Heidolph

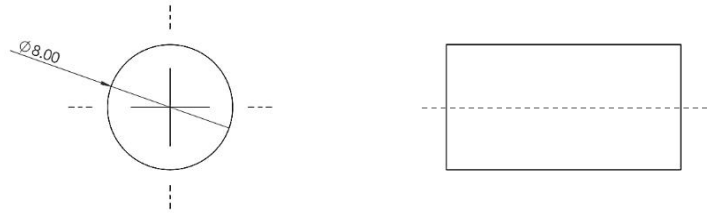
<sup>3</sup> Photon Mono X

<sup>4</sup> Santam

<sup>5</sup> Chitobox

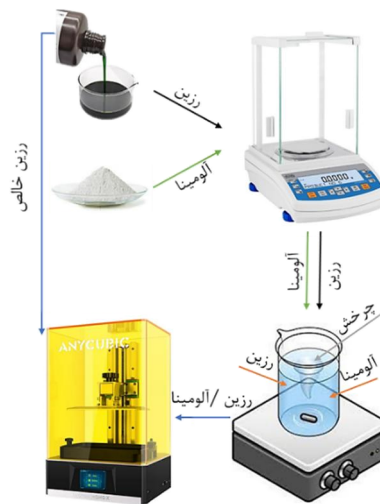


(الف)

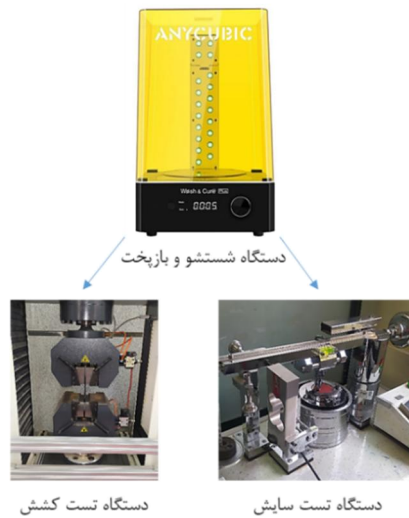


(ب)

شکل ۲ ابعاد نمونه (الف) آزمون کشش بر اساس استاندارد ISO 527-2، (ب) آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM-G99



(الف)



(ب)

شکل ۳ (الف) فرایند آماده‌سازی و چاپ نمونه‌ها، (ب) فرایند شستشو، بازیخت و آزمون‌های انجام‌شده

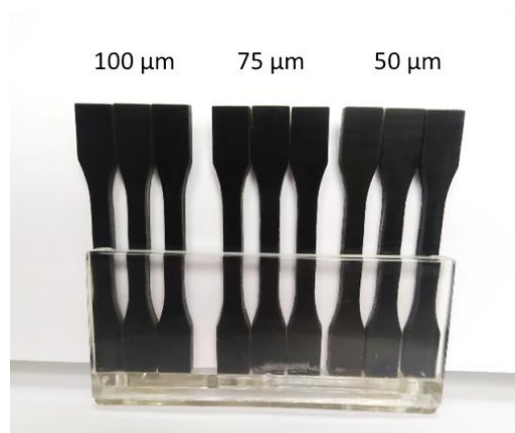
پس از اتمام چاپ، نمونه‌های تولید شده به خوبی با استفاده از الکل تمیز شدند و برجستگی و عیوب سطحی نمونه‌ها با استفاده از سوهان برطرف شد. نمونه‌های کشش و سایش به مدت ۳ دقیقه داخل دستگاه بازپخت در معرض نور فرابنفش قرار داده شد. شکل ۳ ب فرایند شستشو و بازپخت و آزمون‌های انجام شده را نشان می‌دهد. قبل از انجام آزمون سایش تمامی نمونه‌ها با ترازو آزمایشگاهی وزن شد و پس از انجام آزمون نیز مجدد وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد و در نهایت نرخ سایش ویژه نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد.

$$w_s = \frac{m}{d \times F} \quad (1)$$

که  $w_s$  نرخ سایش ویژه،  $m$  میزان جرم ساییده شده برحسب کیلوگرم،  $d$  مسافت پیموده شده برحسب متر و  $F$  نیروی اعمالی برحسب نیوتن است.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۴ نمونه‌های تولیدی آزمون کشش و سایش را نشان می‌دهد. خواص نمونه‌های تولید شده در شرایط مختلف بررسی شد و تأثیر عواملی مانند ضخامت لایه در هر مرحله پخت و درصد نانو مواد تقویت‌کننده آلومینا بر استحکام کششی و مقاومت به سایش نمونه‌ها مشخص شد که در ادامه به بررسی هر کدام از آن‌ها پرداخته شده است.



