مکانیک سازهها و شارهها/ سال۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۲/ صفحه ۱–۱۶

. نشریه کانیک سازه کاو شاره ک



DOI: 10.22044/jsfm.2025.15960.3952



# تحلیل غیرخطی سلسله مراتبی رفتار خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی شیشه/اپوکسی تقویتشده با نانوذرات سیلیکا

## محمّدجواد محمودى

دانشیار، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، تهران، ایران. مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

#### چکیدہ

در این مقاله، یک روش تحلیلی سلسله مراتبی بر اساس میکرومکانیک برای پیشبینی رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیتهای هیبریدی پایه پلیمری ارائه میشود. کامپوزیت هیبریدی مدنظر شامل اجزای شیشه و اپوکسی تقویتشده با نانوذرات سیلیکا میباشد. یک مدل میکرومکانیکی بر پایه سلول واحد طی دو مرحله برای استخراج پاسخ کرنش کلی خزش-بازیافت نانوکامپوزیت سیلیکا/پوکسی و نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/پوکسی اعمال میشود. المان حجمی نماینده شامل سه فاز زمینه، فاز میانی و تقویت، به ترتیب با رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی، ویسکوالاستیک غیرخطی یا الاستیک خطی، و الاستیک خطی مدنظر میباشد. مدل ساختاری و سکوالاستیک غیرخطی شیپری مورد استفاده قرا میگیرد. در این مطالعه، مشخصههای فاز میانی شامل ضخامت و مدل رفتاری، وابسته به اندازه، خواص و کسر حجمی نانوذره در نظر گرفته میشود. نتایج روش ارائهشده با نتایج تجربی جهت اعتبارسنجی مقایسه میشود. و محمینین، یک تحلیل حساسیت با تغییر تعداد زیر سلولها انجام میگیرد. اثر پارامترهای مدل شامل کسر حجمی الیاف و کسر حجمی و اندازه نانو تقویتکننده، ضخامت، خواص، و نوع رفتار فاز میانی، سطح بار اعمالی و دمای محمل می ایل کسر حجمی الیاف و کسر حجمی و اندازه نانو تقویتکننده، ضخامت، خواص، و نوع رفتار فاز میانی، سطح بار اعمالی و دمای محیط بر رفتار میز الاستیک و ویسکوالاستیک و اندازه نانو تقویتکننده، ضخامت، خواص، و نوع رفتار فاز میانی، سطح بار اعمالی و دمای محیط بر رفتار مؤر الاستیک و ویسکوالاستیک و اندازه نانو تقویتکننده، ضخامت، خواص، و نوع رفتار فاز میانی، سطح بار اعمالی و دمای محیط بر رفتار مؤر الاستیک و ویسکوالاستیک و اندازه کامپوزیت هیبریدی، و همچنین تاریخچه کلی کرنش خزشی و پاسخ کلی خزش –بازیافت آن مورد بررسی قرار میگیرد.

**كلمات كليدى:** نانوكامپوزيت هيبريدى؛ رفتار ويسكوالاستيك غيرخطى؛ كرنش خزش-بازيافت؛ مدلسازى ميكرومكانيكى؛ نانوذره.

### Hierarchical Nonlinear Analysis of Creep-Recovery Behavior of Glass/Epoxy Hybrid Nanocomposite Reinforced by Silica Nanoparticles

#### M.J. Mahmoodi

Assoc. Prof., Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

#### Abstract

In this paper, a hierarchical micromechanics-based analytical method is presented to predict the nonlinear viscoelastic behavior of polymer-based hybrid composites. The hybrid composite consists of glass and epoxy reinforced with silica nanoparticles. A unit cell-based micromechanical model is applied in two steps to extract the overall creep-recovery strain response of silica/epoxy nanocomposite and silica/glass/epoxy hybrid nanocomposite. The representative volume element consists of three phases: matrix, interphase, and reinforcement, with nonlinear viscoelastic, nonlinear viscoelastic or linear elastic, and linear elastic behavior, respectively. The Shapery nonlinear viscoelastic constitutive model is used. The interphase characteristics, including thickness and the behavioral model, dependent on the size, properties, and volume fraction of the nanoparticle, are considered. The results of the proposed method are compared with experimental results for validation. Also, a sensitivity analysis is performed by changing the number of subcells. The effects of the model parameters such as fiber and nanoreinforcement volume fraction, nanoreinforcement size, the interphase thickness and properties, and type of behavior, the applied loading level, and ambient temperature on the effective elastic and viscoelastic behavior, overall creep strain history, and overall creep-recovery response of the hybrid nanocomposite are investigated.

**Keywords:** Hybrid nanocomposite; Nonlinear viscoelastic behavior; Creep-recovery strain; Micromechanical modeling; Nanoparticle.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۷۳۹۳۲۴۵۹-۰۲۱؛ فکس: ۷۷۰۰۶۶۶۰

آدرس پست الكترونيك: mj\_mahmoudi@sbu.ac.ir

#### ۱– مقدمه

از مزیتهای مواد کامپوزیتی می توان به وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی، استحکام ویژه و عمر خستگی زیاد، و همچنین دارا بودن خاصیت جذب انرژی اشاره کرد. کامپوزیت-های زمینه پلیمری سهم بسزایی در صنایع حملونقل، دریایی، عمرانی، نظامی و هوایی ایفا میکنند [۱]. پلیمری بودن این مواد موجب رفتار ويسكوالاستيك يا خواص وابسته به زمان آنها میباشد. در مورد فلزات، هنگامی که دما تا حدود نیمی از دمای ذوب ماده افزایش یابد، اثرات ویسکوالاستیک ظاهر می شوند ولی مواد پلیمری در دمای اتاق هم رفتار ویسکو-الاستیک از خود نشان میدهند. از عوامل دیگری که بر رفتار وابسته به زمان مواد پلیمری تأثیر می گذارند، می توان به رطوبت و سطح تنش اشاره نمود. در سطوح تنش بالا، رفتار ویسکوالاستیک پیچیده و غیرخطی میشود. وجود رفتار وابسته به زمان در پلیمرها ناشی از ساختار مولکولی منحصر به فرد آنها است [١،٢]. بنابراین تحلیل رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیتهای زمینه پلیمری بهعنوان یک بخش از رفتار مكانيكي بلند مدت اين مواد، ضروري به نظر ميرسد.

مطالعات تجربی، تحلیلی و عددی متعددی در خصوص بررسى رفتار ويسكوالاستيك غيرخطى كامپوزيتهاى زمينه پلیمری انجام شده است. تاتل و برینسون [۲] رفتار ويسكوالاستيك كامپوزيت گرافيت/اپوكسى را با روش آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در حوزه مدلسازی، شافر و آدام [۳] با استفاده از مدلسازی میکرومکانیکی المان محدود رفتار ويسكوالاستيك غيرخطى زمينه اپوكسى تقويتشده با الیاف تکجهته را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در بارگذاری عرضى پاسخ كامپوزيت را تحت سطوح مختلف تنش پيشبيني نمودند. ابودی [۴] با روش سلولی پاسخ ویسکوالاستیک کامپوزیت زمینه پلیمری را مورد مطالعه قرار داد. زمینه پلیمری با مدل ویسکوالاستیک غیرخطی شیپری [۵] مدل شد. حاج على و مولييانا [۶] نيز با روش سلولى اثرات جهت الياف را بر پاسخ ويسكوالاستيك كامپوزيت گرافيت/اپوكسي مورد مطالعه قرار دادند. الياف بعنوان يک ماده ايزوتروپ عرضي و زمينه بعنوان يک ماده ويسکوالاستيک غيرخطي مطابق مدل شیپری درنظر گرفته شدند. زاتوس و پاپانیکولاو [۷] اثرات پیشبار را بر رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیت مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در سطوح تنش بالا پاسخ کامپوزیت

کاملاً غیرخطی شده و جهت طراحی مطمئن و بهینه بایستی این رفتار در مدلسازی منظور شود. درویزه و همکاران [۸] نیز بر روی اثرات فاز میانی بر رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیتهای چند فازی زمینه پلیمری مطالعهای انجام دادند. المان حجمی نماینده کامپوزیت شامل سه بخش الیاف، فاز میانی و ماتریس بود و برای تعریف مدل ویسکوالاستیک از رابطهی شیپری استفاده شده است. نتایج نشان داد که تأثیر فاز میانی در بارگذاریهای محوری بر روی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیتها قابل چشمپوشی میباشد.

