



مورفولوژی سطوح کشش و سایش نانوکامپوزیت رزین/آلومینا

حسین ملکی^۱، پرویز اسدی^{۲*}، مصطفی اکبری^۳، حسین رحیمی آسیابارکی^۳

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

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

۳- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۴ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

پردازش نور دیجیتال

شکل ظاهری

نانوکامپوزیت آلومینا

خواص مکانیکی

رزین

چکیده

در این مطالعه با افزودن مقادیر مختلف نانو پودر اکسید آلومینیوم به رزین و تولید نمونه‌های نانوکامپوزیت رزین/آلومینا با استفاده از فرایند پردازش نور دیجیتال (DLP)، تأثیر محتوای مختلف نانو پودر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله استحکام کششی و مقاومت به سایش بررسی شد. سپس مورفولوژی سطوح کشش و سایش نانوکامپوزیت رزین/آلومینا تولیدشده بررسی گردید. با افزایش محتوای آلومینا تا ۲ درصد وزنی استحکام کششی به علت اجتماع نانو پودر و ایجاد نقاط تمرکز تنش و شروع شکست، کاهش یافت. ادامه افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده، سبب پدیده انحراف ترک شد و استحکام کششی بهبود یافت؛ به طوری که در نهایت با ۸ درصد وزنی آلومینا استحکام کششی نزدیک به ۱۶ درصد نسبت به نمونه رزین خالص افزایش یافت. کمترین استحکام کششی نانوکامپوزیت آلومینا در نمونه ۱.۵ درصد وزنی آلومینا مشاهده شد. علاوه بر این، با افزایش درصد وزنی آلومینا در نانوکامپوزیت، ابتدا نیروی ضعیف فصل مشترک بین رزین و نانو پودر، منجر به کاهش مقاومت به سایش شد و سپس با افزایش محتوای تقویت‌کننده، بهبود یافت. نهایتاً در ۸ درصد وزنی، نرخ سایش ویژه نزدیک به ۶۲ درصد نسبت به نمونه رزین خالص کاهش یافت.

Morphology of tensile and wear surfaces of resin / alumina nanocomposite

Hossein Maleki¹, Parviz Asadi^{2*}, Mostafa Akbari³, Hossein Rahimi Asiabaraki³

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

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 May 2024

Accepted: 4 August 2024

Keywords:

Digital Light Processing

Appearance

Alumina Nanocomposite

Mechanical Properties

Resin

Abstract

In this study, by adding different amounts of aluminum oxide nano powder to the resin and producing resin / alumina nanocomposite samples using digital light processing (DLP), the effect of different nano powder content on the mechanical properties of the samples, including tensile strength and wear resistance, was investigated. Then, the morphology of the tensile and wear surfaces of the produced resin / alumina nanocomposite was investigated. By increasing the alumina content up to 2% by weight, the tensile strength decreased due to the clustering of nano powders and the creation of stress concentration points and the initiation of failure. Continuing to increase the amount of reinforcing particles caused the phenomenon of crack deviation and the tensile strength improved, so that finally with 8 wt% alumina, the tensile strength increased by nearly 16% compared to the pure resin sample. The lowest tensile strength of alumina nanocomposite was observed in the sample of 1.5% by weight of alumina. In addition, with an increase in the weight percentage of alumina in the nanocomposite, firstly, the weak force of the interface between the resin and the nano powder led to a decrease in wear resistance, and then it improved with the increase of the reinforcing content. finally, at 8 wt%, the specific wear rate was close to It decreased to 62% compared to the pure resin sample.

Please cite this article using:

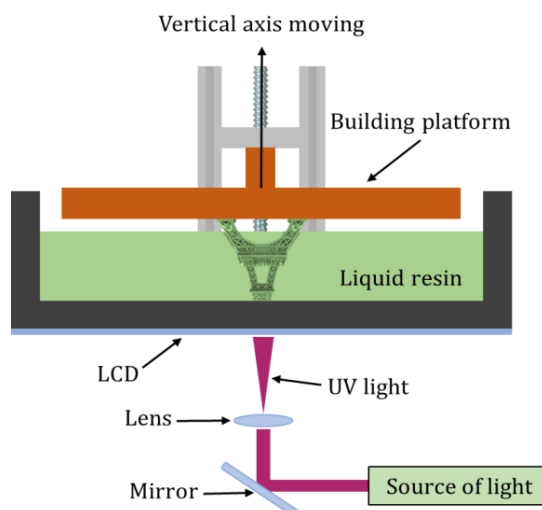
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Maleki H, Asadi P, Akbari M, Rahimi Asiabaraki H. Morphology of tensile and wear surfaces of resin / alumina nanocomposite. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Sep 22;11(7):35-45. doi: 10.22034/ijme.2024.458104.1962 [In Persian]

۱- مقدمه

چاپگرهای سه بعدی با فناوری پردازش نور دیجیتال^۱ مزیت‌های بسیاری دارند که موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید می‌شوند، زیرا با توجه به عملکرد آن‌ها از باقی چاپگرها سرعت بیشتری دارند. علاوه بر این قابلیت تولید نمونه‌هایی با جزئیات و وضوح بالا با استحکام خوبی را دارا می‌باشند [۱].

