



بهینه سازی خواص فیزیکی مکانیکی رزین های پخت نوری برای استفاده در چاپ سه بعدی توسط افزودنی های میکرو و نانو جهت کاربردهای صنعتی

مرتضی بهزادنسب^{۱*}، مطهره حسینی^۲

۱- استادیار، مهندسی صنایع پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی صنایع پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۹۷۵/۱۱۲، m.behzadnasab@ippi.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ اسفند ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۸

ارائه در سایت: دی ۱۳۹۸

کلیدواژگان:

چاپ سه بعدی

استریو لیتوگرافی

خواص فیزیکی مکانیکی

نانوتکنولوژی

اصلاح سطح

چاپگرهای سه بعدی در دهه اخیر کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده‌اند به نحوی که از این تکنولوژی گاهاً به‌عنوان انقلاب چهارم صنعتی یاد می‌شود. استریو لیتوگرافی یکی از قدیمیترین و در عین حال دقیقترین روش‌های مورد استفاده در این صنعت است. با وجود مطالعات فراوان در زمینه‌های مختلف تشکیل دهنده این تکنولوژی در زمینه تقویت خواص مکانیکی رزین‌های مورد استفاده در این روش جهت کاربرد به‌عنوان قطعه نهایی و بدون فرایندهای اضافه پس‌پخت، به خصوص در چاپگرهای صفحه متحرک به سمت بالا (اغلب پرینترهای رومیزی)، مطالعات کمی شده است. در این مقاله سعی شده با استفاده از افزودن میکرو و نانو ذرات ساده و اصلاح سطح شده کربنات کلسیم به یک رزین صنعتی با همزن مکانیکی خواص فیزیکی مکانیکی آن‌ها تقویت گشته و همزمان محدودیت‌ها و تاثیرات میزان افزایش ذرات بر سایر خواص مطالعه گردد. مشاهده شد که ویسکوزیته بهینه برای استفاده در این چاپگرها ۱۸۰ تا ۳۰۰ سانتی پواز می‌باشد. همچنین مشاهده شد که افزودن ذرات کربنات کلسیم موجب کاهش جمع‌شدگی حاصل از پخت شده و با افزایش میکرو و نانو ذرات خواص مکانیکی تا ۷۰ درصد بهبود می‌یابد. علاوه بر آن مشاهده شد که انجام فرایند پسا پخت بر روی نمونه‌های تهیه شده به این روش حیاتی می‌باشد.

Optimization of Physical-Mechanical Properties of light cure Resins for use in 3D printing by micro and nano additives for industrial applications

Morteza Behzadnasab*, Motahare Hosseini

Polymer Processing Faculty, Iran polymer and petrochemical institute, Tehran, Iran

* P.O.B. 14975/112 Tehran, Iran, m.behzadnasab@ippi.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 10 March 2019
Accepted 18 May 2019
Available December 2019

Keywords:

3D printing
Stereolithography
Physical & mechanical properties
Nanotechnology
Surface modification

Abstract

3D printers have become widely used in the industry in the last decade so that this technology is sometimes referred to as the fourth industrial revolution. Stereolithography is one of the oldest and, at the same time, the most accurate method used in this industry. Despite numerous studies in various fields involved in this technology, there is a lack of quantitative studies on strengthening the mechanical properties of resins used in this method for application as the final piece and without post-processing, especially in button-up printers (mainly used in desktop printers). In this paper, the physical and mechanical properties of an industrial grade resin were improved via addition of calcium carbonate micro and nanoparticles, with and without surface modification with a mechanical stirrer, at the same time the limitations and effects of adding this filler on other properties such as printability have been studied. It was found that optimal viscosity for use in these printers is ranged between 180 to 300 centipoise. It was also observed that the addition of calcium carbonate particles reduced the curing induced shrinkage and improved the mechanical properties up to 70% with the increase of micro and nanoparticles. In addition, it was observed that the post-curing process is critical to achieving the optimal properties.

۱- مقدمه

راستای تولید قطعات با هرگونه هندسه فضایی در کمترین زمان و با کمترین هزینه به کار گرفته می‌شود، ساخت افزایشی (Additive manufacturing) است. در این فرایند یک قطعه جامد، مستقیماً از داده‌های هندسی سطوح آن که به کمک کامپیوتر طراحی شده است، به‌صورت لایه به لایه ساخته

زمان در زندگی امروز بشر نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، از این‌رو، کوتاه نمودن زمان توسعه و تکوین یک محصول از طراحی تا تولید، رمز موفقیت یک سازمان تولیدکننده در دنیای رقابتی امروز به شمار می‌آید. یکی از فناوری‌های نسبتاً جدیدی که در

Please cite this article using:

M. Behzadnasab, M. Hosseini, Optimization of Physical-Mechanical Properties of light cure Resins for use in 3D printing by micro and nano additives for industrial applications, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 8, pp. 33-42, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مابقی باقی می‌مانند. در این روش نور لیزر UV با کمک آینه‌هایی که قابلیت تحرک کنترل شده را داشته و زاویه قرارگیری آن توسط کامپیوتر کنترل می‌شود بر روی سطح رزین تابیده شده و با حرکت آینه‌ها همانند حرکت نازل در روش قبل در محورهای x و y موجب ایجاد لایه اول بر روی صفحه متحرک شده و سپس با حرکت صفحه در راستای محور Z امکان ایجاد لایه بعدی بر روی لایه پرینت شده قبلی مهیا شده و بدین ترتیب قطعه نهایی لایه به لایه ایجاد می‌شود [۴].

زمان مورد نیاز برای تهیه هر لایه به سرعت روبش منبع نوری همچون لیزر در راستای X و Y وابسته است که خود تابع دو عامل سرعت حرکت لیزر و سرعت پخت رزین و یا به عبارتی حداقل زمان مورد نیاز تابش نور فرابنفش برای تکمیل واکنش پخت است. عمق نفوذ پخت نیز با کنترل عمق نفوذ نور توسط افزودن مواد معدنی همچون پرکننده، رنگ‌دانه و یا مواد جاذب نور و یا کنترل میزان رادیکال آزاد ایجاد شده با استفاده از جاذب رادیکال در فرمولاسیون رزین قابل کنترل است به نحوی که در صورتی که قرار باشد در قطعه‌ای حفره‌ای ایجاد شود (مطابق شکل ۱)، در اثر عملیات پخت سقف حفره، رزین داخل حفره در اثر تابش نور در هنگام پخت ناحیه سقف، پخت نشود [۴].

