



# Investigation of Interlayer Fracture of Printed Composite (Glass/ABS) Considering a Statistical Micromechanical Damage Model

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Mehri-khansari N.<sup>1\*</sup>,  
Zare-Asl-Khanghah S.<sup>1</sup>,  
Ghorbani H.<sup>2</sup>

### How to cite this article

Mehri-khansari N, Zare-Asl-Khanghah S, Ghorbani H, Investigation of Interlayer Fracture of Printed Composite (Glass/ABS) Considering a Statistical Micromechanical Damage Model. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(02):107-115.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

<sup>2</sup> Mechanical engineering Department, Tarbiat modares University, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

n.mehri@sut.ac.ir

### Article History

Received: March 9, 2025

Accepted: April 19, 2025

ePublished: May 3, 2025

## ABSTRACT

In this study, using a novel hybrid method (FDM+Fiber), continuous thermoplastic fiber composites (Glass/ABS) was produced using a 3D printer. This study investigated the challenges associated with incomplete impregnation between fibers and matrix in thermoplastic composites, especially printed specimens. This defect is caused by the formation of interlayer micropores that can behave similarly to microcracks and lead to a decrease in layer adhesion and a decrease in mechanical properties. In addition, the probabilistic and random distribution of micropores creates a kind of uncertainty in the properties of these materials and affects the path of the main crack growth. The innovation of this study is in providing a model based on micromechanical statistical damage and experimental results to predict the growth of the main crack in these materials. In this regard, different porosity percentages (10, 20, 30, and 40 percent) with normal, gamma, and uniform distributions have been used in cases with and without interference. Experimental and numerical results indicate that the use of statistical micromechanical damage models allows more accurate prediction of interlayer fracture behavior of Glass/ABS composites.

**Keywords** Fracture Mechanics, Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, Additive Manufacturing, Statistical Damage Model

## CITATION LINKS

1- Experimental and numerical investigation of interlayer ... 2- Impregnation Ability and Micromechanical Assessments ... 3- 3D printing of fibre-reinforced thermoplastic ... 4- Advances in 3D printing of thermoplastic ... 5- 3D printing for continuous fiber reinforced ... 6- 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of ... 7- Elastic moduli of a cracked solid. 8- Average stress in matrix and average elastic energy ... 9- A generalized self-consistent mechanics method ... 10- The differential scheme and its application to ... 11- Microcrack interaction and shear fault failure. 12- Elastic interaction of a crack with a ... 13- Elastic solids with many cracks: a simple ... 14- Orthotropic mode II shear test fixture: Iosipescu ... 15- Mixed-modes (I/III) fracture of aluminum foam ... 16- A new approach for investigation of damage zone ... 17- Orthotropic failure criteria based on machine learning ... 18- Micro-mechanical damage diagnosis methodologies ... 19- Probabilistic micromechanical damage model for ... 20- Recent developments in improving the fracture toughness ... 21- Numerical and experimental analysis of the mode I ... 22- Phase-field fracture coupled elasto-plastic constitutive ... 23- Quasi-micromechanical damage model for brittle ... 24- A model for investigation of damaged zone mechanical ...

## بررسی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت (Glass/ABS) پرینت شده با در نظر گرفتن مدل آسیب آماری میکرومکانیکی

نبی مهری خوانساری<sup>۱\*</sup>، سالار زارع اصل خانقاه<sup>۱</sup>، هادی قربانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش، با استفاده از روش نوین ترکیبی (FDM+Fiber)، کامپوزیت‌های الیاف ممتد ترموپلاستیک (Glass/ABS) به کمک دستگاه پرینتر سه‌بعدی تولید شدند. این تحقیق به بررسی چالش‌های مرتبط با آغستگی ناقص بین الیاف و ماتریس در کامپوزیت‌های ترموپلاستیک، به‌ویژه نمونه‌های پرینت شده، پرداخته است. این نقص ناشی از ایجاد میکروحفره‌های بین‌لایه‌ای است که می‌تواند رفتار مشابه میکروتکرک‌ها داشته باشد و منجر به کاهش چسبندگی لایه‌ها و افت خواص مکانیکی شوند. علاوه بر این، توزیع احتمالی و تصادفی میکروحفره‌ها نوعی عدم قطعیت در خواص این مواد ایجاد کرده و مسیر رشد ترک اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نوآوری این مطالعه در ارائه مدلی مبتنی بر آسیب آماری میکرومکانیکی و نتایج تجربی برای پیش‌بینی رشد ترک اصلی در این مواد است. در این رابطه از درصد‌های تخریل متفاوتی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد) با توزیع نرمال، گاما و یکنواخت در حالت‌های با و بدون تداخل استفاده شده است. نتایج تجربی و عددی حاکی از آن است که استفاده از مدل‌های آسیب آماری میکرومکانیکی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت Glass/ABS را فراهم می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** مکانیک شکست، کامپوزیت ترموپلاست الیاف ممتد، ساخت افزایشی، مدل آسیب آماری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