خزش یکی از اثرات خاصیت ویسکوالاستیک بوده، و در قطعات مختلف، گذر زمانهای طولانی باعث ایجاد پدیدهی خزش در مواد کامپوزیتی می گردد. رفیعی و مظهری [۹] بر روى رفتار خزشى كامپوزيت رزين فنوليك تقويتشده با پارچه بافته شده از الیاف بازالت به صورت تجربی بررسی انجام داده اند. آنها نمونههای خود را در دماهای ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد تحت دو بارگذاری مکانیکی با مقادیر ۲/۸ و ۶/۵ مگا پاسکال تحت آزمایش قرار دادهاند و پارامترهایی نظیر نرخ کرنش، عمر و مکانیزم گسیختگی را بررسی نمودهاند. پاسریچا و همکاران [۱۰] پاسخ خزشی کامپوزیت زمینه پلیمری را تحت بارگذاری ترمومکانیکی متناوب با روش آزمایشگاهی استخراج کردند. پاپانیکولو و همکاران [۱۱] رفتار ويسكوالاستيك پليمر تقويتشده با الياف را به روش آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها کرنش خزش-بازیافت برحسب زمان را تحت سطوح مختلف تنش بدست آوردند. اثرات جهت الياف بر پاسخ ويسكوالاستيك كامپوزيت زمینه پلیمری با روش آزمایشگاهی در مرجع [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است.

نوع بارگذاری یکی دیگر از عواملی است که در رفتار ویسکوالاستیک ماده تأثیرگذار است. هانگ و گروهش [۱۳] بر روی تنش وابسته به زمان چندلایههای کامپوزیتی متقارن تحت بارگذاری کششی تکمحوره بررسی انجام دادند. خواص ویسکوالاستیک بهوسیلهی مدل ماکسول برای لبه آزاد چند-لایه کامپوزیتی بیان شد. معادلات تحلیلی به فرم انتگرالی برای ناحیهی ویسکوالاستیک خطی آمد. نتایج حل تحلیلی به وسیله شبیهسازی سهبعدی برای لایهچینیهای مختلف چندلایه در نرمافزارهای تجاری اعتبارسنجی شده است.

یکی از کاربردهای چندلایههای کامپوزیتی استفاده از آن-ها در صفحات ساندویچی بوده که خواص ویسکوالاستیک در این موارد نیز می تواند از اهمیت خاصی بر خوردار باشد. گالوپی و رویر-کارفگنی [۱۴] از روش تحلیلی مسئله وابسته بودن خصوصیات به زمان را برای یک تیر چندلایه با تکیهگاه ساده استفاده کرده است. در معادلات حاکم برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک از سری پرونی متشکل از المانهای ماکسول استفاده شده است. دو لایه از ماده کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه بوده که با ماده پلیمری ویسکوالاستیک به یکدیگر چسبیدهاند. آنها این مدل را برای دو حالت درنظر گرفته و با يكديگر مقايسه مي كنند. اولين حالت با درنظر گرفتن مدول الاستیسیته معادل برای لایه وسط و حالت دوم با درنظر گرفتن خصوصیات ویسکوالاستیک لایه میانی می باشد. پس از مقایسه نتایج این دو حالت و شبیهسازی حالات در نرمافزارهای عددی دریافتند که درنظر نگرفتن خواص ویسکوالاستیک باعث ایجاد خطا در نتایج شبیهسازی نسبت به نتایج تجربی می گردد.

یانگ و همکاران [۱۵] بر روی عملکرد ارتعاشی و جذب انرژی صفحات ساندویچی با هسته هرمی و رویه ترکیبی از الیاف کربن و لایهای با خواص ویسکوالاستیک بررسی انجام دادهاند. صفحات ساندویچی با ضخامتهای مختلف لایه ویسکوالاستیک به روش قالب گیری با پرس گرم ساخته شده-اند. برای روند حل، یک مدل تحلیلی بر اساس نظریه انرژی کرنشی مودال بهمنظور استفاده در نرمافزار آباکوس ارائه گشت. چندین حالت آزمون مودال برای بدست آوردن رفتار ارتعاشی و جذب انرژی در دو حالت وجود و نبود لایه ویسکوالاستیک انجام شده است. درنهایت مشاهده شد که در اثر وجود لایه ویسکوالاستیک ضریب اتلاف چند لایه افزایش چشم گیری دارد

استفاده از این نوع مواد کامپوزیتی که فاز تقویت کننده آن در مقیاس نانومتری است، مانند نانو ذرات سیلیکا، نانو الیاف کربن، نانو صفحات گرافن و نانوتیوب کربنی، با توجه به خواص مکانیکی [۱۶،۱۷]، حرارتی [۱۸] و الکتریکی [۱۹] بسیار مناسب آنها در مقایسه با مواد کامپوزیتی مرسوم که فاز تقویت کننده آن در مقیاس میکرو بوده، رو به رشد است. ذراتی که چنین ابعادی دارند دارای خواصی متفاوت از ذرات مقیاس-های بزرگتر هستند زیرا دارای نسبت سطح به حجم بیشتری هستند و تعداد بیشتری از آنها در حجمی برابر میتواند قرار

گیرد. ثابت شده است که این تقویت کنندهها با داشتن کسر حجمی یا وزنی بسیار کم، میتوانند به طور قابل توجهی سفتی و مقاومت مواد پایه یا بستر پلیمری را افزایش دهند.

در مطالعه حاضر، یک تحلیل سلسله مراتبی جهت بررسی تأثير اضافه كردن نانوتقويت بر رفتار خزشي و ويسكوالاستيك غيرخطى كامپوزيت پليمرى تقويتشده با الياف، و همچنين تأثیر دما بر رفتار خزشی این نوع نانوکامپوزیت هیبریدی ارائه می شود. ابتدا از یک مدل میکرومکانیکی تحلیلی سه بعدی براى پيشبينى پاسخ مؤثر خزش-بازيافت نانوكامپوزيت پايه پلیمری تقویت شده با نانو ذرات سیلیکا استفاده می شود. در مدلسازی میکرومکانیکی نانوکامپوزیت، ناحیهی فاز میانی به دلیل وجود واکنشهای شیمیایی و نیروهای واندروالس بین فاز تقویت کننده و زمینه درنظر گرفته می شود [۲۰-۲۳]. همچنین جدایش اتصال بین اجزاء در مدل حاضر مشابه مراجع [۲۸–۲۴] و همچنین در واقعیت تجربی [۲۹] وجود ندارد. در مرحلهٔ دوم مدلسازی سلسله مراتبی از مدل میکرومکانیک براى استخراج رفتار نانوكامپوزيت هيبريدى اليافى زمينه پلیمری استفاده می شود. در بخش ۲، مدل ساختاری شیپری و معادلات میکرومکانیکی سلول واحد برای یک المان حجمی نماینده کامپوزیت چند فازی ارائه می گردد. در بخش ۳، ابتدا چند اعتبار سنجی به منظور اطمینان از صحت مدل ارائه می شود، و پس از آن اثرات خواص الاستیک و ضخامت فاز میانی، سطح تنش بارگذاری، درصد حجمی نانوذره و الیاف، و تأثیر دما بر رفتار خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی بررسی می-شود. نوآوری این مقاله در کلیت، شامل ارائه یک استراتژی برای استخراج پاسخ ویسکوالاستیک غیرخطی و رفتار خزش-بازیافت نانوکامپوزیتهای هیبریدی میباشد. در جزئیات، بررسی اثرات دما، سطح تنش اعمالی، نوع رفتار فاز میانی و نحوه آرایش نانوتقویت بر رفتار خزش-بازیافت نانوکامپوزیت، و همچنین وابستگی ضخامت فاز میانی به محتوای نانوتقویت از نكات بارز اين تحقيق ميباشد.

### ۲- مدلسازی و تحلیل

در این بخش، ابتدا رابطهٔ ساختاری ویسکوالاستیک غیرخطی شیپری بیان می گردد. سپس مدلسازی میکرومکانیکی تشریح می گردد. در ادامه مشخصههای فازمیانی اطراف نانوذرات بیان می شود، و در نهایت فرایند کلی مدلسازی سلسله مراتبی رفتار

کلی خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی جمعبندی می-گردد.