فتوپلیمریزاسیون یک روش تولید افزودنی مبتنی بر مایع قابل پخت با عکس است [۲]. روش‌های مرسوم آن شامل استریولیتوگرافی^۲ (SLA) و پردازش نور دیجیتال (DLP) می‌باشد که به دلیل توانایی آن‌ها در ساخت محصولات با وضوح بالا و پرداخت سطح عالی و بدون زبری مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پردازش نور دیجیتال یکی از روش‌های چاپ سه بعدی می‌باشد که شباهت زیادی با استریولیتوگرافی دارد. در این روش دستگاه طرحی را که در یک نرم‌افزار مدل‌سازی سه بعدی ایجاد شده می‌گیرد و از فناوری پردازش نور دیجیتال برای چاپ نمونه سه بعدی استفاده می‌کند. پلتفرم ساخت چاپگر در ظرفی از رزین مایع غوطه‌ور است و یک منبع نور دیجیتال هر لایه را روی آن پخت می‌کند. نور باعث شده رزین روی پلتفرم سخت و یک برش جامد از قطعه ایجاد شود، لایه‌ها روی هم ساخته می‌شوند تا زمانی که چاپ تکمیل گردد [۳، ۴]. شکل ۱ نمونه‌ای از دستگاه چاپگر سه بعدی DLP و نحوه عملکرد آن را نشان می‌دهد؛ اما به دلیل خواص محدود رزین‌ها به ساخت قطعات کامپوزیتی روی آورده شده است. کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن خواص خارق‌العاده اخیراً در صنایع مختلف استفاده می‌شوند [۵].



شکل ۱ دستگاه چاپ سه بعدی پردازش نور دیجیتال

جونگ و همکاران [۶] خواص مکانیکی رزین الاستومری مبتنی بر پلی‌اتر^۳ با ترکیب نانوذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید^۴ را بررسی کردند. با ترکیب نانوذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید کافی در ماتریس الاستومری، ساختارهای پرینت سه بعدی استحکام و دوام بالایی را بدون ایجاد مشکل در پخت نشان دادند. استحکام کششی کامپوزیت با ۲۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیسیم‌دی‌اکسید ۸۸ درصد (از ۳،۲۹ به ۶،۱۸ مگاپاسکال) افزایش یافت. علاوه بر این، سختی به‌طور هم‌زمان ۵۲ درصد افزایش یافت.

ژائو و همکاران [۷] پرینت سه بعدی کامپوزیت‌های کولار را به روش پردازش نور دیجیتال ارائه دادند. این مطالعه کاربرد کولار با اندازه میکرومتر در رزین را برای استریولیتوگرافی ارزیابی کرد و نتایج نشان داد که پس از رسیدن محتوای کولار به ۷ درصد 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 درصد کاهش یافت. در آزمون نوردی تک‌لایه، افزودن کولار باعث شد رزین وضوح بهتری داشته باشد.

¹ Digital Light Processing (DLP)

² Stereolithography

³ Polyether

⁴ Silicon Dioxide (SiO₂)

جو و چو [۸] مطالعات مقایسه‌ای را در مورد ساخت و بهینه‌سازی کامپوزیت‌های پلی یورتان^۱ با نانومواد پلی آنیلین^۲ و ورق گرافن^۳ در چاپ سه‌بعدی نوع پردازش نور دیجیتال ارائه دادند. نانومواد 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.

سانو و همکاران [۹] دریافته‌اند که الیاف شیشه‌ای ناپیوسته و پیوسته به‌طور 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 به‌عنوان تقویت‌کننده 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 الیاف شیشه و پودر شیشه می‌تواند تا ۵۰ درصد 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 پس‌پردازش دارد.

آلخاندروکورتس و همکاران [۱۰] قابلیت‌های مکانیکی کامپوزیت‌های رزین دما بالا (بر پایه آکریلات^۴) تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی^۵ ساخته‌شده با فناوری چاپ سه‌بعدی پردازش نور دیجیتال و همچنین محتوای نانولوله‌های کربنی و اثرات پخت ثانویه را ارائه دادند. با توجه به خواص مکانیکی، پخت ثانویه با اشعه ماوراءبنفش به‌طور 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 نانولوله‌های کربنی یافتند.

پایین بودن استحکام کششی، سختی و مقاومت به سایش نمونه‌های رزینی، استفاده از چاپگرهای DLP را محدود کرده است. در بسیاری از مواقع نمونه‌های کاربردی با خواص مکانیکی مطلوب نیاز است که نمونه‌های رزینی، پاسخ‌گوی آن نیاز نیستند؛ زیرا علاوه بر خواص نامناسب برای قطعات کاربردی، رزین‌ها ماهیتاً با گذر زمان به دلیل مجاورت با هوا و نور خواص ذاتی خود را از دست می‌دهند و قطعه ضعیف‌تر می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود با کامپوزیت‌سازی، خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود بخشیده شود. در این پژوهش به کمک کامپوزیت‌سازی در مقیاس نانو با استفاده از نانوپودر آلومینا و رزین استاندارد، سعی شد خواص مکانیکی نمونه‌ها نسبت به نمونه رزین خالص بهبود بخشیده شود.

۲- مواد و روش‌ها

رزین استفاده‌شده، رزین استاندارد مشکی اینکیوبیک^۱، دارای زمان پخت بهینه و حساس به نور فرابنفش (۳۵۵~۴۰۵ نانومتر) است. مشخصات تکمیلی رزین استفاده‌شده در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱ خواص رزین استاندارد [۱۱]

نوردهی لایه‌های اول	۵۰ تا ۶۰ ثانیه
نوردهی معمولی	۸ تا ۱۰ ثانیه
انقباض	۳،۷۲ تا ۴،۲۴ درصد
سختی	۸۴ D
ویسکوزیته (۲۵ درجه سانتی‌گراد)	۱۵۰ تا ۳۰۰
چگالی	~ ۱،۱ g/cm ^۳

¹ Polyurethane (PU)

² Polyaniline (PANI)

³ Graphene Sheet (GS)

⁴ Acrylate

⁵ Carbon Nanotube (CNT)

