



استحکام خزشی کامپوزیت‌های هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های خطوط انتقال برق

محسن مالمراد¹، خسرو رحمانی^{2*}، روح‌اله سرفراز³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 16765-1719، kh_rahmani@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان:

کامپوزیت هیبریدی،

خزش،

آنالیز دینامیکی-مکانیکی،

دما

چکیده

در این مقاله، استحکام خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در نسل جدید هادی‌های پرفریت خطوط انتقال برق در دماهای عملکردی پیش‌بینی شده است. میله‌های کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در مغزی این هادی‌ها به صورت تک‌جهتی و متشکل از هسته کربن-اپوکسی و پوسته شیشه-اپوکسی به روش پالتروژن ساخته شده‌اند. جهت تعیین مقادیر مدول ذخیره و مدول اتلاف بر حسب دما، آنالیز دینامیکی-مکانیکی بر روی نمونه‌های برش داده شده از هسته کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف صورت گرفته است. همچنین آزمون خمش سه نقطه‌ای متناسب با دمای کارکرد هادی‌ها، در چند دمای مختلف با نرخ بارگذاری ثابت بر روی نمونه‌های میله‌ای کامپوزیت هیبریدی انجام شده است. با استفاده از اصل برهم‌نهی دما-زمان و استفاده از نتایج آنالیز دینامیکی-مکانیکی، نمودار مادر مدول ذخیره در دمای مرجع دلخواه ایجاد شده است. با استفاده از عامل انتقال دما-زمان بدست آمده از نمودار مادر مدول ذخیره و نیز استحکام‌های خمشی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف، نمودار مادر استحکام خمشی با نرخ کرنش ثابت ساخته شده است. سپس با استفاده از روش‌های موجود، نمودار مادر استحکام خزشی در دمای کاری دلخواه رسم شده است که می‌تواند جهت ارزیابی دوام هادی‌های مذکور در صنعت انتقال برق مورد استفاده قرار گیرد. پیش‌بینی عمر خزشی در شرایط بارگذاری حدی نشان می‌دهد که این هادی‌ها رفتار خزشی خوبی در شرایط عملکردی در مدت طولانی دارند.

Creep strength of hybrid composites used in power transmission line conductors

Mohsen Malmorad, Khosrow Rahmani*, Roohollah Sarfaraz

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-1719, Tehran, Iran, kh_rahmani@sbu.ac.ir

Keywords

Hybrid composites,
Creep,
DMA,
Temperature

Abstract

In this paper, the creep strength of hybrid composites used in the new generation of power transmission line conductors is predicted. The hybrid composite rods consist of carbon fiber/epoxy composite core surrounded by a glass fiber/epoxy composite shell. The hybrid rods were fabricated by using the pultrusion process. Dynamic mechanical analysis was carried out at various frequencies on specimens cut from the carbon/epoxy fiber composite core. In addition, the hybrid composite rods were subjected to three-point bending experiments at constant loading rate and different temperatures. The master curve of the storage modulus corresponding to carbon/epoxy composite core was derived at the desired reference temperature based on the time-temperature superposition principle. Consequently, the master curve of the constant strain rate flexural strength was constructed using the time-temperature shift factors and the monotonic flexural strengths of hybrid composites at different temperatures. Based on these data, the creep strength master curve was developed at the operating temperature. The prediction of creep life based on the constructed master curve shows a proper response of these conductors at service condition.

1- مقدمه

تحمل‌کننده‌ی بار تشکیل شده‌اند. مغزی کامپوزیت هیبریدی شامل دو قسمت هسته و پوسته است که به ترتیب از کامپوزیت تک‌جهتی الیاف کربن-اپوکسی و، کامپوزیت تک‌جهتی الیاف شیشه-اپوکسی تشکیل شده است (شکل 1). لایه شیشه-اپوکسی به منظور جلوگیری از تشکیل پیل گالوانیک الیاف کربن با آلومینیوم، به دور هسته داخلی پوشانده می‌شود. از ویژگی‌های مهم این هادی‌ها می‌توان به شکم‌دهی کم، کاهش تلفات خطوط شبکه و

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری در نسل جدید هادی‌های استحکام بالا و شکم‌دهی پایین¹ مورد استفاده در صنعت انتقال برق مورد توجه قرار گرفته است. این نوع هادی‌ها، از مفتول‌های دوزنقه‌ای آلومینیوم به عنوان هادی جریان برق و مغزی کامپوزیت هیبریدی به عنوان المان اصلی

¹ High Strength Low Sag Conductors (HSLs)

Please cite this article using:

Malmorad M., Rahmani, KH., Sarfaraz, R., "Creep strength of hybrid composites used in power transmission line conductors", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. *, No.*, pp. ****, 20**.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

پلیمری تقویت شده با الیاف کربن بر اساس این روش، تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. [12].