(الف)



(ب)

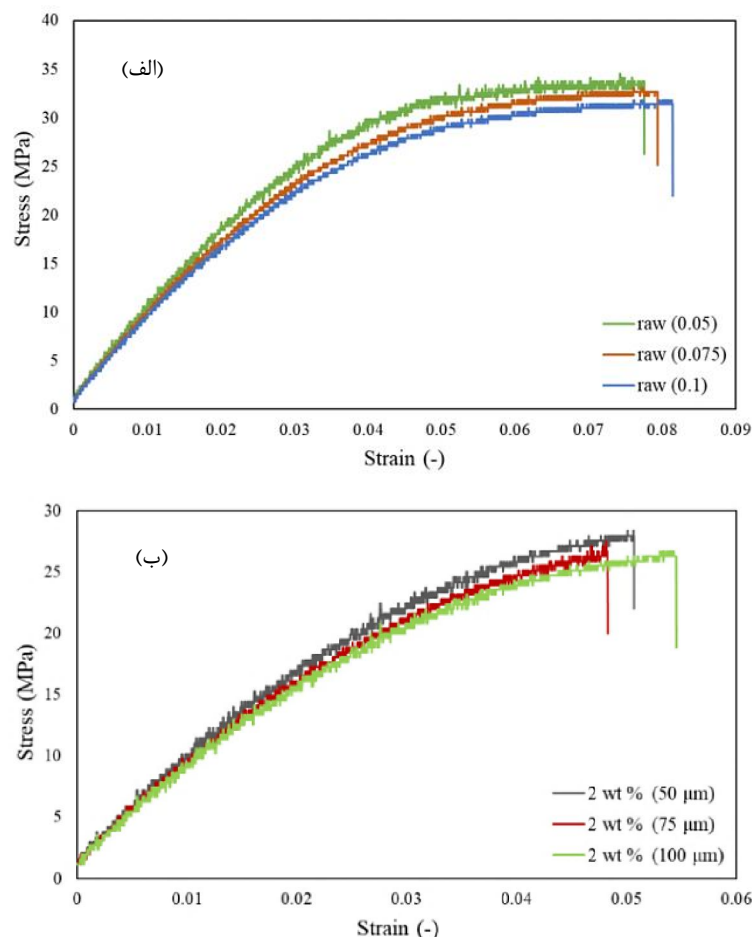
شکل ۴ الف) نمونه‌های آزمون کشش با درصد تقویت‌کننده ثابت و ضخامت لایه مختلف، ب) نمونه‌ی چاپ‌شده آزمون سایش.

#### ۳-۱- تأثیر ضخامت لایه بر استحکام کششی

ضخامت لایه یکی از عوامل مهم در کیفیت نمونه‌ها است و در خواص نمونه‌ها نقش به‌سزایی دارد. برای به دست آوردن تأثیر ضخامت لایه، نمونه‌های با ابعاد و شرایط چاپ یکسان (زمان تابش ۵ ثانیه) در سه ضخامت لایه ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰  $\mu\text{m}$  چاپ شدند. انتظار می‌رفت با کاهش ضخامت لایه با توجه به پخت بهتر هر لایه و همچنین افزایش تعداد لایه‌ها در همان ابعاد، استحکام نمونه‌ها افزایش یابد و خواص بهتری از خود نشان دهد. پس از انجام آزمون کشش و به دست آوردن استحکام کششی نمونه‌ها طبق شکل ۵ الف، مشخص شد نمونه‌های با ضخامت لایه کمتر استحکام بهتری نسبت به نمونه‌های با ضخامت لایه بیشتر دارند به طوری که استحکام کششی