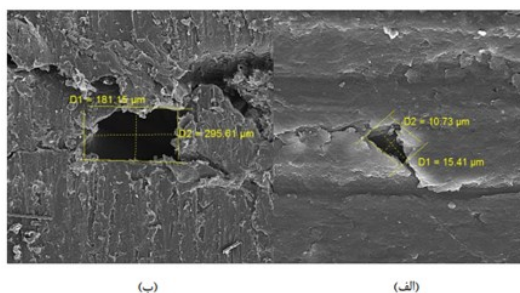
\*نویسنده مسئول: n.mehri@sut.ac.ir

### ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری، به ویژه کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با الیاف پیوسته، به دلیل استحکام، چگالی کم و خواص مفید مختلف مانند مقاومت در برابر خستگی بالا و قابلیت بازیافت، به طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها از الیاف تقویت شده مانند شیشه یا کربن تشکیل شده اند که در یک پایه ترموپلاستیک مانند پلی پروپیلن یا پلی آمید تعبیه شده اند [1, 2]. ساخت افزودنی، به ویژه مدل سازی رسوب ذوب شده، یک روش مقرون به صرفه برای تولید قطعات کاربردی با استفاده از پلیمرهای ترموپلاستیک است. پژوهش حاضر از روش رسوب ذوب شده (FDM) برای ایجاد نمونه‌های ترکیبی استفاده می‌کند و همچنین، فرصت‌هایی را برای تولید کامپوزیت‌های پلیمری الیاف پیوسته و فویل‌های آلومینیومی با عمر کوتاه ارائه می‌دهد. پلیمرهای ترموپلاستیک دارای مزایای بی شماری نسبت به دو نوع دیگر پلیمرها هستند که باعث

پذیرش روزافزون آنها می‌شود. این مزایا شامل ظرفیت تغییر شکل در دماهای بالاتر، اتصال آسان‌تر و اطمینان از مقاومت بهتر در برابر فرآیندهای تولید برای نیل به محصولات نهایی با کیفیت بالاتر است. یکی از راه‌های ساخت نمونه‌های پلیمری، چاپ سه بعدی، یا فرآیند ساخت افزایشی است. روش‌های مختلفی از جمله مدل سازی مذاب نشانی (FDM)، سخت سازی، استریولیتوگرافی با لایه‌های انتخابی و چاپ جوهر افشان سه بعدی برای ایجاد نمونه‌های پلیمری استفاده می‌شود، که از این میان، چاپگر FDM به دلیل سرعت بالا، هزینه کم و سادگی، کاربرد بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد. تولید کامپوزیت مبتنی بر FDM یک فناوری در حال پیشرفت است که با موانعی در جایگزینی روش‌های سنتی مواجه است [3]. از جمله این موانع، چسبندگی بین لایه‌ای ناکافی و اتصال ضعیف جهت Z است که تحقیقات مداوم بر روی سیستم‌های تزریق مویرگی و بازوهای رباتیک تا حد زیادی رفع کننده این محدودیت است [4, 5]. وجود حفره‌ها در اشیاء پرینت سه بعدی یک محدودیت طبیعی در فرآیند چاپ است که به صورت ذاتی در اکثر نمونه‌ها به وجود می‌آید [6]. اگرچه، مواد تقویت کننده می‌توانند استحکام ماده را افزایش دهند، اما این تخلخل‌ها می‌توانند ساختار ماده را تضعیف نمایند. همپوشانی ضعیف نوارها و چین‌های بین لایه‌ها به دلیل روش لایه به لایه و اشباع ناکافی رزین و الیاف منجر به افزایش غلظت بالای الیاف و پلیمر شده و در نهایت باعث افزایش تخریل و ایجاد ایرادات ساختاری می‌شود. طراحی نازل بر فرسایش الیاف تأثیر می‌گذارد و بهبود آن می‌تواند عیوب را کاهش دهد. در نمونه کامپوزیت ABS/Glass تخریل بالا به دلیل عواملی مانند تغییرات قطر رستر و اشباع ضعیف رشته به وجود می‌آید که نمونه ای از حفره‌ها در شکل میکروسکوپی SEM گرفته شده در این تحقیق نشان داده می‌شود.

همانطور که از عکسهای SEM مشخص است، تشکیل حفره در چاپ FDM امری ذاتی است. کامپوزیت‌های پلیمری، علیرغم مزایای مواد تقویت کننده، اغلب به دلیل تخریل درون اجزا، از مقاومت مکانیکی لازم برخوردار نیستند.



شکل ۱) تصویر بزرگنمایی شده از سطح مقطع نمونه FDM (الف) نمونه ABS خالص (ب) نمونه کامپوزیتی ABS/GLASS در این تحقیق افزودن تقویت کننده‌های استحکام می‌تواند مسائل مربوط به

در سال ۱۹۷۶، بودیانسکی و همکارانش [7] روش خودسازگار را معرفی کردند که خواص مکانیکی نوک ترک را با استفاده از روش انرژی و در نظر گرفتن پارامترهای چگالی میکروتورک تخمین می‌زند. این روش ریزترک‌های دایره‌ای و بیضوی را در نظر می‌گیرد و تخمین‌هایی را برای خواصی مانند مدول الاستیسیته، مدول برشی و چگالی میکروتورک در مورد ریزترک‌های دایره‌ای ارائه می‌کند.

که در آن، مقادیر  $G$  و  $V$  به ترتیب مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پوان هستند و مقادیر دارای بار، مقادیر مربوط به ناحیه آسیب هستند. در اواخر دهه ۱۹۸۰، روشی توسط هشین [10] برای پیش بینی خواص مکانیکی آسیب معرفی شد. این روش به نام روش چگالی محدود میکروترک است که در پیش‌بینی برخی خواص مکانیکی ریزترک‌های دایره‌ای یا بیضوی دقت مناسبی دارد.

