



## 3D printing of thermoset composite reinforced with continuous fibers and evaluation of its mechanical properties

Behzad Najafloo<sup>1</sup>, Amir Masood Rezaoust<sup>2</sup>, Masood Latifi<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Textile Engineering Department, Textile Excellence & Research Centers, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

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

Article Information	Abstract
<p><b>Article history:</b></p> <p>Received: 2023-11-08 Accepted: 2024-01-01</p>	<p>There has been a continuous interest in advancing fabrication methods associated with fiber-reinforced composites due to their growing importance across a variety of applications. 3D printing has emerged as a novel approach among these techniques. While short fiber-reinforced composites can be successfully printed, their mechanical properties are often inferior to those of continuous fiber composites. Currently, thermoplastic polymers are commonly used for continuous fiber printing. Despite these drawbacks, thermosetting resins can provide a solution to problems such as low load-bearing capacity, weaker interlayer bonds, and lower strength. In this study, a fused deposition modeling platform was used in order to 3D print thermoset composites reinforced with continuous fibers. Using glass fibers and acrylate resins, single-layer and multilayer composite samples were prepared. Single-layer composites were found to have Young's modulus of elasticity of 4.74 GPa and a tensile strength of 270.91 MPa, indicating significant results when compared to other research studies. During the bending test for multilayer composites, the stress increases linearly with strain and the main fracture occurs in a brittle manner. A numerical model was also applied to simulate the mechanical behavior of the printed parts. The comparison of experimental and numerical results demonstrated a commendable agreement, thereby validating the method's effectiveness.</p>
<p><b>Keywords:</b></p> <p>Lamina/ply, 3D printing, Continuous fiber reinforced Thermoset composites, Mechanical testing.</p>	

(\* ) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail address: [latifi@aut.ac.ir](mailto:latifi@aut.ac.ir)



## چاپ سه‌بعدی کامپوزیت گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته و ارزیابی خواص مکانیکی آن

بهزاد نجف‌لو<sup>۱</sup>، امیرمسعود رضادوست<sup>۲</sup>، مسعود لطیفی<sup>۱\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی نساجی، قطب علمی و مرکز تحقیقات نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱	با توجه به اهمیت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف و کاربردهای متنوع آن‌ها، همواره روش‌های ساخت این کامپوزیت‌ها مورد توجه بوده و چاپ سه‌بعدی به‌عنوان روشی جدید در این حوزه معرفی شده است. الیاف نقش مهمی در خواص کامپوزیت‌ها دارد و اگرچه ساخت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کوتاه با چاپ سه‌بعدی امکان‌پذیر است، اما حداکثر خواص مکانیکی قابل دستیابی با آنها قابل مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف پیوسته نیست. در سال‌های اخیر، مواد پلیمری گرماترم به‌صورت رایج در حوزه چاپ الیاف پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما به‌واسطه‌ی مشکل‌های موجود از جمله ضعف توانایی برابرداری، پیوند ضعیف‌تر بین لایه‌ای و استحکام کم‌تر، استفاده از رزین‌های گرماسخت و استفاده از آنها بسیار می‌تواند، راهگشا باشد. در این پژوهش، از روش لایه‌گذاری هم‌جوش به‌عنوان فناوری پایه برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته استفاده شد. الیاف شیشه و رزین آکریلات برای تولید نمونه‌های کامپوزیت تک‌لایه و چندلایه مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها تحت آزمون‌های کششی و خمشی قرار گرفتند. مدول یانگ ۴/۷۴ گیگاپاسکال و استحکام کششی نهایی ۲۷۰/۹۱ مگاپاسکال برای کامپوزیت‌های تک‌لایه محاسبه شد که درمقایسه با یافته‌های سایر پژوهش‌ها، نتایج قابل توجهی بوده است. نتایج آزمایش خمش برای کامپوزیت‌های چندلایه نشان داد که تنش به‌صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد و شکست اصلی به‌صورت ترد رخ می‌دهد. همچنین، رفتار مکانیکی قطعه‌های ساخته‌شده شبیه‌سازی شد. مقایسه‌ی نتایج تجربی رفتار خمش کامپوزیت چندلایه حاکی از تطابق خوب آنها با خروجی مدل عددی بود.
واژه‌های کلیدی: تک‌لایه، چاپ سه‌بعدی، کامپوزیت الیاف پیوسته، آزمایش مکانیکی.	

## ۱ مقدمه

الگوی سه‌بعدی است. در واقع این روش به مجموعه‌ای از فرآیندهای ساخت اطلاق می‌شود که توسط آنها الگوی فیزیکی یک قطعه‌ی جامد، به‌طور مستقیم از داده‌های هندسی سطوح آن که به کمک رایانه طراحی شده‌است، ساخته شود. در این روش‌ها الگوی سه‌بعدی رایانه‌ای قطعه‌ی مورد نظر را می‌توان به ده‌ها یا هزاران لایه‌ی دو بعدی تقسیم و هر لایه را به‌صورت مجزا ایجاد و سپس با افزودن لایه‌های متعدد بر روی یکدیگر قطعه‌ی نهایی را تولید نمود (شکل ۱) [۲].

از مهم‌ترین فرآیندهای ساخت افزایشی که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند، می‌توان به نمونه‌سازی با رزین‌های حساس به نور، الگوسازی چند افشانه، الگوسازی به روش لایه‌گذاری هم‌جوش، سخت‌سازی انتخابی لیزری، ساخت به روش لایه‌ای، نمونه‌سازی انجمادی سریع، نمونه‌سازی پخت زمینه جامد و نمونه‌سازی شبکه‌ی لیزری اشاره کرد [۲].

امروزه کامپوزیت‌ها از خواص مکانیکی برجسته و انعطاف‌پذیری مناسبی در طراحی برخوردار هستند و روش‌های ساخت آنها به‌طور نسبی آسان است. کامپوزیت‌ها موادی سبک، مقاوم در برابر خوردگی و ضربه، دارای مقاومت خستگی مناسب، مستحکم و با دوام هستند و به روش‌های مختلفی قابل تبدیل به یک محصول یا یک قطعه هستند. یکی از انواع کامپوزیت‌ها که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، کامپوزیت‌های با تقویت‌کننده‌ی لیفی (الیاف، نخ، انواع پارچه‌های حلقوی، تارپودی، برید و سه‌بعدی) هستند. دو ویژگی برجسته کامپوزیت‌های لیفی، استحکام ویژه (نسبت استحکام به وزن) بالا و تنظیم خواص ناهمسان‌گردی آنها یعنی تابعیت خواص به جهت اندازه‌گیری است. استحکام ویژه‌ی بالای این نوع کامپوزیت‌ها سبب شده است که بتوانند از این نظر با بسیاری از مواد رقابت کنند. ویژگی ناهمسان‌گردی خواص نیز این امکان را فراهم کرده که طراح بتواند در مکان‌های مورد نظر بدون افزایش وزن به خواص مطلوب دست یابد [۱].

