



## ساخت ماده مرکب با زمینه آکریلونیتریل بوتادین استایرن و الیاف شیشه بافته شده و بررسی چقرمگی شکست مود مرکب I/II با استفاده از فیکسچر بهبود یافته

الیاس حدادی<sup>۱\*</sup>، محرم شاملی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: ehadadi@nus.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ آذر ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۰ دی ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

آکریلونیتریل بوتادین استایرن

چقرمگی شکست

الیاف شیشه

ماده مرکب

### چکیده

یکی از چالش‌های اصلی برای بررسی خواص مکانیکی مواد، ساخت نمونه‌های آزمون شکست است؛ به خصوص مواد پلیمری که هر روز کاربرد آنها زیادتر می‌شود. آکریلونیتریل بوتادین استایرن یک پلیمر گرمانرم می‌باشد که به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله مراحل ساخت ماده مرکب الیاف شیشه بافته شده با زمینه آکریلونیتریل بوتادین استایرن، نمونه‌های آزمایش پروانه‌ای شکل، شکست و بررسی مقاومت شکست این نمونه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. پس از رفع چالش‌های ساخت نمونه‌ها، با استفاده از یک فیکسچر بهبود یافته برای مطالعه رفتار شکست تحت مودهای مرکب داخل صفحه I/II با قابلیت آزمون تحت مودهای خالص I و II و ترکیب‌های دلخواه در این بازه، آزمون‌های شکست بین لایه‌ای این ماده با ترک تعبیه شده در نمونه‌ها انجام گرفت. ترکیب‌های متفاوتی از بارگذاری شکست داخل صفحه از مود اول خالص تا مود دوم خالص و زوایای بین این دو مود با گام ۱۵ درجه در نظر گرفته شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که ماده مرکب ترک‌دار حاصله، در برابر بارگذاری مود I یعنی مود باز شونده‌گی تا ۸۰ درصد مقاومت کمتری نسبت به بارگذاری مود II داشته و رشد ترک در بارهای نسبتاً کمی اتفاق می‌افتد و در مقابل با تغییر به سمت مودهای مرکب و بارگذاری برش داخل صفحه II، یعنی به سمت زاویه بارگذاری بالای صفر درجه و در نهایت ۹۰ درجه، نمونه‌ها در برابر رشد ترک مقاوم‌تر بوده و در نتیجه بارهایی تا ۴۲۰ درصد بیشتر را تحمل می‌کنند. از نمودارهای حاصل می‌توان با استخراج بارهای بحرانی و مطالعات عددی به محاسبه چقرمگی شکست ماده دست یافت.

## Manufacturing of composite material with Acrylonitrile Butadiene Styrene matrix and woven glass fibers and investigation of its mixed-mode I/II fracture toughness using improved fixture

Elyas Haddadi<sup>1\*</sup>, Moharram Shameli<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

2- Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

\* Corresponding Author's Email: ehadadi@nus.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 27 November 2024

Accepted: 30 December 2024

#### Keywords:

Acrylonitrile Butadiene Styrene

Fracture Mechanics

Glass Fibers

Composite Material

### Abstract

One of the main challenges in investigation of the mechanical properties of materials is the manufacturing of the fracture test specimens, especially for polymeric materials, which are increasingly used. Acrylonitrile butadiene styrene is a thermoplastic polymer that has been widely used in various industries. In this article, the steps of manufacturing of a woven glass fiber composite with acrylonitrile butadiene styrene matrix, manufacturing of butterfly-shaped fracture specimens, and examining the fracture strength of specimens are considered. After overcoming the challenges of sample manufacturing, interlaminar fracture tests of this material with embedded cracks were performed using an improved fixture to study the fracture behavior under in-plane mixed modes I/II with the ability to test under pure mode I and mode II and arbitrary combinations in this range. Different combinations of in-plane fracture loading with a step of 15 degrees were considered. The tests results showed that the cracked composite material has up to 80% less resistance to Mode I loading, i.e., the opening mode, than to Mode II loading, and crack growth occurs at relatively low loads. On the other hand, by changing to mixed mode loading and in-plane shear loading II, i.e., to a loading angle above zero degrees and finally 90 degrees, the samples are more resistant to crack growth and as a result, they withstand loads up to 420% higher. From the resulting graphs, it is possible to calculate the fracture toughness of the prepared material in the desired modes by extracting critical loads and numerical studies.

### Please cite this article using:

Haddadi E, Shameli M. Manufacturing of composite material with Acrylonitrile Butadiene Styrene matrix and woven glass fibers and investigation of its mixed-mode I/II fracture toughness using improved fixture. 2025 Mar 21;12(1):1-13. doi: 10.22034/ijme.2024.490686.2030 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

ورق آکریلونیتریل بوتادین استایرن<sup>۱</sup> یکی از پرمصرفترین ورق‌های پلاستیکی است. این ورق دارای سه مونومر آکریلونیتریل استایرن و بوتادین است که هرکدام از آن‌ها ویژگی‌های خاصی در ورق ایجاد می‌کنند [۱]. آکریلونیتریل دارای خواصی چون سفتی، استحکام مذاب، پایداری در مقابل فرسودگی و پایداری در مقابل عوامل شیمیایی است. بوتادین نیز دارای خواصی چون استحکام مذاب، مقاومت ضربه‌ای و چقرمگی در دمای پائین است. استایرن نیز چون سفتی، شفافیت و فرایند پذیری آسان را دارا است [۲-۴]. ورق ABS در مقابل رطوبت، حرارت زیاد و سائیدگی پایدار بوده ولی در صورت تماس با روغن‌های پایه نفتی ترک می‌خورد. از قابلیت رنگ‌پذیری، عایق بودن و چسبندگی خوبی برخوردار است، بنابراین در بسیاری از موارد جایگزین مناسبی برای سایر ورق‌های پلاستیکی است [۵]. این ماده در اندازه‌های مختلف به صورت ورق و میل‌گرد در دسترس است. ضخامت ورق‌های تولیدی برحسب نوع دستگاه از ۰٫۲ تا ۱۰ میلی‌متر و بیشتر نیز قابل تولید است، عرض ورق نیز از یک متر تا چندین متر متغیر است. تلاش‌ها و تحقیقات زیادی برای بررسی شکست ترد در حالت مود مرکب بر روی مواد مختلف مهندسی انجام گرفته است [۷-۹]. در بین این مواد، با توجه به موارد ذکر شده، آکریلونیتریل بوتادین استایرن به‌عنوان ماده بسیار مناسبی برای آزمون‌های آزمایشگاهی است، که همگن و ایزوتروپ بوده و معمولاً در دمای اتاق و نرخ بارگذاری متوسط با شکست نسبتاً ترد مواجه است. از دیگر ویژگی‌های خاص این ماده می‌توان به قابلیت ماشین‌کاری و پولیش‌کاری و راحتی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش اشاره کرد [۱۰]. بنابراین مطالعه خواص مکانیکی و رفتار شکست این ماده دارای اهمیت است [۱۱].

امروزه پلیمرهای مهندسی به‌خوبی جایگاه خود را در ساخت قطعات و سازه‌های مهندسی پیدا کرده‌اند به طوری که تصور انواع صنایع پیشرفته بدون حضور پلیمرها و پلاستیک‌های مهندسی مشکل است. اکنون این پلیمرها در ساخت تولیدات مختلف از قبیل؛ لوازم خانگی، مصارف عمومی، تجهیزات علمی و پزشکی، صنایع خودروسازی، حمل‌ونقل زمینی و دریایی، صنعت هوافضا و مواد مرکب زمینه پلیمری به کار می‌روند [۱۲-۱۴]. پلاستیک‌ها به دلیل وجود ترکیبی از خواص متنوع در مقایسه با سایر مواد بیشتر جلب توجه می‌کنند. از جمله این خواص می‌توان به سبکی وزن، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت شکل‌پذیری اشاره کرد [۱۵]. کامپوزیت‌های بافتی به دلیل داشتن مزایایی نظیر مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای در مقایسه با کامپوزیت‌های تک‌جهتی، محبوبیت زیادی برای استفاده در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع هوافضا پیدا کرده‌اند. با این وجود لایه‌های کامپوزیت بافتی به دلیل وجود تنش‌های بین لایه‌ای، حساسیت بسیار زیادی به ترک‌های موجود بین لایه‌ای و جدایش لایه‌ها دارند [۱۱].

چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین خصوصیات مواد در کاربردهای مهندسی است [۱۶، ۱۷]. تئوری‌های سیستماتیک پدیده‌های شکست در اوایل ۱۹۲۰ توسط اینگلس پایه‌گذاری و به دنبال آن توسط گریفیث توسعه داده شد [۱۸، ۱۹]. امروزه این تئوری‌ها به‌عنوان مبانی تئوری‌های شکست جدید شناخته می‌شوند. مکانیک شکست الاستیک خطی<sup>۲</sup> (از جمله روش‌های ضریب شدت تنش<sup>۳</sup> و نرخ‌هایی انرژی<sup>۴</sup>) تا زمانی معتبر است که تغییرات غیرخطی مواد، محدود به ناحیه کوچکی در اطراف نوک ترک باشد [۲۰-۲۲]. به‌هرحال، این روش‌ها برای موادی که پلاستیسیته زیادی را در هنگام شکست از خود نشان می‌دهند مناسب نبوده و نمی‌توانند چقرمگی شکست این نوع مواد را اندازه‌گیری نمایند. اروین برای اولین بار وجود یک ناحیه پلاستیک را در نوک ترک تشخیص داد [۲۳]. زمانی که این ناحیه پلاستیک بزرگ باشد، بخش قابل‌توجهی از انرژی شکست در این ناحیه جذب شده و در نتیجه مکانیک شکست الاستیک خطی اعتبار خود را از دست می‌دهد. این امر به ظهور مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک منجر شد. از جمله تئوری‌های این نوع شکست جابه‌جایی میزان بازشدگی نوک ترک<sup>۵</sup>، انتگرال جی<sup>۶</sup> و کار ضروری شکست<sup>۷</sup> است. جابه‌جایی در بازشدگی نوک ترک برای مواقعی به کار می‌رود که یک ترک پیش از شروع، به دلیل تغییر شکل پلاستیک دچار کند شدگی می‌شود. روش انتگرال جی بر پایه یک انتگرال شمارنده و مستقل از مسیر است که توسط رایس ارائه شد [۲۴]. ارتباط بین مقدار بحرانی جابه‌جایی

<sup>1</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene

<sup>2</sup> Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

<sup>3</sup> Stress Intensity Factor (K)

<sup>4</sup> Energy Release Rate (G)

<sup>5</sup> Crack Tip Opening Displacement

<sup>6</sup> J-Integral

<sup>7</sup> Essential Work of Fracture

در بازشدگی نوک ترک، نرخ بحرانی رهایی انرژی و انتگرال جی بحرانی را می‌توان به وسیلهٔ مدل اروین<sup>۱</sup>، مفاهیم ولز<sup>۲</sup> و مدل داگدال<sup>۳</sup> تشریح کرد [۲۵، ۲۶]. برای بسیاری از پلیمرهای چقرمه، همواره می‌توان تغییر شکل پلاستیک در مقیاس بزرگ را در طول فرایند شکست مشاهده کرد. تحت این شرایط، دیگر نمی‌توان مکانیک شکست را از طریق جابه‌جایی میزان بازشدگی نوک ترک و انتگرال جی که عموماً برای تغییر شکل الاستیک غیرخطی کاربرد دارند، بررسی کرد. برای مطالعهٔ رفتار شکست این مواد از روش کار ضروری شکست که یکی از موفق‌ترین تئوری‌ها از این نوع است، استفاده می‌شود. این روش برای تعیین چقرمگی مواد چقرمه و پلیمرهای چقرمه شده در حالت تنش صفحه‌ای و به دلیل سادگی و مفید بودن به کار گرفته می‌شود [۲۷، ۲۸].

نوآوری این مقاله، بررسی مقایسه‌ای رفتار شکست بین لایه‌ای تحت مود مرکب داخل صفحه I/II نمونه‌های ماده مرکب ساخته شده با زمینه آکریلونیتریل بوتادین استایرن و الیاف شیشه بافته شده با استفاده از یک فیکسچر بهبودیافته می‌باشد. به عبارتی علاوه بر استفاده از فیکسچر بهبودیافته جدید و منحصر به فرد در این مقاله، رفتار شکست ماده مرکب کمتر مطالعه شده با زمینه ABS و الیاف شیشه بافته شده برای اولین بار تحت ترکیب‌های متنوعی از مودهای بارگذاری داخل صفحه از مود خالص I تا مود خالص II و زوایای مختلف در این بازه مورد مطالعه قرار گرفت. محورهای فعالیت‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از: تهیه نمونه‌هایی از ماده ABS و بررسی خواص این ماده و سپس تهیه ماده مرکب با زمینه ABS و الیاف شیشه بافته متعامد در دو حالت قطعات بدون ترک و با ترک استاندارد؛ تخمین خواص مکانیکی این ماده مرکب و تهیه نمونه‌های شکست پروانه‌ای کوچک از این ماده برای مطالعه مقاومت شکست؛ تدوین و اجرای ترکیب‌های متفاوتی از آزمون‌های شکست داخل صفحه از مود اول خالص تا مود دوم خالص و زوایای بین این دو مود خالص در بازه‌های ۱۵ درجه (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) با استفاده از فیکسچر شکست بهبودیافته؛ بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون‌ها به منظور شناخت مقاومت به رشد ترک ماده مرکب مورد مطالعه.

## ۲- مطالعات و آزمایش‌ها

مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) ابزار مفیدی برای تحقیق در مورد ترک‌ها است. هدف از آزمایش چقرمگی شکست، به دست آوردن مقدار ضرایب شدت تنش بحرانی یا چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) در حالت کرنش صفحه‌ای است. این خصوصیت جسم برای توصیف کردن مقاومت در مقابل شکست آن در طراحی اعضای سازه‌ای به کار می‌رود. استانداردهای ASTM با عنوان‌های E399 و D5045 برخی راهنمایی‌ها را درباره چقرمگی شکست مود کششی در حالت کرنش صفحه‌ای ( $K_{IC}$ ) برای فلزات و پلاستیک‌ها را دارند. ضریب شدت تنش ( $K_{IC}$ ) در رأس یک ترک در یک نمونه کششی پیوسته از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۷، ۲۸]:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f(a/w) \quad (1)$$

که  $P_C$  بار بحرانی شکست،  $w$  عرض نمونه،  $t$  ضخامت نمونه،  $a$  طول ترک و  $f(a/w)$  ضریب شدت تنش بی‌بعد یا ضریب اصلاح هندسی است و از تحلیل المان محدود نمونه آزمایشگاهی به دست می‌آید. مکانیک شکست الاستیک خطی و شرایط کرنش صفحه‌ای، شرایط اولیه لازم هستند. ضرایب شدت تنش در جلوی رأس ترک برای یک نوع اصلاح شده نمونه آرکان با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۹، ۳۰]:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f_I(a/w) \quad (2)$$

به طریق مشابه  $K_{IIC}$  نیز با استفاده از ضریب شدت تنش  $f_{II}(a/w)$  محاسبه می‌شود.

مقدار  $K_{IC}$  به دست آمده از نمونه‌های مورد آزمایش نشان داد که چقرمگی شکست نه تنها به هندسهٔ نوک ترک، اندازه شعاع، عرض شیار ترک و زاویه یا چهارگوش شدیداً وابسته است بلکه، عواملی چون تغییر شکل نوک ترک، ناحیهٔ متأثر از حرارت و تنش پسماند نیز می‌تواند روی آن تأثیر بگذارد. بنابراین برای کاهش این نوع تأثیرات بر چقرمگی شکست مواد پلیمری بهتر است که روش ایجاد ترک بر اساس جنس ماده انتخاب شود. ولی لازم به ذکر است که تمام فرایندهای تولید ترک اولیه حتی روش خستگی روی ناچ ایجاد شده تأثیر داشته و نمی‌توان یک ترک اولیه بدون عیب را به دست آورد؛ بنابراین باید تلاش کرد که روش ایجاد ناچ حداقل تأثیر را روی

<sup>1</sup> Irwin

<sup>2</sup> Well's

<sup>3</sup> Dugdale

نمونه داشته باشد. همچنین به صورت عملی به دست آمد که روش ایجاد ترک اولیه با استفاده از لیزر دقیق تر، قابل تکرار و تقریباً اثر مشابه سایر روش‌های ایجاد ترک اولیه را داشته و  $K_{IC}$  ناشی از آن اختلاف چندانی با بقیه ندارد [۳۱].