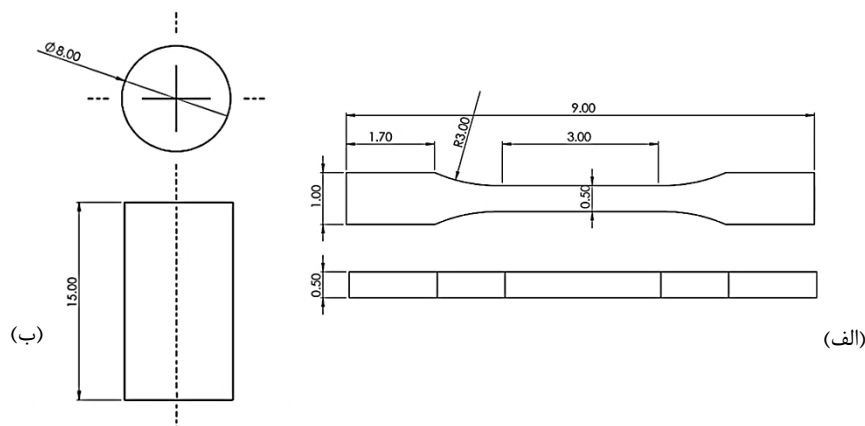
⁶ Anycubic

نانو پودر مصرفی نیز پودر آلومینا بایکالوکس^۱ با اندازه دانه ۵۰ نانومتر است. وزن مواد مصرفی و نمونه‌های تولیدشده با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی رادوگ^۲ با دقت ۰,۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای تولید نمونه‌های کامپوزیتی با توجه به میزان درصد تقویت‌کننده که در جدول ۲ مشخص شده است، رزین مصرفی و پودر موردنیاز اندازه‌گیری و سپس رزین داخل بشر آزمایشگاهی ریخته شد و روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس پودر به آرامی به آن اضافه شد. بعد از اتمام پودر موردنیاز، مخلوط رزین و نانو 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^۳ و سرعت چرخشی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. سپس نانوکامپوزیت آماده‌شده به داخل مخزن رزین دستگاه پرینتر سه‌بعدی ریخته شد و پس از خارج شدن حباب‌های ایجادشده چاپ نمونه آغاز گردید. پرینتر سه‌بعدی استفاده‌شده برای تولید نمونه‌ها پرینتر سه‌بعدی اینکیوبیک مدل فوتون مونیو ایکس^۴ بود. برای شست‌وشو و پخت ثانویه نمونه‌ها از دستگاه شست‌وشو و بازپخت اینکیوبیک استفاده شد.

جدول ۲ مقادیر رزین و پودر تقویت‌کننده برای تولید نمونه‌های کامپوزیت آلومینا

نمونه	رزین (g)	آلومینا (g)
رزین خالص	۱۰۰	-
۰,۵ درصد وزنی Al_2O_3	۹۹,۵	۰,۵
۱ درصد وزنی Al_2O_3	۹۹	۱
۱,۵ درصد وزنی Al_2O_3	۹۸,۵	۱,۵
۲ درصد وزنی Al_2O_3	۹۸	۲
۴ درصد وزنی Al_2O_3	۹۶	۴
۶ درصد وزنی Al_2O_3	۹۴	۶
۸ درصد وزنی Al_2O_3	۹۲	۸

استحکام کششی توسط دستگاه آزمون کشش سنتام^۵ با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام و برای قابلیت اطمینان نتایج، پیش بارگذاری ۵۰ نیوتن در نظر گرفته شد. مقاومت به سایش نمونه‌های تولیدشده به روش آزمون سایش پین روی دیسک اندازه‌گیری شد. آزمون سایش با سرعت خطی ۰,۲ متر بر ثانیه، مسافت ۱۲۰ متر و نیروی عمودی ۵ نیوتن با استفاده از دیسک به قطر ۷ سانتی‌متر و سنباده 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. شکل ۲ نشان‌دهنده ابعاد نمونه‌های آزمون کشش و آزمون سایش می‌باشد.



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

1 Baikalox

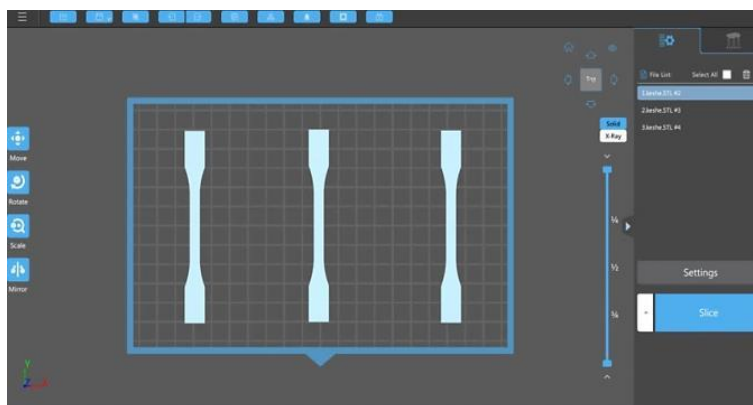
2 Radwag

3 Heidolph

4 Photon Mono X

5 Santam

پس از طراحی نمونه‌ها و گرفتن یک خروجی با پسوند STL، با استفاده از نرم‌افزار چیتوباکس^۱ 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. شکل ۳ نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در صفحه ساخت دستگاه را نشان می‌دهد که توسط نرم‌افزار چیتوباکس ایجاد شد. برای ۱۰ لایه اول نمونه، مدت زمان تابش ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد تا نمونه به خوبی به صفحه چاپ دستگاه بچسبد و در ادامه چاپ مانع جدا شدن نمونه از صفحه شود. در نهایت یک فایل خروجی برای شروع فرایند چاپ توسط دستگاه پرینتر سه‌بعدی گرفته شد. تمامی نمونه‌های آزمون کشش در ضخامت لایه ۵۰ میکرومتر و زمان تابش ۵ ثانیه چاپ شدند. سپس نمونه‌های آزمون سایش در مطلوب‌ترین ضخامت لایه از نظر زمان تکمیل فرایند تولید و کیفیت خروجی (زمان تابش ۵ ثانیه و ضخامت لایه ۷۵ میکرومتر) تولید شد.