ساخت افزایشی یا برهم‌افزا که از آن با عنوان چاپ سه‌بعدی نیز یاد می‌شود، یک فرآیند اتصال مواد به یکدیگر برای ساخت قطعه از داده‌های رایانه‌ای

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: latifi@aut.ac.ir

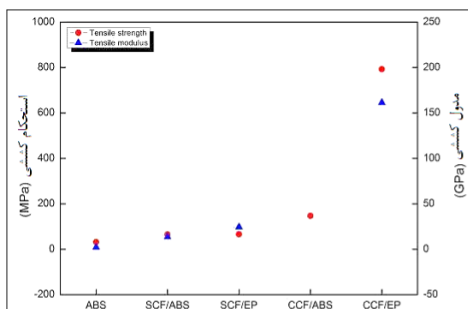
در دسته‌بندی اول، الیاف به‌صورت خشک به همراه مواد گرمانرم مانند آکریلونیتریل بوتادین استایرن و پلی لاکتیک اسید وارد اکسترودر شده و فرآیند چاپ ادامه می‌یابد. امکان تنظیم کسر حجمی الیاف از نقاط مثبت این روش است. حال آن‌که پیوند ضعیف‌تر بین زمینه و الیاف از نکته‌های منفی آن محسوب می‌شود [۷،۸].

استفاده از پیش‌آغشته راهکار یکی از مجموعه‌های معروف سازندگان چاپگرهای سه‌بعدی الیاف پیوسته شرکت امریکایی مارک فورج است که برای چاپ کامپوزیت‌ها استفاده می‌کند. در واقع با بهره‌گیری از روش پیش‌آغشته‌سازی الیاف فرآیند چاپ را انجام می‌دهد. این شرکت تولیدکننده فیلامنت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، شیشه و کولار است که در شماری از کارهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است [۹-۱۱]. علاوه بر این، چندین مقاله مروری درباره‌ی همین موضوع نیز توسط محققان مختلف منتشر شده است [۱۲-۱۴].

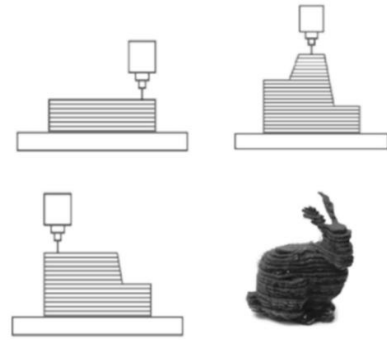
در مقایسه با کامپوزیت‌های گرمانرم، تحقیق‌های گسترده‌ای پیرامون کامپوزیت‌های تقویت‌شده با زمینه گرماسخت انجام نشده‌است. اما ویژگی بهتر این نوع کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌های گرمانرم انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه را امری اجتناب‌ناپذیر می‌کند. کامپوزیت‌های گرماسخت به دلیل ترکیب‌های بین‌مولکولی قوی و واکنش‌های زنجیره‌ای پلیمر گرماسخت و پیوند قوی‌تر بین رزین-الیاف، بهتر از کامپوزیت‌های مشابه ترموپلاستیک می‌باشند [۱۷-۱۵].

در شکل ۲ نتایج چندین پژوهش مشابه در حوزه چاپ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که مشخص است، استفاده از الیاف به‌عنوان جزء تقویت‌کننده و همچنین استفاده از پلیمرهای گرماسخت در مقایسه‌ی با پلیمرهای گرمانرم خصوصیت قابل توجهی به کامپوزیت خواهد بخشید.

کامپتون و همکاران [۱۹] ترکیبی از مواد را در دمای پایین سنتز کردند و از الیاف خردشده‌ی کربن برای تقویت‌کنندگی کامپوزیت و از آمیزه‌ی امیدازول به‌عنوان عامل پخت بهره بردند. آنها با استفاده از فناوری لایه‌نشانی هم‌جوش قطعه‌های کامپوزیتی با ۳۵ درصد کسر وزنی را چاپ و مقدار ۶۶/۲ مگاپاسکال را برای استحکام کششی این کامپوزیت‌ها گزارش کردند.



شکل ۲ ویژگی ارزیابی شده مواد چاپ‌شده سه‌بعدی مختلف: ABS، الیاف کوتاه کربن/ABS [۱۸]، الیاف کوتاه کربن/رزین اپوکسی [۱۹]، الیاف پیوسته کربن/ABS [۱۰] و الیاف پیوسته کربن/اپوکسی



شکل ۱ طرح‌واره روش ساخت برهم‌افزا [۲]

با وجود گستردگی کاربرد چاپ سه‌بعدی امروزه غالب محصول‌های پلیمری چاپ‌شده به‌عنوان نمونه‌های مفهومی و نه کاربردی استفاده می‌شوند، زیرا محصولاتی که از پلیمر خالص تهیه و به این روش‌ها تولید می‌شوند، اغلب فاقد مقاومت بوده و نمی‌توان از آنها به‌عنوان قطعه‌های باربردار و کاربردی بهره برد. چنین مشکل‌هایی موجب محدودیت کاربرد صنعتی این قطعات پلیمری چاپ شده است [۳].

چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های پلیمری این محدودیت را با ترکیب زمینه پلیمری و جزء تقویت‌کننده به‌منظور تحقق سامانه‌ای با ساختار مناسب با خصوصیت کارکردی مورد نیاز حل کرده است. به‌کارگیری ذره‌ها، الیاف یا تقویت‌کننده‌ی نانومواد در پلیمرها امکان تولید کامپوزیت پلیمری را فراهم کرده است. استفاده از نانوذره‌ها به‌طور معمول هزینه بالایی دارد و موجب بهبود خصوصیت فیزیکی-مکانیکی می‌شود اما تأثیر فوق‌العاده‌ای بر خصوصیت مکانیکی قطعه‌های تقویت‌شده ندارد. استفاده از الیاف خردشده به‌عنوان روشی دیگر برای تقویت‌کنندگی کامپوزیت‌ها در چاپ سه‌بعدی متداول است. طی مقایسه‌ی انجام‌شده مقاومت خمشی نمونه‌های چاپ‌شده با فیلامنت‌های حاوی الیاف خردشده‌ی کربن اونیکس تا حدود ۸۰ مگاپاسکال گزارش شده است. در حالی که برای نمونه‌های خالص پلیمری مقاومت خمشی بالاتر از ۶۰ مگاپاسکال ثبت نشده است. از طرفی، نکته حایز اهمیت در مورد کامپوزیت‌های اونیکس این مطلب است که مقاومت خمشی آنها نسبت به کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته تا ۶ برابر کم‌تر گزارش شده است [۴]. لذا در سال‌های اخیر چاپ سه‌بعدی با الیاف پیوسته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از الیاف پیوسته برای چاپ، به‌دلیل پیوستگی آنها نیازمند تمهیدهای خاصی است که موجب می‌شود فرآیند چاپ پیچیده‌تر و مشکل‌تر شود [۵]. کامپوزیت‌های پلیمری را می‌توان بر حسب نوع زمینه طبقه‌بندی کرد. مواد پلیمر گرمانرم مانند آکریلونیتریل، بوتادین استایرن، پلی لاکتیک اسید، پلی آمید و پلی کربنات و همچنین مواد پلیمری گرماسخت مانند اپوکسی رزین‌ها را می‌توان به‌وسیله‌ی این فناوری فرآورش نمود [۶]. به‌طور معمول برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های گرمانرم تقویت‌شده با الیاف پیوسته از دو روش برای چاپ استفاده می‌شود [۷]:

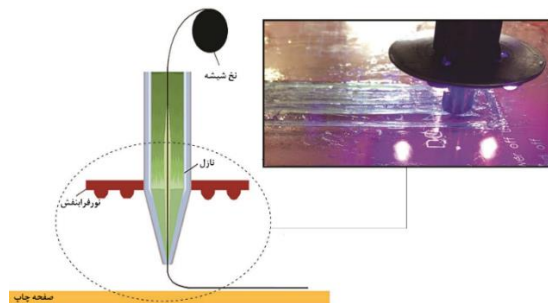
- ورود همزمان الیاف و فیلامنت پلیمری به نازل و آغشته‌سازی درجا
- استفاده از الیاف پیش‌آغشته

هدف این پژوهش، استفاده از یک روش چاپ سه‌بعدی برای ساخت کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته است. در ادامه یک مدل عددی برای رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه ارائه و با داده‌های تجربی مقایسه شد. همچنین، کامپوزیت تک‌لایه و چندلایه‌ی چاپ شده مورد بررسی آزمایش‌های مکانیکی کشش و خمش قرار گرفت و سازوکار شکست آنها مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چاپ‌شده با سایر کامپوزیت‌های مشابه مقایسه شدند.

## ۲ کارهای تجربی و عددی

### ۱-۲ چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته

در این پژوهش، روش لایه‌گذاری هم‌جوش، به‌عنوان فناوری پایه جهت چاپ سه‌بعدی کامپوزیت گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته، استفاده شد (شکل ۳). به منظور این هدف، در ابتدا روش آغشته‌سازی، حرکت الیاف و پخت رزین مشخص شد. الیاف پیوسته از دوک نخ باز شده و سپس وارد حمام رزین گرماسخت می‌شوند. در ادامه الیاف پس از آغشته‌سازی وارد نازل طراحی شده می‌شود و سرانجام از نازل خارج و بر روی صفحه چاپگر قرار می‌گیرد. در ساخت نازل سعی بر آن بوده است که لبه‌های نازل پهن و گرد شده طراحی شوند تا هنگام خارج شدن الیاف از نازل، آنها به‌طور کامل بر روی بستر چاپگر خوابانده شوند و هم‌اینکه، هنگام عبور نازل بین الیاف چاپ‌شده کم‌ترین آسیب به الیاف وارد شود.



شکل ۳ طرح‌واره فناوری چاپ سه‌بعدی کامپوزیت گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته

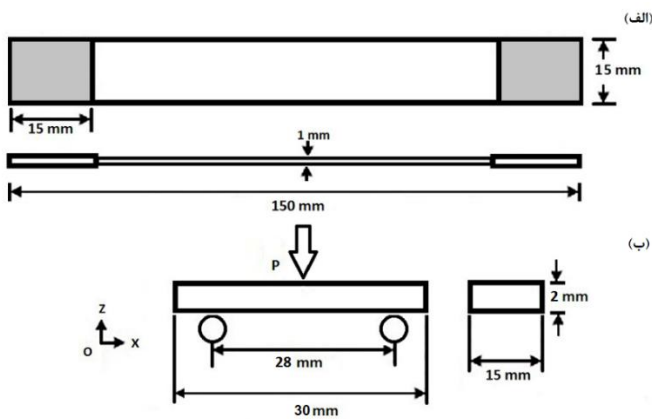
الیاف آغشته شده پس از خروج از نازل بر بستر چاپگر قرار می‌گیرند. در این هنگام از نور یو وی که توسط آل ای دی‌های مخصوص تعبیه شده در اطراف نازل قرار گرفته‌اند برای پخت رزین استفاده می‌شود. با تابش این نور پخت اولیه انجام شده و رزین سخت می‌شود. در ادامه، برای پخت کامل، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در داخل جعبه نور یو وی قرار گرفتند.

برای انجام این پژوهش از دو نوع مختلف تقویت‌کننده الیاف شیشه B و A به‌ترتیب برای نمونه‌های کامپوزیتی تک‌لایه و چندلایه و رزین آکریلات (تولید شرکت رزیتان) استفاده شده است. مشخصه‌های این مواد به صورت تجربی اندازه‌گیری شده و در جدول ۱ آمده است.

اولین کار تحقیقی که در زمینه‌ی چاپ کامپوزیت‌های سه‌بعدی تقویت‌شده با زمینه‌ی گرماسخت با الیاف پیوسته منتشر شده مربوط به پژوهش‌ها و همکاران [۲۰] است. آنها از الیاف پیوسته کربن و رزین اپوکسی به‌عنوان تقویت‌کننده و زمینه استفاده کردند. دستگاه چاپ در نظر گرفته‌شده برای این کار از قسمت‌های حمام آغشته‌سازی، لوله‌های انتقال، راهنماها و نازل چاپ تشکیل شده بود. در نهایت نمونه‌های معیار برای آزمایش خمش و کشش چاپ شدند و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدول الاستیک و استحکام کششی برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با زمینه‌ی گرماسخت به ترتیب برابر ۱۶۱/۴ و ۷۹۲/۸ مگاپاسکال بوده است. علاوه بر این، استحکام و مدول خمشی نیز برابر با ۲۰۲ و ۱۴۳/۹ مگاپاسکال گزارش شده بود که نسبت به نمونه‌های مشابه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با زمینه‌ی گرمانرم مقادیر بالاتری هستند [۲۰].

