

Experimental Investigation on Fatigue Behavior of Epoxy Resin under Load and Displacement Controls

Mahmood Mehrdad Shokrieh* and Masood Esmkhani

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, P.O. Box: 16846-13114 Tehran, Iran

Received: 27 November 2013, accepted: 9 August 2014

ABSTRACT

The mechanical properties of epoxy resin including tensile and flexural modulus, tensile and flexural strength for static conditions are currently studied. The frequency effect as significant parameter at room temperature is investigated and fatigue behavior of the epoxy resin in tension-tension loading conditions for different frequencies of 2, 3 and 5 Hz are obtained. The epoxy resin has been taken under flexural bending fatigue loading and fatigue life is investigated. The results of the experiments show the values of 2.5 and 3 GPa of tensile and flexural modulus and 59.98 and 110.02 MPa of tensile and flexural strengths for the resin, respectively. To achieve a linear load-deflection relationship in a three-point bending experiment, a maximum allowable deflection of 5 mm is acquired. The relationship between the frequency and fatigue life shows higher frequency results in lower fatigue life. Loading with frequency of 2 Hz has provided 5.8 times more fatigue life compared with 5 Hz loading. For a tension-tension fatigue loading condition, the variation of tensile modulus of epoxy resin shows no noticeable change during the fatigue loading condition. This modulus decreases significantly only in the primary and failure cycles close to the fracture point. In further experiments, fatigue behavior of epoxy resin was tested under flexural bending fatigue loadings with controlled deflection at room temperature. Maximum applied normalized stresses versus the number of cycles to failure curve are illustrated and it can be performed in order to predict the number of cycles to failure for the resin in arbitrary applied normal stresses as well.

Keywords:

fatigue behavior,
displacement control,
epoxy resin,
frequency effect,
mechanical properties

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shokrieh@iust.ac.ir

بررسی تجربی رفتار خستگی رزین اپوکسی تحت کنترل بار و جابه‌جایی

محمود مهرداد شکریه*، مسعود اسم‌خانی

تهران، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مکانیک، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

دریافت: ۹۲/۹/۶، پذیرش: ۹۳/۵/۱۸

چکیده

در این پژوهش، ابتدا در شرایط ایستا، خواص مکانیکی رزین اپوکسی شامل مدول‌های کششی و خمشی و استحکام‌های کششی و خمشی مطالعه شد. سپس در دمای محیط، رفتار خستگی در شرایط کشش - کشش برای بسامدهای مختلف ۲، ۳ و ۵ Hz ارزیابی شد. در ادامه، رزین اپوکسی در شرایط بارگذاری خستگی خمشی با کنترل جابه‌جایی قرار گرفت و عمر خستگی آن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد، برای رزین بررسی شده در این پژوهش، مدول کششی برابر با ۲/۵ GPa، مدول خمشی برابر با ۳ GPa، استحکام کششی برابر با ۵۹/۹۸ MPa و استحکام خمشی برابر با ۱۱۰/۰۲ MPa است. برای خطی‌بودن رفتار نیرو - تغییرشکل، بیشینه جابه‌جایی مجاز در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، برابر با ۵ mm به دست آمد. همچنین، افزایش بسامد باعث کاهش عمر خستگی شکست شده و از میان بسامدهای آزمون شده، مقدار عمر خستگی در بسامد ۲ Hz در مقایسه با بسامد ۵ Hz تقریباً ۵/۸ برابر به دست آمده است. در ادامه، تغییرات مدول کششی رزین اپوکسی در شرایط بارگذاری خستگی کشش - کشش با توجه به اهمیت آن نیز مطالعه و مشاهده شد، مدول رزین اپوکسی در بسیاری از زمان‌های آزمون، تغییر چشمگیری ندارد و فقط در چرخه‌های اولیه و پایانی نزدیک به نقطه شکست، به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. برای تکمیل مطالعه رفتار خستگی رزین اپوکسی، این ماده در بارگذاری خستگی خمشی در شرایط کنترل جابه‌جایی در دمای محیط قرار گرفت و نمودار بیشینه تنش اعمال شده نرمال شده برحسب تعداد چرخه خستگی شکست رسم شد که با استفاده از آن می‌توان عمر خستگی شکست رزین در هر تنش بیشینه اعمال شده دلخواه را به‌خوبی پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی

رفتار خستگی،
کنترل جابه‌جایی،
رزین اپوکسی،
اثر بسامد،
خواص مکانیکی

مقدمه

رزین‌های اپوکسی به‌عنوان ماتریس، اثر بسیار مؤثری در تغییر خواص مکانیکی سازه‌های استاندارد دارند. اما این مواد، در اثر تغییر زمان و نیز قرارگرفتن زیر نیروهای متناوب، رفتارهای متفاوتی را نشان می‌دهند. از این رفتار، با عنوان خواص خستگی ماده یاد می‌شود و با دو نوع بارگذاری مختلف کنترل نیرو و کنترل جابه‌جایی قابل اعمال است. روش کنترل نیرو توسط پژوهشگران بسیاری برای پلیمرهای گرماسخت و گرمانرم بررسی شده است. Simon و همکاران [۱]، خواص خستگی رزین پلی‌آمید ۶ را مطالعه کردند. آنها در آزمون با نسبت تنش‌های برابر ۰/۱ و ۱- مقدار کاهش مدول را ارزیابی کردند. شریعتی و همکاران [۲]، خواص خستگی رزین پلی‌استال را به‌عنوان پلیمر مهندسی با کاربردهای فراوان در صنعت، بررسی کردند. درباره کاربرد این نوع پلیمر، می‌توان به استفاده از این مواد در صنایع خودرو و الکترونیک اشاره کرد. آنها در آزمون‌های خستگی تک‌محوری روی این پلیمر نشان دادند، روش‌های انرژی و بنا نهاده شده بر تنش، موفقیت بیشتری را در پیش‌بینی عمر خستگی در مقایسه با روش بنا نهاده شده بر کرنش دارند. Zhou و Mallick [۳] خواص خستگی پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نانوذرات و پلی‌پروپیلن تقویت شده با نانوذرات را بررسی کردند. آنها از معادله Eyring برای مدل‌کردن دما و حساسیت سرعت کرنش استحکام این دو نانوکامپوزیت زیر بارگذاری کنترل نیرو استفاده کردند. آزمون خستگی کشش - کشش در بسامدهای ۰/۵ و ۱ Hz انجام شد. نتایج به‌دست آمده از نانوکامپوزیت‌ها با نتایج اولیه رزین‌ها بدون وجود نانوذرات مقایسه شد. آنها در نهایت گزارش کردند، اثر افزودن نانوذرات به این رزین‌های گرمانرم در جهت افزایش عمر خستگی، گامی مثبت ارزیابی می‌شود.