## ۲-۱- مواد و روش‌ها

برای ساخت ماده مرکب زمینه ترموپلاستیکی با زمینه ABS و الیاف شیشه بافته انتخاب شد. بدین منظور از گرانول ABS ساخت شرکت پتروشیمی تبریز با شناسه محصول SD0150 استفاده شد. این محصول شاخص ذوب<sup>۱</sup> (MFI) در حدود ۳ dg/min (۳۵۰ °C) و دمای نرمی در حدود ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده و چگالی آن ۱,۰۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. گرید انتخاب شده دارای بیشترین چسبندگی به الیاف شیشه است. این پلیمر دمای فرایندی ۲۰۰ الی ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد را دارا است که در این مقاله با دمای ۲۰۰ درجه کارهای قالب‌گیری صورت گرفته است. دستگاه قالب‌گیری دستگاه پرس داغ<sup>۲</sup> محصول شرکت برابندر<sup>۳</sup> با ظرفیت فشار ۲۰۰ تن و دارای ابعاد حدودی ۲۵۰ در ۲۵۰ میلی‌متری برای صفحات پرس است (شکل ۱).



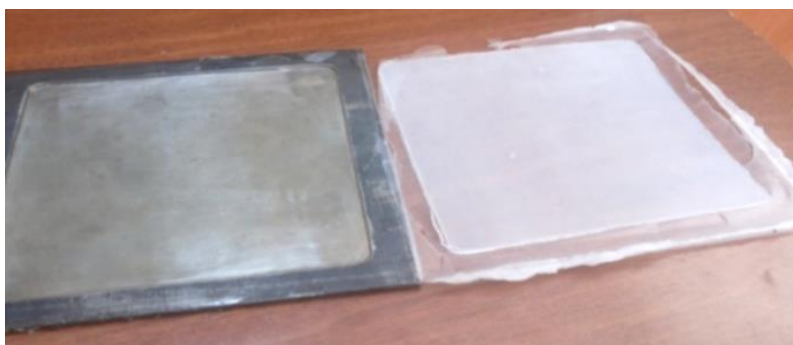
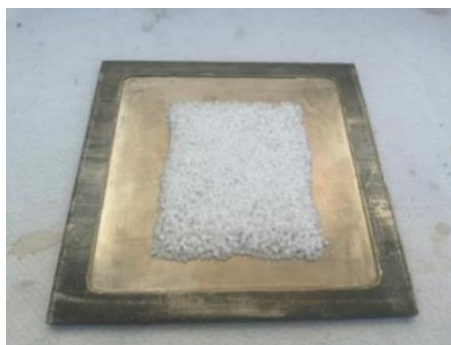
شکل ۱- نمایی از دستگاه پرس داغ مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها

در اولین گام ابتدا ورق‌های نیم و یک میلی‌متری ABS توسط قالب‌های مربوطه تهیه گردید. بدین منظور وزن خاصی از گرانول‌ها در قالب ریخته و در فاصله بین صفحات قالب قرار داده شد. دمای فک‌ها در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم و به مدت ۶ دقیقه، گرانول‌ها در نزدیکی صفحات بالا و پائین قالب در این دما قرار گرفت. پس از این مدت با رسیدن گرانول‌ها به حالت شیشه‌ای و حالت روان، قالب که بر روی آن فویل آلومینیومی (به منظور صافی سطح، عدم چسبیدن به صفحه بالایی و عدم حباب‌گیری) اضافه شد، تحت فشار و بسته شدن صفحات قالب قرار گرفت. دما و زمان با توجه به حجم قالب و گرانول‌های داخل قالب و مشخصات پلیمر طوری انتخاب شد که همه گرانول‌ها از حالت اولیه جامد به حالت شیشه‌ای تبدیل شده و فرایند ادغام آن‌ها شروع شود و هوای بین آن‌ها شروع به خارج شدن نموده و در حین اعمال حرارت و نیز بسته شدن قالب و شروع فرایند فشار، پلیمر به‌تواند به صورت روان حرکت نموده و حجم قالب را به‌طور کامل پر نماید. این دو عامل (دما و زمان) پس از چند بار آزمون اولیه به دست آمد به نحوی که علاوه بر اطمینان از کفایت مقادیر برای ذوب کامل، شروع روان شدن مذاب و تخلیه حباب‌ها، از بیش از اندازه بودن مقادیر نیز به جهت جلوگیری از سوختن پلیمر و چسبندگی فویل آلومینیومی اجتناب شود. فشاری در حدود ۱۰۰ بار در مرحله قالب‌گیری اعمال شد. این مقدار نیز که به تدریج توسط دستگاه کنترل و به حد نهایی خود می‌رسد به میزانی است که ضمن تخلیه مذاب مازاد بر حجم قالب و انطباق و بسته شدن لبه‌های قالب، فشار بیش از حد به مرکز قالب منتقل نشده و از تغییر شکل قالب و نازک شدن ضخامت پلیمر نهایی در مرکز قالب جلوگیری می‌شود. پس از ۲ دقیقه پرس (جهت تکمیل بسته شدن کامل لبه‌های قالب و تخلیه مذاب مازاد و شکل‌گیری ورق)، فرایند اعمال حرارت متوقف و صفحات پرس و قالب خنک‌کاری شدند و قالب از دستگاه خارج و ورق‌های تولید شده از قالب بیرون آورده شدند (شکل ۲).