در تحقیقی دیگر که منتشر شده است، مینگ و همکاران [۱۵] از روشی جدید برای چاپ کامپوزیت‌های سه‌بعدی تقویت‌شده با الیاف پیوسته کربن و زمینه‌ی گرماسخت استفاده کردند. آنها از رزین اپوکسی، عامل پخت دیسیان دیامید و همچنین الیاف کربن استفاده کردند. ابتدا پیش‌آغشته‌سازی الیاف کربن انجام می‌شود و سپس الیاف پیش‌آغشته همچون رشته‌هایی با قطر مشخص آماده مرحله چاپ می‌شوند. فیلامنت‌های آماده‌شده در بخش پیش‌آغشته وارد نازل چاپگر می‌شوند و در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. در نهایت برای پخت کامپوزیت، قطعه‌ی چاپ‌شده داخل پودرسدیم کلرید به‌طوری قرار داده می‌شود تا به‌طور کامل پوشیده شود. سپس با اعمال خلأ درون محفظه و خروج هوای اضافی محفظه‌ی درون گرم‌کننده، ابتدا تحت دمای ۱۳۰ و سپس ۱۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد هریک به مدت یک ساعت قرار می‌گیرد. ارزیابی ویژگی مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی تقویت‌شده با الیاف پیوسته به‌صورت کشش، خمش و تنش برشی انجام شد. نتایج نشان داد، استحکام و مدول کششی به ترتیب ۱۴۷۶/۱۱ مگاپاسکال و ۱۰۰/۲۸ گیگاپاسکال می‌باشند. همچنین برای استحکام، مدول خمشی و تنش برشی به ترتیب ۸۵۸/۰۸ مگاپاسکال، ۷۱/۹۸ گیگاپاسکال و ۴۸/۷۵ مگاپاسکال گزارش شده است. با جمع‌بندی این مطالب می‌توان اظهار داشت، امروزه با توسعه‌ی فناوری‌های مختلف برای تولید کامپوزیت‌های لیفی، استفاده از چاپگر سه‌بعدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو تولید کامپوزیت لیفی به روش چاپ از جمله موضوع‌هایی است که تحت بررسی بوده و امکان پیشرفت‌های بسیاری در آن قابل پیش‌بینی است. مواد پلیمری گرمانرم به‌صورت رایج در حوزه چاپ مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما به‌واسطه‌ی توانایی ضعیف باربرداری، پیوند ضعیف‌تر بین لایه‌ای و استحکام و سختی ضعیف‌تر [۲۱]، لزوم توجه به مواد پلیمری گرماسخت و استفاده از آنها برای بهره‌بردن از ویژگی مکانیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این اطلاعات گسترده و کاربردی در حوزه کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته در مقایسه‌ی با کامپوزیت‌های مشابه گرمانرم منتشر نشده است.

رفتار اجسام را شبیه‌سازی کند و عملکرد مکانیکی یک مدل را تحت شرایط مختلف بارگذاری ارزیابی کند. برای حل معادله‌ها از روش استاتیک/کلی استفاده شد. در ماژول تعامل، تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۳ در مرحله اول بین قسمت‌های سخت (سر بارگذاری و تکیه‌گاه گیردار) و تیر قابل تغییر شکل در نظر گرفته شد. برای شرایط مرزی، یک جابجایی محدود ۳ میلی‌متری به سر آزاد اعمال شد و سر دیگر به صورت تکیه‌گاه گیردار لحاظ شد. در این مدل‌سازی، از المان‌های ۶-گره خطی مثلثی پریسم استفاده و اندازه تقریبی شبکه کلی نیز حدود ۰/۲۵ تعیین شد.



شکل ۴ ابعاد نمونه‌های کامپوزیتی در آزمون کشش و (ب) خمش

### ۳ تحلیل و تفسیر نتایج و یافته‌ها

۱-۳ آزمون کشش کامپوزیت تک‌لایه گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته

شکل ۵-الف نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش کامپوزیت‌های تک‌لایه را نشان می‌دهد. آنچه مشخص است تنش تا حدودی به صورت خطی نسبت به کرنش برای هر سه نمونه افزایش یافته است.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش کامپوزیت چاپ‌شده تک‌لایه S

نمونه	کرنش نهایی (%)	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
S1	۵/۸۴	۲۶۸/۹۹	۴/۶۰
S2	۵/۷۳	۲۷۶/۲۶	۴/۸۲
S3	۵/۵۷	۲۶۷/۴۹	۴/۸۰
میانگین	۵/۷۱	۲۷۰/۹۱	۴/۷۴
ضریب تغییرات (%)	۲/۴۲	۱/۷۳	۲/۵۶

مقادیر کرنش نهایی این نمونه‌ها در جدول ۴ گزارش شده است. نخستین کاهش اساسی در منحنی تنش مربوط به شکست کششی اصلی کامپوزیت است. همان‌طور که در شکل ۵-پ دیده می‌شود، شکستگی الیاف و ترک‌های افقی نتیجه‌ی شکست کششی است، که نشان‌دهنده‌ی شکست ترد کامپوزیت است. با کمک میکروسکوپ الکترونی بیش‌تر می‌توان درباره سازوکارهای شکست در مقیاس میکرو دقت کرد. همان‌طور که در شکل ۵-ب نشان داده شده است، بسیاری از شکستگی‌های الیاف در سطح شکست شناسایی شدند

جدول ۱ مشخصه‌های رزین و تقویت‌کننده استفاده شده

ویژگی	الیاف شیشه A	الیاف شیشه B	رزین آکریلات
نمره (tex)	۱۶۰	۶۰۰	--
مقاومت کششی (MPa)	۱۶۸۰/۴۷	۲۵۹۳	۲۵/۳۰
مدول کششی (GPa)	۷۶/۲۵	۸۰/۸۸	۱/۰۹
کرنش شکست (%)	۲/۴۱	۲	۳/۷۲

برای کامپوزیت تک‌لایه، الیاف با آرایش صفر درجه و برای چندلایه، صفحات کامپوزیتی هفت لایه الیاف به ترتیب با آرایش صفر و ۹۰ درجه در هر لایه روی هم چاپ شدند. متغیرهای فرآیندی مربوط به این چاپ و کامپوزیت تک‌لایه در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ پنجره فرآیندی چاپ نمونه‌های کامپوزیتی

کامپوزیت	سرعت نازل (mm/min)	ضخامت لایه (mm)	قطر نازل (mm)
تک‌لایه	۲۰۰	۰.۶	۲
چندلایه	۱۰۰	۰.۵	۱

مطابق با تنظیم‌هایی که در جدول ۲ آمده است، دو سری نمونه کامپوزیت چاپ شدند. مشخصه‌های نمونه‌های چاپ شده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ ابعاد نمونه‌های کامپوزیتی چاپ‌شده