از پارامترهای مؤثر بر بارگذاری کنترل نیرو مانند کشش - کشش، بسامد بارگذاری در آزمون است. Broutman و همکاران [۴]، افزایش دمای روی قطعه آزمون را در اثر تغییر بسامد مطالعه کردند.

پژوهشگران از روش کنترل جابه‌جایی نیز برای ارزیابی رفتار خستگی پلیمرها استفاده کردند که بر مبنای نظریه تیر ساده یک‌سرگردار بنا نهاده شده است. این به‌عنوان روشی ساده و ارزان برای بررسی مقایسه‌ای و کیفی مواد مطرح است. در نظریه حاکم بر این روش، ممان خمشی به شکل خطی در طول قطعه تغییر می‌کند. زیرا، قطعه از یک سمت به فک ثابت دستگاه وصل شده و روی سمت دیگر قطعه به‌وسیله بار خمشی متغیر، نیرو اعمال می‌شود. تعداد چرخه بارگذاری در این روش، عمر خستگی نامیده می‌شود. روش کنترل جابه‌جایی توسط پژوهشگران بسیاری برای پیش‌بینی عمر خستگی قطعه به‌کار گرفته شده است [۱۰-۵].

ذبیح‌پور [۵] با ارائه فرایند مدل‌سازی، مراحل واماندگی لایه‌ای مواد کامپوزیتی را زیر بارگذاری خمشی با معادله‌های ریاضی و مدل‌های پایه توصیف کرد. Ramkumar و Gnanamoorthy [۶] مقدار افزایش عمر خستگی خمشی رزین پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نانوذرات خاک‌کرس را مطالعه کردند. Rajeesh و همکاران [۷]، اثر رطوبت را بر عمر خستگی رزین پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نانوذرات خاک‌کرس بررسی کردند. Timmaraju و همکاران [۸،۹] اثر تغییرات شرایط محیطی را بر خستگی خمشی رزین پلی‌آمید ۶ تقویت شده با نانوذرات خاک‌کرس بررسی کردند. همچنین، آنها در مطالعه دیگری مقدار رطوبت را به‌عنوان متغیر ورودی در آزمون‌ها در نظر گرفتند. شکریه و همکاران [۱۰]، مقدار اثر افزودن نانوذرات گرافن به رزین اپوکسی را زیر بارگذاری خمشی بررسی کردند. آنها در دمای محیط با مقدار دامنه متغیر، نمونه‌ها را مورد آزمون قرار دادند و عمر خستگی رزین اپوکسی تقویت شده با ۰/۲۵٪ وزنی گرافن را با رزین اپوکسی خالص مقایسه کرده و در نهایت افزایش ۲۷ برابری را در یک نقطه بارگذاری گزارش کردند.

مطالعه مقالات و پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد، با توجه به عدم استفاده رزین اپوکسی به تنهایی و بدون وجود تقویت‌کننده در صنایع، تاکنون بیشتر بررسی‌ها روی عمر خستگی رزین‌های خالص گرمانرم و تقویت‌شده با پرکننده‌ها انجام شده است. بنابراین، کمبود پژوهش در زمینه بررسی عمر خستگی رزین‌های اپوکسی بدون وجود تقویت‌کننده‌ها کاملاً محسوس است. این نوع از رزین‌ها بیشتر در شرایط بارگذاری ایستا، ارزیابی و مطالعه شدند. در پژوهش حاضر، مطالعه کاملی روی رفتار خستگی رزین اپوکسی زیر بارگذاری‌های مختلف کشش - کشش با کنترل نیرو و بارگذاری خمشی با کنترل جابه‌جایی انجام و رفتار مدول این ماده در این شرایط بررسی شده است. همچنین، اثر بسامد بارگذاری روی رفتار خستگی نیز به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر ارزیابی شده است.

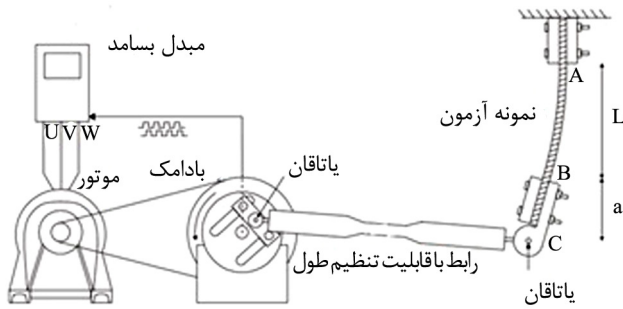
تجربی

مواد

از رزین اپوکسی ML 526 نوع بیس فنول A استفاده شد. این رزین از شرکت مواد مهندسی مکرر تأمین شده و دلیل انتخاب آن، استفاده فراوان در صنعت است. HA-11 به‌عنوان سخت‌کننده این رزین به نسبت ۱۵ به ۱۰۰ رزین به‌کار گرفته شد. برای بیان دقیق‌تر، خواص فیزیکی و مکانیکی این رزین در جدول ۱ آمده است. برای دمای انتقال

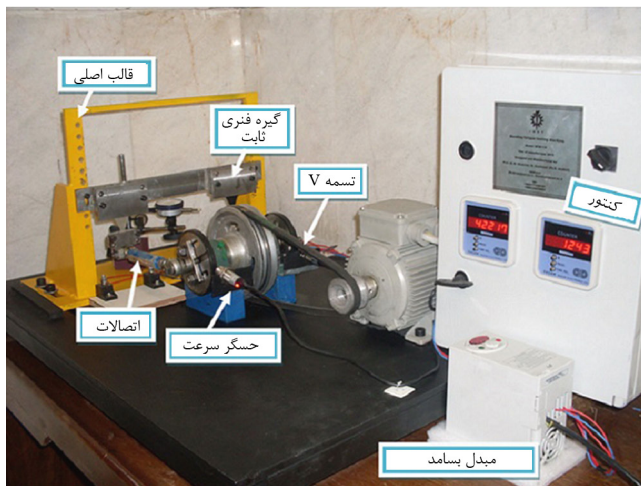
جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی ML 526.

