



## مقایسه رفتار خزشی در کامپوزیت‌های پایه پلیمری ترموست بر اساس دو مدل ویسکوالاستیک انتگرال یگانه شپری و چهار پارامتری برگر

محمدحسین قپانی‌فرد کاشانی<sup>1</sup>، احمدرضا قاسمی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731753153، ghasemi@kashanu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1404/04/08

پذیرش: 1405/01/30

### کلیدواژگان

خزش،

مدل ویسکوالاستیک شپری،

مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک

برگر،

رفتار بلند مدت خزشی،

چندلایه‌های کامپوزیتی

در این تحقیق دو مدل تحلیلی ویسکوالاستیک چهار پارامتری برگر و انتگرال یگانه شپری برای پیش‌بینی رفتار خزشی بلند مدت چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/وینیل استر مقایسه، تحلیل و ارزیابی شده است. برای مشخصه‌سازی پارامترهای معادله ویسکوالاستیک برگر از نتایج آزمایش‌های تجربی موجود، استفاده شد. از آنجا که استفاده از پارامترهای مشخصه‌سازی شده در مرحله خزش برای جایگذاری در معادله مربوط به ریکاوری، خطای زیادی را بین نتایج آزمون‌های تجربی و مدل تحلیلی ویسکوالاستیک برگر ایجاد کرد، پارامترهای مدل برگر در مرحله خزش و ریکاوری بصورت جداگانه مشخصه‌سازی شدند. نتایج بدست آمده از مدل ویسکوالاستیک برگر نسبت به مدل ویسکوالاستیک شپری برای چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/وینیل استر، از انطباق بسیار خوبی با نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی بخصوص در سطوح دمایی و تنش بالا، برخوردار بود. این انطباق در هر دو مرحله خزش و ریکاوری بخوبی مشاهده گردید. همچنین اثر دما و تنش بر روی تغییرات پارامترهای معادله برگر بررسی شد و مشاهده گردید که مقادیر این پارامترها با تغییر سطوح دما و تنش تغییر می‌کند. در ادامه معادلات حاکم بر تغییرات این پارامترها نسبت به دما و تنش استخراج گردید. سپس پارامترهای نرمی خزشی، مدول خزشی، فاکتور تخریب و نرخ کرنش خزشی در هر مرحله محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح دما و تنش، نرمی خزشی، فاکتور تخریب، و نرخ کرنش خزشی افزایش و مدول خزشی برای چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/وینیل استر کاهش می‌یابد.

## Creep behaviour comparison in thermoset polymer matrix composites based on single integral schapery and four parameter burgers models

Mohammad Hossein Ghappani-Fard Kashani<sup>1</sup>, Ahmad Reza Ghasemi<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

\* P.O.B. 8731753153, Kashan, Iran, ghasemi@kashanu.ac.ir

### Keywords

Creep, Schapery viscoelastic model, Burgers four-parameter viscoelastic model, Long-term creep behavior, Composite multi-layers

### Abstract

In this study two viscoelastic analytical models -the four-parameter Burgers model and the single-integral Schapery model- were compared, analyzed, and evaluated for predicting the long-term creep behavior of glass/vinylester composite laminates. The parameters of the Burgers viscoelastic model were characterized using available experimental data. Since using the same set of characterized parameters from the creep stage in the recovery stage resulted in significant discrepancies between experimental results and the Burgers analytical model, the model parameters for the creep and recovery stages were characterized separately. The results obtained from the Burgers model showed significantly better agreement with experimental data for glass/vinylester composite laminates, especially at high temperature and stress levels, compared to the Schapery model. This agreement was observed clearly in both the creep and recovery stages. Furthermore, the effects of temperature and stress on the variations of the Burgers model parameters were investigated, revealing that these parameters change with varying temperature and stress levels. Subsequently, the governing equations describing the variation of these parameters with respect to temperature and stress were derived. Finally, the creep compliance, creep modulus, damage factor, and creep strain rate were calculated at each stage. The results for glass/vinylester composite laminates indicate that with increasing temperature and stress levels, the creep compliance, damage factor, and creep strain rate increase, while the creep modulus decreases.

Please cite this article using:

Ghappani-Fard Kashani, M. H., Ghasemi, A. R., "Creep behaviour comparison in thermoset polymer matrix composites based on single integral schapery and four parameter burgers models," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 3, pp. 2810-2822, 2026. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2064251.1924>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

خزش از جمله رفتار وابسته به زمان است که در کامپوزیت‌ها بسیار مورد توجه است. از آنجایی که ماتریس‌های پلیمری در مواد کامپوزیتی پاسخ خزشی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند، خزش در دماهای کاری مانند دمای محیط یا اندکی بالاتر از آن برای کامپوزیت‌ها اهمیت پیدا می‌کند. خزش پدیده‌ای است که در آن مواد تحت تأثیر یک بار مکانیکی ثابت در دما و رطوبت ثابت تغییر شکل دائم را در طول زمان از خود نشان می‌دهند. در واقع خزش تغییر شکل آهسته و پیوسته یک ماده تحت تنش ثابت است [1]. خزش پدیده‌ای منحصر به فرد است، زیرا باعث می‌شود مواد حتی بدون رسیدن به تنش تسلیم، دچار کرنش پلاستیک شوند [2]. دمایی که در آن خزش اتفاق می‌افتد به جنس ماده بستگی دارد. این دما به نقطه  $T_m$  (دمای ذوب) ماده تحت خزش بستگی داشته و معمولاً در نسبت دما به دمای ذوب 0.5 و بیش از آن اتفاق می‌افتد. در کامپوزیت‌ها دمای  $T_g$  (دمای گذر شیشه‌ای که در آن جامد ترد به نرم تبدیل می‌شود) مدنظر قرار می‌گیرد [3]. محققین زیادی از معادلات ساختاری خزشی با رویکرد ویسکوالاستیک خطی و غیرخطی برای توصیف رفتار خزشی کامپوزیت‌های پایه پلیمری تحت بارهای مکانیکی و دمایی استفاده کرده‌اند [4,5]. یکی از روش‌هایی که می‌تواند پاسخ خزشی مواد را پیش‌بینی کند، روش مشخصه‌سازی شتابدار می‌باشد که برای تعیین رفتار خزشی بلند مدت کامپوزیت‌ها در گذشته استفاده شده است [6]. در هر لحظه کرنش کل مواد را می‌توان به مجموع یک کرنش الاستیک آبی ( $\epsilon_0$ ) و یک کرنش خزشی افزایشی ( $\epsilon_{cr}$ ) نشان داد [7]. مولیان و همکاران [8] با انجام آزمون‌های تجربی خزشی کوتاه مدت به مشخصه‌سازی رفتار ویسکوالاستیک چندلایه‌های کامپوزیتی تک جهته تقویت شده با الیاف کربنی شیشه وینیل استر و شیشه پلی‌استر پرداخته و با استفاده از معادلات غیرخطی انتگرال یگانه شپری به تعیین رفتار بلند مدت آن‌ها مبادرت نمودند. همچنین با استفاده از روش (TTSP)<sup>1</sup> با جابجایی منحنی‌های خزشی کوتاه مدت، به بررسی رفتار بلند مدت خزشی و مقایسه نتایج با مدل‌های ریاضی پرداختند، که از دقت خوبی برخوردار بودند. موهان و آدامز [9] آزمایش‌های تجربی خزشی و ریکواری تحت کشش و فشار را بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی گرافیت اپوکسی و شیشه اپوکسی انجام دادند و با استفاده از مدل ویسکوالاستیک انتگرال یگانه شپری برای پاسخ‌های خزشی و ریکواری، نشان دادند که رطوبت و دما بر روی پارامترهای معادله مؤثر است. مولیان و همکاران [10] آزمایش‌های تجربی خزش را بر روی کامپوزیت‌های چندلایه شیشه پلی‌استر انجام دادند و از روی نمودارهای خزشی نشان دادند که پاسخ‌ها در نمودارهای هم‌زمانی تنش-کرنش با افزایش دما و زمان به سمت غیرخطی شدن پیش می‌رود، در حالیکه در دماهای پایین رفتار خطی از خود نشان می‌دادند. کاتوزیان و همکاران [11] آزمون‌های تجربی خزشی را به مدت 10 ساعت بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی کربن اپوکسی تحت سطوح مختلف دمایی (23 و 100 و 140 درجه سانتی‌گراد) و تنشی انجام دادند و از مدل ویسکوالاستیک انتگرال یگانه شپری برای مشخصه‌سازی پارامترهای غیرخطی ویسکوالاستیک آن قطعه‌ها استفاده کردند. مولیان و همکاران [12] با انجام آزمایش‌های تجربی خزش و با بکار بردن معادلات ساختاری توانی خزش و مقایسه با نتایج تجربی، به بررسی پاسخ ماکروسکوپی چندلایه‌های کامپوزیتی پلی‌آمید پرداختند. مولیان و همکاران [13] یک مدل چندگانه ویسکوالاستیک را برای تحلیل رفتارهای وابسته به تنش و دمای چندلایه‌های کامپوزیتی گرافیت اپوکسی توسعه دادند و با نتایج آزمون‌های تجربی خزشی انجام شده