$$\overline{E_-}(1+n) \tag{Y}$$

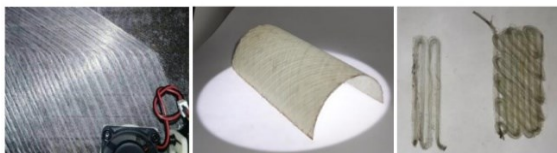


شکل ۲) فیلامنت پلی پروپیلین تقویت شده با الیاف ممتد شیشه، قطر ۱ میلی‌متر

در این تحقیق، نمونه‌های ترکیبی ترموپلاستیک الیاف پیوسته با استفاده از تقویت کننده شیشه و زمینه ABS ساخته شد. زمینه یا ماتریس ABS به دو صورت خالص و ترکیبی با الیاف شیشه (ABS/Glass) مورد بررسی و ساخت قرار گرفت. مدل ترکیبی با الیاف شیشه به طور خاص برای درک مکانیسم‌های شکست بین لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت زیرا در این مدل الیاف و زمینه با درصد ترکیب مشخصی به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین، با چندین بار سعی و خطا، ساختار پایداری از استون و چسب اکسیل ۳۲ برای چسباندن کامپوزیت شیشه/ABS به زیانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برخلاف چاپگرهای معمولی که از یک نازل برای چاپ استفاده می‌کنند، در این تحقیق از چند نازل استفاده شد. همچنین، یک رول فیلامنت پلیمری به منظور استحکام بخشی و یک لایه تفلن به منظور ایجاد ترک بین لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، فیلامنت پلی پروپیلین تقویت شده با الیاف ممتد شیشه به قطر ۱ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۲).

در شکل زیر یک نمونه کامپوزیتی تولید شده را نشان می‌دهد که از لایه چینی با استفاده از یک چاپگر سه بعدی ایجاد شده است. در این نمونه، همانطور که مشاهده می‌شود از سه نازل متفاوت استفاده شده است، یکی برای ذوب فیلامنت، یکی برای معرفی پلیمر الیافی پوشش داده شده با رزین، و دیگری برای فرآیند چاپ (شکل ۳).

پلیمر الیافی استفاده شده در این تحقیق، پس از پوشش دهی با رزین، در فرآیند چاپ گنجانده می‌شود و امکان ایجاد قطعات کامپوزیت لایه ای با توجه به پارامترهای طراحی را فراهم می‌کند.



شکل ۳) لایه چینی با الیاف شیشه / پلی پروپیلین به کمک پرینتر سه بعدی

$$w = \frac{5}{8} \ln\left(\frac{v}{v_D}\right) + \frac{15}{64} \ln\left(\frac{1 - \bar{v}_D}{1 - v}\right) + \frac{45}{128} \ln\left(\frac{1 + \bar{v}_D}{1 + v}\right) + \frac{5}{128} \ln\left(\frac{3 - \bar{v}_D}{3 - v}\right)$$

$$\frac{\bar{E}_{Gsc}}{E} = \left(1 + \frac{16(1 - v^2)(10 - 3v)w}{45(2 - v)} + D_E(v)w^{5/2}\right)^{-1} \quad (۳)$$

$$\frac{\bar{G}_{Gsc}}{G} = \left(1 - \frac{32(1 - v)(5 - v)w}{45(2 - v)} + D_G(v)w^{5/2}\right)^{-1}$$

فنگ و همکارانش [23] در سال ۲۰۰۰ یک رویکرد چگالی محدود اصلاح شده را با استفاده از روش‌های تیلور و خودسازگار برای تجزیه و تحلیل ریزترک‌های دایره ای و بیضوی معرفی کردند.

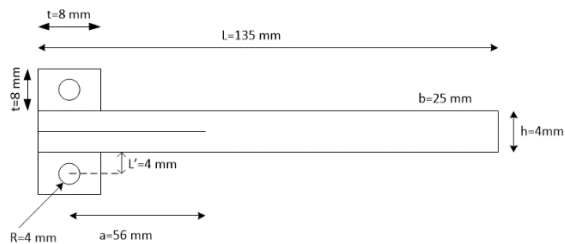
$$\frac{\bar{E}_{Gsc}}{E} = \left[1 + \frac{16(1 - v^2)(10 - 3v)w}{45(2 - v)} + D_E(v)w^{5/2}\right]^{-1} \quad (۴)$$

$$\frac{\bar{G}_{Gsc}}{G} = \left[1 - \frac{32(1 - v)(5 - v)w}{45(2 - v)} + D_G(v)w^{5/2}\right]^{-1}$$

### ۳- مواد و روش انجام تحقیق

#### ۳-۱- ساخت نمونه پرینت شده الیاف ممتد

علیرغم پتانسیل نوآورانه پرینت سه بعدی در ایجاد کامپوزیت‌های پلیمری، چندین چالش باید مورد توجه قرار گیرد من جمله واکنش‌های مکانیکی ارتوتروپیک مواد تحت تأثیر پارامترهای مختلف چاپ مانند جهت تولید و الگوی شطرنجی (رستر) و اتکای بیش از حد به خواص مواد که ممکن است باعث نقص مکانیکی و به خطر افتادن پارامترهای چاپ شود. چاپگرهای FDM نیاز دارند که مواد کامپوزیت به صورت رشته ای (فیلامنت) برای اکستروژن وجود داشته باشد که رشته‌ها مشکلاتی را در طراحی و مدل سازی تکیه گاه‌های لازم برای چاپ ایجاد می‌کنند. مواد کامپوزیتی، به ویژه آنهایی که دارای الیاف پیوسته هستند مانند کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، رفتار ارتوتروپیک را به دلیل تفاوت در خواص مکانیکی در امتداد محورهای مختلف مختصات اصلی نشان می‌دهند.