پیش‌بینی استحکام خزشی مغزی کامپوزیت هیبریدی ساخته شده به روش پالترژون در بارگذاری خمشی، از نوآوری‌های این مقاله است. به این منظور، ابتدا آنالیز دینامیکی-مکانیکی^۴ در چند فرکانس بارگذاری بر روی نمونه‌های آماده شده صورت گرفته است و با استفاده از نتایج آن، عامل انتقال دما-زمان برای دماهای مختلف نسبت به دمای مرجع انتخابی به دست آمده-اند. سپس آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای در چند دمای مختلف با نرخ بارگذاری ثابت بر نمونه‌های هیبریدی انجام شده است و با استفاده از روش‌های شتابدار تخمین عمر خزشی، نمودار مادر^۵ استحکام خزشی کامپوزیت مورد نظر در دمای کاری دلخواه محاسبه شده است.

2- روش‌شناسی^۶

یکی از مدل‌های پیش‌بینی رفتار بلند مدت کامپوزیت‌های پلیمری، استفاده از روش‌های شتابدار است. در این روش‌ها، نتایج آزمون‌های کوتاه مدت، با استفاده از اصل برهم‌نهی دما-زمان به زمان‌های طولانی‌تر برون‌یابی می‌شود. [9].

2-1- اصل برهم‌نهی دما-زمان

در کامپوزیت‌های پلیمری با افزایش دما، زمان آسایش^۷ به علت ایجاد انرژی لازم برای حرکت ملکول‌های زمینه پلیمر کاهش می‌یابد و اثر زمان طولانی (فرکانس پایین) بر حرکت ملکول‌ها با اثر دمای بالا معادل در نظر گرفته می‌شود [13]. به معادل بودن تاثیر زمان و دما بر فرآیند آسایش اصل برهم‌نهی دما-زمان گفته می‌شود. بر اساس این اصل، نمودارهای خواص مکانیکی مواد پایه پلیمری در دماهای مختلف می‌توانند در طول محور لگاریتمی زمان انتقال یابند و نمودار مادر در دمای مرجع انتخابی را تشکیل دهند. نمودار به دست آمده از برهم‌نهی در زمان‌ها (فرکانس‌ها) و دماهای متفاوت (نسبت به دمای دلخواه انتخابی) نمودار مادر نامیده می‌شود که زمان‌های طولانی و خارج از گستره آزمایش را نیز پوشش می‌دهد [14]. به مقدار انتقال بر روی محور لگاریتمی زمان، عامل انتقال دما-زمان^۸ گفته می‌شود و با رابطه (1) بیان می‌گردد:

$$a_T = \frac{t_{T_0}}{t_T} \quad (1)$$

a_T عامل انتقال دما-زمان و t زمان آسایش و اندیس‌های T و T_0 به ترتیب دمای آزمایش و دمای مرجع را نشان می‌دهند.

روابط آرهینوس^۹ و ویلیامز-لندل-فری^{۱۰} (WLF) از مهمترین مدل‌های ارائه شده برای ارتباط بین دما و زمان بر اساس اصل TTS می‌باشند [15]. رابطه آرهینوس در دماهای خارج از دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) پلیمرها و رابطه WLF در محدوده دمای انتقال شیشه‌ای و بالاتر صادق است

عبور بیش از دو برابری جریان برق نسبت به هادی‌های معمولی اشاره نمود [1]. استفاده از هادی‌های ساخته شده با مغزی کامپوزیتی موجب افزایش بهره‌وری سرمایه، صرفه‌جویی عملیاتی به وسیله تلفات کمتر خطوط انتقال و کاهش تولید گاز دی اکسید کربن به میزان 2.5 برابر خواهد شد [2]. کاهش تلفات خطوط انتقال نه تنها باعث کاهش مصرف سوخت در نیروگاه‌ها می‌شود بلکه می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر گازهای مضر را نیز به طور چشمگیری کاهش دهد. هادی‌های هوایی مورد استفاده در شبکه انتقال برق در معرض بارگذاری‌های مکانیکی نظیر بارهای ناشی از نیروی باد و وزن هادی قرار دارند و دمای کاری آن‌ها متناسب با جریان برق عبوری بین 100 تا 180 درجه سانتیگراد متغیر است [3]. جایگزینی هادی‌های مرسوم با هادی‌های نسل جدید به منظور افزایش عمر و بهره‌وری شبکه انتقال برق مستلزم بررسی و پیش‌بینی عمر بلند مدت این نوع هادی‌ها به ویژه هسته کامپوزیتی به کار رفته در آن‌ها در شرایط و دمای کاری واقعی است.