نمونه با ضخامت  $50 \mu\text{m}$  تقریباً  $8/55\%$  و نمونه با ضخامت  $75 \mu\text{m}$  تقریباً  $4\%$  نسبت به نمونه با ضخامت  $100 \mu\text{m}$  بیشتر شد. به طور کلی، بیشترین مقاومت کششی در ضخامت لایه  $50 \mu\text{m}$  (کمترین ضخامت هر لایه چاپ) به مقدار  $34/52 \text{ MPa}$  در نمونه خالص مشاهده شد. علت این امر به این دلیل است که استحکام نمونه‌های چاپ شده با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد [۱۱]. به نظر می‌رسد با کاهش ضخامت چاپ هر لایه از یک‌سو، پخت با کیفیت‌تر انجام می‌شود و احتمال تشکیل عیب در بین لایه‌ها کاهش می‌یابد؛ و از سوی دیگر در صورت به وجود آمدن عیب در بین لایه‌های چاپ، اندازه آن کوچک‌تر بوده و اثر منفی آن بر استحکام کمتر است. این بهبود در خواص کششی قطعات چاپ شده هنگامی که ضخامت لایه چاپ کاهش می‌یابد در سایر تحقیقات منتشر شده نیز مشاهده شد [۱۲، ۱۳]. اما با توجه به اینکه در ابعاد ثابت، ضخامت لایه کمتر به معنی تعداد لایه‌های بیشتر است، بنابراین زمان چاپ نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در نمونه‌های بدون پودر، مدت زمان چاپ از ۱۵ دقیقه در نمونه با ضخامت لایه‌های  $100 \mu\text{m}$  به حدود ۲۵ دقیقه در نمونه با ضخامت لایه‌های  $50 \mu\text{m}$  افزایش یافت که استهلاک تجهیزات را به همراه دارد.

تأثیر ضخامت لایه بر کامپوزیت  $2\%$  وزنی آلومینا نیز بررسی شد تا رفتار کامپوزیت‌ها در ضخامت لایه‌های متفاوت نیز مشخص شود. با توجه به شکل ۵ ب ضخامت لایه تأثیر اندکی بر استحکام نمونه‌ها داشت و با کاهش ضخامت لایه از  $100 \mu\text{m}$  به  $50 \mu\text{m}$  استحکام از  $26/68$  به  $28/38 \text{ MPa}$  افزایش یافت.

