



# Comparison of Mechanical Properties of Glass Interlayer Polymers Under Different Loadings

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Kholoosi F.<sup>1</sup>,  
Alavi Nia A.<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Kholoosi F., Alavi Nia A. Comparison of Mechanical Properties of Glass Interlayer Polymers Under Different Loadings. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(09):567-576.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### \*Correspondence

Address: Bu-Ali Sina University, Department of Mechanical Engineering, Hamedan, Iran.

alavi1338@yahoo.com

### Article History

Received: August 9, 2023  
Accepted: October 22, 2023  
ePublished: November 12, 2023

## ABSTRACT

Polymers are used in a wide range of industries. In this research, the mechanical behavior of polymers used in the glass industry has been studied. The investigated polymers included thermoplastic polyurethane (TPU), polyvinyl butyral (PVB) and sentry glas (SG). These polymers were subjected to tension and compression tests at different strain rates from 0.001 to 0.25 s<sup>-1</sup>. Also, the mechanical dynamic properties of the polymers were extracted using the mechanical dynamic analysis test at a constant frequency. The tensile test results showed that the mechanical behavior of polyurethane is not dependent on strain rate, but SG is highly sensitive to strain rate. Also, with increasing strain rate, the fracture stress of SG decreased drastically. The pressure test results showed that TPU can withstand more stress. The glass transition temperature of TPU was lower than the other two polymers. Overall, it can be concluded that among the polymers studied in this research, TPU had better mechanical behavior.

**Keywords** Polymer, strain Rate, Mechanical Dynamic Analysis, Quasi-Static Loading, Interlayer

## CITATION LINKS

1- Parametric study of a SPH high ... 2- Investigating the effect of TPU and ... 3- Experimental and numerical investigation ... 4- Computational methods for bird ... 5- Damage visualization and deformation ... 6- Perforation of laminated glass: an ... 7- Behavior of multilayer transparent spacecraft ... 8- Energy absorption mechanism of ... 9- Development of an intrinsic solid-shell ... 10- A high-fidelity numerical approach ... 11- Failure mechanisms and residual capacity ... 12- Experimental study on mechanical behavior ... 13- Systematic experimental study on ... 14- Bending behavior of structural glass ... 15- Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on dynamic mechanical ... 16- Constitutive investigation on viscoelasticity of ... 17- The mechanical properties of Polyvinyl Butyral ... 18- The mechanical properties of ionoplast ... 19- Research on temperature and strain rate dependent ... 20- Compressive response of a glass-polymer system ... 21- Molecular Dynamics Study of Mechanical Properties ... 22- Dynamic compressive response of a developed ... 23- Numerical analysis of dynamic responses of ... 24- Manufacturing and mechanical and electrical properties ... 25- Design, manufacturing, and evaluation of ... 26- Mechanical Behavior of Laminated Glass Polymer ... 27- Influence of PVB Interlayer Mechanical Properties ... 28- Preparation of laminated safety glass based ... 29- Standard Test Methods for Vulcanized ... 30- TA Orchestrator User Manual ... 31- Standard Test Method for Transition ... 32- Effective thickness of laminated glass ...

## مقایسه خواص مکانیکی پلیمرهای میان‌لایه شیشه در بارگذاری‌های مختلف

فرشید خلوصی<sup>۱</sup>، علی علوی‌نیا\*

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

### چکیده

پلیمرها در طیف وسیعی از صنایع کاربرد دارند. در این پژوهش، به بررسی رفتار مکانیکی پلیمرهای مورد استفاده در صنایع شیشه‌سازی پرداخته شده است. پلیمرهای مورد بررسی شامل پلی‌یورتان ترموپلاستیک (TPU)، پلی‌وینیل بوتیرال (PVB) و ستری گلس (SG) بودند. این پلیمرها در نرخ کرنش‌های مختلف از  $0/001$  تا  $0/25$  تحت آزمایش‌های کشش و فشار قرار گرفتند. همچنین، خواص دینامیکی مکانیکی پلیمرها با استفاده از آزمون آنالیز دینامیکی مکانیکی در فرکانس ثابت انجام شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که رفتار مکانیکی پلی‌یورتان به نرخ کرنش وابسته نبوده ولی SG به شدت به نرخ کرنش حساس بوده است. همچنین، با افزایش نرخ کرنش، تنش شکست SG به شدت کاهش یافت. نتایج آزمون فشار نشان داد که TPU تنش بیشتری را می‌تواند تحمل کند. دمای شیشه‌ای شدن TPU نسبت به پلیمرهای دیگر پایین‌تر بود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در میان پلیمرهای مورد بررسی در این پژوهش، رفتار مکانیکی بهتری داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** پلیمر، نرخ کرنش، میان‌لایه، آزمون دینامیکی مکانیکی، بارگذاری شبه‌استاتیکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

\*نویسنده مسئول: alavi1338@yahoo.com

### ۱- مقدمه

مواد پلیمری به دلیل استحکام بالا، جذب انرژی مناسب و وزن کم در طیف گسترده‌ای از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از کاربردهای این مواد استفاده در صنایعی است که نیاز به افزایش استحکام دارند. صنایع شیشه‌سازی از مهم‌ترین صنایعی هستند که مواد پلیمری به‌عنوان میان‌لایه در آن استفاده می‌شوند. شیشه‌های چندلایه (Laminate) در حوزه‌های هوافضا [1-4]، ضد گلوله [5-7]، اتومبیل‌سازی [8-10] و ... کاربرد گسترده‌ای دارند. به‌منظور جلوگیری از شکست شیشه‌های چندلایه که در صنایع مختلف مانند اتومبیل‌سازی استفاده می‌شوند و همچنین جلوگیری از پاشش شیشه به داخل کابین پس از ضربه، از میان‌لایه‌های پلیمری در بین لایه‌های شیشه استفاده می‌کنند که هم استحکام سازه را افزایش می‌دهد و هم پس از شکست، آن‌ها را متصل به هم نگه می‌دارد. بلیز و همکاران [11] در سال ۲۰۰۹، به بررسی نحوه شکست شیشه با میان‌لایه SGP و PVB در آزمایش کشش پرداختند. نمونه‌های آزمایش به طول ۱۱۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که شیشه با میان‌لایه SGP ضعیف‌تر از شیشه با میان‌لایه PVB بود. ژو و همکاران [12] در سال ۲۰۱۱ به بررسی رفتار مکانیکی شیشه چندلایه با میان‌لایه PVB در نرخ کرنش‌های مختلف پرداختند.