در این روش پارامترهای رزینی همچون سرعت پخت، میزان حرارت ایجاد شده در اثر پخت و یا ویسکوزیته رزین نقش بسزایی در کیفیت و سرعت تهیه محصول دارند [۵، ۶].

دقت ابعادی و وضوح در این روش تا ۲۰ میکرومتر قابل بهینه‌سازی است ولیکن نیاز به حرکت در سه محور موجب کاهش سرعت تولید در قطعات بزرگ می‌شود. در مکانیسمی جدیدتر کل منبع نوری به صورت یکنواخت مساحتی به ابعاد کل سطح صفحه ساخت را نوردهی کرده و با قرار دادن یک ماسک در مقابل نور تنها در محل‌هایی که قرار است در آنجا عملیات پلیمریزاسیون انجام شود به نور اجازه عبور داده شده و در سایر نواحی که نور به آن‌ها تابیده نمی‌شود پلیمریزاسیون رخ نمی‌دهد.

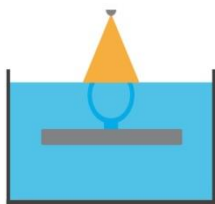


Fig. 1 The reason for the need to control the depth of light penetration to keep the areas in the arc (pale areas) fluid while curing the wall and the hollow part's roof (bold areas).

شکل ۱ دلیل لزوم کنترل عمق نفوذ نور برای مابقی مانند نواحی داخل قوس (نواحی کمرنگ) در هنگام پخت دیواره و سقف قطعه تو خالی (نواحی پررنگ)

می‌شود. برای این منظور مدل سه‌بعدی رایانه‌ای به ده‌ها و یا هزاران لایه دوبعدی با ضخامت چند ده میکرومتر تقسیم شده و هر لایه به صورت مجزا ایجاد و سپس با افزودن لایه‌های متعدد بر روی یکدیگر قطعه نهایی تولید می‌شود. از دیگر مزایای این روش می‌توان به تولید قطعات با هندسی فضایی بسیار پیچیده که با سایر روش‌ها قابل دسترسی نیستند اشاره کرد. علاوه بر آن در این روش نیازی به شمار بالای تولید برای به صرفه شدن نبوده و می‌توان به صورت کاملاً هدفمند قطعات با هندسه منحصر به فرد را ایجاد نمود [۱، ۲].

روش‌های متفاوتی برای این منظور تا به حال به کار برده شده است. مهم‌ترین فرایندهای AM که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند عبارت‌اند از نمونه‌سازی با رزین‌های حساس به نور؛ مدل‌سازی چند افشانه؛ مدل‌سازی به روش لایه‌گذاری هم‌جوش؛ هم‌جوشی انتخابی لیزری؛ ساخت اشیا به روش لایه ای؛ نمونه‌سازی انجمادی سریع؛ نمونه‌سازی پخت زمینه جامد؛ نمونه‌سازی شبکه لیزری؛ و نمونه‌سازی افشانه گرمایی [۳، ۱].

هرچند مرسوم‌ترین روش‌های تولید در حال حاضر روش لایه‌گذاری هم‌جوش (FDM) است، ولیکن به دلیل وضوح پایین (حداکثر دقت ۲۰۰ میکرومتر) و سرعت پایین تولید به دلیل نیاز به حرکت در سه جهت x ، y و z در کنار محدودیت انتخاب مواد ترموپلاست با شرایط رئولوژیک ویژه و محدودیت دمایی افزودنی‌ها و زیرآیند (عدم امکان استفاده از موادی با دمای تخریب کمتر از دمای اکستروژن) موجب کاهش رغبت صنایع به این روش شده است [۱]. روش متداول دیگر استریو لیتوگرافی نام دارد. نخستین بار در اواسط دهه ۸۰ میلادی چارلز هال پلیمرهای با قابلیت پخت نوری را در معرض تابش لیزر اسکن کننده، همانند مکانیسم به کار رفته در پرینترهای لیزری، قرار داد و توانست یک لایه جامد ایجاد کند. با تکرار این عمل و پخت لایه‌های بعدی بر روی لایه قبلی، قطعات سه‌بعدی تولید شد [۱]. در این روش صفحه متحرک در محور Z در حمامی آکنده از رزین حساس به نور غوطه‌ور بوده و منبع نور به آن تابیده می‌شود. هر نقطه از رزین که در معرض تابش قرار گیرد پلیمریزه و جامد شده و باقی قسمت‌های رزین به صورت مونومر

1 Stereo lithography
2 Multi jet modeling
3 Fused deposition modeling (FDM)
4 Selective laser sintering
5 Laminated object manufacturing
6 Rapid freeze prototyping
7 Solid ground curing
8 Laser engineered net shaping
9 Thermojet

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

۲-۱-۱- رزین

رزین استفاده شده یک رزین پخت نوری با ساختمان متاکریلاتی با نام تجاری Maancure 2500 که توسط شرکت مان پلیمر^۱ تولید شده است.

۲-۱-۲- پرکننده معدنی کربنات کلسیم (CaCO₃)

برای بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده از پرکننده معدنی کربنات کلسیم با دو نوع اندازه ذرات استفاده شد. میکروذرات کربنات کلسیم رسوبی با میانگین اندازه ذرات ۲ میکرومتر با کد Barin 132 از شرکت شیمی معدنی همدان^۲ و نانو ذرات کربنات کلسیم با میانگین اندازه ذرات ۱۵-۳۰ نانومتر از شرکت اومیا^۳ تهیه شده است.

۲-۱-۳- عامل پراکنش^۴

به منظور ترشوندگی بهتر ذرات پرکننده در رزین و پایداری آن‌ها و همچنین جلوگیری از تجمع مجدد احتمالی پس از پخش کردن در رزین، از عامل پراکنش کننده با نام تجاری AS7074 محصول شرکت آنا شیمی^۵ استفاده شده است.

۲-۱-۴- عامل اصلاح سطحی

در آماده‌سازی نمونه‌های اصلاح شده، برای اصلاح سطح نانو ذرات کربنات کلسیم از سیلان با نام ۳- (تری متوکسی سیلیل) پروپیل متاکریلات شرکت سیگما آلدریج با درصد خلوص ۹۸ درصد استفاده شده است.