توسط هیل و همکاران [14] مقایسه کردند. ویولت و شپری [15] اثر دما و زمان را بر روی کامپوزیت‌های تک جهته کربن اپوکسی تحت فشار را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که رابطه میان تنش شکست نمونه‌های کامپوزیتی و زمان از یک معادله توانی پیروی می‌کند. جین و همکاران [16] اثرات محیط بر روی رفتار خزشی چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه پلی‌استر (FRP) را بررسی کردند. پیکن و همکاران [17] از معادله برگر گسترش یافته برای مدل کردن رفتار خزشی نانوکامپوزیت‌های ترموست خاک رس در سطوح دمایی و تنشی مختلف استفاده کردند و نشان دادند که معادله ساختاری خزشی برگر نسبت به معادله توانی فایندلی در پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی نانوکامپوزیت‌ها بهتر می‌باشد. همچنین این مدل بخوبی توانست رفتار خزشی این کامپوزیت‌ها را نشان دهد. آن‌ها نشان دادند که دینامیک سیستم بین لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با پرکننده‌ها، مستقل از مقدار پرکننده است و عمدتاً توسط ماتریس کنترل می‌شود. کلمنت و همکاران [18] از مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری برگر برای پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی کامپوزیت‌های کربن اپوکسی بکار رفته در صنایع دریایی را با بررسی اثر تماس آب در رفتار ویسکوالاستیک، استفاده کردند و نشان دادند که این مدل تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد. آلمیدا و همکاران [19] از چهار مدل ساختاری خزشی وایبول، فایندلی، ایرینگ و برگر برای پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی رفتار چندلایه‌های کامپوزیتی کربن اپوکسی استفاده کردند و نشان دادند که دو مدل وایبول و ایرینگ همخوانی بهتری با داده‌های بدست آمده با روش (TTSP) دارند. چانگ و ویلیامسون [6] آزمایش‌های شتابدار خزشی بر روی کامپوزیت با الیاف تک جهته SMC-C50 با 50 درصد وزنی الیاف پلی‌استر انجام دادند. همچنین آزمون‌های کوتاه مدت خزشی را در سطوح مختلف دمایی و تنشی انجام دادند و نتایج آزمون‌های تجربی را با معادله ساختاری فایندلی مدل کردند که از دقت خوبی برخوردار بود. ژانگ و همکاران [20] از مدل برگر برای نشان دادن مکانیزم خزش در کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/MWCNT استفاده کردند. موزیویکی و مارکوویچ [21] رفتار خزشی نانوکامپوزیت‌های پلیمری بدست آمده از پودر چوب و روغن بذر کتان را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تغییر شکل خزشی با اضافه کردن پودر چوب به ماتریس بواسطه برهم کنش بسیار خوب الیاف و ماتریس کاهش پیدا می‌کند. کانگ یو و همکاران [22] رفتار خزشی کامپوزیت‌های پلیمری را تحت رطوبت محیطی مطالعه کردند و از یک مدل ساختاری غیرخطی خزش ارتوتروپیک سه پارامتری که اثر رطوبت را در نظر می‌گیرد، استفاده کردند. پاپانیوکولا و همکاران [23] اثر خستگی حرارتی را بر روی رفتار خزشی و ریکواری کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه را بررسی کردند. آن‌ها به منظور درک بهتر از رفتار نمونه‌های کامپوزیتی از یک مدل ویسکوالاستیک چهار پارامتری برگر استفاده کردند و نشان دادند که ارتباط تغییرات چهار پارامتر با تعداد سیکل‌های اعمالی دید بهتری را نسبت به رفتار خزشی مشاهده شده، ارائه می‌نماید. پرلا و همکاران [24] آزمون‌های تجربی خزش را بر روی نمونه‌های کامپوزیتی با چیدمان تک جهته کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه در سطوح مختلف تنشی انجام دادند و از مدل‌های خزشی فایندلی و برگر برای مدل کردن رفتار بلند مدت خزشی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده کردند، و به این نتیجه رسیدند که مدل برگر توانایی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی دارد. براونر و همکاران [25] با

<sup>1</sup> Time – temperature superposition principle

در اینجا  $D_0$  و  $\Delta D$  مدول‌های نرمی الاستیک آبی و نرمی گذرا می‌باشند، که مستقل از دما و تنش فرض می‌شوند. مولیانا و همکاران [8] براساس روش بکار رفته توسط هارپر و ویتسمن [35] همچنین لو و شیری [36] به مشخصه‌سازی پارامترهای معادله ساختاری ویسکوالاستیک شیری پرداختند. پارامترهای  $g_0, g_1, g_2$  و  $a$  وابسته به دما و تنش هستند. پارامتر  $\psi$  زمان کاهش یافته می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi^t \equiv \Psi(t) = \int_0^t \frac{d\xi}{a\sigma^\xi aT^\xi} \quad (2)$$

پارامتر  $g_0$  نرمی الاستیک آبی است و کاهش یا افزایش در چقرمگی را اندازه‌گیری می‌کند و تابعی از تنش و دما می‌باشد. پارامتر  $g_1$  مربوط به خزش گذرا می‌باشد و اثر غیرخطی را در نرمی گذرا اندازه‌گیری می‌کند. پارامتر  $g_2$  اثر نرخ بارگذاری بر روی پاسخ خزشی را محاسبه می‌کند. پارامترهای  $T_{ref}$  به ترتیب دمای جاری و دمای مرجع (محیط) را مشخص می‌نمایند. پارامتر  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی وابسته به ماده می‌باشد که در طول بازه دمایی آزمون‌های خزش که به اندازه کافی در زیر دمای عبور گذر شیشه‌ای  $(T_g)$  است ثابت فرض می‌گردد. در شرایط محیطی مرجع پارامترهای غیرخطی وابسته به تنش هستند (یعنی همه پارامترهای وابسته به دما  $a^{T^t}$  و  $g_j^{T^t}$  ( $j = 0, 1, 2$ ) مساوی با یک در نظر گرفته می‌شود). پارامترهای  $a^{T^t}$  و  $a^{\sigma^t}$  بصورت ترم‌هایی از تنش و دمای غیر مرجع فاکتورهای جایابی زمان هستند. پارامتر نرمی گذرا اغلب با بکار بردن معادله قانون توانی و یا معادله نمایی سری پرونی بدست می‌آید:

$$\Delta D \psi^t = C(\psi^t)^n \quad (3)$$

$$\Delta D \psi^t = \sum_{n=1}^N D_n(1 - \exp[-\lambda_n \psi^t]) \quad (4)$$

پارامترهای  $C$  و  $n$  در مدل قانون توانی ثابت ماده و مستقل از دما و تنش هستند و در شرایط مرجع یعنی دمای اتاق اندازه‌گیری می‌شوند. متغیر  $D_n$ ،  $n^{th}$  ضریب از سری پرونی و  $\lambda_n$ ،  $n^{th}$  تقابل از تأخیر زمانی که مستقل از دما و تنش می‌باشد. با استفاده از قانون مدل توانی برای نرمی گذرا، معادله کرنش مکانیکی در معادله (1) بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon^t = \varepsilon(t) = g_0^{\sigma^t} g_0^{T^t} D_0 \sigma^t + g_1^{\sigma^t} g_1^{T^t} C \int_0^t (\psi^t - \psi^\tau)^n \frac{d(g_2^{\sigma^\tau} g_2^{T^\tau} \sigma^\tau)}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

آزمون‌های خزش و ریکاوری هم‌دما اغلب برای مشخصه‌سازی پارامترهای وابسته به دما، تنش و زمان مواد انجام می‌شود.

$$\sigma^t = \sigma_0 [H(t) - H(t - t_1)] \quad (6)$$

بطوریکه تابع  $H(t)$  تابع هوی ساید می‌باشد. بنابراین نرخ بارگذاری در معادله (5) بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d(g_2^{\sigma_0} g_2^{T_0} \sigma_0)}{dt} = g_2^{\sigma_0} g_2^{T_0} \sigma_0 [\delta(t) - \delta(t - t_1)] \quad (7)$$

با جایگذاری معادله (7) در معادله (5) کرنش‌های خزش و ریکاوری بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon_c^t = \left[ g_0^{\sigma_0} g_0^{T_0} D_0 + g_1^{\sigma_0} g_1^{T_0} g_2^{\sigma_0} g_2^{T_0} C \left( \frac{t}{a\sigma_0 aT} \right)^n \right] \sigma_0 \quad 0 < t \leq t_1 \quad (8)$$

انجام آزمون‌های تجربی خزش به بررسی رفتار خزشی نمونه‌های کامپوزیتی پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در سطوح مختلف دمایی و تنشی پرداختند. آن‌ها از مدل چهار پارامتری ویسکوالاستیک برگر برای پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده کردند. ژانو و همکاران [26] آزمون‌های تجربی کششی و فشاری خزش را به مدت 24 ساعت بر روی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک تحت سطوح تنشی 15%، 30%، 45% و 60% و به این نتیجه رسیدند که سطوح تنشی 15% و 30% سطوح تنشی پایین در آزمون‌های کششی و فشاری خزش محسوب می‌شوند. لینگ و همکاران [27] با انجام آزمون‌های تجربی به مقایسه رفتار خزشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی بگاس و چندین کامپوزیت پلیمری دیگر در سطح تنشی یکسان با افزایش سطح دما پرداختند. کونتو و همکاران [28] رفتار خزشی کوتاه مدت کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب را مورد مطالعه قرار دادند. بی و همکاران [29, 30] و بی [31] از روابط انتگرال یگانه شیری همراه با تحلیل المان محدود برای بررسی پاسخ ویسکوالاستیک چندلایه‌های کامپوزیتی در معرض بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی استفاده کردند. اسکات و زوریک [32] آزمون‌های خزشی فشاری را بر روی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/وینیل استر انجام دادند. قاسمی و حسین‌پور [33] اثرات تغییرات دما و فشار داخلی را بر روی استوانه‌های کامپوزیتی چندلایه بررسی کردند. آن‌ها از معادله ویسکوالاستیک غیرخطی شیری و معادلات پرنتل روس و تقریب مندلسون برای بیان رفتار خزشی استفاده کردند. آن‌ها تاریخچه کرنش‌های خزشی محیطی، شعاعی و محوری استوانه‌های کامپوزیتی چندلایه شیشه وینیل استر را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی این تحقیق، مشخصه‌سازی دقیق پارامترهای معادله ویسکوالاستیک برگر و تحلیل اثر تغییرات دما و تنش بر روی این پارامترها است. این تحقیق بر مبنای داده‌های تجربی حاصل از آزمون‌های تجربی انجام‌شده توسط دیگر محققان [8]، به ارزیابی دقیق رفتار خزشی بلندمدت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای در ماتریس وینیل استر پرداخته است. در این راستا، علاوه بر مشخصه‌سازی معادله برگر، تلاش شده است با تغییر پارامترهای آن در شرایط دمایی و تنشی مختلف، معادلات حاکم به‌طور دقیق بررسی و مدل‌سازی شوند. همچنین، این تحقیق به مقایسه و تحلیل معادله ویسکوالاستیک برگر با معادله انتگرال یگانه شیری پرداخته تا میزان انطباق هرکدام از این مدل‌ها با داده‌های تجربی و پیش‌بینی رفتار بلندمدت خزشی کامپوزیت‌های شیشه وینیل استر را ارزیابی کند. به‌ویژه، در این مطالعه، تأثیر سطوح مختلف دما و تنش بر روی رفتار خزشی، عملکرد مدل‌ها و قابلیت پیش‌بینی آن‌ها در شرایط عملی مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

## 2- مدل‌های خزشی ویسکوالاستیک

### 2-1- مدل انتگرال یگانه شیری:

معادله انتگرال شیری برای نشان دادن رفتارهای وابسته به زمان مواد ویسکوالاستیک با رفتارهای غیرخطی ترمومکانیکی در تحقیقات زیادی بکار رفته است [34]، که برای بارگذاری‌های تک محور و هم دما بصورت زیر بیان می‌شود:

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

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\sigma}{\eta_3}\right) t \quad (14)$$

$$\frac{d\varepsilon_3}{dt} = \left(\frac{\sigma}{\eta_3}\right) \quad (15)$$

در معادله‌های فوق پنج متغیر مجهول  $\sigma, \varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  وجود دارد، در حالیکه  $\sigma, \varepsilon$  متغیرهای بیرونی هستند و  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  متغیرهای درونی هستند. با جایگذاری و به کمک تبدیل لاپلاس معکوس رفتار خزشی برگر طبق معادله زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right] + \frac{t}{\eta_3} \right] \quad (16)$$

رفتار خزشی برگر در واقع جمع رفتار خزشی مدل‌های ماکسول و کلونین می‌باشد [38]. اگر تنش  $\sigma_0$  در زمان  $t_1$  برداشته شود رفتار ریکواری مدل برگر می‌تولند از معادله (16) و بکار بردن اصل جمع آثار و در نظر گرفتن اینکه در زمان  $t = t_1$  تنش  $\sigma = -\sigma_0$  نیز اضافه شود بدست آید.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_3} t_1 + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[ \exp\left(\frac{E_2 t_1}{\eta_2}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \quad t > t_1 \quad (17)$$

نرمی خزشی قطعات نیز از تقسیم کردن معادله 16 بر تنش استاتیکی  $\sigma_0$  بدست می‌آید:

$$j(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right] + \frac{t}{\eta_3} \right) \quad (18)$$

مدول خزشی قطعات بصورت زیر بیان می‌شود:

$$E(t) = \frac{1}{j(t)} \quad (19)$$

همچنین فاکتور تخریب قطعات نیز بصورت زیر می‌باشد:

$$D(t) = 1 - \frac{E(t)}{E_0} \quad (20)$$

### 3- استخراج و مشخصه‌سازی پارامترهای مدل برگر و پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی:

در این تحقیق از نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده توسط مولیانا و همکاران [8] بر روی پنج لایه کامپوزیتی شیشه وینیل استر استفاده شده است. تنش تسلیم فشاری مربوط به پنج لایه کامپوزیتی شیشه وینیل استر با زاویه الیاف  $45^\circ$  برابر با  $165 \text{ MPa}$  می‌باشد، که از نتایج آزمون‌های تجربی مربوط به آن نمونه استفاده می‌شود. برای برازش منحنی توسط نرم‌افزار متلب بر روی نقاط بدست آمده از آزمون‌های تجربی و انجام محاسبات ریاضی از تابع نمایی زیر استفاده می‌کنیم:

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x) \quad (21)$$

برای مشخصه‌سازی پارامترهای مدل برگر از روش انجام شده توسط پاپانیوکولا و همکاران [37] استفاده شده است. نتایج آزمون‌های تجربی تساوی مقادیر مربوط به این پارامترها را در مرحله خزش و ریکواری تأیید نمی‌کند. به همین دلیل پارامترهای معادلات ساختاری خزش و ریکواری می‌بایست بصورت جداگانه مشخصه‌سازی شوند. شکل 2 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش را بر حسب تغییرات تنش استاتیکی در دمای  $75^\circ\text{F}$  در چندلایه کامپوزیتی شیشه وینیل استر نمایش می‌دهد و همانطور که

با استفاده از اصل جمع آثار بولتزمان معادله ساختاری مربوط به کرنش وابسته به زمان در مرحله ریکواری بصورت معادله (9) بیان می‌شود.

$$\varepsilon_r^t = g_1^T g_2^{\sigma_0} g_2^T C \left[ \left( \frac{t_1}{a\sigma_0 a^T} + \frac{t-t_1}{a^T} \right)^n - \left( \frac{t-t_1}{a^T} \right)^n \right] \sigma_0 \quad (9)$$

پارامترهای مربوط به مواد می‌تولند با استفاده از برازش معادلات (8) و (9) بر روی پاسخ‌های خطی و غیرخطی بدست آمده از آزمون‌های خزش و ریکواری در سطوح مختلف دمایی و تنش‌ی مشخصه‌سازی شود.

### 2-2 مدل چهار پارامتری برگر:

از میان مدل‌های رئولوژیک، مدل چهار پارامتری معروف به برگر توانایی پیش‌بینی رفتار خزشی بلند مدت کامپوزیت‌های کربن اپوکسی را دارد. مدل برگر شامل یک المان ماکسول و یک المان کلونین می‌باشد که بصورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند [37]، که در شکل 1 قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل سه پارامتری جامد معروف به *SLS* هم توانایی پیش‌بینی رفتار خزشی این نوع از کامپوزیت‌ها را دارد ولی بخاطر نداشتن دمپر در المان ماکسول در هنگام ریکواری نمی‌تواند کرنش‌های پسماند را در مواد پلیمری ترموست (اپوکسی‌ها) پیش‌بینی نماید.

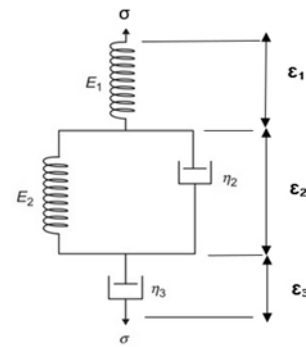


Fig. 1 Schematic of the four-parameter Burgers model [1]

شکل 1 شماتیک مدل چهار پارامتری برگر [1]

برای تعیین معادله ساختاری برگر و تعیین پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  موارد زیر باید در نظر گرفته شود. کرنش کل برابر است با:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (10)$$

درحالیکه  $\varepsilon_1$  نشان دهنده تغییر شکل الاستیک خالص فنر در المان ماکسول است و  $\varepsilon_2$  نشان دهنده تغییر شکل الاستیک تأخیری المان کلونین می‌باشد و  $\varepsilon_3$  نشان دهنده تغییر شکل ویسکوز دمپر در المان ماکسول می‌باشد. تغییر شکل الاستیک فنر در المان ماکسول برابر است با:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \quad (11)$$

تغییر شکل الاستیک تأخیری ناشی از المان کلونین برابر است با:

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\eta_2} \quad (12)$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma}{E_2}\right) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \right], \quad \tau_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (13)$$

تغییر شکل ویسکوز ناشی از دمپر المان ماکسول برابر است با:

مشاهده می‌شود این پارامترها در دمای ثابت تابع تنش می‌باشند. با افزایش سطح تنش روند کاهشی در مقادیر این پارامترها دیده می‌شود. معادلات برازش شده بر روی پارامترهای مدل چهار پارامتری برگر در دمای 75°F و سطوح تنشی مختلف براساس نتایج آزمون‌های تجربی خزشی کوتاه مدت انجام شده در جدول 1 بیان شده است. شکل 3 مقایسه بین پاسخ خزشی مدل‌های برگر و شپری و نتایج آزمون‌های تجربی را بر روی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه وینیل استر با زاویه الیاف 45° نسبت به محور افقی تحت دمای 75°F و در سه سطح تنشی ارائه می‌دهد. از نتایج آزمون‌های تجربی برای کالیبره کردن و مشخصه‌سازی پارامترهای مدل برگر استفاده شده است. هر دو مدل در پیش‌بینی رفتار خزشی از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشند. در سطوح تنشی پایین (0.2, 0.4σ<sub>ult</sub>) هر دو مدل از دقت تقریباً یکسانی در پیش‌بینی رفتار خزشی بلند مدت نمونه‌های کامپوزیتی برخوردار هستند، در حالیکه در سطح تنش بالا (0.6σ<sub>ult</sub>) مدل برگر از دقت بهتری نسبت به مدل شپری برخوردار می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود هر چه سطح اعمال تنش استاتیکی بالاتر باشد مقدار کرنش الاستیک آنی و کرنش خزشی بالاتر می‌باشد. پارامترهای مربوط به معادله ریکواری مدل برگر به غیر از پارامتر η<sub>2</sub> بطور مستقل از مرحله خزش مشخصه‌سازی شده است.

شکل 4 تغییرات پارامترهای E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>, η<sub>3</sub> مدل برگر در مرحله ریکواری را برحسب تغییرات تنش استاتیکی در دمای 75°F در چندلایه کامپوزیتی شیشه وینیل استر نشان می‌دهد. تفاوت بین پارامتر η<sub>3</sub> در مرحله خزش و ریکواری در این شکل کاملاً مشهود می‌باشد. کرنش باقیمانده در پایان زمان ریکواری ناشی از وجود پارامتر η<sub>3</sub> المان ماکسول در معادله ساختاری محاسبه شده است.

شکل 2 تغییرات پارامترهای E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>, η<sub>3</sub> مدل برگر در مرحله خزشی در دمای 75°F در چندلایه کامپوزیتی شیشه وینیل استر نشان می‌دهد. تفاوت بین پارامتر η<sub>3</sub> در مرحله خزش و ریکواری در این شکل کاملاً مشهود می‌باشد. کرنش باقیمانده در پایان زمان ریکواری ناشی از وجود پارامتر η<sub>3</sub> المان ماکسول در معادله ساختاری

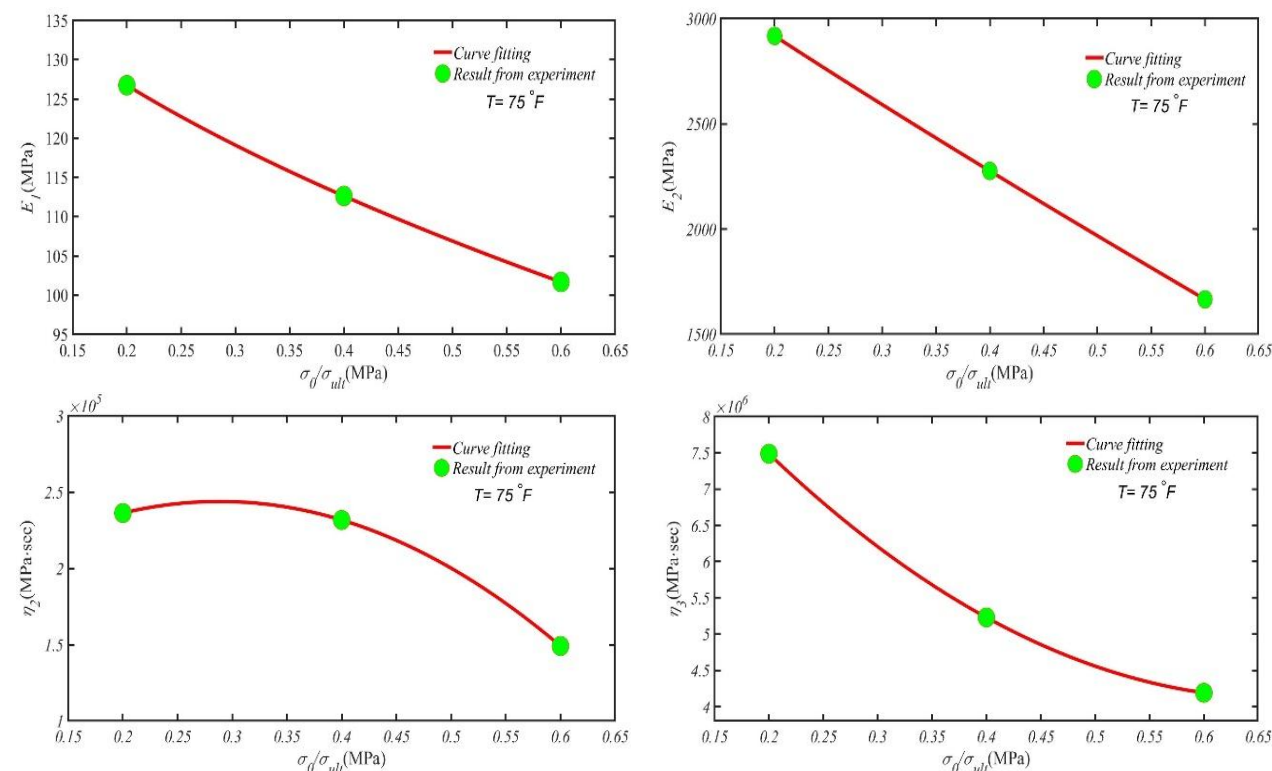


Fig. 2 Variations of the burgers model parameters E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>, η<sub>3</sub> during the creep stage as a function of static stress at 75°F

