

## Long-term Durability and Performance of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

*This paper provides an overview of key findings and suggestions for future research on the durability and performance of fiber-reinforced polymer (FRP) composites. The studies reviewed in this paper focus on the effects of moisture, humidity, and other conditions on the physical and mechanical properties of FRP composites. The results of the study show that moisture and humidity have a significant effect on the properties of FRP composites, resulting in reduced strength and interlayer shear strength. Additionally, the presence of moisture in FRP/steel joints can affect the joint performance. The durability of FRP composites is influenced by factors such as moisture absorption, chemical reactions, and microstructural changes, which lead to a decrease in mechanical strength over time. Moisture and humidity significantly impact FRP composite properties, causing reduced strength and interlayer shear strength. For FRP/steel joints, moisture can initially strengthen the bond but may lead to reduced strength in the long term. A predictive model has been developed to estimate the long-term mechanical properties. Further research is needed on fire resistance in FRP reinforcement, and understanding shear response and tool wear for optimal FRP composite design is essential. Surface modifications such as albumin multilayer coatings enhance gold nanoparticle recognition by tumor cells, improving therapy.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 29 December 2023

**Revise Date:** 20 March 2024

**Accept Date:** 17 April 2024

### Keywords:

FRP

Fiber-Reinforced Polymer  
Rehabilitation

Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525689.3736>

\*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: [Havaei@aut.ac.ir](mailto:Havaei@aut.ac.ir)

## مقاومت و عملکرد بلندمدت کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP)

غلامرضا هوائی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

این مقاله یک مرور کلی از یافته‌های کلیدی و پیشنهادات برای تحقیق‌های آینده در زمینه دوام و عملکرد کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) ارائه می‌دهد. مطالعات بررسی‌شده در این مقاله بر اثرات رطوبت، رطوبت و شرایط دیگر بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های FRP تمرکز دارند. نتایج مطالعه نشان می‌دهند که رطوبت و رطوبت تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های کامپوزیت‌های FRP دارند و باعث کاهش استحکام و مقاومت برشی لایه‌ای می‌شوند. همچنین، حضور رطوبت در مفاصل FRP/ فولاد می‌تواند عملکرد مفصل را تحت تأثیر قرار دهد. دوام کامپوزیت‌های FRP تحت تأثیر عواملی مانند جذب رطوبت، واکنش‌های شیمیایی و تغییرات میکروساختاری قرار دارد که منجر به کاهش استحکام مکانیکی در طول زمان می‌شود. رطوبت و رطوبت تأثیر زیادی بر ویژگی‌های کامپوزیت FRP دارند و باعث کاهش استحکام و مقاومت برشی لایه‌ای می‌شوند. برای مفاصل FRP فولاد، رطوبت می‌تواند در ابتدا پیوند را تقویت کند اما ممکن است منجر به کاهش استحکام در بلندمدت شود. یک مدل پیش‌بینی برای برآورد ویژگی‌های مکانیکی بلندمدت توسعه یافته است. تحقیقات بیشتری برای مقاومت در برابر آتش در تقویت FRP و درک پاسخ برش و سایش ابزار برای طراحی بهینه کامپوزیت‌های FRP ضروری است. تغییرات سطحی مانند پوشش چندلایه آلومین، شناسایی نانوذرات طلا توسط سلول‌های توموری را بهبود می‌بخشد و درمان را ارتقا می‌دهد.

کلمات کلیدی: FRP، پلیمر تقویت‌شده با الیاف، مقاوم‌سازی، بتن

| شناسه دیجیتال:   |   | سابقه مقاله: |               |            |                 |            |
|--|---|--------------|---------------|------------|-----------------|------------|
| doi:   | <a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525689.3736">https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525689.3736</a> | چاپ          | انتشار آنلاین | پذیرش      | بازنگری         | دریافت     |
|  | <a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525689.3736">10.22065/jsce.2025.525689.3736</a>                 | ۱۴۰۴/۰۴/۳۱   | ۱۴۰۳/۰۱/۲۹    | ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ | ۱۴۰۳/۰۱/۰۱      | ۱۴۰۲/۱۰/۰۸ |
| غلامرضا هوائی  |   |              |               |            | *نویسنده مسئول: |            |
| <a href="mailto:havaei@aut.ac.ir">havaei@aut.ac.ir</a> |   |              |               |            | پست الکترونیکی: |            |

## ۱- مقدمه

پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای مواد ساخت و ساز سنتی به دلیل استحکام بالا، وزن سبک و مقاومت در برابر خوردگی به ظهور رسیده است. این مواد در صنایع مختلفی مانند هوافضا، مهندسی عمران، خودروسازی و سازه‌های دریایی کاربرد دارند. با این حال، عملکرد بلندمدت و دوام کامپوزیت‌های FRP عوامل حیاتی هستند که مناسب بودن آن‌ها برای این کاربردها را تعیین می‌کنند. دوام کامپوزیت‌های FRP به توانایی آن‌ها در مقاومت در برابر قرارگیری در معرض محیطی و فرآیندهای تخریب طی دوره‌های طولانی اشاره دارد. عوامل محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت، قرارگیری در معرض مواد شیمیایی و تابش UV می‌توانند تأثیرات زیادی بر عملکرد کامپوزیت‌های FRP بگذارند. علاوه بر این، مکانیسم‌های پیری، شامل میکروتکرک‌ها، جداسازی لایه‌ها، خزش، خستگی و تخریب الیاف می‌توانند منجر به تخریب تدریجی ویژگی‌های مواد شوند.

درک فرآیندهای تخریب و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های FRP برای پیش‌بینی عملکرد بلندمدت آن‌ها ضروری است. ویژگی‌های مختلف مواد، از جمله ویژگی‌های الیاف، ماتریس و رابط الیاف-ماتریس، نقش مهمی در تعیین دوام کامپوزیت‌های FRP دارند. برای اطمینان از استفاده ایمن و قابل اعتماد از کامپوزیت‌های FRP، توسعه تکنیک‌های ارزیابی مؤثر برای سنجش دوام آن‌ها و نظارت بر عملکرد بلندمدت آن‌ها ضروری است. روش‌های آزمون غیرمخرب، آزمایش‌های مکانیکی، آزمایش‌های پیری شتاب‌یافته و تکنیک‌های نظارت و حسگری بینش‌های ارزشمندی در مورد مکانیسم‌های تخریب ارائه می‌دهند و امکان شناسایی زود هنگام مشکلات احتمالی را فراهم می‌کنند.

علاوه بر این، پژوهشگران و مهندسان به طور مداوم در حال بررسی استراتژی‌هایی برای افزایش دوام کامپوزیت‌های FRP هستند. تکنیک‌های حفاظت سطحی، تغییرات مواد، تکنیک‌های تقویت و ملاحظات طراحی در حال بررسی هستند تا از تخریب جلوگیری کرده و عملکرد بلندمدت کامپوزیت‌های FRP را بهبود بخشند (شکل‌های ۱ و ۲). کامپوزیت‌ها نقش مهمی در صنایع هوافضا و خودروسازی به دلیل استحکام فوق‌العاده آن‌ها ایفا می‌کنند. با این حال، فرآیند تولید یکپارچه زمان‌بر، نیروی کار زیاد و پرهزینه است. به ویژه لامینیشن کتابی، هزینه‌های نیروی کار قابل توجهی دارد که به طور قابل توجهی به هزینه‌های کل تولید اضافه می‌کند [۲۴]. مواد FRP به دلیل ویژگی‌های عالی خود مانند مقاومت در برابر خوردگی در حال gaining popularity در کاربردهای مهندسی به جای موادی مانند فولاد هستند. ویژگی‌های عالی آن‌ها از جمله مقاومت در برابر خوردگی باعث شده که این مواد برای تقویت بتن موجود یا ایجاد کامپوزیت‌های جدید مناسب باشند [5].