۲-۲- روش آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های شامل میکرو ذرات کربنات کلسیم با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی و نمونه‌های دارای نانو ذرات کربنات کلسیم با مقادیر ۵ و ۱۰ درصد، آماده شدند. پس از چاپ قطعات با ضخامت لایه ۵۰ میکرومتر و پس‌پخت قطعات در زمان بهینه برای هر نمونه (برای هر نمونه روبش از ۱ الی ۴۰ دقیقه انجام شده و زمان بهینه بر اساس خواص فیزیکی مکانیکی مشخص شد)، آزمون‌های مورد نظر بر روی قطعات چاپ شده انجام شد. فرمول‌بندی و کد اختصاری نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

در این روش منبع تابش به‌جای نور لیزر یک ویدئو پروژکتور با رزولوشن بسیار بالا می‌باشد و به‌جای حرکت نور در راستای محورها، هر قطعه سه‌بعدی به صدها عکس دوبعدی تبدیل شده و هر بار تصویر یک لایه بر روی صفحه متحرک تابیده شده سپس صفحه در راستای محور Z حرکت کرده و تصویر لایه بعدی تابیده می‌شود [۷].

با حذف حرکت در راستای محور X و Y سرعت پرینت در این روش بسیار زیادتر شده و دقت نیز افزایش می‌یابد. تنها عامل محدودکننده در این روش وضوح تصویر و ابعاد تصویر پروژکتور به کار رفته بوده و در صورت استفاده از پروژکتور مناسب می‌توان قطعات با ابعاد بزرگ را تهیه نمود. با حذف شدن حرکت در راستای X و Y، عامل محدود کننده سرعت تعداد لایه‌های موجود در راستای محور Z و سرعت پخت هر لایه می‌باشد. یکی دیگر از نقاط قوت این روش نسبت به روش FDM می‌توان به یکنواخت‌تر بودن خواص در سه جهت و وابستگی بسیار کمتر به جهت پرینت اشاره کرد [۸-۱۲].

در بدو ابداع این روش به دلیل گران بودن مواد اولیه و فرایند تولید بیشتر مطالعات بر روی تهیه قالب‌های ریختگری و تهیه قطعات سرامیکی متمرکز بوده و کمتر مطالعه‌ای در زمینه خواص فیزیکی مکانیکی قطعات حاصل از رزین‌های فاقد و یا با مقادیر کم پرکننده جهت استفاده در سایر زمینه‌ها انجام پذیرفته است [۴، ۱۳]. با اتمام مدت زمان حق انحصاری ثبت اختراع‌ها و فراگیر شدن دستگاه‌های ارزان قیمت رومیزی نیاز به مطالعه بیشتر بر روی پارامترهای مؤثر در خواص قطعات تهیه شده با این‌گونه پرینترها احساس می‌شود. رزین‌ها به خاطر ذات آلی بودنشان اغلب از خواص فیزیکی مکانیکی بالایی برخوردار نبوده و اغلب نیازمند اصلاح توسط افزودنی‌های معدنی می‌باشند [۱۴، ۱۵]. تفاوت فاحش قیمت پرکننده‌های معدنی با بستر رزینی نیز عامل محرک دیگری برای استفاده حداکثری از پرکننده‌ها می‌باشد.

متأسفانه مطالعات کمی در راستای مطالعه تأثیر افزودنی‌های معدنی بر خواص رزین‌های مورد استفاده در استریولیتوگرافی به عمل آمده است. در این مطالعه سعی شده تأثیر افزودن میکرو و نانو ذرات کربنات کلسیم به‌عنوان یک پرکننده معدنی مرسوم بر خواص یک نمونه رزین صنعتی مرسوم برای استفاده در چاپگرهای سه‌بعدی استریولیتوگرافی با صفحه متحرک به سمت بالا مورد مطالعه قرار گیرد.

¹ Maan polymer Co.

² Chemie Madani Hamadan Co. (Iran)

³ Omya

⁴ Dispersing agent

⁵ Ana chemie (Iran)

جدول ۱ فرمول‌بندی و کد اختصاری نمونه‌های مورد مطالعه

Table 1 Formulation and abbreviation of the studied samples

نمونه	رزین تجاری (%)	کربنات کلسیم (%)	نانو کربنات کلسیم (%)	نانو کربنات کلسیم اصلاح شده (%)
Neat	۱۰۰	۰	۰	۰
15M	۸۵	۱۵	۰	۰
20M	۸۰	۲۰	۰	۰
5N	۹۵	۰	۵	۰
10N	۹۰	۰	۱۰	۰
5TN	۹۵	۰	۰	۵
10TN	۹۰	۰	۰	۱۰

الف- در نمونه‌های حاوی پرکننده میکرو و نانو ذرات کربنات کلسیم، برای اطمینان از پراکنش مناسب ذرات پرکننده، مقدار مشخص از کربنات کلسیم را به مخلوط اضافه نموده و مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه و به کمک دستگاه هموژنایزر مدل HG-15D شرکت DAIHAN Scientific Co ساخت کشور کره با سرعت ۱۲۰۰۰ rpm هم‌زده شد. به‌منظور اطمینان از پخش ذرات در اندازه مناسب برای چاپ قطعات، پس از زمان‌های ۵ و ۱۰ دقیقه اختلاط به‌وسیله هموژنایزر، دانه‌بندی رزین به‌وسیله آزمون دانه‌بندی کنترل شد که اندازه ذرات کمتر از ۲۰ میکرون بود. برای جلوگیری از افزایش دمای آمیزه در هنگام اختلاط توسط هموژنایزر و یکسان بودن شرایط دمایی برای همه‌ی نمونه‌ها، بشر حاوی مواد درون حمام آب یخ قرار داده شد.

ب- به منظور اصلاح سطح نانو ذرات کربنات کلسیم، به ازای هر یک گرم از نانو ذرات مقدار ۲۰ سی سی استون تولید شرکت مرک آلمان درون بشر ریخته و به مدت ۱۰ دقیقه در دو مرحله‌ی ۵ دقیقه ای، با توان ۷۰ وات و زمان‌های ۰/۷ ثانیه روشن- ۰/۳ ثانیه خاموش پخش شدن ذرات به‌وسیله همگن کننده فراصوت میله‌ای مدل HD3200 ساخت شرکت Bandelin کشور آلمان انجام شد. در مرحله بعد به میزان نصف وزن نانو ذرات، سیلان - (تری متوکسی سیلیل) پروپیل متاکریلات اضافه شد و درب و اطراف بشر کاملاً با فویل آلومینیومی پوشیده شده و به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سپس مجدداً ۱۰ دقیقه مطابق شرایط ذکر شده نمونه به‌وسیله همگن کننده فراصوت مخلوط شد. رزین تجاری به نمونه‌ی مذکور اضافه و به‌وسیله همزن مغناطیسی در دمای ۶۰-۷۰ درجه سانتی گراد حذف حلال استون انجام شد [۱۶]. در تمام مراحل اطراف ظرف نمونه کاملاً

با فویل آلومینیومی پوشیده شده بود و در فضای با حداقل نور حذف استون از نمونه انجام شد تا از پیشرفت واکنش و پخت آن جلوگیری گردد.