شکل ۵) شکل شماتیک از نمونه DCB

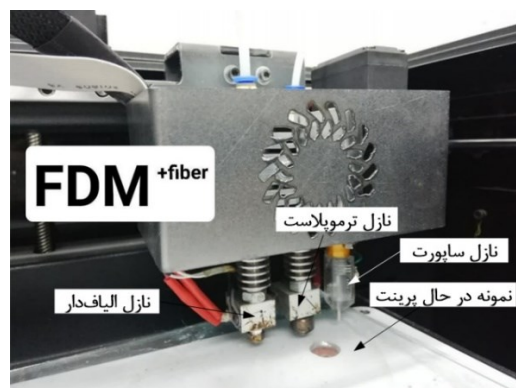
شکل ۵ یک نمونه DCB را در کنار تب اتصال آن به دستگاه کششی نشان می‌دهد، که هر دو قسمت به طور مستقل اما بدون درز با استفاده از ABS متصل شده‌اند. طبق آزمایشات متعدد تجربی، چسب لاکسیل 32 را به عنوان بهترین ماده برای اتصال ABS شناسایی شد که با استون به صورت سریعتری خشک می‌شود. در شکل زیر، نمونه DCB با ابعاد استاندارد (طول  $L=30\text{ mm}$ ، عرض  $b=25\text{ mm}$ ، ضخامت  $h=4\text{ mm}$  و طول ترک اولیه  $a_0=56\text{ mm}$  میلی متر) طراحی و ساخته شد.

نمونه‌های تولید شده از یک لایه چینی متشکل از ۲۰ لایه پلیمری خالص، هر یک به ضخامت ۰/۲ میلی متر، و با یک پیش ترک به عرض ۱۳ میکرومتر تشکیل شده است. روشهای متعددی برای تشکیل پیش ترک ها در نمونه وجود دارد. در این تحقیق، یک ورق تفلون غیر چسبنده به ضخامت ۱۳ میکرومتر در حین چاپ در وسط قطعه قرار گرفت (یعنی در عرض ۲ میلی متر از کف نمونه) تا با جلوگیری از چسبندگی لایه، ترک ایجاد شود. نمونه‌های پلیمری خالص دارای شبکه‌ای با زاویه  $\pm 45^\circ$  درجه با اندازه نازل ۰/۵ میلی متری هستند. سرعت اسمی چاپ، ۶۰ میلی متر بر ثانیه برآورد شد. شکل ۶ تصاویری از نمونه‌های خالص ABS و کامپوزیت Glass/ABS را نشان می‌دهد.

نمونه‌های کامپوزیت ساخته شده نیز مانند نمونه‌های پلیمری خالص هر کدام از ۲۰ لایه با ضخامت ۰/۲ میلی متر در هر لایه تشکیل شده است. الیاف تقویت کننده در همه لایه ها وجود دارد که نتایج متفاوتی را در جهات مختلف به همراه دارد. هر لایه ترکیبی از ABS خالص و الیاف شیشه است که تا لایه بیستم تکرار می‌شود. در نمونه‌های پلیمری، لایه‌های بدون الیاف دارای بافت حصیری  $\pm 45^\circ$  درجه هستند، در حالی که لایه‌های دارای الیاف دارای جهت گیری صفر درجه هستند که در آنها ملاحظات مربوط به استحکام در نظر گرفته شده است.



شکل ۶) نمونه‌های پرینت شده، (الف) نمونه ABS خالص، (ب) نمونه کامپوزیتی



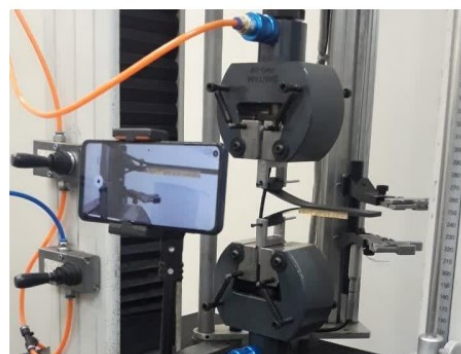
شکل ۴) پرینتر سه بعدی تقویت شده با الیاف ممتد مورد استفاده در این تحقیق

قطر نازل پلیمری استفاده شده در این تحقیق ۰/۴ میلی متر است، در حالی که قطر نازل الیاف بر اساس نوع الیاف متفاوت است. برای الیاف ABS/Glass، قطر نازل الیاف ۰/۶ میلی متر است. نازل پلیمری می‌تواند به دمای ۲۶۰ درجه سانتیگراد برسد و هر دو نازل در دمای ۱۸۰-۲۶۰ درجه سانتیگراد نگهداری شوند. در شکل ۳، تنظیمات در نمای چاپگر سه بعدی نشان داده شده است.

در فرآیند چاپ سه بعدی در این تحقیق، با رشته‌های پلیمری، ابتدا مواد ذوب شده و بر روی صفحه‌ای به نام صفحه تولید یا print bed اکستروژد می‌شوند. پس از طراحی، نازل چاپگر که تا دمای خاصی گرم می‌شود، مواد خام، ABS، را ذوب می‌کند، که سپس توسط نازل سیستم ۳ محوره چاپگر، در مکان‌های دقیقی به صفحه ساخت خارج می‌شود. وضوح چاپگر در محورهای X، Y و Z به ترتیب ۶/۹، ۶/۹ و ۲/۵ میکرون است. با ایجاد هر لایه، دما کاهش می‌یابد و باعث جامد شدن مواد می‌شود. با استفاده از هیتر، تا حد امکان از نوسانات دمایی جلوگیری شد تا از تابیدگی نمونه ممانعت شود. همچنین، برای افزایش کیفیت سطح نازل به طور مکرر در سراسر سطح حرکت می‌کند تا زمانی که قطعه کامل شود علاوه بر آن، برای جلوگیری از ایجاد تنش داخلی در نمونه تولید شده، از ایجاد لایه گذاری بر گوشه‌های با زاویه راست اجتناب شد و به جای آن از لبه‌های منحنی و نرم استفاده شد. بدین صورت، با انجام مراحل مذکور، پوشش پلیمری به دقت ۵۰ میکرون دست آمد، در حالی که لایه کامپوزیت الیاف پیوسته به دقت ۲۰۰ میکرون دست آمد و ساختاری پلکان مانند شکل را تشکیل می‌دهد که استحکام و کیفیت را افزایش می‌دهد.