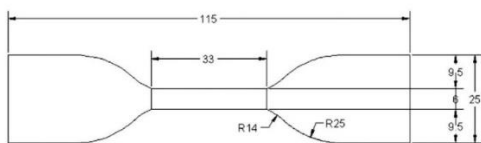
نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، مقدار تنش نهایی و کرنش نهایی افزایش یافت. لیو و همکاران [13] در سال ۲۰۱۲، رفتار مکانیکی PVB را در آزمایش‌های مختلف بررسی کردند. آزمایش‌های کشش و فشار در نرخ کرنش‌های مختلف انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در آزمایش‌های کشش، منحنی تنش-کرنش PVB، تحت بارگذاری دینامیکی به‌صورت الاستوپلاستیک است در حالی که آن‌هایی که تحت بارهای شبه‌استاتیکی قرار گرفتند رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان دادند. سرافیناویکوس و همکاران [14] در سال ۲۰۱۳، به بررسی آزمون خمش بر روی شیشه چندلایه با میان‌لایه‌های مختلف پرداختند. میان‌لایه‌ها از جنس PVB، EVA و SGP انتخاب شدند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که تنش‌های نهایی شیشه‌های چندلایه با میان‌لایه PVB و EVA به هم نزدیک بودند. قاسمی و فارسانی [15] در سال ۲۰۱۳، به بررسی خواص میرایی و سفتی کامپوزیت‌های پلی پروپیلن/کربنات کلسیم پرداختند. از آزمون‌های کشش و DMA برای بررسی خواص مکانیکی استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات در این پلیمرها، استحکام کششی کاهش و مدول الاستیک افزایش یافت. در پژوهشی دیگر، لیو و همکاران [16] در سال ۲۰۱۴، با استفاده از آزمون DMA رفتار مکانیکی PVB را بررسی کردند. ایشان در این پژوهش، مقدار ضرایب ویسکوالاستیک را برای نمونه PVB محاسبه کردند. ژانگ و همکاران [17] در سال ۲۰۱۵، به بررسی خواص مکانیکی PVB در آزمایش کشش پرداختند. آزمایش‌های کشش در نرخ کرنش‌های  $0/008$  تا  $1360 s^{-1}$  انجام شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، تنش شکست بیشتر شد. همچنین، با افزایش نرخ کرنش مقدار مدول یانگ نیز افزایش یافت. ژانگ و همکاران [18] در پژوهشی دیگر، به بررسی خواص مکانیکی SGP در آزمایش کشش پرداختند. نرخ کرنش در بازه  $0/0056$  تا  $2000 s^{-1}$  بررسی شد. منحنی‌های تنش-کرنش نشان دادند که رفتار SGP وابسته به نرخ کرنش است. همچنین، نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم نیز افزایش یافت. ژو و همکاران [19] در سال ۲۰۱۶، به بررسی رفتار مکانیکی PVB در دما و نرخ کرنش‌های مختلف پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، تنش نهایی نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، با کاهش دما مقدار تنش نهایی نمونه‌ها افزایش یافت. در پژوهشی در سال ۲۰۱۶، فان و همکاران [20] رفتار مکانیکی نمونه‌های پلیمر-شیشه را در نرخ کرنش‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها به صورت استوانه و با طول و قطر ۵ و ۱۰ میلی‌متر ساخته شدند. آزمون فشار شبه‌استاتیکی و دینامیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها پس از آزمایش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج پژوهش ایشان

در پژوهش‌های گذشته، رفتار مکانیکی میان‌لایه‌های پلیمری در آزمایش فشاری مورد مطالعه و مقایسه قرار نگرفته است. در این پژوهش، رفتار سه ماده پلیمری پرکاربرد در صنایع شیشه‌سازی مطالعه شده است. از آزمون کشش و فشار شبه‌استاتیکی و همچنین آزمون DMA به منظور بررسی رفتار مکانیکی این مواد استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش این مواد استخراج شده و سپس پارامترهای مختلف آن از جمله تنش و کرنش شکست مواد مختلف در نرخ کرنش‌های یکسان با هم مقایسه گردیده است. در انتها، رفتار دینامیکی مکانیکی نمونه‌ها در فرکانس ثابت با هم مقایسه شده است.

## ۲- مواد و آزمایش

### ۲-۱- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های مورد آزمایش از جنس TPU، PVB و SG آماده شدند. ورق‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های TPU، PVB و SG به ترتیب ۱/۲۵، ۰/۷۶ و ۰/۷۶ میلی‌متر ضخامت داشتند. TPU مورد استفاده از شرکت هانستمن (Huntsman) و از نوع کریستالفلکس (KRYSTALFLEX) و نمونه‌های PVB و SG از شرکت دوپونت (DuPont) و از نوع بوتاکیت (Butacite) تهیه شدند. این پلیمرها از نوع ترموپلاستیک هستند. نمونه‌های آزمون کشش استاتیکی بر طبق استاندارد ASTM-D412 آماده شدند [29]. یک مورد از این نمونه‌ها و ابعاد آن در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌طور کلی برای آزمایش کشش از هر جنس ۱۲ نمونه ساخته شد. به منظور انجام آزمایش فشار، نیاز به نمونه‌های استوانه‌ای شکل بود. به همین منظور، مطابق شکل (۲-الف)، با استفاده از دستگاه اتوکلاو تعدادی از ورق‌های پلیمر روی هم قرار داده شدند و با استفاده از دستگاه این ورق‌ها به هم چسبانده شدند تا ضخامت آن به حدود ۱۰ میلی‌متر برسد. مقدار فشار در اتوکلاو تا حدود ۱۸۰ psi و دما تا ۱۳۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت.