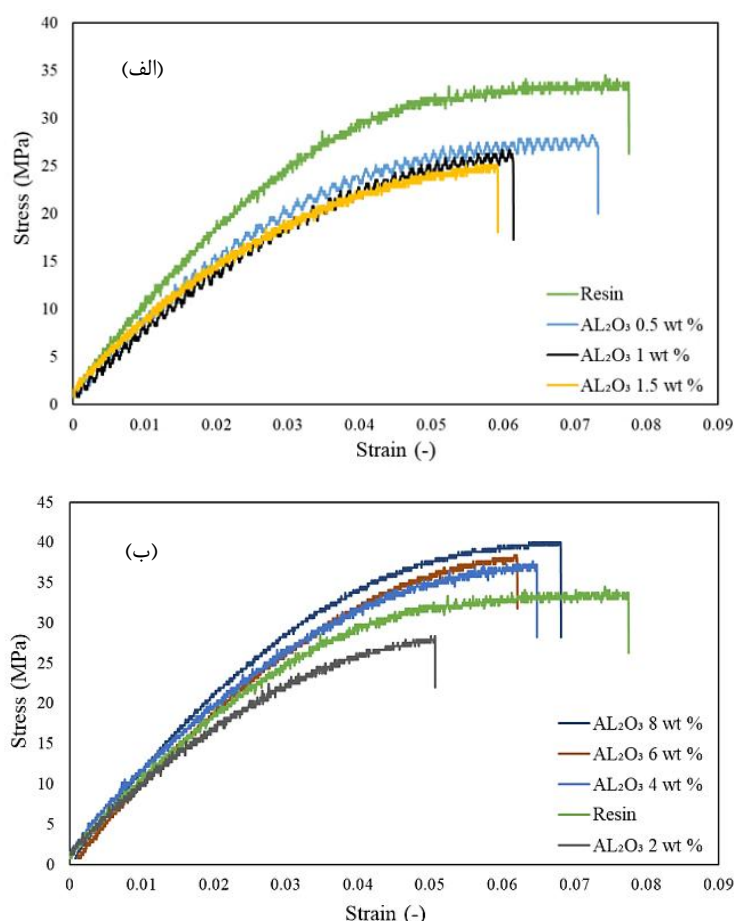


شکل ۵ منحنی تنش کرنش (الف) نمونه‌های تولیدشده خالص در ضخامت لایه‌های متفاوت، (ب) نمونه‌های تولیدشده  $2\%$  وزنی آلومینا در ضخامت لایه‌های متفاوت

### ۳-۲- تأثیر آلومینیوم اکسید بر استحکام کششی

با توجه به درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، استحکام کششی نمونه‌ها در دو مرحله بررسی شد. مرحله اول کامپوزیت‌های زیر  $2\%$  درصد وزنی تقویت‌کننده و مرحله دوم کامپوزیت‌های بالای  $2\%$  درصد وزنی تقویت‌کننده. با توجه به نتایج مرحله اول طبق شکل ۶ الف با

افزایش غلظت تقویت کننده استحکام کششی نمونه‌ها روند کاهشی داشت و با افزایش غلظت از ۰/۵ تا ۱/۵٪ در هر مرحله استحکام کششی نسبت به مرحله قبل کاهش یافت. در کامپوزیت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ وزنی آلومینا استحکام کششی نسبت به نمونه رزین ساده به ترتیب ۱۸/۲٪، ۲۲/۷٪ و ۲۷/۲٪ کاهش یافت. انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز به طور مشابه با افزایش درصد تقویت‌کننده کاهش یافت. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که رفتار مکانیکی با ادغام آلومینا در مقادیر تا ۲٪ بهبود نیافته است. این رفتار ممکن است به حباب‌های ایجاد شده به دلیل افزودن آلومینا نسبت داده شود که افزایش تقویت‌کننده باعث ایجاد منافذ و تخلخل در ساختار نمونه شود [۱۴]. همچنین ممکن است در مقادیر زیر ۲٪ مقدار کلی نانوذرات آلومینا در حدی نباشد که بتواند پخش ذرات یکنواخت در زمینه رزین داشته و اثر تقویتی نشان دهد. اما با توجه به شکل ۶ استحکام کششی برای نمونه‌های تولید شده با نانو ذرات تقویت کننده در مقادیر بالای ۲٪ روند صعودی داشت و به مرور استحکام و انعطاف‌پذیری بهبود یافت. در کامپوزیت ۲٪ وزنی استحکام کششی نسبت به نمونه رزین ساده ۱۹٪ کاهش یافت ولی در کامپوزیت‌های ۴ و ۶٪ وزنی به ترتیب ۹ و ۱۱٪ افزایش یافت و نهایتاً در ۸٪ وزنی با کاهش جزئی انعطاف‌پذیری، استحکام با افزایش حدود ۱۶٪ نسبت به رزین ساده از ۳۴/۵ به ۴۰ MPa رسید. مقادیر بالای ۸٪ نیز قابلیت چاپ با دستگاه پرینتر سه‌بعدی را نداشتند و رزین از حالت طبیعی خارج شده و به دلیل مقاومت ذرات تقویت‌کننده در برابر عبور نور، لایه‌ها در مدت زمان ۵ ثانیه‌ی تنظیم شده در این مطالعه به اندازه کافی سفت نمی‌شدند که بتوان فرایند چاپ را ادامه داد. البته با افزایش زمان چاپ، امکان تولید نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصد وزنی بالاتر از ۸٪ وجود خواهد داشت که به دلیل یکسان نبودن پارامترهای فرایندی قابل مقایسه با سایر نتایج این مطالعه نخواهد بود.