### ۳-۲- آزمون کشش DCB

در این تحقیق، ابعاد نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM 5528D تعیین شد که روش آزمون تعیین چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته را مشخص می‌کند.



شکل ۷) ست آپ انجام آزمایش

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل کشش نمونه‌های کامپوزیت ABS خالص و ABS/Glass با در نظر گرفتن استاندارد ASTM 5528D بود. دستگاه تست کشش تک محوری برای تعیین انرژی شکست در نمونه‌های تیر یکسر گیردار دویل استفاده شد. طبق دستورالعمل‌های استاندارد، بارگذاری نمونه‌ها با سرعت ۱ تا ۵ میلی‌متر در دقیقه بارگذاری شد. در این تحقیق، به دلیل بررسی دقیق میزان رشد ترک، سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر در دقیقه انتخاب شد. بدین منظور، نمودار جابجایی نمونه از دو روش استفاده از دوربین فیلمبرداری و اکستنسومتر استفاده شد (شکل ۷).

#### ۴- شبیه‌سازی عددی

##### ۴-۱- شبیه‌سازی عددی ناحیه آسیب

خواص مکانیکی مواد مهندسی، مانند فوم‌های نمدی و قطعات چاپ شده، می‌تواند تا حد زیادی تحت تاثیر تخریب و حفره‌ها باشد. درک و تجزیه و تحلیل رفتار مکانیکی این مواد در علم مهندسی بسیار مهم است. با این حال، مدل‌سازی مواد با ویژگی‌های مختلف مانند حفره‌ها، ضخامت و زاویه قرارگیری چالش‌هایی را به همراه دارد. برای رفع این مشکل از کد نویسی پایتون به منظور شبیه‌سازی مواد متخلخل استفاده شد. در این تحقیق، نمونه‌های کامپوزیت پرینت شده حاوی حفره‌های دایره‌ای هستند که شعاع و توزیع آنها توسط توزیع‌هایی مانند گاوسی، گاما و یکنواخت تعیین می‌شود. مبنای انتخاب درصد‌های تخریب، عکس‌های SEM گرفته شده از نمونه‌های تجربی است. طبق نتایج تجربی درصد تخریب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ در نمونه‌های تجربی قابل مشاهده است. با این حال، به دلیل یکنواختی در نتایج، شعاع کره‌ها صرفاً با توزیع یکنواخت شبیه‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی دو شرط بررسی می‌شود: شرط عدم تداخل و شرط تداخل حفره‌ها. مدل‌های عددی ارائه شده در این زمینه عمدتاً شامل شبیه‌سازی بدون تداخل است که مسیری آسان تر برای شبیه‌سازی به شمار می‌رود. ولی در این تحقیق، هر دو روش با تداخل و بدون آن بررسی شده است چرا که در شبیه

سازی دقیق در واقع تداخل تخریبها بررسی می‌شود. در ابتدا مکعب‌هایی به عنوان المان حجمی معرف (RVE) با اندازه بسیار کوچک در محیط مدل‌سازی آباکوس تولید شده و وارد محیط مونتاز می‌شوند. در ادامه، این فرآیند شامل ایجاد کره‌های تکراری به عنوان حفره است. این کره‌ها شعاع‌های قابل تنظیم و مختصات تصادفی برای مراکز خود دارند. این الگوریتم تضمین می‌کند که کره‌ها با اندازه‌گیری فواصل بین آنها در فضای سه‌بعدی، کره‌های ایجاد شده قبلی را مختل نمی‌کنند. اگر فاصله بین یک کره جدید و کره‌های موجود کمتر از شعاع‌های ترکیبی باشد که نشان دهنده همپوشانی است، کره جدید ایجاد نمی‌شود. این الزام شامل انجام شرایط مرزی دوره ای در هندسه المان حجمی‌نماینده است، و تضمین می‌کند که کره‌های درون یک مکعب به این شرایط پایبند باشند. اگر یک کره کاملاً در داخل مکعب قرار گیرد، شرط برقرار است. برای پرداختن به تناوب، اگر یک کره از یک طرف بیرون بزند، یک کپی از قسمتی که در ناحیه قرار ندارد در طرف مقابل قرار می‌گیرد. این فرآیند برای همه کره‌های بیرون زده در تمام وجوه و طرف‌های مکعب تکرار می‌شود و از تعادل و رعایت شرایط مرزی دوره ای اطمینان می‌یابد. پس از برآورده شدن شرایط، آباکوس شروع به ایجاد کره و هرگونه کپی لازم می‌کند. کره‌ها بر اساس مختصات در محیط اسمبلی قرار می‌گیرند. مختصات مرکز، شعاع و حجم آنها برای ارزیابی فاصله، تداخل و تخریب ثبت می‌شود. تولید کره با رسیدن به درصد تخریب مطلوب متوقف می‌شود. سپس، مقادیر تنش وارده به نمونه تجربی در بارگذاری نرم افزار وارد شده و در نهایت مکعب معرف المان تحلیل می‌شود. چون اندازه مکعب المان کوچک است، فرض اعمال تنش‌های حداکثری حوالی نوک ترک بر این المان فرض درستی است. بنابراین، شبیه‌سازی ناحیه آسیب نوک ترک با روش کلی انجام می‌شود.