شکل ۱- کامپوزیت GFRP



شکل ۲- ترک‌های میکرو در بتن

تیرهای بتن مسلح (RC) کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) هستند که برای تحمل بارهای خدماتی و مقاومت در برابر تنش‌های مختلف طراحی شده‌اند. تقویت تیرهای RC برای افزایش دوام، تحمل بارهایی فراتر از حد طراحی و افزایش ظرفیت بار ضروری است [۸۱]. تعمیرات به منظور بازیابی استحکام، سختی یا قابلیت تغییر شکل اولیه است، در حالی که تقویت استحکام با هدف بهبود عملکرد سازه نسبت به طراحی اصلی انجام می‌شود [۱۳]. این مطالعه یک روش بهینه‌سازی غیرقطعی برای اجزای CFRP و GFRP ارائه می‌دهد که شامل تصادفی بودن اندازه و تصادفی بودن جهت‌گیری بارگذاری است. [93]

محصولات پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) به طور گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز برای تقویت سازه‌های موجود استفاده می‌شوند. ایده‌های زیادی برای اجزای اضافی مانند تیرها، ستون‌ها، دیوارها و کف‌ها برای غلبه بر آسیب‌های ناشی از تأثیرات محیطی و تغییرات در ساختار پیشنهاد شده است [۳۶]. وصله‌های کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) پیوسته اثربخشی خود را در افزایش طول عمر خستگی فولاد شکننده یا حساس به خستگی نشان داده‌اند. این مطالعه به تحلیل رشد ترک خستگی اجزای فولادی تقویت‌شده با وصله‌های الیاز حافظه‌شکل (SMA) پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) می‌پردازد. [106]

این مقاله مروری به هدف ارائه یک نمای کلی از عوامل مؤثر بر دوام و عملکرد بلندمدت کامپوزیت‌های FRP است. این مقاله به بررسی قرارگیری محیطی که کامپوزیت‌های FRP ممکن است با آن مواجه شوند، مکانیسم‌های پیری و فرآیندهای تخریب آن‌ها، و تأثیر ویژگی‌های مختلف مواد بر دوام آن‌ها می‌پردازد. علاوه بر این، مقاله به بررسی تکنیک‌های ارزیابی پیشرفته و استراتژی‌های بهبود دوام و عملکرد بلندمدت کامپوزیت‌های FRP خواهد پرداخت. با جمع و خلاصه‌سازی دانش موجود در مورد دوام کامپوزیت‌های FRP، این مقاله مروری به درک این جنبه مهم کمک کرده و بینش‌هایی برای تحقیقات و توسعه‌های آینده ارائه می‌دهد.

فن‌آوری‌های تولید خودکار مانند تولید افزایشی (چاپ سه‌بعدی)، درج نوار خودکار (ATP)، پیچش فیلامنت و درج فیبر خودکار (AFP) به عنوان راه‌حل‌های امیدوارکننده برای مشکلات تولید به ظهور رسیده‌اند. این فناوری پیشرفته کنترل دقیق، تکرارپذیری و توانایی ایجاد هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌کند و در عین حال نیروی کار را کاهش می‌دهد. اهمیت تولید خودکار و پردازش کامپوزیت‌های FRP این است که می‌تواند کسب‌وکارها را تغییر دهد، کنترل کیفیت را بهبود بخشد و ظرفیت تولید را در طول چرخه تولید افزایش دهد. با استفاده از اتوماسیون، تولیدکنندگان می‌توانند فرآیندهای تولید را بهبود بخشیده، ضایعات را کاهش داده و استفاده از منابع را بهینه کنند.

علاوه بر این، فناوری اتوماسیون برای کامپوزیت‌های FRP باید نفوذ بازار را گسترش داده و تنوع کاربردها را افزایش دهد. این فناوری می‌تواند توسعه راه‌حل‌های سبک، بادوام و مؤثر در بسیاری از زمینه‌ها مانند محصولات هوافضا، انرژی عمیق، محصولات بدنه کامپوزیتی در تولید خودرو و لوازم جانبی در مهندسی را امکان‌پذیر کند. پیشرفت‌ها در طراحی و عملکرد کامپوزیت‌های FRP این پتانسیل را دارند که صنعت را متحول کنند، نوآوری را به پیش ببرند و فرصت‌های جدیدی برای رشد ایجاد کنند. توانایی تولید مؤثر محصولات با کیفیت با هزینه کم می‌تواند نوآوری را تحریک کرده، بهره‌وری را افزایش دهد و با کاهش ضایعات به توسعه پایدار کمک کند. با توجه به اهمیت فرآیند تولید انرژی برای کامپوزیت‌های FRP، یک بررسی جامع از فناوری‌های کنونی و مدرن ضروری است.

این بررسی هدف دارد تا درک یکپارچه‌ای از آخرین فناوری‌ها، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای بالقوه آن‌ها ارائه دهد. این بینش‌ها می‌توانند دانشمندان، مهندسان و ذینفعان صنعتی را به این درک برسانند که چگونه می‌توانند از پتانسیل کامل تولید و عملکرد کامپوزیت‌های FRP بهره‌برداری کنند، سطوح بالاتری در مواد و فرآیندها ایجاد کنند و در نهایت محصولات جدیدی با عملکرد بهتر و قیمت‌های ارزان‌تر تولید کنند.

هدف اصلی این مرور، ارائه یک مرور جامع از فناوری‌های کنونی و مدرن برای تولید و پردازش الکترونیک با استفاده از مواد پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) است. با دستیابی به این هدف، این تحقیق قصد دارد:

تحلیل نقاط قوت و محدودیت‌ها: این مرور به بررسی نقاط قوت و محدودیت‌های هر یک از روش‌های طراحی مکانیکی برای کامپوزیت‌های FRP خواهد پرداخت. عواملی مانند سرعت تولید، دقت، تکرارپذیری، پیچیدگی هندسه، سازگاری مواد و قابلیت مقیاس‌پذیری را تحلیل خواهد کرد. با درک مزایا و معایب هر تکنیک، خوانندگان به درک مناسبی از مناسب بودن آن‌ها برای کاربردهای خاص و مسائل مرتبط با استفاده از آن‌ها خواهند رسید.

کاربردها و بازارهای تحقیقاتی: این مرور به بررسی کاربردها و بازارهای مختلف استفاده از فناوری‌های تولید خودکار کامپوزیت FRP خواهد پرداخت. کاربردهای آن را در صنایع هوافضا، خودروسازی، مهندسی عمران، دریایی و دیگر زمینه‌ها بررسی خواهد کرد.

ارزیابی کنترل کیفیت و بهینه‌سازی: هدف اصلی این تحلیل، ارزیابی تأثیر فرآیند تولید الکترونیک بر کنترل کیفیت و بهینه‌سازی در تولید کامپوزیت‌های FRP است. بررسی خواهد شد که چگونه اتوماسیون می‌تواند ثبات را بهبود بخشد، نقص‌ها را کاهش دهد و ایمنی را افزایش دهد. علاوه بر این، این مرور استراتژی‌هایی برای بهبود روش‌های غیر استاندارد، انتخاب تجهیزات و هماهنگی عملیات برای عملیات‌های مؤثر و قابل اعتماد خواهد کاوید.

شناسایی چالش‌ها و مسیرهای آینده: این مرور به شناسایی چالش‌ها و محدودیت‌های اصلی مرتبط با تولید قطعات الکترونیکی کامپوزیت‌های FRP خواهد پرداخت. مسائلی مانند بودجه‌بندی، مدیریت ضایعات، بهره‌وری انرژی و نیازهای طراحی را بررسی خواهد کرد. همچنین، این مرور تحقیقات و توسعه‌های آینده را اطلاع‌رسانی خواهد کرد، از جمله زمینه‌هایی که نیاز به تحقیقات بیشتر و نوآوری دارند.

این مرور به هدف دستیابی به این اهداف و به‌عنوان یک منبع برای محققان، مهندسان و حرفه‌ای‌های تجاری که به دنبال درک عمیق‌تری از طراحی مواد و فناوری برای کامپوزیت‌های FRP هستند، ارائه می‌شود. بینش‌های این مرور به تصمیم‌گیری کمک خواهد کرد، فناوری تولید را پیشبرد خواهد داد و استفاده از فرآیندهای خودکار در کامپوزیت‌های FRP را تسهیل خواهد کرد.

ببخشید که عنوان‌ها رو ترجمه نکردم. در اینجا ترجمه کامل همراه با عنوان‌ها است

## ۲- قرارگیری در معرض شرایط محیطی

### ۱-۲ رفتار وابسته به دما در کامپوزیت‌های FRP

این مجموعه مقالات تحقیقاتی به بررسی رفتار پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) در دماهای مختلف می‌پردازد. مقاله همچنین دقت مدل‌های مختلف را در پیش‌بینی رفتار تاندون‌های CFRP در دماهای مختلف ارزیابی می‌کند. علاوه بر این، نویسندگان معادله جدیدی را پیشنهاد داده‌اند که با استفاده از برازش عددی برای محاسبه رفتار کامپوزیت‌های CFRP در دماهای بالا به دست آمده است [۱۰۸]. مطالعه‌ای به بررسی رفتار دمایی و خستگی کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف بازالت (BFR) پرداخته است. تفاوت کاهش یافته در عمر خستگی در دماهای بالا در کامپوزیت‌های BFR ممکن است ناشی از بهبود شکل‌پذیری، توزیع بهتر بار و کاهش تمرکز تنش‌ها باشد که همه این‌ها به واکنش یکنواخت‌تر و مقاوم‌تر ماده تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای کمک می‌کند [105].