Fig. 1 A high strength low sag conductor consisting of aluminum wires and a hybrid composite core

شکل 1 نمونه‌ای از یک هادی با استحکام بالا و شکم‌دهی پایین، شامل مفتول‌های آلومینیومی و مغزی کامپوزیت هیبریدی

استحکام خمشی کامپوزیت هیبریدی اشاره شده پس از پیرسازی^۱ و نیز تحت تاثیر ازون^۲ توسط کاموسا و همکاران [4-5] بررسی شده است. نوت و همکاران [3 و 6] تاثیر دما بر استحکام کششی و اثر رطوبت بر استحکام خمشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین عمر خزشی کامپوزیت هیبریدی تحت بارگذاری کششی به وسیله روش‌های شتابدار پیش‌بینی شده است [7]. استحکام خزشی این نوع کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی، که بسیار مهم بوده و در حین کارکرد به تناوب رخ می‌دهد، در دماهای عملکردی تاکنون بررسی نشده است که یکی از دلایل اصلی آن پرهزینه و وقت‌گیر بودن انجام این‌گونه آزمون‌ها است.

به منظور کاهش هزینه‌ها و زمان لازم برای تخمین عمر درازمدت تحت شرایط عملکردی، از روش‌های مدل‌سازی و شتابدار تخمین عمر استفاده می‌شود [8-10]. ناکادا و همکاران [11] روش شتابداری را بر اساس اصل برهم‌نهی دما-زمان^۳ (TTS) برای پیش‌بینی استحکام خزشی کامپوزیت‌های پلیمری توسعه دادند. پیش‌بینی استحکام خزشی و خستگی کامپوزیت‌های

¹ Aging

² Ozone

³ Time-Temperature Superposition (TTS) Principle

⁴ Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

⁵ Master curve

⁶ Methodology

⁷ Relaxation time

⁸ Time-Temperature Shift Factor

⁹ Arrhenius

¹⁰ Williams-Landel-Ferry

میله‌ای به قطر 7 میلی‌متر و از دو قسمت داخلی و پوسته خارجی تشکیل شده است. هسته از الیاف تک‌جهته کربن از نوع T700-12k و زمینه اپوکسی و پوسته از الیاف تک‌جهته شیشه ECR و زمینه اپوکسی تشکیل شده است. زمینه‌ی استفاده شده در هسته و پوسته یکسان و از نوع اپوکسی دمای بالا Ly-5210 شرکت هانستمن و هاردنر مربوطه Hy-5158 با نسبت وزنی رزین به هاردنر 1:4 است. مقطع نمونه کامپوزیت ساخته شده در شکل 3 نشان داده شده است. قطر هسته کامپوزیت در حدود 5 میلی‌متر و ضخامت بخش شیشه‌ای در حدود 1 میلی‌متر است. درصد حجمی الیاف در هر دو قسمت کربن و شیشه تقریباً 70 درصد است.

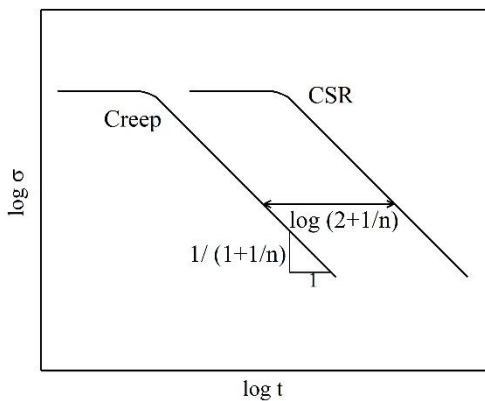


Fig.2 Schematic relationship between CSR and creep master curves [18]

شکل 2 رابطه‌ی بین نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی [18]

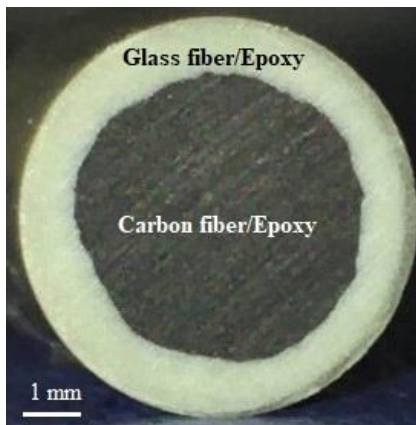


Fig.3 Cross section of hybrid composite core

شکل 3 سطح مقطع مغزی کامپوزیت هیبریدی

2-3 آنالیز دینامیکی-مکانیکی

نمونه‌های آنالیز دینامیکی-مکانیکی به صورت مستطیلی از قسمت هسته کامپوزیت کربن-اپوکسی به ابعاد $40 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ برش داده شدند و توسط دستگاه آنالیز ساخت شرکت متلر تولدو⁵ موجود در پژوهشگاه پلیمر ایران مورد آزمون قرار گرفتند. نمونه‌ها تحت بارگذاری نوسانی با دامنه ثابت

[16]. از آنجا که دمای انتقال شیشه‌ای به عنوان حداکثر دمای کاری کامپوزیت‌ها در صنایع در نظر گرفته می‌شود [17] رابطه آرهینوس (رابطه 2) برای به‌دست آوردن نمودار مادر خواص مکانیکی این مواد در دماهای کاری استفاده می‌شود.

$$\log a_T = \frac{\Delta H}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2)$$

ΔH انرژی فعال‌سازی برای حرکت ملکول‌ها و R ثابت جهانی گازها می‌باشد. در رابطه 2 دماها بر حسب کلوین می‌باشند.