شکل 2 تغییرات پارامترهای E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, η<sub>2</sub>, η<sub>3</sub> مدل برگر در مرحله خزش بر حسب تغییرات تنش استاتیکی در دمای 75°F

جدول 1 معادلات برازش شده بر روی پارامترهای مدل برگر در مرحله خزش در دمای 75°F

$R^2$	c	b	a	Function	Parameter
1	159.1	0.5221	-74.97	$f(x) = a\sigma_0^b + c$	$E_1$
1	3655	0.9041	-3157	$f(x) = a\sigma_0^b + c$	$E_2$
1	1.62E+05	5.62E+05	-9.7E+05	$f(x) = a\sigma_0^2 + b\sigma_0 + c$	$\eta_2$
1	1.09E+07	-2.043+07	1.52E+07	$f(x) = a\sigma_0^2 + b\sigma_0 + c$	$\eta_3$

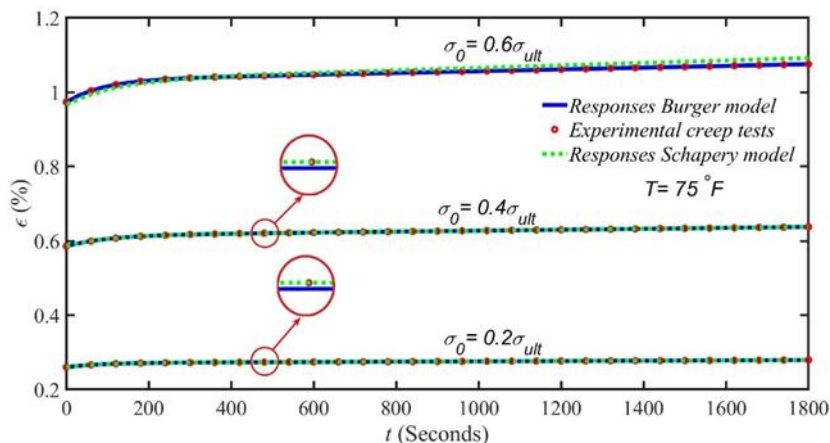


Fig. 3 Comparison between the creep response of schapery and bergers models and experimental tests performed at different stress levels and temperature 75°F

شکل 3 مقایسه بین پاسخ خزشی مدل‌های شپری و برگر و آزمون‌های تجربی انجام شده در سطوح تنش‌های مختلف در دمای 75°F

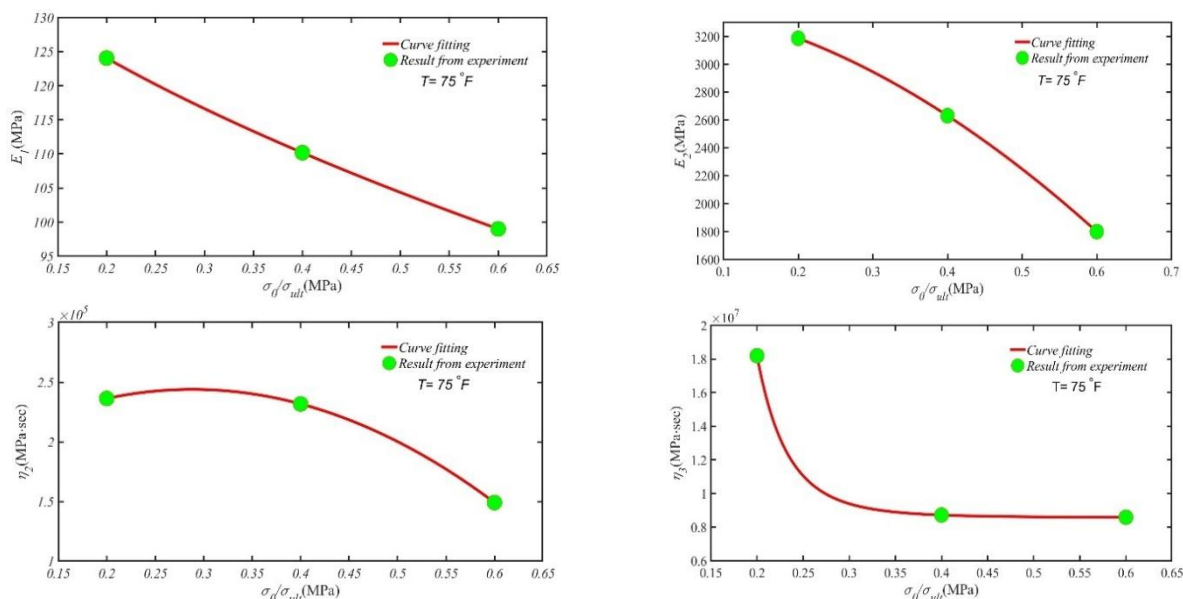


Fig. 4 Variations of the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the recovery stage as a function of static stress at 75°F

شکل 4 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله ریکاوری بر حسب تغییرات تنش استاتیکی در دمای 75°F

جدول 2 معادلات برازش شده بر روی پارامترهای مدل برگر در مرحله خزش در دمای 75°F

$R^2$	c	b	a	Function	Parameter
1	151.5	0.5907	-70.98	$f(x) = a\sigma_0^b + c$	$E_1$
1	3412	1.788	-4019	$f(x) = a\sigma_0^b + c$	$E_2$
1	1.63E+05	5.62E+05	-9.7E+05	$f(x) = a\sigma_0^2 + b\sigma_0 + c$	$\eta_2$
1	8.58E+06	-6.082	539.9	$f(x) = a\sigma_0^b + c$	$\eta_3$

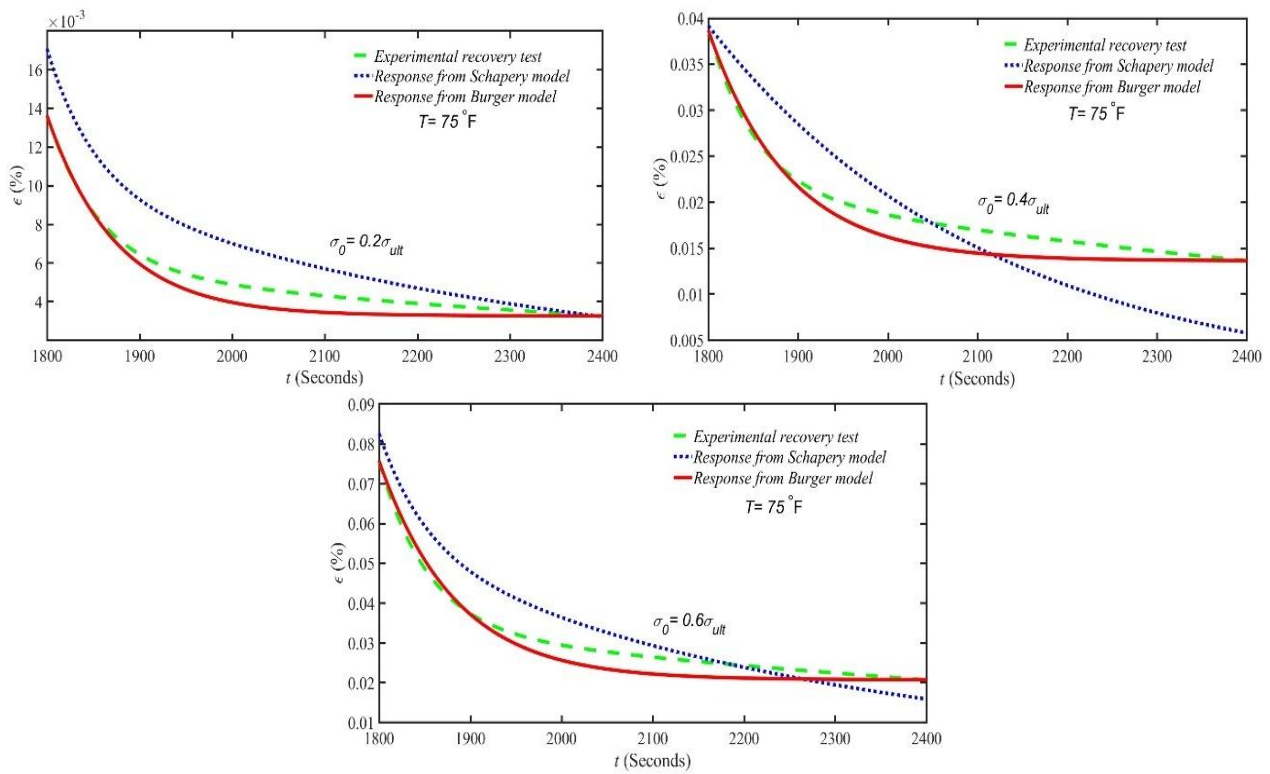


Fig. 5 Comparison between the recovery response of schapery and bergers models and experimental tests performed at different stress levels and temperature 75°F

شکل 5 مقایسه بین پاسخ ریکاوری مدل‌های شپری و برگر و آزمون‌های تجربی انجام شده در سطوح مختلف تنش و در دمای 75°F