مطالعه‌ای مروری جامع درباره کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) انجام شده است که به کامپوزیت‌ها و استفاده از انواع مختلف شیشه‌ها می‌پردازد. ماتریس اطلاعاتی از طریق روش‌های مختلف آماده شده است [۶۶]. این مطالعه انتشار آب در قطعات کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) با ویژگی‌های داده‌ای مختلف را بررسی می‌کند. مدل ترکیبی انتشار تغییر شکل ماکروسکوپی Fickian و Gurtin توصیف کلی از کل فرآیند انتشار ارائه می‌دهد [۱۸]. نویسندگان اثر دما و دمای عملیاتی مواد پلیمری را در عملکرد آن‌ها بررسی می‌کنند و اثرات دماهای برش بر روی عملیات‌های مختلف مانند برش عمودی، فرزکاری، دوربینگ و حفاری و تأثیر آن‌ها بر مواد و تجهیزات را مورد بررسی قرار می‌دهند [۷۸]. نویسندگان بر لزوم انجام تحقیقات گسترده در این زمینه تأکید می‌کنند. آن‌ها به تصمیم استفاده از این اطلاعات با حداقل ایمنی برای کاهش وزن و بهبود ویژگی‌های محصول اشاره می‌کنند. این مقاله اهمیت ارزیابی قدرت اتصال و پایداری را برای اطمینان از عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محیط‌های مختلف برجسته می‌کند. [77]

نویسندگان دریافتند که دما تأثیر بیشتری بر روی قدرت پیوند نمونه‌های کششی کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) نسبت به نمونه‌های کششی کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده با الیاف بازالت (BFRP) دارد. تعادل دمای باقی‌مانده نیز محاسبه شده است که ایده‌های از رفتار میله‌های BFRP در دمای بالا می‌دهد [۵۲]. همچنین، نویسندگان دریافتند که قدرت کششی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ثابت باقی ماند، اما در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت، احتمالاً به دلیل نرم شدن ماتریس اپوکسی و ضعیف شدن پیوند الیاف-ماتریس فراتر از دمای گذار شیشه. [100]

این مطالعه به بررسی رفتار کششی لایه‌های اپوکسی رزین تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRE) در اندازه‌های مختلف پرداخته است. مطالعات نشان داده‌اند که قدرت کششی به طور غیرخطی با افزایش دما کاهش می‌یابد. [۸۲]. نویسندگان مدل‌سازی تحلیلی انجام داده‌اند تا مکانیسم‌های زیربنایی که منجر به رفتار مکانیکی وابسته به دما می‌شوند، را آشکار کنند. این یافته‌ها بینشی درباره پاسخ دمایی کامپوزیت‌های CFRP فراهم می‌کند که می‌تواند به طراحی کامپوزیت‌های CFRP سبک‌تر، مقاوم‌تر و محکم‌تر کمک کند. [44]

این مجموعه مقالات تحقیقاتی تأثیر دما بر رفتار و عملکرد کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) را بررسی می‌کند. این مطالعات مدل‌های مختلف را ارزیابی کرده و معادلات جدیدی را برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های FRP در دماهای بالا پیشنهاد می‌دهند. آن‌ها تأثیرات دما بر رفتار خستگی کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف بازالت و کربن را بررسی می‌کنند و کاهش تفاوت‌های عمر خستگی با افزایش دما را برجسته می‌کنند.

## 2.2. تأثیر رطوبت و رطوبت‌زدایی

رطوبت و رطوبت‌زدایی تأثیر قابل توجهی بر روی کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) دارند. قرارگیری در معرض رطوبت می‌تواند تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مواد FRP ایجاد کند. جذب رطوبت باعث تغییرات و تضعیف و سفت شدن پیوند الیاف-ماتریس می‌شود. همچنین، این مواد به آسیب‌های محیطی مانند لایه‌برداری، خوردگی و رشد میکروبی حساس هستند. خنک‌سازی هیگروترمال همراه با رطوبت و دما می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های FRP را بیشتر تحت تأثیر قرار دهد. نتیجه‌گیری‌ها نشان دادند که مقاومت کششی نهایی و مدول ورق‌های FRP با قرارگیری در معرض تابش فرابنفش (UV) در طول زمان کاهش می‌یابد. تجزیه مواد چسب رزینی به عنوان عامل اصلی در تخریب ساختارهای بتنی تقویت‌شده با FRP شناسایی شد. جالب توجه است که افزایش تعداد لایه‌های FRP تأثیرات منفی تابش UV را بر عملکرد این مواد کاهش نمی‌دهد. [103]

نویسندگان تحقیقی درباره تأثیر شرایط آب و هوایی متغیر بر روی خزش مکانیکی-سورفتی در چوب‌های تقویت‌شده با گلابلم (glulam) انجام داده‌اند. این مطالعه نشان داد که هم تیرهای تقویت‌نشده و هم تیرهای تقویت‌شده تغییرات قابل توجهی در رفتار خزش و انحراف بعد از اولین دوره رطوبت نسبی داشتند. [68] محققان عملکردهای زمانی وابسته به عملکرد مواد کربن فیبر تقویت‌شده با پلیمر (CFRP) و شیشه فیبر تقویت‌شده با پلیمر (GFRP) تحت شرایط محیطی شدید مختلف را مقایسه و تجزیه و تحلیل کردند. [110]

نویسندگان به بررسی اندازه‌گیری رطوبت مواد در پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) با استفاده از حسگرهای یکپارچه پرداخته‌اند. این مطالعه بر اهمیت تعیین و گنجاندن سطوح رطوبت برای روش‌های جبران، مانند شناسایی خط پایه بهینه تأکید دارد. نشان داده شده است

که حسگرهای یکپارچه برای تعیین جذب آب و پیری طولانی مدت FRP مؤثر هستند. [74] مطالعه‌ای دیگر به دوام کامپوزیت‌های FRP برای ساختارهای هوافضا در شرایط هیگروترمال پرداخته است. این مطالعه از هم‌ترازی زمان-دما (TTS) برای ایجاد همبستگی بین رطوبت، دما و رفتار مکانیکی ساختارهای لامینه استفاده کرده است. [31] نویسندگان گزارش کاملی از آسیب‌های محیطی و تخریب کامپوزیت‌های FRP ارائه کرده‌اند. این مرور بر ویژگی‌های مکانیکی برتر کامپوزیت‌های FRP نسبت به مواد فلزی تأکید دارد، که این ویژگی‌ها باعث شده تا این مواد گزینه‌های ترجیحی برای ساختارهای مهندسی عمران و قطعات هوافضا با عملکرد بالا باشند. [77] محققان اثرات شرایط هیگروترمال بر چسب‌های اپوکسی استفاده شده در کامپوزیت‌های FRP را مطالعه کرده‌اند. این تحقیق بر حساسیت اپوکسی به آب و دمای بالا تأکید دارد، که می‌تواند بر طول عمر تعمیرات FRP در محیط‌های هیگروترمال تأثیر بگذارد. [11] نویسندگان دستورالعمل‌هایی برای بهبود کارایی ساختارهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP ارائه داده‌اند. تأکید بر در نظر گرفتن پارامترهای بحرانی و نتایج تحقیقاتی مرتبط با انواع مختلف بتن تقویت شده با FRP است که بینش‌هایی برای فرآیند طراحی فراهم می‌کند. [69] نویسندگان تأثیرات محیطی بر دوام میله‌های تقویت کننده FRP را مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعه نشان داد که به جز محلول‌های آبی، میله‌های GFRP نسبت به میله‌های BFRP در محلول‌های قلیایی، نمک و اسید مقاوم‌تر به خوردگی هستند. نویسندگان یک مدل پیش‌بینی جدید برای هر دو نوع میله GFRP و BFRP پیشنهاد کرده‌اند. [15]