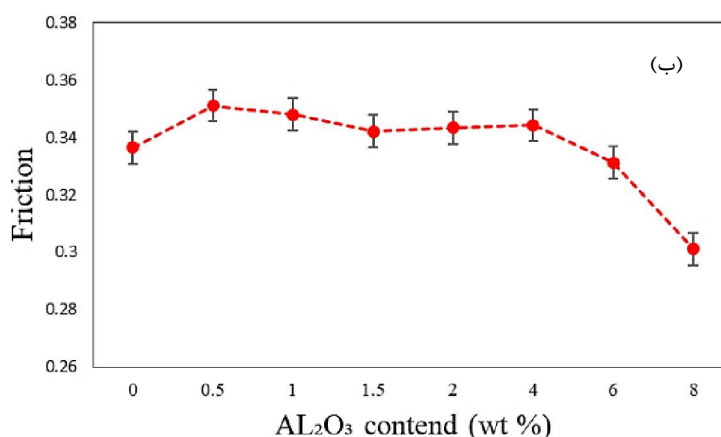
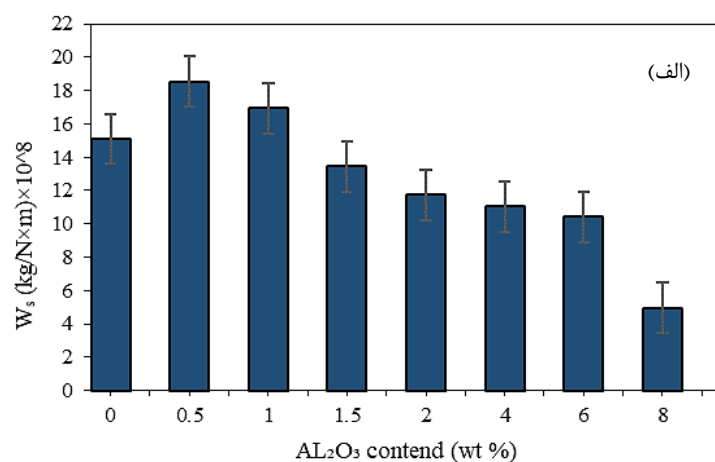


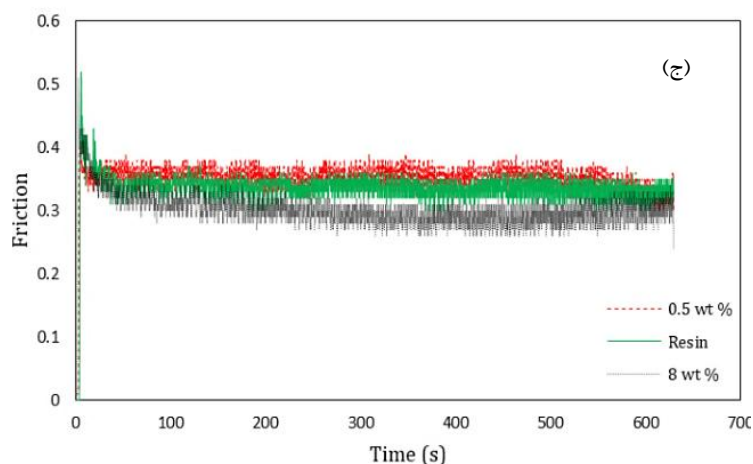
شکل ۶ مقادیر استحکام کششی (الف) نمونه‌های خالص و مرکب به ازای غلظت‌های بالای ۲٪؛ (ب) نمونه‌های خالص و مرکب به ازای غلظت‌های بالای ۲٪.