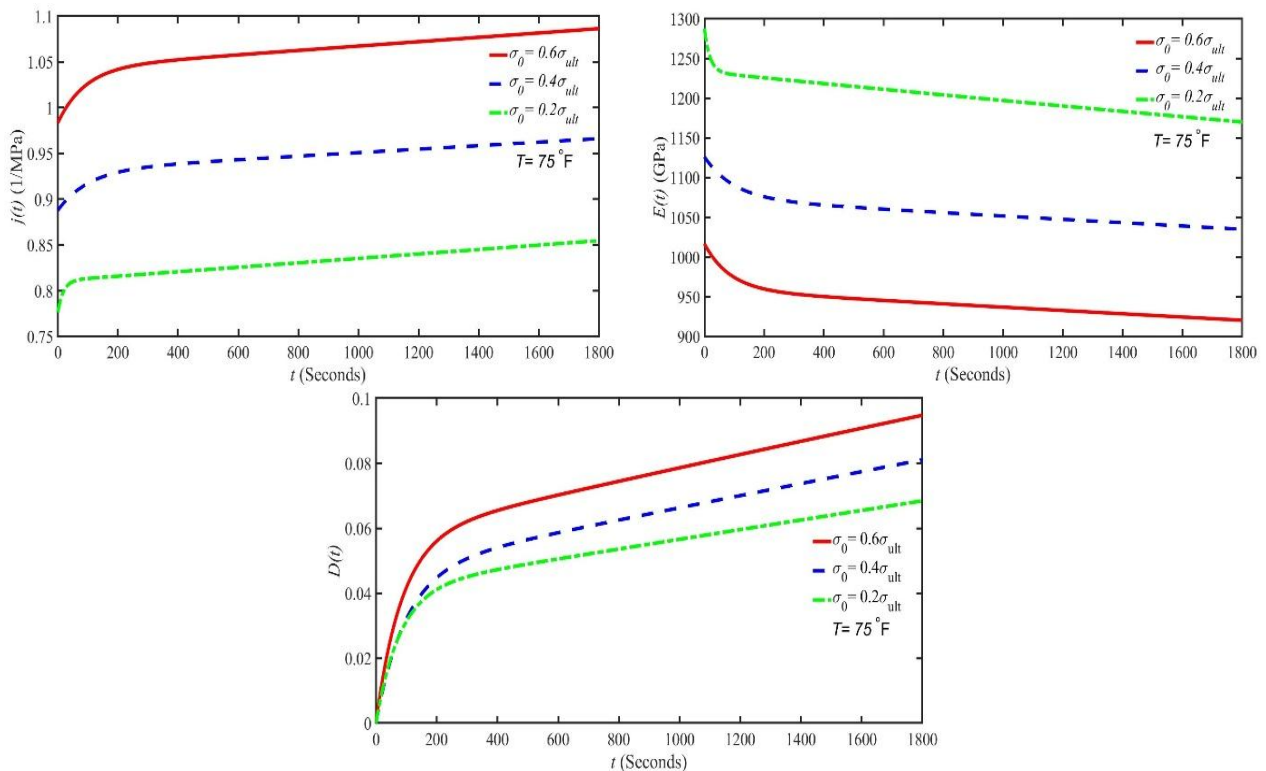


Fig. 6 Creep compliance, creep modulus, and damage factor as a function of time under various stress levels at 75°F

شکل 6 نرمی خزشی، مدول خزشی، فاکتور تخریب بر حسب گذر زمان در سطوح مختلف تنش و در دمای 75°F

جدول 3 معادله برازش شده بر روی تغییرات نرخ کرنش خزشی حالت پایدار در دمای 75°F

Table 3 Fitted equation for the variations of steady-state creep strain rate at temperature 75°F

$R^2$	c	b	a	Function
1	-1.81E-06	2.34E-05	3.18E-05	$f(x) = a\sigma_0^2 + b\sigma_0 + c$

هر دو مدل در پیش‌بینی رفتار خزشی از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌شود هر چه سطح اعمال دما بر روی نمونه بالاتر باشد مقدار کرنش الاستیک آنی و کرنش خزشی بالاتر می‌باشد. همچنین در سطوح دمایی و تنش‌های بالا مدل برگر از انطباق بهتری بر روی نتایج آزمون‌های تجربی برخوردار می‌باشد. انطباق بین مدل ویسکوالاستیک برگر و نتایج آزمون‌های تجربی در سطوح تنش‌های 0.4 و 0.6 تنش نهایی قطعه کامپوزیتی به‌وضوح دیده می‌شود. شکل‌های 9، 10 و 11 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش را بر حسب تغییرات دما در سطوح تنش الاستیکی  $\sigma_0 = 0.2 - 0.6\sigma_{ult}$  در چندلایه کامپوزیتی شیشه‌وینیل استر نمایش می‌دهد.

معادله حاکم بر تغییرات نرخ کرنش خزشی حالت پایدار بر حسب تنش الاستیکی اعمال شده در انتهای زمان خزش ناشی از نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده در دمای 75°F در جدول شماره 3 آورده شده است. شکل 8 مقایسه بین پاسخ خزشی مدل‌های برگر و شپری و نتایج آزمون‌های تجربی را بر روی نمونه‌های کامپوزیتی شیشه‌وینیل استر با زاویه الیاف 45° نسبت به محور افقی تحت تنش الاستیکی  $\sigma_0 = 0.2 - 0.6\sigma_{ult}$  و در چهار سطح دمایی ارائه می‌دهد. از نتایج آزمون‌های تجربی برای کالیبره کردن و مشخصه‌سازی پارامترهای مدل برگر استفاده شده است.

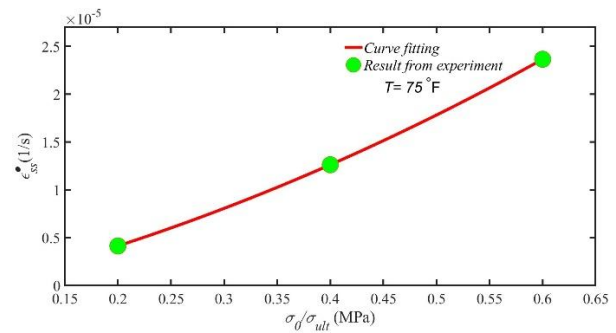


Fig. 7 Variation of creep strain rate as a function of static stress changes at 75°F

شکل 7 تغییر نرخ کرنش خزشی بر حسب تغییرات تنش الاستیکی تحت دمای 75°F

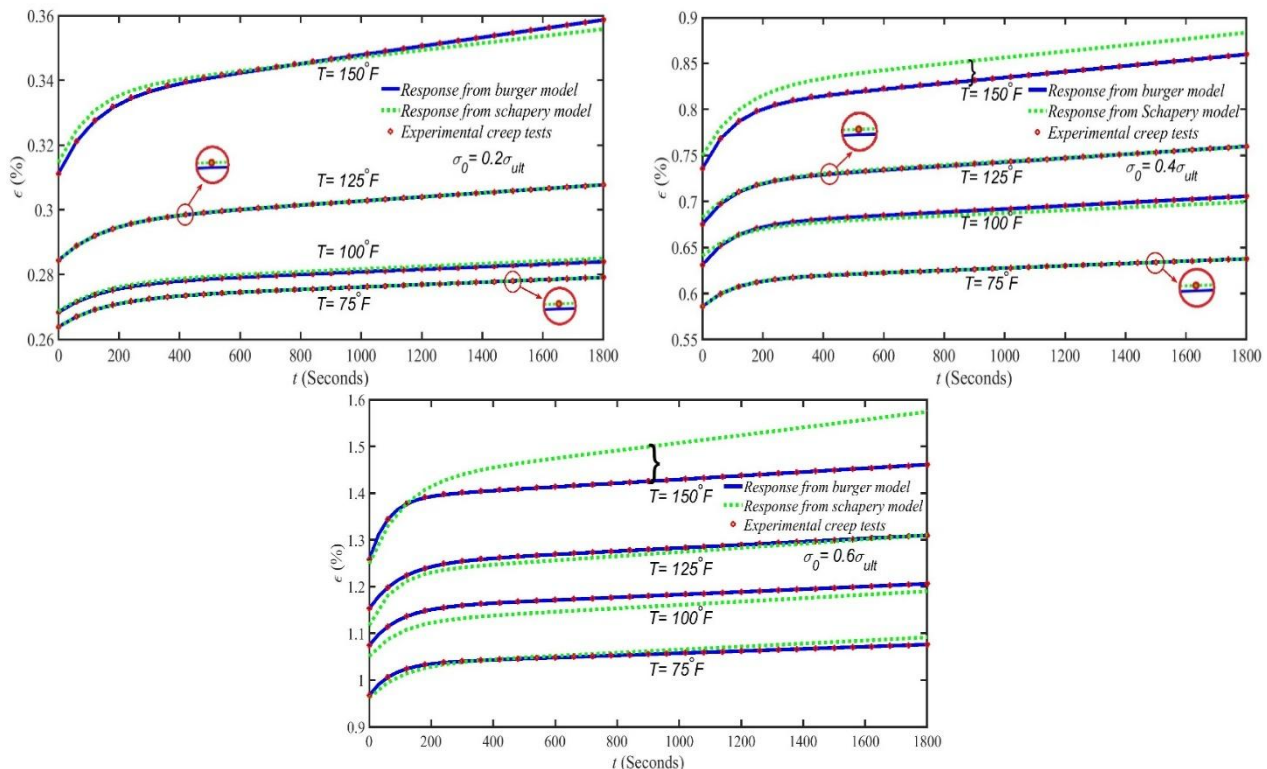


Fig. 8 Comparison between the creep responses of the Schapery and Burgers models and experimental tests conducted under various temperature and stress levels

شکل 8 مقایسه بین پاسخ خزشی مدل‌های شپری و برگر و آزمون‌های تجربی انجام شده در سطوح دمایی و تنش‌های مختلف

ارائه شده است. با استفاده از این معادلات می‌توان در دمایی غیر از سطوح دمایی مورد مطالعه رفتار خزشی قطعه را در همان بازه تنش (0.2-0.6) $\sigma_{ult}$  که آزمون‌های تجربی صورت پذیرفته را معین نمود.