مقدار	خاصیت
۶۰	استحکام کششی (MPa)
۲/۶	مدول کششی (GPa)
۷۲	دمای انتقال شیشه‌ای (°C)
۱۱۹۰	گرانروی در ۲۵°C (cP)



شکل ۲- تصویر کلی از دستگاه آزمون خستگی خمشی.

در آزمون‌های کنترل جابه‌جایی، برای انجام آزمون خستگی خمشی، دستگاهی با کد BFM-110 به‌کار گرفته شد. این دستگاه توسط نویسندگان مقاله طراحی، ساخته و ثبت اختراع شده است. روش به‌کار گرفته بدین ترتیب است که ابتدا نمونه مطابق با شکل ۲ در نقطه A در فک ثابت دستگاه بسته شده و در سمت دیگر قطعه پلیمری در نقطه B که دارای اتصال کروی است، قرار می‌گیرد. با استفاده از



شکل ۳- دستگاه آزمون خستگی خمشی BFM-110.

شیشه‌ای از اطلاعات فنی ارائه شده توسط سازنده استفاده شد و سایر خواص، در آزمایشگاه توسط پژوهشگران مقاله حاضر به‌دست آمد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا درصد وزنی مناسب از سخت‌کننده به رزین با استفاده از همزن مکانیکی با سرعت ۱۰۰ rpm و به‌مدت حداکثر ۵ min اضافه شده و محتوای بشر به‌مدت حداقل ۱۵ min درون محفظه خلأ (فشار ۱ mbar) قرار گرفت تا حباب‌های درون آن خارج شوند. پس از اتمام این فرایند، رزین به درون قالب انتقال داده شد. سپس، نمونه‌ها به‌مدت ۲ روز در همان دمای محیط باقی ماندند تا فرایند پخت اولیه آن تکمیل شود. در ادامه برای انجام فرایند پخت نهایی، نمونه‌ها ابتدا به‌مدت ۲ h در دمای ۸۰°C و سپس به‌مدت ۱ h در دمای ۱۱۰°C گرمادهی شدند.

در آزمون‌های کنترل بار روی نمونه، رزین اپوکسی زیر بارگذاری خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو قرار گرفته و از دستگاه خستگی (Instron-Schenck) IST به ظرفیت ۵ تن مطابق با شکل ۱ استفاده شد.



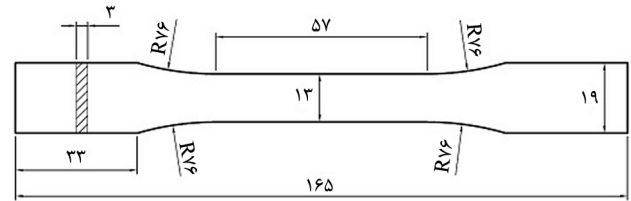
شکل ۱- دستگاه آزمون خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو، نسبت تنش برابر با ۰/۱.

ابعاد نمونه‌های آزمون

نمونه‌های استفاده شده برای آزمون خمشی کشش - کشش براساس استاندارد ASTM D638-02 مطابق شکل ۴ ساخته شدند [۱۱]. نمونه‌های آزمون خمشی مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده و براساس نمونه ارائه شده توسط Ramkumar و Gnanamoorthy [۶] ساخته شدند. برای فلزات تحت این نوع بارگذاری، استاندارد ASTM B593-96 [۱۲] تدوین شده است. با رعایت ابعاد استفاده شده مطابق با شکل ۵، مفهوم تنش ثابت در وسط قطعه رعایت شده است. برای ساخت قالب‌های قطعه‌ها، از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI304 به ضخامت ۳ mm استفاده شد. به‌عنوان نمونه، قالب قطعه‌های خمشی به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بتوان در هر مرحله نمونه‌سازی، شش عدد قطعه تولید کرد. برای ساخت این قالب که در شکل ۶ نشان داده شده، از روش برش لیزری استفاده شد تا بتوان به کیفیت سطح مناسب دست یافت. ملاحظه می‌شود، اتصال دو سطح قالب، از هفت نقطه با استفاده از پیچ‌های M6 انجام می‌شود.

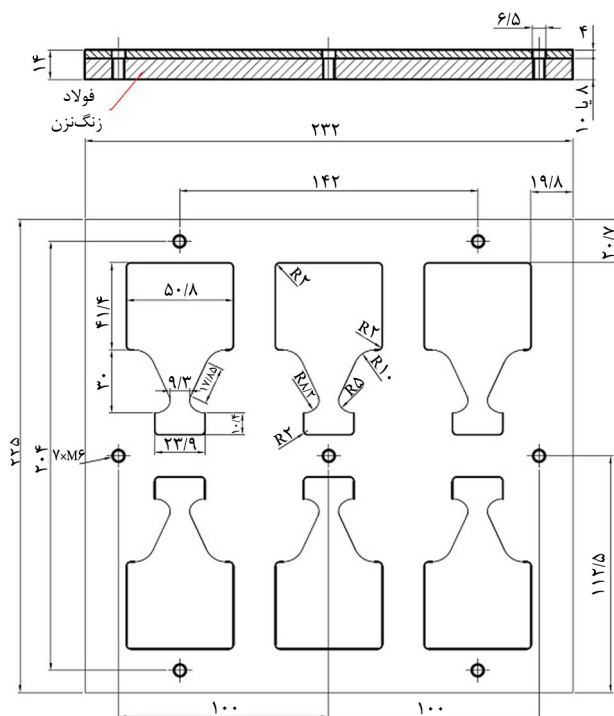
محاسبه تنش در بارگذاری خمشی

با توجه به نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه، محاسبه تنش با به‌کارگیری نظریه تیر یک‌سرگردار انجام شده است. بخش بالای