۲-۱- روابط ساختاری ویسکوالاستیک غیرخطی برای مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی فاز زمینهٔ کامپوزیت زمینه پلیمری، از معادله ساختاری شیپری به صورت زیر استفاده میشود [۳۰].

$$\varepsilon(t) = g_0^{\sigma(t)} D_0 \sigma(t) + g_1^{\sigma(t)} \int_0^t \Delta D(\psi^t - \psi^\tau) \frac{\partial g_2^{\sigma(\tau)} \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$
(1)

که  $D_0$  مقدار نرمی آنی در زمان صفر t=0 و  $\psi$  زمان مؤثر می باشد. در رابطهٔ (۱)، پارامتر  $\psi$  به صورت زیر داده میشود:

$$\tau = t - \Delta t$$
  

$$\psi^{t} \equiv \psi(t) = \int_{0}^{t} \frac{d\xi}{a_{\sigma}^{\sigma\xi} a_{T}^{T}}$$
  

$$\Delta \psi^{t} = \frac{\Delta t}{a_{\sigma} a_{T}}$$
(7)

همچنین، Δ*D* مؤلفهی نرمی وابسته به زمان بوده که از تابع نمایی سری پرونی با *N* جمله برای توصیف آن به صورت زیر استفاده میشود:

$$\Delta D(\psi^t) = \sum_{n=1}^{N} D_n \left[ 1 - e^{-\lambda_n \psi^t} \right] \tag{7}$$

که  $n \cdot D_n$  امین ضریب سری پرونی و  $n \cdot c$ زمان تأخیر، و هر دو پارامتر مستقل از تنش میباشند [۳1]. *90 یا 22 و 2*۵ نیز پارامترهای مستقل از زمان ولی وابسته به تنش هستند. در واقع اثرات غیرخطی رفتار ویسکوالاستیک پلیمر توسط این چهار پارامتر تعریف میشود [۳۱]. فاکتور دما *تa* مستقل از زمان و تنش و مقدار آن در طول آزمایش برای هر دمایی ثابت میباشد [۳۲]. این پارامترها بصورت رابطهٔ (۴) بیان می شوند [۳7].

$$g_0 = 1 + \sum_{i=1}^{n_{g_0}} \alpha_i \left\langle \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} - 1 \right\rangle^i, \tag{f}$$

$$g_{1} = 1 + \sum_{\substack{i=1\\n_{g_{2}}}}^{n_{g_{1}}} \beta_{i} \left\langle \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{0}} - 1 \right\rangle^{i}$$

$$g_{2} = 1 + \sum_{\substack{i=1\\n_{a_{\sigma}}}}^{n_{g_{2}}} \gamma_{i} \left\langle \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{0}} - 1 \right\rangle^{i},$$

$$a_{\sigma} = 1 + \sum_{\substack{i=1\\n_{a_{\sigma}}}}^{n_{a_{\sigma}}} \delta_{i} \left\langle \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{0}} - 1 \right\rangle^{i}$$

$$a_{T} = exp \left[ \frac{C_{1}(T - T_{0})}{C_{2} + (T - T_{0})} \right],$$

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & x > 0\\ 0 & x \le 0 \end{cases}$$

در روابط (۴)،  $\sigma_{eq}$  تنش معادل هر سلول زمینه است که بعد از هر بازه زمان  $\Delta t$  از رابطهی فون مایزز محاسبه میشود.  $\sigma_0$  نیز حد تنش مؤثر میباشد که از آزمایش کشش بدست آمده، و ماده مورد نظر در بالاتر از این مقدار رفتار غیرخطی از خود نشان میدهد. همچنین،  $\beta_i$ ،  $\alpha_i$  و  $\delta$  پارامترهایی هستند که از نتایج آزمایشگاهی بدست میآیند [۳۱].  $\Omega$  و  $\Omega$  ثوابت بدستآمده از نتایج آزمایشگاهی برای مواد زمینه هستند و  $T_0$ دمای مرجع برای هر ماده پلیمری است [۳۳–۳۲].

با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطهی (۱)، یک فرم بازگشتی برای قسمت انتگرالی معادله بدست میآید. بنابراین کرنش کل در زمان حاضر از رابطهٔ (۵) بدست میآید.

$$\varepsilon(t) = \left(g_0^t D_0 + g_1^t g_2^t \sum_{n=1}^N D_n \left[1 - \frac{1 - e^{-\lambda_n \Delta \psi^t}}{\lambda_n \Delta \psi^t}\right]\right) \sigma(t) - g_1^t \sum_{n=1}^N D_n \left(e^{-\lambda_n \Delta \psi^t} q_n^{t-\Delta t} - \frac{1 - e^{-\lambda_n \Delta \psi^t}}{\lambda_n \Delta \psi^t} g_2^{t-\Delta t} \sigma(t - \Delta t)\right)$$

$$(\Delta)$$

$$\varepsilon_{f}(t) = (1 + v_{m})S_{p}(t)\sigma_{f}(t) - v_{m}S_{p}(t)\sigma_{ll}(t) + (1 + v_{m})R_{f}(t) - v_{m}R_{ll}(t)$$
(7)  
$$f = 11,22,33$$

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۲

که  $\sigma_f \in \sigma_f$  و  $\sigma_f$  مؤلفههای تنش و کرنش در زمان f هستند. در رابطهٔ (۶)، نسبت پواسون زمینه  $v_m$  مستقل از زمان فرض می-شود [۳۳–۲۹]. ماتریس نرمی ( $S_p$ ) نیز به صورت رابطهی (۷) نوشته میشود:

$$S_p(t) = g_0^t D_0 + g_1^t g_2^t \sum_{n=1}^N D_n \left[ 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_n \Delta \psi^t}}{\lambda_n \Delta \psi^t} \right]$$
(Y)

$$R_{f}(t) = -g_{1}^{t} \sum_{n=1}^{N} D_{n} \left( e^{-\lambda_{n} \Delta \psi^{t}} q_{n,f}^{t-\Delta t} - \frac{1-e^{-\lambda_{n} \Delta \psi^{t}}}{\lambda_{n} \Delta \psi^{t}} g_{2}^{t-\Delta t} \sigma_{f}(t-\Delta t) \right)$$
(A)

انتگرال موروثی برای هر بخش از سری پرونی در انتهای زمان حاضر (q<sup>r</sup>nf) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} q_{n,f}^{t} &= e^{-\lambda_{n}\Delta\psi^{t}} q_{n,f}^{t-\Delta t} - \frac{1 - e^{-\lambda_{n}\Delta\psi^{t}}}{\lambda_{n}\Delta\psi^{t}} \\ &\times \left(g_{2}^{t}\sigma_{f}(t) - \right. \end{aligned} \tag{9}$$

## ۲-۲- مدلسازی میکرومکانیکی

مدل سلول واحد از جمله مدل های میکرومکانیکی تحلیلی با فرضیات ساده شوندهٔ هندسه کامپوزیت ها میباشد [۲۴-۲۶، ۱۳۴]. این مدل دارای ریاضیات ساده و بر پایه مقاومت مصالح است که پارامترهای سطح میکرو به سادگی در آن مدل می-شوند، و در عین حال تطابق خوبی بین نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی دیده میشود [۳۵]. روش سلولی [۳۷، ۳۶] و روش سلولی تعمیم یافته [۳۹، ۳۸] نیز جزء معروفترین مدل-های سلول واحد هستند. به منظور کاهش محاسبات و زمان تحلیل در عموم مدل های میکرومکانیک، کوچکترین بخش تکرار شونده که در عین حال جامع اطلاعات می باشد، به عنوان المان حجمی نماینده در نظر گرفته میشود و در واقع تمام خواص و رفتار کامپوزیت و المان حجمی نماینده یکسان فرض

<sup>1</sup> hereditary

میشوند. در مدل سهبعدی حاضر، توزیع تقویت در زمینه بصورت تصادفی در نظر گرفته میشود.