(الف)



(ب)

شکل (۱) نمونه آزمایش الف) ابعاد استاندارد بر حسب میلی‌متر (ب) نمونه برش داده شده TPU

نشان داد که با افزایش نرخ کرنش مقدار تنش و کرنش نهایی افزایش یافته است. قاجار و همکاران در سال ۲۰۱۸ [21]، خواص مکانیکی ماده پلیمری پلی‌وینیلیدن فلوراید آمورف که دارای مونومرهای قطبیده می‌باشد را با استفاده از شبیه‌سازی بررسی کردند. از آزمون کشش و DMA برای مطالعه خواص مکانیکی استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که تطابق رفتاری مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها وجود داشت. فان و وانگ [22] در سال ۲۰۱۸، به بررسی رفتار دینامیکی پلی‌متیل‌متا‌آکریلیک (PMMA) در نرخ کرنش‌های مختلف پرداختند. آزمایش فشار شبه‌استاتیکی و دینامیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که با افزایش نرخ کرنش مقدار تنش نهایی و کرنش نهایی بیشتر شدند. لیو و همکاران [23] در سال ۲۰۲۱، به بررسی عددی پاسخ دینامیکی شیشه چندلایه در برابر انفجار پرداختند. میان‌لایه از جنس PVB انتخاب شد. ضخامت میان‌لایه و شیشه، شرایط مرزی و ابعاد شیشه به‌عنوان پارامترهای مورد بررسی در نظر گرفته شدند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد با افزایش ضخامت میان‌لایه PVB مقاومت در برابر انفجار شیشه‌های چندلایه به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. همچنین، افزایش ضخامت شیشه توانست مقاومت در برابر انفجار شیشه چندلایه را بهبود بخشد. به علاوه، افزایش ضخامت لایه شیشه جلویی در مقایسه با افزایش ضخامت لایه شیشه پشتی موثرتر بود. سرخوش و زارعی [24] به بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت پلیمری تفلون تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. جهت تعیین خواص مکانیکی از آزمون کشش و جهت تعیین خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی از آزمون ثابت دی‌الکتریک در باند X استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که زمان طولانی پخت در دماهای بالا، باعث تخریب مواد افزودنی به الیاف و کاهش کیفیت واکنش بین الیاف-زمینه شده و در اثر آن استحکام کامپوزیت کاهش یافت. در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۲، سرخوش و همکاران [25]، به بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت زیست تخریب‌پذیر با الیاف کف پرداختند. جهت تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت، از آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها استفاده شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که این کامپوزیت از قابلیت بالقوه‌ای در طراحی کاربردهای الکترومغناطیسی و الکتریکی نسبت به فلزات برخوردار است. در سالیان اخیر، تحقیقات بسیاری بر روی خواص مکانیکی میان‌لایه‌های مختلف انجام شده است [26-27]. دینگ و همکاران [28] در سال ۲۰۲۳، به مقایسه استحکام ضربه شیشه‌های چندلایه با میان‌لایه TPU پرداختند. ایشان توانستند با بهبود لایه TPU، استحکام کششی آن را از ۲۷ به ۵۱ مگاپاسکال و ازدیاد طول آن را در هنگام شکست پس از بازپخت از ۳۳۰٪ به ۵۲۵٪ برسانند.

کرنش ۳ بار تکرار شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سننام ۵ تن، واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه بوعلی سینا انجام گرفته است.

(ب) آزمون فشار شبه‌استاتیکی: این آزمون در دو نرخ کرنش ۰/۰۱ و  $0.83 s^{-1}$  انجام شده و برای اطمینان از صحت نتایج، در هر نرخ کرنش ۳ بار تکرار شده است. این آزمون با استفاده از دستگاه سننام ۱۵ تن موجود در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است.

(ج) آزمون DMA: این آزمون برای مطالعه رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها بسیار مفید است و با استفاده از آن می‌توان دمای شیشه‌ای شدن و رفتار ویسکوالاستیک ماده را بررسی کرد. دمای انتقال شیشه‌ای (Glass Transition Temperature)، دمایی است که بعد از آن دما، تحرکات زنجیره پلیمر در مقیاس بزرگ‌تری آغاز شده و تغییرات پلیمری از یک حالت سخت و ترد، به یک حالت نرم و لاستیکی تبدیل می‌شود. در این ناحیه افت شدید مدول مشاهده می‌شود.

این آزمون با دو روش دما ثابت و فرکانس ثابت انجام می‌گیرد. در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار ماده در دماهای مختلف و همچنین دمای شیشه شدن از روش فرکانس ثابت استفاده شده است. آزمون DMA در محدوده دمایی ۱۰۰- تا ۱۰۰+ درجه سانتی‌گراد و در فرکانس ثابت ۱ هرتز انجام شده و نرخ تغییرات دما ۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. آزمون DMA با استفاده از دستگاه متلر تولیدو (Mettler Toledo) در آزمایشگاه پلیمر پژوهش‌شده پلیمر انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی نتایج آزمایش کشش شبه‌استاتیکی

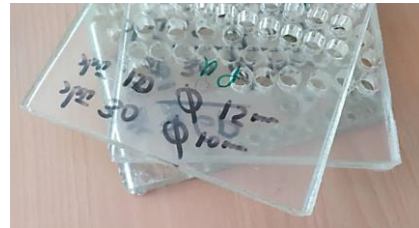
خواص آزمون شبه‌استاتیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش سننام تحت نرخ کرنش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳) نمونه‌ای از جنس PVB در نرخ کرنش  $0.01 s^{-1}$  را در دستگاه سننام نشان می‌دهد. در شکل (۴) نیز نتایج آزمون کشش نمونه‌های مختلف ارائه شده است. در نرخ کرنش بالا، نمونه‌ها از داخل فک‌ها سر خوردند.



شکل ۳) نمونه PVB در حین آزمایش کشش



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲) آماده‌سازی نمونه آزمایش فشاری (الف) دستگاه اتوکلاو (ب) نمونه اتوکلاو شده (ج) نمونه استوانه‌ای ساخته شده برای آزمون فشار از جنس PVB

مدت زمان این چرخه حدود ۴۰ دقیقه طول کشید. شکل (۲-ب) نمونه‌های آماده شده برای هر سه نوع پلیمر را نشان می‌دهد. سپس نمونه‌هایی به‌صورت استوانه به‌ترتیب، با قطر و طول ۱۵ و ۱۰ میلی‌متر ساخته شدند. شکل (۲-ج) یکی از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای آزمایش فشار، از هر جنس ۶ نمونه ساخته شد.

از آزمون DMA نیز برای بررسی رفتار ماده استفاده شد. طبق این آزمون، نمونه‌ها به‌شکل مستطیل با ابعاد  $4/2 \times 7/5$  میلی‌متر و با ضخامت ورق‌های موجود آماده شدند. به‌طورکلی، تمام نمونه‌ها در دانشگاه بوعلی سینا همدان ساخته و آماده شدند.