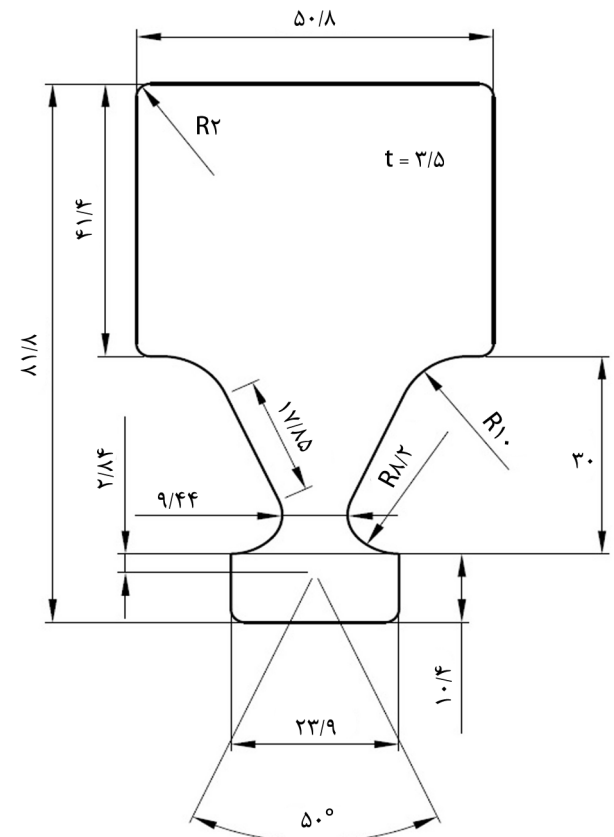


شکل ۴- ابعاد نمونه‌های استفاده شده در آزمون خمشی کشش- کشش به میلی‌متر طبق استاندارد ASTM D638-02.

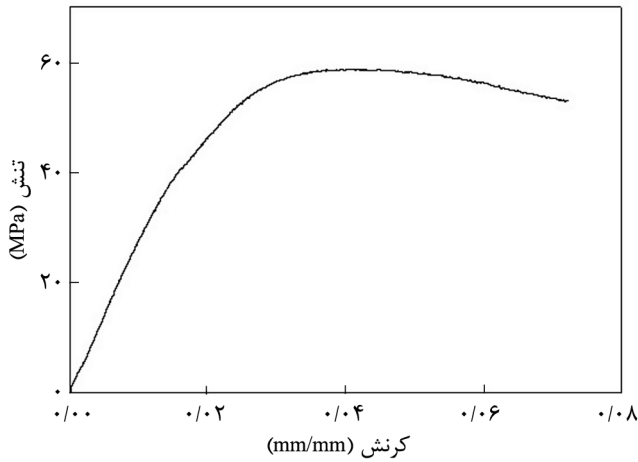
یک مبدل (inverter) سه فاز، بسامد موتور روی مقدار مدنظر تنظیم شده و با دو عدد پولی و تسمه، گشتاور از موتور به میل‌لنگ منتقل می‌شود. حرکت دورانی به‌وسیله بازوی لنگ به حرکت رفت و برگشتی تبدیل شده و در نقطه C این جابه‌جایی به نمونه پلیمری منتقل می‌شود. حین انجام آزمون، تعداد چرخه‌های دورانی با دورخوان نوری شمرده می‌شود. دستگاه قابلیت تنظیم جابه‌جایی‌های مختلف ثابت را حین آزمون نیز دارد، بنابراین دامنه بارگذاری در واقع قابل تغییر است. از طرفی، بادامک تنظیم‌شدنی این امکان را می‌دهد که خیز در حالت یک‌طرفی یا کاملاً معکوس‌شونده تنظیم شود. تصویر این دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۶- ابعاد (میلی‌متر) قالب ساخته شده برای قطعه‌ها در آزمون خمشی کششی.



شکل ۵- ابعاد (میلی‌متر) نمونه‌های استفاده شده در آزمون خمشی کششی.



شکل ۸- نمودار تنش - کرنش رزین اپوکسی در آزمون کشش.

$$I(x) = \frac{B_0(L_0 - x)H^3}{12L_0} \quad (3)$$

در نهایت، مقدار تنش حداکثر مطابق با معادله (۴) به دست آمد:

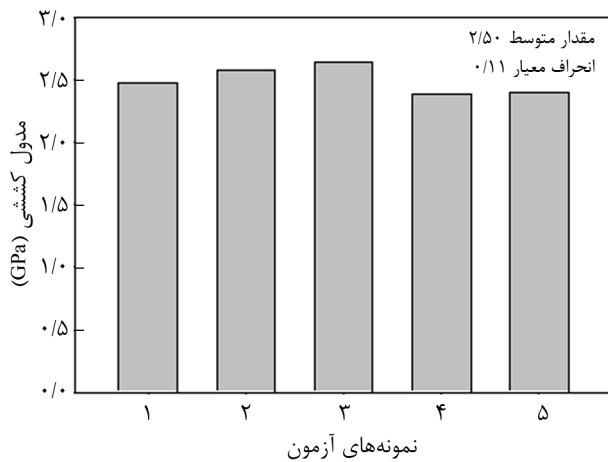
$$\sigma_{max} = -\frac{z_0 \times E \times H}{L_0^2} \quad (4)$$

در این معادله، L_0 طول قطعه، H ضخامت قطعه، Z_0 خیز در نقطه $x = L_0$ (انتهای تیر)، E مدول یانگ و B_0 پهنای بخش مثلثی شکل قطعه است.

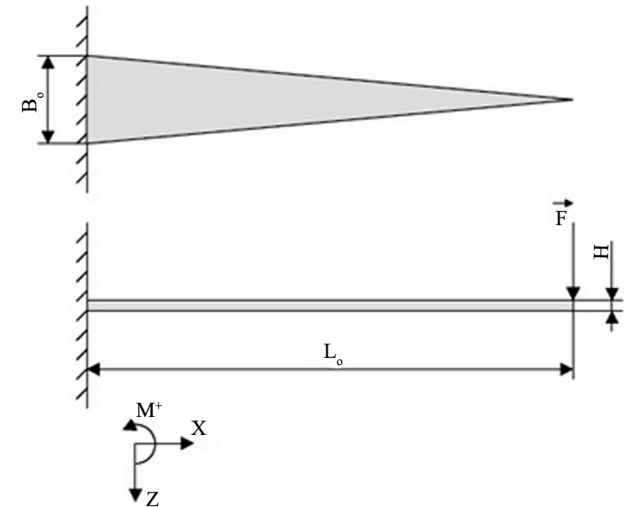
نتایج و بحث

آزمون خستگی با بارگذاری کنترل نیرو

برای آغاز مطالعه روی عمر خستگی رزین خالص اپوکسی زیر



(ب)



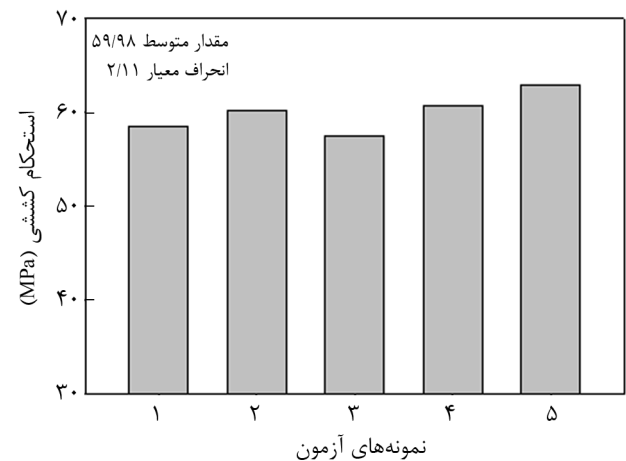
شکل ۷- تصویر کلی نمونه زیر تنش خمشی ثابت.