شینگ لیو، تیان کیائو لیو و پنگ فنگ یک چارچوب پیش‌بینی عملکرد بلندمدت برای کامپوزیت‌های FRP پالتروزی شده که در معرض آب، رطوبت و محلول‌های قلیایی قرار دارند، توسعه دادند. این مطالعه تأثیر قابل توجه زمان قرارگیری و دما بر ویژگی‌های کششی باقی مانده کامپوزیت‌های FRP را برجسته کرد. مدل درخت تصمیم XGBoost پیشنهادی یک روش نوآورانه برای پیش‌بینی تخریب بلندمدت کامپوزیت‌های FRP تحت تأثیرات محیطی ارائه داد. [58]

### 2.3. تأثیر قرارگیری در معرض مواد شیمیایی و محیط‌های خوردنده بر FRP

قرارگیری در معرض مواد شیمیایی و محیط‌های خوردنده چالش‌های قابل توجهی برای مواد پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) ایجاد می‌کند. FRP ها به دلیل خواص مکانیکی عالی و مقاومت در برابر خوردگی در صنایع مختلف به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. با این حال، قرارگیری در معرض مواد شیمیایی سخت، مانند اسیدها، قلیاها، حلال‌ها و نمک‌ها، می‌تواند منجر به تخریب کامپوزیت‌های FRP شود. حملات شیمیایی می‌تواند منجر به از دست دادن استحکام مکانیکی، جداشدگی لایه‌ها و خرابی پیوند بین الیاف و ماتریکس گردد.

نتایج تجربی نشان می‌دهد که قرار دادن الیاف شیشه‌ای ساده به‌طور مستقیم در معرض محلول قلیایی واکنش‌های شدیدی را ایجاد می‌کند که باعث شستشو و حل شدن می‌شود، که به‌طور قابل توجهی شعاع الیاف و استحکام کششی آن را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، سطح الیاف دارای پوشش ماتریکس محافظتی (حدود ۱.۵ میکرومتر ضخامت) است که به‌طور موفقیت‌آمیز ورود  $H_2O/OH^-$  را به تأخیر می‌اندازد و از واکنش‌های شیمیایی، کاهش استحکام کششی و کاهش شعاع جلوگیری می‌کند [۸۶]. حفظ استحکام در نقاط مختلف مقطع میلگرد می‌تواند با استفاده از نتایج آزمایشات بر تخریب الیاف پوشش‌دار در یک محیط مرطوب و تحلیل انتشار جبهه آب شبیه‌سازی شده تعیین شود. یک مدل انتشار اصلاح شده با افزایش نفوذپذیری آب (از  $4.0 \times 10^{-6}$  میلی‌متر مربع/ثانیه به  $4.5 \times 10^{-6}$  میلی‌متر مربع/ثانیه) و حضور شکاف‌های بین‌سطحی در ناحیه خورده شده برای حل مشکلاتی مانند ترک خوردگی ماتریکس، فرسایش الیاف و جداشدگی الیاف/ماتریکس استفاده می‌شود که بر نفوذپذیری آب تأثیر می‌گذارد. این مدل اثرات پیری هیگروترمال مواد را نیز در نظر می‌گیرد. [87]

جدول یک تحلیل مقایسه‌ای از مطالعات در زمینه دوام مواد FRP در محیط‌های مختلف را ارائه می‌دهد. یافته‌های نویسندگان جنبه‌های مهمی مانند مقاومت شیمیایی، مکانیزم‌های تخریب و راه‌حل‌هایی برای بهبود دوام FRP را برجسته می‌کند. مشخص شد که الیاف E-glass در برابر خوردگی شیمیایی حساس هستند، در حالی که الیاف ECR-glass دوام شیمیایی عالی را نشان دادند. شرایط اسیدی باعث تخریب ساختارهای تقویت شده با FRP و رابط‌های پیوندی FRP-to-concrete شد. میلگردهای FRP هیبریدی از جنس بازالت/کربن تحت تأثیر واکنش سیلیس قلیایی تخریب شدند، در حالی که الیاف کربنی دوام بهتری از خود نشان دادند.

## ۳- مکانیزم‌های سالخوردگی

مکانیزم‌های پیری در پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) به فرآیندهایی اطلاق می‌شود که طی آن‌ها ماده در طول زمان دچار تخریب می‌شود. دو مکانیزم مهم پیری در FRP شامل تخریب ماتریکس و تخریب رابط الیاف-ماتریکس هستند.

تخریب ماتریکس: ماتریکس در کامپوزیت‌های FRP، که معمولاً یک رزین پلیمری است، می‌تواند در طول زمان به دلیل قرارگیری در معرض عوامل محیطی مختلف مانند رطوبت، تغییرات دمایی و مواد شیمیایی دچار تخریب شود. این تخریب می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی ماتریکس، از جمله سفتی، استحکام و مقاومت آن در برابر تغییر شکل شود. تخریب ماتریکس ممکن است شامل واکنش‌های شیمیایی، شکستن زنجیره‌های پلیمری و از دست دادن یکپارچگی ساختاری در ماتریکس باشد.

تخریب رابط الیاف-ماتریکس: رابط بین الیاف تقویتی و ماتریکس برای انتقال مؤثر تنش و بار درون کامپوزیت FRP بسیار حیاتی است. با این حال، در طول زمان، رابط الیاف-ماتریکس می‌تواند تخریب شود که منجر به کاهش چسبندگی و استحکام بین‌سطحی می‌شود. عواملی مانند جذب رطوبت، چرخه‌های حرارتی و بارگذاری مکانیکی می‌توانند به تخریب رابط الیاف-ماتریکس کمک کنند. این تخریب می‌تواند منجر به از دست رفتن کارایی انتقال بار، کاهش سفتی و کاهش عملکرد مکانیکی کلی کامپوزیت FRP شود.

درک این مکانیزم‌های پیری برای ارزیابی دوام و عملکرد بلندمدت مواد FRP در کاربردهای مختلف ضروری است. با شناسایی و کاهش این فرآیندهای تخریب، محققان و مهندسان می‌توانند استراتژی‌هایی برای افزایش عمر مفید و قابلیت اطمینان کامپوزیت‌های FRP توسعه دهند.

با اتصال فرآیندهای میکروسکوپی شامل انتشار آب/یون و تخریب الیاف/ماتریکس با کاهش استحکام کششی کلان، این مطالعه مکانیزم تخریب GFRP (پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه) را نشان داد. به‌طور قابل توجهی، عامل اصلی تأثیرگذار بر تخریب GFRP نشان داده شد که سطح pH است نه یون‌های نمکی. این مطالعه بر لزوم اولویت‌بندی قرارگیری در معرض pH پایین‌تر به‌جای محتوای نمک برای افزایش دوام کامپوزیت‌های GFRP تأکید می‌کند. نتایج این مطالعه پایگاه داده مفیدی برای درک کاهش استحکام کششی GFRP ارائه می‌دهند.

این بررسی بر ویژگی‌های مکانیکی و مکانیزم‌های تخریب میله‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) تحت شرایط محیطی و بارگذاری شدید متمرکز است. مطالعه به تخریب میله‌های FRP در آب، آب دریا و محلول‌قلیایی، همچنین تأثیرات چرخه‌های تر-خشک و یخ‌زدگی-ذوب بر تخریب آن‌ها پرداخته است [۲۰]. مقاله خلاصه‌ای از روش‌ها برای بهبود مقاومت FRP کامپوزیت‌ها در برابر آب دریا ارائه داده و طرح‌های تحقیقاتی برای تسریع پیری و مدل‌های پیش‌بینی عمر را بررسی می‌کند. همچنین پیشنهاداتی برای بهبود دقت پیش‌بینی عمر برای کامپوزیت‌های FRP در معرض آب دریا ارائه می‌دهد. [67]

مطالعه به تخریب میله‌های FRP با استفاده از الیاف بازالت (BFRP) در محیط‌قلیایی پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که میله‌های BFRP در مرحله ابتدایی نرخ تخریب مشابهی با میله‌های GFRP دارند، اما در طول زمان استحکام کششی و حفظ استحکام بالاتری را حفظ می‌کنند [۸۸]. این مطالعه همچنین به بررسی شکست مشابه فرایند تخریب در عایق‌های کامپوزیتی از جنس سیلیکون پرداخته و خصوصیات فیزیکوشیمیایی میله‌های FRP استخراج شده از عایق‌های دارای شکست مشابه تخریب و نمونه‌های پیر شده مصنوعی را مقایسه می‌کند. یافته‌ها به درک مکانیزم تخریب و پیش‌بینی عمر عایق‌های کامپوزیتی با ولتاژ بالا کمک می‌کند. [91]

