



# Calibration of Constitutive Models for Pressure-Sensitive Adhesives Based on Experimental Data

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Haddadi E.<sup>1\*</sup>,  
Eshaghi Oskui A.<sup>2</sup>,

### How to cite this article

Haddadi E, Eshaghi Oskui A, Calibration of Constitutive Models for Pressure-Sensitive Adhesives Based on Experimental Data. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(05):329-339.

## ABSTRACT

Linear viscoelastic constitutive laws, such as hyperelasticity with the Prony series, are commonly used in commercial software to simulate polymer materials. However, these models are not accurate regarding large strain problems despite performing well for small strain problems. To gather experimental data for soft adhesives, various shear modes were employed, including monotonic, creep, and low-cycle tests using single-lap shear specimens. These tests were conducted on optically clear adhesives (OCAs). Initially, the validity range for linear viscoelasticity was established, revealing the inability to predict large strains accurately using this approach. Subsequently, the three-network viscoplastic (TNV) model parameters were calibrated experimentally under large strains. The calibration procedures took advantage of variations in loading modes, enhancing the precision and improving the accuracy of the constitutive models. For calibration purposes, it is recommended to utilize the low-cycle loading-unloading test as it offers a suitable and cost-effective means of precision. This approach provides a cost-effective way to accurately predict material behavior, owing to the variations in loading modes. Finally, the characteristic model was used to evaluate the results through the finite element method. The results showed that the proposed model accurately predicts stress values, energy dissipation, and energy loss due to softening.

**Keywords** Calibration, Nonlinear Viscoelasticity, Cyclic Loading, Optically Clear Adhesive

## CITATION LINKS

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanics and Aerospace Engineering, College of Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ehadadi@tvu.ac.ir

### Article History

Received: July 17, 2024

Accepted: August 18, 2024

ePublished: August 28, 2024

1- What is a display? An introduction to .... 2- Characterization of an acrylic pressure-sensitive adhesive blended with .... 3- Characterization of an acrylic polymer under hygrothermal aging as .... 4- Mechanical simulation of foldable AMOLED panel with .... 5- Multiple neutral axes in bending of .... 6- Foldable-display systems as .... 7- A novel flexible capacitive touch pad based on .... 8- The effects of compressive stress on .... 9- Failure mechanism of .... 10- Modeling the effect of rate and geometry on .... 11- Predictive mechanistic model for .... 12- Effect of temperature and humidity on .... 13- Modeling the Mechanical Performance of a .... 14- Modeling of hyperelastic behavior of .... 15- Optimization Of Hyperelastic Model Parameters Of Soft Tissue Based On Genetic Algorithm Utilizing Experimental Mechanical Datas. 16- Developments in pressure-sensitive adhesives: A review. 17- A new viscoplastic model and experimental characterization for .... 18- Handbook of materials behavior models, three-volume set: .... 19- Biomechanical behaviors and visco-hyperelastic mechanical properties of .... 20- Investigation of mode-I fracture behavior by .... 21- Efficiency of hyperelastic models for .... 22- ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14 documentation. 23- Zastosowanie hipersprężystości i MES w modelowaniu mostowych łożysk elastomerowych. 24- Some forms of the strain energy function for rubber. 25- On the finite element implementation of .... 26- Modeling the mechanical performance of .... 27- MCalibration and PolymerFEM User Manual. 28- Apparent Shear Strength of Single-Lap Joint Adhesively Bonded Metal Specimens. 29- Analysis and design of structural bonded joints. 30- Investigation of the mechanical properties of .... 31- Mechanics of solid polymers: theory and computational modeling. 32- Determining rheological properties of cereal products using .... 33- The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 34- Nonlinear ligament viscoelasticity. 35- Modeling the viscoelasticity of .... 36- Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction. 37- ISO 6721-10. 38- Viscoelastic characterization of .... 39- A visco-hyperelastic model with Mullins effect for .... 40- Statistical Inference.

## کالیبراسیون مدل‌های رفتاری برای چسب‌های حساس به فشار بر اساس داده‌های تجربی

الیاس حدادی<sup>۱\*</sup>، ابوذر اسحقی اسکویی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، استان تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت جنوب، شزن، چین.

### چکیده

قوانین رفتاری ویسکوالاستیک خطی، مانند هایپرالاستیسیت با سری‌های پرونی به طور گسترده در نرم‌افزارهای تجاری برای شبیه‌سازی مواد پلیمری به کار گرفته می‌شوند. اگرچه این مدل‌ها، ممکن است برای مسائل کرنش کوچک عملکرد خوبی داشته باشند، اما در مورد مسائل کرنش بزرگ مانند چسب‌های تهیه شده از مواد نرم، دقت کافی را ندارند. به منظور به دست آوردن داده‌های تجربی برای چسب‌های نرم، از حالت‌های مختلف بارگذاری برشی مانند بارگذاری یکنواخت، خزش و آزمایش‌های سیکلی کم‌چرخه با استفاده از نمونه برش تک-لیه استفاده شد. این آزمایش‌ها، روی یک نوع چسب‌های شفاف نوری انجام شد. در ابتدا، محدوده اعتبار ویسکوالاستیک خطی تعیین شد که عدم توانایی این رویکرد در پیش‌بینی دقیق کرنش‌های بزرگ را آشکار ساخت. سپس، پارامترهای مدل سه شبکه‌ای ویسکوپلاستیک تحت کرنش‌های بزرگ کالیبره و به صورت تجربی انجام گرفت. رویه‌های کالیبراسیون از تغییرات در حالت‌های بارگذاری بهره بردند و بدین ترتیب دقت مدل‌های رفتاری را افزایش دادند. برای کالیبراسیون، آزمایش بارگذاری-باربرداری کم‌چرخه به دلیل فراهم سازی حجم زیادی از اطلاعات، به عنوان روشی مناسب و مقرون به صرفه برای پیش‌بینی دقیق رفتار ماده توصیه می‌شود. در نهایت، توانایی مدل اساسی مستخرج، با استفاده از یک بارگذاری چرخه‌ای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی مقادیر تنش، اتلاف انرژی و کاهش انرژی ناشی از نرم شدن را به طور دقیق پیش‌بینی می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** کالیبراسیون، ویسکوالاستیسیت غیرخطی، بارگذاری چرخه‌ای، چسب شفاف نوری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

\*نویسنده مسئول: ehadadi@tvu.ac.ir

### ۱- مقدمه

چسب شفاف نوری (Optically Clear Adhesives)، نمونه‌ای از الاستومرهای تقریباً غیرقابل تراکم (Incompressible)، نرم و شفاف است که کاربرد گسترده‌ای در نمایشگرهای تاشونده (Foldable Displays)، مانند نمایشگرهای دیود نوررسان ارگانیک (Organic Light-emitting Diode) (OLED) و نمایشگرهای دیود نوررسان ارگانیک با ماتریس فعال (Active-matrix Organic Light-emitting Diode) (AMOLED) دارد<sup>[1]</sup>. علت محبوبیت چسب‌های شفاف نوری را می‌توان به مزایای ویژه آنها نسبت داد که شامل شفافیت بسیار بالا، عدم ایجاد حباب و اعوجاج است که به طور قابل توجهی می‌تواند رزولوشن تصویر را بهبود بخشد. علاوه بر ویژگی‌های نوری منحصر به فرد آنها، کاربرد چسب‌های شفاف نوری می‌تواند مزایای مکانیکی قابل توجهی را ارائه دهد.