پارامترهای مذکور به طور جداگانه در هر سطح دمایی مشخصه‌سازی شده و تغییرات آن بر روی نمودار به تصویر کشیده شده است. همچنین معادلات برازش شده و ضرایب آن بر روی این نمودارها در جدول‌های شماره 4، 5 و 6

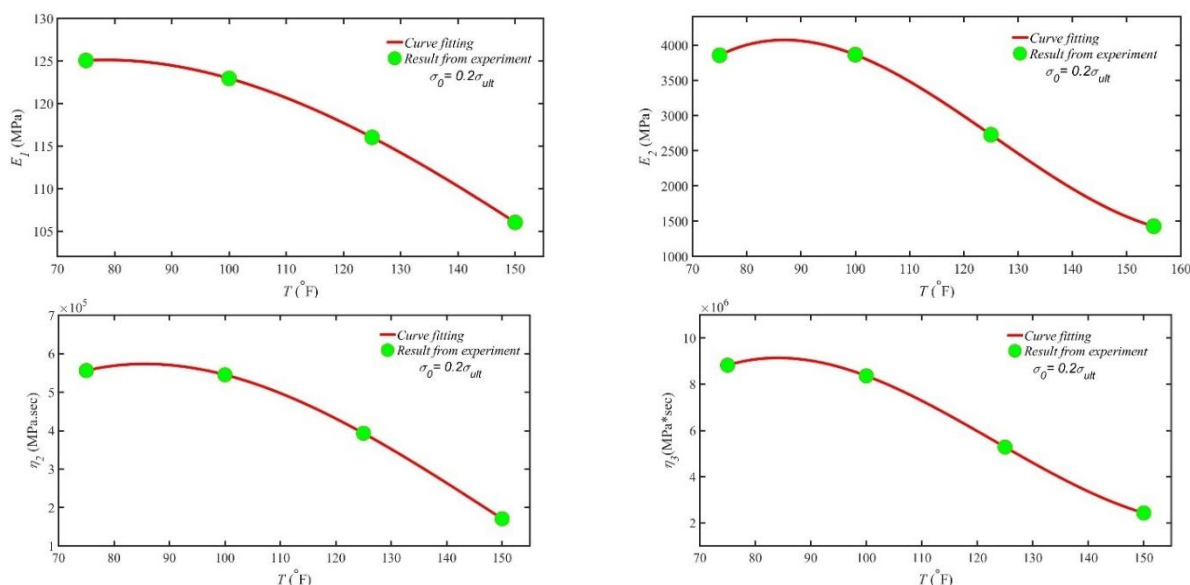


Fig. 9 Variations of the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage as a function of temperature under static stress  $\sigma_0 = 0.2\sigma_{ult}$

شکل 9 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش بر حسب تغییرات دما در تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.2\sigma_{ult}$

جدول 4 معادلات برازش شده بر روی پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش در تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.2\sigma_{ult}$

Table 4 Fitted equations for the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage under static stress  $\sigma_0 = 0.2\sigma_{ult}$

$R^2$	d	c	b	a	Function	Parameter
1	84.72	1.146	-95.18E-04	1.885E-05	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_1$
1	-1.42E+04	510.4	-4.489	0.01192	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_2$
1	-9.69E+05	4.14E+04	-340.5	0.7587	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$\eta_2$
1	-3.402E+07	1.241E+06	-1.122E+04	30.4	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$\eta_3$

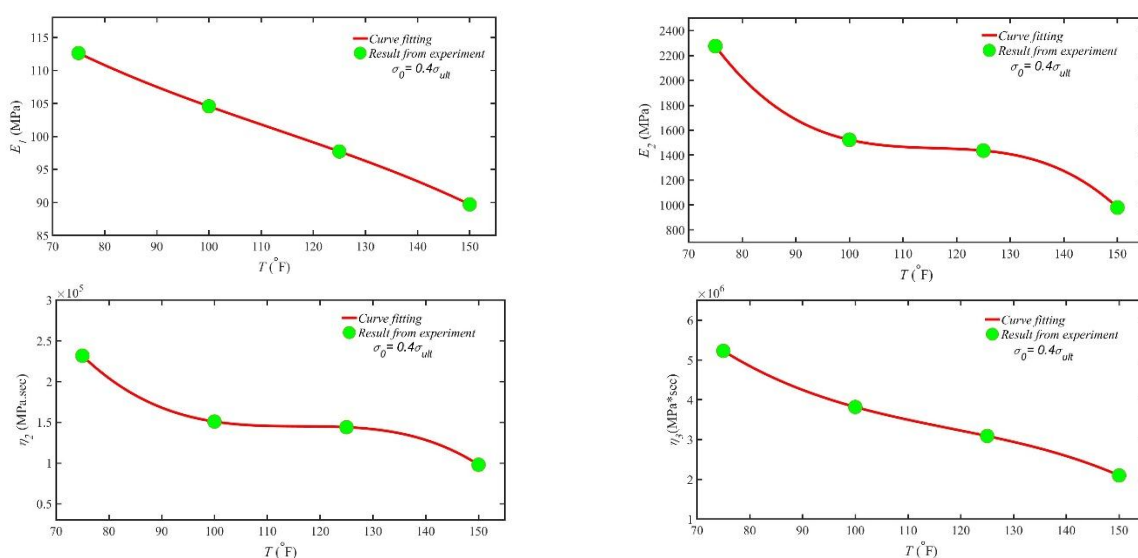


Fig. 10 Variations of the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage as a function of temperature under static stress  $\sigma_0 = 0.4\sigma_{ult}$

شکل 10 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش را بر حسب تغییرات دما در تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.4\sigma_{ult}$

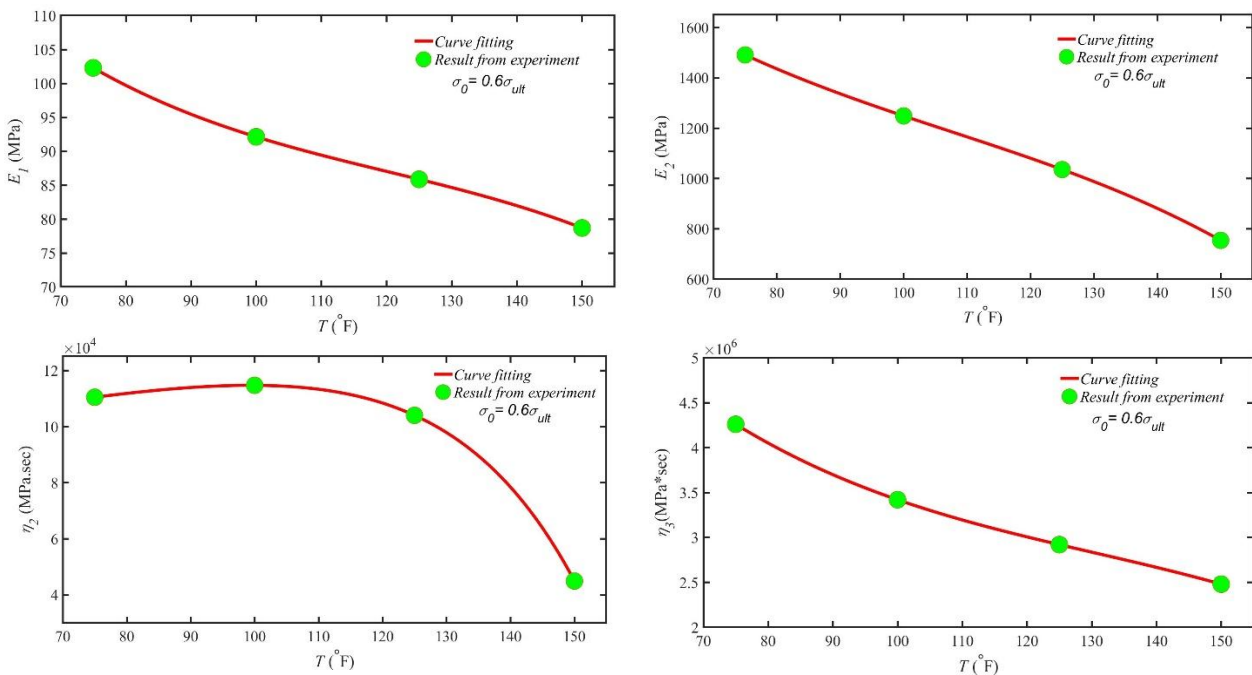
جدول 5 معادلات برازش شده بر روی پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش در تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.4\sigma_{ult}$

**Table 5** Fitted equations for the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage under static stress  $\sigma_0 = 0.4\sigma_{ult}$

$R^2$	d	c	b	a	Function	Parameter
1	168.2	-1.246	0.008663	-2.562E-05	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_1$
1	1.888E+04	-447.8	3.847	-0.01105	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_2$
1	2.049E+06	-4.904E+04	421.2	-1.207	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$\eta_2$
1	2.294E+07	-4.461E+05	3552	-10.03	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$\eta_3$

شکل 12 نرمی خزشی و مدول خزشی نمونه‌های کامپوزیتی را در سطوح مختلف تنش  $(0.2 - 0.6\sigma_{ult})$  و دمایی  $(75 - 150^\circ\text{F})$  نشان می‌دهد. هرچه سطح اعمال دما در تنش ثابت و یا سطح اعمال تنش در دمای ثابت بر روی نمونه کامپوزیتی بالاتر باشد، نرمی خزشی بیشتر می‌شود و هر چه سطح اعمال دما به نمونه کامپوزیتی در مرحله خزش بیشتر باشد مدول خزشی نمونه کامپوزیتی بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین در هر سطح دمایی با گذر زمان کاهش مدول خزشی را مشاهده می‌کنیم که حاکی از رشد تخریب میکرو ساختارها در نمونه‌ها می‌باشد که خود را در کاهش مدول خزشی نشان می‌دهد. شکل 13 فاکتور تخریب را در سطوح مختلف تنش  $(0.2 - 0.6\sigma_{ult})$  و دمایی  $(75 - 150^\circ\text{F})$  نشان می‌دهد. در واقع هر چه سطح دمای اعمال شده به نمونه کامپوزیتی بالاتر باشد تخریب در نمونه بالاتر باشد میزان رشد

تخریب در میکرو ساختارهای آن بالاتر می‌باشد. همچنین هر چه مقدار فاکتور تخریب در نمونه بالاتر باشد نرمی خزشی آن بیشتر می‌شود که از مقایسه دو شکل 12 و 13 به‌وضوح دیده می‌شود. با افزایش مقدار نرمی خزش و فاکتور تخریب در نمونه‌های کامپوزیتی، نرخ کرنش خزشی در نمونه‌های تحت آزمایش با افزایش سطح دما و تنش زیاد می‌شود که این موضوع در شکل 13 دیده می‌شود. در این شکل مقادیر نرخ کرنش در انتهای زمان خزش محاسبه شده است. معادله حاکم بر تغییرات نرخ کرنش خزشی حالت پایدار بر حسب دما در انتهای زمان خزش ناشی از نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده در سطوح مختلف تنش  $(0.2 - 0.6\sigma_{ult})$  و دمایی  $(75 - 150^\circ\text{F})$  در جدول شماره 7 آورده شده است.