۲-۳- تجهیزات

۱-۳-۲- دستگاه پرینتر^۲ DLP

چاپ قطعات توسط یک چاپگر سه‌بعدی از نوع DLP با نام Parsa 3D ساخت ایران انجام شد. برای تعیین زمان بهینه‌ی تابش، زمان‌های مختلفی از تابش نور در محدوده ۰/۳ تا ۱/۵ ثانیه بر روی طرح تست پرینت بررسی شده و با توجه به نتایج حاصل زمان مناسب تابش انتخاب شد. معیار انتخاب حداقل زمان تابش برای پرینت کامل و بدون نقص نمونه بود. برای فرایند پسا پخت قطعات چاپ شده، از محفظه UV مجهز به ۱۲ عدد LED با قدرت ۳ وات با طول موج ۳۸۵ نانومتر و ۱۲ عدد LED ۳ وات با طول موج ۴۰۵ نانومتر استفاده شد. تصویر نمونه تست پرینت در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۴-۲- آزمون‌های انجام شده و دستگاه‌های مورد استفاده

۱-۴-۲- آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی نوری (Photo- DSC) گرماسنجی روبشی تفاضلی نوری نوع جدیدی از گرماسنجی است که به دلیل سادگی و سرعت زیاد، امکان مطالعه سینتیک و فعالیت پلیمریزاسیون‌های آغاز شده با نور را در یک بازه زمانی کوتاه فراهم می‌کند. با استفاده از این آزمون می‌توان متغیرهایی مانند ساختار منومرها و آغازگرهای نوری در فرایند پلیمر شدن، ترکیب فرمول بندی، دما و اثر اتمسفر (اکسیژن یا گازهای خنثی) را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد. اساس کار این روش مانند DSC معمولی است با این تفاوت که در این روش به جای اعمال گرما از یک منبع نور UV استفاده می‌شود. این آزمون در دمای اتاق تحت تابش نور فرابنفش (UV) انجام شد. دستگاه DSC مورد استفاده در این آزمون ساخت شرکت Toledo Mettler سوئیس و لامپ UV مدل Hamamatsu ساخت کشور ژاپن است.

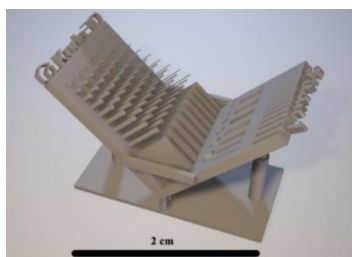


Fig. 2 Test print sample image

شکل ۲ تصویر نمونه تست پرینت

^۲Digital light projector based

^۱ Homogenizer

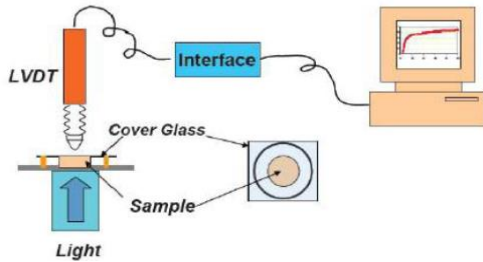


Fig. 3 Schematic illustration of the shrinkage test device

شکل ۳ شماتیکی از دستگاه آزمون جمع شدگی

۲-۵-۶- آزمون کشش

برای تعیین استحکام، مدول و ازدیاد طول در نقطه شکست، بر روی نمونه‌ها آزمون کشش انجام شد. نمونه‌های دمبلی شکل مطابق استاندارد ISO-527 چاپ شده و پس از پساپخت با سرعت کشش ۵ mm/min به کمک دستگاه Santam 2000 ساخت شرکت سنتام ایران مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج گزارش شده میانگین داده‌های پنج نمونه هستند.

۳- نتایج و بحث

برای ارزیابی اثرات افزودن میکرو ذرات کربنات کلسیم در قابلیت چاپ رزین، مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی کربنات کلسیم به رزین قبل از چاپ افزوده شد. تا ۱۵ درصد وزنی کربنات کلسیم، نمونه‌های پرینت شده در جهت Z همگن نبودند و غلظت ذرات کربنات کلسیم در نمونه‌ی پرینت شده با افزایش شماره لایه، کاهش می‌یافت. به نحوی که همان‌گونه که در شکل ۴- الف دیده می‌شود با افزایش ارتفاع چاپ رنگ نمونه تغییر کرده و از رنگ خاکستری به رنگ نارنجی که رنگ نمونه رزین خالص است تغییر می‌یافت. دلیل این ماجرا را می‌توان در شرایط حاکم بر فرایند تولید جستجو کرد. از آنجا که فرایند تولید شامل تکرار سیکل غوطه‌وری-تابش-جدایش از سطح زیرین-افزایش ارتفاع-کاهش ارتفاع و غوطه‌وری مجدد به ارتفاع جدید است رزین به‌صورت مکرر در داخل حمام در راستای محورهای X و Y به جلو عقب رانده می‌شود. تکرار بسیار زیاد این فرایند (به‌طور مثال برای چاپ قطعه‌ای به ارتفاع ۱ سانتی‌متر با دقت ابعادی ۵۰ میکرومتر فرایند فوق حداقل ۲۰۰ سیکل تکرار می‌گردد) موجب می‌شود به تدریج ذرات کربنات کلسیم تحت امواج ایجاد شده در رزین به سمت لبه‌های مخزن حرکت کرده و رزین زیرناحیه پخت به تدریج از پرکننده معدنی خالی شود. هر قدر خواص فیزیکی پرکننده با رزین متفاوت باشد تمایل به دوفاز شدن بیشتر شده و در نتیجه این اثر تشدید می‌شود. در درصد‌های وزنی ۱۵ و ۲۰، افزایش ویسکوزیته برای خنثی کردن

۲-۴-۲- آزمون ویسکوزیته

یکی از پارامترهای مؤثر بر پرینت پذیری رزین، ویسکوزیته‌ی آن است که برای اندازه‌گیری ویسکوزیته از ویسکومتر Krebs مدل VK2000 ساخت شرکت VISCOTECH اسپانیا استفاده شد. اندازه‌گیری ویسکوزیته بر اساس استاندارد ASTM D562 در دمای $25 \pm 1^\circ\text{C}$ با استفاده از یک اسپیندل پره‌ای انجام شد.

۲-۴-۳- آزمون سختی Shore D

در این تحقیق ارزیابی میزان پخت و زمان لازم پساپخت به‌وسیله آزمون سختی Shore D انجام شد.