شکل ۱ شماتیک المان حجمی نماینده کامپوزیت در مدل میکرومکانیک حاضر را نشان می دهد. در این شکل، زیرسلول-های تقویت، فازمیانی و زمینه به ترتیب با رنگهای مشکی، خاکستری و سفید نشان داده شدهاند. از نظر ابعاد المان حجمی نماینده، طول اضلاع  $Lr \ Lc \ th$  و Lr به ترتیب در راستاهای ۱، ۲ و ۳ در نظر گرفته می شود، و این اضلاع به ترتیب به r و hقسمت برای هر زیرسلول تقسیم می گردند. متغیر شمارنده نیز در راستای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با  $i \ j \ e$  نشان داده می شود. هر زیرسلول با نام گذاری شده و ابعاد هر یک در جهات ۱، ۲ و  $T \ a_i \ b_j \ a_i$ 



شکل ۱- المان حجمی مدل سلول واحد برای نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو ذره و کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با الیاف

در این مرحله دو شرط لحاظ می گردد. تغییرات جابجایی در داخل زیرسلولهای المان نماینده خطی لحاظ می گردد که منجر به تنش و کرنش ثابت در هر زیرسلول می شود. در مطالعات قبلی نشان داده شده است که چنین فرضی از دقت کافی برای مدلسازی کامپوزیتها برخوردار می باشد [۰۰، ۲۷]. همچنین جدایش اتصال بین تقویت و زمینه پلیمری در مدل حاضر مشابه مراجع [۲۲–۲۶] و همچنین در واقعیت تجربی [۲۹] وجود ندارد.

به منظور تعیین خواص مکانیکی وابسته به زمان کامپوزیت و بررسی رفتار ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت هیبریدی، المان حجمی نماینده تحت بارگذاری سه محوره قرار می گیرد. حالت تنش داخل نمونه در مختصات اصلی ماده، شامل سه مؤلفهی تنش داخل نمونه در مختصات اصلی ماده، شامل سه مؤلفهی تنش داک 22 و 33 بهترتیب در جهات ۱، ۲ و ۳ میباشد. فرض میشود که تنشهای نرمال وارده بر المان نماینده حجمی ماده مرکب هیچ گونه تنش برشی داخل آن ایجاد نمی کند و بالعکس [11]. از تعادل تنشهای میکرو در زیرسلولها و تنشهای ماکروی اعمالی در مرز المان نماینده، رابطهٔ (۱۰) بدست میآید.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} a_i b_j \sigma_{11}^{ij1} = L_c L_r S_1 \\ \sum_{k=1}^{h} \sum_{j=1}^{r} d_k b_j \sigma_{22}^{1jk} = L_r L_h S_2 \\ \sum_{i=1}^{c} \sum_{k=1}^{h} a_i d_k \sigma_{33}^{i1k} = L_c L_h S_3 \end{cases}$$
(1.)

$$\begin{cases} \sigma_{11}^{ij1} = \sigma_{11}^{ijk} , & (k > 1) \\ \sigma_{22}^{1jk} = \sigma_{22}^{ijk} , & (i > 1) \\ \sigma_{33}^{i1k} = \sigma_{33}^{ijk} . & (j > 1) \end{cases}$$
(11)

با فرض اتصال کامل زیرسلولها، تغییر مکان المان نماینده در یک جهت برابر مجموع تغییر مکان زیرسلولهای یک ردیف در همان جهت است. لذا رابطه بین کرنش کل المان حجمی و کرنش زیرسلولها به صورت رابطه (۱۳) بدست میآید.

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{h} d_k \varepsilon_{11}^{11k} = \sum_{k=1}^{h} d_k \varepsilon_{11}^{ijk} = L_h \overline{\varepsilon}_{11}, (i \times j \neq 1) \\ \sum_{i=1}^{c} d_i \varepsilon_{22}^{i11} = \sum_{i=1}^{c} d_i \varepsilon_{22}^{ijk} = L_c \overline{\varepsilon}_{22}, (i \times j \neq 1) \\ \sum_{j=1}^{r} b_j \varepsilon_{33}^{1j1} = \sum_{j=1}^{r} b_j \varepsilon_{33}^{ijk} = L_r \overline{\varepsilon}_{33}, (i \times j \neq 1) \end{cases}$$

که در این رابطه 
$$\overline{e}_{11}$$
،  $\overline{e}_{23}$  و  $\overline{e}_{33}$  کرنش کلی المان  
حجمی نماینده به ترتیب در جهات ۲، ۲ و ۳ است.

رابطهی بین تنش و کرنش زیرسلولهای شامل فاز تقویت کننده بصورت رابطهٔ الاستیک خطی (۱۳) میباشد:

$$[\varepsilon]^{ijk} = [S]^{ijk} [\sigma]^{ijk} \tag{17}$$

که ۵، ماتریس نرمی الاستیک زیرسلول های ماده تقویت-کننده است.

برای فاز زمینه از معادلات ساختاری غیرخطی شیپری ارائه شده در بخش ۲–۱ استفاده میشود.

با ترکیب معادلات (۶)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) در حالت بارگذاری نرمال دستگاه معادلات، m معادله m مجهولی مطابق رابطه (۱۴) بدست میآید [۴۲].

$$\begin{split} & [A]_{m\times m}\{\sigma\}_{m\times 1} = [F]_{m\times 1} + \{H\}_{m\times 1} \\ & (m=cr+rh+ch) \end{split}$$

در رابطهی (۱۴)، ماتریس A شامل ضرایب هندسی و پارامترهای اجزای سازندهی کامپوزیت، بردار  $\sigma$  شامل تنش-های میکرو در زیرسلولها، بردار F شامل نیروی خارجی وارده بر المان حجمی نماینده و بردار H انتگرال موروثی میباشد. با حل دستگاه (۱۴) در هر لحظه از زمان، مقدار میکروتنشهای در هر زیرسلول بدست میآید. با جایگذاری این تنشها در رابطهی (۶) برای زیرسلولهای فاز زمینه و معادلهی (۱۳) برای زیرسلولهای فاز تقویت کننده، کرنشهای میکرو متناظر برای هر زیرسلول بدست میآیند. سپس با جایگذاری کرنشهای میکرو در معادله (۱۲) کرنش ماکرو در زمان t برای راستای مورد نظر محاسبه میشود.

#### ۲-۳-مشخصههای فاز میانی اطراف نانو ذرات

مقدار مدول الاستیسیته فاز میانی E<sub>i</sub>، ثابت و به صورت تابعی از مدول الاستیسیته نانو ذره E<sub>NP</sub> و مدول الاستیسیته ماده پلیمر E<sub>PM</sub> فرض و به صورت رابطهٔ (۱۵) بیان می شود [۴۳].

$$E_i = \alpha E_{PM} + (1 - \alpha) E_{NP} \tag{10}$$

مقدار  $\alpha$  در این رابطه ثابت است، و به خواص سطح نانوذره بستگی دارد. در مطالعه حاضر، مقدار  $\alpha$  برابر ۰/۹۷۵۶ در نظر

گرفته میشود. ضخامت فاز میانی ti تابعی از کسر حجمی نانوذره fNP به صورت زیر است [۴۳].

 $t_i = -3.006(\ln f_{NP}) - 3.3981 \tag{19}$ 

در این پژوهش، مقدار نسبت پوآسون فاز میانی برابر مقدار نسبت پوآسون ماده زمینه در نظر گرفته می شود (۲۳، ۲۲].

# ۲-۴- فرایند مدلسازی سلسله مراتبی نانوکامپوزیت هیبریدی

در شکل ۲، شماتیک رویهٔ کلی مدلسازی رفتار غیرخطی خزش-بازيافت نانوكامپوزيت هيبريدى سيليكا/شيشه/اپوكسى نشان داده شده است. در مرحله اول، نانوذرات سیلیکا به همراه فازمیانی اطراف نانوذرات و زمینه اپوکسی مورد توجه قرار می-گیرند. مدل میکرومکانیکی سلول واحد تشریح شده در بخش ۲-۲ روی این سه فاز اعمال شده، و رفتار نانوکامپوزیت زمینه پلیمری سیلیکا/اپوکسی بدست میاید. در این مرحله، برای بیان رفتار غیرخطی زمینه از معادلات ساختاری بخش ۲-۱ استفاده می شود. مشخصه های فازمیانی نانوذرات-پلیمر شامل ضخامت و مدل الاستيسيته و همچنين رفتار ويسكوالاستيسته مربوطه مطابق بخش ۲-۳ در نظر گرفته می شود. در مرحله دوم، نانوكامپوزيت پليمرى بعنوان زمينه و الياف بعنوان تقويت درنظر گرفته شده، و بار دیگر، مدلسازی میکرومکانیکی سلول واحد روی این دو فاز اعمال می گردد. بدیهی است که در این مرحله ضخامت فاز میانی در مدلسازی میکرومکانیکی و نشان داده شده در شکل ۱، صفر درنظر گرفته می شود.