**Fig. 11** Variations of the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage as a function of temperature under static stress  $\sigma_0 = 0.6\sigma_{ult}$

شکل 11 تغییرات پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش را بر حسب تغییرات دما در سطح تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.6\sigma_{ult}$

جدول 6 معادلات برازش شده بر روی پارامترهای  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  مدل برگر در مرحله خزش در تنش استاتیکی  $\sigma_0 = 0.6\sigma_{ult}$

**Table 6** Fitted equations for the burgers model parameters  $E_1, E_2, \eta_2, \eta_3$  during the creep stage under static stress  $\sigma_0 = 0.6\sigma_{ult}$

$R^2$	d	c	b	a	Function	Parameter
1	204.1	-2.455	0.01847	-5.118E-05	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_1$
1	3373	-44.46	0.3365	-0.001043	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$E_2$
1	0.00403	8.446E+04	0.04482	-131.9	$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot T) + c \cdot \exp(d \cdot T)$	$\eta_2$
1	1.162E+07	-1.689E+05	1168	-2.987	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$\eta_3$

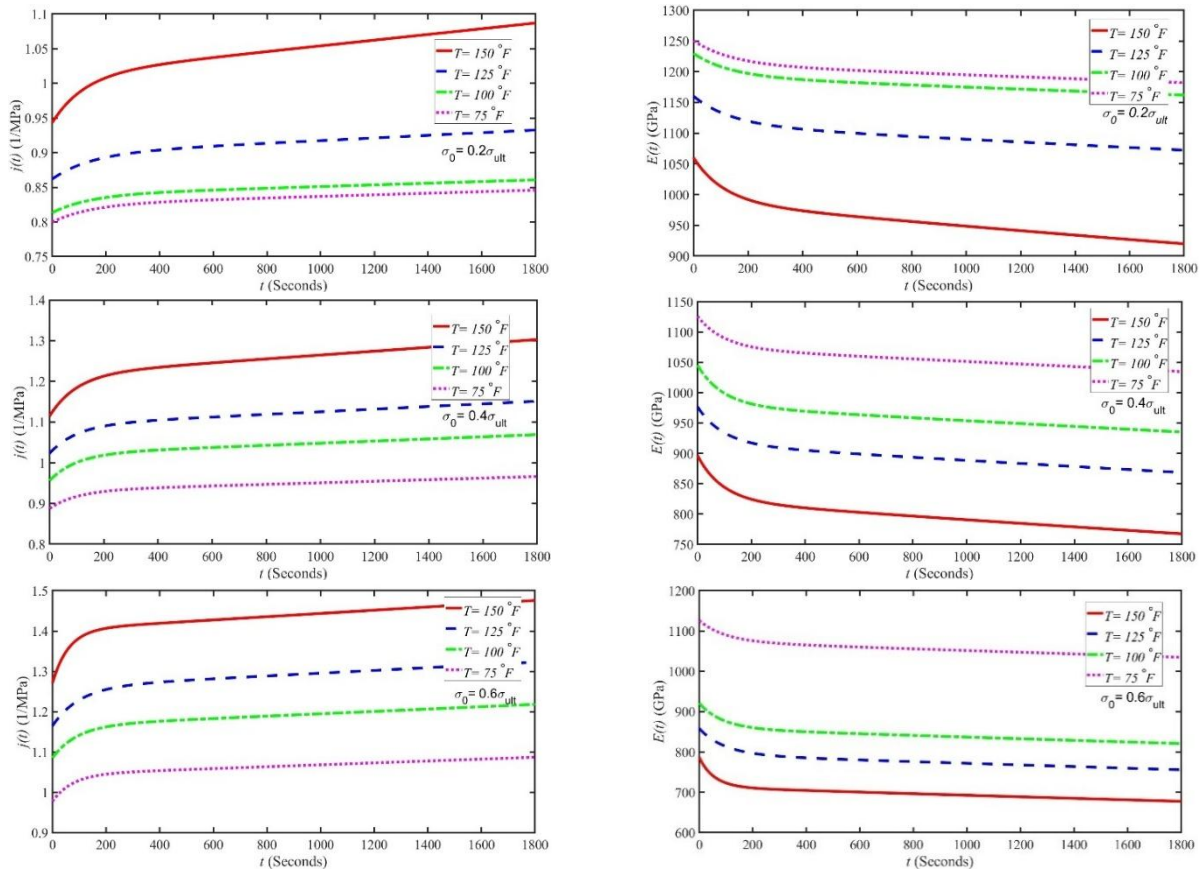


Fig. 12 Creep compliance and creep modulus as a function of time under various stress levels ( $0.2 - 0.6\sigma_{ult}$ ) and temperatures ( $75-150^{\circ}F$ )

شکل 12 نرمی خزشی و مدول خزشی بر حسب گذر زمان تحت سطوح مختلف تنش ( $0.2 - 0.6\sigma_{ult}$ ) و دمایی ( $75 - 150^{\circ}F$ )

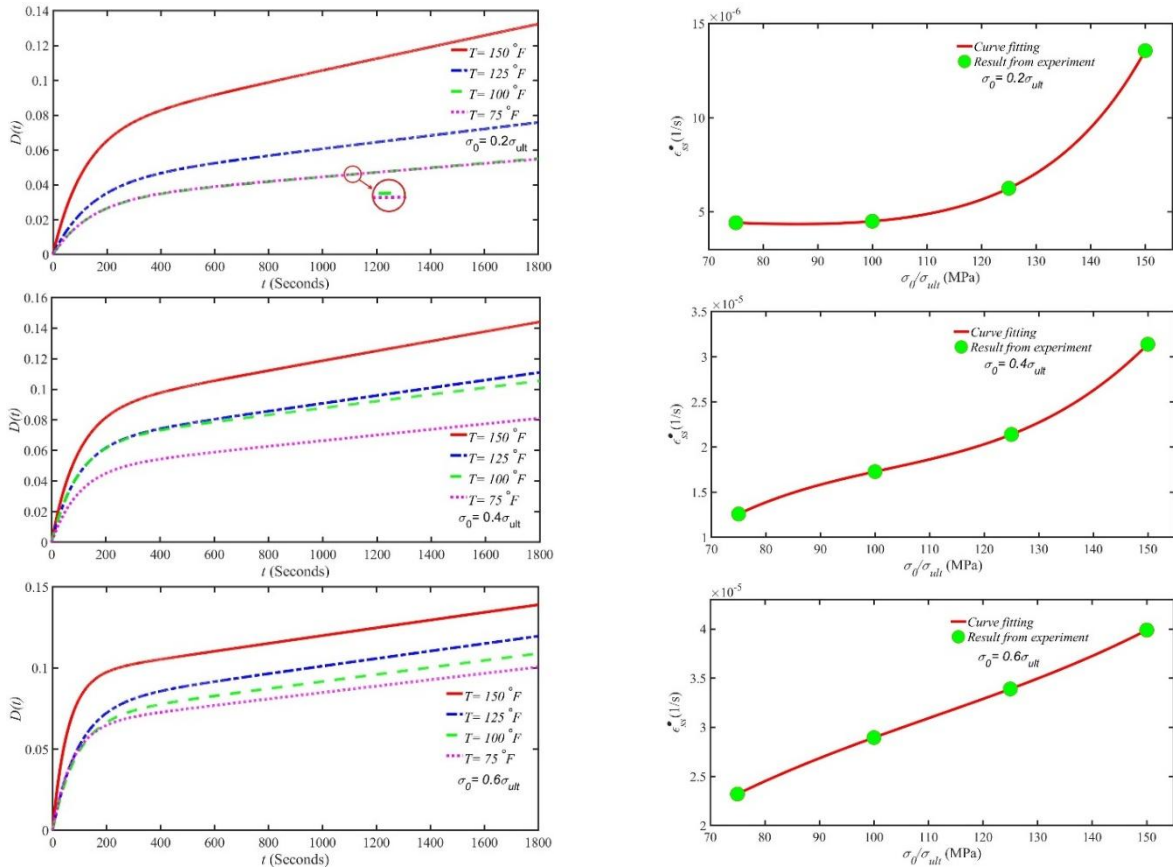


Fig. 13 Damage factor and variation of creep strain rate as a function of time under different stress levels ( $0.2 - 0.6\sigma_{ult}$ ) and temperature ( $75-150^{\circ}F$ )

شکل 13 فاکتور تخریب و تغییر نرخ کرنش خزشی بر حسب گذر زمان تحت سطوح مختلف تنش ( $0.2 - 0.6\sigma_{ult}$ ) و دمایی ( $75 - 150^{\circ}F$ )

جدول 7 معادله برازش شده بر روی نرخ کرنش خزشی در انتهای زمان خزش ناشی در سطوح مختلف تنشی ( $0.2 - 0.6 \sigma_{ult}$ ) و دمایی ( $75 - 150^\circ F$ )

Table 7 Fitted equation on the creep strain rate at the end of the creep duration induced under various stress levels ( $0.2-0.6\sigma_{ult}$ ) and temperatures ( $75-150^\circ F$ )

$R^2$	d	c	b	a	Function	Level stress
1	0.04953	6.461E-09	-0.0059	6.48E-06	$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot T) + c \cdot \exp(d \cdot T)$	$0.2 \sigma_{ult}$
1	-6.93E-05	2.287E-06	-2.108E-08	6.87E-11	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$0.4 \sigma_{ult}$
1	-1.69E-05	9.1E-07	-6.451E-09	1.94E-11	$f(x) = aT^3 + bT^2 + cT + d$	$0.6 \sigma_{ult}$