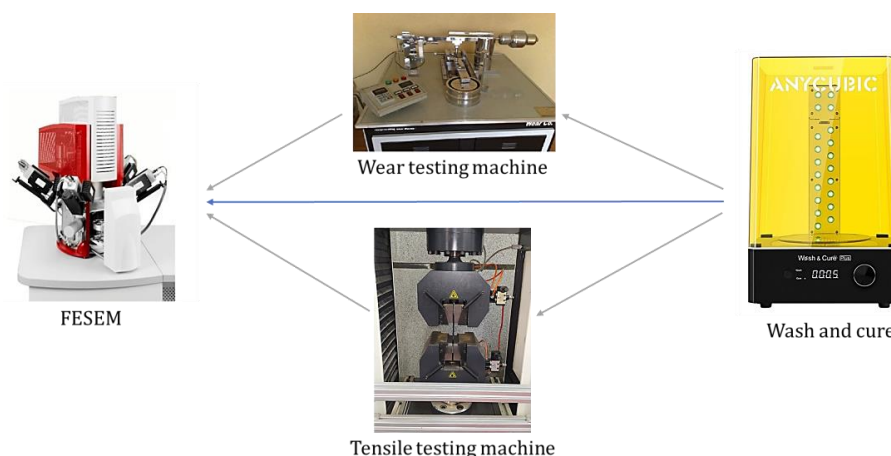


شکل ۳ مشخصات و شرایط چاپ نمونه‌ها در نرم‌افزار چیتوباکس

پس از اتمام چاپ، نمونه‌های تولیدشده به خوبی با استفاده از الکل تمیز شدند و برجستگی و عیوب سطحی آن‌ها برطرف شد. نمونه‌های آزمون کشش و سایش به مدت ۳ دقیقه داخل دستگاه بازپخت در معرض نور فرابنفش قرار گرفتند. شکل ۴ فرایند شست‌وشو، بازپخت و آزمون‌های انجام‌شده را نشان می‌دهد. قبل از انجام آزمون سایش تمامی نمونه‌ها با ترازو آزمایشگاهی وزن شدند 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 [۱۲].

$$w_s = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot L} \quad (1)$$

که w_s نرخ سایش ویژه بر حسب mm^3/Nm ، Δm میزان جرم کم شده مواد بر حسب g ، ρ دانسیته بر حسب g/mm^3 ، F نیروی اعمالی بر حسب N و L مسافت پیموده شده بر حسب m است.



شکل ۴ روند شست‌وشو، بازپخت و آزمون‌های انجام‌شده

¹ Chitobox

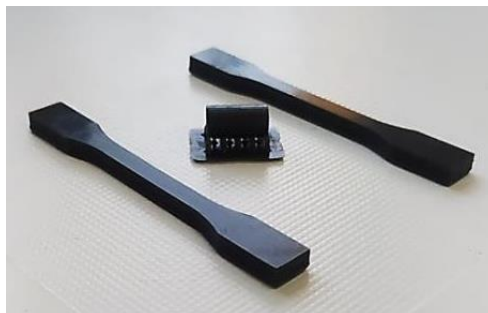
پس از انجام تمامی آزمون‌های مخرب نظیر آزمون کشش و سایش، نمونه‌ها برای تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۱ آماده شدند. نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی باید متناسب با ابعاد دستگاه، پایدار در شرایط خلأ و هادی جریان باشند. نکته مشترک در مورد بیشتر پلیمرها این است که نارسا بوده و حتماً نیاز به پوشش‌دهی دارند؛ بنابراین تمامی نمونه‌ها پوشش‌دهی طلا شدند. شکل ۵ سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش آماده شده برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی را نشان می‌دهد.



شکل ۵ پوشش‌دهی طلا سطوح شکست

۳- نتایج و بحث

پس از تولید نمونه‌های آزمون کشش و سایش که در شکل ۶ نشان داده شده است، تأثیر نانو مواد تقویت‌کننده آلومینا بر استحکام کششی و مقاومت به سایش نمونه‌ها مشخص و با بررسی مورفولوژی سطوح شکست و سایش، نتایج به‌دست‌آمده توجیه شد.



شکل ۶ نمونه‌های چاپ‌شده آزمون کشش و سایش

۳-۱- تأثیر آلومینا بر استحکام کششی

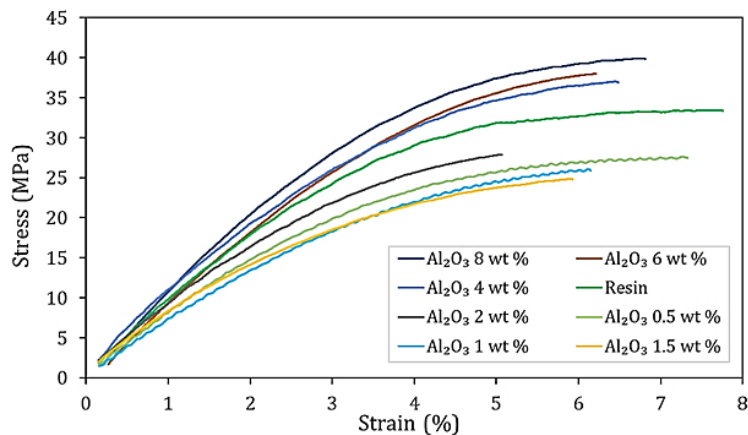
استحکام کششی یکی از فاکتورهای مهم در خواص مکانیکی مواد است. پس از تولید نمونه‌ها آزمون کشش برای تمام نمونه‌ها انجام شد و استحکام کششی نمونه‌ها بررسی شد.

در پژوهش [۱۳]، مشخص شد با افزایش غلظت آلومینا استحکام کششی نمونه‌ها در درصد‌های وزنی پایین (زیر ۲ درصد) روند کاهشی داشت و با افزایش غلظت از ۰٫۵ تا ۱٫۵ درصد در هر مرحله استحکام کششی نسبت به مرحله قبل کاهش یافت. در کامپوزیت‌های ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد وزنی آلومینا استحکام کششی نسبت به نمونه رزین ساده به ترتیب ۱۸٫۲ و ۲۲٫۷ و ۲۷٫۲ درصد کاهش یافت. انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز به‌طور مشابه در ابتدا با افزایش درصد تقویت‌کننده کاهش یافت؛ بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که رفتار مکانیکی با افزایش آلومینا تا ۲ درصد وزنی بهبود نیافت.