2-2 روش آزمون شتابدار¹

یکی از روش‌های تخمین عمر خزشی کامپوزیت‌های پلیمری، روش آزمون شتابدار توسعه یافته توسط ناکادا و همکاران [11] است که برای انواع کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن با زمینه‌های گرم‌انرم² و گرم‌سخت³ در بارگذاری‌های طولی، عرضی و خمشی اعمال شده و نتایج مطلوبی از آن به‌دست آمده است. این روش بر اساس اصل برهم‌نهی دما-زمان و با این فرض که واماندگی زمینه پلیمری کنترل‌کننده واماندگی نهایی در کامپوزیت‌ها است، توسعه یافته است. در این روش، پس از بررسی خواص ویسکوالاستیک زمینه، عامل انتقال دما-زمان در دمای مرجع انتخابی به‌دست می‌آید و سپس استحکام‌های مکانیکی در بارگذاری با نرخ ثابت در دماهای مختلف توسط آزمون‌های ساده کوتاه مدت تعیین می‌گردند. استحکام‌های به‌دست آمده در دماهای مختلف به اندازه عامل انتقال دما-زمان، که نسبت به دمای مرجع نرمال می‌شوند، در طول محور لگاریتمی زمان انتقال داده می‌شوند. نمودار ساخته شده، نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت⁴ در دمای مرجع می‌باشد. کریستسن و میانو [18] نشان دادند که برای کامپوزیت‌های پلیمری، شیب نمودارهای استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی با هم برابر هستند. بنابراین، نمودار مادر استحکام خزشی در بارگذاری خمشی می‌تواند بر مبنای نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت به‌دست آید. اگر شیب نمودار مادر لگاریتم استحکام با نرخ کرنش ثابت نسبت به لگاریتم زمان انتقال یافته $\frac{1}{1+1/n}$ باشد، نمودار مادر لگاریتم استحکام خزشی با انتقال افقی به اندازه $\log \left(2 + \frac{1}{n} \right)$ در طول محور لگاریتم زمان به سمت چپ ساخته می‌شود (شکل 2).

3 مواد و آزمون

1-3 مواد

در این مطالعه، کامپوزیت‌های هیبریدی با الیاف تک‌جهته در راستای طولی به روش پالترژن ساخته شده‌اند. نمونه کامپوزیت ساخته شده به صورت

¹ Accelerated Testing Methodology (ATM)

² Thermo-plastic

³ Thermoset

⁴ Constant Strain Rate (CSR) Strength Master Curve

⁵ Mettler Toledo

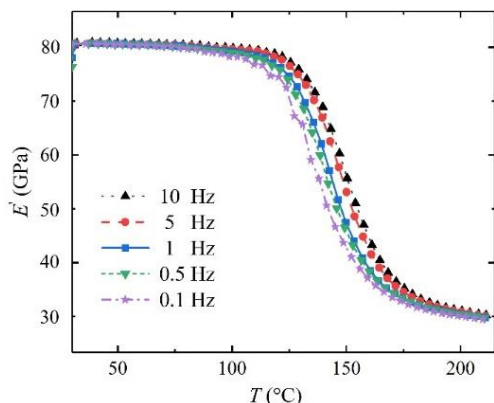


Fig. 4 DMA results of Carbon/epoxy composite for various frequencies at 3 °C/min: storage modulus vs temperature

شکل 4 مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دما در فرکانس‌های مختلف و نرخ دماهی 3 °C/min

مقادیر مدول اتلاف کامپوزیت کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف نسبت به دما در شکل 5 آمده است. در تمامی فرکانس‌ها، با افزایش دما، مدول اتلاف ابتدا افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. معمولاً برای کامپوزیت‌ها دمای متناظر با مقدار بیشینه مدول اتلاف به عنوان دمای انتقال شیشه‌ای گزارش می‌شود [20]. نقطه پیک نمودارهای اتلاف با افزایش فرکانس، به سمت راست (دماهای بالاتر) و بالا (مقادیر مدول اتلاف بیشتر) انتقال پیدا می‌کنند. نکته قابل ذکر این است که مستقل از فرکانس اعمالی، مدول ذخیره و مدول اتلاف در دماهای بالا به مقادیر خاصی همگرا می‌شوند.