۲-۴-۴- آزمون جمع شدگی (Shrinkage)

روش انجام آزمون: این آزمون با روش دیسک متصل‌که توسط واتس و کش [۱۷] توسعه یافته است، انجام شد. در این آزمون حلقه‌ای برنجی به قطر تقریبی ۱۶ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر بر روی یک لام شیشه‌ای (ضخامت ۰/۳ میلی‌متر) به‌گونه‌ای که وسط لام شیشه‌ای با مرکز حلقه یکسان باشد چسبانده شد. حلقه مومی (پارافینی) به قطر تقریبی ۷ میلی‌متر تهیه شد و در وسط حلقه برنجی قرار گرفت. سپس از یک لام شیشه‌ای به‌منظور اعمال فشار جهت چسباندن حلقه مومی به لام شیشه‌ای زیرین استفاده شد. بعد از هم ارتفاع شدن حلقه مومی با حلقه برنجی، لام شیشه‌ای رویی برداشته شد. نمونه در داخل حلقه مومی ریخته شد و یک لام شیشه‌ای منعطف به گونه‌ای که وسط لام با مرکز حلقه برنجی منطبق باشد بر روی حلقه برنجی قرار گرفت و با کمی فشار بر روی آن، رزین به صورت یکنواختی داخل حلقه پارافینی پخش شد. در مرحله‌ی بعد نوک تیز دستگاه به گونه‌ای بر روی نمونه تنظیم شد که در وسط لام (که با مرکز حلقه برنجی و حلقه پارافینی یکسان است) قرار گیرد. سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پخت نوری با شدت حدود 500 mw/cm^2 به مدت ۴۰ ثانیه و در معرض تابش نور فرابنفش با طول موج ۳۶۰ نانومتر قرار داده شدند. میزان کرنش حاصل از جمع شدگی به طور پیوسته تا زمان ۱۰۰۰ ثانیه پس از آغاز نوردهی توسط یک Linear variable differential transduce (LVDT) اندازه‌گیری شد. با مشتق‌گیری عددی از داده‌های کرنش حاصل از جمع شدگی بر حسب زمان منحنی سرعت کرنش جمع شدگی به دست آمد. این آزمون برای هر نمونه ۳ بار تکرار شد. در شکل ۳ شماتیکی از دستگاه فوق نشان داده شده است.

¹ Bonded disk

جدول ۲ نتایج ویسکوزیته فرمول بندی‌های مختلف آماده شده

10N	5N	20M	15M	خالص	تجاری	کد نمونه
۲۴۳	۱۸۱	۲۸۷	۲۴۱	۱۵۰	۱۹۰	ویسکوزیته (سانتی پواز)

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزودن پرکننده و همچنین افزایش آن ویسکوزیته افزایش می‌یابد. میزان ویسکوزیته مطلوب برای چاپ با روش صفحه متحرک به سمت بالا بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ سانتی پواز تعیین گردید. با افزایش ویسکوزیته به بیش از تقریباً ۳۰۰ سانتی پواز به دلیل سخت شدن جریان‌یابی مجدد پس از هر بار پرینت و گیرکردن حباب هوا، پرینت پذیری نمونه مشکل شده و امکان‌پذیر نیست.

۲-۳- آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی نوری

برای بررسی سینتیک پخت رزین اولیه از آزمون گرماسنج تفاضلی نوری استفاده شد. در این راستا ظرف نمونه و ظرف مرجع با استفاده از نور UV در دمای ثابت (دمای محیط) تابش‌دهی شده تا نمونه پخت شود. مشاهده شد که فرایند پخت به‌شدت وابسته به قدرت نور بوده و با افزایش قدرت لامپ (از ۵ درصد به ۱۰۰ درصد) زمان مورد نیاز برای تکمیل پخت از ۲۰ دقیقه به کمتر از ۱۵ ثانیه افت می‌کند. همچنین مشاهده شد که فرایند پخت به‌صورت دفعی و با آزادسازی انرژی قابل توجهی همراه بوده و حداکثر میزان پخت در لحظات اولیه تابش رخ می‌دهد. در شکل ۵ نمودارهای پخت در DSC نوری در دو توان مختلف نشان داده شده‌اند.

۳-۳- آزمون سختی (Shore D)

برای بررسی میزان پخت اولیه و زمان لازم پس‌پخت، نمونه‌هایی به شکل مکعب با ابعاد ۱ سانتی‌متر چاپ شده و در زمان‌های مختلف سختی آن‌ها به‌وسیله آزمون سختی Shore D اندازه‌گیری شد. با توجه به حداکثر سختی اندازه‌گیری شده، زمان نهایی پس‌پخت قطعات چاپ شده تعیین شد. نکته‌ی قابل توجه در مورد پخت و سختی قطعات چاپ شده، تفاوت سختی اولیه در سطح چسبیده به صفحه ساخت (لایه‌ی اول) و سطح مقابل (لایه‌ی آخر) آن است که دلیل آن نفوذ نور در تابش‌های متوالی در لایه‌های اولیه چاپ شده است. در نمونه‌های فاقد پرکننده رزین شفاف است و با هر بار تابش قسمتی از نور به لایه‌های بالاتر می‌رود.

این اثر کافی بوده و شسته شدن ذرات به کناره مشاهده نگردید و همان‌گونه که در شکل ۴- ب مشاهده می‌شود قطعه رنگ یکنواختی داشت. با افزایش غلظت پرکننده به بالای ۲۰ درصد، قابلیت چاپ کاهش یافت. دلیل این امر را می‌توان در افزایش ویسکوزیته جستجو کرد. در فرایند چاپ برای ادامه فرایند در هر مرحله بایستی حداقل به میزان ارتفاع لایه جدید رزین مایع جهت پلیمریزه شدن در ناحیه چاپ قرار گیرد. در دستگاه‌های با صفحه متحرک به سمت بالا این عمل تنها با جاری شدن رزین امکان پذیر است، به این ترتیب که پس از جدا شدن قطعه از سطح زیرین و در حین بالا رفتن صفحه متحرک، رزین جدید بایستی تحت نیروی جاذبه و جریانی که حاصل از حرکت صفحه متحرک به سمت بالا در حمام ایجاد می‌شود، در محل چاپ جاری شود تا پرینتر برای چاپ لایه جدید آمادگی لازم را پیدا کند. با افزایش ویسکوزیته در کنار کاهش توانایی رزین به جاری شدن امکان حبس حباب‌های هوا در رزین افزایش یافته و به‌صورت هم‌زمان امکان خروج آن‌ها نیز کاهش می‌یابد و به دلیل دقت بالای فرایند چاپ، حضور حباب‌های هوا در نمونه موجب قطع شدن چاپ در مکان‌های با ظرافت بالا شده و در سایر نقاط این حباب‌ها به سان نقص عمل می‌کنند.