چسبندگی سریع و قوی، عدم نیاز به خشک شدن، ضخامت کم و افزایش استحکام صفحه نمایش از دیگر مزایای چسب‌های شفاف نوری می‌باشد<sup>[2,3]</sup>. کاهش سطح تنش در لایه‌های مختلف صفحه نمایش در هنگام خم شدن، می‌تواند طول عمر آنها را افزایش دهد. استفاده از چسب‌های شفاف نوری با مدول یانگ بسیار پایین‌تر (~ کیلوپاسکال) بین لایه‌های با مدول یانگ بالا (~ گیگاپاسکال) می‌تواند توزیع مجدد تنش را انجام دهد. در چنین مواردی، چندین لایه خنثی در طول ضخامت تشکیل می‌شود که می‌تواند به طور قابل توجهی حداکثر تنش و کرنش را کاهش دهد<sup>[4,5]</sup>. امروزه از چسب‌های شفاف نوری در لایه‌های منعطف AMOLED، برای تشکیل یک ساختار مرکب در بخش پشتی فیلم‌های AMOLED و پلاریزرها استفاده می‌شود<sup>[6,7]</sup>. با توجه به افزایش تقاضا برای نمایشگرهای OLED تاشو و کاربرد گسترده آنها، این نمایشگرها نیازمند شناسایی تمامی اجزای آنها از جمله شناسایی کامل مواد چسب شفاف نوری است. در مطالعه‌ای توسط ژو و پارک (Zhou and Park)، تأثیر بار فشاری بر عملکرد OLEDها مورد بررسی قرار گرفت. آنها از کاهش دائمی عملکرد مواد پس از عبور از حد خاصی از بار فشاری گزارش دادند<sup>[8]</sup>. همچنین مکانیزم‌های خرابی در OLED در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت<sup>[9]</sup>. نتایج نشان داد که حالت‌های خرابی شامل تشکیل عیوب انفجاری متمرکز و ورقه-شدن حلقه‌ای فیلم کاتد بود. در تحقیقات زیادی به جدایش اتصالات چسب‌های حساس به فشار پرداخته شده است<sup>[10,11]</sup>. همچنین اخیراً در تحقیقات ارزشمندی به استخراج معادلات اساسی برخی چسب‌های حساس به فشار پرداخته شده است<sup>[12,13]</sup>. تقریباً در تمامی موارد از تئوری ویسکوالاستیسیت خطی استفاده شده است، این در حالی است که یکی از ویژگی‌های بارز این مواد، توانایی تجربه مقادیر کرنش بزرگ می‌باشد که تحت آن شرایط، از قوانین ویسکوالاستیسیت غیرخطی پیروی می‌کند، نکته‌ای که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق به دنبال بررسی تأثیر شرایط بارگذاری و مدل‌های رفتاری بر پیش-بینی دقیق خواص هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک مواد است. فعالیت‌های اصلی این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- انجام آزمایش‌های تجربی در حالت‌های بارگذاری مختلف برای شناسایی رفتار چسب شفاف نوری تحت شرایط بارگذاری متفاوت برای اولین بار
- ۲- کالیبراسیون ماده مورد بررسی با استفاده از مدل‌های رفتاری (Constitutive Models) مختلف و داده‌های تجربی با در نظر گرفتن ویسکوالاستیسیت غیرخطی برای اولین بار
- ۳- ارزیابی توانایی مدل‌های مختلف در پیش‌بینی رفتار ماده به صورت تجربی
- ۴- بررسی صحت پاسخ ماده که توسط هر معادله رفتاری قابل ارائه است.

هنگامی که  $C_1$  از مرتبه ۱ باشد،  $C_2, 0$  (1) از  $0$  (0.1) تا  $0$  (0.01) خواهد بود و  $C_3$  نیز از مرتبه  $0$  (0.001) یا  $0$  (0.0001) خواهد بود. توجه داشته باشید که  $C_1$  معرف مدول برشی در کرنش‌های کوچک است. در کرنش‌های متوسط، به دلیل تأثیر  $C_2$  ماده تا حدودی نرم می‌شود و در نهایت به دلیل  $C_3$  در مقادیر کرنش بزرگ، قوی‌تر می‌شود. منحنی‌های تنش-کرنش مواد نرم با استفاده از مقادیر ذکر شده، به شکل S خواهند داشت. این ویژگی مدل یئو است که می‌تواند طیف وسیعی از کرنش‌ها را پوشش دهد [4,26].

### ۳- ویسکوالاستیسیته

در مدل‌سازی چسب شفاف نوری، هاپیرالاستیسیته مزایای متعددی از جمله محاسبات آسان را ارائه می‌دهد. با این حال، محدودیت‌هایی مانند عدم تأثیر نرخ بارگذاری (وابستگی به زمان) و ویسکوالاستیسیته دارد. برای رفع این ضعف، به طور معمول از یک مدل ویسکوالاستیسیته همراه با یک مدل هاپیرالاستیسیته استفاده می‌شود. ویسکوالاستیسیته خطی برای اکثر الاستومرها و مواد مشابه، راه‌حل‌های رضایت‌بخشی ارائه می‌کند. یک مدل ماکسول تعمیم‌یافته مبتنی بر سری پرونی (Prony Series) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$G(\tau) = G_0(g_\infty + \sum_{i=1}^{N_G} g_i e^{-\frac{\tau}{\tau_i^G}})' K(\tau) \quad (4)$$

$$= K_0 \left( k_\infty + \sum_{i=1}^{N_K} k_i e^{-\frac{\tau}{\tau_i^K}} \right)$$

در این رابطه،  $g_\infty$  و  $k_\infty$  به ترتیب نشان دهنده مدول برشی و مدول حجمی بلند مدت هستند. پارامترهای سری پرونی را می‌توان با آزمایش‌های ریلکسیشن تنش یا آزمایش‌های نوسانی تعیین کرد. دقت تئوری ویسکوالاستیسیته خطی به شدت به رفتار کلی ماده، به ویژه محدوده تغییر شکل‌پذیری آن بستگی دارد. در برخی موارد، مانند این مطالعه خاص، مدل‌های خطی در به تصویر کشیدن دقیق خواص واقعی ویسکوالاستیکی که توسط پلیمرها نشان داده می‌شود، ناکافی هستند. در بخش‌های بعدی از تست برش نوسانی دینامیکی برای تعیین غیرخطی بودن رفتار ویسکوزیته ماده استفاده شده است. در این تحقیق مدل جریان توانی انتخاب شده است [27].

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{\tau}{f_p f_{ep} f_\theta \dot{\epsilon}} \right)^m \quad (5)$$

در رابطه فوق  $m$  بیانگر توان تنش،  $\dot{\epsilon}$  مقاومت جریان برشی شبکه و  $\tau$  تنش برشی اعمال شده می‌باشد. همچنین پارامترهای  $f_{ep}$ ،  $f_p$  و  $f_\theta$  به ترتیب تأثیر فشار، تسلیم ماده و دما را در نظر می‌گیرند که در این تحقیق موضوعیت ندارند. این معادله را می‌توان برای محاسبه گرادین سرعت جریان ویسکو پلاستیک شبکه A به کار برد:

### ۲- هاپیرالاستیسیته

چسب شفاف نوری، عمدتاً از پلیمرهای الاستومری با ساختارهای مولکولی زنجیره بلند تشکیل شده است. این زنجیره‌ها در هم تنیده و با هم بافته شده‌اند و امکان کشش، لغزش و حرکت بر روی یکدیگر را فراهم می‌کنند. قبل از بارگذاری، این زنجیره‌های مولکولی در یک پیکربندی پیچیده قرار دارند. پس از بارگذاری، این زنجیره‌ها کشیده شده و در جهت کرنش متمایل می‌شوند. پس از باربرداری، انرژی ذاتی این زنجیره‌های مولکولی منجر به پیچیده شدن مجدد آنها و بازبایی شکل اولیه آنها می‌شود [14-16].

برای تعیین رفتار ماده با بالاترین دقت، باید از ساده‌ترین مدل‌ها با کمترین ثوابت استفاده شود [17]. همچنین اشکال مختلفی از توابع انرژی کرنش استخراج شده که از میان آنها می‌توان به مواد همسانگرد، غیرقابل تراکم یا تقریباً غیرقابل تراکم اشاره کرد [18-20]. با این حال، تنها برخی از آنها می‌توانند به طور کامل رفتار مواد نرم را به ویژه تحت شرایط بارگذاری مختلف بیان کنند [21]. در صورت وجود همسانگردی و تجزیه سهم انرژی کرنش حجمی و انحرافی، معادله اساسی انرژی پتانسیل (معادله ۱) به شرح زیر است [22]:

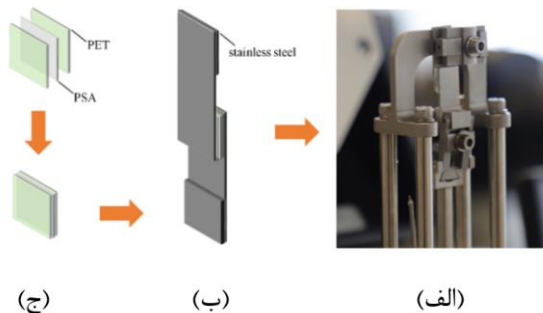
$$U = f(\bar{I}_1 - 3, \bar{I}_2 - 3) + g(J_{el} - 1) \quad (1)$$

در نتیجه، با قرار دادن  $g = \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$  و استفاده از بسط تیلور [23]:

$$U \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (2)$$

این عبارت برای انرژی کرنش هاپیرالاستیک چند جمله‌ای شناخته شده است. N در معادله فوق می‌تواند تا عدد شش باشد در حالی که  $C_{kl}$  و  $D_k$  پارامترهای ماده هستند. تراکم‌پذیری ماده توسط  $D_i$  تعیین می‌شود. در مورد چسب شفاف نوری مورد مطالعه در این تحقیق، اگر همه  $D_i$ ها صفر باشند، به این معنی است که ماده کاملاً غیرقابل تراکم است. حجم الاستیک با  $J_{el}$  نشان داده می‌شود. با جایگزینی صفر برای ضرایب مختلف، می‌توان اشکال مختلفی از مدل چند جمله‌ای به دست آورد. اگر  $n = 1$  باشد، فقط جملات خطی باقی می‌مانند و این مدل به عنوان مدل موون (Movon) شناخته می‌شود. هنگامی که وابستگی به نامتغیر دوم،  $I_2$ ، حذف شود و  $N=3$  باشد، به عنوان مدل یئو (Yeoh) شناخته می‌شود [24]. توابع انرژی پتانسیل، به طور کلی نسبت به نامتغیر دوم ( $I_2$ ) حساسیت کمتری نسبت به نامتغیر اول ( $I_1$ ) دارند. این فرض همچنین، پایداری مدل هاپیرالاستیک را بهبود می‌بخشد و اندازه‌گیری وابستگی به  $I_2$  چالش برانگیزتر است [25]. بنابراین، مدل یئو برای مواد غیرقابل تراکم، مدلی شناخته شده است.