<sup>1</sup> Melt Flow Rate Index

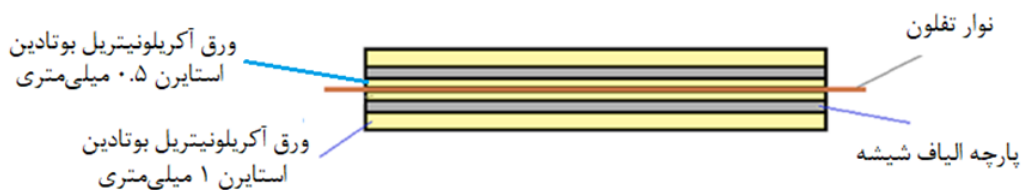
<sup>2</sup> Hot Press

<sup>3</sup> Brabender

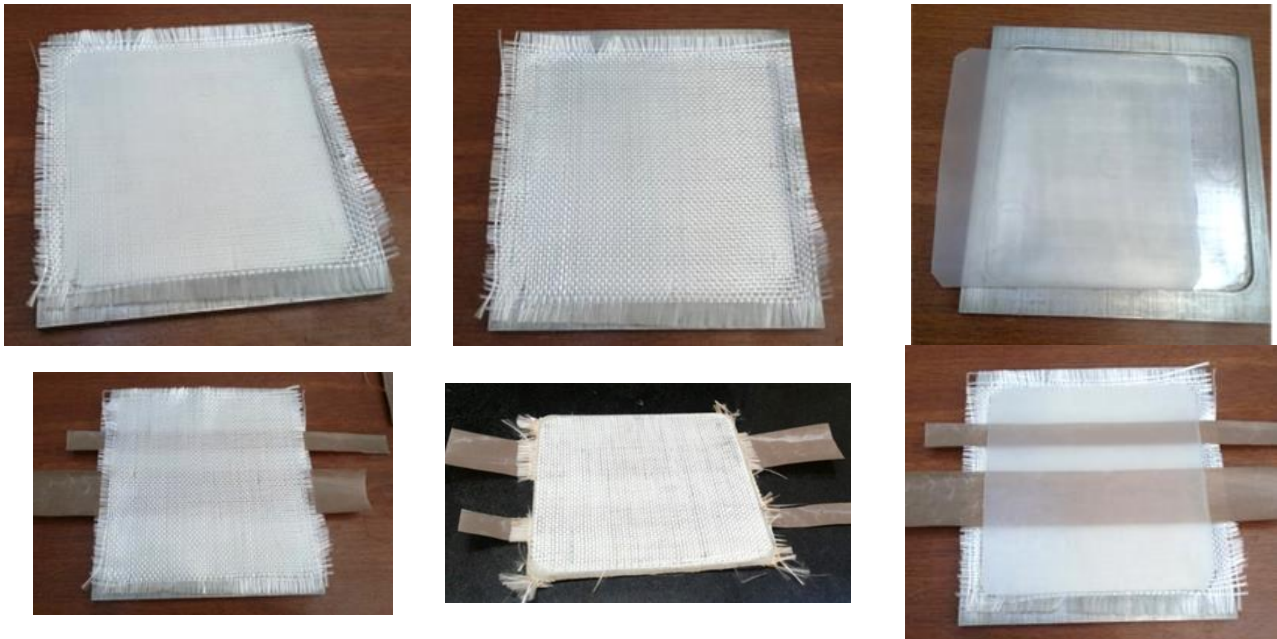


شکل ۲ تصاویری از مراحل قالب‌گیری ورق‌های نیم میلی‌متری توسط دستگاه پرس داغ

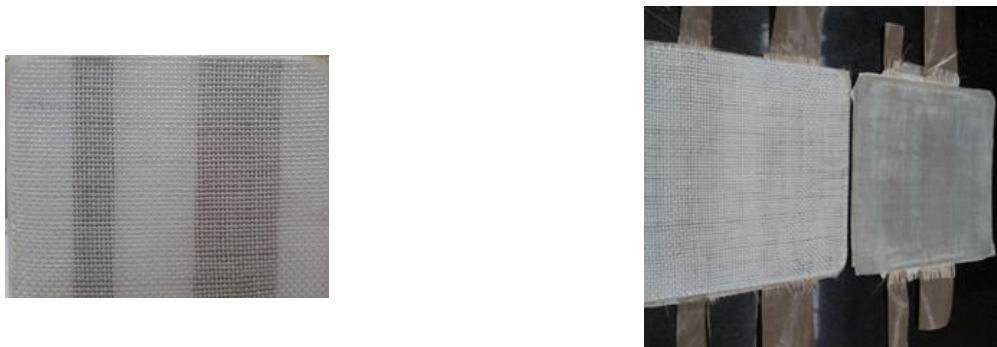
در گام بعدی، تهیه ورق‌های ماده مرکب با الیاف شیشه با چیدمان نشان داده شده در شکل ۳ انجام گرفت. به منظور ایجاد ترک اولیه، نوار تفلون در بخشی از ورق‌ها قرار داده شد. از بخش‌های دیگر این ورق (سالم و بدون ترک)، برای آزمایش خواص مکانیکی ماده مرکب حاصل بهره گرفته شد. تصاویر نشان داده شده در شکل ۴-الف مراحل ساخت این ورق‌های مرکب را نشان می‌دهد. نمونه‌های ماده مرکب سالم در حالت‌های یک لایه و ۲۰ لایه تهیه گردید و از نمونه‌های ۲۰ لایه برای تعیین خواص مکانیکی ماده مرکب استفاده گردید. برای تهیه نمونه‌های ترک‌دار از مواد تک لایه استفاده شد و ترک (نوار تفلون نسوز نازک ۰,۲ میلی‌متری) در بین دو لایه از این لایه‌ها، برای مطالعه شکست بین لایه‌ای قرار داده شد. تهیه این ماده پس از رفع ایرادات حاصله اعم از حباب‌گیری، عدم نفوذ و گلوله گلوله شدن گرانول‌ها و یا انحراف و اعوجاج پارچه شیشه بهینه‌سازی شد و در نهایت محصولی با کیفیت مناسب تهیه گردید که توسط کنترل‌های چشمی، نوری و برش‌های موضعی کیفیت آن مورد تأیید قرار گرفت. نمونه‌ای از قطعات ساخته شده در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



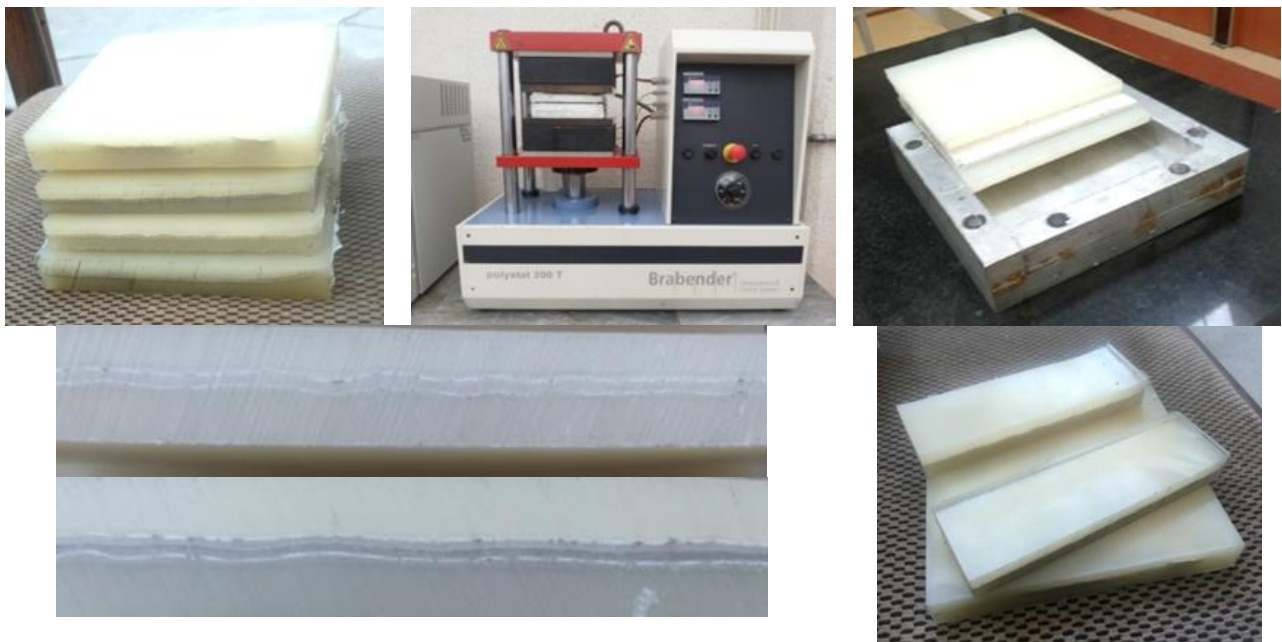
شکل ۳ نمای شماتیک از لایه چینی ماده مرکب مورد مطالعه



(الف)



(ب)



(ج)

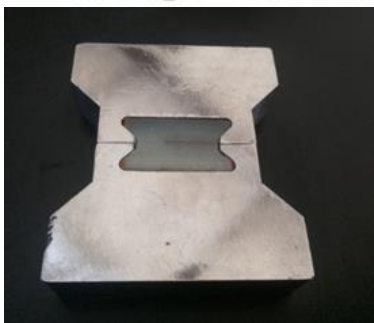
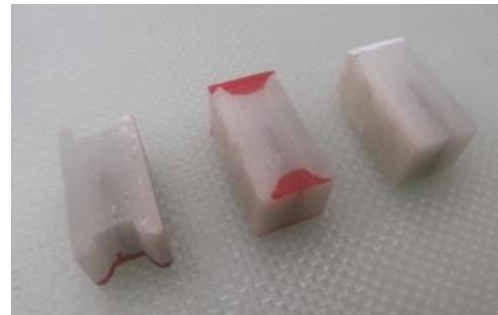
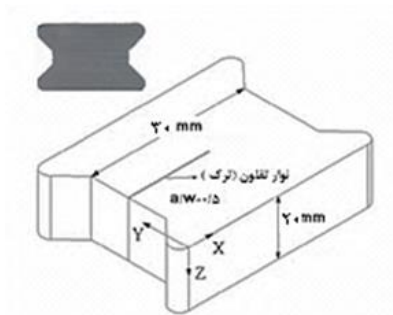
شکل ۴ الف) مراحل ساخت ماده مرکب الیاف شیشه بافتی با زمینه ABS، ب) نمونه‌ای از ماده مرکب ساخته شده با الیاف شیشه بافتی و زمینه ABS و ج) مرحله‌ای از ساخت ورق با هسته مرکب