در نمونه‌های با نانو ذرات نانوکربنات کلسیم، غلظت مناسب برای چاپ بین ۵ تا ۱۰ درصد تعیین شده و در مقادیر کمتر و بیشتر اثر مشابه آنچه در بالا ذکر شد مشاهده گردید.

۱-۳- ویسکوزیته

ویسکوزیته نمونه‌های آماده شده و یک نمونه رزین خالص تجاری مرجع با نام تجاری Cheri محصول شرکت B9 creator که در صنعت ریختگری دقیق استفاده می‌شود اندازه‌گیری و نتایج به دست آمده در جدول ۲ گزارش شده است.

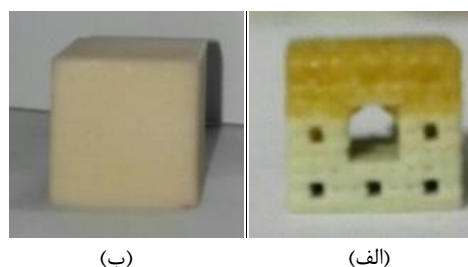


Fig. 4 Images of samples containing: A - 5 wt % of carbonate calcium - B - 20 wt % of carbonate calcium

شکل ۴ تصاویری از نمونه‌های تهیه شده حاوی الف- ۵ درصد وزنی کربنات کلسیم و ب- ۲۰ درصد وزنی کربنات کلسیم

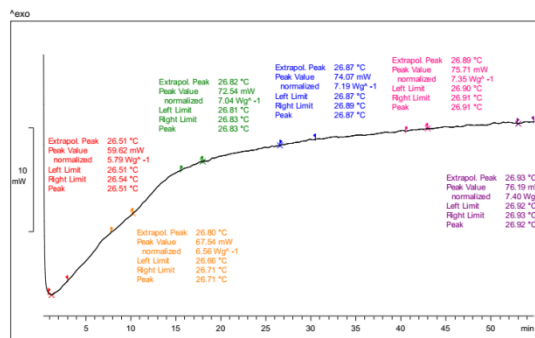
جدول ۳ نتایج سختی با زمان‌های مختلف پساپخت.

کد نمونه	زمان پساپخت (دقیقه)	سختی لایه اول	سختی لایه آخر
خالص	۰	۸۳	۸۱
	۱۰	۸۴	۸۲
	۲۰	۸۵	۸۴
	۳۰	۸۵	۸۵
	۴۰	۸۵	۸۵
20M	۰	۸۸	۸۸
	۱۰	۸۹	۸۸
	۲۰	۸۹	۸۹
	۳۰	۹۰	۹۰
	۴۰	۹۰	۹۰
10N	۰	۸۳	۸۱
	۱۰	۸۴	۸۳
	۲۰	۸۵	۸۴
	۳۰	۸۶	۸۵
	۴۰	۸۶	۸۶
5TN	۰	۸۴	۸۰
	۱۰	۸۵	۸۴
	۲۰	۸۵	۸۵
	۳۰	۸۶	۸۶
	۴۰	۸۶	۸۶

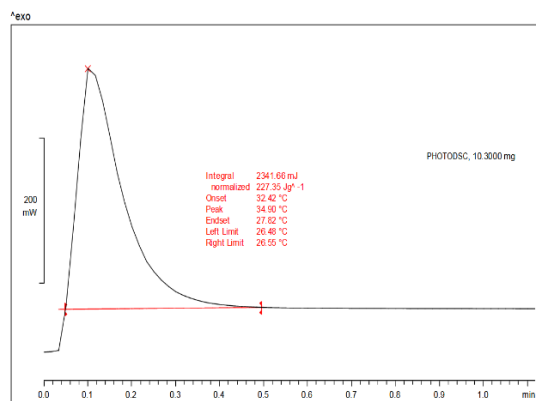
نمونه‌های دارای ۲۰ درصد وزنی پرکننده‌های سایز میکرو، سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند که با توجه به حضور ۲۰ درصد وزنی پرکننده معدنی منطقی است. ولیکن نمونه‌های حاوی نانو ذرات سختی کمتری را در مقایسه با نمونه حاوی ذرات میکرو و تقریباً برابر نمونه خالص از خود نشان می‌دهند که می‌تواند به دلیل حضور مقدار کمتری از مواد در محصول باشد. با توجه به افزایش ویسکوزیته امکان افزودن نانو ذرات به مقادیر بیشتر نبوده و لذا امکان مقایسه نتایج در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد مهیا نبود. از آنجا که معیار زمان پساپخت ثابت شدن سختی قطعه طی دو اندازه‌گیری متوالی بود، مشاهده شد که نمونه‌های حاوی پرکننده فارق از ابعاد پرکننده پس از ۳۰ دقیقه قرارگیری در معرض فرایند پساپخت به حداکثر میزان سختی رسیده و نیازی به ادامه فرایند نیست. دلیل اینکه هر دو نمونه در یک زمان به حداکثر سختی رسیده‌اند را می‌توان به قالب بودن رفتار رزین به دلیل کم بودن نسبی ذرات پرکننده نسبت داد.

۴-۳- جمع شدگی (Shrinkage)

رزین‌های مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی از خانواده آکریلات و متاکریلات‌ها هستند که واکنش‌پذیری بالایی داشته و از جمع



(الف)



(ب)

Fig. 5 Photo DSC results for neat resin in A:5% light intensity B:100% light intensity

شکل ۵ الف- نتیجه آزمون گرما وزن‌سنجی تفاضلی نوری رزین خالص در ۵ درصد توان لامپ ب- نتیجه آزمون گرما وزن‌سنجی تفاضلی نوری رزین خالص در ۱۰۰ درصد توان لامپ

هرچند میزان نفوذ نور بسیار کم است ولیکن به دلیل تعدد دفعات تابش، نور منتقل شده خود می‌تواند به‌عنوان منبعی برای ادامه هرچند کم پلیمریزاسیون بوده و به عبارتی همانند پساپخت عمل کرده لذا سختی لایه‌هایی که اول ایجاد می‌شوند بالاتر خواهد بود. لایه‌های آخر در فرایند چاپ به دلیل اینکه به واسطه اتمام مرحله چاپ کمتر در معرض تابش نور قرار می‌گیرند و در نتیجه همواره از سختی کمتری برخوردارند. بنابراین پس از خارج نمودن قطعه از پرینتر و شستشوی آن، قطعه بایستی به نحوی در کوره پساپخت نوری قرار گیرد که لایه‌های آخر چاپ شده رو به لامپ پساپخت بوده و بیشترین میزان نور را دریافت کنند تا بدین طریق تفاوت میزان پخت در دستگاه جبران شود. با توجه به این نکته، سختی از هر دو سطح مذکور گرفته شد که نتایج چند نمونه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این نتایج زمان ۴۰-۳۰ دقیقه به‌عنوان زمان پساپخت برای نمونه‌ها مختلف انتخاب شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پس از گذشت ۲۰ دقیقه از پساپخت سختی دو طرف نمونه فاقد پرکننده یکسان شده و با افزایش زمان تثبیت شده و بالاتر نمی‌رود.