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3)$$



شکل ۱) شماتیک نمونه آزمایشی (الف) سیستم آنالایزر مکانیکی دینامیکی، (ب) نمونه اتصال تکلبه و (ج) ساختار ساندویچی پلی اتیلن ترفتالات- چسب شفاف نوری- پلی اتیلن ترفتالات

مشکل آزمایش چسب شفاف نوری، در مقایسه با چسبهای حساس به فشار سنتی، مدول الاستیکی کوچک، ضخامت کم (۱۳۰ میکرومتر) و استحکام خمشی پایین آن است که تسهیل کننده تغییر شکل آن است. همزمان، وضعیت کرنش مواد ویسکوالاستیک با تاریخچه تنش آن مرتبط است. بنابراین، باید پیش تنش در مراحل بارگذاری و آماده سازی به حداقل برسد. بر این اساس، طرحهای آزمایشگاهی برای چسب شفاف نوری طراحی شد، تا دقت آزمایش تضمین شود. نمونههای اتصال چسبی تکلبه در آزمایشهای تجربی مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، نمونه اتصال چسبی تکلبه تحت بار کششی قرار دارد که یکی از ساده ترین روشها برای ایجاد بار برشی است و به عنوان یک نمونه آزمون استاندارد، برای مشخصه یابی مواد به ویژه چسبها در استانداردهای ASTM، BS، ES و ISO استفاده می شود [29].

#### ۲-۴- آزمایشهای تجربی

توسعه یک مدل ماده مناسب که قادر به پیش بینی رفتار پیشرفته مواد تحت شرایط بارگذاری مختلف باشد، نیازمند آزمایشهای تجربی متنوع برای تعیین رفتار ماده در شرایط بارگذاری متفاوت است [30,31]. بدیهی است که تعداد زیاد آزمایشهای تجربی در مرحله کالیبراسیون قابل استفاده نیست و بنابراین استفاده هوشمندانه از حداقل آزمایشهای تجربی برای به دست آوردن حداکثر داده ضروری است. در این راستا، آزمایشهای مختلفی تحت شرایط بارگذاری مختلف، به صورت کنترل نرخ کرنش، کنترل کرنش، کنترل تنش و ترکیبی از آنها انجام شد.

در حین تستهای برش یکنواخت و خزش، به ترتیب سرعتهای کرنش و سطوح تنش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این کار، پوشش شرایطی مشابه با محدوده واقعی کاربردهای چسب شفاف نوری در تلفنهای همراه بود. همچنین برای دستیابی به حداکثر داده ممکن در مورد رفتار ماده با حداقل تعداد آزمایش، طیف وسیعی از آزمایشهای چرخه ای انجام شد. همه آزمایشها

$$\dot{F}_A^v = \dot{\gamma}_0 \left[ R \left( \frac{\tau_A}{f_p \cdot f_{ep} \cdot \hat{\tau}_A} - 0.001 \right) \right]^m F_A^{e-1} [N_A + b \text{sign}(\text{tr}[\sigma]) 1] F. \quad (6)$$

$\dot{\gamma}_0$  دارای واحد ۱ بر ثانیه (1/s) می باشد. تابع رمپ (Ramp Function) به صورت  $R(x) = (x + |x|)/2$  تعریف می شود.  $F$  نشان دهنده گرادیان تغییر شکل است.  $F^v$  و  $F^e$  به ترتیب اجزای الاستیک و ویسکوپلاستیک گرادیان تغییر شکل را نشان می دهند. با توجه به اینکه  $b$  یک پارامتر ماده است، برای توصیف جریان ویسکوپلاستیک حجمی استفاده می شود. تنش مؤثر در مدل های ایزوتروپیک توسط اصل فرینبوس (Frobenius Norm) طبق رابطه ۷ داده می شود:

$$\tau_A = \left[ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |\sigma'_{A,ij}|^2 \right] \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $\sigma' = \text{dev}[\sigma] = \text{dev}[\sigma_A]$  بیانگر تنش انحرافی می باشد. در مقایسه با مدل خطی، مدل توانی دقت بالاتری را نشان داده و وابستگی به کرنش، دما، فشار و فرکانس را در نظر می گیرد. همچنین این مدل، به طور کیفی تمام رفتارهای دینامیکی ضروری الاستومرها را به تصویر می کشد، که در آن، شبکه های موازی متعدد نیز می توانند به طور کمی پاسخ را به واقعیت مواد نزدیک نمایند. این تحقیق، از مدل مذکور به عنوان ابزاری قدرتمند بهره برده است. مواد نرم همچنین مستعد آسیب هستند. نوع مطالعات انجام شده در این تحقیق، امکان بررسی اثر آسیب مولینز (Mullins Damage Effect) را فراهم می کند. عامل آسیب مولینز،  $\eta$ ، با رابطه زیر بیان می شود.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \text{erf} \left[ \frac{U_{dev}^{max} - U_{dev}}{\bar{U} + \beta U_{dev}^{max}} \right] \quad (8)$$

که در آن  $r$ ،  $\bar{U}$  و  $\beta$  پارامترهای ماده هستند و  $\text{erf}(x)$  تابع خطا می باشد. همچنین  $U_{dev}$  چگالی انرژی کرنش دیفرانسیلی فعلی در شبکه مد نظر است و  $U_{dev}^{max}$  حداکثر چگالی انرژی کرنش دیفرانسیلی است. اگر  $r = 0$  باشد، آسیب مولینز غیرفعال می شود.

#### ۴- روشهای آزمایشگاهی

##### ۴-۱- تهیه نمونه

در این مطالعه، از چسب شفاف نوری تجاری 3M استفاده شد که بین دو لایه پلی اتیلن ترفتالات قرار گرفته و ساختاری ساندویچی را تشکیل می دهد. پلی اتیلن ترفتالات در مقایسه با چسب شفاف نوری، مدول بسیار بالاتری دارد و به همین دلیل می توان آن را به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفت. ساختار ساندویچی در نمونه، با یک فولاد ضد زنگ پوشانده شده است تا یک اتصال تک همپوشانی بر اساس استاندارد ASTM D1002 [28] ایجاد کند که تنش برشی را از طریق بارگذاری کششی به چسب شفاف نوری اعمال می کند.

هایپرالاستیک را توصیف کند. همچنین می‌تواند، با انجام آن در چندین نرخ کرنش، وابستگی آن به زمان و در نتیجه رفتار ویسکوالاستیک ماده را نشان دهد. بنابراین، این آزمایش‌ها توسط آنالایزر مکانیکی دینامیکی با سرعت‌های کرنش ۰/۱، ۰/۵ و ۱ s<sup>-1</sup> انجام شد. شکل ۲-ب شرایط بارگذاری شماتیک آن را نمایش می‌دهد. به طور خاص، آزمایش با نرخ کرنش ۰/۵ s<sup>-1</sup> برای اعتبارسنجی در فرایند کالیبراسیون گنجانده نشد.

#### ۴-۲-۳- آزمایش خزش

در برخی موارد، به دلیل نقش برجسته‌ای که خزش در زندگی روزمره دارد<sup>[34]</sup>، می‌تواند توصیف بهتری از خواص ویسکوالاستیک ارائه دهد<sup>[35]</sup>. تست خزش را می‌توان، با اعمال سریع تنش پله‌ای و حفظ آن در طول زمان و اندازه‌گیری تغییر شکل وابسته به زمان انجام داد (شکل ۲-ج). در این تحقیق، تست خزش در مقادیر تنش ۱۰۰، ۵۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام شد که با فرایند آزمون و خطا برای پوشش دادن طیف وسیعی انتخاب شد.

#### ۴-۲-۴- آزمایش بازیابی خزش

رفتار مواد نرم پس از حذف تنش ثابت، به اندازه رفتار آنها تحت تنش مهم است<sup>[36]</sup>. رفتار بازیابی خزش، با استفاده از روش بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲-د مورد بررسی قرار گرفت. چسب شفاف نوری مورد مطالعه، یک پلیمر ترموپلاستیک با قابلیت ذوب شدن است. در تست بازیابی خزش پلیمرهای ترموپلاستیک، حتی پس از مدت زمان طولانی، برخی از تغییر شکل‌ها به صورت دائمی باقی می‌ماند. بنابراین، انتظار می‌رود ماده آزمایش شده نیز رفتاری مشابه داشته باشد. این رفتار ذاتی، ماهیت مواد ترموپلاستیک است که توانایی تغییر شکل برگشت‌پذیر در دماهای بالا و بازگشت به شکل اولیه، پس از سرد شدن را دارا هستند.