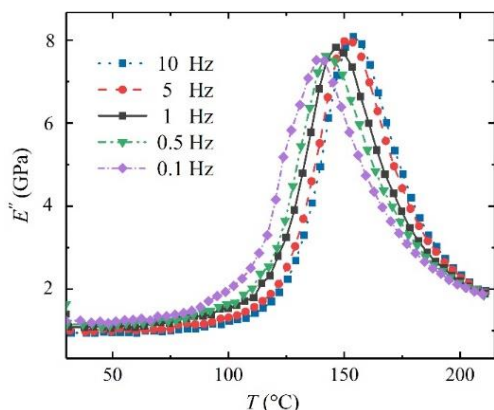


Fig. 5 DMA results of carbon/epoxy composite for various frequencies at 3 °C/min: loss modulus vs temperature

شکل 5 مدول اتلاف کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دما در فرکانس‌های مختلف و نرخ دماهی 3 °C/min

1-1-4-2 نمودار مادر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی

مقادیر لگاریتم مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به زمان t (معکوس فرکانس) در سمت چپ شکل 6 آورده شده است. با انتقال افقی نمودارها در دماهای مختلف نسبت به دمای مرجع ($T_0 = 50^\circ\text{C}$)، نمودار مادر مدول ذخیره نسبت به زمان انتقال یافته t' ساخته شده است (شکل 6

20 میکرومتر و با فرکانس‌های 0.1، 0.5، 1، 5 و 10 Hz و در حالت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای با فاصله تکیه‌گاه‌های ثابت برابر با 20 mm قرار داده شدند. آزمون‌ها در دماهای مختلف، از دمای محیط تا دمای 210 °C، با نرخ 3 °C/min انجام شد. با استفاده از داده‌های آزمون، مدول ذخیره و مدول اتلاف کامپوزیت به عنوان توابعی از دما اندازه‌گیری شدند.

3-3 آزمون خمش

آزمون‌های خمشی مطابق با استاندارد ASTM-D790 [19] انجام گردید. به منظور کاهش اثرات برش در نتایج آزمون، نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی به طول 170 میلی‌متر برش داده شدند و تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای با فاصله بین تکیه‌گاه‌های ثابت 120 mm قرار داده شدند (نسبت طول به قطر نمونه برابر با 16). آزمون توسط دستگاه یونیورسال 10 تن مجهز به محفظه‌ی حرارتی ساخت شرکت سنتام موجود در دانشگاه علم و صنعت در دماهای محیط، 120، 140، 160 و 180 °C صورت گرفت. در دمای محیط، یک نمونه و در بقیه دماها، دو نمونه آزمایش شدند. تمامی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون به مدت 30 دقیقه در دمای مورد نظر قرار داده شدند تا از یکنواختی دما در تمامی نقاط نمونه اطمینان حاصل شود. آزمون‌ها به صورت جابجایی کنترل و با نرخ 2 mm/min انجام شدند. تنش خمشی با اعمال رابطه 3 به داده‌های نیرو (F) - جابه‌جایی (δ) به دست آمده از آزمون خمشی سه نقطه‌ای محاسبه شدند.

$$\sigma_f = \frac{8Fl}{\pi d^3} \quad (3)$$

در این رابطه F ، L و d به ترتیب نیروی اعمال شده، فاصله بین تکیه‌گاه‌های ثابت و قطر میله‌ی کامپوزیتی در آزمون خمشی سه نقطه‌ای می‌باشند.

4- نتایج و بحث

1-1-4 آنالیز دینامیکی-مکانیکی

1-1-4 رفتار دینامیکی-مکانیکی

مقادیر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی در فرکانس‌های مختلف نسبت به دما در شکل 4 آمده است. با افزایش دما، مدول ذخیره کاهش می‌یابد. روند کاهش مدول ذخیره با دما را می‌توان در سه ناحیه مجزا بیان نمود. در ناحیه اول، از دمای محیط تا 120 °C، افت مدول ذخیره با دما کم و قابل صرف‌نظر کردن است و می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت (ناحیه ی شیشه‌ای-ای). در ناحیه دوم، بین دماهای 120 تا 170 °C، که به آن ناحیه انتقال شیشه‌ای گفته می‌شود، کاهش مدول ذخیره با دما شدید است. در ناحیه سوم، دماهای بالاتر از 170 °C، مدول ذخیره با نرخ کمی کاهش می‌یابد و می‌توان فرض نمود که با دما، ثابت می‌ماند (ناحیه رابری). مدول ذخیره از دمای محیط تا دمای 210 °C حدود 63 درصد کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس در کل محدوده‌ی دمای، مدول ذخیره به سمت راست محور دما یعنی دماهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند و در دمای ثابت مقادیر مدول ذخیره برای فرکانس‌های بالاتر، بیشتر است.