نمونه کاملاً ثابت در فک بالایی دستگاه نصب شده و طرف دیگر قطعه به شکل رفت و برگشتی تحت بارگذاری مشخص قرار می‌گیرد. نمونه به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که اعمال تنش ثابت در وسط قطعه انجام شود. در شکل ۷ به‌طور نمایی نحوه قرار گرفتن تیر زیر خمش نشان داده شده است. در حالت متقارن بودن قطعه در محل خیز، مقدار تنش از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$\sigma_{max} = \frac{M \times H}{2 \times I} \quad (1)$$

در این معادله، σ_{max} مقدار حداکثر تنش در سطح خارجی جسم، M ممان خمشی، H ضخامت تیر و I مقدار ممان اینرسی است.

$$B(x) = \frac{B_0}{L_0} \times (L_0 - x) \quad (2)$$

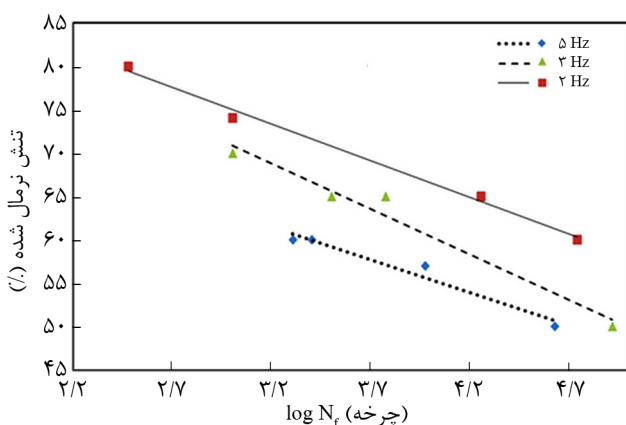


(الف)

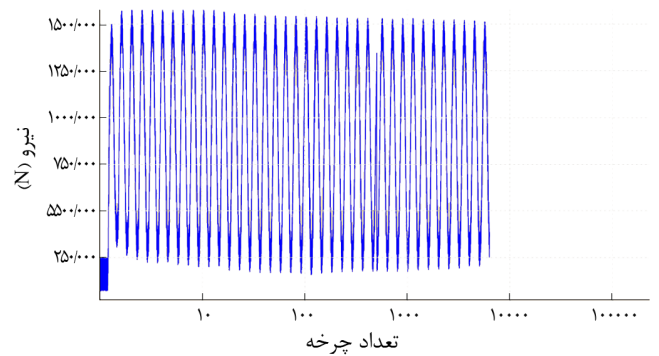
شکل ۹- خواص مکانیکی رزین اپوکسی ML 526 به‌دست آمده از آزمون‌های کشش: (الف) استحکام کششی و (ب) مدول کششی.

مدول کششی برای رزین اپوکسی، نمونه در شرایط بارگذاری خستگی کنترل نیرو قرار گرفت. برای انجام آزمون‌های خستگی کشش - کشش مقدار نسبت تنش برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شد و تمام آزمون‌ها در دمای آزمایشگاه انجام شد. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از بارگذاری انجام شده روی قطعه با سطح مقطع $47/5 \text{ mm}^2$ در بسامد برابر 2 Hz نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با دقت نسبتاً خوبی، مقدارهای بیشینه و کمینه نیرو در طول آزمون، ثابت نگه داشته شده و عملکرد دستگاه و شیرهای هیدرولیکی آن قابل قبول است. برای اطمینان از محدوده بسامد انتخابی، دما هنگام آزمون خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو در چرخه‌های مختلف اندازه‌گیری شده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، بیشینه تغییرات دما طی آزمون به 3 K رسیده است. این افزایش ناچیز دما نشان می‌دهد، افزایش ناخواسته دما حین آزمون و پدیده نرم‌شدگی گرمایی آن رخ نداده است.

در روش کنترل نیرو، با تقسیم مقدار تنش‌های بیشینه مختلف بر استحکام کششی و رسم آن بر تعداد چرخه شکست در بارگذاری خستگی کشش - کشش، آزمون‌ها برای بسامدهای مختلف ۲، ۳ و 5 Hz تکرار شده که نتایج آن در شکل ۱۲ رسم شده است. ملاحظه می‌شود، برای دستیابی به بیشترین عمر خستگی رزین خالص در شرایط بارگذاری مشخص، بسامد 2 Hz دارای اثر بیشینه برای این منظور است. در تنش نرمال شده برابر با $0/60$ ، مقدار عمر خستگی در بسامد 2 Hz در مقایسه با عمر خستگی در بسامد 5 Hz تقریباً $5/8$ برابر به دست آمده است. از دلایل اصلی این موضوع در بسامدهای زیاد، با توجه به افزایش مقدار انرژی اعمال شده به قطعه، می‌توان به پدیده نرم‌شدگی گرمایی ماده اشاره کرد که باعث کاهش خواص رزین خالص می‌شود. در این شرایط، تخریب در آن با سرعت بیشتری نیز به وقوع می‌پیوندد.



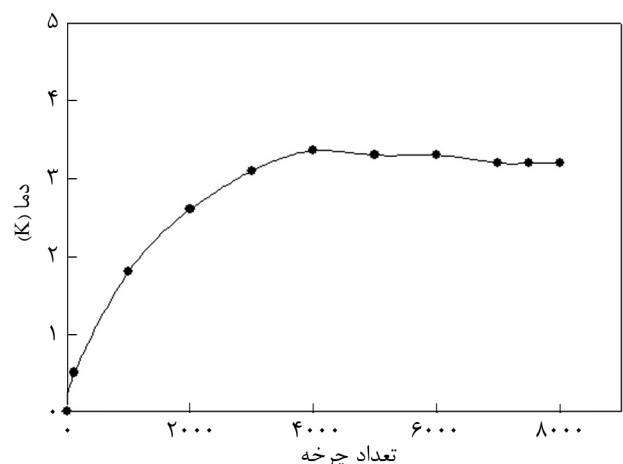
شکل ۱۲- نسبت بیشینه نرمال شده (تنش اعمالی به استحکام کششی) برحسب تعداد چرخه شکست زیر بار خستگی کشش - کشش، $R=0/1$.