#### ۲-۲- آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، به‌منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، از سه آزمون استفاده شد:

(الف) آزمون کشش شبه‌استاتیکی: این آزمون مطابق با استاندارد ASTM-D412 انجام شد. این آزمون‌ها از نرخ کرنش ۰/۰۱ تا  $0.25 s^{-1}$  انجام شده و برای اطمینان از صحت نتایج، در هر نرخ

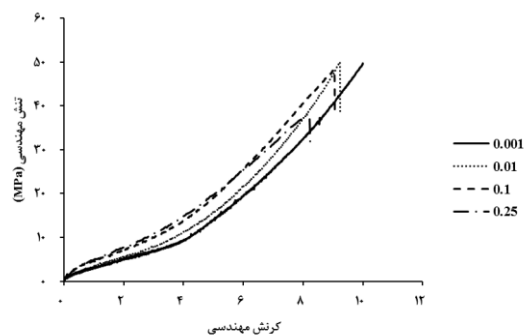
نشان دادند. این در حالی است که نمونه SG رفتاری الاستوپلاستیک از خود نشان داده است و تنش شکست در آن‌ها مشاهده شد. جدول (۱) مقدار عددی خواص کششی را نشان می‌دهد. برای محاسبه جذب انرژی، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها، مبنا قرار گرفته است. مطابق این جدول، بیشترین مقدار جذب انرژی در نرخ کرنش  $0.001 \text{ s}^{-1}$  مربوط به TPU بوده است. مقدار جذب انرژی TPU از PVB و SG به ترتیب، ۱۱۷۴ و ۲۹۸ درصد بیشتر بود. همچنین در این نرخ کرنش، مقدار تنش و کرنش شکست TPU از پلیمرهای دیگر بیشتر بوده و مقدار تنش و کرنش شکست برای PVB به ترتیب، ۲۱۶ و ۹۶/۱ درصد کمتر و برای SG به ترتیب، ۷۳/۳ و ۱۷۷/۷ درصد کمتر به دست آمد. شایان ذکر است که مبنای مقایسه کمیت‌ها در جدول (۱) مقدار خواص TPU در نرخ کرنش  $0.001 \text{ s}^{-1}$  بوده است. همچنین طبق شکل (۵)، نمونه‌های TPU و PVB پس از آزمایش تقریباً به اندازه اولیه خود بازگشتند ولی نمونه‌های SG وارد فاز پلاستیک شده و طول آن‌ها افزایش یافت.

### ۳-۲- آزمون فشار شبه‌استاتیکی

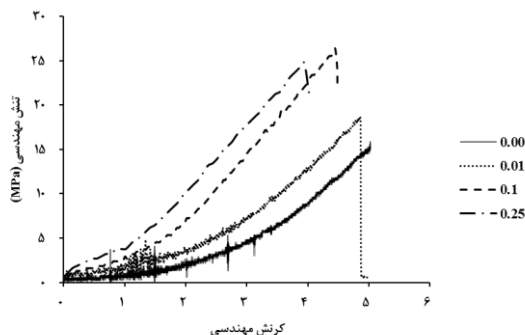
شکل (۶) نتایج آزمون فشار و جدول (۲) مقدار عددی نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۶)، در نمودارهای مربوط به TPU و PVB همانند آزمون کشش، نقطه تسلیم مشاهده نشده و رفتاری کاملاً الاستیک مشاهده شد ولی در نمودارهای SG، نقطه تسلیم مشاهده شد و ماده از فاز الاستیک وارد فاز پلاستیک شده است. این ماده رفتاری الاستوپلاستیک از خود نشان داد. مطابق شکل (۶)، در نرخ کرنش  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ، مقدار تنش شکست SG از پلیمرهای دیگر بیشتر بوده ولی در نرخ کرنش  $0.083 \text{ s}^{-1}$  مقدار تنش شکست TPU از پلیمرهای دیگر بیشتر به دست آمد. مطابق جدول (۲) در نرخ کرنش  $0.001 \text{ s}^{-1}$  مقدار جذب انرژی TPU از PVB و SG به ترتیب ۹/۷ و ۸۴/۱ درصد کمتر می‌باشد. این در حالی است که در نرخ کرنش  $0.083 \text{ s}^{-1}$  مقدار جذب انرژی TPU از PVB و SG به ترتیب ۱۳/۷ و ۲۴/۱ درصد بیشتر است. جدول (۳) تغییر شکل نمونه‌ها را پس از آزمایش فشار نشان می‌دهد. در نرخ کرنش  $0.083 \text{ s}^{-1}$ ، بیشترین مقدار تنش شکست در بین ۳ نمونه پلیمر مربوط به TPU با ۱۰۳ مگاپاسکال بوده و پس از آن PVB و SG به ترتیب با ۶۵/۲ و ۴۱/۴ مگاپاسکال قرار دارند. رفتار مکانیکی SG در دو نوع نرخ کرنش مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار تنش بیشینه در نرخ کرنش  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ، ۶۳/۱ مگاپاسکال محاسبه شد این در حالی است که با افزایش نرخ کرنش به  $0.083 \text{ s}^{-1}$ ، مقدار تنش بیشینه کاهش یافته و مقدار آن به ۴۱/۴ مگاپاسکال رسید.

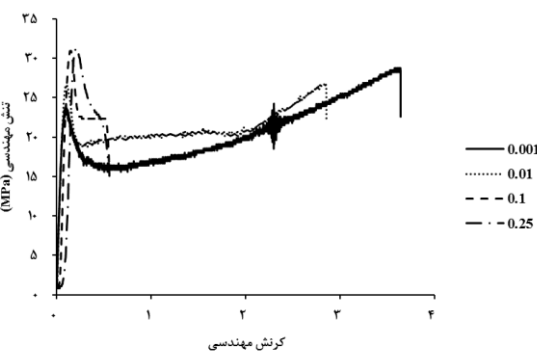
نتایج آزمون فشار نشان داد که نمونه TPU در مقابل بار فشاری رفتار الاستیک از خود نشان داده و در مقابل بارگذاری فشاری دچار کمترین تغییر شکل شده است. نمونه PVB پس از آزمون تقریباً به شکل اولیه خود بازگشته ولی دچار تخریب شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