با اجتماع پودر در زمینه رزین، هر یک از نقاط به‌عنوان شروع ترک و شکست عمل کرد و در نتیجه شکست زود هنگام در آزمون کشش مشاهده شد؛ اما استحکام کششی برای نمونه‌های تولیدشده با نانوذرات تقویت‌کننده در مقادیر بالاتر روند صعودی داشت و به‌مرور استحکام و انعطاف‌پذیری بهبود یافت. در کامپوزیت ۲ درصد وزنی استحکام کششی نسبت به نمونه رزین ساده ۱۹ درصد

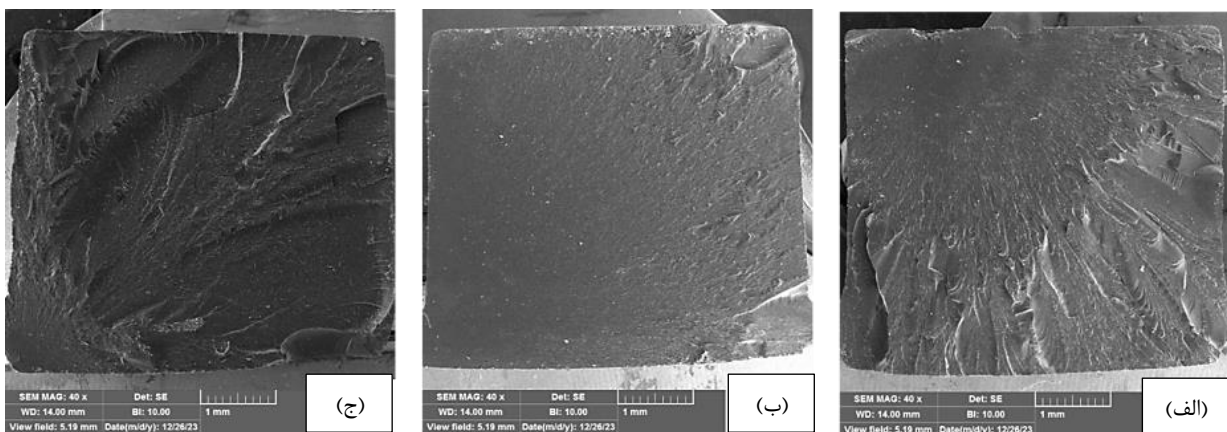
^۱ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

کاهش یافت ولی در کامپوزیت‌های ۴ و ۶ درصد وزنی به ترتیب ۹ و ۱۱ درصد افزایش یافت و نهایتاً در ۸ درصد وزنی با کاهش جزئی انعطاف‌پذیری، استحکام با افزایش حدود ۱۶ درصدی نسبت به رزین ساده از ۳۴٫۵ به ۴۰ مگاپاسکال رسید. شکل ۷ نمودار تنش و کرنش نمونه‌های نانوکامپوزیتی با تقویت‌کننده آلومینا را نشان می‌دهد. مقادیر بالای ۸ درصد نیز قابلیت چاپ با دستگاه چاپگر سه‌بعدی را نداشتند زیرا به دلیل مقاومت ذرات تقویت‌کننده در برابر عبور نور، لایه‌ها در مدت زمان ۵ ثانیه‌ی تنظیم‌شده، ایجاد نشدند. در این حالت تکمیل فرایند چاپ، تنها با افزایش زمان تابش نور میسر است اما به دلیل یکسان نبودن پارامترهای فرایند، قابل مقایسه با سایر نتایج نبود.



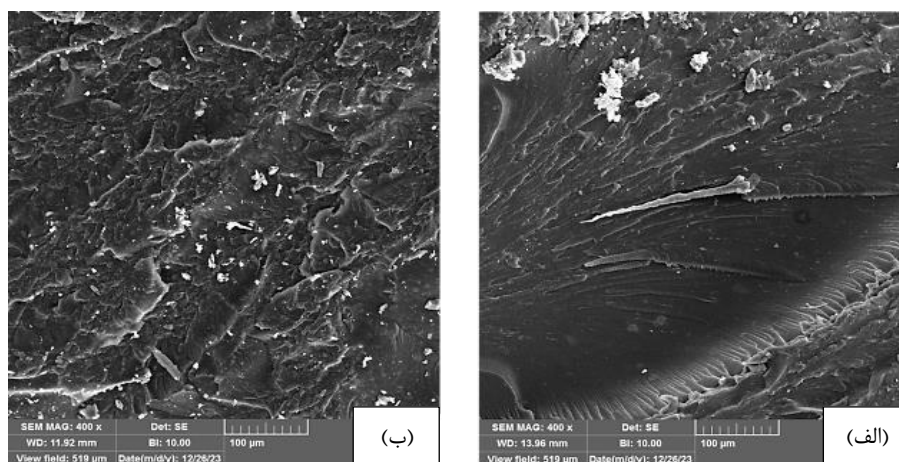
شکل ۷ منحنی تنش-کرنش کامپوزیت‌های ۰ تا ۸ درصد وزنی آلومینا