شکل ۲- شماتیک مراحل طریقهٔ مدلسازی رفتار نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی

### ۳- نتایج و بحث

در ابتدا به منظور صحتسنجی مدل میکرومکانیکی حاضر، مقایسهای بین نتایج تجربی و مدل میکرومکانیکی ارائه شده روی پاسخ ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیت دوفازی انجام میگیرد. کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با گرافیت ٪۶۵ حجمی در نظر گرفته میشود. ضرایب سری پرونی برای اپوکسی در جدول ۱ آورده شده است. برای اپوکسی، مدول الاستیسیته، نسبت پوآسون، نرمی الاستیک آنی و حد تنش مؤثر به ترتیب برابر ۶/۶ GPa، ۳/۰۰، ۲۰۲۹ GPa<sup>1</sup> و MPa مؤثر به ترتیب برابر ۶/۶ GPa، ۵/۰۰، ۲۰۲۹ GPa، و م مؤثر به ترتیب برابر ۱۳]. گرافیت نیز به عنوان یک مادهٔ ایزوتروپ عرضی (اشاره به ماتریس نرمی مربوطه در رابطهٔ ایروتروپ و عرضی (اشاره به ماتریس نرمی مربوطه در رابطهٔ اینبت پوآسون طولی و عرضی برای گرافیت به ترتیب برابر GPa [۳]]

جدول ۱- ضرایب سری پرونی برای ماده اپوکسی [۳۱]

<sup>نرمی خ</sup> زشی D <sub>n</sub> (× 10 <sup>-6</sup> MPa <sup>-1</sup> )	زمان تأخیر λ <sub>n</sub> (sec <sup>-1</sup> )	شماره
٨/۵٠	١	١
٨/٣۶	•/\	٢
۵/۵ -	•/• )	٣
۳۳/۸۰	•/•• ١	۴

در شکل ۳، رفتار کلی خزشی کامپوزیت گرافیت/اپوکسی پیش بینی شده توسط مدل سازی میکرومکانیکی حاضر و نتایج تجربی [۲] برای سه سطح تنش ۱۲، ۱۵/۶ و ۲۰/۷ مگاپاسکال در دمای اتاق ارائه شده است.



چنانکه از شکل ۳ نتیجه گیری می شود، مطابقت خوبی بین نتایج مدل ارائه شده و دادههای آزمایشگاهی [۲] دیده میشود. همچنین، با افزایش سطح تنش، فاز زمینه اپوکسی تغییرشکل خزشی بیشتری از خود نشان داده، و در نتیجه رفتار معقولانهٔ افزایش کرنش کلی خزشی در طی زمان با افزایش سطح تنش وارده در شکل مشاهده میشود، که هر دو این موارد تأیید کننده اعتبار مدل ارائه شده میباشد.

بعنوان یک اعتبارسنجی دیگر، برای ماده PMMA، المان حجمی نماینده با خواص ایزوتروپ تحت چند سطح بار گذاری قرار می گیرد. در این مدلسازی، ضریب دما برابر واحد و حد تنش مؤثر PMMA، PMAA میباشد [۳۰]. نرمی الاستیک اولیه برابر (MPa<sup>-1</sup>) میاشد [۳۰] و می شود، و ضرایب سری پرونی و نرمی الاستیک آنی برای این ماده در جدول ۲ ارائه شده است [۳۰]. مدت زمانی که ماده تحت کرنش خزش میباشد برابر ۱۸۰۰ و زمان بازیافت کرنش برابر s میشود.

جدول ۲- ضرایب سری پرونی برای پلیمر PMMA [۳۰]

$\rm D_n \times 10^{-6} (MPa^{-1})$	$\lambda_n(s^{-1})$	شماره
<b>۲۳/۶۳۵</b> λ	١	١
۵/۶۶۰۲	11	٢
۱۴/۸۴۰۵	۱۲	٣
ነ አ/አአዮአ	۱۳	۴
27/0727	۱۴	۵
۴۰/۰۵۶۹	۱۰-۵	۶
8./4220	<i>۱۰</i> -۶	٧
V9/8FVV	١٧	٨
<i><b>١</b>۶٢/١٧٩٠</i>	۱۷	٩

شکل ۴ تاریخچه زمانی رفتار خزش-بازیافت PMMA خالص بدست امده از مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی [۳۱] را در سه سطح تنش اعمالی ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال نشان میدهد.

همانطور که از شکل ۴ مشاهده می شود، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از مدل سازی حاضر با داده های تجربی [۳۱] در سطوح مختلف تنش وجود دارد. همچنین می توان تغییرات قابل توجه و معقول پاسخ خزش-بازیافت PMMA را با افزایش سطح تنش اعمالی از ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال را مشاهده نمود.



تنش اعمالی ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال

در ادامهٔ مقاله، به سیستم اصلی کامپوزیت مورد نظر این مقاله پرداخته می شود، و رفتار کلی ویسکوالاستیک غیرخطی نانوکامپوزیت هیبریدی پایه اپوکسی تقویتشده با نانوذرات سیلیکا و الیاف بلند شیشه که خواص الاستیک این اجزاء در جدول ۳ آمده، بررسی میشود.

جدول ۳- خواص الاستیک اجزای سازنده نانوکامپوزیت هیبریدی [۳۱،۲۲،۴۳]

نسبت پواسون	مدول الاستيسته (GPa)	مادہ	
•/77	۲۲/۴	فيبر شيشه	
•/٣٣	$\lambda\lambda/Y$	نانوذره سيليكا	
۰/۳۵	٣/٢٧	پليمر اپوكسى	

بطور پیش فرض، مگر اینکه غیر از این تصریح شود، مقدار درصدحجمی الیاف شیشه، نانوذرات سیلیکا و قطر ذرات، به ترتیب برابر با ٪۵۰، ٪۵ و mn ۲۵ در نظر گرفته می شود. همچنین مقدار مدول الاستیسته و ضخامت فاز میانی از روابط (۱۵) و (۱۶) برای ۹/۹۷۵۶ م به ترتیب برابر GP۵ ۵۳۵۵ و mn (۱۵) مرابر ۹/۹۵ و ma ۵/۶۰۷ و ما از روابط (۴) محاسبه می شوند. همچنین، حد تنش مؤثر اپوکسی برابر MP۵ محاسبه می شوند. همچنین، حد تنش مؤثر اپوکسی برابر ۹/۹۵ محاسبه می شوند. همچنین، حد تنش مؤثر اپوکسی برابر ۹/۵ محاسبه می شوند. همچنین، حد تنش مؤثر اپوکسی برابر ۹/۵ تا یز برابر ضرایب سری پرونی ماده زمینه درنظر گرفته می شوند. بعلاوه، مقدار فاکتور دما *Ta* به جز در حالتی که تأثیر دما نیز برابر ضرایب سری پرونی ماده زمینه درنظر گرفته می شوند. بررسی شود، برابر واحد فرض می شود. زمان خزش و زمان تأثیر پارامترهای مختلف بررسی می شود. زمان خزش و زمان بازیافت کرنش نمونه نیز هر دو برابر ۲۰۰۶ در نظر گرفته می شود.

ابتدا با استفاده از مدلسازی میکرومکانیکی سهبعدی مورد نظر، خواص الاستیک نانوکامپوزیت شامل فاز تقویت کننده نانوذره، فاز میانی و زمینه استخراج می شود. در این مرحله، فاز میانی به صورت ماده ویسکوالاستیک غیر خطی در نظر گرفته می شود. ضرایب سری پرونی فاز میانی برابر ضرایب سری پرونی زمینه در نظر گرفته می شود.