#### ۴-۲-۵- آزمایش کم‌چرخه بارگذاری-باربرداری-بارگذاری مجدد

برای به دست آوردن حداکثر اطلاعات در مورد خواص هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک ماده، تکرار این آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف ضروری است. با طراحی بهینه آزمایش‌های تجربی، می‌توان با هوشمندی بیشتری عمل کرد و خواص ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک و هایپرالاستیک ماده را استخراج نمود. بارگذاری سیکلی، یکی از مهم‌ترین روش‌ها است. با تعریف صحیح توالی بارگذاری-باربرداری-بارگذاری مجدد، می‌توان خواص مختلف ماده را استخراج کرد. علاوه بر خواص ذکر شده، چنین آزمایشی همچنین برای بررسی هیستریزس، اتلاف انرژی و اثر آسیب مولینز، در طول بارگذاری سیکلی قابل استفاده است.

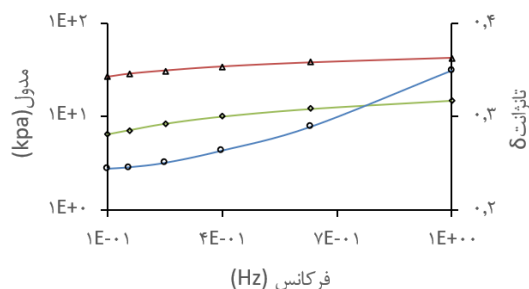
با نمونه‌های اتصال چسبی تک‌لبه در یک آنالایزر مکانیکی دینامیکی در حالت‌های بارگذاری مختلف انجام شد. آنالایزر مکانیکی دینامیکی به طور ویژه برای آزمایش مواد نرم تحت تنش کم طراحی شده است، زیرا از دقت کنترل بالا و تفکیک نیرو و جابجایی برخوردار است. آزمایش‌ها تکرارپذیری بسیار بالایی را نشان دادند؛ با این حال، هر آزمایش با استفاده از حداقل سه نمونه اصلی دست نخورده، برای مشاهده اثر مولینز انجام شد. رطوبت محیط ۷۰±۵ درصد و دما ۲۳±۱ درجه سانتیگراد بود.

#### ۴-۲-۱- آزمایش برش نوسانی دینامیکی

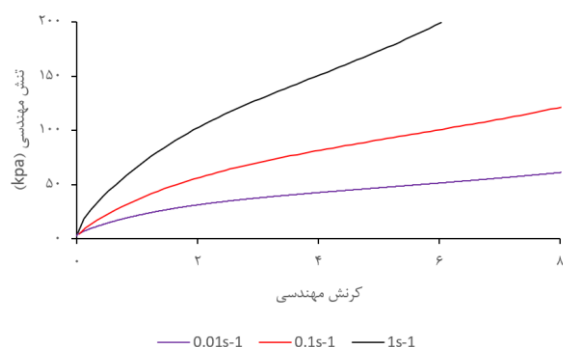
آزمایش‌های دینامیکی، اغلب با اعمال دامنه کرنش به نمونه‌های برشی و اندازه‌گیری پاسخ تنش انجام می‌شود. این آزمایش، تحت دامنه کرنش بزرگ برای به دست آوردن خواص ویسکوالاستیک ماده انجام شد. این خواص، به طور کلی از طریق یک تکنیک غیر مخرب به دست می‌آیند<sup>[32]</sup>. این آزمایش بر این اصل استوار است که پاسخ تنش سینوسی مواد ویسکوالاستیک نسبت به ورودی، که به آن زاویه فاز ( $\delta$ ) نیز گفته می‌شود، دارای تأخیر است<sup>[33]</sup>. تنش خروجی این آزمایش را می‌توان بر اساس مدول ذخیره،  $G'$  و مدول تلفات،  $G''$ ، بر حسب پاسکال بیان کرد. انرژی ذخیره شده، یعنی پاسخ الاستیک ماده را نشان می‌دهد، در حالی که  $G''$ ، انرژی از دست رفته در هر چرخه تغییر شکل به دلیل اتلاف ویسکوز، یعنی رفتار غیر الاستیک ماده را نشان می‌دهد. برهم نهی  $G'$  و  $G''$  به عنوان مدول مختلط  $G^*$  شناخته می‌شود که نشان دهنده توانایی ماده برای مقاومت در برابر تغییر شکل برشی است و به صورت  $G^* = G' + iG''$  و  $|G^*|^2 = G'^2 + G''^2$  تعریف می‌شود. تانژانت  $\delta$ ، همچنین به عنوان ضریب تلفات یا تانژانت تلفات شناخته می‌شود که به صورت نسبت  $G''$  به  $G'$  قابل بیان است. این پارامتر را می‌توان برای ارزیابی ویسکوالاستیسیته ماده استفاده کرد. در مواردی که تانژانت تلفات تقریباً صفر باشد، مدول تلفات به سمت صفر تمایل پیدا می‌کند که نشان دهنده ماده تقریباً الاستیک است. برای تانژانت تلفات نزدیک به ۹۰، ماده ویسکوز است. بنابراین، این پارامتر در موارد رایج ویسکوالاستیک بین ۰ تا ۹۰ قرار می‌گیرد. در این پژوهش، این آزمایش بر روی نمونه‌های برشی با فرکانس ۱ هرتز و در دامنه کرنش بزرگ، برای ارزیابی رفتار الاستیک یا ویسکوز ماده انجام شد (شکل ۲-الف).

#### ۴-۲-۲- آزمایش برش یکنواخت

رفتار چسب‌ها باید تحت شرایط بارگذاری برشی به طور جامع مشخص شود. همان‌طور که در بسیاری از منابع مکانیک جامدات به طور گسترده ذکر شده است، بسیاری از معادلات، مدل‌ها و تئوری‌های پاسخ رفتاری در بخش‌های برشی و حجمی طبقه‌بندی می‌شوند<sup>[31]</sup>. بنابراین، این مطالعه نیز بر بارگذاری برشی تمرکز دارد. بارگذاری برش یکنواخت با نرخ کرنش ثابت می‌تواند رفتار



شکل ۳) نتایج آزمایش تجربی برای حالت بارگذاری برشی نوسانی دینامیکی در فرکانس ۱ هرتز

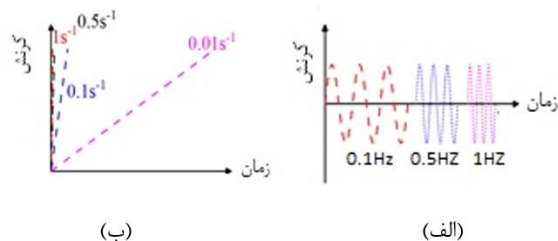


شکل ۴) نتایج آزمایش تجربی برای حالت‌های برشی یکنواخت در نرخ‌های کرنش مختلف

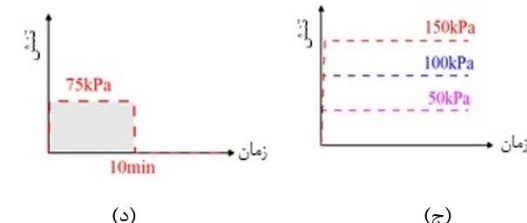
نرخ کرنش به خوبی قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش نرخ کرنش باعث افزایش مقاومت ماده در برابر تغییر شکل می‌شود. از این رو، تحت تنش بالاتری قرار گرفته است. از آنجایی که هدف این مطالعه بررسی شکست نبود، همه آزمایش‌ها تا رسیدن به کرنش ۱۰۰۰٪ یا تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال، یعنی محدودیت دستگاه، ادامه یافت.

### ۳-۱-۵- آزمایش خزش

نتایج آزمون خزش برای نمونه‌های برشی طبق شکل ۵ نشان داده شده است. چسب شفاف نوری، به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک قابل توجه خود، تحت تنش ثابت و رفتار وابسته به زمان از خود نشان می‌دهد. تست‌های خزش در سطوح تنشی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام شد و تغییرات کرنش تا زمان ۶۰۰ ثانیه ثبت شد. با مقایسه نتایج سرعت خزش در مقابل جابجایی، می‌توان مناطق اول و دوم خزش را شناسایی کرد. در ناحیه اول، سرعت خزش زیاد است و با گذشت زمان، نرخ کرنش به سرعت کاهش یافته و به طور نسبتاً ثابتی به تغییر شکل ادامه می‌دهد. با این حال، مشاهده منطقه سوم خزش در این ماده، طی ۶۰۰ ثانیه امکان‌پذیر نیست.