تحقیقات همچنین به مکانیزم شکست مشابه تخریب در عایق‌های کامپوزیتی سیلیکون پرداخته است. این مطالعه نشان می‌دهد که وجود تخلیه و جریان منجر به فرسایش، نرم شدن، ذوب شدن و تبخیر ماتریکس رزین اپوکسی می‌شود. علاوه بر این، فرآیندهای تبادل یونی و هیدرولیز بین الیاف شیشه تحت تأثیر هم‌زمان تنش مکانیکی و رطوبت رخ می‌دهد. [56]

بررسی به عملکرد استحکام و پیری کامپوزیت‌های پلیمر هیبریدی تحت شرایط مختلف محیطی اشاره دارد. این مطالعه به بهبود چشمگیر دوام حاصل از ترکیب کامپوزیت‌های طبیعی/سنتتیک و افزودن نانو پرکننده‌ها پرداخته است [۶۱]. مطالعه به دوام FRP کامپوزیت‌ها در ساختارهای هوافضا تحت شرایط هیگروترمال پرداخته است. تحقیقات نشان می‌دهند که غوطه‌وری طولانی مدت در آب باعث تخریب و

تغییرات ساختاری قابل توجهی می‌شود، به طوری که کامپوزیت‌های (شیشه-اپوکسی) G-E حساسیت بیشتری به پیری نسبت به کامپوزیت‌های (کربن-اپوکسی) C-E و کامپوزیت‌های هیبریدی دارند. [31]

این بررسی به محدود بودن تحقیقات در مورد ویژگی‌های دینامیکی کامپوزیت‌های FRP بعد از قرارگیری طولانی مدت در معرض رطوبت اشاره دارد. مطالعه با جمع‌بندی پیشرفت‌های کنونی در مطالعات جذب رطوبت و تأثیرات آن بر ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف، خواسته‌های تحقیقاتی را شناسایی می‌کند [47]. مطالعه به تخریب ویژگی‌های مکانیکی میله‌های FRP هیبریدی بازالت/کربن در محیط خورنده آب دریا پرداخته است. تخریب به فرایندهای خوردگی و واکنش سیلیکای قلیایی نسبت داده شده است، در حالی که الیاف کربنی دوام بهتری نشان داده‌اند به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برتر و مقاومت در برابر خوردگی. [33]

این مقاله تأثیر فرآیند پیری طبیعی بر استحکام برشی مفصل‌های تک‌پوش کامپوزیت‌های FRP را بررسی می‌کند. درجه تخریب چسب از طریق ویژگی‌های حرارتی اندازه‌گیری شده با تحلیل وزنی حرارتی و تحلیل دینامیکی ترموالکتریکی ارزیابی می‌شود. آزمایشات کششی روی مفصل‌های تک‌پوش برای ارزیابی عملکرد آن‌ها در دمای اتاق انجام می‌شود. [40]

#### ۴- میکروتَرَک‌ها، جداسازی، خزش و خستگی

ترک خوردگی میکرو به تشکیل ترک‌های کوچک یا شکاف‌ها درون یک ماده اشاره دارد. این امر می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند تمرکز تنش‌ها، انبساط حرارتی یا بارگذاری دوره‌ای باشد. ترک‌های میکرو می‌توانند به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و یکپارچگی سازه‌ای ماده تأثیر بگذارند و منجر به کاهش استحکام، سختی و دوام آن شوند.

از دست دادن پیوند<sup>۱</sup> به جدایی یا از دست دادن چسبندگی بین لایه‌ها یا سطوح مختلف درون یک ماده یا بین دو ماده در یک اتصال چسبیده اشاره دارد. این امر می‌تواند به دلیل عواملی مانند چسبندگی ناکافی، تنش‌های حرارتی یا بارگذاری مکانیکی رخ دهد. از دست دادن پیوند انتقال بار بین لایه‌ها یا مواد را تضعیف کرده و باعث کاهش استحکام و عملکرد کلی سازه می‌شود.

خزش<sup>۲</sup> تغییر شکل وابسته به زمان است که در یک ماده تحت بار یا تنش ثابت رخ می‌دهد. این امر به ویژه در دماهای بالا یا سطوح تنش بالا اهمیت دارد. تغییر شکل خزش می‌تواند ناشی از مکانیسم‌های مختلفی مانند نفوذ، حرکت جابجایی یا استراحت زنجیره‌های پلیمری باشد. خزش می‌تواند باعث تغییرات ابعادی، تغییر شکل پلاستیکی و بی‌ثباتی سازه‌ای شود که منجر به شکست ماده یا سازه در طول زمان می‌گردد.

خستگی<sup>۳</sup> آسیب ساختاری تدریجی و موضعی است که زمانی رخ می‌دهد که یک ماده تحت بارگذاری دوره‌ای قرار می‌گیرد. این پدیده معمولاً از ترک‌های میکرو آغاز می‌شود و با هر چرخه بارگذاری گسترش می‌یابد تا زمانی که ترک‌ها به اندازه بحرانی برسند و ماده دچار شکست شود. شکست خستگی یک پدیده رایج در مواد و سازه‌ها است که تحت بارگذاری یا ارتعاشات تکراری قرار دارند و می‌تواند در سطوح تنشی بسیار پایین‌تر از استحکام استاتیک ماده رخ دهد.

در مرور ادبیات، نویسندگان رفتارهای کششی، خزش، خستگی و ترمو-مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کوتاه را در دماهای بالا بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین تأثیر عوامل محیطی مانند رطوبت و پیری را در نظر گرفته‌اند [۱۶]. نویسندگان یک پلتفرم محاسباتی برای پیش‌بینی پلاستیسیته دوره‌ای انیزوتروپیک، خزش و خستگی در پلیمرهای بدون پرکننده توسعه داده‌اند. عملکرد این پلتفرم از طریق مطالعات عددی و مقایسه با داده‌های آزمایشی تأیید شده است و به عنوان ابزاری مفید برای مهندسان در ارزیابی پیش‌بینی طول عمر و بهبود عملکرد ساختارهای پلیمر و کامپوزیت‌های پلیمری (PMC) عمل می‌کند [۷۹]. محققان خزش و مکانیسم آسیب چدن گرافیتی

<sup>1</sup> Debonding

<sup>2</sup> Creep

<sup>3</sup> Fatigue

فشرده با مقادیر مختلف از محتویات پرلیت را در دماهای بالا بررسی کرده‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تغییرات قابل توجهی در خزش در دماهای بالای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و انواع مختلفی از استرس‌ها و دماها رفتار ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. [98]

در مطالعه‌های دیگر، اثر فازهای رسوبی بر خواص مکانیکی و مکانیسم‌های شکست آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شده است. آن‌ها تغییر در نوع شکست از شکست بین‌دانه‌ای و شکست ترانس‌گرنولار به شکست شبه‌انشقاق را مشاهده کردند، که به تغییر مورفولوژی فاز رسوبی  $\delta$  مرتبط است [۱۰۲]. نویسندگان یک مرور جامع در مورد شروع ترک‌ها و ترک‌های میکرو، گسترش، شناسایی و مشاهده آن‌ها در ساختارهای پلیمری ارائه داده‌اند. آن‌ها همچنین تکنیک‌های ترمیم خود-ترمیمی بیومیمتیک برای ترمیم ترک‌ها و ترک‌های میکرو و روش‌های محافظت سطحی فعال را مورد بحث قرار داده‌اند [۸]. محققان تمرکز خود را بر روی دوام و رفتار تخریب کامپوزیت‌های زیست‌پایه زیر شرایط مختلف پیری گذاشته‌اند. مرور آن‌ها شامل موضوعاتی مانند پیری ترمو-اکسیداتیو، فرسایش تسریع‌شده، تخریب هیدرولیتیک، خستگی و خزش است و یک نمای کلی از عملکرد بلندمدت این مواد تجاری مهم را فراهم می‌کند [۱۲]. نویسندگان خستگی بین لایه‌های کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه را با استفاده از روش تیر I بررسی کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که نمونه‌های خشک به دلیل اثرات غالب خزش دچار شکست می‌شوند، که منجر به ترک‌های بین‌لایه‌ای می‌شود، در حالی که نمونه‌های شرایطی تحت تأثیر اثرات رشد آسیب قرار می‌گیرند که منجر به شکست درون‌لایه‌ای می‌شود. از دست دادن پیوند الیاف/ماتریس به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای بارگذاری مکانیکی در نمونه‌های شرایطی شناسایی شد. [25]

## ۵- فرآیندهای تخریب

دوام مواد پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) می‌تواند تحت تأثیر فرآیندهای مختلف تخریب قرار گیرد. یکی از فرآیندهای کلیدی تخریب، قرارگیری در معرض رطوبت است که می‌تواند منجر به تخریب خواص FRP و استحکام پیوند بین FRP و سایر مواد شود. رطوبت می‌تواند باعث کاهش استحکام پیوند شود، به‌ویژه زمانی که ماده زیرلایه به آسیب‌های رطوبتی حساس باشد. علاوه بر این، قرارگیری در معرض تابش UV می‌تواند مواد چسباننده رزین مورد استفاده در سازه‌های FRP را تخریب کرده و منجر به کاهش استحکام کششی نهایی و مدول ورق‌های FRP شود.