## ۲-۲- تهیه نمونه‌های آزمون‌های شکست

جهت اجرای آزمون‌های شکست تحت مود مرکب و با استفاده از فیکسچر جدید نیاز به تهیه نمونه‌ها با حداقل ضخامت ۲۲ میلی‌متر بود. لذا در ادامه با استفاده از ورق‌های ضخیم و قالب‌گیری دوباره و پس از مراحل بهینه‌سازی اتصال و عدم حباب‌گیری نمونه‌ها، ورق ضخیم با هسته مرکزی مرکب ساخته شد. در شکل ۴-ج مراحل ترکیب، ساخت، برش و آزمون کیفیت این ورق‌ها نشان داده شده است. در شکل ۵-الف مراحل از آماده‌سازی نمونه‌های پروانه‌ای کوچک با هسته مرکب و در ادامه در شکل ۵-ب برش و آماده‌سازی نمونه‌های پروانه‌ای برای آزمایش‌های شکست و ابعاد آن آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵ (الف) مراحل از آماده‌سازی نمونه‌های پروانه‌ای کوچک با هسته مرکب و (ب) برش و آماده‌سازی نمونه‌های پروانه‌ای برای آزمایش‌های شکست و ابعاد آن

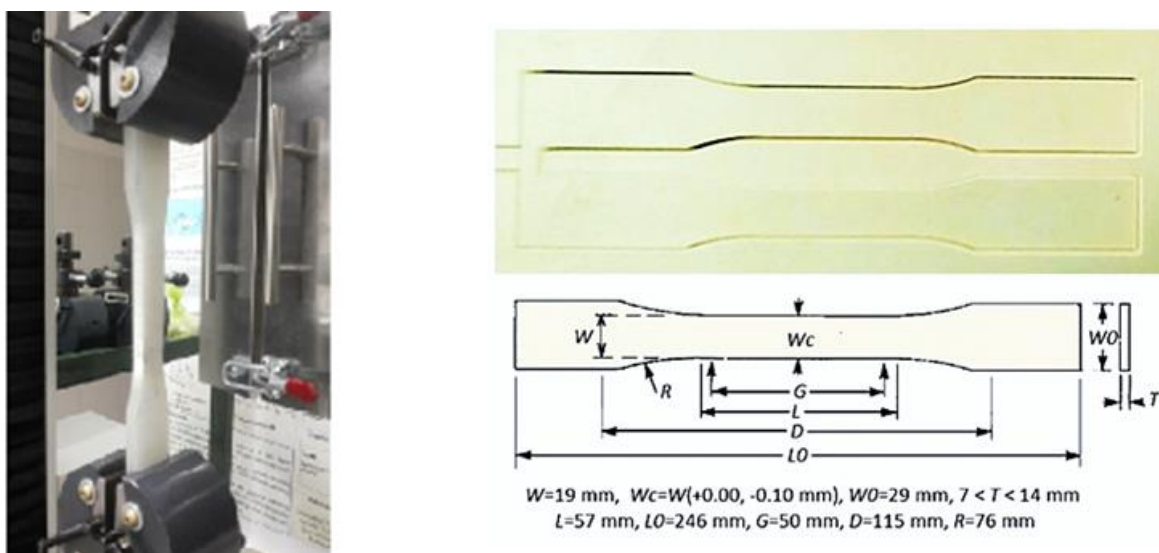
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی

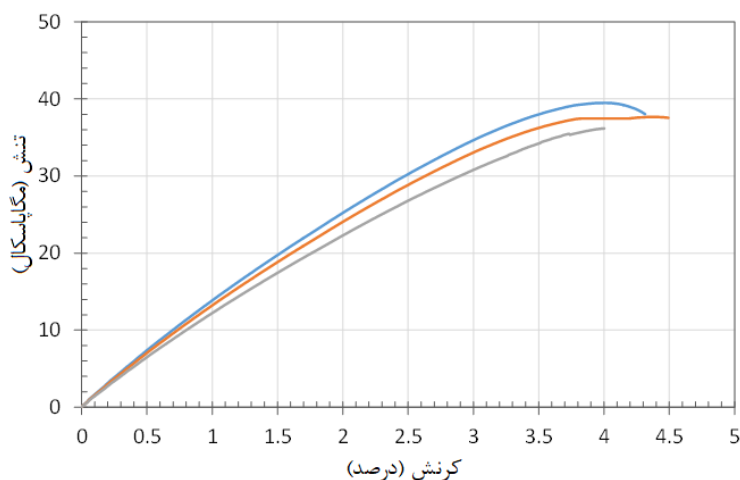
دستگاه‌های کشش مورد استفاده برای آزمون‌های خواص مکانیکی و آزمون‌های شکست بین‌لایه‌ای ماده مرکب از نوع Static Testing Machines ساخت شرکت zwick/Roell آلمان با ظرفیت کشش ۱ تن و نیز دستگاه سنتام مدل STM-400 با ظرفیت کشش ۴۰ تن و قابلیت کنترل جابه‌جایی با سرعت‌های مختلف بودند.

برای تعیین پارامترهای خواص مکانیکی، نمونه‌های دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM D638 [۳۲] با همان شرایط تهیه نمونه‌های پروانه‌ای تهیه شد که شکل کلی نمونه و وسیله آزمایش آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود. شکل ۷ نتایج نمونه‌های دمبلی تحت آزمون کشش را نشان می‌دهد؛ چنان‌که مشاهده می‌شود جهت کاهش خطای آزمایش سه نمونه دمبلی مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول ۱ خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون کشش ارائه شده است.

پس از تهیه این ورق مرکب، آزمون‌های کشش به منظور تخمین مقاومت ماده تولید شده انجام گرفت و برخی از خواص مکانیکی آن استخراج گردید. نمونه‌ای از منحنی‌های تنش-کرنش این ماده در شکل ۸ آورده شده است. خصوصیات کششی ماده در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۶ نمونه دمبلی و نحوه آزمایش نمونه دمبلی جهت به دست آوردن خواص مکانیکی (ابعاد برحسب میلی‌متر) [۳۲]

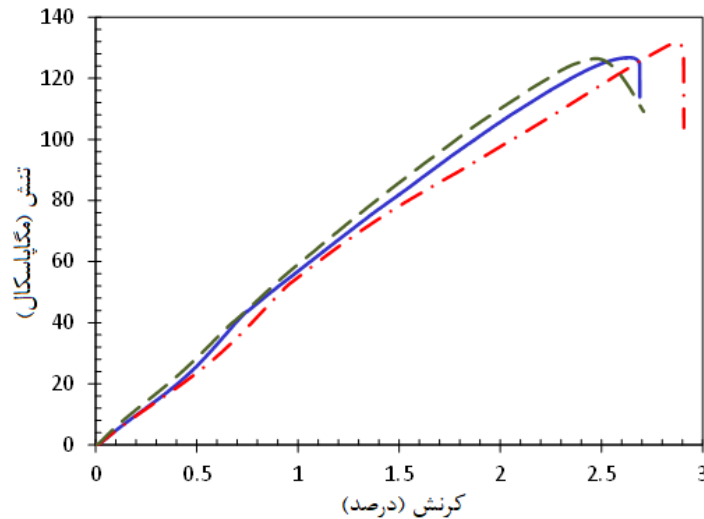


شکل ۷ نمودارهای حاصل از کشش نمونه‌های دمبلی شکل، طبق استاندارد ASTM D638

<sup>1</sup> ASTM D638 Tensile Test on Plastics

جدول ۱ خواص مکانیکی به دست آمده از نمونه های دمبلی شکل، طبق استاندارد ASTM D638

آزمون	E [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]
۱	۱۲۹۷	۳۶/۵
۲	۱۵۸۰	۳۷/۸
۳	۱۷۶۶	۳۹/۲
Avg.	۱۵۵۰	۳۷/۸
STDEV.	۱۹۲	۱/۱