(ب)



(ج)

شکل ۲) روش کنترل بارگذاری مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی مختلف: (الف) آزمایش برشی نوسانی دینامیکی، (ب) آزمایش برشی ساده (در نرخ کرنش‌های مختلف)، (ج) آزمایش‌های خزش (در سطوح تنش مختلف) و (د) آزمایش بازیابی خزشی

## ۵- نتایج

### ۵-۱- نتایج تجربی

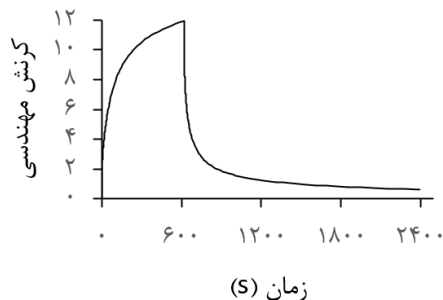
#### ۵-۱-۱- تست برش نوسانی دینامیکی

شکل ۳، نتایج آزمایش‌های برش نوسانی دینامیکی در فرکانس ۱ هرتز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر  $G'$  تقریباً دو برابر  $G''$  است که نشان‌دهنده غلبه رفتار الاستیک بر رفتار ویسکوز می‌باشد. علاوه بر این، تغییرات قابل توجهی در  $G'$ ، با افزایش دامنه کرنش پس از سطح کرنش ۰/۲۵ قابل مشاهده است. به طور مشابه،  $G''$  نیز پس از سطح کرنش ۰/۲۹ بیش از ۵ درصد تغییر می‌کند. بر اساس استاندارد ISO 6721-10، مواد ویسکوالاستیک زمانی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند که  $G'$  بیش از ۵ درصد از مقادیر اولیه خود منحرف شوند [37]. فاصله بین کرنش‌های ۰/۲۵ و ۰/۲۹ را می‌توان به عنوان منطقه گذار از ویسکوالاستیسیته خطی به غیرخطی در نظر گرفت. با توجه به رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی مواد چسب شفاف نوری، نظریه ویسکوالاستیسیته غیرخطی ضروری است، زیرا این ماده به طور معمول در اکثر کاربردهای عملی تحت مقادیر کرنش بالا و در محدوده ویسکوالاستیک غیرخطی قرار می‌گیرد [36]. این نکته در بخش‌های بعدی ملاک عمل قرار گرفته و از مدل جریان توانی (روابط ۵ و ۶) به همراه مدل یئو، برای تعیین رفتار کرنش بزرگ ماده استفاده شد.

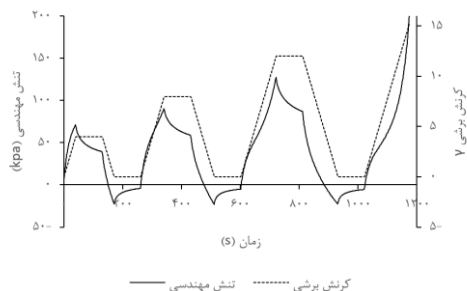
#### ۵-۱-۲- آزمایش برش یکنواخت

آزمایش‌های بارگذاری برش یکنواخت تحت سرعت‌های کرنش مختلف (۰/۰۱، ۰/۱ و ۱ s<sup>-1</sup>) انجام شد، نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. رفتار هائپرالاستیک مواد و همچنین وابستگی آن به





شکل ۶) نتایج آزمایش تجربی برای آزمایش بازیابی خزش برشی

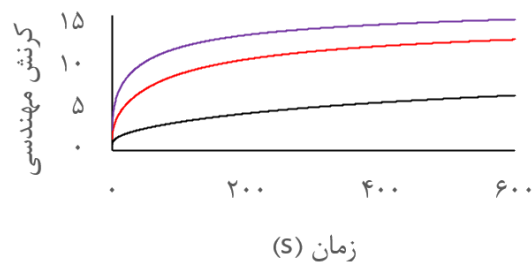


شکل ۷) نتایج آزمایش تجربی برای حالت برشی چرخه پایین بارگذاری-تخلیه

شده، کمتر از این حداکثر بار تجربه شده قبلی باشد، رفتار بارگذاری لاستیک، شبیه رفتار یک ماده "جدید" بدون آسیب را تقلید می‌کند. با این حال، در طول تخلیه بار، اثر نرم شدن ظاهر می‌شود. اگر بار از حداکثر قبلی خود فراتر رود، رابطه تنش-کرنش تغییر می‌کند و منجر به نرم شدن بیشتر می‌شود. تأخیر زمانی ماده در هنگام تخلیه بار، باعث می‌شود تنش‌های منفی به کرنش صفر برسند. با این حال، با گذشت زمان، ماده آرام می‌شود و تنش به صفر باز می‌گردد.

#### ۶- اعتبارسنجی

شکل ۸، تفاوت بین پیش‌بینی‌های هر معادله رفتاری و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در نگاه اول مشهود است که مدل به دست آمده از آزمایش برش ساده، در شکل ۸-الف و مدل به دست آمده از آزمایش بازیابی خزش، در شکل ۸-ب هر دو از دقت بالایی برخوردار هستند. می‌توان نتیجه گرفت که حالت آزمایش مشابه، دقیق‌ترین نتایج را به همراه خواهد داشت. بنابراین، اگر هدف، بررسی نوع خاصی از بارگذاری مانند رفتار برشی ماده باشد، بهتر است از آزمایش‌های تجربی مشابه آن برای استخراج مدل رفتاری استفاده شود. در مقابل، اگر هدف به دست آوردن یک معادله رفتاری کلی، برای ارائه پاسخ رضایت‌بخش برای همه شرایط باشد، قضیه متفاوت می‌شود و مشخص می‌شود که، دخالت داشتن حالت‌های بارگذاری مختلف در فرایند کالیبراسیون، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. جهت رهایی از شلوعی، تنها پیش‌بینی‌های مرتبط با برخی مدل‌ها در شکل ۸-ب نشان داده شده است؛ لازم به ذکر



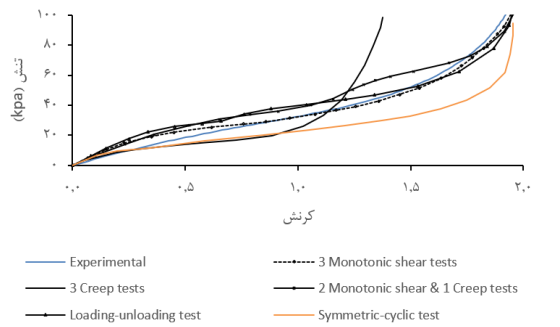
شکل ۵) نتایج آزمایش تجربی برای آزمایش‌های خزش در سطوح مختلف تنش

#### ۵-۱-۴- آزمایش بازیابی خزش

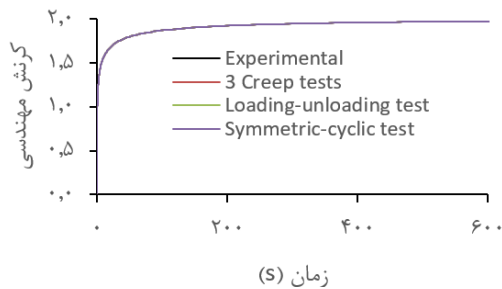
آزمایش بازیابی خزش، بارگذاری خزش در سطح تنش ۷۵ کیلو پاسکال برای ۶۰۰ ثانیه و رفتار بازیابی آن برای ۱۸۰۰ ثانیه را مورد بررسی قرار داد (شکل ۶). این آزمایش، نه تنها اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار خزش، بلکه در مورد رفتار بازیابی نیز ارائه می‌دهد که مستقیماً تحت تأثیر رفتار ویسکوالاستیک (عمدتاً غیرخطی) قرار دارد [36]. کرنش لحظه‌ای در  $t=0$  ثانیه،  $\epsilon_0$ ، برابر با  $2/4$  و مقدار بازیابی خزش لحظه‌ای،  $\Delta\epsilon_{(600)}$ ، برابر با  $3/8$  است. تعدادی از پارامترهای ماده، به طور مستقیم از این مقادیر به دست می‌آیند، مانند پارامترهای وابسته به تنش معادله شاپری (Schapery) [38]. در نتیجه، اگر معادله رفتاری ماده با دقت کافی تعیین شود، رفتار بازیابی خزش ماده بدون نیاز به آزمایش قابل دستیابی است. به همین دلیل، نتایج تست بازیابی خزش در فرایند کالیبراسیون گنجانده نشده است و به عنوان یک نقطه کنترلی برای ارزیابی میزان پیش‌بینی رفتار بازیابی خزش، توسط مدل‌های استخراج شده عمل می‌کند.