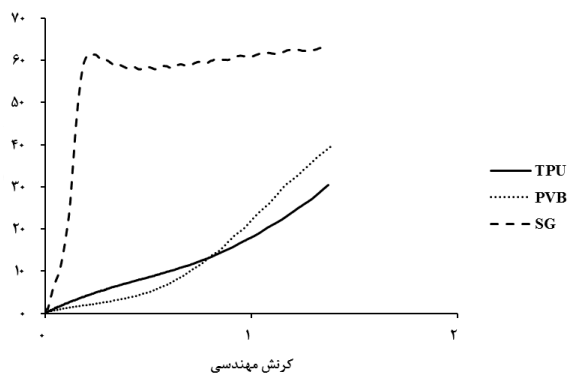
شکل ۴) نمودار تنش-کرنش کششی نمونه‌ها در نرخ کرنش‌های مختلف (الف) TPU (ب) PVB (پ) SG

به همین جهت، جهت جلوگیری از سر خوردن نمونه‌ها از یک تب از جنس آلومینیم استفاده شد.

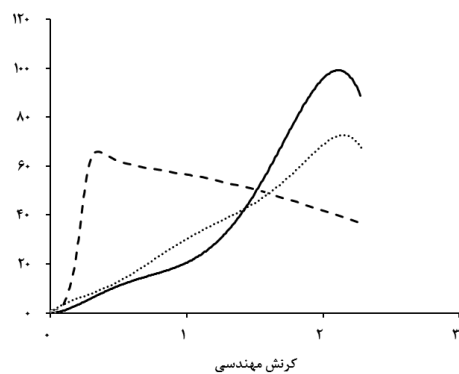
مطابق شکل (۴)، رفتار نمونه TPU به نرخ کرنش وابستگی کمی داشته است. نمونه PVB به نرخ کرنش حساسیت بیشتری داشته و با افزایش نرخ کرنش، مقدار تنش و کرنش نهایی به ترتیب افزایش و کاهش یافت. همچنین نمونه SG، به شدت به نرخ کرنش حساس بوده است. این نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، مقدار تنش شکست نمونه‌ها افزایش ولی مقدار کرنش شکست آن‌ها کاهش یافت. در این نمودارها، نقطه تسلیم مشخصی دیده نشده و فقط نقطه شکست قابل مشاهده است. مطابق این نمودارها، TPU و PVB رفتاری کاملاً الاستیک از خود

جدول ۱) مقایسه خواص کششی پلیمرهای مورد بررسی

جنس پلیمر	نرخ کرنش ( $s^{-1}$ )	تنش شکست		کرنش شکست		جذب انرژی	
		مقدار (MPa)	اختلاف (%)	مقدار (%)	اختلاف (%)	مقدار (kJ)	اختلاف (%)
TPU	۰/۰۰۱	۴۹/۴	-	۱۰۰۰	-	۴۴/۶	-
	۰/۰۱	۴۹/۸	۰/۸	۹۲۰	-۸/۶۹	۴۲/۱	-۵/۹
	۰/۱	۴۸/۵	-۱/۸	۹۱۰	-۹/۸۹	۴۴/۴	-۰/۰۴۵
PVB	۰/۲۵	۴۰/۵	-۲۳/۴	۸۲۰	-۲۱/۹	۳۶/۲	-۲۴/۷
	۰/۰۰۱	۱۵/۶	-۲۱۶	۵۱۰	-۹۶/۱	۳/۵	-۱۱۷۴
	۰/۰۱	۱۸/۳	-۱۷۰	۴۸۰	-۱۰۸/۳	۴/۸	-۸۲۹
SG	۰/۱	۲۶/۱	-۸۹/۲	۴۴۰	-۱۲۷	۷/۱	-۵۲۸
	۰/۲۵	۲۴/۷	-۱۰۰	۳۹۰	-۱۵۶/۴	۶/۵	-۵۸۶
	۰/۰۰۱	۲۸/۵	-۷۳/۳	۳۶۰	-۱۷۷/۷	۱۱/۲	-۲۹۸
SG	۰/۰۱	۲۶/۳	-۸۷/۸	۲۸۰	-۲۵۷	۹/۱	-۳۹۰
	۰/۱	۲۰/۹	-۱۳۶/۳	۵۳	-۱۷۸۶	۱/۸	-۲۳۷۷
	۰/۲۵	۲۱/۵	-۱۲۹/۷	۵۲	-۱۸۲۳	۱/۶	-۲۶۸۷

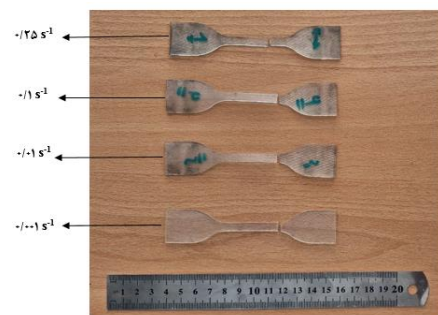


(الف)

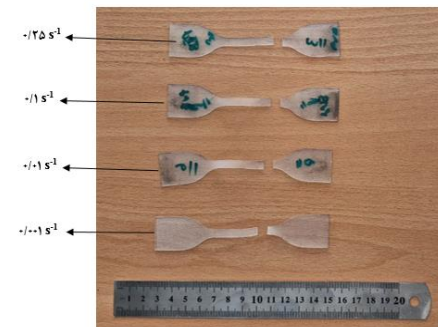


(ب)

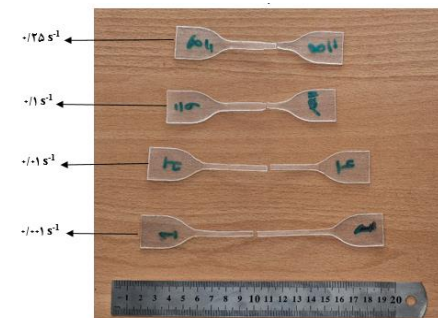
شکل ۶) نمودار تنش-کرنش فشاری سه نوع پلیمر در نرخ کرنش‌های مختلف الف)  $0.01 s^{-1}$  ب)  $0.1 s^{-1}$  ج)  $1.83 s^{-1}$



(الف)



(ب)