جدول ۵ نتایج آزمون کشش

کد نمونه	مدول (GPa)	استحکام (MPa)	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)
Neat	0.1888 ± 0.03	27.01 ± 2.22	4.78 ± 0.42
15M	1.146 ± 0.10	31.75 ± 5.81	3.42 ± 0.75
20M	1.376 ± 0.05	24.62 ± 1.46	2.19 ± 0.18
5N	0.1881 ± 0.047	30.55 ± 0.97	3.90 ± 0.03
10N	1.121 ± 0.38	36.07 ± 3.96	4.06 ± 0.35
5TN	1.499 ± 0.065	41.85 ± 1.61	3.15 ± 0.24
10TN	1.845 ± 0.043	47.41 ± 3.65	2.85 ± 0.13

با توجه به نتایج شکل ۶ و جدول مشاهده می‌شود که با افزودن میکرو و نانو ذرات کربنات کلسیم در مقادیر مختلف، به‌طور کلی خواص مکانیکی بهبود یافته است. در میکروذرات کربنات کلسیم، می‌توان ۱۵ درصد را به‌عنوان درصد بهینه انتخاب کرد زیرا با افزایش پرکننده به میزان ۲۰ درصد شاهد کاهش استحکام در نقطه شکست هستیم که می‌توان دلیل آن را نایکنواختی ذرات در هنگام چاپ شدن قطعات و تجمع ذرات در حین پخت دانست. یکی از اثراتی که باید مورد توجه قرار گیرد، تغییر رفتار پخت به دلیل پراکندگی نور با افزایش درصد پرکننده است که می‌تواند فرایند پخت را تحت تأثیر قرار دهد.

در نمونه‌های حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم، خواص مکانیکی با افزایش نانو ذرات روند افزایشی دارد. در نمونه‌ی 5N مقادیر مدول، مشابه نمونه‌ی خالص شده است و نتایج نمونه‌ی 10N به وضوح بهتر از نتایج نمونه‌های دارای میکروذرات کربنات کلسیم در مقادیر مختلف است.

همان‌گونه که از داده‌های فوق به خوبی پیدا است، افزایش پرکننده‌های معدنی به رزین مورد استفاده در چاپگرهای سه‌بعدی موجب افزایش خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود. ولیکن بایستی در نظر داشت که ذرات معدنی به دلیل تفاوت‌های ذاتی با بستر رزینی از چسبندگی مناسبی در بستر رزین برخوردار نیستند و در صورت اصلاح سطحی می‌توان خواص فیزیکی مکانیکی کامپوزیت نهایی را افزایش چشمگیری داد. برای این منظور اغلب از اصلاح‌کننده‌های سطح سیلانی استفاده می‌شود. این اصلاح‌کننده‌های سطحی با داشتن گروه‌های عاملی متفاوت در سطح خود امکان برقراری ارتباط شیمیایی بین ذره معدنی با بستر رزینی را فراهم کرده موجب افزایش استحکام آن می‌گردند [۱۸]. از آنجا که بستر رزینی رزین‌های مورد استفاده در استریو لیتوگرافی اغلب آکریلاتی و متاکریلاتی است [۱۹] از اصلاح

شدگی نسبتاً بالایی برخوردار هستند. رزین‌های مورد استفاده در هر بار روبش به دلیل زمان کمتر تابش نسبت به زمان مورد نیاز برای پخت کامل، تنها به مقداری در طی فرایند تابش نور پخت شده و پس از اینکه لایه جدید بر روی لایه قدیمی قرار می‌گرفت نور از آن عبور کرده موجب ادامه فرایند پخت در لایه‌های زیرین می‌شود. این اتفاق موجب از بین رفتن دقت مورد نیاز در قطعه نهایی و همچنین ایجاد تنش باقی مانده در اثر جمع شدگی اضافه و در نتیجه تغییر شکل قطعی نهایی می‌شود. یکی از محاسن افزودن کربنات کلسیم به این رزین‌ها کاهش جمع شدگی و چاپ قطعات با دقت ابعادی بالاتر است. نتایج آزمون جمع شدگی در جدول ۴ ارائه شده است.

۵-۳- آزمون کشش

از هر فرمولاسیون ۵ عدد دمبل مطابق استاندارد ISO-527 جهت آزمون کشش چاپ شد و پس از پساپخت به‌وسیله دستگاه آزمون کشش یونیورسال (Santam 2000) مورد آزمون قرار گرفت. برای مقایسه بهتر نتایج آزمون کشش نمونه‌های مختلف، نموداری از هر یک از فرمول بندی‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است. همچنین نتایج این آزمون در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۴ نتایج آزمون جمع شدگی