با توجه به شکل ۸-الف که مربوط به سطح شکست رزین خالص می‌باشد، مسیر حرکت صفحات شکست به‌طور پیاپی تغییر کرد و این امر موجب تأخیر در شکست نمونه شد؛ اما در شکل ۸-ب برای آلومینای ۱ درصد وزنی صفحات شکست به‌صورت مستقیم حرکت کرد و موجب شکستی ترد شد که سبب افت استحکام گردید. افزودن ذرات آلومینا می‌تواند به‌عنوان یک نقطه ضعیف و حساس برای انتشار ترک در هنگام اعمال تنش کششی باشد. از سوی دیگر هنگام اعمال نیروی برشی، ذرات آلومینا در اندازه نانو می‌توانند به‌عنوان مانعی در برابر لغزش عمل کنند و در نتیجه استحکام مواد را افزایش دهند [۱۴]. به نظر می‌رسد که برای درصد ذرات آلومینا زیر ۲ درصد، عملکرد نانوذرات به اندازه کافی قوی نبود و در نتیجه استحکام کششی مواد کاهش یافت. با این حال، زمانی که مقدار ذرات نانو آلومینا تقویت‌کننده از ۲ درصد بیشتر شد، اثر تقویت‌کننده غالب شد و به‌طور قابل‌توجهی استحکام کششی نمونه را افزایش داد. با توجه به شکل ۸-ج وجود یک سطح شکستگی ناهموار در نمونه نانوکامپوزیت آلومینا ۸ درصد نشان داد که مکانیزم انحراف ترک صورت گرفته است. در این فرایند، نوک ترک هنگام برخورد با موانع مجبور به چرخش و در نتیجه ترک طولانی‌تر می‌شود. با توجه به افزایش اتلاف انرژی در انحراف ترک، می‌توان مقادیر انرژی شکست بالاتری را برای نانوکامپوزیت‌های رزین/آلومینا در مقایسه با نمونه رزین خالص پیش‌بینی کرد. در پژوهش [۱۵] نیز نتایج مشابه به دست آمده است.

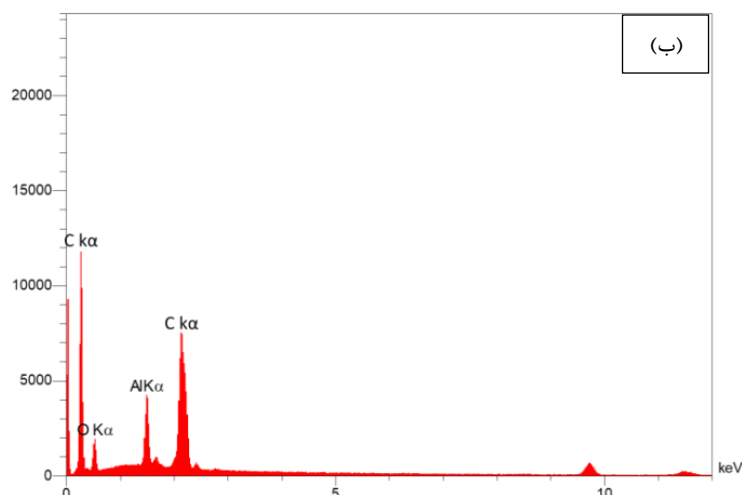
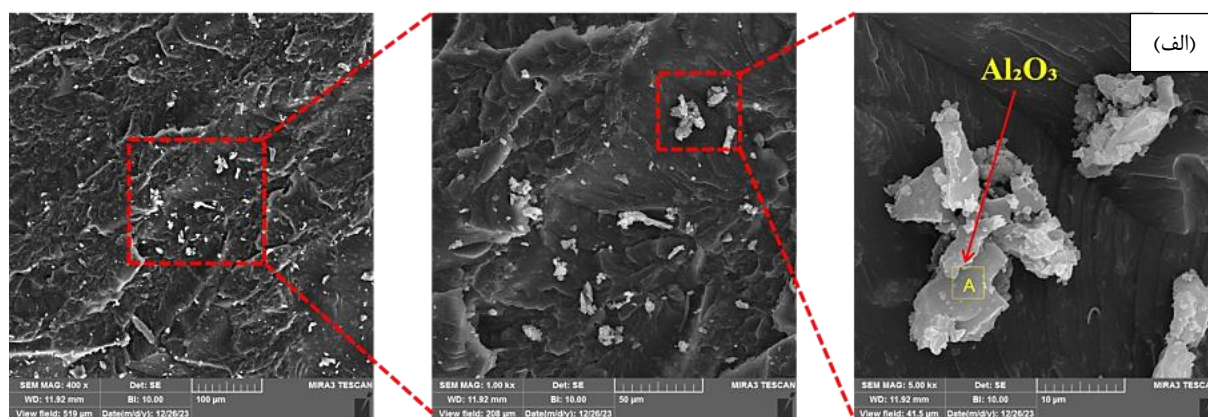


شکل ۸ شکل ظاهری نمونه الف) رزین خالص، ب) کامپوزیت آلومینا ۱ درصد وزنی، ج) کامپوزیت آلومینا ۸ درصد وزنی

با توجه به شکل ۹-ب سطوح شکست، آلومینا در تمامی نقاط پراکنده شده است و این نشان‌دهنده ساختار همگن نمونه‌ها بعد از ترکیب مواد و در نتیجه چاپ آن‌ها است. همان‌طور که در شکل ۹-ب مشخص است، غلظت آلومینا ۸ درصد وزنی نسبت به شکل ۹-الف که نشان‌دهنده آلومینا ۱ درصد وزنی است، بسیار بیشتر شد و توزیع آلومینا به‌عنوان مانع در مسیر حرکت صفحات برشی باعث افزایش استحکام شد. شکل ۱۰-الف ذرات آلومینا در سطوح شکست را نمایش می‌دهد و شکل ۱۰-ب نشان‌دهنده طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۱ می‌باشد که حضور آلومینا را اثبات می‌کند.