در شکل ۵، اثرات نوع رفتار فاز میانی سیلیکا//پوکسی شامل فازمیانی الاستیک (بدون وابستگی به زمان) و ویسکوالاستیک بر مدول الاستیسته مؤثر کلی نانوکامپوزیت سیلیکا//پوکسی با ٪۵ حجمی نانوسیلیکا نشان داده شده است.



از شکل ۵ مشاهده میشود که نوع رفتار فاز میانی شامل الاستیک یا ویسکوالاستیک بر مدول الاستیسیته کلی نانوکامپوزیت با گذشت زمان تأثیر بسزایی دارد. با گذشت زمان به اندازه کافی، مدول الاستیسته کلی نانوکامپوزیت با فاز میانی ویسکوالاستیک برابر ۵/۹۸ GP ۵/۹۸ و کمتر از مدول الاستیسیته نانوکامپوزیت شامل فاز میانی الاستیک پیش بینی میشود. می باشد. این کمتر بودن پاسخ رفتار کلی مدول یانگ با فرض رفتار ویسکوالاستیک فاز میانی به این دلیل است که از نظر رفتار ویسکوالاستیک فاز میانی به این دلیل است که از نظر ترکیب اختلاط فازهای ماده کامپوزیت، دو فاز زمینه و فاز ویسکوالاستیسیته نانوکامپوزیت شرکت دارند. لذا در ادامه، برای بررسی رفتار کلی ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت هیبریدی با استفاده از مدلسازی سلسله مراتبی حاضر، فاز میانی به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته میشود.

شکل۶ وابستگی نسبت پوآسون مؤثر نانوکامپوزیت سیلیکا/پوکسی با ٪۵ حجمی نانوسیلیکا را به نوع رفتار فاز میانی شامل الاستیک و ویسکوالاستیک نشان میدهد.



با توجه به شکل ۶، می توان گزارش کرد که مقدار نسبت پواسون کلی نانوکامپوزیت چندان متأثر از نوع رفتار فاز میانی نمی باشد، و در هر دو حالت، برابر ۲۳۳ می باشد. این رفتار می تواند به دلیل این فرض باشد که در مدلسازی حاضر مشابه مراجع [۲۲، ۲۲] مقدار نسبت پوآسون فاز میانی برابر مقدار نسبت پوآسون ماده زمینه در نظر گرفته شده است.

طی مدلسازی سلسله مراتبی تشریح شده در بخش ۲-۴، رفتار بدست آمده برای نانوکامپوزیت سیلیکا/پوکسی به عنوان خواص زمینه برای کامپوزیت تقویتشده با الیاف بلند شیشه در نظر گرفته میشود. درصد حجمی الیاف شیشه، مگر اینکه غیر از آن ذکر شود، ۵۰٪ میباشد.

به منظور بررسی اثر سطح تنش وارده بر پاسخ مؤثر خزش -بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی، نمونه تحت تنشهای با سطوح مختلف قرار می گیرد. شکل ۷ نتایج حاصل از اعمال بارگذاری عرضی وارد بر نانوکامپوزیت هیبریدی را در سطوح تنش اعمالی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ مگاپاسکال نشان میدهد.



چنانچه از شکل ۲ مشاهده می شود با افزایش سطح تنش، به دلیل وابستگی رفتار ویسکوالاستیسیته غیرخطی زمینه و فاز میانی در معادلات ساختاری شیپری بخش ۲-۱ به سطح تنش، کرنش مؤثر خزشی بیشتر می شود، و کرنش بازیافت مؤثر نانوکامپوزیت هیبریدی طی مدت زمان بیشتری به صفر میل می کند.

در این بخش، اثر مقدار اضافه کردن نانوذرات سیلیکا بر پاسخ زمانی مؤثر خزش-بازیافت نانوکامپوزیت تقویتشده با ۸۰٪ درصد حجمی الیاف شیشه مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۸ پاسخ مؤثر خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی را تحت تنش عرضی ۲۰ MPa در درصدهای حجمی نانوسیلیکا شامل، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۲۰ درصد، نشان داده شده است.



چنانچه از شکل ۸ مشاهده میشود، با افزایش محتوای نانوذرات سیلیکا، به دلیل عدم وابستگی به زمان رفتار و عدم رفتار ویسکوالاستیک برای فاز نانوتقویت، کرنش مؤثر خزشی نانوکامپوزیت هیبریدی کاهش مییابد، ولی کرنش بازیافت مؤثر آن در همهٔ مقادیر محتوای نانوذرات مورد بررسی تقریباً یکسان میباشد، و برای همهٔ نمونههای نانوکامپوزیت هیبریدی طی زمان یکسانی به صفر میل میکند. کاهش کرنش خزشی مذکور اثرگذاری ویژهٔ نانوذرات سیلیکا را بر ایمنی نمونهٔ نانوکامپوزیت هیبریدی نشان میدهد.

در این بخش، تأثیر قطر نانوذرات سیلیکا بر رفتار مؤثر خزش-بازیافت کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با ٪۵ حجمی نانوسیلیکا و ٪۵۰ حجمی الیاف شیشه تحت تنش عرضی اعمالی ۲۰ MPa بررسی میشود. شکل ۹ اثر تغییرات اندازه نانوذرات سیلیکا را بر کرنش مؤثر خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی نشان میدهد. در این بررسی، چهار قطر نانوذرات، شامل ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ نانومتر مدنظر قرار گرفته است.



با توجه به شکل ۹، میتوان نتیجه گیری کرد که افزایش قطر نانوذرات منجر به کاهش مقدار کرنش مؤثر خزشی می شود، ولی کرنش مؤثر بازیافت برای تمام مقادیر قطر نانوذره، با هم برابر و طی زمان یکسانی به صفر میل میکند.

یک مطالعهٔ پارامتری به منظور بررسی اثر کسر حجمی الیاف شیشه بر رفتار مؤثر نانوکامپوزیت هیبریدی تقویتشده با ٪۵ نانوسیلیکا، تحت تنش عرضی ۲۰ MPa صورت می گیرد. در شکل ۱۰، کرنش مؤثر خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی در شش کسر حجمی الیاف شیشه از ۱۰ تا ۶۰ درصد حجمی نشان میدهد.

نتایج شکل ۱۰ نشان میدهد که بطور معقولانهای به دلیل عدم وابستگی به زمانِ رفتار و عدم رفتار ویسکوالاستیک برای فاز الیاف شیشه با افزایش کسر حجمی الیاف شیشه، کرنش مؤثر خزشی نانوکامپوزیت هیبریدی کاهش مییابد، و همچنین کرنش مؤثر بازیافت کاهش مییابد و سریعتر به صفر میل می کند. این رفتار نیز میتواند بهعنوان مؤید صحّت کلّی فرایند مدلسازی سلسله مراتبی ارائه شده تلقی گردد.



نوع رفتار فاز میانی اطراف نانوذرات پاسخ مؤثر خزش-بازیافت کامپوزیت هیبریدی تقویت شده را تحت تأثیر قرار می دهد. در اینجا، اثر نوع رفتار فاز میانی شامل الاستیک یا ویسکوالاستیک بودن فاز میانی بر پاسخ مؤثر خزش-بازیافت نمونه هیبریدی تقویتشده با ٪۵ نانوذره و ٪۵۰ الیاف شیشه تحت تنش عرضی ۲۰ MPa مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۱۱ تاریخچه کرنش مؤثر خزش-بازیافت نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی را در سه حالت بدون فاز میانی، با فاز میانی الاستیک، و با فاز میانی ویسکوالاستیک را نشان میدهد.

چنانکه از شکل ۱۱ مشاهده میشود با فرض عدم وجود فاز میانی، کرنش کلی خزشی نانوکامپوزیت هیبریدی بیشترین مقدار را نسبت به وجود فاز میانی دارد. همچنین، کرنش خزشی در حالتی که فاز میانی با رفتار ویسکوالاستیک در نظر گرفته شود، بیشتر از حالتی است که فاز میانی با رفتار الاستیک لحاظ شود. این نتایج با رفتار اجزای نانوکامپوزیت همخوانی دارد، چرا که در حالت بدون فاز میانی، زمینه با رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی در پاسخ کلی نانوکامپوزیت اثر غالب را دارد، و با اضافه کردن فاز میانی ویسکوالاستیک و الاستیک (بدون وابستگی رفتار به زمان) خزش کلی کاهش مییابد. بعلاوه، مقدار کرنش خزشی در لحظه 0= ا برای هر سه حالت فاز میانی با هم برابر میباشد. همچنین، عدم وجود یا وجود فاز

میانی با هر نوع رفتاری، تأثیری بر مدت زمان صفر شدن کرنش بازیافت نمونه ندارد، و برای هر سه حالت کرنش بازیافت با هم برابر میباشد.