## ۳-۳- تأثیر آلومینا بر مقاومت به سایش

یکی از معیارهای مهم در خواص مواد پلیمری، مقاومت به سایش آن‌ها است و عوامل و متغیرهای بسیاری بر روی پدیده سایش مؤثر هستند. نمونه‌های آزمون سایش تولید شده بدون پودر و نیز نانو کامپوزیت‌های تولید شده با درصد وزنی مختلف از تقویت‌کننده تحت آزمون سایش قرار گرفتند تا تأثیر افزودن نانوذرات تقویت‌کننده آلومینا و نیز مقدار آن بر مقاومت به سایش نمونه‌ها مشخص شود. ضخامت لایه در تمامی نمونه‌ها  $75 \mu\text{m}$  در نظر گرفته شد. نرخ سایش ویژه در نمونه‌های مختلف تولید شده در شکل ۷ الف آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است مقاومت به سایش نمونه‌های نانو کامپوزیتی در مقایسه با نمونه بدون پودر ابتدا کاهش یافته و در درصدهای بالاتر روند افزایشی داشت. در درصدهای تقویت‌کننده  $0/5$  و  $1$ ٪ نرخ سایش ویژه نمونه‌ها نسبت به نمونه رزین ساده به ترتیب  $22/7$  و  $12/18$ ٪ افزایش یافته و به همین میزان مقاومت به سایش کمتری نشان دادند. اما در درصدهای تقویت‌کننده  $1/5$ ،  $2$ ،  $4$ ،  $6$  و  $8$ ٪ نرخ سایش ویژه نمونه‌ها نسبت به نمونه رزین ساده به ترتیب  $11$ ،  $22$ ،  $27$ ،  $31$  و  $67$ ٪ افزایش یافت. به نظر می‌رسد در مقادیر پایین نانوذرات تقویت‌کننده در زمینه پلیمری، توزیع یکنواختی از آن‌ها وجود ندارد و این باعث تضعیف اتصال مواد پلیمری به یکدیگر شده و یکپارچگی را در ساختار قطعه تولید شده کاهش می‌دهد. این امر سبب می‌شود مقاومت به سایش کاهش یافته و لایه‌های سطح قطعه در مواجهه با سطح ساینده به راحتی از هم جدا شده و نرخ سایش بالا رود. اما با افزایش مقادیر نانو ذرات در ساختار نمونه تولید شده، این ذرات در حین آزمون سایش به عنوان یاتاقان عمل کرده و مانع از برخورد سطح ساینده با مواد پلیمری قطعه می‌گردد. در نتیجه ضریب اصطکاک نیز کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب اصطکاک نمونه‌های تولید شده در شکل ۷ ب و نمودار ضریب شکست نمونه‌ی رزین خالص و نمونه‌های کامپوزیتی  $0/5$  و  $1/8$ ٪ در شکل ۷ ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ضریب اصطکاک رابطه مستقیمی با نرخ سایش ویژه داشت و در حضور مقادیر بالا از نانوذرات تقویت‌کننده ضریب اصطکاک کاهش یافت.





شکل ۷ مقادیر الف) نرخ سایش ویژه برای نمونه‌های خالص و کامپوزیتی، ب) ضریب اصطکاک برای نمونه‌های خالص و کامپوزیتی ۰/۵ و ۰/۸، ج) ضریب اصطکاک برای

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌های رزین خالص و نانوکامپوزیتی چاپ شده با استفاده از روش پردازش نور دیجیتال بررسی شد. سه ضخامت لایه چاپی (۷۵، ۵۰، و ۱۰۰  $\mu\text{m}$ ) در طول ساخت نمونه‌ها استفاده شد و هفت غلظت مختلف آلومینا (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۴، ۶ و ۸٪) مورد آزمایش قرار گرفت. تأثیر ضخامت لایه چاپ و درصد وزنی تقویت‌کننده نیز ارزیابی شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد: - بالاترین مقاومت کششی در نمونه‌های رزین خالص با کمترین ضخامت لایه (۵۰  $\mu\text{m}$ ) مشاهده شد که تقریباً ۸/۵۵٪ نسبت به نمونه با ضخامت ۱۰۰  $\mu\text{m}$  بیشتر شد که دلیل آن افزایش تعداد لایه‌ها و پخت بهتر هر لایه در نتیجه کاهش عیوب در ساختار نمونه بود.

- کمترین استحکام کششی در نمونه ۱/۵٪ وزنی آلومینا مشاهده شد که به دلیل عدم پخش ذرات به صورت یکنواخت در زمینه رزین و ایجاد منافذ و تخلخل در ساختار نمونه در درصدهای پایین پرکننده نسبت داده شد و بیشترین استحکام کششی در نمونه ۰/۸٪ وزنی آلومینا مشاهده شد.