#### ۵-۱-۵- آزمایش کم‌چرخه بارگذاری-باربرداری-بارگذاری مجدد

شکل ۷، تغییرات وابسته به زمان ورودی کرنش و خروجی تنش را نشان می‌دهد. علاوه بر این، کاهش قابل توجه تنش در محل توقف، به طور واضح تأثیر قابل توجه زمان استراحت بر رفتار ماده را نشان می‌دهد. هر چه بارگذاری یا نرخ کرنش بیشتر باشد، ریلکسیشن بیشتر قابل توجه خواهد بود. به ویژه، در دوره استراحت آخرین سیکل در شکل ۷، تنش تقریباً ۳۴ درصد کاهش یافته است. حتی اگر، دوره استراحت طولانی‌تر بود، تنش همچنان به روند کاهشی خود ادامه می‌داد. بر اساس شکل ۷، شیب منحنی بارگذاری نیز در طول سیکل‌های متوالی بارگذاری و باربرداری کاهش یافته است که نشان دهنده نرم شدن یا آسیب ماده است. این موضوع، لزوم در نظر گرفتن آسیب را تأیید می‌کند. بنابراین، اثر مولینز در محاسبات در نظر گرفته شد و پارامترهای آن استخراج گردید [39]. این اثر، وابستگی رابطه تنش-کرنش در لاستیک‌ها به بالاترین بار تجربه شده قبلی را نشان می‌دهد. هنگامی که بار اعمال

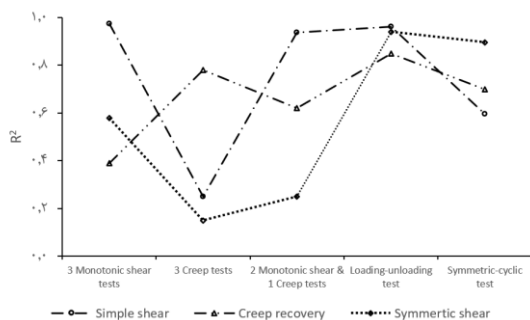


(الف)



(ب)

**شکل ۸** مقایسه بین پیش‌بینی‌های مدل‌های مختلف (خطوط چین‌دار و نقطه‌چین) و داده‌های تجربی (خط یک‌دست)، (الف) آزمایش برش در نرخ کرنش  $10^{-5} s^{-1}$ ، (ب) خزش بازیابی شده



**شکل ۹** مقایسه بین مقادیر  $R^2$  به دست آمده بر اساس مدل‌های مستخرج شده در آزمایش‌های اعتبار سنجی مختلف

جهت سهولت در استفاده از مدل‌های مستخرج در شبیه‌سازی‌های المان محدود، ثوابت مستخرج برای آنها در جداول ۱ تا ۳ ارائه گردیده است. مقادیر نهایی استخراج شده برای مدل‌های 3 monotonic shear tests و 3 creep tests در جدول ۱ و ضرایب مربوط به مدل 2 monotonic shear and 1 creep tests در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین ثوابت مربوط به مدل‌های Loading-unloading test و Symmetric-cyclic test به ترتیب در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده است و در صورت نیاز، هر کدام از آنها قابل استفاده در شبیه‌سازی‌های المان محدود می‌باشند. نکته قابل توجه، تفاوت در تعداد ثوابت مورد نیاز در هر مدل می‌باشد که بیانگر میزان هزینه محاسباتی مربوط به آن مدل می‌باشد. تعداد شبکه مورد استفاده، میزان دقت مورد انتظار و همچنین پارامترهای آسیب از جمله موارد تأثیرگذار بر آن می‌باشند.

است که خروجی تمامی مدل‌ها در این شکل، کاملاً برهم منطبق بوده و لذا هم پوشانی کامل دارند. مطابق شکل ۸، زمانی که آزمایش‌های استفاده شده در فرایند کالیبراسیون و آزمایش تجربی مورد نظر برای پیش‌بینی در یک حالت (مود بارگذاری) انجام نشده باشند، مدل استخراج شده در پیش‌بینی رفتار ماده چندان موفق نبوده است. به عنوان مثال، بر اساس آزمایش‌های خزش، به تنهایی نمی‌توان از مدل مربوط به آن، برای پیش‌بینی رفتار برش یکنواخت ماده استفاده کرد؛ به همین ترتیب، بر اساس سه آزمایش برش، نمی‌توان از مدل مستخرج آن، برای پیش‌بینی رفتار خزش استفاده کرد. زمانی که امکان انجام آزمایش‌های تجربی در یک حالت بارگذاری مشابه وجود ندارد، انجام آنها در چندین حالت بارگذاری برای کالیبراسیون مناسب است. یک برازش خوب را می‌توان با تعیین ضریب  $R^2$  برای هر معادله رفتاری سنجید [40]. اگر پیش‌بینی رگرسیون دارای  $R^2$  برابر با ۱ باشد، آنگاه برازش داده‌ها کاملاً دقیق است. شکل ۹، توانایی مدل‌های مختلف را برای پیش‌بینی هر تست اعتبارسنجی نشان می‌دهد که نکات قابل تاملی دارد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، مدل به دست آمده از بارگذاری برشی، در پیش‌بینی بارگذاری برشی موفق است، در حالی که مدل به دست آمده از آزمون خزش، تحت بارگذاری خشی، عملکرد مناسبی داشته است. علاوه بر این، مدل‌های به دست آمده از یک نوع بارگذاری، به طور کلی در بارگذاری‌های غیرمشابه یا چرخه‌ای عملکرد ضعیفی دارند. به عنوان مثال، مدل استخراج شده بر اساس سه بارگذاری خزش، قادر به پیش‌بینی رفتار ماده تحت بارگذاری برشی یا چرخه‌ای نیست. علاوه بر این، مشهود است که مدل به دست آمده از دو آزمایش برش و یک آزمایش خزش، عملکرد نسبتاً بهتری هم در بارگذاری خشی و هم در بارگذاری برشی دارد. مدل‌های به دست آمده از بارگذاری چرخه‌ای، به طور کلی در تمام تست‌های اعتبارسنجی عملکرد خوبی دارند، زیرا از اکثر حالت‌های بارگذاری در کالیبراسیون بهره برده است. با در نظر گرفتن میانگین پارامترهای  $R^2$ ، برای سه تست اعتبارسنجی، به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد مدل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مستخرج از آزمایش برش کم‌چرخه بارگذاری-بارگذاری در اینجا بهترین انتخاب باشد. از بعد دیگری نیز می‌توان به مسئله نگاه کرد. همان‌طور که اشاره شد، تنوع در نوع بارگذاری در فرایند کالیبراسیون، باعث ارتقای توانایی مدل در پیش‌بینی رفتار ماده در شرایط بارگذاری مختلف خواهد شد. لذا طبیعتاً در مواردی که هدف، دستیابی به مدلی کلی برای تمامی شرایط می‌باشد، استفاده هرچه بیشتر از تست‌های متنوع، مطلوب می‌باشد. این درحالی است که انجام آزمایش‌های تجربی در حالت‌های بارگذاری مختلف دشوار، زمان‌بر و پرهزینه هست و با محدودیت-هایی در فرایند کالیبراسیون همراه است و استفاده از بارگذاری چرخه‌ای می‌تواند بهینه‌ترین جایگزین برای چنین تست‌های پرهزینه و زمان‌بر باشد.



**جدول ۳)** پارامترهای خواص ماده مستخرج از کالبراسیون یک آزمایش بارگذاری-باربرداری چرخه‌ای

| Constitutive model              |                                                  |       | Loading-unloading test |           |           |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|-------|------------------------|-----------|-----------|
| R <sup>2</sup> =0.981           |                                                  |       |                        |           |           |
| Parameter                       | Symbol                                           | Units | Network A              | Network B | Network C |
| Yeoh parameter 1                | C <sub>10</sub>                                  | MPa   | 0.0045                 | 0.010405  | 0.0246    |
| Yeoh parameter 2                | C <sub>20</sub>                                  | MPa   | -1.2942e-05            | 6e-05     | -0.0274   |
| Yeoh parameter 3                | C <sub>30</sub>                                  | MPa   | 4.4186e-08             | 8e-06     | 0.0175    |
| Bulk modulus 1, 2, and 3        | K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> | MPa   | 0                      | 0         | 0         |
| Mullins effect magnitude        | r                                                | -     | -                      | -         | 1.487     |
| Mullins Energy                  | $\bar{U}$                                        | MPa   | -                      | -         | 0.00029   |
| Mullins adjustment              | $\beta$                                          | -     | -                      | -         | 0.01      |
| Parameter                       | b                                                | -     | -                      | 0         | 0         |
| Shear flow resistance           | $\hat{\tau}$                                     | MPa   | -                      | 0.0309    | 0.04      |
| Shear flow exponent             | $m$                                              | -     | -                      | 3.58      | 10.8      |
| Yield evolution of $\hat{\tau}$ | $f_f$                                            | -     | -                      | 1.858     | 1.059     |
| Characteristic yield evolution  | $\varepsilon_f$                                  | -     | -                      | 1         | 0.09      |
| Flow damage strain              | $c_\varepsilon$                                  | -     | -                      | 0.1       | 0.1       |
| Flow damage final state         | $f_s$                                            | -     | -                      | 1         | 1         |