کد نمونه	درصد جمع شدگی
خالص	۶/۷
20M	۵/۸

Table 4 Results of shrinkage test

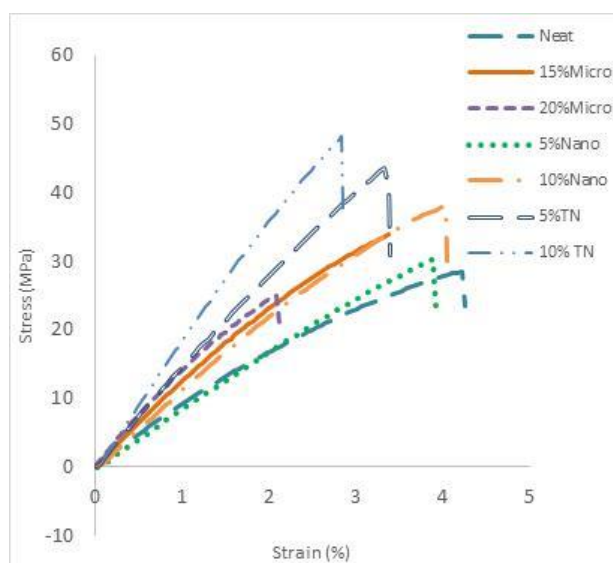


Fig. 6 Tensile test diagrams of different formulations

شکل ۶ مقایسه نمودارهای آزمون کشش فرمول بندی‌های مختلف

۵- جمع‌بندی

این مطالعه برای بررسی امکان بهبود خواص رزین‌های صنعتی به کار رفته در چاپگرهای سه‌بعدی استریو لیتوگرافی رومیزی با مکانیسم DLP و صفحه متحرک رو به بالا صورت پذیرفت. مشاهده شد که برای افزودن میکرو و نانو ذرات یک حد کف و سقف باید مورد توجه قرار گیرد که تابع ویسکوزیته رزین بوده و مابین ۱۸۰ تا ۳۰۰ سانتی پواز می‌باشد که بالاتر و یا پایین‌تر از آن، افزودن ذرات معدنی موجب عدم یکنواختی چاپ و یا عدم امکان چاپ می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزودن ذرات معدنی می‌تواند موجب کاهش جمع‌شدگی ناشی از پخت به میزان ۱ درصد گردد. مشاهده شد که افزودن میکرو و نانو ذرات کربنات کلسیم به‌خصوص پس از اصلاح سطحی توسط سیلان مناسب می‌تواند خواص مکانیکی را تا ۷۰ درصد افزایش دهد. علاوه بر آن مشاهده شد که برای رسیدن به حداکثر میزان خواص مکانیکی انجام فرایند پساپخت ضروری می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Gibson, I., *Additive Manufacturing Technologies*: Springer, 2014.
- [2] Meboldt, M. and C. Klahn, *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*, Springer International Publishing, 2017.
- [3] Wong, K.V. and A. Hernandez, *A review of additive manufacturing*. ISRN Mechanical Engineering, 2012.
- [4] Bártolo, P.J., *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*, Springer US, 2011.
- [5] Jacobs, P.F., et al., *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [6] Bikas, H., P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **83**(1-4): pp. 389-405, 2016.
- [7] Hatzenbichler, M., et al. Additive manufacturing of photopolymers using the Texas Instruments DLP lightcrafter. in *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications V. International Society for Optics and Photonics*, 2013.
- [8] Fernandez-Vicente, M., et al., Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, **3**(3): pp. 183-192, 2016.
- [9] Wang, X., et al., 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, **110**. pp. 442-458, 2017.

کننده سطحی (تری متوکسی سیلیل) پروپیل متاکریلات استفاده شد.

در ادامه با انجام اصلاح سطح نانو ذرات و افزودن آن به میزان ۵ درصد وزنی در رزین، استحکام تا ۳۶ درصد نسبت به نمونه‌ی بدون اصلاح سطح (5N) و ۵۴ درصد نسبت به نمونه‌ی خالص افزایش نشان داده است. نتایج مدول کششی نیز حدود ۷۰ درصد نسبت به نمونه‌های خالص و ۵ درصد بدون اصلاح سطح افزایش یافته است. با افزودن ۱۰ درصد وزنی نانو ذرات اصلاح شده میزان بهبود خواص نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی نانو ذرات فاقد اصلاح سطحی استحکام ۳۱ درصد و نسبت به نمونه فاقد نانو ذرات ۷۵ درصد می‌باشد.

با هدف مطالعه تاثیر فرایند پساپخت بر روی خواص مکانیکی، از نمونه‌های چاپ شده با فرمول 5TN بدون انجام مرحله پسا پخت (نمونه 5%TN-WP) و پساپخت شده به مدت زمان ۴۰ دقیقه (نمونه 5%TN) آزمون کشش انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با انجام مرحله‌ی پساپخت و کامل شدن واکنش‌ها در نمونه 5%TN، مدول و استحکام کششی به ترتیب از ۰/۸ به ۱/۴۹ GPa و از ۳۳ به ۴۲ MPa افزایش یافته و ازدیاد طول تا نقطه‌ی شکست از ۱۱/۸ به ۳/۱۵ درصد کاهش یافته است. این نتایج که مطابق با روند تغییرات سختی با زمان پساپخت است ضرورت مرحله‌ی پساپخت بر روی قطعات چاپ شده پس از اتمام مرحله‌ی چاپ را نشان می‌دهد.

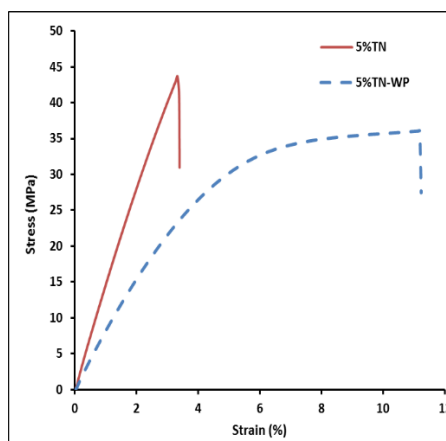


Fig. 7 Tensile test diagrams for samples containing 5wt% nano particles with (5% TN) and without (5% TN-WP) post curing
 شکل ۷ مقایسه نتایج آزمون کشش از نمونه‌های پساپخت شده 5% TN و بدون پساپخت با فرمول 5% TN-WP

- Engineering*. Springer New York, 2013:
- [16] Behzadnasab, M., et al., Corrosion performance of epoxy coatings containing silane treated ZrO₂ nanoparticles on mild steel in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, **53**(1): pp. 89-98, 2011.
- [17] Watts, D. and A. Cash, Kinetic measurements of photo-polymerization contraction in resins and composites. *Measurement Science and Technology*, (8) pp. 788-794, 1991.
- [18] Plueddemann, E.P., *Silane Coupling Agents*. Springer US, 2013.
- [19] Ligon, S.C., et al., Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical reviews*, **117**(15): pp. 10212-10290, 2017.
- [10] Alaimo, G., et al., Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts. *Composites Part B: Engineering*, **113**: pp. 371-380, 2017.
- [11] Mohamed, O.A., et al., Effect of process parameters on dynamic mechanical performance of fdm PC/ABS printed parts through design of experiment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **25**(7): pp. 2922-2935, 2016.
- [12] Dizon, J.R.C., et al., Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 2017.
- [13] Halloran, J.W., Ceramic stereolithography: additive manufacturing for ceramics by photopolymerization. *Annual Review of Materials Research*, **46**: pp. 19-40, 2016.
- [14] Campbell, F.C., *Structural Composite Materials*. 2010: ASM International.
- [15] Chawla, K.K., *Composite Materials: Science and*