نویسندگان تحقیقی در مورد خواص مکانیکی و دوام لایه‌های کامپوزیت FRP هیبریدی از الیاف کتان/شیشه انجام داده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزودن الیاف شیشه به طور مؤثری جذب آب کامپوزیت‌های الیاف کتان را بهبود می‌بخشد. هیبرید کردن الیاف کتان با الیاف شیشه رویکردی عملی برای تقویت لایه‌های FRP به‌ویژه در شرایط محیطی هیگروترمال است. [59]

در یک گزارش مرور، آسیب‌های محیطی و تخریب کامپوزیت‌های FRP به‌طور گسترده مورد بحث قرار گرفت. در حالی که کامپوزیت‌های FRP خواص مکانیکی برتری نسبت به معادل‌های فلزی خود دارند، آن‌ها در برابر آسیب‌ها و تخریب‌های محیطی حساس هستند که چالش‌هایی برای عملکرد بلندمدت آن‌ها به وجود می‌آورد [۷۲]. پژوهشگران تحقیقی درباره استفاده از الیاف سلولزی و کامپوزیت‌های آن‌ها در سیمان، ژئوپلیمر و پلیمرها در مهندسی عمران انجام دادند. آن‌ها به محبوبیت فزاینده الیاف سلولزی منوفیلانمنت به‌عنوان جایگزینی برای تقویت‌کننده‌های فولادی در بتن اشاره کردند. علاوه بر این، استفاده از پارچه‌های الیاف سلولزی و کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با آن‌ها به دلیل هزینه‌اثربخشی و خواص مکانیکی خاص مطلوب، در حال افزایش است. [95]

نویسندگان پیشرفت‌های حیاتی و فرصت‌های آینده در بازیافت پلیمرهای تجاری را مورد بحث قرار داده‌اند. آن‌ها بر پتانسیل بازیافت شیمیایی برای تبدیل زباله‌های پلاستیکی به مونومرها جهت پلیمرسازی مجدد، بدون آسیب به خواص مواد یا ارزش اقتصادی پلیمر تأکید کردند. بازیافت شیمیایی به‌عنوان رویکردی امیدوارکننده برای زباله‌های پلاستیکی که برای بازیافت مکانیکی یا شیمیایی قابل استفاده نیستند، در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. سواروپ غارده و بالاسوبراپانیان کانداسوبرامانیان مروری بر روش‌های مختلف بازیافت پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف (FRP) ارائه دادند. مرور آن‌ها شامل رویکردهای بازیافت مکانیکی، حرارتی (بستر سیال و پیرولیز) و شیمیایی (دماهای پایین و دماهای فوق بحرانی) بود. کارایی این روش‌ها در تخریب انواع مختلف مواد FRP مانند شیشه، کربن و الیاف طبیعی مورد بحث قرار گرفت. [26]

پژوهشگران خواص کینتیک درمان و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی زیست‌پایه شامل رزین‌های اپوکسی مبتنی بر لیگنین را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استحکام کششی و خمشی کامپوزیت‌های FRP تهیه‌شده با رزین‌های اپوکسی زیست‌پایه قابل مقایسه یا حتی برتر از کامپوزیت‌های FRP با رزین اپوکسی مبتنی بر BPA خالص است، به‌ویژه زمانی که نسبت ترکیب رزین اپوکسی مبتنی بر لیگنین کمتر از ۵۰-۷۵ درصد وزنی باشد. علاوه بر این، استحکام چسبندگی فیلم‌های اپوکسی زیست‌پایه روی زیرلایه فلزی زمانی که با رزین اپوکسی DOL تا ۵۰ درصد وزنی ترکیب شده بودند، بالاتر از حد انتظار بود. [21]

نویسندگان تأثیر مختلف هم‌زیست‌کننده‌ها روی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف سبز تزریقی مبتنی بر سیستم پلی (اسید لاکتیک)-مینا لید روغن دانه کتان و پشم گوسفند را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که اصلاح الیاف منجر به بهبود خواص مکانیکی و تغییرات اندکی در خواص حرارتی FRP ها شد. استفاده از عوامل اتصال در مواد PLA-MLO و پشم گوسفند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشید و پتانسیل کاربرد آن‌ها را گسترش داد، در حالی که طبیعت زیست‌پایه ماده حفظ شد. [70]

نویسندگان ویژگی‌های تخریب رزین‌های زیستی مبتنی بر FRP برای بازسازی خارجی سازه‌ها را بررسی کردند. آن‌ها خواص مکانیکی و فیزیکوشیمیایی و همچنین تخریب محیطی کامپوزیت‌های شیشه‌ای تقویت‌شده با رزین‌های فوران زیست‌پایه (بیو-منبع) را با معادل‌های رزین‌های فوران مبتنی بر ترموست (پترو-منبع) مقایسه کردند. هدف مطالعه ارزیابی مناسب بودن کامپوزیت‌های شیشه‌ای تقویت‌شده با رزین‌های بیو-منبع برای کاربردهای بازسازی سازه‌ای بود. [22]

محققان مطالعه‌ای بر روی سنتز و تجزیه و تحلیل پلیمرهای الهام گرفته از طبیعت انجام دادند. آن‌ها یک پلیمر زیستی با استفاده از مونومر طبیعی توسعه دادند و آن را تحت آزمایشات مکانیکی قرار دادند تا خواص آن را ارزیابی کنند. برای ایجاد محصول نهایی، از یک الیاف طبیعی با استفاده از مواد اتصال‌دهنده مانند رزین‌ها استفاده شد که منجر به یک کامپوزیت پلیمر زیستی گردید. [45]

## ۶- خواص مواد، خواص الیاف و تأثیر آن‌ها بر دوام FRP

دوام مواد پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، از جمله خواص مواد و خواص الیاف. خواص مواد مانند نوع ماتریس رزین، نوع الیاف و میزان رزین می‌توانند بر عملکرد کلی و دوام FRP تأثیر بگذارند. انتخاب ماتریس رزین بسیار مهم است زیرا مقاومت شیمیایی، جذب رطوبت و ثبات حرارتی FRP را تعیین می‌کند. انواع مختلف الیاف مانند کربن، شیشه یا آرامید دارای خواص مکانیکی و رفتارهای خاص تحت شرایط محیطی مختلف هستند که می‌توانند بر دوام FRP تأثیر بگذارند. محققان به بررسی دوام اتصالات FRP به بتن و خواص ترکیبی آن‌ها تحت شرایط رطوبت پرداخته‌اند. مطالعه نشان داد که در اثر غوطه‌وری مداوم، هم خواص مواد و هم خواص اتصال دچار تخریب شدند. استحکام اتصال به‌طور قابل توجهی برای زیرلایه‌های بتن با مقاومت بالا و مقاومت معمولی کاهش یافت که نقش زیرلایه در دوام اتصال را برجسته می‌کند. [80] محققان تأثیر شرایط هیگروترمال بر عملکرد کامپوزیت‌های FRP برای سازه‌های هوافضا را بررسی کردند. مطالعه شامل شرایط‌دهی کامپوزیت‌ها در دماها و زمان‌های مختلف در آب مقطر بود. هدف ارزیابی تأثیر پیری بر عملکرد کامپوزیت‌ها بود. [31] نویسندگان تأثیر خواص مکانیکی و حرارتی میله‌های FRP بر عملکرد کششی آن‌ها تحت دماهای بالا را بررسی کردند. مطالعه نشان داد که عواملی همچون قطر میله، نوع الیاف، نوع رزین و خواص حرارتی میله‌های FRP در نتایج تأثیرگذار هستند، در حالی که نسبت الیاف به ماتریس تأثیر کمتری داشت. [7] محققان دیگر یک مرور انتقادی در مورد دوام اتصالات میله‌های FRP به بتن انجام دادند. این مطالعه به تحلیل تحقیقات مختلفی که از تنظیمات آزمایش کشش میله‌های FRP استفاده کرده‌اند پرداخته و رژیم‌های مختلف قرارگیری در معرض و خواص هندسی و مکانیکی متفاوت را در نظر گرفته است. هدف این مطالعه ارائه یک درک جامع از دوام این اتصالات بود. [30] محققان یک مرور انتقادی بر خواص مکانیکی و دوام سازه‌های بتن مسلح با FRP و سنگدانه‌های مرجانی (CAC) ارائه دادند. این مرور شامل موضوعاتی مانند خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های مرجانی، عملکرد نفوذ یون کلرید در CAC، عملکرد اتصال و دوام میله‌های FRP در CAC، و رفتار مکانیکی و دوام سازه‌های بتن مسلح با FRP بود. [99] نویسندگان مدلی برای بررسی تأثیر خواص سطحی بر استحکام کششی وابسته به دما در کامپوزیت‌های FRP توسعه دادند. این مدل دما، خواص ترکیبی، خواص سطحی و تنش حرارتی باقیمانده را در نظر گرفت و تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت. [55] محققان دیگر تأثیر اندازه میله‌ها را بر دوام بلندمدت