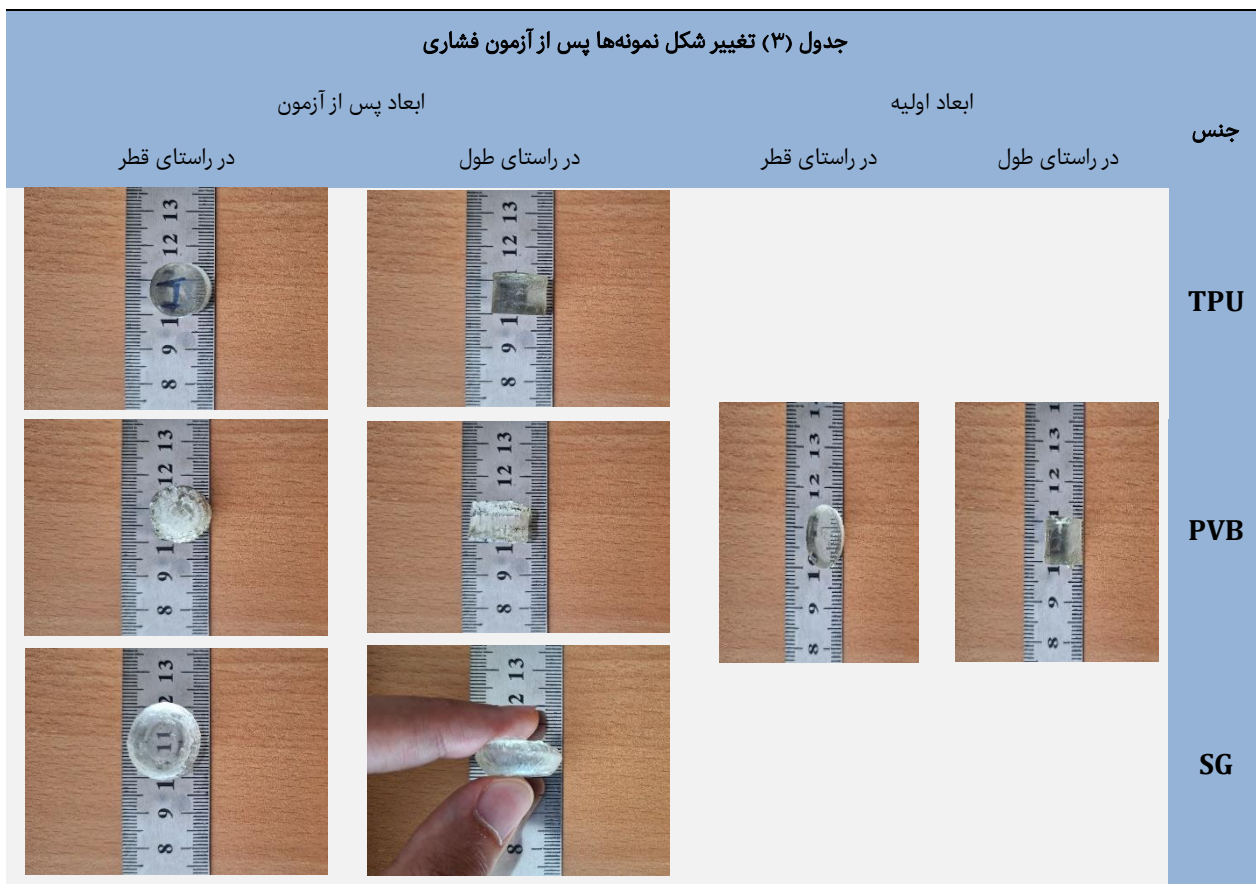
(پ)

شکل ۵) نحوه شکست نمونه‌ها در نرخ کرنش‌های مختلف در آزمایش کشش الف) TPU ب) PVB ج) SG

جدول ۲) مقایسه خواص فشاری پلیمرهای مورد بررسی

جذب انرژی		تنش		جنس	نرخ کرنش (s <sup>-1</sup> )
اختلاف (%)	مقدار (kJ)	اختلاف (%)	مقدار (MPa)		
-	۱۳/۹	۱۳۵	۳۰/۵	TPU	۰/۰۱
۹/۷	۱۵/۴	۱۳۵	۳۹/۶	PVB	
۸۴/۱	۸۷/۳	۱۳۵	۶۳/۱	SG	
-	۷۳/۶	۲۲۰	۱۰۳	TPU	۰/۸۳
-۱۳/۷	۶۴/۷	۲۲۰	۶۵/۲	PVB	
-۲۴/۱	۵۹/۳	۲۲۰	۴۱/۴	SG	

جدول ۳) تغییر شکل نمونه‌ها پس از آزمون فشاری



فرکانس ۱ هرتز قرار گرفته و تغییرات مدول ذخیره‌ای (Storage modulus)، مدول اتلافی (Loss modulus) و فاکتور اتلاف (Tan δ) که نسبت مدول اتلافی به مدول ذخیره است، بر حسب دما اندازه‌گیری شدند.

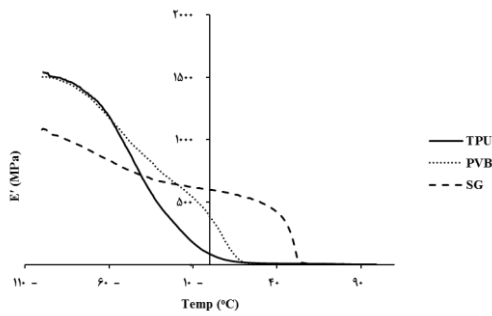
رابطه (۱) این نسبت را نشان می‌دهد.

$$\tan \delta = \frac{\text{Loss modulus}}{\text{Storage modulus}} = \frac{E''}{E'} \quad (1)$$

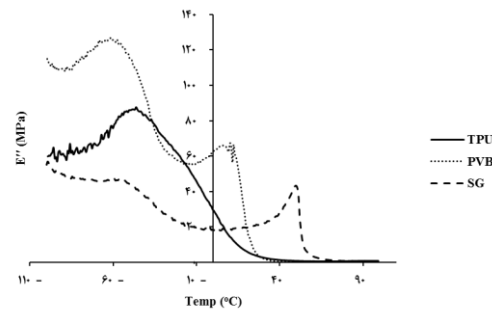
نمونه SG نیز پس از آزمون، به شدت دچار تغییر شکل و تخریب شده است به طوری که قطر آن از ۱۵ میلی‌متر به حدود ۲۱ میلی‌متر و طول آن از ۱۰ میلی‌متر به کمتر از ۵ میلی‌متر رسیده است.