**جدول ۴)** پارامترهای خواص ماده مستخرج از کالبراسیون یک آزمایش بارگذاری کم‌چرخه متقارن

| Constitutive model              |                                                  |       | Symmetric-cyclic test |           |           |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-----------------------|-----------|-----------|
|                                 |                                                  |       | R <sup>2</sup> =0.991 |           |           |
| Parameter                       | Symbol                                           | Units | Network A             | Network B | Network C |
| Yeoh parameter 1                | C <sub>10</sub>                                  | MPa   | 0.0039824             | 0.008     | 0.0243    |
| Yeoh parameter 2                | C <sub>20</sub>                                  | MPa   | -1.6e-05              | 8e-05     | -0.02     |
| Yeoh parameter 3                | C <sub>30</sub>                                  | MPa   | 1.066e-07             | 6e-06     | 0.02      |
| Bulk modulus 1, 2, and 3        | K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> | MPa   | 0                     | 0         | 0         |
| Mullins effect magnitude        | r                                                | -     | -                     | -         | 1.2       |
| Mullins Energy                  | $\hat{U}$                                        | MPa   | -                     | -         | 0.00032   |
| Mullins adjustment              | $\beta$                                          | -     | -                     | -         | 0.01      |
| Parameter                       | b                                                | -     | -                     | 0         | 0         |
| Shear flow resistance           | $\hat{\tau}$                                     | MPa   | -                     | 0.03992   | 0.01043   |
| Shear flow exponent             | m                                                | -     | -                     | 4         | 11        |
| Yield evolution of $\hat{\tau}$ | $f_f$                                            | -     | -                     | 1.84      | 0.2374    |
| Characteristic yield evolution  | $\varepsilon_f$                                  | -     | -                     | 1         | 0.131     |
| Flow damage strain              | $c_\varepsilon$                                  | -     | -                     | 0.1       | 0.1       |
| Flow damage final state         | $f_s$                                            | -     | -                     | 1         | 1         |

## ۷- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تجربی به دست آمده، مؤلفه‌های مناسب هایپرلاستیک و ویسکوالاستیک برای ماده تعیین گردید. سپس، مدل‌های رفتاری با استفاده از داده‌های تجربی کالبره شدند. دقت مدل‌های رفتاری با افزودن حالت‌های مختلف بارگذاری به فرایند کالبراسیون بهبود یافت. برای مثال، ترکیب آزمایش‌های برش یکنواخت و خزش در مقایسه با اجرای جداگانه آنها نتایج بهتری را به همراه داشت. با این حال، این امر نیازمند مدل‌های پیچیده‌تری برای کالبراسیون رفتار ماده است. به منظور دستیابی به بیشترین تنوع حالت‌های بارگذاری با استفاده از تعداد محدودی آزمایش (حالت بهینه)، از آزمایش بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد. مشاهده شد که بارگذاری سیکلی با وجود نیاز به مدل‌های کالبراسیون پیچیده‌تر، به نتایج دقیق‌تری با آزمایش‌های کمتر منجر می‌شود. مدل سه شبکه ویسکوپلاستیک (TNV) با استفاده

**جدول ۱)** پارامترهای خواص ماده مستخرج از کالبراسیون سه آزمایش برش یکنواخت در نرخ کرنش‌های مختلف و خواص ماده مستخرج از سه آزمایش خزش در سطح تنش‌های مختلف

| Constitutive model             |                                                  |       | 3 monotonic shear tests |           | 3 creep tests         |           |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|                                |                                                  |       | R <sup>2</sup> =0.994   |           | R <sup>2</sup> =0.989 |           |
| Parameter                      | Symbol                                           | Units | Network A               | Network B | Network A             | Network B |
| Yeoh parameter 1               | C <sub>10</sub>                                  | MPa   | 0.0068                  | 0.041     | 5e-05                 | 0.02606   |
| Yeoh parameter 2               | C <sub>20</sub>                                  | MPa   | -1.04e-04               | -0.009    | -7e-05                | -0.009    |
| Yeoh parameter 3               | C <sub>30</sub>                                  | MPa   | 7.0e-07                 | 0.0044    | 0.000453              | 0.13      |
| Bulk modulus 1, 2, and 3       | K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> | MPa   | 0                       | 0         | 0                     | 0         |
| Mullins effect magnitude       | r                                                | -     | -                       | 9         | 10                    | -         |
| Mullins Energy                 | <i>U</i>                                         | MPa   | -                       | 0.03      | 5                     | -         |
| Mullins adjustment             | β                                                | -     | -                       | 0.01      | 0.01                  | -         |
| Parameter                      | b                                                | -     | -                       | 0         | 0                     | 0         |
| Shear flow resistance          | <i>τ̂</i>                                        | MPa   | -                       | 0.15      | 30.7                  | 0.635     |
| Shear flow exponent            | <i>m</i>                                         | -     | -                       | 1.7       | 1.0595                | 1         |
| Yield evolution of <i>τ̂</i>   | <i>f<sub>f</sub></i>                             | -     | -                       | 1         | 1                     | 1         |
| Characteristic yield evolution | <i>ε<sub>f</sub></i>                             | -     | -                       | 0.1       | 0.1                   | 0.1       |
| Flow damage strain             | <i>c<sub>ε</sub></i>                             | -     | -                       | 0.1       | 0.1                   | 0.1       |
| Flow damage final state        | <i>f<sub>s</sub></i>                             | -     | -                       | 1         | 1                     | 1         |

**جدول ۲)** پارامترهای خواص ماده مستخرج از کالبراسیون دو آزمایش برش یکنواخت و یک آزمایش خزش

| Constitutive model             |                                                  |       | 2 monotonic shear and 1 |           |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------------------------|-----------|
|                                |                                                  |       | creep tests             |           |
|                                |                                                  |       | R <sup>2</sup> =0.94    |           |
| Parameter                      | Symbol                                           | Units | Network A               | Network B |
| Yeoh parameter 1               | C <sub>10</sub>                                  | MPa   | 0.0053                  | 0.023     |
| Yeoh parameter 2               | C <sub>20</sub>                                  | MPa   | -0.0011                 | 0.0062    |
| Yeoh parameter 3               | C <sub>30</sub>                                  | MPa   | 0.00038                 | 0.023     |
| Bulk modulus 1, 2, and 3       | K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub> | MPa   | 0                       | 0         |
| Mullins effect magnitude       | r                                                | -     | 6                       | -         |
| Mullins Energy                 | <i>U</i>                                         | MPa   | 0.009                   | -         |
| Mullins adjustment             | β                                                | -     | 0.01                    | -         |
| Parameter                      | b                                                | -     | 0                       | 0         |
| Shear flow resistance          | <i>τ̂</i>                                        | MPa   | 0.121                   | 0.1124    |
| Shear flow exponent            | <i>m</i>                                         | -     | 4.9875                  | 2.54      |
| Yield evolution of <i>τ̂</i>   | <i>f<sub>f</sub></i>                             | -     | 1                       | 1         |
| Characteristic yield evolution | <i>ε<sub>f</sub></i>                             | -     | 0.1                     | 0.1       |
| Flow damage strain             | <i>c<sub>ε</sub></i>                             | -     | 0.1                     | 0.1       |
| Flow damage final state        | <i>f<sub>s</sub></i>                             | -     | 1                       | 1         |

در انتخاب نوع و تعداد آزمایش‌های تجربی برای فرایند کالبراسیون مواد ویسکوالاستیک، هیچ قاعده خاص یا الزامات سختی وجود ندارد<sup>[31]</sup>. تردیدی نیست که دقت مدل پایه، با افزایش تنوع حالت‌های بارگذاری، افزایش می‌یابد؛ با این حال، انتخاب نوع و تعداد آزمایش‌ها، به هدف مدل رفتاری و نوع آن بستگی دارد. از طرف دیگر، در اکثر موارد، معادلات رفتاری به دست آمده از کالبراسیون، نوعی تقریب هستند که دستیابی به پاسخ دقیق ماده را غیرممکن می‌سازد. زیرا علاوه بر خطا در آزمایش‌های تجربی، فرایند کالبراسیون، به طور کلی شامل حل معادلات اضافی مقید است که دستیابی به تطابق کامل مدل، با داده‌های تجربی را غیرممکن می‌کند.