##### ۴-۲- بررسی آماری مشخصه‌های آسیب

بررسی آسیب‌ها شامل تجزیه و تحلیل آماری اندازه، جهت‌ها و مکان‌های تخریبها است. در تحقیقات حاضر، آسیب‌ها (تخریبها) به صورت دایره‌های کروی نمایش داده می‌شوند. اندازه و مکان این دایره‌ها از توابع توزیع خاصی پیروی می‌کنند. در تحقیقات قبلی اندازه دایره با توزیع آماری استاندارد مطابقت دارد، در حالی که مکان آنها با استفاده از توزیع‌های آماری مونت کارلو تعیین می‌شدند [14, 15, 18, 24]. همانطور که در بخش اشاره شد، سه تابع گاوسی، گاما و توزیع یکنواخت به منظور بررسی آماری ناحیه آسیب در نظر گرفته شد. ایجاد اعداد با این توابع توزیع چالشی است که با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو به آن پرداخته می‌شود. در این مطالعه، تمرکز بر تجزیه و تحلیل تجمع آسیب در سازه‌های مواد مرکب است. مشاهدات آسیب بر چگونگی گسترش آسیب با استفاده از توابع آماری تأکید می‌کند.

برای نمونه کامپوزیتی ABS/Glass بارگذاری با سرعت ۱ میلی متر در دقیقه به منظور اندازه گیری دقیق طول ترک انجام شد. افزودن الیاف پیوسته به نمونه پلیمری در آزمایش شکست منجر به افزایش ۷/۴۷ درصدی در حداکثر نیروی شکست در حالت I شد. این افزایش در ظرفیت تحمل بار به مکانیسم‌های سخت شدن مختلف، مانند پل بندی الیاف و تشکیل ریزترک در نوک ترک نسبت داده می‌شود. همانطور که نشان داده شده است، این مکانیسم‌ها به تاخیر در شکست قطعه کمک می‌کنند. با بررسی دقیق‌تر داده‌های تجربی، مشاهده می‌شود که تنش ابتدا پس از افزایش کاهش می‌یابد و به دنبال آن افزایش دیگری رخ می‌دهد.

## ۲-۵- نتایج شبیه سازی المان حجمی معرف دارای تخلخل

در این قسمت، نتایج تحلیل‌های عددی برای محاسبه خواص مکانیکی مواد متخلخل مطابق با روند ذکر شده در قسمت قبل ارائه می‌شود. همچنین، برای صحت سنجی تحلیل‌های عددی، نتایج این شبیه سازی با نتایج ارائه شده در پژوهش مارکو و همکاران مقایسه می‌شوند. نمودار تغییرات مدول الاستیسیته نسبی  $(\frac{E}{E_0})$  و مدول برشی نسبی  $(\frac{G}{G_0})$  ماده متخلخل با توزیع آماری نرمال، یکنواخت و گاما بر حسب درصد تخلخل در شکلهای زیر نشان داده شده است. همانطور که در این شکلهای مشاهده می‌شود مقدار مدول الاستیسیته و مدول برشی نسبی ماده متخلخل با افزایش درصد تخلخل به صورت غیر خطی کاهش پیدا می‌کند. شبیه‌سازی انجام شده با تابع توزیع گاما در مقایسه با دیگر توابع نتایج بهتری را پیش‌بینی می‌کند و با نتایج مدل‌های میکرومکانیک و نتایج مارکو همخوانی بهتری دارد. با بررسی داده‌های عددی مشاهده می‌شود که حدوداً در درصد تخلخل‌های زیر ۵۰ درصد مدول الاستیسیته و برشی ماده متخلخل به سمت صفر میل می‌نماید و می‌توان گفت که ماده متخلخل استحکام مکانیکی خود را از دست خواهد داد. همچنین با مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج ارائه شده در پژوهش مارکو مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین مقادیر مدول الاستیسیته و برشی نسبی محاسبه شده وجود دارد که این تطابق خوب بیانگر صحت روند مدل سازی و تحلیل انجام شده در این پژوهش برای محاسبه خواص مکانیکی مواد متخلخل می‌باشد. در شکلهای زیر نتایج مربوط به مدول الاستیسیته و مدول برشی نسبی ماده متخلخل با تابع توزیع گاما و با در نظر گرفتن برهم‌کنش میکروحفره‌ها نشان داده شده است. همانطور که از نمودارهای فوق قابل مشاهده است، برای درصد تخلخل‌های کم، نتایج به خوبی با مدل‌های میکرومکانیکی همپوشانی دارد. ولی با افزایش درصد تخلخل فاصله بین نتایج عددی و مدل‌های میکرومکانیکی افزایش می‌یابد. همانطور که در فصل دوم هم اشاره شد، این مدل‌ها یا برهم‌کنش بین حفره‌ها را در نظر نگرفته‌اند و یا برهم‌کنش ضعیف حفره‌ها در نظر گرفته‌اند، که این فرض در واقعیت درست نیست.

ارزیابی قابلیت اطمینان مواد اغلب شامل در نظر گرفتن احتمال آسیب است، که معادله گاما یک مدل شکست آماری رایج است.

$$f(x; k, \theta) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta \Gamma(k)} \quad (5)$$

در این تحقیق، یک المان حجمی‌نماینده که ۱۰ میکرومتر در ۱۰ میکرومتر در ۱۰ میکرومتر فرض شده است. لازم به ذکر است که شبیه سازی در آباکوس، محدود شدن حفره‌ها به فاصله ۰/۲۴ میکرون را به همراه دارد که در واقعیت این محدودیت وجود ندارد. از طرفی، شعاع‌های ریز حفره‌ها به طور تصادفی، به دنبال توزیع یکنواخت بین ۱-۰/۵ میکرون، بر اساس اندازه المان حجم نماینده تعیین شد.