### ۳-۳- آزمون حرارتی دینامیکی مکانیکی

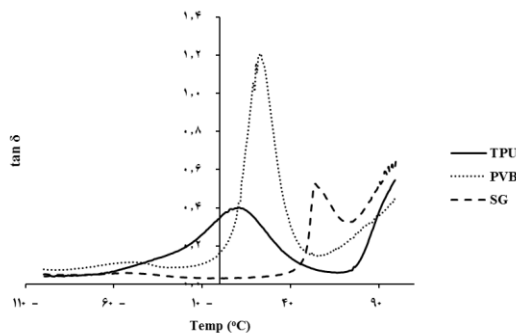
شکل (۷) دستگاه آزمایش حرارتی دینامیکی مکانیکی را نشان می‌دهد. مدول ماده و میزان اتلاف انرژی مواد پلیمری که ناشی از ویژگی ویسکوالاستیک آنهاست، در این آزمون مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این آزمایش، نمونه‌ها تحت تنش‌های دوره‌ای با



(الف)



(ب)



(پ)

**شکل ۸** نتایج آزمون دینامیکی مکانیکی فرکانس ثابت (الف) مدول ذخیره (ب) مدول اتلافی (پ) فاکتور اتلاف

دمای شیشه‌ای شدن برای TPU حدود ۶۰- درجه سانتی‌گراد و مدول ذخیره حدود ۱/۲ گیگاپاسکال محاسبه شدند. دمای شیشه‌ای شدن برای PVB و SG به ترتیب، حدود ۱۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و مدول ذخیره به ترتیب ۴۰۰ و ۴۸۰ مگاپاسکال به دست آمد. TPU دارای کمترین مقدار دمای انتقال شیشه‌ای و پس از آن PVB و SG بالاترین مقدار منطقه دمای انتقال را داشتند. همچنین، PVB دارای بیشترین مقدار فاکتور اتلاف در بین سه نوع ماده بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از آزمایش‌های کشش و فشار شبه‌استاتیکی و نیز آزمون DMA رفتار مکانیکی میان‌لایه‌های پلیمری PVB، TPU و SG که در ساخت شیشه‌های چندلایه



(الف)



(ب)

**شکل ۷** آزمون DMA (الف) دستگاه آزمایش (ب) نصب نمونه بر روی دستگاه

مناطق انتقال شیشه‌ای را می‌توان در نمودارهای مدول ذخیره، مدول اتلاف و فاکتور اتلاف برای این سه نوع پلیمر مشاهده کرد. اگر چه روش منحصر به فردی برای تعیین دمای انتقال شیشه‌ای وجود ندارد [30]، ولی می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف، با استفاده از نمودارهای مدول ذخیره، مدول اتلاف و فاکتور اتلاف مقدار این دما را با مقداری اختلاف محاسبه کرد. طبق استاندارد ASTM-D3418-97 که برای محاسبه دمای شیشه‌ای شدن مواد پلیمری استفاده می‌شود [31-32]، میزان حداکثر مدول اتلاف که با تجزیه و تحلیل دمایی محاسبه می‌شود به عنوان دمای شیشه‌ای شدن معرفی می‌گردد.

مطابق این تعریف، بیشترین مقدار مدول اتلاف برای TPU، PVB و SG به ترتیب حدود ۸۵، ۶۲ و ۵۰ مگاپاسکال به دست آمدند که مطابق آن، دمای شیشه‌ای شدن هر کدام از نمونه‌ها به ترتیب حدود ۵۲-، ۱۱ و ۴۹ درجه سانتی‌گراد محاسبه شدند. همچنین، با استفاده از نمودار مدول ذخیره نیز می‌توان دمای شیشه‌ای شدن را محاسبه نمود.



- birdstrike windshield application. *Composite Structures*. 2013 Feb 1;96:616-30.
- 2- Kholoosi F, Alavi Nia A. Investigating the effect of TPU and SG interlayer on windshield resistance against bird strike. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023 Aug;45(8):424.
- 3- Zhou J, Liu J, Zhang X, Yan Y, Jiang L, Mohagheghian I, Dear JP, Charalambides MN. Experimental and numerical investigation of high velocity soft impact loading on aircraft materials. *Aerospace Science and Technology*. 2019 Jul 1;90:44-58.
- 4- Heimbs S. Computational methods for bird strike simulations: A review. *Computers & Structures*. 2011 Dec 1;89(23-24):2093-112.
- 5- Strassburger E, Bauer S, Popko G. Damage visualization and deformation measurement in glass laminates during projectile penetration. *Defence Technology*. 2014 Jun 1;10(2):226-38.
- 6- Osnes K, Holmen JK, Grue T, Børvik T. Perforation of laminated glass: an experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*. 2021 Oct 1;156:103922.
- 7- Shakirzyanova VV, Selivanov VV, Silnikov MV, Malishchuk TS. Behavior of multilayer transparent spacecraft elements during high-speed collision with compact impactors. *Acta Astronautica*. 2021 Mar 1;180:119-24.
- 8- Liu B, Xu X, Wang Y, Sun Y, Li Y. Energy absorption mechanism of polyvinyl butyral laminated windshield subjected to head impact: Experiment and numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2016 Apr 1;90:26-36.
- 9- Xu X, Wang D, Zang M, Chen S. Development of an intrinsic solid-shell cohesive zone model for impact fracture of windshield laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*. 2022 May 1;163:104187.
- 10- Gao W, Zhao G, He X, Chen S, Wang C. A high-fidelity numerical approach for dummy head-windshield contact interactions. *International Journal of Impact Engineering*. 2023 Apr 1;176:104560.
- 11- Belis J, Depauw J, Callewaert D, Delincé D, Van Impe R. Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature. *Engineering Failure Analysis*. 2009 Sep 1;16(6):1866-75.
- 12- Xu J, Li Y, Liu B, Zhu M, Ge D. Experimental study on mechanical behavior of PVB laminated glass under quasi-static and dynamic loadings. *Composites Part B: Engineering*. 2011 Mar 1;42(2):302-8.
- 13- Liu B, Sun Y, Li Y, Wang Y, Ge D, Xu J. Systematic experimental study on mechanical behavior of PVB (polyvinyl butyral) material under various loading conditions. *Polymer Engineering & Science*. 2012 May;52(5):1137-47.
- 14- Serafinavicius T, Kvedaras AK, Sauciuvenas G. Bending behavior of structural glass laminated with different interlayers. *Mechanics of composite materials*. 2013 Sep;49:437-46.
- 15- ASHENAI GF, ESLAMI FM. Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on dynamic mechanical properties of Polypropylene. *Modares Mechanical Engineering*. 2013; 13(6):1-10.