#### 6- مراجع

- [1] Papanicolaou, G., Zaoutsos, S., "Viscoelastic Constitutive Modeling Of Creep And Stress Relaxation In Polymers And Polymer Matrix Composites," In Creep And Fatigue In Polymer Matrix Composites, Second ed., Woodhead Publishing, Cambridge, UK, pp. 3–59, 2019.
- [2] Harrison, W. J., Evans, W. J., "Application Of The Theta Projection Method To Creep Modelling Using Abaqus," Abaqus Regional Users Conference, Swansea University, Swansea, UK. 2007.
- [3] Zabulionis, D., Gailius, A., "Numerical Modelling Of Creep Functions Of Laminated Composites," Mechanika, Vol. 65, No. 3, pp. 5–11, 2007.
- [4] Chen, D.-L., Yang, P.-F., Lai, Y.-S., "A Review Of Three-Dimensional Viscoelastic Models With An Application To Viscoelasticity Characterization Using Nanoindentation," Elsevier, Vol. 52, No. 3, pp. 541–558, 2012.
- [5] Guedes, R. M., "Creep And Fatigue In Polymer Matrix Composites," Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2019.
- [6] Yen, S.-C., Williamson, F.L., "Accelerated Characterization Of Creep Response An Off-Axis Composite Material," Composites Science And Technology, Vol. 38, No. 2, pp. 103–118, 1990.
- [7] Guede, R., "Creep And Fatigue Lifetime Prediction Of Polymer Matrix Composites Based On Simple Cumulative Damage Laws," Composites Part A: Applied Science And Manufacturing, Vol. 39, No. 11, pp. 1716–1725, 2008.
- [8] Muliana, A., Nair, A., Khan, K. A., Wagner, S., "Characterization Of Thermo-Mechanical And Long-Term Behaviors Of Multi-Layered Composite Materials," Composites Science And Technology, Vol. 66, No. 15, pp. 2907–2924, 2006.
- [9] Mohan, M., Adams, DF., "Nonlinear Creep-Recovery Response Of Polymer Matrix And Its Composites," Experimental Mechanics, Vol. 25 pp. 262–271, 1985.
- [10] Muddasani, M., Sawant, S., Muliana, A., "Thermo-Viscoelastic Responses Of Multilayered Polymer Composites: Experimental And Numerical Studies," Composite Structures, Vol. 92, No. 11, pp. 2641–2652, 2010.
- [11] Katouzian, M., Bruller, O. S., Horoschenkoff, A., "On The Effect Of Temperature On The Creep Behavior Of Neat And Carbon Fiber Reinforced PEEK And Epoxy Resin," J Compos Mater, Vol. 29, no. 3, pp. 372–87, 1995.
- [12] Song, R., Muliana, A. H., Palazotto, A., "An Empirical Approach To Evaluate Creep Responses In Polymers And Polymeric Composites And Determination Of Design Stresses," Composite Structures, Vol. 148, pp. 207–223, 2016.
- [13] Muliana A., Haj-Ali, R., "Multiscale Modeling For The Long-Term Behavior Of Laminated Composite Structures," AIAA journal, Vol. 43, No. 8, pp. 1815–1822, 2005.
- [14] Hiel, C. C., Brinson, H. F., Cardon, A. H., "The Nonlinear Viscoelastic Response Of Resin Matrix Composites," Applied Science, Vol. 2, pp. 271–281, 1983.
- [15] Violette, M. G., Schapery, R., "Time-Dependent Compressive Strength Of Unidirectional Viscoelastic Composite Materials," Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 6, pp. 133–145, 2002.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق به مقایسه دو مدل تحلیلی ویسکوالاستیک چهار پارامتری برگر و انتگرال یگانه شپری در پیش‌بینی رفتار خزشی بلند مدت یک چندلایه کامپوزیتی شیشه / وینیل استر پرداخته شده است. در ابتدا به معرفی دو مدل ساختاری خزشی پرداخته شده است. مدل‌سازی رفتار خزشی نمونه‌های کامپوزیتی ابتدا در سطح دمایی  $75^\circ F$  و سطوح تنشی ( $0.2 - 0.6 \sigma_{ult}$ ) انجام گرفت. در سطوح تنشی ( $0.4 - 0.6 \sigma_{ult}$ ) مدل برگر از انطباق بسیار بهتری نسبت به مدل شپری در پیش‌بینی رفتار خزشی بلند مدت نمونه‌ها برخوردار است. در مدل‌سازی مرحله ریکاوری نمونه‌ها نیز مدل برگر از دقت بسیار بهتری نسبت به مدل شپری برخوردار می‌باشد. همچنین مدل برگر در پیش‌بینی کرنش پس‌ماند خزشی از مدل ویسکوالاستیک شپری کاملاً دقت بیشتری دارد. در مجموع می‌توان بیان داشت که مدل شپری با افزایش زمان محور افقی زمان را قطع نموده و مقدار کرنش صفر را نشان می‌دهد، در حالیکه در واقعیت این گونه نیست. بنابراین به نظر می‌رسد مدل شپری مناسب تحلیل خزش در کامپوزیت‌های ترموست نمی‌باشد. در ادامه به ترتیب تحت سطوح تنشی ( $0.2 - 0.6 \sigma_{ult}$ ) و سطوح دمایی ( $75 - 150^\circ F$ ) مدل‌سازی رفتار خزشی نمونه‌ها صورت پذیرفت و مشاهده گردید مدل چهار پارامتری برگر از دقت بسیار بیشتری نسبت به مدل ویسکوالاستیک شپری در پیش‌بینی رفتار بلند مدت خزشی کامپوزیت‌های ترموست شیشه / وینیل استر برخوردار می‌باشد و هرچه سطح تنش و دما بالاتر باشد این دقت بیشتر نمایان می‌شود. همچنین مشخص گردید که با افزایش سطوح دما تحت تنش ثابت به ترتیب نرمی خزشی و فاکتور تخریب و نرخ خزشی افزایش و مدول خزشی قطعات کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که پارامترهای مدل چهار پارامتری برگر با تغییر سطح تنش یا دما دچار تغییر می‌شود، که معادلات حاکم بر این تغییرات در هر مرحله بطور جداگانه برای کامپوزیت شیشه / وینیل استر محاسبه و ارائه شد.

#### 5- فهرست علائم

ضریب فنر المان ماکسول (MPa)	$E_1$
ضریب فنر المان کلویین (MPa)	$E_2$
زمان (seconds)	$t$
دما ( $^\circ F$ )	$T$
علائم یونانی	
ضریب ویسکوز المان کلویین ( $MPa \cdot sec$ )	$\eta_2$
ضریب ویسکوز المان ماکسول ( $MPa \cdot sec$ )	$\eta_3$
تنش (MPa)	$\sigma$
کرنش	$\epsilon$
زیرنویس‌ها	
نهایی	ult
خزش	cr

- And Twisting Loadings,” *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, Vol. 40, No. 22, pp. 4225–4238, 1997.
- [32] Scott, D. W., Zureick, A.-H., “Compression Creep Of a Pultruded E-Glass/Vinylester Composite,” *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 8, pp. 1361–1369, 1998.
- [33] Hosseinpour, K., Ghasemi, A. R., “Thermal Variations Of Thermo-Mechanical Loading Effects On Creep Stress And Strain Distribution In Multi-layered Composite Cylinder,” *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, Vol. 9, No. 1, pp. 115–123, 2022.
- [34] Zhang, S. Y., Xiang, X. Y., “Creep Characterization Of a Fiber Reinforced Plastic Material,” *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, Vol. 11, No. 10, pp. 1187–1194, 1992.
- [35] Harper, B., Weitsman, Y., “Characterization Method For a Class Of Thermorheologically Complex Materials,” *Journal of Rheology*, Vol. 29, No. 1, pp. 49–66, 1985.
- [36] Lou, Y., Schapery, R. A., “Viscoelastic Characterization Of a Nonlinear Fiber-Reinforced Plastic,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, No. 2, pp. 208–234, 1971.
- [37] Papanicolaou, G. C., Xepapadaki, A., Abirama, G., Jiga, G., “Viscoelastic Characterization Of a Glass-Epoxy Composite,” *Materiale Plastice*, Vol. 45, No. 3, pp. 221–227, 2008.
- [38] Findley, W. N., Davis, F. A., “Creep And Relaxation Of Nonlinear Viscoelastic Materials,” Courier Corporation, New York, 2013.
- [16] Jain, R., Goswamy, S., Asthana, K., “A Study Of The Effect Of Natural Weathering On The Creep Behaviour Of Glass Fibre-Reinforced Polyester Laminates,” *Polymer Composites*, Vol. 10, No. 1, pp. 39–43, 1979.
- [17] Faraz, M., Besseling, N., Korobko, A., Picken, S., “Characterization And Modeling Of Creep Behavior Of a Thermoset Nanocomposite,” *Polymer Composites*, Vol. 36, No. 2, pp. 322–329, 2015.
- [18] Dezulier, Q., Clement, A., Davies, P., Jacquemin, F. J., Arhant, M., Flageul, B., “Characterization And Modelling Of The Hygro-Viscoelastic Behaviour Of Polymer-Based Composites Used In Marine Environment,” *Philosophical Transactions Of The Royal Society A*, Vol. 381, No. 2240, p.p 20210221, 2023.
- [19] Ornaghi, H. L., Almeida, J. H. S., Monticeli, F. M., Neves, R. M., Cioffi, M. O. H., “Time-Temperature Behavior Of Carbon/Epoxy Laminates Under Creep Loading,” *Mechanics Of Time-Dependent Materials*, Vol. 25, pp. 601–615, 2021.
- [20] Jia, Y., Jiang, Z. M., Gong, X. L., Zhang, Z., “Creep Of Thermoplastic Polyurethane Reinforced With Ozone Functionalized Carbon Nanotubes,” *Express Polymer Letters*, Vol. 6, No. 9, p.p 750–758, 2012.
- [21] Mosiewicki, M. A., Marcovich, N. E., Aranguren, M. I., “Creep Behavior Of Wood Flour Composites Made From Linseed Oil-Based Polyester Thermosets,” *Journal Of Applied Polymer Science*, Vol. 121, No. 5, pp. 2626–2633, 2011.
- [22] Sun, T., Yu, C., Yang, W., Zhong, J., Xu, Q., “Experimental And Numerical Research On The Nonlinear Creep Response Of Polymeric Composites Under Humid Environments,” *Composite Structures*, Vol. 251, pp. 112673, 2020.
- [23] Papanicolaou, G., Xepapadaki, A., Tagaris, G., “Effect Of Thermal Shock Cycling On The Creep Behavior Of Glass-Epoxy Composites,” *Composite Structures*, Vol. 88, No. 3, pp. 436–442, 2009.
- [24] Berardi, V. P., Perrella, M., Armentani, E., Cricri, G., “Experimental Investigation And Numerical Modeling Of Creep Response Of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 44, No. 4, pp. 1085–1095, 2021.
- [25] Brauner, C., Herrmann, A. S., Niemeier, P. M., Schubert, K., “Analysis Of The Non-Linear Load And Temperature-Dependent Creep Behaviour Of Thermoplastic Composite Materials,” *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 30, No. 3, pp. 302–317, 2017.
- [26] Zhao, L., Wei, Y., Zhang, G. W., Xi, F., “Short-Term Creep Properties And Creep Model Of Wood-Plastic Composites,” *Polymer Composites*, Vol. 43, No. 2, pp. 924–933, 2022.
- [27] Xu, Y., Wu, Q., Lei, Y., Yao, F., “Creep Behavior Of Bagasse Fiber Reinforced Polymer Composites,” *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 9, pp. 3280–3286, 2010.
- [28] Georgiopoulos, P., Kontou, E., Christopoulos, A., “Short-Term Creep Behavior Of a Biodegradable Polymer Reinforced With Wood-Fibers,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80, pp. 134–144, 2015.
- [29] Yi, S., Hilton, H. H., Ahmad, M. F., “Nonlinear Thermo-Viscoelastic Analysis Of Interlaminar Stresses In Laminated Composites,” *Journal Of Applied Mechanics*, Vol. 63, No. 1, pp. 218–224, 1996.
- [30] Yi, S., Ahmad, M. F., Hilton, H. H. “Nonlinear Viscoelastic Stress Singularities Near Free Edges Of Unsymmetrically Laminated Composites,” *International Journal Of Solids And Structures*, Vol. 35, No. 24, pp. 3221–3237, 1998.
- [31] Yi, S., “Finite Element Analysis Of Free Edge Stresses In Non-Linear Viscoelastic Composites Under Uniaxial Extension, Bending