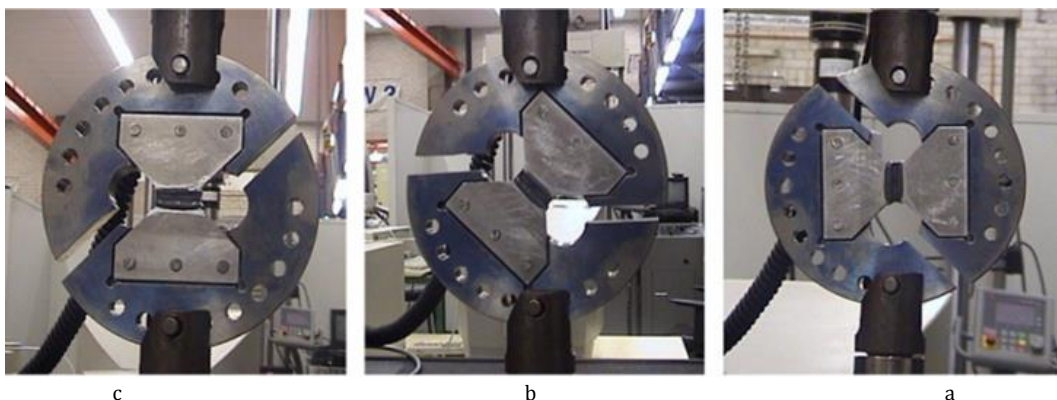


شکل ۸ نمونه منحنی های تنش-کرنش ورق مرکب تهیه شده

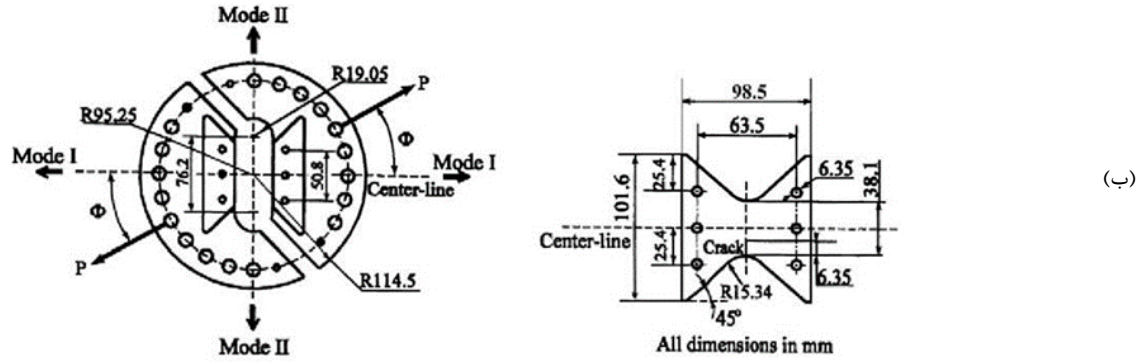
جدول ۲ مشخصات تقریبی ماده کامپوزیت بافتی شیشه-ABS

$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
۶/۲۵	۶/۲۵	۲/۳	۰/۴۲	۱/۳۵	۱/۳۵	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۱۱

یکی از بهترین روش های اندازه گیری مود مرکب، روش آرکان است که در سال ۱۹۸۷ توسط آرکان و همکاران [۳۳] بر روی مواد کامپوزیتی استفاده شد. آزمایش بر مبنای بارگذاری تک محوری نمونه ترک دار که بین دو قطعه فلزی جهت ترکیب مودهای مشخص داخل صفحه، قرار گرفته، استوار است. در سال ۱۹۹۵ آمستوتز و همکاران [۳۴] با ایجاد سوراخ هایی در محیط دستگاه جهت اعمال بار، دستگاه را اصلاح نمودند. در واقع این روش، روش مناسبی جهت اندازه گیری مود اول و دوم و مود مرکب، تنها با استفاده از یک گیره برای آزمایش است. در شکل ۹-الف نمونه مورد آزمایش در دستگاه ارائه شده است. نمونه آزمایش آرکان، به شکل پروانه ای است که ترکی در وسط آن ایجاد می شود و توسط پین به فیکسچر متصل می شود، دستگاه و نمونه در شکل ۹-ب نشان داده شده است.

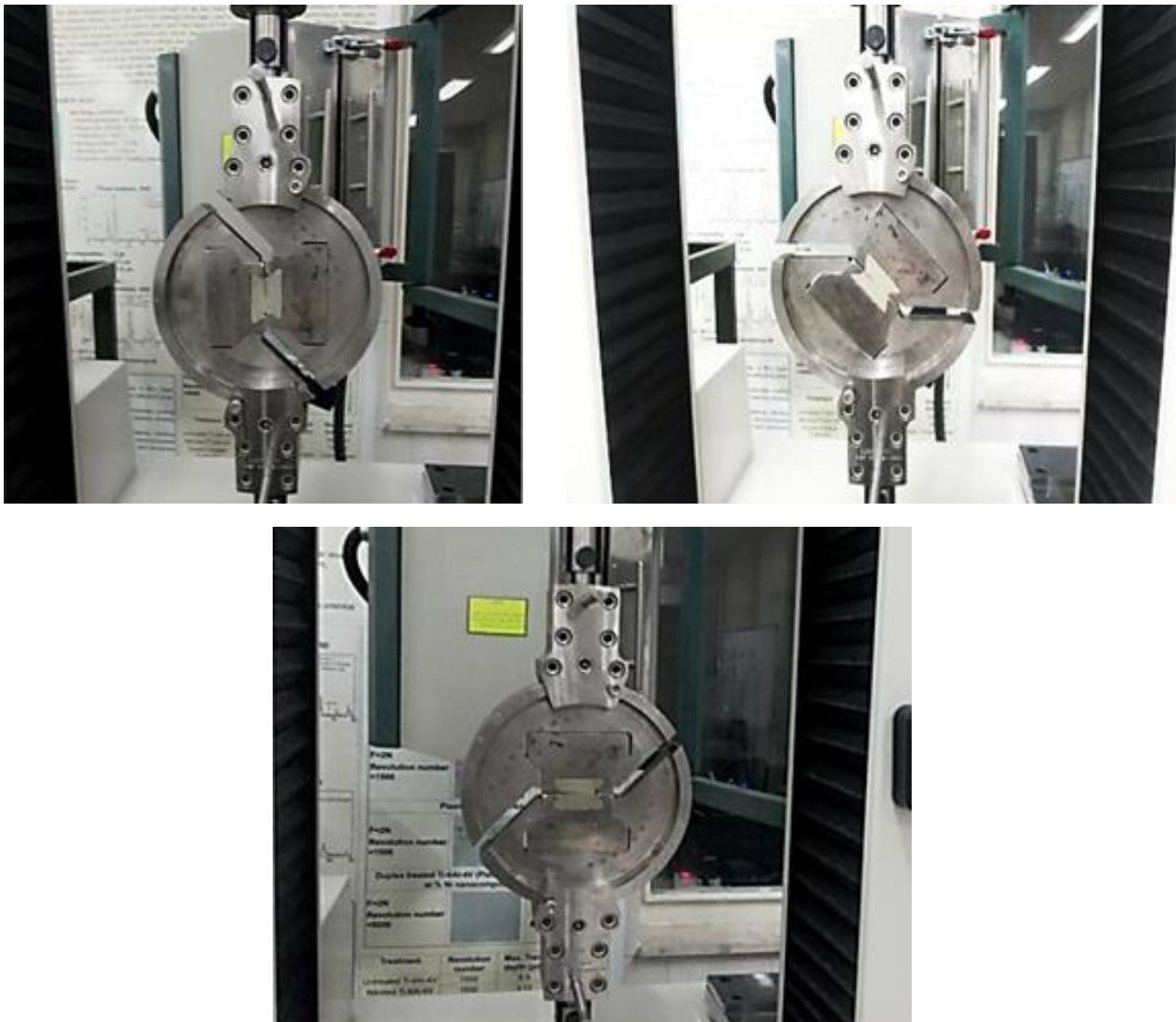


(الف)



شکل ۹ الف) نمایی از دستگاه و گیره آزمایش آرکان، (a) بارگذاری در مود II، (b) بارگذاری در حالت مود مرکب ۴۵ درجه، و (c) بارگذاری در مود I و (ب) نمونه و دستگاه اصلاح شده آرکان [۳۵]

پس از تهیه نمونه‌های پروانه‌ای، آزمون‌های شکست توسط فیکسچر جدید برای حالات مختلف از مود I (زاویه صفر درجه) تا مود II (زاویه ۹۰ درجه) و با گام زاویه‌ای ۱۵ درجه اجرا شد (شکل ۱۰). برای هر حالت، برخی نمونه‌ها تا حالت نهایی شکست بارگذاری شدند تا رفتار کلی نمونه‌ها در آن زاویه شناخته شود، سپس نمونه‌های دیگر هر کدام تا بار خاصی بارگذاری شده و باربرداری شدند.