در اینجا یک مطالعه پارامتری دیگر روی اثر مشخصههای فاز میانی بر رفتار کلی خزش-بازیافت نمونه نانوکامپوزیت هیبریدی صورت می گیرد. در شکل ۱۲، اثر مقدار  $\alpha$  در رابطهٔ (۱۵) که متناظر تغییر مدول الاستیسیته فاز میانی است، بر رفتار کلی کرنش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی مورد بررسی قرار می گیرد. در این شکل، پنج مقدار مدول یانگ فاز میانی که گسترده ده برابر شدگی مدل را پوشش میدهد، مورد وارسی قرار گرفته است.

همانطور که از شکل (۱۲) مشاهده می گردد، با کاهش مقدار α، که متناظر افزایش مدول الاستیسیته فاز میانی (E<sub>i</sub>) میباشد، کرنش مؤثر خزش نانوکامپوزیت هیبریدی تحت تنش t=0 کاهش مییابد. کرنش خزشی در زمان 0= برای همهٔ مقادیر E<sub>i</sub> یکسان میباشد. همچنین، تغییر مدول الاستیسیته فاز میانی تأثیری بر مدت زمان کاهش کرنش بازیافت ندارد، و کرنش بازیافت برای همهٔ مقادیر مدول الاستیسیته فاز میانی، با هم برابر میباشد.





پارامتر مهم و مؤثر دیگر در رفتار ویسکوالاستیک نانوکامپوزیتها دمای محیط میباشد. اثر دمای محیط بر رفتار کلی خزش-بازیافت کامپوزیت هیبریدی مدنظر با استفاده از مدلسازی سلسله مراتبی حاضر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل، سه دمای محیط شامل ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد به همراه دمای مرجع ماده اپوکسی برابر C<sup>°</sup> ۱۸۰ تر در دو سطح تنش ۵ و ۳۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته است.



با توجه به شکل ۱۴، از دمای ۲۵°۵۲ اتاق تا ۲°۰۰۰، تاریخچهٔ کرنش مؤثر خزشی به صورت ثابت میباشد، و مقدار کرنش بازیافت پس از باربرداری به سرعت به صفر میل میکند.







۱۸۰ °C) برای دماهای نزدیک به دمای مرجع ماده اپوکسی ( $^{\circ}$  °C) = = $^{-1}$  و دماهای بالاتر، کرنش مؤثر خزش از لحظه 0=t تا انتهای مدت زمان خزش افزایش مییابد، و همچنین کرنش بازیافت طی زمان بیشتری نسبت به دماهای پایین به صفر میل می کند. این رفتار با توجه به حساسیت زمینه اپوکسی به تغییرت دما معقول میباشد. برای سطح پایین تنش، تفاوت اندکی بین کرنش خزش در دمای  $^{\circ}$  و  $^{\circ}$  ۱۰۰ مشاهده میشود.

در انتها، یک تحلیل حساسیت به مش با تغییر تعداد زیرسلولهای المان حجمی نماینده نانوکامپوزیت هیبریدی انجام میشود. از طریق این تحلیل همچنین میتوان اثر آرایش للیاف شامل توزیع اتفاقی و منظم مربعی را بر پاسخ کلی خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی بررسی کرد. شکل ۱۵ نتایج این تحلیل حساسیت به مش را با آرایش اتفاقی الیاف شامل ۱۰×۱۰، ۱۵×۱۵ و ۳۰×۳۰ زیرسلول، و آرایش مربعی الیاف با ۲×۲ زیرسلول نشان میدهد. از شکل ۱۵ مشاهده می-شود که با افزایش تعداد زیر سلولها کرنش خزش-بازیافت نسبت به المان چهار سلولی به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد. از آنجا که گسترش پیشرونده رفتار غیرخطی در المان نماینده در تعداد زیرسلول بالاتر نمایان میگردد. با افزایش تعداد مش، نتایج به مقدار واقعی همگرا میگردد. چنانکه از شکل ملاحظه می شود نتایج مربوط به تعداد مش ۱۵×۱۵ و



هیبریدی سیلیکا/شیشه/اپوکسی در بارگذاری ۲۰ مگایاسکال

۴- جمعبندی و نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدلسازی سلسله مراتبی جهت پیشبینی رفتار كلى خزش-بازيافت نانوكامپوزيت هيبريدى سيليكا/شيشه/اپوكسى بواسطة رفتار ويسكوالاستيك غيرخطى زمینهٔ اپوکسی ارائه شد. مدل ساختاری شیپری که اثرات دمای محیط را شامل می شود، برای زمینه اپوکسی و فاز میانی نانوسیلیکا/اپوکسی در نظر گرفته شده است. نتایج مدل با داده-های تجربی در دسترس مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. اثرات افزودن نانو تقویت کننده به کامپوزیت شیشه/اپوکسی و اثرات افزودن الياف شيشه به نانوكامپوزيت سيليكا/اپوكسي بر روى پاسخ کلی خزش-بازیافت کامپوزیت هیبریدی مطالعه شد. همچنین اثرات فاز میانی شامل مشخصههای رفتاری الاستیک و ويسكوالاستيك و مقدار مدول الاستيسيته و مشخصه هندسی مقدار ضخامت فاز میانی بر رفتار ویسکوالاستیک و خزش-بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی بررسی شد. استخراج نتایج معقول و قابل انتظار بر روی مطالعات پارامتری انجام شده در هر بخش مربوطه تأیید کننده صحت کارکرد مدلسازی ميكرومكانيكي سلسلهمراتبي غيرخطي ارائه شده ميباشد. نتایج و دستاوردهای حاصله از این مطالعه بطور کلی می تواند بصورت زير ليست شود:

- بر مبنای تحلیل حساسیت به مش (زیرسلول) صورت گرفته، که مؤید همگرایی و صحت کارکرد مدل می باشد، با افزایش تعداد زیرسلول کرنش مؤثر خزش-بازیافت افزایش مییابد.
- با افزایش محتوای هر فاز تقویت کننده (شیشه و سیلیکا)،
   کرنش مؤثر خزش و بازیافت نانوکامپوزیت هیبریدی
   کاهش مییابد.
- با افزودن کمی نانوذرات سیلیکا، کرنش خزش کلی نانوکامپوزیت هیبریدی تا حد زیادی کاهش مییابد.
- هر چند در آغاز بارگذاری میزان کرنش مؤثر خزشی نانوکامپوزیت برای فاز میانی الاستیک و ویسکوالاستیک یکسان است، ولی با افزایش زمان، کرنش خزشی با در نظر گرفتن فاز میانی ویسکوالاستیک بیشتر میباشد.
- اگر فاز میانی با رفتار الاستیک در نظر گرفته شود، مدّت زمان لازم برای اینکه کرنش بازیافت نانوکامپوزیت به صفر برسد، کاهش مییابد.