میله‌های کامپوزیتی basalt-FRP پوشش داده شده با شن بررسی کردند. نتایج نشان داد که خواص فیزیکی و مکانیکی میله‌ها تحت تأثیر اندازه مقطع عرضی قرار دارد، به طوری که میله‌های با قطر بزرگ‌تر استحکام برشی بین لایه‌ای و برشی عرضی کمتری دارند، همچنین استحکام خمشی آن‌ها نسبت به میله‌های با قطر کوچک‌تر کمتر است. [4] محققان اهمیت در نظر گرفتن همبستگی آماری بین خواص مکانیکی لایه‌ها برای ارزیابی احتمال دقیق شکست ساختارهای کامپوزیتی پلاستیکی تقویت شده با الیاف را تأکید کردند. مطالعه نشان داد که همبستگی آماری بین سفتی لایه‌ها تأثیر زیادی بر قابلیت اطمینان لمینیت دارد، در حالی که تأثیر همبستگی آماری بین استحکام لایه‌ها ناچیز بود. [101] نویسندگان تخریب خواص پایه در سازه‌های RC تقویت شده با FRP تحت تابش UV را بررسی کردند. مطالعه نشان داد که استحکام کششی نهایی و مدول میله‌های FRP با افزایش زمان قرارگیری در معرض UV کاهش می‌یابد. تخریب مواد چسب رزینی به عنوان عامل اصلی تأثیرگذار بر عملکرد سازه‌های RC تقویت شده با FRP شناسایی شد، در حالی که افزایش تعداد لایه‌های FRP نتوانست اثر تابش UV را کاهش دهد. [103]

## ۷- آزمایش مکانیکی برای ارزیابی عملکرد بلندمدت FRP

در این مطالعه، عملکرد دوام میله‌های کامپوزیت پلیمر تقویت شده با الیاف بازالت (BFRP) پوشش داده شده با شن بررسی شد. میله‌های BFRP غیرمشروط بهترین خواص فیزیکی را نشان دادند، در حالی که عملکرد دوام بلندمدت کاهش ۱۲٪ در استحکام برشی عرضی، ۱۹٪ در استحکام خمشی و ۲۱٪ در حفظ استحکام برشی بین لایه‌ای نشان دادند. [3] نویسندگان تأثیر رطوبت را بر عملکرد بلندمدت اتصالات FRP/ فولاد چسبی در پل‌ها بررسی کردند. تجزیه و تحلیل‌های المان محدود آن‌ها نشان داد که نفوذپذیری چسب پوشش دهنده تأثیر قابل توجهی بر نفوذ رطوبت به داخل اتصالات دارد. علاوه بر این، مقادیر کمی از رطوبت در سطح تماس فولاد/چسب در مدت زمان بحرانی باعث افزایش استحکام اتصال شد. [38] نویسندگان وضعیت کاربرد کامپوزیت‌های FRP در پل‌های جاده‌ای را بررسی کردند. آزمایشات مختلفی برای ارزیابی عملکرد اعضای سازه‌ای استفاده شده با کامپوزیت‌های FRP انجام شد. با این حال، تحقیقات بیشتری لازم است تا داده‌های فنی تولید شود و کاربران نهایی را درباره دوام بلندمدت FRP در وضعیت موجود قانع کند. [46] محققان یک مرور جامع در مورد خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FRP پل کشیده شده تحت تأثیر اثرات محیطی بلندمدت ارائه دادند. کامپوزیت‌های FRP پل کشیده شده به دلیل خواص ضد خوردگی و وزن سبک مورد توجه قرار گرفته‌اند. نویسندگان بر نیاز به مطالعه عملکرد بلندمدت این کامپوزیت‌ها تأکید کردند. [57] نویسندگان یک مرور در مورد خواص مکانیکی بلندمدت سیستم‌های میله FRP و لنگرهای آن انجام دادند. آن‌ها مدل‌های عددی برای پیش‌بینی رفتارهای وابسته به زمان این سیستم‌ها ارائه دادند و چالش‌های عملکرد بلندمدت و کاربرد آن‌ها در پل‌های پشتیبانی شده توسط کابل را مورد بحث قرار دادند. [104] نویسندگان خواص مکانیکی و مدل پیش‌بینی استحکام بلندمدت میله‌های FRP بازالت (BFRP) را ارزیابی کردند. برنامه آزمایشی نشان داد که میله‌های BFRP استحکام تقریباً ۱۳۰۰ مگاپاسکال را تضمین کرده و ۷۲٪ و ۸۰٪ استحکام خود را پس از ۱۰۰ سال قرارگیری در معرض محیط‌های بتن و ملات حفظ می‌کنند. [76] نویسندگان خواص فیزیکی و مکانیکی میله‌های جدید FRP بازالت برای تقویت سازه‌های بتنی را بررسی کردند. مطالعه نشان داد که میله‌های BFRP رفتار مکانیکی خوبی مشابه میله‌های FRP شیشه‌ای درجه II و III داشتند. استحکام کششی میله‌های BFRP از نیازهای مشخص شده توسط CAN/CSA S807-10 برای میله‌های FRP کربنی بیشتر بود. [17] محققان دیگر عملکرد و تخریب تقویت‌کننده‌های GFRP در بتن را بررسی کردند. آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پرتوی ایکس انرژی متفرق (EDS) برای نظارت بر تغییرات ریزساختاری و ترکیب شیمیایی استفاده کردند. مطالعه همچنین استحکام برشی بین لایه‌های GFRP، دمای انتقال شیشه (Tg) و محتوای الیاف را برای مقایسه با نمونه‌های کنترل ارزیابی کرد. [29] محققان تأثیر اندازه میله‌ها را بر دوام بلندمدت میله‌های کامپوزیت BFRP پوشش دهی شده با شن بررسی کردند. مطالعه نشان داد که خواص فیزیکی و مکانیکی میله‌های BFRP تحت تأثیر اندازه مقطع عرضی قرار دارد. میله‌های با قطر بزرگ‌تر استحکام برشی بین لایه‌ای و برشی عرضی کمتری دارند، همچنین استحکام خمشی آن‌ها نسبت به میله‌های با قطر کوچک‌تر کمتر است. [17] نویسندگان بر عملکرد بلندمدت و جنبه ایمنی آتش کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های ساختمانی تمرکز کردند. تحقیقات آن‌ها موضوعاتی مانند تخریب سیستم‌های چسبیده FRP، ارزیابی یکپارچگی بین لایه‌ها، سیستم‌های تقویت شده با FRP با دوام عالی، و رفتار آتش سیستم‌های FRP را شامل می‌شد. [49]

## ۸- استراتژی‌های تقویت: حفاظت سطحی و پوشش‌ها

استفاده از کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) در صنایع مختلف به دلیل خواص مکانیکی برجسته و مقاومت به خوردگی آن‌ها توجه زیادی را جلب کرده است. با این حال، مواد FRP همچنان ممکن است در طول زمان به خصوص زمانی که در معرض شرایط محیطی سخت قرار گیرند، در معرض تخریب باشند. برای تقویت دوام و طول عمر سازه‌های FRP، حفاظت سطحی و پوشش‌ها به عنوان استراتژی‌های مؤثر به طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. این روش‌ها شامل اعمال لایه‌های حفاظتی یا پوشش‌ها بر روی سطح اجزای FRP است که یک مانع اضافی در برابر رطوبت، تابش UV، قرارگیری در معرض مواد شیمیایی و سایش مکانیکی فراهم می‌آورد. این مقدمه مختصر اهمیت حفاظت سطحی و پوشش‌ها را در بهبود عملکرد و افزایش عمر سرویس سازه‌های FRP برجسته می‌کند.