شکل ۱۰ تصاویری از آزمون‌های شکست نمونه‌های ماده مرکب

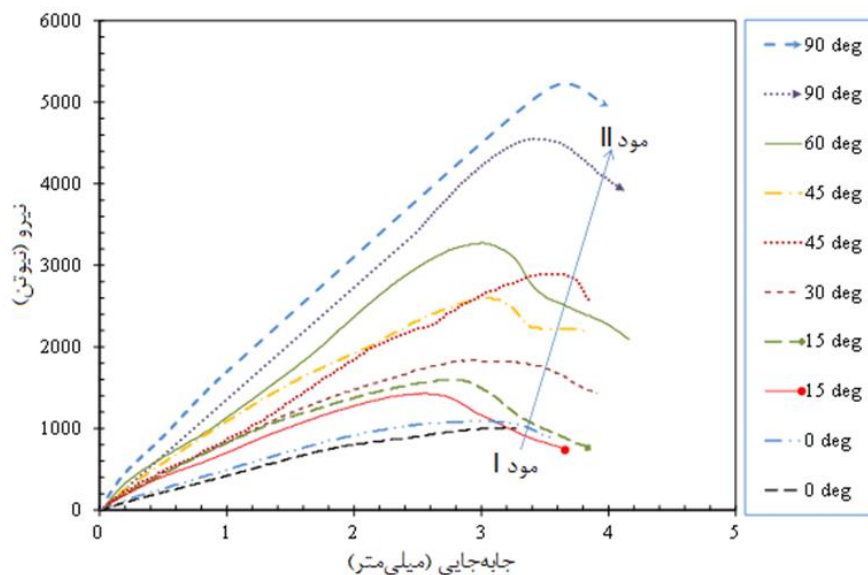
### ۳-۲- نتایج آزمون‌های شکست

ساخت نمونه‌های آزمایش، چالشی است که در این مقاله نیز به چشم می‌خورد. نهایت تلاش در ساخت نمونه‌های ABS با الیاف شیشه بافته انجام و در ایجاد پیش ترک نهایت دقت و حوصله به کار گرفته شد.

شکست ماده مرکب با زمینه ABS تحت بارگذاری مود مرکب I/II از حالت مود I خالص تا مود II خالص با زاویه گام ۱۵ درجه مطابق با استانداردهای ASTM E1820-13 و ASTM D6068 بررسی و منحنی‌های نیرو-جابجایی به دست آمدند. در شکل ۱۱ منحنی‌های بار-جابجایی نمونه‌ها در مودهای مرکب نشان داده شده است (جهت مشاهده بهتر رفتار ماده، برای بعضی از آزمایش‌ها ۲ نتیجه آورده شده است). مقطع جانبی این نمونه‌ها ابتدا به صورت چشمی و میکروسکوپی بررسی و پس از ترد سازی در ازت و شکست کامل، روند رشد ترک در آن‌ها رؤیت گردید.

روند این نمودارها نشان می‌دهد که ماده حاصله مقاومت کمتری در برابر بارگذاری‌های مود I یعنی مود باز شونده دارد و نشان‌دهنده رشد ترک در بارهای نسبتاً کم است. در مقابل، با حرکت به سمت زاویه بارگذاری بالای صفر درجه و در نهایت ۹۰ درجه که همان مود بارگذاری برش داخل صفحه یا مود II، نمونه‌های ساخته شده در برابر رشد ترک مقاوم‌تر بوده و در نتیجه بار بیشتری را تحمل می‌کنند. با مقایسه بارهای شکست نمونه‌ها مشاهده گردید، ماده مرکب ترک‌دار ساخته شده در زاویه بارگذاری ۱۵ درجه از مود مرکب I/II، ۵۴ درصد مقاومت بیشتری نسبت به بارگذاری مود I خالص دارد. مقاومت این ماده مرکب ترک‌دار در زوایای بارگذاری ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه، به ترتیب ۸۱، ۱۸۹ و ۲۲۸ درصد بیشتر از بارگذاری مود خالص I است. مقایسه مود خالص I و II نشان می‌دهد که نمونه‌ها در مود II، تا ۴۲۰ درصد (۵٫۲ برابر) بار بحرانی بیشتری را تحمل می‌کنند و این یعنی نمونه در مود بارگذاری خالص II یا همان ۹۰ درجه حساسیت کمتری در برابر رشد ترک نسبت به مود خالص I یا همان صفر درجه دارد.

همچنین نمودارها نشان می‌دهند که در بارگذاری‌هایی به جز مود خالص I، تغییر شکل پلاستیک بیشتری را در زمینه ABS نشان می‌دهد. بدین معنی که در این زوایا، رشد ترک به صورت خطی و الاستیک خالص رخ نمی‌دهد و برش در صفحات مایل به تدریج رخ داده و پس از تغییر شکل‌های بزرگ‌تر و پلاستیک، نمونه به سمت شکست می‌رود.



شکل ۱۱ نمونه‌ای از منحنی‌های بار-جابجایی نمونه‌های پروانه‌ای تحت شکست مود مرکب

### ۴- نتیجه‌گیری

نمونه‌های ABS تقویت شده با الیاف شیشه در این مقاله با استفاده از دستگاه‌های مختلف تهیه و خواص آن مورد آزمایش قرار گرفت. پس از تهیه نمونه‌هایی از ماده ABS و به دست آوردن خواص مکانیکی آن‌ها و همچنین تهیه ماده مرکبی با زمینه ABS و الیاف شیشه بافته متعامد و به دست آوردن خواص مکانیکی این ماده مرکب، نمونه‌های شکستی به شکل پروانه‌ای کوچک از این ماده مرکب برای

مطالعه مقاومت شکست این ماده ساخته شد. در عمل برای ساخت نمونه‌های فوق چالش‌هایی از جمله حباب‌گیری، عدم نفوذ و گلوله گلوله شدن گرانول‌ها و یا انحراف و اعوجاج پارچه شیشه وجود داشته که روند تهیه نمونه‌ها را با مشکل مواجه می‌کرد. بارگذاری نمونه‌های شکست با ترک تعبیه‌شده در این نمونه‌ها، در ترکیب‌های متفاوتی از بارگذاری شکست داخل صفحه از مود اول خالص (زاویه ۰ درجه) تا مود دوم خالص (زاویه ۹۰ درجه) و زوایای بین این دو مود خالص با گام ۱۵ درجه (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰)، با استفاده از یک فیکسچر شکست بهبودیافته برای بارگذاری‌های تحت مود مرکب I/II از مود I خالص تا مود II خالص به انجام رسید. نمودارها نشان داد که ماده حاصله مقاومت کمتری (تا ۸۰ درصد کمتر) در برابر بارگذاری‌های مود I یعنی مود باز شونده داشته و رشد ترک در بارهای نسبتاً کم اتفاق می‌افتد و در مقابل با حرکت به سمت بارگذاری مرکب، یعنی به سمت زاویه بارگذاری بالای صفر درجه و در نهایت ۹۰ درجه که همان مود بارگذاری برش داخل صفحه یا II است، نمونه‌های ساخته‌شده در برابر رشد ترک مقاوم‌تر بوده و در نتیجه بار بیشتری (تا ۴۲۰ درصد بیشتر) را تحمل می‌کنند. از نمودارهای حاصل می‌توان پس از استخراج بارهای بحرانی و با افزودن مطالعات عددی به محاسبه چقرمگی شکست ماده تهیه شده در مودهای موردنظر دست یافت.