استفاده می‌شوند بررسی شد. مهم‌ترین نتایج آزمون‌ها به صورت ذیل می‌باشند:

- ۱- نمودار تنش-کرنش میان‌لایه‌های SG، PVB و TPU مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین مقدار تنش نهایی مربوط به TPU بود. مقدار تنش و کرنش شکست TPU در نرخ کرنش  $s^{-1}$  ۰/۰۰۱، به ترتیب ۴۹/۴ مگاپاسکال و ۱۰۰۰ درصد بود این در حالی است که برای PVB مقدار تنش و کرنش شکست به ترتیب ۲۱۶ و ۹۶/۱ درصد کمتر و همچنین برای SG به ترتیب ۷۳/۳ و ۱۷۷/۷ درصد کمتر به دست آمدند.
- ۲- در آزمایش کشش در نرخ‌های کرنش یکسان، مقدار جذب انرژی TPU از پلیمرهای دیگر بیشتر به دست آمد. در نرخ کرنش  $s^{-1}$  ۰/۰۰۱ مقدار جذب انرژی TPU از PVB و SG به ترتیب ۱۱۷۴ و ۲۹۸ درصد بیشتر بود.
- ۳- آزمون فشار نشان داد که TPU نسبت به PVB و SG دارای تنش نهایی بیشتری است. در نرخ کرنش  $s^{-1}$  ۰/۸۳، تنش فشاری نهایی TPU، حدود ۱۰۳ مگاپاسکال به دست آمد این در حالی است که برای نمونه‌های PVB و SG این مقادیر به ترتیب ۵۷/۹ و ۱۴۸/۸ درصد کمتر بودند.
- ۴- مقدار جذب انرژی در آزمایش فشار نیز بررسی شد. در نرخ کرنش ۰/۸۳، این مقدار برای TPU برابر ۷۳/۶ کیلو ژول به دست آمد در حالی که برای PVB و SG این مقدار به ترتیب ۱۳/۷ و ۲۴/۱ درصد کمتر محاسبه شدند.
- ۵- مطابق نتایج آزمون DMA، پلیمر TPU دارای کمترین مقدار و SG دارای بیشترین مقدار دمای شیشه‌ای شدن بود. همچنین مقدار فاکتور اتلاف PVB از نمونه‌های دیگر بیشتر بود.

**تقدیر و تشکر:** بدین وسیله نویسندگان این مقاله از زحمات جناب آقای دکتر سید علی‌رضا ثابت، دانشیار پژوهشکده پلیمر و پتروشیمی ایران، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌نمایند.

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

**تعارض منافع:** این مقاله هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

**منابع مالی:** هزینه‌های این پژوهش از بودجه شخصی و پژوهانه دانشگاه تامین شده است.

## منابع

- 1- Grimaldi A, Sollo A, Guida M, Marulo F. Parametric study of a SPH high velocity impact analysis-a

- 30- TA Orchestrator User Manual (v7.2.0.4), TA Instruments – Waters LLC, New Castle, 2008.
- 31- ASTM D3418-15- Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.
- 32- Galuppi L, Royer-Carfagni GF. Effective thickness of laminated glass beams: New expression via a variational approach. *Engineering Structures*. 2012 May 1;38:53-67.
- 16- Liu B, Xu J, Li Y. Constitutive investigation on viscoelasticity of polyvinyl butyral: experiments based on dynamic mechanical analysis method. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014 Jan 1;2014.
- 17- Zhang X, Hao H, Shi Y, Cui J. The mechanical properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at high strain rates. *Construction and building materials*. 2015 Sep 15;93:404-15.
- 18- Zhang X, Shi Y, Hao H, Cui J. The mechanical properties of ionoplast interlayer material at high strain rates. *Materials & Design*. 2015 Oct 15;83:387-99.
- 19- Xu X, Liu B, Wang Y, Li Y. Research on temperature and strain rate dependent viscoelastic response of polyvinyl butyral film. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 2016 Aug 1;9(3):788-93.
- 20- Fan JT, Weerheijm J, Sluys LJ. Compressive response of a glass-polymer system at various strain rates. *Mechanics of Materials*. 2016 Apr 1;95:49-59.
- 21- Ghajar MH, Mosavi M, Ghattan Kashani H. Molecular Dynamics Study of Mechanical Properties of Polyvinylidene Fluoride Polymer by Tensile Test and Dynamic Mechanical Analysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Apr 10;18(2):95-102.
- 22- Fan J, Wang C. Dynamic compressive response of a developed polymer composite at different strain rates. *Composites Part B: Engineering*. 2018 Nov 1;152:96-101.
- 23- Liu W, Shi Y, Hao H, Zhang X. Numerical analysis of dynamic responses of laminated glass window subjected to gas explosions. *Engineering Structures*. 2021 Jul 1;238:112243.
- 24- Sarkhosh R, Zarei H. Design, Manufacturing and mechanical and electrical properties evaluation of glass fiber reinforced PTFE polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2021 Jan 10;21(2):117-27.
- 25- Sarkhosh R, Arabqomi H, Farrokhbadi A. Design, manufacturing, and evaluation of mechanical and electrical properties of biodegradable epoxy/hemp composite produced by VARTM method. *Journal of Aeronautical Engineering*. 2022 Apr 21;24(1):70-82.
- 26- Knight JT, El-Sisi AA, Elbelbisi AH, Newberry M, Salim HA. Mechanical Behavior of Laminated Glass Polymer Interlayer Subjected to Environmental Effects. *Polymers*. 2022 Nov 24;14(23):5113.
- 27- Galić J, Stepinac L, Bošnjak A, Zovko I. Influence of PVB Interlayer Mechanical Properties on Laminated Glass Elements Design in Dependence of Real Time-Temperature Changes. *Polymers*. 2022 Oct 18;14(20):4402.
- 28- Ding W, Zhan S, Liu H, Bo Y, Sun Z, Wang S, Zhang M. Preparation of laminated safety glass based on high strength polyurethane film by solution annealing. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023 Jan 10;140(2):e53279.
- 29- ASTM-D412- Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension.