



## Effect of Clay Nanoparticles on Increasing the Lifetime of Glass/Epoxy Composites under Thermal and Humidity Conditions (Hydrothermal)

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Azimi S.A.<sup>1</sup> MSc,  
Momeni V.<sup>1</sup> MSc,  
Alaei M.H.\*<sup>1</sup> PhD,  
Mirzaei A.<sup>1</sup> MSc,  
Rezvani Nasab M.<sup>1</sup> MSc,  
Ramezani Nezhad M.<sup>1</sup> MSc,  
Mohamadian A.H.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Azimi S.A, Momeni V, Alaei M.H, Mirzaei A, Rezvani Nasab M, Ramezani Nezhad M, Mohamadian A.H. Effect of Clay Nanoparticles on Increasing the Lifetime of Glass/Epoxy Composites under Thermal and Humidity Conditions (Hydrothermal). Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):701-708.

<sup>1</sup>Composite Materials Department, Materials & Manufacturing Technology Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Shabanlou Street, Babaei Highway, Lavizan, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 22970274  
Fax: +98 (21) 22936578  
mhallaee@mut.ac.ir

#### Article History

Received: April 28, 2019  
Accepted: July 9, 2019  
ePublished: March 01, 2020

### ABSTRACT

In this research, the effect of adding clay Nanoparticles on increasing the lifetime of glass/epoxy composites under hydrothermal conditions has been investigated. For this purpose, samples containing 3 Vol.% of clay Nanoparticles and samples without clay Nanoparticles in resin epoxy has been manufactured for the fabrication of specimens of the tensile test using hand lay-up and vacuum bag. The specimens were placed under the hydrothermal condition of 90% humidity and 75 °C temperature for 500 hours in the incubator and were tested for tensile properties. The results show that addition of clay Nanoparticles decreases the strength of the composite by 21.39% in the newly produced samples while in a long time, these particles slow down the process of composite degradation, so that in the same environmental conditions, the strength of specimens containing clay Nanoparticles is 9% higher than the specimens without clay Nanoparticles.

**Keywords** Glass/Epoxy Composites; Environmental Conditions; Mechanical Properties; Clay Nanoparticles

### CITATION LINKS

[1] Influence of physical ageing on the yield response of model DGEBA/poly (propylene oxide) epoxy glasses [2] Analysis of how thermal aging affects the long-term mechanical behavior and strength of polymer-matrix composites [3] Relaxation phenomenon in epoxy glass aged under post-yield strain [4] Physical aging in long term creep of polymeric composite laminates [5] Concurrent physical aging and degradation of crosslinked coating systems in accelerated weathering [6] Thermo-oxidative degradation of graphite/epoxy composite laminates: Modeling and long-term predictions [7] Moisture diffusion and hydrothermal aging in pultruded fibre reinforced polymer composites of bridge decks [8] Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites [9] Effects of hydrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics [10] Effect of thermo-oxidative aging on three-dimensional and four-directional braided carbon fiber/epoxy composite [11] Moisture absorption/desorption effects on flexural property of glass-fiber-reinforced polyester laminates: Three-point bending test and coupled hygro-mechanical finite element analysis [12] Effects of the media and ageing condition on the tensile properties and fracture toughness of epoxy resin [13] Hydrothermal aging of carbon reinforced epoxy laminates with nanofibrous mats as toughening interlayers [14] Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites [15] Correlation of accelerated aging test to natural aging test on graphite-epoxy composite materials [16] Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites [17] Mechanical and thermal properties of glass fiber-vinyl ester resin composite for pipeline repair exposed to hot-wet conditioning [18] Accelerated weathering on glass fiber/epoxy/organomontmorillonite nanocomposites [19] Effect of accelerated ageing on hardness and flexural behaviour of woven fabric glass/carbon hybrid epoxy composites [20] Interfacial properties and thermal aging of glass fiber/epoxy composites reinforced with SiC and SiO<sub>2</sub> nanoparticles

## تأثیر نانوذرات خاک رس بر افزایش طول عمر کامپوزیت شیشه-اپوکسی در شرایط محیطی دمایی و رطوبتی (هیدروترمال)

سیدعلی عظیمی MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

وحید مومنی MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

محمدحسین علائی\* PhD

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

امین میرزایی MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

مهران رضوانی‌نسب MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

مجید رضوانی‌نژاد MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

امیرحسین محمدیان MSc

گروه کامپوزیت، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### چکیده

در این تحقیق، به بررسی تأثیر نانوذرات خاک رس بر افزایش طول عمر کامپوزیت شیشه-اپوکسی در شرایط محیطی هیدروترمال پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های حاوی ۳٪ و نمونه‌های فاقد نانوذرات خاک رس در رزین اپوکسی برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از لایه چینی دستی و کسبه خلأ ساخته شده است. پس از ساخت، نمونه‌ها تحت شرایط محیطی هیدروترمال ۹۰٪ رطوبت، ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰۰ ساعت در انکوباتور قرار گرفته و در نهایت تحت آزمون کشش با هم مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که اضافه کردن نانوذرات خاک رس گرچه در ابتدا باعث کاهش استحکام کامپوزیت به میزان ۲۱/۳۹٪ در نمونه‌های تازه‌ساخته شده می‌شود، ولی در درازمدت این ذرات باعث کندشدن فرآیند تخریب کامپوزیت شده، به نحوی که استحکام نمونه‌های حاوی نانوذرات خاک رس پس از قرارگیری تحت شرایط محیطی از نمونه‌های فاقد نانوذرات خاک رس تحت شرایط محیطی یکسان (۵۰۰ ساعت) ۹٪ بیشتر است.

**کلیدواژگان:** کامپوزیت شیشه-اپوکسی، شرایط محیطی، خواص مکانیکی، نانوذرات خاک رس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۸

\*نویسنده مسئول: mhallaee@mut.ac.ir

### ۱- مقدمه

با توجه به مزایای کامپوزیت‌ها، استفاده از این مواد در صنایع گوناگون روز به روز در حال افزایش است. این مواد نیز همانند سایر

مواد دارای معایبی هستند که مهم‌ترین آنها پیرشدگی تحت شرایط محیطی چون دما، رطوبت، اشعه فرابنفش و غیره است [1]. بدین منظور امروزه مطالعات فراوانی بر تأثیر همزمان رطوبت و دما بر خواص کامپوزیت‌های ساخته شده انجام گرفته است که اثری بالقوه دارد و در محیط‌های گرمسیری و مرطوب رخ می‌دهد. تمامی تحقیقات، کاهش خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی را طی فرآیند پیرشدگی شتاب‌زده گزارش کردند [2-5]. از مهم‌ترین پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به مطالعه /زکلیک و همکاران [6] اشاره نمود که در آن تأثیر دماهای ۱۵۰، ۱۷۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را بر کامپوزیت گرافیت-اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها پایدار بوده و اُفت محسوسی در استحکام و کاهش وزن، مشاهده نشد. اگرچه همین ماده در معرض دماهای ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب دچار کاهش وزن ۰/۸۱، ۲/۳۱ و ۵/۸۴٪ شده که با کاهش استحکام برشی ۱۰/۷۸، ۳۳/۰۷ و ۴۹/۸۶٪ همراه بوده است.

همچنین جیانگ و همکاران [7]، میزان کاهش خواص مکانیکی را برای نمونه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی تحت شرایط غوطه‌وری در آب انجام داده‌اند. طبق بررسی‌های انجام شده برای شرایط پیرشدگی آب با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، جذب رطوبت سه برابر بیشتر از شرایط با رطوبت بیش از ۳٪ در سطح اشباع بوده است. در تحقیق دیگر، اثر پیرشدگی تسریع شده رطوبتی-دمایی بر خواص حرارتی و شکست کامپوزیت کربن-اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق رفتار پیرشدگی هیدروترمال (دمایی و رطوبتی) یک ورقه کامپوزیتی الیاف کربن با ماتریس اپوکسی به صورت حجمی بررسی شده که برای این کار نمونه‌ها در شبیه‌ساز طول عمر، به صورت غوطه‌ور در آب مقطر، در دمای ۳۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ و ۸ هفته قرار داده شده‌اند. نتایج آنها نشان داد که افزایش دمای پیرشدگی از ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب آب تمام سیستم‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که جذب آب برای رزین به تدریج در مرحله اول جذب افزایش می‌یابد [8, 9].

فن و همکاران [10] اثر پیرشدگی حرارتی را بر خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف کربن-اپوکسی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص مکانیکی کامپوزیت در اثر قرارگیری در معرض دماهای ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش چشمگیری داشته است.

اثرات جذب و دفع رطوبت بر خواص مکانیکی و مقاومت شکست ورقه‌های شیشه-پلی‌استر توسط تریانگ و همکاران [11] مورد بررسی قرار گرفته است. اثر جذب و دفع رطوبت بر خواص مقاومت خمشی ورقه از جنس پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) به صورت تجربی تحت پیرشدگی محیطی با شرایط گرم-مرطوب مورد بررسی قرار گرفته و برای مشخص نمودن تخریب مکانیکی، آزمون خمشی سه نقطه با استفاده از استاندارد (ASTM D790-10A) انجام شده است. در نهایت خواص مقاومت خمشی نمونه در سه محیط خشک

کاهش وزن ۵/۳۰٪ داشت که این به دلیل وجود میکروترک‌های ناشی از تجزیه زنجیره‌های پلیمری و از بین رفتن ماتریس در طول پیرشدگی حرارتی است. در روندی مشابه برای ورقه‌های الیاف فلزی نیز کاهش مقاومت خمشی ۴/۲۶٪ و عدم کاهش وزن نمونه‌ها گزارش شده است که نشان می‌دهد وزن نمونه (FML) بسیار پایدار است.

سن‌باریوسا و همکاران<sup>[16]</sup>، اثرات پیرشدگی تسریع‌شده را بر طول عمر کامپوزیت‌های کربن- اپوکسی بررسی کردند. طبق مشاهدات آنها، این ماده در طول گذر زمان آفت خواص پیدا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که خواص ماتریس‌ها به‌خاطر قرارگرفتن در معرض اشعه فرابنفش، سیکل دمایی و محیط‌های مرطوب دارای روند کاهشی است. آنها نمونه‌های کامپوزیتی را داخل یک محفظه محیطی در شرایط کنترل‌شده دمایی و رطوبتی و اشعه فرابنفش مورد آزمایش تسریع‌شده طول عمر قرار دادند و به کمک الکتروسکوپ مادون قرمز فوریه (FTIR)، آنالیز دینامیکی (DMA) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استحکام برشی بین لایه‌ها، استحکام فشاری و تنوع جرم نمونه‌ها را اندازه‌گیری کردند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی نمونه‌ها مشاهده نشد، اگرچه اثرات آزمایش تسریع‌شده در نمونه‌ها با کاهش جرم، قرارگرفتن الیاف خارج از ماتریس، واکنش شیمیایی، افزایش چگالی ترک در آزمون‌های برشی بین لایه‌ای و کماتش الیاف در نمونه‌های شکسته‌شده پس از آزمایش فشرده‌سازی، قابل مشاهده است.

بررسی تاثیر پیرشدگی تسریع‌شده بر دمای انتقال شیشه و خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه- وینیل استر توسط شمسودها و همکاران<sup>[17]</sup> انجام گرفت. در آن، نمونه مورد آزمایش در محفظه تهویه مطبوع گرم، در معرض دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. نتایج نشان داد که استحکام کششی و استحکام برشی نمونه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در همان ابتدا کاهش یافته، اما مدول الاستیک آن بدون تغییر باقی مانده است. همچنین دمای انتقال شیشه نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و بعد از انجام آزمایش به ۹۷ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در نهایت دمای متوسط انتقال شیشه نمونه‌ها نیز پس از روند پیرشدگی برابر با ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

در تحقیقاتی مشابه، تاثیر حضور نانوذرات در رفتار پیرشدگی کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تحقیق چانگ و چو<sup>[18]</sup> اشاره کرد. آنها با اضافه کردن نانوذرات خاک رس در کامپوزیت‌های ترکیبی شیشه- اپوکسی در شرایط محیطی اشعه فرابنفش میزان کاهش خواص مکانیکی نمونه‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست نمونه‌ها در معرض اشعه کاهش می‌یابد.

تاثیر پیرشدگی تسریع‌شده بر خواص مکانیکی (سختی و مقاومت خمشی) کامپوزیت‌های ترکیبی با رزین اپوکسی و الیاف پارچه‌ای کربن و شیشه، توسط سانیل‌کومار و همکاران<sup>[19]</sup> انجام گرفت. در

(رطوبت نسبی صفر)، رطوبت غیراشباع (۳۰ تا ۵۰٪ رطوبت نسبی) و رطوبت اشباع (۱۰۰٪ رطوبت نسبی) در هر دو دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد با هم مقایسه شده است. نتایج تجربی آنها نشان داد که ترکیبی از اثرات رطوبت و دما به‌طور کامل موجب کاهش خواص مکانیکی از قبیل استحکام، سختی و مقاومت خمشی ورقه‌های GFRP می‌شود. علاوه بر این، درصد کاهش استحکام خمشی بسیار بزرگ‌تر از مدول الاستیک ماده است. در نهایت کاهش غیرقابل برگشت مدول الاستیک ۱۵٪ و مقاومت خمشی ۱۶/۴٪ برای ورقه‌های GFRP گزارش شده است که یک مرحله از جذب یا عدم جذب رطوبت را در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تجربه می‌کنند.

در پژوهش دیگری، تاثیر شرایط محیطی هیدروترمال بر خواص کششی و چقرمگی شکست رزین اپوکسی در حالات پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که جذب آب در نمونه‌ها سبب افزایش چقرمگی شکست و کاهش خواص کششی می‌شود<sup>[12]</sup>.

بررسی اثر پیرشدگی هیدروترمال بر ورقه‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن با پارچه‌هایی از جنس نانوالیاف نایلون ۶ به‌عنوان پوشش سخت‌تر، توسط دی‌فیلیپو و همکاران<sup>[13]</sup> انجام شده است. در آن از پارچه‌های الکترونیسی (فرآیندی برای تولید انواع نانوالیاف و میکروالیاف از محلول‌های مواد پلیمری) به‌عنوان پوشش‌های سخت در کامپوزیت اپوکسی با الیاف کربن در کارایی بالا استفاده شده است. این کار به بررسی تاثیر اثر ترکیبی از رطوبت و آب با درجه حرارت ۹۰ درجه سانتی‌گراد در ورقه کامپوزیتی با ۶ غشاء الکترونیسی پرداخته است که فقط در صفحه وسط و در هر لایه قرار دارد. نتایج این تحقیق نشان داد اگر پارچه‌های نانوالیاف در هر یک از سطوح بین لایه قرار داده شوند، مقاومت برشی بین لایه‌ها تا ۳۰٪ نسبت به کامپوزیت ساده افزایش می‌یابد.

لی و ژو<sup>[14]</sup> رفتار پیرشدگی کامپوزیت کتان- اپوکسی را تحت تاثیر رطوبت و دما مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که جذب آب با افزایش دمای محیط رابطه‌ای مستقیم دارد. همچنین در ابتدای زمان پیرشدگی میزان جذب بیشتر از سایر زمان‌ها گزارش شده است.

شین و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی تاثیر پدیده پیرشدگی هم‌دما بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی با الیاف شیشه و فلز (FMLs) پرداخته‌اند. در این تحقیق دو نمونه کامپوزیتی به روش دستی تحت فشار خلأ ساخته و سپس به محیط شبیه‌ساز پیرشدگی هم‌دما (۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، هوا خشک) تا پنج هفته منتقل شده است. در نهایت آزمون خمشی و آزمون ضربه چارپی بر نمونه‌های قبل از آزمایش و بعد از آن برای بررسی تاثیر شرایط هم‌دما بر خواص مکانیکی نمونه‌ها، انجام شده است و نتایج تجربی از خواص خمشی و مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های شیشه- اپوکسی و ورقه‌های الیاف فلزی پس از ۸۴ ساعت و تحت دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد با هم مقایسه شد. پس از انجام شبیه‌سازی، طول عمر نمونه کامپوزیتی شیشه- اپوکسی، کاهش ۱۰/۶۱٪ در مقاومت خمشی و

## ۳- روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: رزین اپوکسی با نام تجاری Araldite LY556، سخت‌کننده متیل‌تتراهیدروفتالیک‌ایدید با نام تجاری HY917 و شتاب‌دهنده‌ای با نام تجاری DY070 از شرکت سیباگایگی؛ ماده زمینه به‌ترتیب با درصدهای وزنی ۱۰۰ گرم رزین، ۹۰ گرم سخت‌کننده و ۱۰ گرم شتاب‌دهنده تهیه شده است. برای تقویت‌کننده از پارچه ۲۰۰ گرمی شیشه با بافت پلین از شرکت وتروتکس (Vetrotex) استفاده شده است. همچنین برای بررسی بهبود تاثیر ذرات نانو بر رفتار ماده، از پودر نانوس منتموریلونیت (Montmorillonite) نیز استفاده شده است. نمونه‌های این آزمون، طبق استاندارد ASTM D3039 ساخته و مورد آزمون کشش قرار گرفته است. این استاندارد برای تعیین خواص کششی درون صفحه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف مدول بالا است. طبق این استاندارد، نمونه‌های آزمون باید به‌صورت مستطیلی باشند. این استاندارد برای حرکت به سمت یکسان‌سازی ابعاد در دنیا، پیشنهاداتی نیز ارائه نموده است. طبق این استاندارد ابعاد نمونه‌ها شامل ضخامت، طول و پهنا به مقدار  $25 \times 25 \times 2/5$  میلی‌متر است. برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش، ابتدا دو لمینیت مجزا با تعداد ۱۶ لایه شیشه، با زاویه الیاف صفر و ۹۰ درجه به‌صورت دستی لایه‌چینی شده است. رزین‌های به‌کاررفته در این لایه چینی به دو صورت آماده شدند: در حالت اول، رزین LY556 و سخت‌کننده HY917 با نسبت وزنی رزین به سخت‌کننده ۳۸/۱۰۰ و بدون پودر نانو با یکدیگر ترکیب شدند. در حالت دوم با توجه به هوا پخت‌بودن رزین مورد استفاده، ابتدا ۳ درصد وزنی رزین و سخت‌کننده پودر نانوس به رزین LY556 اضافه شده و توسط همزن برقی و دستگاه امواج التراسونیک به مدت ۲ ساعت مخلوط شده است. در مرحله بعد سخت‌کننده HY917 اضافه شده و به مدت ۱۵ دقیقه اختلاط ادامه یافت تا رزین مورد استفاده در نمونه‌های حاوی نانوس آماده شود (شکل ۱).



شکل ۱) ترکیب پودر نانو توسط دستگاه همزن اولتراسونیک

در مرحله بعد، ساخت نمونه‌ها با استفاده از فرآیند لایه چینی و کیسه خلأ انجام شده است. پس از اتمام لایه‌چینی هر دو لمینیت،

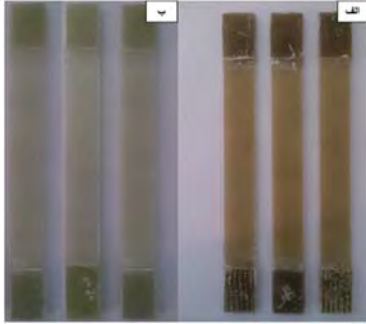
آن سعی شده یک جایگزین مناسب برای الیاف کربن در قالب ترکیبی از الیاف کربن و شیشه ارائه شود. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن دامنه متنوعی از کاربردها در زمینه‌های خودرو، هواپیما، سازه‌های دریایی و غیره را شامل می‌شوند. با وجود اینکه الیاف کربن نسبت به شیشه از استحکام بالاتری برخوردار هستند، اما هزینه بالای این الیاف موجب محدودیت در کاربرد آنها است. در روند تحقیق، چهار دسته نمونه کامپوزیت چند لایه با استفاده از پرکننده گرافیت ۵، ۱۰ و ۱۵٪ توسط روش دستی تهیه شده و سه مجموعه از نمونه‌ها با محتوای مختلف پرکننده در دماهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰۰ ساعت قرار داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ۵ و ۱۰٪ پرکننده گرافیت نسبت به نمونه‌هایی با پرکننده گرافیت ۱۵٪ دارای استحکام خمشی بیشتری هستند. همچنین میزان افزایش پرکننده از ۱۰ تا ۱۵٪ بر خواص اتصال رزین و فیبرها اثر گذاشته و منجر به کاهش استحکام نمونه‌ها شده است. حداکثر مقدار استحکام خمشی برای پرکننده ۵٪ و پرکننده ۱۵٪ به‌ترتیب برابر با  $375/825$  و  $298$  مگاپاسکال گزارش شده است.

کوان و همکاران [20]، پیرشدگی حرارتی را بر کامپوزیت شیشه-اپوکسی با نانوذرات سیلیکاتی SiC و SiO<sub>2</sub> مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی SiC مقاومت بیشتری در مقابل پیرشدگی حرارتی و همچنین خواص مکانیکی بالاتری در مقایسه با نمونه‌های حاوی SiO<sub>2</sub> از خود نشان می‌دهند.

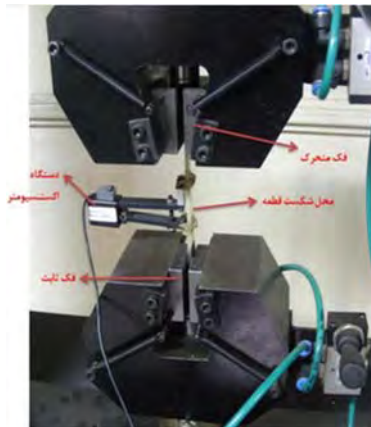
با بررسی مطالعات پیشین، می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که طول عمر کامپوزیت‌ها طی فرآیندهای پیرشدگی تحت شرایط مختلف محیطی از قبیل محیط‌های مرطوب، محیط‌هایی با دماهای بالا و یا حتی ترکیب همزمان این اثرات با یکدیگر متغیر و به نوع مواد تشکیل‌دهنده آن از قبیل رزین (اپوکسی، وینیل‌استر و پلی‌استر) و تقویت‌کننده (شیشه، کربن و کولار) و جهت آنها وابسته است. با توجه به نوع کاربرد کامپوزیت‌ها، شرایط محیطی باعث تغییر خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، مقاومت خمشی و تغییرات استحکام به ضربه و غیره نیز می‌شود. با توجه به اهمیت پیرشدگی در کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی تحت شرایط هیدروترمال و همچنین استفاده از خاک رس به‌منظور افزایش طول عمر این کامپوزیت‌ها، در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است.

## ۲- شرح مساله

با توجه به اهمیت کامپوزیت‌ها و گسترش کاربرد آنها در صنایع مختلف، امروزه مساله پیرشدگی در این مواد بحثی گلوگاهی به‌شمار می‌رود. در بسیاری از موارد، کامپوزیت‌ها انتخاب مناسب‌تری نسبت به دیگر مواد هستند، ولی با توجه به حساس بودن آنها در مقابل شرایط محیطی از آنها کمتر استفاده می‌شود. در این تحقیق، به‌منظور بهبود عملکرد نمونه‌های کامپوزیت شیشه-اپوکسی تحت شرایط پیرشدگی شتاب‌زده دما و رطوبت، از ذرات نانوس به میزان ۳٪ استفاده شده است.



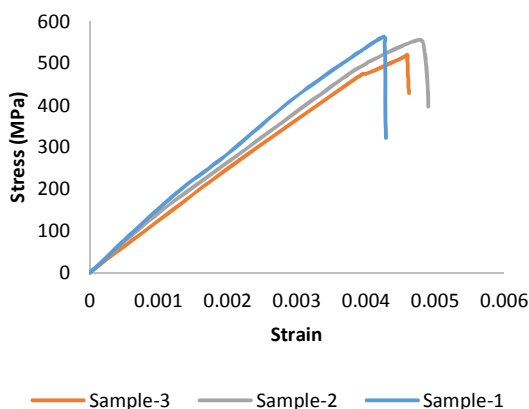
شکل ۵) نمونه‌های آزمون کشش حاوی پودر نانو همراه تب (الف) و فاقد پودر نانو همراه تب (ب)



شکل ۶) دستگاه آزمون کشش همراه با اکستنسایومتر

#### ۴- نتایج و بحث

در نمودار ۱، نتایج ارزیابی آزمون کشش شامل نمودار تنش- کرنش نمونه‌های کامپوزیت فاقد نانوذرات قابل مشاهده است. میزان استحکام نهایی در نمونه‌های کامپوزیتی فاقد پودر نانو در جدول ۱، نتایج ارزیابی آزمون کشش شامل نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیت حاوی ۳٪ نانوذرات در نمودار ۲ و میزان استحکام نهایی در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی پودر نانو در جدول ۲ قابل مشاهده است. همان گونه که از مشاهده نتایج خواص دیده می‌شود، اضافه کردن پودر نانوس با عث کاهش استحکام کامپوزیت به میزان ۱۹/۹۹٪ می‌شود.



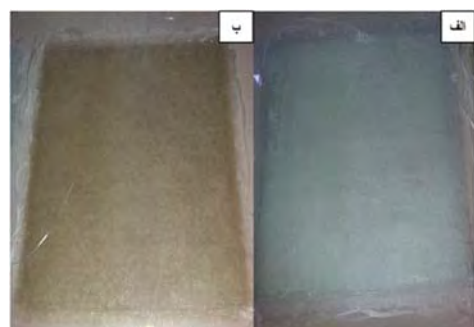
نمودار ۱) نمودار تنش- کرنش نمونه‌های کامپوزیت فاقد نانوذرات

نمونه‌ها توسط کیسه و پمپ خلأ تحت فشار ناشی از خلأ، در دمای محیط پخته شدند (شکل ۲). به منظور همانندسازی شرایط و حذف دخالت عوامل ناشی از تغییر فرمول‌بندی و شرایط ساخت، پخت و برشکاری، تهیه تمام نمونه‌ها در یک مرحله انجام شد و سعی شد تا شرایط ساخت نمونه‌ها در حد امکان مشابه باشد.



شکل ۲) ساخت لمینیت کامپوزیت

پس از پخت کامل لمینیت کامپوزیتی (شکل ۳)، از هر کدام از آنها سه نمونه (در مجموع ۶ عدد) طبق ابعاد پیشنهادی استاندارد توسط دستگاه CNC برش داده شده‌اند (شکل ۴). نمونه‌ها پس از چسباندن تب (Tab) در دو انتهای آنها (شکل ۵) آماده آزمون کشش شدند. اضافه کردن تب در ناحیه گیره‌های دستگاه کشش، با هدف کاهش تمرکز تنش در آن نواحی انجام گرفته است. آزمون کشش نمونه‌ها توسط دستگاه STM-150 سنتام با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. طی آزمون، یک سنسور کرنش سنج (اکستنسایومتر) روی دستگاه نصب شد تا نرخ دقیق کرنش را اندازه‌گیری نماید (شکل ۶). همچنین نمونه‌های بدون پودر نانو و حاوی پودر نانو مربوط به پیرشدگی شتاب‌زده در دستگاه انکوباتور در معرض شرایط محیطی شتاب‌زده هیدروترمال شامل دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰٪ (طبق استاندارد دفاعی ایران (۰۸۱۰)؛ به مدت ۵۰۰ ساعت)، قرار گرفتند که بعد از قرارگیری در شرایط محیطی، از آنها آزمون کشش گرفته شده است.



شکل ۳) لمینیت پخت‌شده حاوی پودر نانو (الف) و بدون پودر نانو (ب)



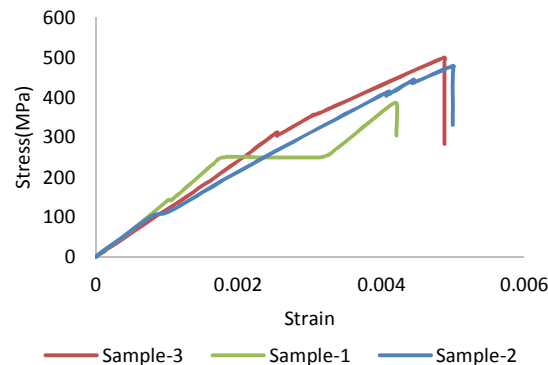
شکل ۴) برشکاری نمونه‌های کپن تست برای آزمون کشش توسط دستگاه CNC

جدول ۱) مقادیر استحکام کششی برای کامپوزیت فاقد نانوذرات

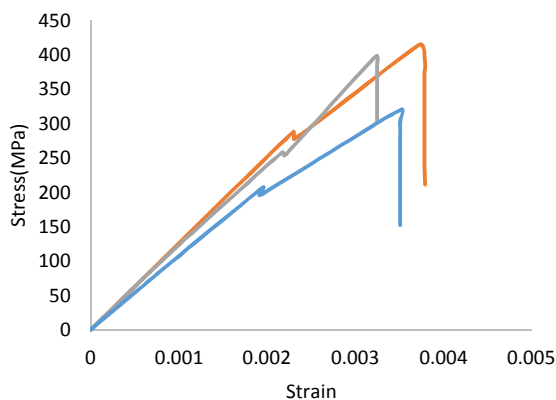
نمونه	استحکام نهایی (MPa)
۱	۵۶۲/۵۰۳
۲	۵۵۵/۰۱۹
۳	۵۱۹/۷۲۲
میانگین	۵۷۲/۳۷۴

جدول ۲) مقادیر استحکام کششی برای کامپوزیت فاقد نانوذرات خاک رس تحت ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده

نمونه	استحکام نهایی (MPa)
۱	۴۱۶/۲۵۲
۲	۴۱۰/۷۱۴
۳	۳۸۴/۵۹۴
میانگین	۴۰۳/۸۵۶



نمودار ۲) نمودار تنش- کرنش نمونه‌های کامپوزیت حاوی نانوذرات



نمودار ۳) نمودار تنش- کرنش نمونه‌های کامپوزیت حاوی نانوذرات خاک رس تحت ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده

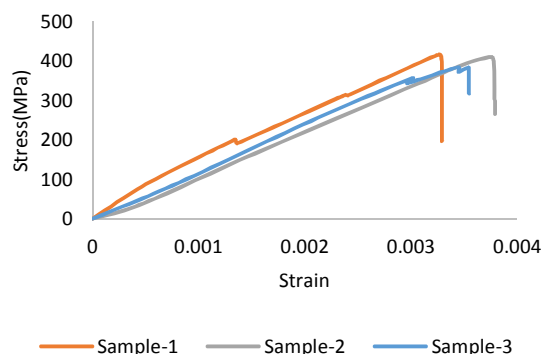
جدول ۳) مقادیر استحکام کششی برای کامپوزیت حاوی نانوذرات

نمونه	استحکام نهایی (MPa)
۱	۴۹۹/۹۵۶
۲	۴۷۸/۷۸۲
۳	۳۸۵/۲۳۴
میانگین	۴۴۹/۹۲۸

جدول ۴) مقادیر استحکام کششی برای کامپوزیت حاوی نانوذرات خاک رس تحت ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده

نمونه	استحکام نهایی (MPa)
۱	۴۱۴/۹۶۳
۲	۳۹۷/۳۸۹
۳	۳۱۹/۷۴۴
میانگین	۳۷۷/۳۶۶

نمونه‌های کامپوزیت شیشه- اپوکسی فاقد پودر رس بعد از قرارگیری تحت شرایط محیطی شتابزده، مورد ارزیابی آزمون کشش قرار گرفتند که نمودار تنش- کرنش این نمونه‌ها در نمودار ۳ و میزان استحکام نهایی در نمونه‌های کامپوزیتی فاقد پودر نانو بعد از پیرشدگی شتابزده در جدول ۳ قابل مشاهده است. نمونه‌های کامپوزیت شیشه- اپوکسی حاوی ۳% پودر نانوذرات بعد از قرارگیری ۵۰۰ ساعت تحت شرایط محیطی شتابزده، مورد ارزیابی آزمون کشش قرار گرفتند که نمودار تنش- کرنش این نمونه‌ها در نمودار ۴ و میزان استحکام نهایی در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۳% پودر نانو بعد از ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده در جدول ۴ قابل مشاهده است.

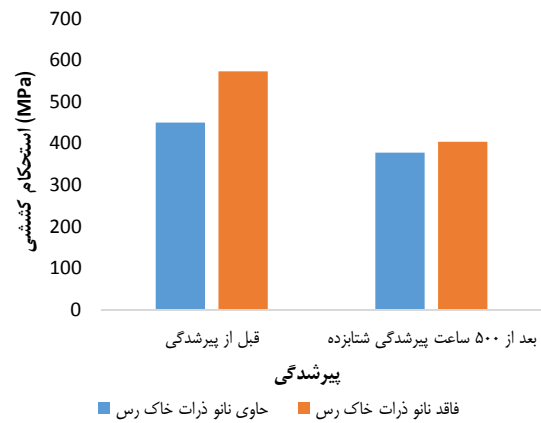


نمودار ۴) نمودار تنش- کرنش نمونه‌های کامپوزیت فاقد نانوذرات خاک رس تحت ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده

در نمودار ۵، مقایسه‌ای بین استحکام کششی نمونه‌های فاقد و حاوی نانوذرات خاک رس، قبل و بعد از پیرشدگی شتابزده قابل مشاهده است. میزان آفت استحکام کششی به دلیل وابسته‌بودن ضخامت نمونه‌ها، سطح تماس با بخار و دمای القاشده در انکوباتور مرتبط با میزان جذب رطوبت است. قرارگیری در این گونه محیط‌ها، در کوتاه‌مدت باعث عمل‌آوری و پخت نمونه‌ها می‌شود که این امر علاوه بر کاهش تنش‌های باقی‌مانده در کامپوزیت‌ها، میزان استحکام کششی را نیز افزایش می‌دهد. میزان آفت خواص برای کامپوزیت‌ها، صرف‌نظر از اثر شرایط محیطی، به نوع رزین و تقویت‌کننده نیز بستگی دارد. همچنین الیاف شیشه به دلیل آب‌دوست‌بودن، میزان بیشتری از رطوبت محیط را به خود جذب می‌کنند که این امر موجب کاهش خواص مکانیکی در نمونه‌های کامپوزیتی شیشه اپوکسی می‌شود. همان گونه که از مشاهده نتایج خواص دیده می‌شود، اضافه‌کردن پودر نانو باعث کاهش روند استحکام در کامپوزیت شیشه- اپوکسی در زمان ۵۰۰ ساعت پیرشدگی شتابزده به میزان ۹% می‌شود.

### منابع

- 1- Sell CG, McKenna GB. Influence of physical ageing on the yield response of model DGEBA/poly (propylene oxide) epoxy glasses. *Polymer*. 1992;33(10):2103-2113.
- 2- Leveque D, Schieffer A, Mavel A, Maire JF. Analysis of how thermal aging affects the long-term mechanical behavior and strength of polymer-matrix composites. *Composites Science and Technology*. 2005;65(3-4):395-401.
- 3- Kawakami H, Souda K, Nanzai Y. Relaxation phenomenon in epoxy glass aged under post-yield strain. *Polymer Engineering & Science*. 2006;46(5):630-634.
- 4- Hu HW. Physical aging in long term creep of polymeric composite laminates. *Journal of Mechanics*. 2007;23(3):245-252.
- 5- Shi X, Fernando BMD, Croll SG. Concurrent physical aging and degradation of crosslinked coating systems in accelerated weathering. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2008;5(3):299-309.
- 6- Ozelik O, Aktas L, Altan MC. Thermo-oxidative degradation of graphite/epoxy composite laminates: Modeling and long-term predictions. *Express Polymer Letters*. 2009;3(12):797-803.
- 7- Jiang X, Kolstein H, Bijlaard FS. Moisture diffusion and hygrothermal aging in pultruded fibre reinforced polymer composites of bridge decks. *Materials & Design*. 2012;37:304-312.
- 8- Alessi S, Pitarresi G, Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014;67:145-153.
- 9- Jiang X, Kolstein H, Bijlaard F, Qiang X. Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;57:49-58.
- 10- Fan W, Li JL, Guo D. Effect of thermo-oxidative aging on three-dimensional and four-directional braided carbon fiber/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*. 2015;49(25):3189-3202.
- 11- Jiang X, Song J, Qiang X, Kolstein H, Bijlaard F. Moisture absorption/desorption effects on flexural property of glass-fiber-reinforced polyester laminates: Three-point bending test and coupled hygro-mechanical finite element analysis. *Polymers*. 2016;8(8):290.
- 12- Sugiman S, Putra IK, Setyawan PD. Effects of the media and ageing condition on the tensile properties and fracture toughness of epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability*. 2016;134:311-321.
- 13- Di Filippo M, Alessi S, Pitarresi G, Sabatino MA, Zucchelli A, Dispenza C. Hydrothermal aging of carbon reinforced epoxy laminates with nanofibrous mats as toughening interlayers. *Polymer Degradation and Stability*. 2016;126:188-195.
- 14- Li Y, Xue B. Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites. *Polymer degradation and stability*. 2016;126:144-158.
- 15- Shin KB, Kim CG, Hong CS. Correlation of accelerated aging test to natural aging test on graphite-epoxy composite materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2003;22(9):849-861.
- 16- Cysne Barbosa AP, Fulco AP, Guerra ES, Arakaki FK, Tosatto M, Costa MC, et al. Accelerated aging effects on



نمودار (۵) نمودار استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت حاوی و فاقد نانو ذرات خاک رس قبل و بعد از پیرشدگی شتابزده

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور افزایش طول عمر کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی از ذرات نانوس با ۳ درصد حجمی استفاده شد. نمونه‌هایی حاوی و فاقد پودر نانوس با مدت ۵۰۰ ساعت تحت پیرشدگی شتابزده قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که استحکام نمونه‌های کامپوزیت شیشه-اپوکسی فاقد نانو ذرات رس که در شرایط پیرشدگی قرار نداشتند، نسبت به قطعات تحت شرایط محیطی شتابزده هم‌دما شامل دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰٪ به مدت ۵۰۰ ساعت، حدود ۲۶٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین استحکام نمونه‌های کامپوزیت شیشه-اپوکسی حاوی نانو ذرات رس که در شرایط پیرشدگی قرار نداشتند، نسبت به نمونه‌های تحت شرایط محیطی شتابزده هم‌دما شامل دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰٪ به مدت ۵۰۰ ساعت، حدود ۱۷٪ کاهش پیدا کرده است. علت اصلی افت خواص کامپوزیت در آزمون کشش، جدایش فاز پیوسته (ماتریس) و ناپیوسته (تقویت‌کننده) در نمونه‌های کامپوزیتی است. طبق استاندارد مذکور این شرایط محیطی تأثیرات بالقوه‌ای بر نمونه‌های کامپوزیتی شیشه-اپوکسی ایجاد کرده است. بنابراین اضافه کردن نانو ذرات خاک رس باعث بهبود شرایط طول عمر کامپوزیت شیشه-اپوکسی به میزان ۹٪ شده است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

**سهم نویسندگان:** سیدعلی عظیمی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ وحید مومنی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۱۰٪)؛ محمدحسین علائی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۱۰٪)؛ امین میرزایی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)؛ مهران رضوانی‌نسب (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)؛ مجید رضوانی‌نژاد (نویسنده ششم)، نگارنده بحث (۱۰٪)؛ امیرحسین محمدیان (نویسنده هفتم)، روش‌شناس (۱۰٪)

19- Sunil Kumar S, Londe NV, Saviraj AS, Kannanth V. Effect of accelerated ageing on hardness and flexural behaviour of woven fabric glass/carbon hybrid epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(10):10751-10756.

20- Kwon DJ, Shin PS, Kim JH, Baek YM, Park HS, Lawrence DeVries K, et al. Interfacial properties and thermal aging of glass fiber/epoxy composites reinforced with SiC and SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*. 2017;130:46-53.

carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017;110:298-306.

17- Shamsuddoha M, Djukic LP, Islam MM, Aravinthan T, Manalo A. Mechanical and thermal properties of glass fiber-vinyl ester resin composite for pipeline repair exposed to hot-wet conditioning. *Journal of Composite Materials*. 2017;51(11):1605-1617.

18- Chang LN, Chow WS. Accelerated weathering on glass fiber/epoxy/organo-montmorillonite nanocomposites. *Journal of Composite Materials*. 2010;44(12):1421-1434.