## References

- [1] Deshmukh D, Kulkarni H, Srivats DS, Bhanushali S, More AP. Recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS): A review. *Polymer Bulletin*. 2024 Aug;81(13):1-38. doi: [10.1007/s00289-024-05269-y](https://doi.org/10.1007/s00289-024-05269-y)
- [2] Gackowski BM, Sharma M, Idapalapati S. Processing and characterization of tailorable 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene composites with hybrid buckypapers. *Composites Communications*. 2022 Jun 1;32:101162. doi: [10.1016/j.coco.2022.101162](https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101162)
- [3] Kamelian FS, Saljoughi E, Shojaee Nasirabadi P, Mousavi SM. Modifications and research potentials of acrylonitrile/butadiene/styrene (ABS) membranes: A review. *Polymer Composites*. 2018 Aug;39(8):2835-46. doi: [10.1002/pc.24276](https://doi.org/10.1002/pc.24276)
- [4] Deng W, Long M, Zhou Q, Wen N, Deng W. One-step preparation of superhydrophobic acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer coating for ultrafast separation of water-in-oil emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018 Feb 1;511:21-6. doi: [10.1016/j.jcis.2017.09.070](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.070)
- [5] Ziemian S, Okwara M, Ziemian CW. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal*. 2015 Apr 20;21(3):270-8. doi: [10.1108/RPJ-09-2013-0086](https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0086)
- [6] Zamani A, Abbasi F, Agah AM. Characterization of rubber phase in acrylonitrile-butadiene-styrene polymers. *Journal of applied polymer science*. 2009 Nov 1;114(3):1908-13. doi: [10.1002/app.30371](https://doi.org/10.1002/app.30371)
- [7] Hasanpour R, Choupani N. Rock fracture characterization using the modified Arcan test specimen. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009 Feb 1;46(2):346-54. doi: [10.1016/j.ijrmms.2008.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.004)
- [8] Ayatollahi MR, Aliha MR. Fracture toughness study for a brittle rock subjected to mixed mode I/II loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007 Jun 1;44(4):617-24. doi: [10.1016/j.ijrmms.2006.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.10.001)
- [9] Wyeth DJ, Atkins AG. Mixed mode fracture toughness as a separation parameter when cutting polymers. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009 Dec 1;76(18):2690-7. doi: [10.1016/j.engfracmech.2009.07.023](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.07.023)
- [10] ASM International. *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International; 1993.
- [11] Shameli M, Choupani N, Razavi MK. Measurement of Mixed-mode Fracture Toughness of Polypropylene using Multispecimen J-integral Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Jun 10;16(4):333-44. [In Persian]
- [12] Manouchehri AM, Golzar M, Masoudi A, Ghorbani H. Investigating and comparing the mechanical properties of ABS/GF continuous fiber composite and ABS polymer produced by fused deposition modeling method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov 22;9(9):26-34. doi: [10.22034/ijme.2023.375334.1722](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.375334.1722) [In Persian]
- [13] Kazemi H, Salamat-Talab M, Ghanbari D. Investigating the mode II critical strain energy release rate of glass/epoxy laminated composites reinforced with polyvinyl alcohol interlayer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 May 21;11(3):51-62. doi: [10.22034/ijme.2024.455742.1950](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.455742.1950) [In Persian]
- [14] Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhabadi A. Experimental investigation of mechanical and electrical properties of semi-biodegradable polypropylene/hemp woven thermoplastic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Jun 22;10(4):62-77. doi: [10.22034/IJME.2023.412380.1820](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.412380.1820) [In Persian]
- [15] Wessel JK. *The handbook of advanced materials: enabling new designs*. John Wiley & Sons; 2004 Apr 27.

- [16] Kazemi H, Salamat-Talab M, Ghanbari D. Investigating the mode II critical strain energy release rate of glass/epoxy laminated composites reinforced with polyvinyl alcohol interlayer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 May 21;11(3):51-62. doi: 10.22034/IJME.2024.455742.1950 [In Persian]
- [17] Hosseini Abbandanak SN, Abdollahi Azghan M. Investigation the interface and charpy impact behavior of fiber metal laminates containing graphene nanoplatelets and glass\kevlar hybrid fibers. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 May 22;6(2):10-9. doi: 10.22034/IJME.2024.455742.1950 [In Persian]
- [18] Park J, Lakes RS. *Biomaterials: an introduction*. Springer Science & Business Media; 2007 Jul 23.
- [19] Anderson TL, Anderson TL. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press; 2005 Jun 24.
- [20] Choupani N, Soltanpour Khamneh M. Investigation on mixed mode elastic-plastic fracture behavior of ABS polymeric material. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Jun 10;15(4):272-80. [In Persian]
- [21] Shokrieh MM, Salamat-Talab M, Heidari-Rarani M. Numerical analysis of mode I delamination growth in laminated DCB specimens using cohesive zone models. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(1):38-48. [In Persian]
- [22] Kaveh Z, Ayatollahi M. Computation of mode I notch stress intensity factors in a V-notched TPB specimen. *Modares Mechanical Engineering*. 2013 Aug 10;13(5):74-82. [In Persian]
- [23] Westergaard HM. Bearing Pressures and Cracks: Bearing Pressures Through a Slightly Waved Surface or Through a Nearly Flat Part of a Cylinder, and Related Problems of Cracks. *Journal of Applied Mechanics*. 1939 Jun;6(2):A49-53. doi: 10.1115/1.4008919
- [24] Irwin GR. Structural aspects of brittle fracture. *Applied materials research*. 1964 Apr 3;3(2):65-81.
- [25] Zhu XK, Joyce JA. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering fracture mechanics*. 2012 May 1;85:1-46. doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.02.001
- [26] Shameli M, Choupani N. Fracture criterion of woven glass-epoxy composite using a new modified mixed-mode loading fixture. *International Journal of Applied Mechanics*. 2016 Mar 24;8(02):1650015. doi: 10.1142/S1758825116500150
- [27] Herasymchuk OM. Theoretical estimation of the endurance limit of metal materials by the characteristics of their static strength and microstructure based on the linear-elastic fracture mechanics. *Strength of Materials*. 2023 Jan;55(1):25-34. doi: 10.1007/s11223-023-00499-3
- [28] Sohail T, Roy S. An investigation of the validity of LEFM at the nanoscale in amorphous materials using the atomistic J-integral including entropic effect. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2023 Jun 1;125:103913. doi: 10.1016/j.tafmec.2023.103913
- [29] Rahman MM, Zhang Z, Shaik A. Investigation of the linear elastic fracture mechanics and its applicability in hydraulic fracturing modeling and design. *Special Topics & Reviews in Porous Media: An International Journal*. 2020;11(6). doi: 10.1615/SpecialTopicsRevPorousMedia.2020033609
- [30] Masuda K, Ishihara S, Shibata H, Oguma N. Effect of Rod-like Structure on Fatigue Life, Short Surface Crack Initiation and Growth Characteristics of Extruded Aluminum Alloy A2024 (Analysis via Modified Linear Elastic Fracture Mechanics). *Materials*. 2021 Dec 8;14(24):7538. doi: 10.3390/ma14247538
- [31] Haddadi E, Choupani N, Abbasi F. Investigation on the effect of different pre-cracking methods on fracture toughness of RT-PMMA. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2016;13:2012-26. doi: 10.1590/1679-78252804
- [32] ASTM International. ASTM D638-08: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. In: *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03*. Philadelphia, PA: ASTM International; 2003.
- [33] Arcan M, Hashin ZA, Voloshin A. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials: a specially designed specimen yields material properties under pure shear or uniform plane-stress conditions. *Experimental mechanics*. 1978 Apr;18:141-6. doi: 10.1007/BF02324146
- [34] Amstutz BE, Sutton MA, Dawicke DS, Newman JC. An experimental study of CTOD for mode I/mode II stable crack growth in thin 2024-T3 aluminum specimens. *ASTM special technical publication*. 1995 Jan 1;1256:256-71. doi: 10.1520/STP16388S
- [35] Richard HA, Benitz K. A loading device for the creation of mixed mode in fracture mechanics. *international Journal of Fracture*. 1983 Jun;22:R55-8. doi: 10.1007/BF00942726