شکل ۹ شکل ظاهری سطوح شکست کامپوزیت آلومینا (الف) ۱ درصد وزنی، (ب) ۸ درصد وزنی

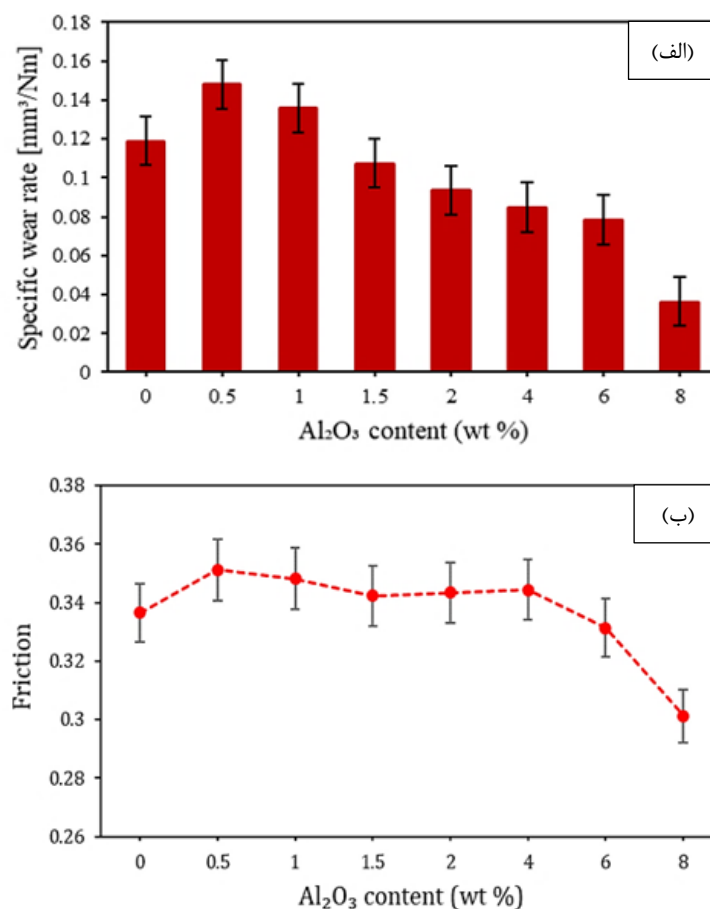


شکل ۱۰ (الف) حضور آلومینا در سراسر سطوح شکست، (ب) نمودار EDS نانوکامپوزیت آلومینا ۸ درصد وزنی

^۱ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

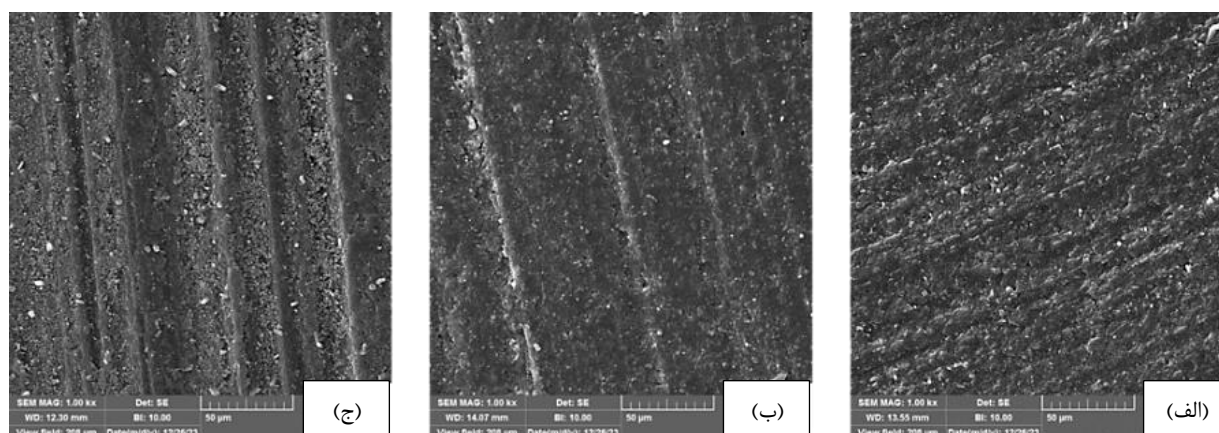
۳-۲- تأثیر آلومینا بر مقاومت به سایش

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 تولیدشده بدون پودر و نیز نانوکامپوزیت‌های تولیدشده با محتوای مختلف از تقویت‌کننده تحت آزمون سایش قرار گرفتند و تأثیر افزودن نانوذرات تقویت‌کننده آلومینا بر مقاومت به سایش نمونه‌ها مشخص شد. ضخامت لایه در تمامی نمونه‌ها ۷۵ میکرومتر در نظر گرفته شد. نرخ سایش ویژه در نمونه‌های مختلف تولیدشده در شکل ۱۱-الف آمده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، مقاومت به سایش نمونه‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه بدون پودر ابتدا کاهش یافت و در درصد‌های بالاتر روند افزایشی داشت. در نانوکامپوزیت‌های ۰,۵ و ۱ درصد وزنی، نرخ سایش ویژه نمونه‌ها نسبت به نمونه رزین به ترتیب ۱۸ و ۳,۱۰ درصد افزایش و در نتیجه مقاومت به سایش در هر دو غلظت کاهش یافت؛ اما در درصد‌های تقویت‌کننده ۱,۵، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد نرخ سایش ویژه نمونه‌ها نسبت به نمونه رزین به ترتیب ۱۲,۵، ۲۳,۵، ۲۸,۱، ۳۳,۶ و ۶۱,۷ درصد کاهش یافت [۱۳]. به نظر می‌رسد در مقادیر پایین نانوذرات تقویت‌کننده در زمینه پلیمری، توزیع یکنواختی از آن‌ها وجود نداشت و این باعث تضعیف اتصال مواد پلیمری به یکدیگر شد و یکپارچگی را در ساختار قطعه تولیدشده کاهش داد. این امر سبب شد مقاومت به سایش کاهش یابد و لایه‌های سطحی قطعه در مواجهه با سطح ساینده به‌راحتی از هم جدا شوند و نرخ سایش بالا رود. همچنین به دلیل پایین بودن نیروی فصل مشترک بین نانوپودر آلومینا و رزین، هنگام تماس نمونه با سطح ساینده، نانوپودر به‌راحتی از فاز زمینه جدا شد و اثر تقویتی از خود نشان نداد؛ اما با افزایش مقادیر نانوذرات در ساختار نمونه تولیدشده، این ذرات در حین آزمون سایش به‌عنوان یاتاقان عمل کرد و مانع از برخورد سطح ساینده با مواد پلیمری قطعه گردید و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش یافت. مقادیر ضریب اصطکاک نمونه‌های تولیدشده در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، ضریب اصطکاک رابطه تقریباً مستقیمی با نرخ سایش ویژه داشت و در حضور مقادیر بالا از نانوذرات تقویت‌کننده ضریب اصطکاک کاهش یافت.