افزایش دما، شروع رفتار غیرخطی در جابه‌جایی‌های کمتر اتفاق می‌افتد. همچنین شیب نمودارها که نشان‌دهنده سفتی ظاهری نمونه‌ها است با افزایش دما کاهش می‌یابد. نقاط پیک نمودارها به عنوان شروع واماندگی در نظر گرفته شده است و تنش‌های متناظر با آن (رابطه 4) به عنوان استحکام خمشی کامپوزیت در شکل 9 با نشانه‌ها نشان داده شده است.

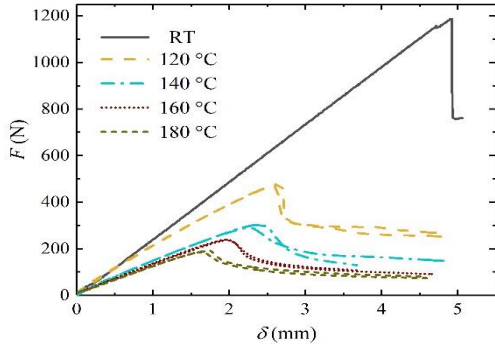


Fig. 8 Force-deflection curves of hybrid composite rods for various temperatures

شکل 8 نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف

3-4 نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت و استحکام خزشی

با انتخاب دمای مرجع 120 °C، متناسب با جریان عبوری 1400 آمپر [1] در هادی‌های خطوط انتقال برق، استفاده از مقادیر انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در بخش 4-1-2 و استفاده از رابطه آرهینوس (رابطه 2)، مقادیر عامل انتقال دما-زمان برای دماهای مختلف نسبت به دمای مرجع محاسبه شدند. با انتقال مقادیر استحکام خمشی در دماهای مختلف بر روی محور لگاریتم زمان به اندازه مقادیر عامل انتقال دما-زمان، نمودار مادر استحکام خمشی با نرخ کرنش ثابت ایجاد گردید (شکل 9).

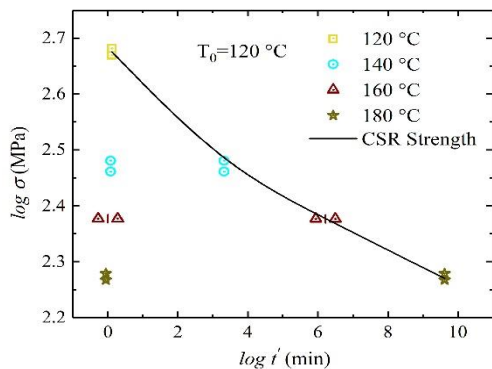


Fig. 9 Variation of flexural strength at different temperatures and CSR strength master curve at reference temperature 120 °C

شکل 9 مقادیر استحکام خمشی کامپوزیت هیبریدی در دماهای مختلف و نمودار مادر استحکام با نرخ کرنش ثابت در دمای مرجع 120 °C

با رسم نمودار لگاریتم استحکام با نرخ کرنش ثابت نسبت به لگاریتم زمان انتقال یافته و محاسبه n از شیب آن $(\frac{1}{1+n})$ ، مقدار انتقال افقی نمودار مادر استحکام خزشی با توجه به رابطه $\log(2 + \frac{1}{n})$ 1.40 محاسبه شد.

سمت راست). تشکیل یک نمودار یکنواخت، صحت اصل برهم‌نهی دما-زمان برای کامپوزیت کربن-اپوکسی را نشان می‌دهد [11].

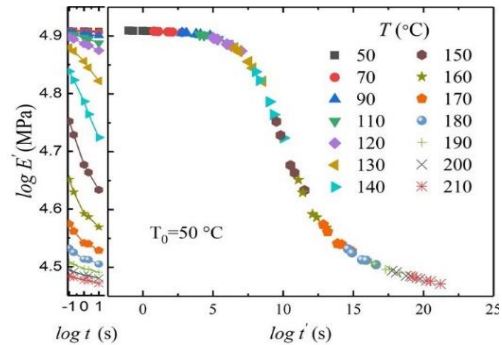


Fig. 6 Storage modulus master curve of Carbon/epoxy composite at reference temperature 50 °C