نمونه	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
تک‌لایه S	۱۵۰/۰۱	۱۵/۰۳	۰/۸۵
ضریب تغییرات (%)	(۱/۰۵)	(۱/۰۳)	(۰/۱۲)
چندلایه U	۳۰/۰۱	۱۵/۳۵	۲/۲۴
ضریب تغییرات (%)	(۱/۵۵)	(۲/۱۷)	(۰/۵۲)

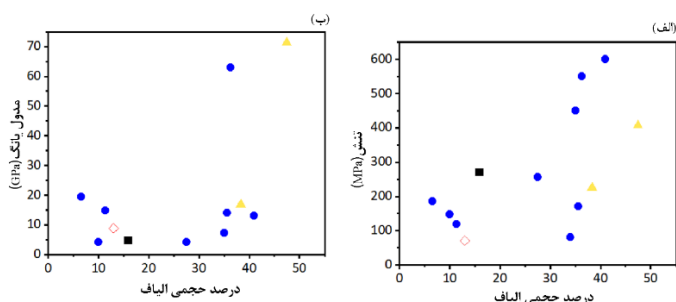
### ۲-۲ آزمایش مکانیکی

آزمایش کشش برای تعیین استحکام نمونه‌های تک‌لایه انجام شد. رفتار کششی و شکست سه نمونه از طریق دستگاه آزمایش یونیورسال اس تی ام-۱۵۰، مورد مطالعه قرار گرفت. سرعت بارگذاری نیروبرابر با ۰.۵ میلی‌متر در دقیقه منطبق بر معیار ISO52745 بود (شکل ۴-الف). آزمایش‌های خمش سه‌نقطه‌ای نیز با استفاده از همین دستگاه انجام شد. سرعت بارگذاری آزمایش و گیب آن سه نمونه در کامپوزیت‌های چندلایه به ترتیب ۵ میلی‌متر در دقیقه و ۱۶ میلی‌متر بود که با معیار ASTM D79046 هماهنگ بود (شکل ۴-ب).

### ۳-۲ مدل‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی نقش مهمی در رشته‌های مهندسی و علوم دانشگاهی دارد و نرم‌افزار آباکوس به عنوان یک ابزار قدرتمند در این زمینه تأثیر زیادی دارد. با استفاده از روش‌های تحلیل المان محدود، نرم‌افزار آباکوس قادر است، بدقت

رفته است و به استحکام کامپوزیت‌های الیاف پیوسته تولیدشده به شیوه سنتی نزدیک شده است. در حالی که مقایسه‌ی مدول نمونه‌های چاپ‌شده با مقادیر سایر کامپوزیت‌ها اختلاف چندانی ندارد. این نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته که در این پژوهش چاپ شده‌اند، دارای ظرفیت بالقوه برای دستیابی به عملکرد مکانیکی بالا در قیاس با کامپوزیت‌های سنتی هستند.



شکل ۶ الف) استحکام کششی و ب) مدول الاستیسیته یانگ، شامل مقادیر تجربی کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته توسط روش لایه-گذاری هم‌جوش با ماتریس‌های پلیمری مانند ABS و PLA (دایره گذاری آبی) [۲۴-۷، ۱۰، ۲۲]. کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی گرماسخت تقویت‌شده با الیاف کوتاه توسط روش لایه‌گذاری هم‌جوش (لوزی قرمز) [۲۵]، و کامپوزیت‌های تقویت‌شده‌ی با الیاف شیشه و کربن پیوسته به‌طور سنتی (مثلث زرد) و پژوهش حاضر (مربع مشکی) [۲۶، ۲۷]

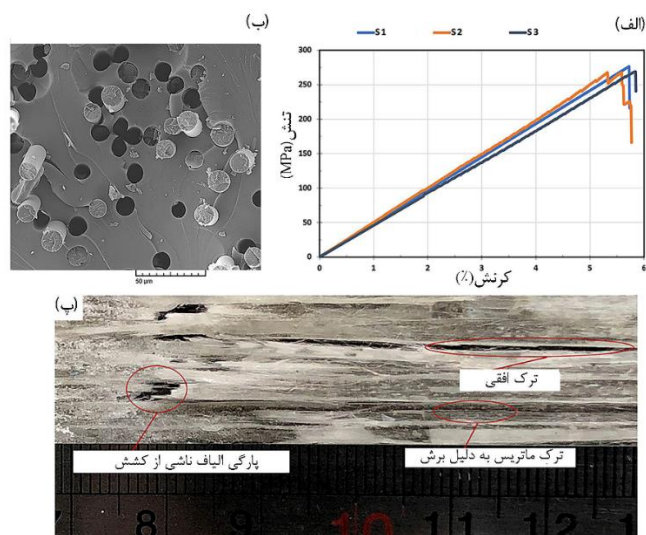
نکته‌ی مهم دیگر در مورد کامپوزیت‌های تک‌لایه، بهره‌گیری از قانون مخلوط‌ها برای پیش‌بینی نظری مدول‌های الاستیسیته در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف است. با استفاده از این مدل، مدول یانگ برای کامپوزیت تک‌لایه، ۱۳/۴۲ گیگاپاسکال محاسبه می‌شود. با این حال، میانگین مدول تجربی حاصل از آزمایش کششی به طریق چشمگیری پایین‌تر بود و برابر با ۴/۷۴ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

این تفاوت بین مدول نظری و واقعی می‌تواند به عوامل مختلفی نسبت داده شوند. دلیل کاهش مدول واقعی با نظری در کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی موارد زیر می‌تواند باشد:

آسیب الیاف در طول ورود در سر نازل و خروج از آن؛ سازوکارهای آغشته-سازی الیاف با رزین و نفوذ رزین به الیاف ممکن است عیب‌ها یا شکست‌هایی در الیاف شیشه ایجاد کنند که باعث کاهش کارایی تقویت‌کنندگی آنها می‌شود. عدم هم‌راستایی الیاف؛ این ویژگی در هر لایه هنگام چاپ باعث ایجاد موج‌ها و از دست دادن ظرفیت باربرداری الیاف در جهت بارگذاری می‌شود. عدم آغشتگی الیاف به رزین؛ نقطه‌های خشک و پوشش رزین ناکافی الیاف نیز می‌تواند به کاهش کارایی انتقال تنش کششی در کامپوزیت منجر شود.

در مقایسه با سایر پژوهش‌ها کاهش‌های مشابه بین پیش‌بینی‌های نظری و مقادیر تجربی مدول در سایر کامپوزیت‌های چاپ‌شده با استفاده از مواد مانند PLA، ABS گزارش شده است [۲۴، ۲۵، ۲۸-۳۰]. به‌طور کلی، بهبود در

و دچار گسیختگی شده‌اند که با شکست ناگهانی مشاهده شده در منحنی تنش-کرنش نیز مطابقت دارد.