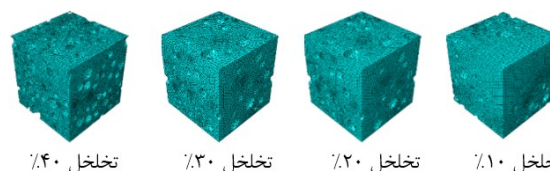
## ۴-۲-۱- برآورد عددی خواص مکانیکی مواد متخلخل

فرآیند تجزیه و تحلیل مواد متخلخل شامل ایجاد یک مدل هندسی و سپس ایجاد یک مدل المان محدود بر اساس المان گوهر نماینده (RVE) است. علیرغم توصیه کلی در مورد استفاده از المانهای هرمی در تجزیه و تحلیل سه بعدی، به دلیل عدم دقت آنها در تحلیل غیرخطی، تعداد المان مورد نیاز با وجوه بیشتر در شبیه سازی تخلخل افزایش می‌یابد (به عنوان مثال، استفاده از ۵۸۹۰۰۰ المان برای مدل RVE با تخلخل ۳۰ درصد). نمایش‌های بصری این مدل‌ها، با تخلخل‌های ۱۰٪ تا ۴۰٪، در شکل ۸، ارائه شده‌اند.

## ۵- نتایج

### ۵-۱- نتایج تست تجربی

آزمایش نمونه DCB با هدف تجزیه و تحلیل توزیع تنش در نزدیکی نوک ترک در هر دو نمونه پلیمر خالص ABS و کامپوزیت شیشه/ABS انجام شد. این شامل محاسبه ضریب شدت تنش و بررسی نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بود. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM 5528D، با ابعاد ۱۳۶ میلی متر طول، ۲۵ میلی متر عرض و ضخامت ۴ میلی متر، همه با طول ترک اولیه ۵/۵۹ میلی متر. در این مطالعه، سه نمونه خالص ABS در ابتدا با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر در دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. با پیروی از توصیه‌های استاندارد، این تحقیق بر اساس محاسبه نرخ آزادسازی انرژی کرنش، نرخ بارگذاری را به ۵ و ۱ میلی‌متر در دقیقه تنظیم کرد.



شکل ۸) نمایی از مدل المان محدود مواد متخلخل در نرم افزار آباکوس با توزیع گاما و با درصد تخلخل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد (با رویکرد عدم برهم‌کنش حفره‌ها)

می‌دانیم که در واقعیت این نقص‌ها می‌توانند هر شکلی داشته باشند، و هرچقدر در شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های تحلیل این برهم‌کنش با دقت بالاتری در نظر گرفته شود، نتایج دقیق‌تر خواهد بود. به همین منظور در این پژوهش، برهم‌کنش بین میکروحفره‌ها (تخلخلها) نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۶- نتیجه‌گیری

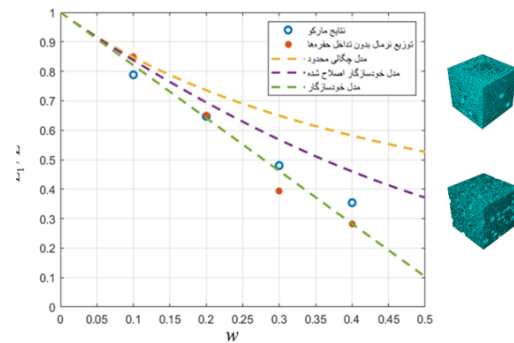
در این تحقیق، مدل‌سازی پیدایش آسیب در نواحی نوک ترک در ماده کامپوزیت الیاف ممتد ترموپلاستیک (Glass/ABS) و به طور کلی مواد ناهمسانگرد، در نظر گرفته شد. هدف این تحقیق، بررسی اثر توزیع حفره‌ها بر خواص مکانیکی ماده کامپوزیت الیاف ممتد ترموپلاستیک (Glass/ABS) و زمینه ABS است که با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری میکروحفره‌ها و روش‌های عددی بررسی شده است. در این تحقیق، ابتدا نمونه کامپوزیت الیاف ممتد ترموپلاستیک (Glass/ABS) و نمونه خالص ABS، ساخته شده و خواص شکست در مود I شکست بر طبق استاندارد ASDM D5528 بررسی شد. سپس، خواص مکانیکی و ضرایب شدت تنش در مواد مذکور با در نظر گرفتن فرض تداخل و عدم تداخل ریز حفره‌ها بررسی و گزارش شد. در این راستا، سه تابع توزیع برای تخمین پارامتر آسیب استفاده شد که نتایج توزیع گاما مطابقت بیشتری با نتایج تجربی داشت.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

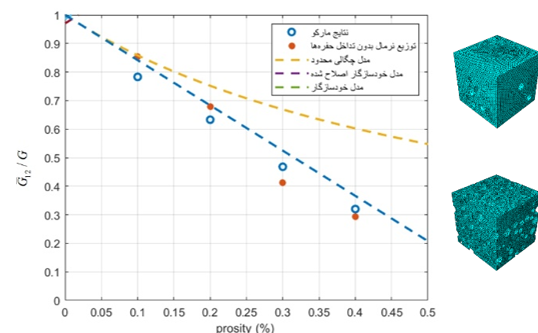
**تعارض منافع:** تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