شکل 6 نمودار مادر مدول ذخیره کامپوزیت کربن-اپوکسی نسبت به دمای مرجع 50 °C

مقادیر عامل دما-زمان به‌دست آمده برای کامپوزیت مورد مطالعه در دماهای مختلف در شکل 7 آورده شده است. شیب نمودار مقادیر عامل دما-زمان نسبت به معکوس دما $(1000/T)$ در مراحل مختلف (شیشه‌ای، انتقال شیشه‌ای و رابری) متفاوت است. شیب نمودار با مقدار انرژی تولید شده توسط دما برای حرکت و چرخش ملکول‌های پلیمر متناسب است. با استفاده از رابطه 2 برای دماهای مرتبط با مرحله شیشه‌ای، مقدار انرژی فعال‌سازی 204 kJ/mol به‌دست می‌آید. این مقدار برای مرحله انتقال شیشه‌ای و مرحله رابری به ترتیب 494 و 648 kJ/mol می‌باشد. با استفاده از رابطه 2 و مقادیر انرژی فعال‌سازی محاسبه شده می‌توان عامل انتقال دما-زمان خواص مکانیکی کامپوزیت را برای هر دمایی در سه مرحله ذکر شده نسبت به دمای مرجع دلخواه به‌دست آورد.

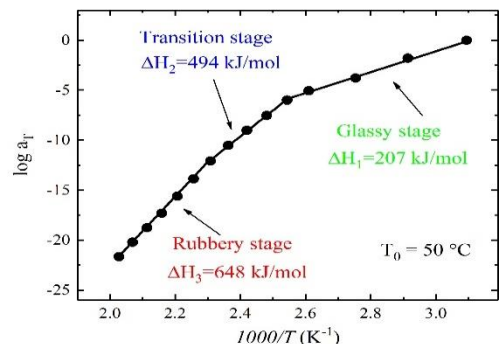


Fig. 7 Time-temperature shift factors of carbon/epoxy composite at reference temperature 50 °C

شکل 7 عامل انتقال دما-زمان کامپوزیت کربن-اپوکسی در دمای مرجع 50 °C

2-4 آزمون خمش

نمودارهای نیرو-جابجایی به‌دست آمده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در شکل 8 نشان داده شده‌اند. تمامی نمودارها در ابتدا رفتار خطی داشته و با افزایش دما، رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند و با

- نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اصل برهم‌نهی دما-زمان می‌تواند به شکل مناسبی برای مدل‌سازی خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه استفاده شود.
- عمر خزشی پیش‌بینی شده برای میله‌ی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه در دمای متناظر با عبور جریان 1400 آمپر و تنش خمشی معادل با 20% استحکام خمشی در دمای محیط و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان 1.7 در حدود 4 سال است. با توجه به اینکه عمده سیکل‌های بارگذاری هادی‌ها در تنش‌های به مراتب پایین‌تری اتفاق می‌افتد نتایج به‌دست آمده، استحکام خزشی مناسب این نوع هادی‌ها در عمرهای طولانی را تایید می‌کند.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر صمیمانه خود را از آقای دکتر فتح‌اله طاهری بهروز که با همکاری در برنامه آزمایشگاهی ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام می‌نمایند.

5- مراجع

- [1] Alawar, A., Bosze, E.J., Nutt, S.R., "A composite core conductor for low sag at high temperatures," IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, No. 3, pp. 2193-2199, 2005.
- [2] Jones, W. D., "More heat, less sag [power cable upgrades]," IEEE Spectrum, Vol. 43, No. 6, pp. 16-18, 2006.
- [3] Bosze, E.J., Alawar, A., Bertschger, O., Tsai, Y.I., Nutt, S.R., "High-temperature strength and storage modulus in unidirectional hybrid composites," Composites Science and Technology. Vol. 66, No. 13, pp.1963-1969, 2006.
- [4] Middleton, J., Hoffman, J., Burks, B., Predecki, P., and Kumosa, M., "Aging of a polymer core composite conductor: Mechanical properties and residual stresses". Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 69, pp. 159-67, 2015.
- [5] Middleton, J., Burks, B., Wells, T., Setters, A.M., Jasiuk, I., Kumosa, M., "The effect of ozone and high temperature on polymer degradation in polymer core composite conductors". Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, pp. 2282-90, 2013.
- [6] Tsai, Y.I., Bosze, E.J., Barjasteh, E., Nutt, S.R., "Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites", Composites Science and Technology, Vol. 69, No. 3, pp. 432-437, 2009.
- [7] Zhao, G., Wang, J., Hao, W., Luo, Y., Guo, G., "Creep life evaluation of aluminum conductor composite core utilized in high voltage electric transmission," Polymer Testing, Vol. 63, pp. 573-581, 2017.
- [8] Khalili, S.M.R., Eslami Farsani, R., Dastmard, R., "Experimental investigation of creep behavior in phenolic based polymer composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 2, pp. 37-42, 2015.
- [9] Rafiee, R. and Mazhari, B., "Modeling creep in long fiber reinforced laminated composites using micromechanical rules," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 409-418, 2017.
- [10] Ahmadi I., and Ataei, N., "Micromechanical modeling for prediction of the creep behavior of fibrous composite materials," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 249-260, 2016.
- [11] Nakada, M., "Accelerated testing methodology for predicting long-term creep and fatigue in polymer matrix composites," Creep and fatigue in polymer matrix composites, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, pp. 439-460, 2011.