شکل ۱۱ مقادیر الف) نرخ سایش ویژه برای نمونه‌های خالص و کامپوزیتی، ب) ضریب اصطکاک برای نمونه‌های خالص و کامپوزیتی

مقاومت به سایش نمونه‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه بدون پودر ابتدا کاهش یافت و در درصدهای بالاتر روند افزایشی داشت. در نمونه‌های رزین خالص هنگامی که نمونه با سطح ساییده برخورد داشت، تنها با پلیمر در ارتباط بود ولی در نمونه‌های کامپوزیتی علاوه بر پلیمر با پودر هم برخورد داشت. چسبندگی پودر آلومینا پس از ترکیب شدن با رزین دارای مقاومت زیادی نبود و با یک نیروی ناچیز به راحتی پودر از رزین جدا شد. با افزایش محتوای آلومینا، کامپوزیت انسجام بهتری پس از چاپ داشت، به علاوه سطح ساییده با تعداد نقاط بیشتری از پودر برخورد داشت؛ در نتیجه با افزایش تعداد نقاط سطح تماس ساییده با پودر، سطح تماس آن با رزین کاهش یافت و منجر به افزایش مقاومت به سایش شد. شکل ظاهری سطوح سایش برای نمونه رزین و کامپوزیت با محتوای نانو آلومینا در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲ شکل ظاهری سطوح سایش نمونه (الف) رزین خالص، (ب) کامپوزیت آلومینا ۰/۵ درصد وزنی، (ج) کامپوزیت آلومینا ۸ درصد وزنی

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیت آلومینا چاپ‌شده با استفاده از روش پردازش نور دیجیتال بررسی شد. نانوکامپوزیت‌های آلومینا در هفت غلظت مختلف (۰، ۵، ۱، ۱، ۵، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد) مورد آزمایش قرار گرفت. مورفولوژی سطوح کشش و سایش هر یک از کامپوزیت‌ها بررسی شد که مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

- کمترین استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های آلومینا در نمونه ۱،۵ درصد وزنی آلومینا مشاهده گردید که به عدم پخش ذرات به صورت یکنواخت در زمینه رزین و اجتماع پودر در ساختار نمونه در درصدهای پایین پرکننده نسبت داده شد.
- بیشترین استحکام کششی در نمونه ۸ درصد وزنی آلومینا مشاهده شد؛ زیرا با بالا رفتن غلظت آلومینا، ذرات آلومینا مانع حرکت صفحات شکست و انحراف ترک شد و شکست به تأخیر افتاد.
- کامپوزیت ۲ درصد وزنی آلومینا به عنوان نقطه عطف استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های آلومینا 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 ۸ درصد وزنی آلومینا و کمترین مقدار در نمونه ۰،۵ درصد وزنی آلومینا مشاهده شد. عدم توزیع یکنواخت نانوذرات آلومینا در زمینه رزین و نیروی ضعیف فصل مشترک آلومینا و رزین موجب کاهش استحکام کششی و مقاومت به سایش نانوکامپوزیت آلومینا شد که با افزایش محتوای آلومینا خواص سایشی نمونه‌ها بهبود یافت.

References

- [1] 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
- [2] Kabir SF, Mathur K, Seyam AF. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Composite Structures. 2020 Jan 15;232:111476. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111476

- [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](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100889)
- [4] Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mühlaupt R. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical reviews*. 2017 Aug 9;117(15):10212-90. doi: [10.1021/acs.chemrev.7b00074](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1177/0021998312451763)
- [6] Jeong G, Park CH, Kim BY, Kim J, Park SD, Yang H, Lee WS. Photocurable elastomer composites with SiO₂-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)
- [7] 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)
- [8] 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](https://doi.org/10.3390/polym12010067)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] Hanon MM, Ghaly A, Zsidaí L, Szakál Z, Szabó I, Kátai L. Investigations of the mechanical properties of DLP 3D printed graphene/resin composites. *Acta Polytech. Hung.* 2021 Jan 1;18(8):143-61. doi: [10.12700/APH.18.8.2021.8.8](https://doi.org/10.12700/APH.18.8.2021.8.8)
- [12] Huang T, Xin Y, Li T, Nutt S, Su C, Chen H, Liu P, Lai Z. Modified graphene/polyimide nanocomposites: reinforcing and tribological effects. *ACS applied materials & interfaces*. 2013 Jun 12;5(11):4878-91. doi: [10.1021/am400635x](https://doi.org/10.1021/am400635x)
- [13] 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 Jul 23;10(5):57-67. doi: [10.22034/IJME.2023.419202.1854](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.419202.1854) [In Persian]
- [14] Lim SH, Zeng KY, He CB. Morphology, tensile and fracture characteristics of epoxy-alumina nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Aug 20;527(21-22):5670-6. doi: [10.1016/j.msea.2010.05.038](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.038)
- [15] Shah WA, Luo X, Guo C, Rabiú BI, Huang B, Yang YQ. Preparation and mechanical properties of graphene-reinforced alumina-matrix composites. *Chemical Physics Letters*. 2020 Sep 1;754:137765. doi: [10.1016/j.cplett.2020.137765](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137765)