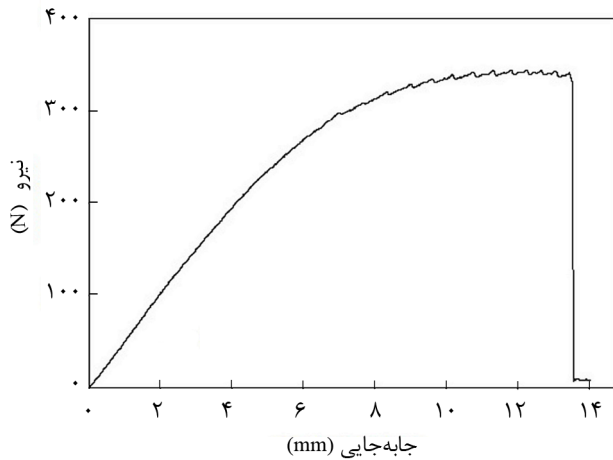
شکل ۱۰- نیرو برحسب تعداد چرخه در بارگذاری خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو در بسامد 2 Hz .

بارگذاری کنترل نیرو، ابتدا باید خواص مکانیکی آن ماده زیر بارگذاری ایستا شناسایی شود. بدین منظور، از استاندارد ASTM D638-02 [۱۱] استفاده شد. در این آزمون، سرعت جابه‌جایی فک بالای دستگاه آزمون کشش، برابر با 2 mm/min در نظر گرفته و مقدار مدول اولیه یا ایستای رزین اندازه‌گیری شد.

برای انجام تمام آزمون‌های کشش و حصول اطمینان از صحت نتایج از پنج نمونه استفاده شد. در شکل ۸، منحنی تنش - کرنش رزین اپوکسی در آزمون کشش به‌عنوان نمونه رسم شده و پس از انجام پنج آزمون متوالی، نتایج خواص مکانیکی رزین اپوکسی ML 526 حاصل از آزمون‌های کشش در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، مقدار متوسط استحکام این نوع رزین اپوکسی برابر با $59/98 \text{ MPa}$ و مقدار انحراف معیار برابر با $2/11$ است. همچنین، مقدار مدول متوسط این رزین برابر با $2/50 \text{ MPa}$ با انحراف معیار برابر با $0/11$ است. پس از انجام آزمون‌های ایستا و مشخصه‌سازی مقدارهای استحکام و



شکل ۱۱- دمای سطح نمونه برحسب تعداد چرخه هنگام بارگذاری خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو در بسامد 5 Hz .

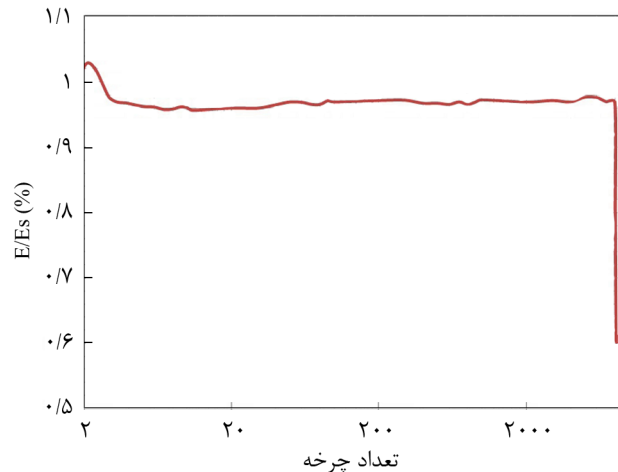


شکل ۱۴- نیرو برحسب جابه‌جایی با استفاده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای رزین اپوکسی.

مختلف گسترش ترک و شکست بسیار متفاوت است. همچنین، در رزین اپوکسی در چرخه‌های ابتدایی و انتهای تغییرات ناگهانی در کاهش مدول ملاحظه می‌شود و در بیشتر چرخه‌های میانی تغییرات مدول بسیار ناچیز است.

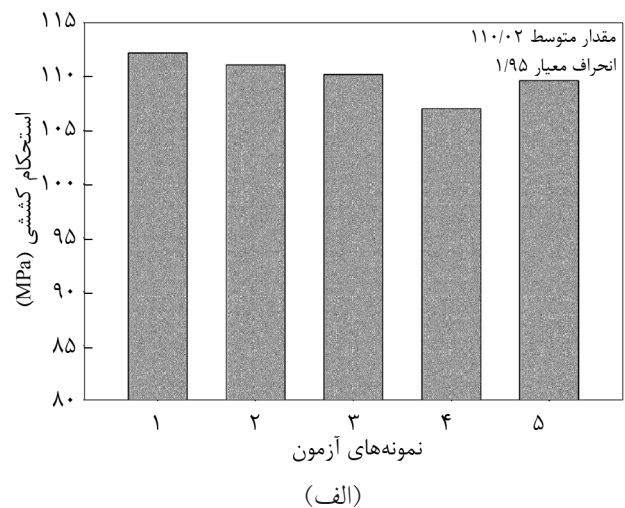
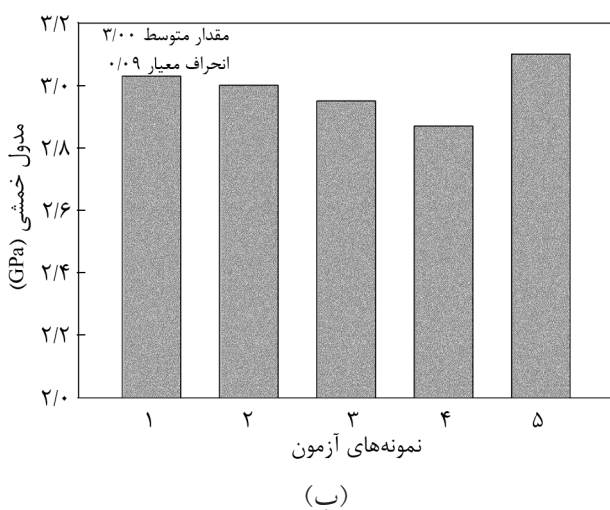
نتایج آزمون خستگی خمشی با بارگذاری کنترل جابه‌جایی

برای بررسی عمر خستگی رزین خالص اپوکسی زیر بارگذاری کنترل جابه‌جایی، ابتدا خواص مکانیکی ماده زیر بارگذاری ایستای خمشی مورد نیاز است. بدین منظور از استاندارد ASTM D790 استفاده شد [۱۳]. در این آزمون، سرعت جابه‌جایی فک بالایی دستگاه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، برابر با ۱۶ mm/min بوده و نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی مطابق با شکل ۱۴ اندازه‌گیری شده است. ملاحظه می‌شود،



شکل ۱۳- نسبت سفتی رزین اپوکسی برحسب تعداد چرخه زیر بار خستگی کشش - کشش، $R = 0/1$.