- extremely different elastic properties. *Journal of Applied Mechanics*. 2014 Nov 1;81(11):114501.
- 6- Kaneko Y, Yamaguchi M, Matsuya H, Tsukada T. Foldable-display systems as a standard platform for multimedia use. *IEEE transactions on consumer electronics*. 1996 Feb;42(1):17-21.
- 7- Tian H, Yang Y, Xie D, Ren TL, Shu Y, Zhou CJ, Sun H, Liu X, Zhang CH. A novel flexible capacitive touch pad based on graphene oxide film. *Nanoscale*. 2013;5(3):890-4.
- 8- Zhou H, Park JW. The effects of compressive stress on the performance of organic light-emitting diodes. *Organic Electronics*. 2015 Sep 1;24:272-9.
- 9- Azraim MM, Omar G, Mansor MR, Fadzullah SH, Lim LM. Failure mechanism of organic light emitting diodes (OLEDs) induced by hygrothermal effect. *Optical Materials*. 2019 May 1;91:85-92.
- 10- Mohammed IK, Charalambides MN, Kinloch AJ. Modeling the effect of rate and geometry on peeling and tack of pressure-sensitive adhesives. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2016 Jul 1;233:85-94.
- 11- Huang H, Dasgupta A, Singh N. Predictive mechanistic model for single-layered pressure-sensitive adhesive (PSA) joints: Part I: Uniaxial tensile stress-strain response. *The European Physical Journal E*. 2020 Sep;43:1-5.
- 12- Luo W, Chen W, Liu D, Huang X, Ma B. Effect of temperature and humidity on mechanical properties and constitutive modeling of pressure-sensitive adhesives. *Scientific Reports*. 2024 Jun 25;14(1):14634.
- 13- Salmon F, Everaerts A, Campbell C, Pennington B, Erdogan-Haug B, Caldwell G. 64-1: Modeling the Mechanical Performance of a Foldable Display Panel Bonded by 3M Optically Clear Adhesives. In *SID Symposium Digest of Technical Papers 2017 May* (Vol. 48, No. 1, pp. 938-941).
- 14- Anani Y, Rahimi GH. Modeling of hyperelastic behavior of functionally graded rubber under mechanical and thermal load. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Jan 10;15(11):359-67. (In Persian)
- 15- Esmaili AR, Keshavarz M, Mojra A. Optimization Of Hyperelastic Model Parameters Of Soft Tissue Based On Genetic Algorithm Utilizing Experimental Mechanical Datas. (In Persian)
- 16- Mapari S, Mestry S, Mhaske ST. Developments in pressure-sensitive adhesives: A review. *Polymer Bulletin*. 2021 Jul;78(7):4075-108.
- 17- Shafiei E, Kiasat MS. A new viscoplastic model and experimental characterization for thermosetting resins. *Polymer Testing*. 2020 Apr 1;84:106389.
- 18- Lemaitre J, editor. *Handbook of materials behavior models, three-volume set: nonlinear models and properties*. Academic Press; 2001 Oct 29.
- 19- Liu T, Ye Z, Yu B, Xuan W, Kang J, Chen J. Biomechanical behaviors and visco-hyperelastic mechanical properties of human hernia patches with polypropylene mesh. *Mechanics of Materials*. 2023 Jan 1;176:104529.
- 20- Talesh RB, Keshtiban PM, Oskui AE. Investigation of mode-I fracture behavior by essential work of fracture

از ویسکوالاستیسیته غیرخطی و با در نظر گرفتن آسیب افتاده، نتایج دقیقی را برای ماده چسب شفاف نوری ارائه کرد. علاوه بر این، با اعتبارسنجی مدل‌های رفتاری استخراج شده با نتایج تجربی، مشاهده شد که هر مدل قادر به پیش‌بینی حالت بارگذاری است که قبلاً در فرایند استخراج آن به کار رفته بود. بدین معنی که مدل به دست آمده از آزمایش برش یکنواخت، می‌تواند رفتار ماده را تحت شرایط بارگذاری برش یکنواخت، با دقت پیش‌بینی کند. بنابراین، با استفاده همزمان از حالت‌های برش و خزش، مدل قادر به پیش‌بینی رفتار ماده تحت هر دو حالت بارگذاری است.

معادله رفتاری به دست آمده از بارگذاری چرخه‌ای، به دلیل پوشش انواع حالت‌ها، عملکرد بسیار بهتری دارد. بنابراین، نتیجه قابل توجه این مطالعه این است که زمانی که هدف، بررسی ماده تحت حالت‌های خاص باشد، معادله رفتاری را می‌توان به راحتی با استفاده از حالت بارگذاری مشابه و منحصر به فرد به دست آورد. بهترین حالت برای استخراج معادله رفتاری، در حالتی که هدف استخراج رابطه کلی برای ماده باشد، استفاده از بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد، زیرا بالاترین دقت پیش‌بینی با تعداد محدودی از آزمایش‌های تجربی را فراهم می‌کند. معادله رفتاری به دست آمده از آزمایش تجربی چرخه‌ای، در پیش‌بینی رفتار ماده، در طیف وسیعی از شرایط، بسیار دقیق است.

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

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

- 1- Blankenbach K. What is a display? An introduction to visual displays and display systems. *Handbook of visual display technology*. 2016:1-22.
- 2- Park CH, Lee SJ, Lee TH, Kim HJ. Characterization of an acrylic pressure-sensitive adhesive blended with hydrophilic monomer exposed to hygrothermal aging: assigning cloud point resistance as an optically clear adhesive for a touch screen panel. *Reactive and Functional Polymers*. 2016 Mar 1;100:130-41.
- 3- Park CH, Lee SJ, Lee TH, Kim HJ. Characterization of an acrylic polymer under hygrothermal aging as an optically clear adhesive for touch screen panels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015 Dec 1;63:137-44.
- 4- Jia Y, Liu Z, Wu D, Chen J, Meng H. Mechanical simulation of foldable AMOLED panel with a module structure. *Organic Electronics*. 2019 Feb 1;65:185-92.
- 5- Shi Y, Rogers JA, Gao C, Huang Y. Multiple neutral axes in bending of a multiple-layer beam with

40- Casella G, Roger LB, *Statistical Inference, Second, Andover Melbourne Mexico City Stamford, CT Toronto Hong Kong New Delhi Seoul Singapore Tokyo: CENGAGE INDIA*, 2002.

- during the single-point incremental forming process. *Engineering Failure Analysis*. 2023 Dec 1;154:107677.
- 21- Marckmann G, Verron E. Efficiency of hyperelastic models for rubber-like materials. In *Constitutive Models for Rubber IV* 2017 Dec 4 (pp. 375-380). Routledge.
- 22- Michael S, *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14 documentation Dassault Syst, Pawtucket, United States: Simulia Corp*, 2014.
- 23- Jemioło S, Gajewski M, Szczerba R. Zastosowanie hipersprężystości i MES w modelowaniu mostowych łożysk elastomerowych.
- 24- Yeoh OH. Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chemistry and technology*. 1993 Nov 1;66(5):754-71.
- 25- Kaliske M, Rothert H. On the finite element implementation of rubber-like materials at finite strains. *Engineering Computations*. 1997 Mar 1;14(2):216-32.
- 26- Nath MM, Gupta G. Modeling the mechanical performance of bendable display under cyclic loading. In *2019 IEEE international flexible electronics technology conference (IFETC)* 2019 Aug 11 (pp. 1-5). IEEE.
- 27- PolymerFEM. MCalibration and PolymerFEM User Manual, Polym LLC, n.d., 2020.
- 28- ASTM D1002, Apparent Shear Strength of Single-Lap Joint Adhesively Bonded Metal Specimens, 2019.
- 29- Tong L, Steven GP. Analysis and design of structural bonded joints. Boston: Kluwer Academic; 1999 Apr 1.
- 30- KOMPOZITA RM. Investigation of the mechanical properties of a cork/rubber composite. *Materiali in tehnologije*. 2016;50(4):579-83.
- 31- Bergstrom JS. Mechanics of solid polymers: theory and computational modeling. William Andrew; 2015 Jul 11.
- 32- Weipert D. Determining rheological properties of cereal products using dynamic mechanical analysis in compression mode. *Cereal foods world*. 1997;42(3):132-7.
- 33- Mezger TG. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers, 4th. Vincentz Network GmbH & Co KG, Hannover, Germany. 2014.
- 34- Provenzano P, Lakes R, Keenan T, Vanderby R. Nonlinear ligament viscoelasticity. *Annals of biomedical engineering*. 2001 Oct;29:908-14.
- 35- Shi X, Jiang S, Yang L, Tang M, Xiao D. Modeling the viscoelasticity of shale by nanoindentation creep tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020 Mar 1;127:104210.
- 36- Brinson HF, Brinson LC. Polymer engineering science and viscoelasticity. An introduction. 2008 Jan;99:157.
- 37- ISO 6721-10 2015.
- 38- Lou YC, Schapery RA. Viscoelastic characterization of a nonlinear fiber-reinforced plastic. *Journal of Composite Materials*. 1971 Feb;5(2):208-34.
- 39- Reis BP, Nogueira LM, Castello DA, Borges LA. A visco-hyperelastic model with Mullins effect for polyurethane elastomers combining a phenomenological approach with macromolecular information. *Mechanics of Materials*. 2021 Oct 1;161:104023.