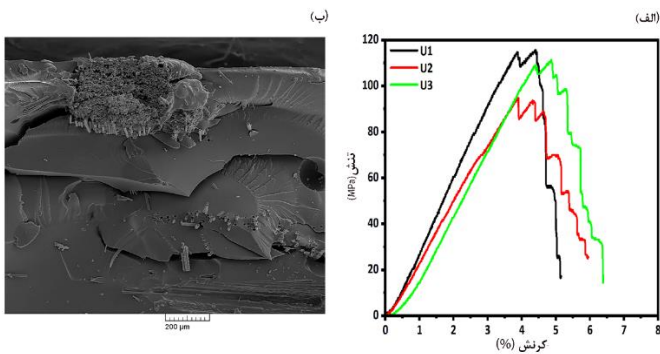


شکل ۵ آزمایش کشش کامپوزیت تک‌لایه: الف) نمودار تنش-کرنش، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست و ب) شکست کششی ناشی از شکستگی الیاف

اگرچه کامپوزیت‌های چاپ‌شده به‌طور معمول اتصال موثری بین الیاف و ماتریس نشان می‌دهند، اما تعداد سوراخ‌های مشخص شده در شکل ۵-ب نشان می‌دهد که برخی از الیاف نیز در طی آزمایش کششی به بیرون کشیده شدند. این کشیده شدن محلی الیاف شاید به دلیل پوشش ناکافی رزین بر روی برخی از سطوح الیاف در طول چاپ است. به‌طور کلی، شکست ترد مشاهده شده در این کامپوزیت‌ها ناشی از شکست الیاف شیشه می‌باشد.

مطابق با جدول ۴، مقادیر تجربی میانگین خواص اصلی کششی حاصل از آزمایش مکانیکی شامل مدول یانگ و استحکام کششی نهایی با نمایانگر مربع در شکل ۶-الف و ب نمایش داده شده‌اند که این ویژگی‌های کششی با داده‌های گزارش شده در سایر پژوهش‌ها مقایسه می‌شود. به‌طور ویژه، داده‌های منتشرشده در مورد استحکام کششی کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته توسط روش لایه‌گذاری هم‌جوش با ماتریس‌های پلیمری مانند ABS و PLA (دایره‌های آبی) [۲۴-۲۲، ۱۰، ۷]، کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی گرماسخت تقویت‌شده با الیاف کوتاه توسط روش لایه‌گذاری هم‌جوش (لوزی قرمز) [۲۵] و کامپوزیت‌های تقویت‌شده‌ی با الیاف شیشه و کربن پیوسته به‌طور سنتی (مثلث‌های زرد) [۲۶، ۲۷] نشان داده شده‌اند.

با توجه به اینکه الیاف کربن به‌طور ذاتی ویژگی‌های مکانیکی برتری نسبت به الیاف شیشه دارند، نمونه‌ی کامپوزیت‌های چاپ‌شده با الیاف شیشه، استحکام کششی نهایی بالا و مدول یانگ قابل قبولی با درصد حجم الیاف معادل نشان دادند. همان‌طور که در شکل ۶-الف مشخص است، استحکام کششی نمونه‌های چاپ‌شده از مقادیر کامپوزیت‌های چاپ‌شده‌ی مشابه فراتر



شکل ۷ آزمایش خمش کامپوزیت چندلایه: الف) نمودار تنش- کرنش برای سه نمونه مشابه، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست

هم‌خوانی خروجی مدل‌های تجزیه و تحلیل المان محدود با داده‌های تجربی ضروری است تا اطمینان حاصل شود که شبیه‌سازی به‌درستی رفتار مکانیکی کامپوزیت را نمایش می‌دهند. به‌طور ویژه، شکل ۸-الف منحنی نیروی واکنش تجربی کامپوزیت چندلایه (U) در مقابل تغییر مکان را با پیش‌بینی‌های محاسباتی المان محدود (FEA) در حین خمش سه نقطه مقایسه می‌کند.

تا نقطه‌ی بیشینه‌ی مقدار نیروی واکنش، که در واقع شکست اولیه رخ می‌دهد، نتایج تجربی و المان محدود با یکدیگر همخوانی خوبی دارند. تفاوت بین مقادیر نیروی واکنش تجربی و شبیه‌سازی شده کم‌تر از ۵/۸ درصد برای این قسمت است. این هماهنگی به‌خوبی نشان می‌دهد که مدل المان محدود قادر است، به‌دقت رفتار خمش الاستیک خطی کامپوزیت چندلایه‌ی چاپ شده را پیش از شروع شکست پیش‌بینی کند. با این حال، ممکن است تفاوتی بین نتایج مدل المان محدود و نتایج تجربی وجود داشته باشد. یک توضیح این است که زمینه‌های پلیمری ویژگی‌های مکانیکی دارند که به‌زمان وابسته هستند، مانند خواص ویسکوالاستیک و افت تنش [۳۲]. در مدل‌های المان محدود عددی، لحاظ کردن این تأثیرها دشوار است. لذا نادیده گرفتن آنها به‌طور کامل در مدل‌های المان محدود منجر به تفاوت‌های کوچک نسبت به نتایج تجربی می‌شود. به‌علاوه، همانگونه که گفته شد در حالی که فرآیند چاپ سه‌بعدی به‌طور مستقیم باعث شکستگی الیاف نمی‌شود، ممکن است برخی صدمه‌های ناشی از تماس با نازل در طول فرآیند لایه‌چینی به الیاف وارد شود یا اینکه با توجه به ساختار کامپوزیت، حرکت نازل بین الیاف شیشه باعث ایجاد برخی آسیب‌ها به الیاف شود. همچنین، به‌دلیل شکل، اندازه نازل و فضای بسیار کم بین الیاف، احتمالاً حرکت نازل باعث جابه‌جایی و انحراف در الیاف در حین چاپ می‌شود. این اختلال در هم‌راستایی الیاف منجر به ایجاد عیوب محلی و همچنین جدایی الیاف-ماتریس می‌شود که این ایراد هم از مواردی است که به‌سختی قابل شبیه‌سازی با روش‌های المان محدود می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که برخی تفاوت‌ها بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی عددی و وقوع آسیب‌های ناشی از چاپ رخ دهد.

ثبات فرآیند چاپ، همچنین آغشته‌سازی بهتر و هم‌راستایی الیاف، می‌تواند به بهبود مدول کامپوزیت‌های چاپ‌شده برای نزدیک‌تر شدن مدول کششی تجربی به نظری کمک کند.

### ۲-۳ آزمون خمش کامپوزیت چندلایه گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته

شکل ۷-الف منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمایش خمش سه نقطه را برای کامپوزیت‌های چندلایه نشان می‌دهد. منحنی تنش-کرنش خمشی به‌طور پیوسته و خطی تا نقطه استحکام خمشی نهایی افزایش می‌یابد، پس از آن شکست به شکل چندمرحله‌ای و ترد رخ می‌دهد. هنگامی که کامپوزیت‌های چندلایه‌ی دوبعدی در معرض نیروهای ضربه‌ای یا خارج از صفحه قرار می‌گیرند، به‌دلیل خواص چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای ضعیف، مستعد ترک‌های لایه‌لایه شونده هستند.

جدول ۵ نتایج آزمون خمش کامپوزیت چاپ‌شده چندلایه U

نمونه	کرنش شکست (%)	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
U1	۴/۵۷	۱۱۷/۷۷	۲/۷۹
U2	۴/۰۳	۹۴/۸۱	۲/۵۸
U3	۴/۸۷	۱۱۱/۳۹	۲/۶۵
میانگین	۴/۵۰	۱۰۷/۹۹	۲/۶۷
ضریب تغییرات (%)	۹/۴۱	۱۰/۹۸	۴/۱۲

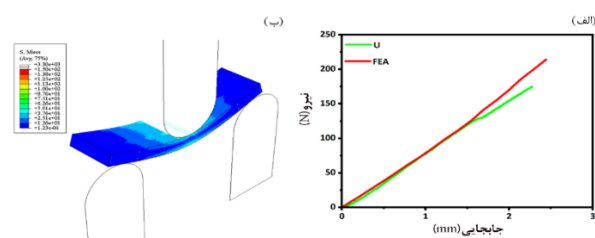
میانگین خواص خمشی حاصل از آزمایش مکانیکی شامل مدول خمش ۲/۶۷ گیگا پاسکال، کرنش ۴/۵۰ و استحکام خمش نهایی ۱۰۷/۹۹ مگا پاسکال برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

زمانی که یک لایه کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی قرار می‌گیرد، قسمت بالای نمونه تنش فشاری و طرف پایینی تنش کششی را تجربه می‌کند. بنابراین الیاف صفحه‌ای و در جهت طول لایه کامپوزیت نقش مهمی در تحمل این تنش‌ها دارند و هر نوع عیب یا انقطاع در این الیاف می‌تواند مقاومت خمشی را کاهش دهد. با در نظر گرفتن این پیش‌زمینه، شکست الیاف یک موضوع مهم در طول فرآیند ساخت کامپوزیت‌های سه‌بعدی است. مسأله دیگری که می‌تواند دلیل شکست چند مرحله‌ای پس از شکست اصلی باشد، این است که برخی از الیاف ممکن است، به اندازه‌ی کافی کشیده نشوند یا از جهت زاویه صفر درجه (هم‌راستایی الیاف) خارج شوند. در نتیجه، زمانی که نمونه‌ی چاپ شده بارگذاری می‌شود، بخش‌های محلی خاصی تحت تنش قرار می‌گیرند، در حالی که بخش‌های دیگر تحت تنش نیستند. بنابراین، مناطق کوچک با سطح تنش بالا ایجاد می‌شوند که به‌دلیل تمرکز تنش، مستعد به شکست آغازین هستند. مشابه با حالت شکست کامپوزیت تک‌لایه هنگام بارگذاری کشش، سوراخ‌های مشخص شده در شکل ۷-ب نیز نشان می‌دهد که برخی از الیاف نیز در طی آزمایش خمش به بیرون کشیده شده‌اند.

## مراجع

- [1] P. Boisse, *Composite reinforcements for optimum performance*, Woodhead Publishing, 2020, pp. 3-34. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04574-0>.
- [2] B. Najafloo, M. Razavi-Nouri, A.M. Rezadoust, "A Review on Fused Deposition Modeling Method" *Polymerization*. vol. 6, pp. 74-85, 2016.
- [3] P. Parandoush, D. Lin, "A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites" *Compos Struct*. vol. 182, pp. 36-53, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
- [4] "Markforged.com" <https://Markforged.Com/Materials/Onyx/>. (n.d.).
- [5] S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran, J. Groll, U. Gbureck, "Fiber reinforcement during 3D printing" *Mater Lett*. vol. 139, pp. 165-168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.065>.
- [6] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective" *Compos B Eng*. vol. 110, pp. 442-458, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034>.
- [7] R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T.-K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguchi, T. Nakamura, A. Todoroki, Y. Hirano, "Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation" *Sci Rep*. vol. 6, pp. 23058, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep23058>.
- [8] A. Fischer, S. Rommel, T. Bauernhansl, *New Fiber Matrix Process with 3D Fiber Printer – A Strategic In-process Integration of Endless Fibers Using Fused Deposition Modeling (FDM)*, Berlin, Digital Product and Process Development Systems, 2013, pp. 167-175.
- [9] G.W. Melenka, B.K.O. Cheung, J.S. Schofield, M.R. Dawson, J.P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures" *Compos Struct*. vol. 153, pp. 866-875, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.
- [10] F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, R. Matsuzaki, "3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens" *Open Journal of Composite Materials*. vol. 06, pp. 18-27, 2016. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2016.61003>.
- [11] J.M. Gardner, G. Sauti, J.-W. Kim, R.J. Cano, R.A. Wincheski, C.J. Stelter, B.W. Grimsley, D.C. Working, E.J. Siochi, "3-D printing of multifunctional carbon nanotube yarn reinforced components" *Addit Manuf*. vol. 12, pp. 38-44, 2016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.008>.
- [12] S.M.F. Kabir, K. Mathur, A.-F.M. Seyam, "A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties" *Compos Struct*. vol. 232, pp. 111476, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>.

خروجی دیگر مدل شبیه‌سازی شده ارزیابی توزیع تنش فون میزس در کامپوزیت است. مطابق با شکل ۸-ب، توزیع تنش در کامپوزیت چاپی چندلایه به‌طور یکنواخت است و هیچ محل تمرکز تنش وجود ندارد که با توجه به ساختار هندسی یکپارچه این کامپوزیت‌ها، قابل پیش‌بینی بود. در واقع، این توزیع بیانگر یک نوع تنش میانگین است که مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در یک محیط سه‌بعدی، توزیع تنش فون میزس با استفاده از مختصات تنش که نمایانگر شش مؤلفه تنش است (سه تنش اصلی و سه تنش برشی) تعریف می‌شود. مقدار بالای تنش فون میزس نشان‌دهنده تنش معادلی است که احتمال شکست مواد را نشان می‌دهد. بنابراین، بیشه مقدار تنش فون میزس مهم است. زیرا نشان می‌دهد که آیا مواد تحت تنش و فشارهای مختلف قادر به مقاومت و عملکرد مناسب هستند یا خیر. اگر تنش بالای فون میزس در یک نقطه از مواد بیش از حد مجاز باشد، این ممکن است به ترکیب و شکست مواد منجر شود.