- کامپوزیت ۲٪ وزنی آلومینا به عنوان نقطه عطف استحکام کششی نمونه‌ها شناسایی شد زیرا در درصدهای پایین‌تر با افزایش درصد وزنی آلومینا، روند استحکام کششی نمونه‌ها نزولی و در درصدهای بالاتر با افزایش درصد، روند صعودی بود.

- بیشترین مقاومت به سایش در نمونه با ۰/۸٪ وزنی آلومینا و کمترین مقدار در نمونه ۰/۱٪ وزنی آلومینا مشاهده شد که به دلیل عدم یکنواختی توزیع نانو ذرات در زمینه رزین در درصدهای کم نانو ذرات بود که باعث تضعیف اتصال رزین شد.

#### References

- [1] Lee JY, A J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied materials today. 2017 Jun 1; 7:120-33. doi: 10.1016/j.apmt.2017.02.004
- [2] Khosravani MR, Reinicke T. On the environmental impacts of 3D printing technology. Applied Materials Today. 2020 Sep 1; 20:100689. doi: 10.1016/j.apmt.2020.100689
- [3] Li Y, Mao Q, Li X, Yin J, Wang Y, Fu J, Huang Y. High-fidelity and high-efficiency additive manufacturing using tunable pre-curing digital light processing. Additive Manufacturing. 2019 Dec 1; 30:100889. doi: 10.1016/j.addma.2019.100889
- [4] Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mülhaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. Chemical reviews. 2017 Aug 9;117(15):10212-90. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074
- [5] Halimi F, Golzar M, Asadi P, Beheshty MH. Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding. Journal of composite materials. 2013 Jul;47(15):1853-63. doi: 10.1177/0021998312451763
- [6] Joo H, Cho S. Comparative studies on polyurethane composites filled with polyaniline and graphene for DLP-type 3D printing. Polymers. 2020 Jan 2;12(1):67. doi: 10.3390/polym12010067
- [7] Cortés A, Sánchez-Romate XF, Jiménez-Suárez A, Campo M, Ureña A, Prolongo SG. Mechanical and strain-

- sensing capabilities of carbon nanotube reinforced composites by digital light processing 3D printing technology. *Polymers*. 2020 Apr;12(4):975. doi: [10.3390/polym12040975](https://doi.org/10.3390/polym12040975)
- [8] Sano Y, Matsuzaki R, Ueda M, Todoroki A, Hirano Y. 3D printing of discontinuous and continuous fibre composites using stereolithography. *Additive Manufacturing*. 2018 Dec 1; 24:521-7. doi: [10.1016/j.addma.2018.10.033](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.033)
- [9] Zhao J, Li Q, Jin F, He N. Digital light processing 3D printing Kevlar composites based on dual curing resin. *Additive Manufacturing*. 2021 May 1; 41:101962. doi: [10.1016/j.addma.2021.101962](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101962)
- [10] Jeong G, Park CH, Kim BY, Kim J, Park SD, Yang H, Lee WS. Photocurable elastomer composites with SiO<sub>2</sub>-mediated cross-links for mechanically durable 3D printing materials. *ACS Applied Polymer Materials*. 2020 Sep 16;2(11):5228-37. doi: [10.1021/acsapm.0c00966](https://doi.org/10.1021/acsapm.0c00966)
- [11] Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*. 2012 Jan 1;3(1):81-90. doi: [10.1016/j.jare.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001)
- [12] Ayrilmis N, Kariz M, Kwon JH, Kitek Kuzman M. Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Jun 19; 102:2195-200. doi: [10.1007/s00170-019-03299-9](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9)
- [13] Rankouhi B, Javadpour S, Delfanian F, Letcher T. Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2016 Jun; 16:467-81. doi: [10.1007/s11668-016-0113-2](https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2)
- [14] Markandan K, Lai CQ. Enhanced mechanical properties of 3D printed graphene-polymer composite lattices at very low graphene concentrations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020 Feb 1; 129:105726. doi: [10.1016/j.compositesa.2019.105726](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105726)