- [9] Rafiee R, Mazhari B (2016) Modeling creep in long fiber reinforced laminated composites using micromechanical rules. J Sci Technol Compos 3(4): 409–418.
- [10] Pasricha A, Turtle ME, Emery AF (1996) Timedependent response of IM7/5260 composites subjected to cyclic thermo-mechanical loading," Compos Sci Technol 56(1): 55–62.
- [11] Papanicolaou GC, Zaoutsos SP, Cardon AH (1999) Further development of a data reduction method for the nonlinear viscoelastic characterization of FRPs. Compos part A Appl Sci Manuf 30(7): 839–848.
- [12] Papanicolaou GC, Zaoutsos SP, Kontou EA, (2004) Fiber orientation dependence of continuous carbon/epoxy composites nonlinear viscoelastic behavior. Compos Sci Technol 64(16): 2535–2545.
- [13] Huang B, Kim HS, Wang J, Du J, Guo Y (2016) Time-dependent stress variations in symmetrically viscoelastic composite laminates under uniaxial tensile load. Compos Struct 142: 278–285.
- [14] Galuppi L, Royer-Carfagni G (2012) Laminated beams with viscoelastic interlayer. Int J Solids Struct 49(18): 2637–2645.
- [15] Yang J, Xiong J, Ma L, Wang B, Zhang G,Wu L (2013) Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal truss sandwich panels with viscoelastic layers. Compos Struct 106: 570–580.
- [16] Joshi N, Muliana A (2010) Deformation in viscoelastic sandwich composites subject to moisture diffusion. Compos Struct 92(2): 254–264.
- [17] Wei C, Srivastava D, Cho K (2002) Thermal expansion and diffusion coefficients of carbon nanotube-polymer composites. Nano Lett 2(6): 647– 650.
- [18] Seidel GD, Lagoudas DC, Mortazavi B, Bardon J, Ahzi S., (2009) A micromechanics model for the electrical conductivity of nanotube-polymer nanocomposites. J Compos Mater 43(9): 917–941.
- [19] Liu H, Brinson LC (2008) Reinforcing efficiency of nanoparticles: A simple comparison for polymer nanocomposites. Compos Sci Technol 68(6): 1502– 1512.
- [20] Yao Y., Chen S., and Chen P., 2013 "The effect of a graded interphase on the mechanism of stress transfer in a fiber-reinforced composite," Mech. Mater., vol. 58, pp. 35–54,.
- [21] Jiang Y, Guo W, Yang H (2008) Numerical studies on the effective shear modulus of particle reinforced composites with an inhomogeneous inter-phase. Comput Mater Sci 43(4): 724–731.
- [22] Boutaleb S. et al. (2009) Micromechanics-based modelling of stiffness and yield stress for silica/polymer nanocomposites. Int J Solids Struct 46(7-8): 1716–1726.

- اثرات ضخامت فاز میانی بر کرنش مؤثر خزشی بیشتر از کرنش مؤثر بازیافت می باشد.
- هرچه قطر نانوذرات تقویت کننده افزایش یابد، کرنش مؤثر خزش کاهش مییابد، ولی مدت زمان صفر شدن کرنش بازیافت، تغییری نمی کند.
- با افزایش دمای محیط و خصوصاً در دماهای بالاتر از دمای مرجع زمینه اپوکسی، کرنش مؤثر خزشی در طی زمان افزایش مییابد.
- با افزایش دمای محیط و خصوصاً در دماهای بالاتر از دمای مرجع زمینه اپوکسی، کرنش مؤثر بازیافت با سرعت کمتری به صفر میل میکند.
- اثرات دمای محیط بر پاسخ کلی خزش-بازیافت در سطح تنش بالا بیشتر نمایان می شود.

#### مراجع

- Khalili SMR, Eslami Farsani R, Dastmard A, Saeedi A (2015) Experimental investigation of creep behavior in Phenolic based polymer composites. J. of Sci Technol Compos 1 (2): pp. 37-42.
- [2] Tuttle ME, Brinson HF 1986 Prediction of the longterm creep compliance of general composite laminates. Exp Mech 26(1): 89–102.
- [3] Schaffer BG, Adams DF (1981) Nonlinear Viscoelastic Analysis of a Unidirectional Composite Material. J Appl Mech 48(4): 859–865.
- [4] Aboudi J (1990) Micromechanical characterization of the non-linear viscoelastic behavior of resin matrix composites. Compos Sci Technol 38(4): 371– 386.
- [5] Schapery RA (1969) On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. Polym Eng Sci 9(4): 295–310.
- [6] Haj-Ali RM, Muliana AH (2004) A multi-scale constitutive formulation for the nonlinear viscoelastic analysis of laminated composite materials and structures. Int J Solids Struct 41(13): 3461–3490.
- [7] Zaoutsos SP, Papanicolaou GC (2010) On the influence of preloading in the nonlinear viscoelastic–viscoplastic response of carbon–epoxy composites. Compos Sci Technol 70(6): 922–929.
- [8] Darvizeh A, Ansari R, Mahmoudi MJ, Hassanzadeh MK (2016) Investigation of interphase effect on the non-linear viscoelastic behavior of multiphase polymer composites. Modares Mech Eng 16(1): 181–191 (In persion).

- [34] Aghdam MM, Dezhsetan A (2005) Micromechanics based analysis of randomly distributed fiber reinforced composites using simplified unit cell model. Compos Struct 71(3): 327–332.
- [35] Aboudi J., Arnold S. M., and Bednarcyk B. A., Micromechanics of composite materials: a generalized multiscale analysis approach. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [36] Aboudi J., "Micromechanical analysis of composites by the method of cells," 1989.
- [37] Aboudi J., "Closed form constitutive equations for metal matrix composites," Int. J. Eng. Sci., vol. 25, no. 9, pp. 1229–1240, 1987.
- [38] Haj-Ali R. and Aboudi J., "Nonlinear micromechanical formulation of the high fidelity generalized method of cells," Int. J. Solids Struct., vol. 46, no. 13, pp. 2577–2592, 2009.
- [39] Bednarcyk BA, Arnold SM (2002) Transverse tensile and creep modeling of continuously reinforced titanium composites with local debonding. Int J Solids Struct 39(7): 1987–2017.
- [40] Mahmoodi MJ, Aghdam MM, Shakeri M (2010) The effects of interfacial debonding on the elastoplastic response of unidirectional silicon carbide-titanium composites. Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci 224(2): 259–269.
- [41] Mahmoodi MJ, Hassanzadeh-Aghdam MK (2015) Effects of interphase damage on the elastoviscoplastic behavior of general unidirectional metal matrix composites. Modares Mech Eng 15(3): 95–105. (In persion)
- [42] Sayyidmousavi A, Bougherara H, Fawaz Z (2015) The role of viscoelasticity on the fatigue of angleply polymer matrix composites at high and room temperatures- A micromechanical approach. Appl Compos Mater 22(3): 307–321.
- [43] Sun L, Gibson RF, Gordaninejad F (2011) Multiscale analysis of stiffness and fracture of nanoparticle-reinforced composites using micromechanics and global–local finite element models. Eng Fract Mech 78(15): 2645–2662.

- [23] Odegard GM, Clancy TC, Gates TS (2005) Modeling of the mechanical properties of nanoparticle/polymer composites. Polymer (Guildf) 46(2): 553–562.
- [24] Falahatgar SR., Salehi M, Aghdam MM (2009) Nonlinear viscoelastic response of unidirectional fiber-reinforced composites in off-axis loading. J Reinf Plast Compos 28(15): 1793–1811.
- [25] Sayyidmousavi A, Bougherara H, Falahatgar SR, Fawaz Z (2014) A 3D micromechanical energybased creep failure criterion for high-temperature polymer-matrix composites. J Reinf Plast Compos 33(4): 380–388.
- [26] Sayyidmousavi A, Bougherara H, Falahatgar SR, Fawaz Z (2015) Thermomechanical viscoelastic response of a unidirectional graphite/polyimide composite at elevated temperatures using a micromechanical approach. J. Compos Mater 49(5):519–534.
- [27] Aboudi J (1982) A continuum theory for fiberreinforced elastic-viscoplastic composites. Int J Eng Sci 20(5): 605–621.
- [28] Aboudi J, Pindera MJ, Arnold SM (1999) Higherorder theory for functionally graded materials. Compos Part B Eng 30(8): 777–832.
- [29] Muliana AH (2004) Integrated micromechanicalstructural framework for the nonlinear viscoelastic behavior of laminated and pultruded composite materials and structures. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- [30] Haj-Ali RM, Muliana AH (2001) Numerical finite element formulation of the Schapery non-linear viscoelastic material model. Int J Numer Methods Eng 59(1): 25–45.
- [31] Haj-Ali RM, Muliana AH (2004) A multi-scale constitutive formulation for the nonlinear viscoelastic analysis of laminated composite materials and structures. Int J Solids Struct 41(13): 3461–3490.
- [32] Lai J, Bakker A (1996) 3-D Schapery representation for non-linear viscoelasticity and finite element implementation. Comput Mech 18(3): 182–191.
- [33] Harris B (1999) Engineering composite materials. IOM, London.