نمودار مادر استحکام خزشی بی‌بعد شده نسبت به استحکام خمشی دمای محیط کامپوزیت هیبریدی در شکل 10 رسم شده است. با توجه به نمودار، اگر کامپوزیت مورد نظر در دمای 120°C تحت تنش خمشی معادل 20% استحکام خمشی در دمای محیط قرار گیرد، با در نظر گرفتن ضریب اطمینان 1.7 [9] پس از 4 سال دچار واماندگی خواهد شد. البته این تنش حدی معادل حداکثر باری است که تحت شرایط کاری عادی گهگاه ممکن است به وجود آید و در نتیجه عمر به‌دست آمده بسیار محتاطانه است. برای به‌دست آوردن عمر خزشی در تنش‌های پایین‌تر می‌توان بر روی نمودار مادر استحکام خزشی برون‌یابی انجام داد [11].

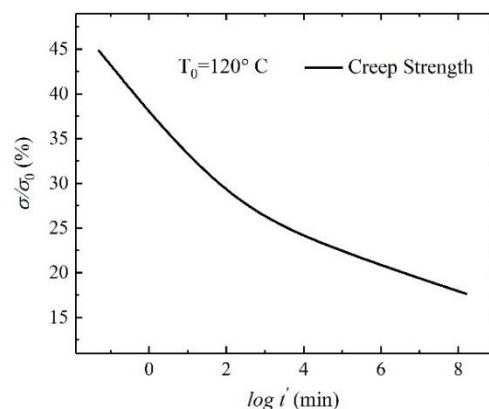


Fig. 10 Creep strength master curve of hybrid composite rod at reference temperature 120°C normalized to its flexural strength at room temperature

شکل 10 نمودار مادر استحکام خزشی میله‌ی کامپوزیت هیبریدی در دمای مرجع 120°C بی‌بعد شده نسبت به استحکام خمشی آن در دمای محیط

5- نتیجه‌گیری

استحکام خزشی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های پرتزرفیت خطوط انتقال برق، با استفاده از روش‌های شتابدار موجود پیش‌بینی شد. به این منظور آنالیز دینامیکی-مکانیکی در فرکانس‌های بارگذاری متفاوت و آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای در چند دمای مختلف بر روی نمونه‌های کامپوزیتی انجام گردید. خلاصه نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- آنالیز دینامیکی-مکانیکی کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه در دماهای بالا (دماهای بالاتر از دمای شیشه‌ای)، از لحاظ تغییرات مدول ذخیره و مدول اتلاف با تغییرات دما، رفتار نوعی کامپوزیت‌های پایه پلیمری را از خود نشان می‌دهد. همچنین افزایش فرکانس بارگذاری به صورت محسوسی موجب افزایش مدول ذخیره و انتقال دمای انتقال شیشه‌ای به دماهای بالاتر می‌شود. تاثیرات دما در بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر روی مغزی کامپوزیت هیبریدی مورد استفاده در هادی‌های پرتزرفیت به شکل کاهش قابل ملاحظه در سفتی خمشی و نیز گسترش رفتار غیرخطی کامپوزیت بروز می‌کند.

- [12] Miyano, Y., Nakada, M., "Accelerated testing methodology for durability of CFRP," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 191, pp. 107977, 2020.
- [13] Zho, J., You, F., Su, L., Yang, Z., Chen, G., Guo, S., "Failure mechanism of time-temperature superposition for poly(vinyl chloride)/dicotylylphthalate(100/70) system," *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 124, pp. 452-458, 2011.
- [14] Leaderman, H., "Elastic and creep properties of filamentous materials and other high polymers," Washington, Dc: The Textile Foundation, 1943.
- [15] Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D., "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids," *Journal of the American Chemical Society* , Vol. 77, pp. 3701-3707, 1955.
- [16] Naya, S., Meneses, A., Tarrío-Saavedra, J., Artiaga, R., Lopez-Beceiro, J., Gracia-Fernandez, C., "New method for estimating shift factors in time-temperature superposition models," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 113, pp. 453-460, 2013.
- [17] Pascault, J.P., Sautereau, H., Verdu, J., Williams, R., *Thermosetting Polymers*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [18] Christensen, R., and Miyano, Y., "Stress intensity controlled kinetic crack growth and stress history dependent life prediction with statistical variability," *International Journal of Fracture*, Vol. 137, pp. 77-87, 2006.
- [19] *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: D 790-10, 2010.
- [20] *Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: determination and report of procedures*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: D 4065-01, 2004.