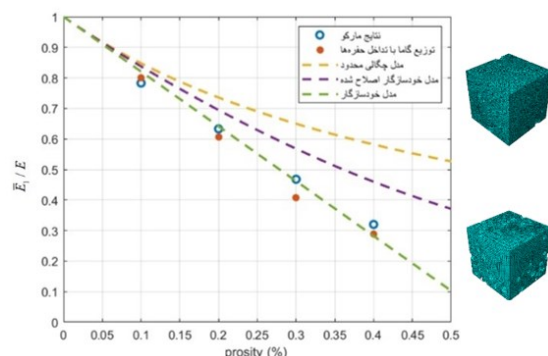
- 1- Ebadi Shishegaran, M., Mehri Khansari, N., Ghorbani, H. Experimental and numerical investigation of interlayer fracture of glass/PP continuous fiber thermoplastic composite in mixed mode (I/II). Journal of Science and Technology of Composites, 2024; 11(3): 2536-2545. doi: 10.22068/jstc.2024.2041133.1898.
- 2- Mehri-Khansari N, Ghorbani H, Golzar M. Impregnation Ability and Micromechanical Assessments of Pultruded GL/PP and GL/PA6 Thermoplastic Prepregs. Journal of Aerospace Science and Technology. 2024 Dec 29.
- 3- Dickson AN, Abourayana HM, Dowling DP. 3D printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication—A review. Polymers. 2020 Sep 24;12(10):2188.
- 4- Valino AD, Dizon JR, Espera Jr AH, Chen Q, Messman J, Advincula RC. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. Progress in Polymer Science. 2019 Nov 1;98:101162.



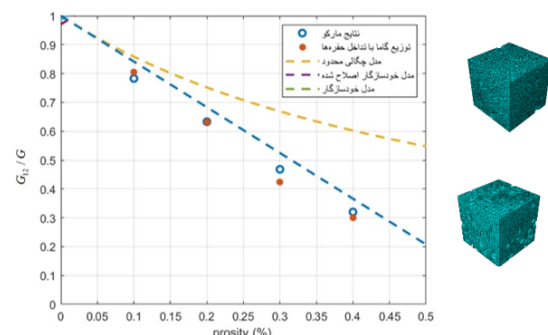
شکل ۹) مدول الاستیک نسبی برای درصد تخلخل‌های مختلف با توزیع نرمال میکروحفره‌ها (بدون برهم‌کنش)



شکل ۱۰) مدول برشی نسبی برای درصد تخلخل‌های مختلف با توزیع نرمال میکروحفره‌ها (بدون برهم‌کنش)



شکل ۱۱) مدول الاستیسیته نسبی برای درصد تخلخل‌های مختلف با توزیع گاما میکروحفره‌ها (با برهم‌کنش)



شکل ۱۲) مدول برشی نسبی برای درصد تخلخل‌های مختلف با توزیع گاما میکروحفره‌ها (با برهم‌کنش)

fracture toughness of 3D-printed fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2024 Aug 15;283:111622.

21- Santos JD, Guerrero JM, Blanco N, Fajardo JL, Paltán CA. Numerical and experimental analysis of the mode I interlaminar fracture toughness in multidirectional 3D-printed thermoplastic composites reinforced with continuous carbon fiber. *Polymers*. 2023 May 22;15(10):2403.

22- Mathey R, Jewell B, Ghosh S, Sain T. Phase-field fracture coupled elasto-plastic constitutive model for 3D printed thermoplastics and composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023 Oct 26;291:109535.

23- Feng XQ, Qin QH, Yu SW. Quasi-micromechanical damage model for brittle solids with interacting microcracks. *Mechanics of materials*. 2004 Mar 1;36(3):261-73.

24- Sabour MH, Fakoor M, Khansari NM. A model for investigation of damaged zone mechanical properties in crack tip vicinity of orthotropic materials. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Mar 21;14(14).

5- Yang C, Tian X, Liu T, Cao Y, Li D. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance. *Rapid Prototyping Journal*. 2017 Jan 16;23(1):209-15.

6- He Q, Wang H, Fu K, Ye L. 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. *Composites science and technology*. 2020 May 3;191:108077.

7- Budiansky B, O'connell RJ. Elastic moduli of a cracked solid. *International journal of Solids and structures*. 1976 Jan 1;12(2):81-97.

8- Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta metallurgica*. 1973 May 1;21(5):571-4.

9- Huang Y, Hu KX. A generalized self-consistent mechanics method for solids containing elliptical inclusions.

10- Hashin Z. The differential scheme and its application to cracked materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1988 Jan 1;36(6):719-34.

11- Deng H, Nemat-Nasser S. Microcrack interaction and shear fault failure. *International Journal of Damage Mechanics*. 1994 Jan;3(1):3-7.

12- Chudnovsky A, Dolgopolsky A, Kachanov M. Elastic interaction of a crack with a microcrack array—I. Formulation of the problem and general form of the solution. *International Journal of Solids and Structures*. 1987 Jan 1;23(1):1-0.

13- Kachanov M. Elastic solids with many cracks: a simple method of analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 1987 Jan 1;23(1):23-43.

14- Mehri Khansari N, Farrokhi A, Mosavi A. Orthotropic mode II shear test fixture: Iosipescu modification. *Engineering Solid Mechanics*. 2019 Apr 20;7(2):93-108.

15- Mehri Khansari N, Aliha MR. Mixed-modes (I/III) fracture of aluminum foam based on micromechanics of damage. *International Journal of Damage Mechanics*. 2023 Apr;32(4):519-48.

16- Fakoor M, Sabour MH, Khansari NM. A new approach for investigation of damage zone properties in orthotropic materials. *Stress (strain)*. 2014 Aug 24;1:X2.

17- Mehri Khansari N, Danandeh Hesar H, Zare Hosseinabadi S. Orthotropic failure criteria based on machine learning and micro-mechanical matrix adapting coefficient. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2024 Dec 2;52(12):9923-46.

18- Shamsirband S, Mehri Khansari N. Micro-mechanical damage diagnosis methodologies based on machine learning and deep learning models. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2021 Aug;22(8):585-608.

19- Khansari NM, Fakoor M, Berto F. Probabilistic micromechanical damage model for mixed mode I/II fracture investigation of composite materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019 Feb 1;99:177-93.

20- Khan T, Ali M, Riaz Z, Butt H, Al-Rub RK, Dong Y, Umer R. Recent developments in improving the