در ادامه پژوهش حاضر، با توجه به کمبود مطالعات انجام شده روی رفتار مدول رزین خالص اپوکسی در شرایط خستگی کشش - کشش، مدول رزین در شرایط خستگی بررسی و نمودار تغییرات آن مطابق شکل ۱۳ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مدول رزین خاص اپوکسی در این شرایط بارگذاری دچار کاهش تدریجی بسیار اندک شده و در نزدیکی چرخه شکست، مقدار کاهش آن نیز در مقیاس لگاریتمی به‌طور ناگهانی اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه رفتار رزین زیر بارگذاری خستگی به‌تنهایی به‌طور کامل مطالعه نشده است، نیاز به بررسی‌های جزئی‌تر در این زمینه احساس می‌شود. اما بیان این نکته لازم است که در محدوده گسترده‌ای از تعداد چرخه‌های بارگذاری، مقدار تغییرات رزین اپوکسی بسیار کم بوده و رفتار آن با کاهش مدول کامپوزیت الیافی به علت سازوکارهای



شکل ۱۵- خواص مکانیکی رزین اپوکسی ML 526 به‌دست آمده از آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای: (الف) استحکام خمشی و (ب) مدول خمشی.

از میان داده‌ها در مقیاس نیمه‌لگاریتمی، امکان پیش‌بینی عمر خستگی شکست در موارد آزمون نشده، میسر شده است. ملاحظه می‌شود، در تنش‌های خمشی نرمال شده بین ۵۸٪ تا ۳۷٪، آزمون‌های انجام شده و در مقادیر کمتر از آن، عمر خستگی قطعه بسیار افزایش می‌یابد و قطعه در محدوده تعریف شده دچار شکست نمی‌شود. همچنین، در ابتدای نمودار با وارد کردن جابه‌جایی بیشتر به قطعه، مقدار تنش خمشی نرمال شده آن افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، برای حالت ۵۸٪، خستگی در تعداد چرخه کمتر رخ داده و با توجه به نوع سطح شکست در این محدوده که ظاهری زبر و نامنظم دارد، امکان بررسی با توجه به نظریه‌های توسعه یافته در خستگی وجود ندارد و پراکندگی در نتایج ملاحظه می‌شود.

البته بیان این نکته نیز ضروری است که استفاده از دستگاه آزمون خستگی خمشی با قابلیت کنترل جابه‌جایی در این پژوهش، تنها به‌عنوان روش مقایسه‌ای بین دو پلیمر کاربرد دارد و در حالت نیاز به نمودار دقیق S-N، استفاده از آزمون خستگی با قابلیت کنترل نیرو پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص خستگی رزین خالص اپوکسی به‌طور کامل زیر بارگذاری‌های خستگی تک‌محوری کشش - کشش در شرایط کنترل نیرو و خستگی خمشی با کنترل جابه‌جایی در بسامدهای مختلف در دمای محیط بررسی شده است. ابتدا، نمونه‌ها در شرایط بارگذاری کششی و خمشی ایستا آزمون شدند. مقدار استحکام شکست کششی و خمشی به‌ترتیب برابر با ۵۹/۹۸ و ۱۱۰/۰۲ MPa حاصل شد. همچنین، مقدار مدول کششی متوسط برای این رزین برابر با ۲/۵۰ GPa و مدول خمشی متوسط برای این رزین برابر با ۳ GPa به‌دست آمد.

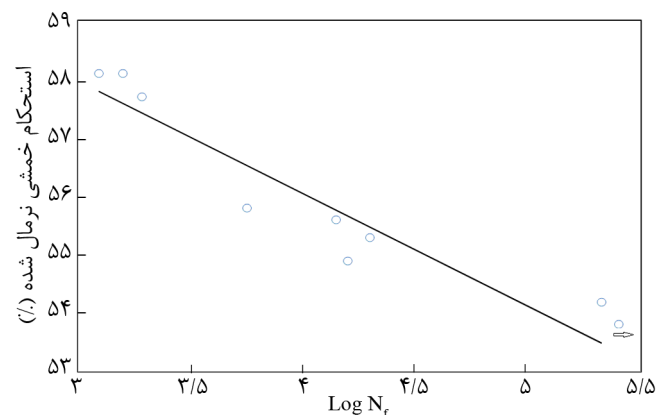
در آزمون‌های خستگی با کنترل نیرو، با تقسیم مقدار تنش‌های بیشینه مختلف بر استحکام کششی و رسم آن برحسب تعداد چرخه شکست در بارگذاری خستگی کشش - کشش، آزمون‌ها برای بسامدهای مختلف ۲، ۳ و ۵ Hz تکرار شده است. نتایج نشان می‌دهد، برای دستیابی به بیشترین عمر خستگی رزین خالص در شرایط بارگذاری مشخص، بسامد ۲ Hz دارای مقدار بیشینه است. به‌عنوان مثال، در مقدار حالت تنش نرمال برابر با ۰/۶۰، مقدار عمر خستگی در بسامد ۲ Hz در مقایسه با عمر خستگی در بسامد ۵ Hz تقریباً ۵/۸ برابر به‌دست آمده است. رفتار مدول کششی رزین اپوکسی

تغییرات نیرو - جابه‌جایی برای رزین خالص اپوکسی تا ۵ mm اول خطی است.