شکل ۸ (الف) نمودار نیرو-جابجایی کامپوزیت چندلایه U (مقایسه‌ی نتایج تجربی U و عددی FEA) و (ب) توزیع تنش فون میزس

## ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش لایه‌گذاری هم‌جوش به عنوان فناوری پایه برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته استفاده شد. الیاف شیشه و رزین آکریلات برای تولید نمونه‌های کامپوزیت تک‌لایه و چندلایه مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تک‌لایه نشان داد که این کامپوزیت‌ها دارای میانگین استحکام کششی نهایی قابل توجهی حدود ۲۷۰/۹۱ مگاپاسکال هستند که در مقایسه با نتایج کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کوتاه مشابه بسیار عملکرد بهتری دارند. همچنین این استحکام به مقدار مقاومت کامپوزیت‌های حاوی الیاف پیوسته نیز نزدیک شده و توانمندی چاپ سه‌بعدی برای تولید کامپوزیت‌های گرماسخت تقویت‌شده با الیاف پیوسته با عملکرد بالا را در قیاس با روش‌های سنتی فراهم می‌کند. تنش-کرنش خمشی برای کامپوزیت‌های چندلایه به‌صورت خطی تا استحکام خمشی افزایش یافت و سازوکار شکست آن به صورت ترد مشاهده شد. تجزیه و تحلیل المان محدود نیز نشان می‌دهد که تطابق خوبی با داده‌های تجربی در قسمت الاستیک وجود دارد که تایید می‌کند، مدل‌های عددی برای مطالعه‌ها اعتبار دارند.

- [13] C. Hu, Z. Sun, Y. Xiao, Q. Qin, "Recent Patents in Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Composites" *Recent Patents on Mechanical Engineering*. vol. 12, pp. 25–36, 2019. <https://doi.org/10.2174/2212797612666190117131659>.
- [14] Y. Tao, P. Li, J. Zhang, S. Wang, S.Q. Shi, F. Kong, "A review of fused filament fabrication of continuous natural fiber reinforced thermoplastic composites: Techniques and materials" *Polym Compos.* vol. n/a, 2023. <https://doi.org/10.1002/pc.27477>.
- [15] Y. Ming, Y. Duan, B. Wang, H. Xiao, X. Zhang, "A Novel Route to Fabricate High-Performance 3D Printed Continuous Fiber-Reinforced Thermosetting Polymer Composites" *Materials*. vol. 12, pp. 1369, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12091369>.
- [16] V. Mishra, S. Negi, S. Kar, A.K. Sharma, Y.N.K. Rajbahadur, A. Kumar, "Recent advances in fused deposition modeling based additive manufacturing of thermoplastic composite structures: A review" *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. vol. 36, pp. 3094–3132, 2023. <https://doi.org/10.1177/08927057221102857>.
- [17] H. Zhang, K. Zhang, A. Li, L. Wan, C. Robert, C.M. Ó Brádaigh, D. Yang, "3D printing of continuous carbon fibre reinforced powder-based epoxy composites" *Composites Communications*. vol. 33, pp. 101239, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101239>.
- [18] H.L. Tekinalp, V. Kunc, G.M. Velez-Garcia, C.E. Duty, L.J. Love, A.K. Naskar, C.A. Blue, S. Ozcan, "Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing" *Compos Sci Technol*. vol. 105, pp. 144–150, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>.
- [19] B.G. Compton, J.A. Lewis, "3D-Printing of Lightweight Cellular Composites" *Advanced Materials*. vol. 26, pp. 5930–5935, 2014. <https://doi.org/10.1002/adma.201401804>.
- [20] W. Hao, Y. Liu, H. Zhou, H. Chen, D. Fang, "Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites" *Polym Test*. vol. 65, pp. 29–34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.11.004>.
- [21] A. Le Duigou, M. Castro, R. Bevan, N. Martin, "3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality" *Mater Des*. vol. 96, pp. 106–114, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>.
- [22] C. Yang, X. Tian, T. Liu, Y. Cao, D. Li, "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance" *Rapid Prototyp J*. vol. 23, pp. 209–215, 2017. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>.
- [23] G.D. Goh, V. Dikshit, A.P. Nagalingam, G.L. Goh, S. Agarwala, S.L. Sing, J. Wei, W.Y. Yeong, "Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics" *Mater Des*. vol. 137, pp. 79–89, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.021>.
- [24] N. Li, Y. Li, S. Liu, "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing" *J Mater Process Technol*. vol. 238, pp. 218–225, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>.
- [25] L.J. Love, V. Kunc, O. Rios, C.E. Duty, A.M. Elliott, B.K. Post, R.J. Smith, C.A. Blue, "The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing" *J Mater Res*. vol. 29, pp. 1893–1898, 2014. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.212>.
- [26] E. Botelho, "Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites" *Compos Sci Technol*. vol. 63, pp. 1843–1855, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00119-2).
- [27] Y. Wang, "Mechanical Properties of Stitched Multiaxial Fabric Reinforced Composites From Manual Layup Process" *Applied Composite Materials*. vol. 9, pp. 81–97, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1013881422106>.
- [28] X. Tian, T. Liu, C. Yang, Q. Wang, D. Li, "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites" *Compos Part A Appl Sci Manuf*. vol. 88, pp. 198–205, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032>.
- [29] X. He, Y. Ding, Z. Lei, S. Welch, W. Zhang, M. Dunn, K. Yu, "3D printing of continuous fiber-reinforced thermoset composites" *Addit Manuf*. vol. 40, pp. 101921, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101921>.
- [30] N. Mosleh, A.M. Rezadoust, S. Dariushi, "Determining process-window for manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced composite Using 3D-printing" *Materials and Manufacturing Processes*. vol. 36, pp. 409–418, 2021. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1843664>.
- [31] A.N. Dickson, J.N. Barry, K.A. McDonnell, D.P. Dowling, "Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing" *Addit Manuf*. vol. 16, pp. 146–152, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>.
- [32] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, "Experimental investigation of time-dependent mechanical properties of PC-ABS prototypes processed by FDM additive manufacturing process" *Mater Lett*. vol. 193, pp. 58–62, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2017.01.104>.