با توجه به نظریه‌های به‌کار گرفته شده برای خستگی خمشی، بیشینه جابه‌جایی مجاز برابر با ۵ mm در نظر گرفته می‌شود. برای اطمینان از صحت نتایج، از پنج نمونه برای انجام آزمون‌های خمشی استفاده شد. در شکل ۱۵ نتایج خواص مکانیکی رزین اپوکسی ML 526 به‌دست آمده از آزمون‌های خمشی سه‌نقطه‌ای گزارش شده است. مقدار متوسط استحکام خمشی به‌دست آمده برای این نوع رزین اپوکسی برابر با ۱۱۰/۰۲ MPa با انحراف معیار برابر با ۱/۹۵ است. همچنین، مقدار مدول متوسط برای این رزین برابر با ۳ MPa با مقدار انحراف معیار برابر با ۰/۰۹ GPa به‌دست آمده است. پس از انجام آزمون‌های ایستا و مشخصه‌سازی مقدارهای استحکام و مدول خمشی برای رزین اپوکسی، نمونه در شرایط بارگذاری خستگی کنترل جابه‌جایی قرار می‌گیرد.

برای انجام آزمون‌های خستگی خمشی، تمام آزمون‌ها در دمای آزمایشگاه انجام شده و با تغییر مقدار بیشینه جابه‌جایی در آن، مقادیر مختلف تنش خمشی به قطعه اعمال شده است. با توجه به ماهیت این آزمون و اعمال تنش‌های خمشی، نمونه هم‌زمان تحت نیروهای کششی و فشاری قرار گرفته و از این‌رو با روش کنترل نیرو که قطعه فقط زیر نیروهای کششی بوده متفاوت است.

در روش کنترل جابه‌جایی، با تقسیم مقدار تنش‌های بیشینه مختلف اعمال شده بر استحکام خمشی و رسم آن برحسب تعداد چرخه شکست در بارگذاری خستگی خمشی، در بسامد ۵ Hz آزمون‌های آن انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۶ رسم شده است. با به‌دست آمدن این نمودار، تغییرات تنش خمشی نرمال شده برحسب تعداد چرخه شکست برای رزین اپوکسی در این بسامد معین شده و با عبور خط



شکل ۱۶- نسبت تنش به استحکام خمشی برحسب تعداد چرخه شکست زیر بار خستگی خمشی با کنترل جابه‌جایی در بسامد ۵ Hz.

اختصارات

σ	تنش (MPa)
B	عرض نمونه در فاصله L از پین (mm)
σ_{max}	حداکثر تنش خمشی قطعه (MPa)
M	ممان (N.m)
I	ممان دوم سطح (m^4)
H	ضخامت قطعه (m)
F	نیرو (N)
B_0	عرض قطعه در مقطع $x = 0$
L_0	طول قطعه (mm)
Z_0	جابه‌جایی بیشینه (mm)
E	مدول (GPa)

در شرایط بارگذاری خستگی کشش - کشش با توجه به اهمیت آن نیز مطالعه و مشاهده شد، مدول رزین اپوکسی در مدت زمان آزمون تغییر قابل توجهی نداشته و تنها مقدار اندکی در تعداد چرخه اولیه کاهش داشته است. در چرخه‌های پایانی و نزدیک به نقطه شکست نیز به‌طور ناگهانی کاهش یافته است. دما هنگام آزمون خستگی کشش - کشش با کنترل نیرو در چرخه‌های مختلف اندازه‌گیری و مشاهده شد که بیشینه تغییرات دما طی آزمون به 3 K رسیده است. نتیجه مزبور حاکی از این موضوع است که افزایش ناخواسته دما حین آزمون و پدیده نرم‌شدگی گرمایی در این آزمون رخ نداده است. در حالت دیگر، رفتار رزین خالص زیر بارگذاری خستگی خمشی با کنترل جابه‌جایی نیز بررسی شده است. مقدار جابه‌جایی مجاز برای خطی‌بودن رفتار نیرو - جابه‌جایی برابر با 5 mm در نظر گرفته شده و آزمون‌های آن با تغییر مقدار بیشینه جابه‌جایی انجام شده است.

مراجع

- Simon C., Bellemare J., Dickson I., Bureau M.N., and Denault J., Bulk Fatigue Damage Evolution in Polyamide-6 and in a Polyamide-6 Nanocomposite, *Polym. Compos.*, **26** 636-646, 2005.
- Shariati M., Hatami H., Yarahmadi H., and Eipakchi H.R., An Experimental Study on the Ratcheting and Fatigue Behavior of Polyacetal under Uniaxial Cyclic Loading, *Mater. Design*, **34**, 302-312, 2012.
- Mallick P.K. and Zhou Y., Yield and Fatigue Behavior of Polypropylene and Polyamide-6 Nanocomposites, *J. Mater. Sci.*, **38**, 3183-3190, 2003.
- Broutman L.J. and Gaggar S.K., *Proceedings of 27th Annual Technical Conference Reinforced Plastics/Composites Institute*, The Society of the Plastics Industry, 1972.
- Zabihpour M., *Flexural Fatigue Failure Analysis of Composite Materials*, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, 2008.
- Ramkumar A. and Gnanamoorthy R., Effect of Nanoclay Addition on the Displacement-Controlled Flexural Fatigue Behavior of a Polymer, *J. Mater. Sci.*, **45**, 4180-4187, 2010.
- Rajeesh K.R., Gnanamoorthy R., and Velmurugan R., Effect of Humidity on the Indentation Hardness and Flexural Fatigue Behavior of Polyamide-6 Nanocomposite, *Mater. Sci. Eng.*, **527**, 2826-2830, 2010.
- Timmaraju M.V., Gnanamoorthy R., and Kannan K., Effect of Environment on Flexural Fatigue Behavior of Polyamide 66/Hectorite Nanocomposites, *Int. J. Fatigue*, **33**, 541-548, 2011.
- Timmaraju M.V., Gnanamoorthy R., and Kannan K., Effect of Initial Imbibed Moisture Content on Flexural Fatigue Behavior of Polyamide 66/Hectorite Nanocomposites at Laboratory Condition, *Mater. Sci. Eng., A*, **528**, 2960-2966, 2011.
- Shokrieh M.M., Esmkhani M., Vahedi F., and Shahverdi H.R., Improvement of Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Resin with Carbon Nanofibers, *Iran. Polym. J.*, **22**, 721-727, 2013.
- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, ASTM D 638-03, 2003.
- Standard Test Method for Bending Fatigue Testing for Copper-Alloy Spring Materials, Annual Book of ASTM Standard, ASTM B 593-96, 2003.
- Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, ASTM D 790-07, 2007.