چهار مکانیزم تقویتی و اثرات هم‌افزایی، یعنی قابلیت مرطوب شدن، قفل مکانیکی، پیوند شیمیایی و لایه انتقال، به تفصیل تجزیه و تحلیل شده‌اند. این مطالعات بر پیشرفت‌های انجام‌شده در درک افزودن نانولوله‌های کربنی (CNTs) و گرافن به کامپوزیت‌های FRP و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی تأکید دارند [۳۷]. برای تسریع در تجاری‌سازی موفق کامپوزیت‌های FRP تقویت‌شده با گرافن (gFRP) برای کاربردهای ساختاری هوشمند، این مطالعه بر اهمیت توسعه استانداردهای واضح برای ارزیابی خواص مواد گرافن، بهبود مواد موجود و پیاده‌سازی فناوری‌های ساخت مقیاس‌پذیر تأکید می‌کند. میرعابدینی در یک تحقیق [۶۳] مطالعه تحقیقات بیشتر در مورد عملکرد دوام CAC و ارزیابی FRP-تقویت‌شده CAC را پیشنهاد می‌دهد. نتایج به عنوان مبنای تحقیقاتی برای تحقیقات آینده در زمینه CAC عمل کرده و کاربرد آن را در پروژه‌های مهندسی اقیانوسی ترویج می‌کند [۱۰۹]. با استفاده از یک فرایند اکسیداسیون فازی مایع به همراه اتصال<sup>۴</sup> یک عامل جفت‌کننده سیلان، روش اصلاحی به طور مؤثری پیوند سطحی را تقویت کرده و عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های CF/PPS را بهبود می‌بخشد. این تحقیق پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی نشان می‌دهد. [39]

سطح رابط بین پوشش و زیرلایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) تجزیه و تحلیل شده و نتایج ماکروسکوپی به دست آمده تأیید شد. شبیه‌سازی‌های عددی به طور دقیق استحکام جداشدگی را با استفاده از پلاستیسیته آسیب بتن ساده‌شده پیش‌بینی کردند و پتانسیل پوشش اصلاح‌شده را برای کاربردهای عملی به نمایش گذاشتند [۷۳]. افزودن SCA منجر به افزایش استحکام پیوند جداشدگی، استحکام مکانیکی و میکرو سختی شد که به دلیل ساختار میکروسکوپی بهینه‌شده تحت غلظت مناسب SCA بود. این نتایج به بهبود پیوند بین ورق‌های FRP و زیرلایه بتن کمک می‌کند [۸۴]. نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی به میزان تقریبی ۲۰۰٪ در استحکام چسبندگی برای نمونه‌های ساختاری لیزری نسبت به نمونه‌های مرجع با شن‌پاشیده شده بود که در آزمون‌های جداشدگی مشاهده شد [۳۴]. مدل پیشنهادی تطابق بهتری با داده‌های تجربی نسبت به مدل‌های موجود نشان داد. علاوه بر این، مطالعه یک عبارت ساده بر اساس مشاهدات تجربی ارائه می‌دهد که به طور دقیق ظرفیت بارگذاری ستون‌های بتن ساده و تقویت‌شده با نوارهای FRP را پیش‌بینی می‌کند. [96]

این مطالعه واکنش فرورفتگی شبه‌استاتیکی پنل‌های سقف FRP بازالت (GFRP) چندسلولی پُل کشیده‌شده برای پل‌های عابر پیاده را بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهند که حالت‌های شکست نفوذی که توسط بارهای استاندارد کفش پاشنه بلند ایجاد می‌شوند، احتمالاً در رویه پل‌ها رخ نمی‌دهند، حتی بدون محافظت سطحی. با این حال، عابران سنگین‌تر که کفش‌های پاشنه بلند "استیلتو" می‌پوشند، ممکن است آسیب اولیه و سوراخ‌شدگی به رویه وارد کنند [۸۳]. مقاله، آماده‌سازی، شناسایی، خواص و کاربردهای پوشش‌های پلی‌اوریا را مورد بحث قرار می‌دهد و بر لزوم تنظیم دامنه‌های سخت و نرم پلیمر برای کاربردهای خاص تأکید می‌کند. این مقاله اهمیت انتخاب مواد مناسب را برجسته کرده و بینش‌هایی را برای توسعه پوشش‌های پلی‌اوریا برای کاهش اثرات انفجار و محافظت بالستیک ارائه می‌دهد. [41]

<sup>4</sup> grafting

## ۴- نتیجه گیری

خلاصه‌ای از مطالعات و مقالات تحقیقاتی مرور شده در این مقاله مروری، اطلاعات خوبی را در مورد جنبه‌های مختلف سیستم‌های پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) ارائه می‌دهد که بر دوام و عملکرد آن‌ها متمرکز است. این مطالعات نشان می‌دهند که عوامل محیطی مختلف مانند رطوبت و دما بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های FRP تأثیر می‌گذارند. یافته‌ها نیاز به آزمایش‌ها و تحلیل‌های گسترده برای ارزیابی دقیق عملکرد کامپوزیت‌های FRP در بلندمدت را نشان می‌دهند. نتایج زیر به عنوان جمع‌بندی ارائه شده‌اند:

۱. دوام کامپوزیت‌های FRP تحت تأثیر عواملی مانند جذب رطوبت، واکنش‌های شیمیایی و تغییرات میکروساختاری قرار دارد که باعث از دست دادن استحکام مکانیکی آن‌ها در طول زمان می‌شود.

۲. رطوبت و رطوبت نسبی تأثیر قابل توجهی بر خواص کامپوزیت‌های FRP دارند، که منجر به کاهش استحکام، مدول و مقاومت برشی لایه‌ها می‌شود.

۳. در اتصالات FRP/فلز، حضور رطوبت در پیوند فلز/چسب می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال شود، اما ممکن است در درازمدت باعث کاهش استحکام شود. مدلی برای پیش‌بینی استحکام بلندمدت توسعه داده شد تا حفظ خواص مکانیکی کامپوزیت‌های FRP را در طول زمان پیش‌بینی کند.

۴. مقاومت در برابر آتش و یکپارچگی تقویت‌های FRP نیاز به تحقیقات بیشتر و راهنمایی‌های استاندارد و دستورالعمل‌ها دارد.

## مراجع

- [1] Achilli, E., et al. (2016). Enhanced gold nanoparticle-tumor cell recognition by albumin multilayer coating. *OpenNan*.
- [2] Adkins, L. (2022). Fiber-reinforced polymer (FRP) resin and corrosion barrier selection—the testing behind the recommendation. In: *Proceedings of the AMPP annual conference+ expo. OnePetro*.
- [3] Ali, A. H., et al. (2019). Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt FRP bars. *Compos. Part B Eng.*, 157, 248–258.
- [4] Ali, A. H., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2020). Bar size effect on long-term durability of sand-coated basalt-FRP composite bars. *Compos. Part B Eng.*, 195, 108059.
- [5] Al-Saadi, A. U., Aravinthan, T., & Lokuge, W. (2018). Structural applications of fibre reinforced polymer (FRP) composite tubes: a review of columns members. *Compos. Struct.*, 204, 513–524.
- [6] Aniskevich, A., & Glaskova-Kuzmina, T. (2019). Effect of moisture on elastic and viscoelastic properties of fiber reinforced plastics: retrospective and current trends. *Creep and fatigue in polymer matrix composites*. Elsevier, 83–120.
- [7] Ashrafi, H., et al. (2017). The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.*, 157, 1001–1010.
- [8] Awaja, F., et al. (2016). Cracks, microcracks, and fracture in polymer structures: formation, detection, autonomic repair. *Prog. Mater. Sci.*, 83, 536–573.
- [9] Bazli, M., et al. (2020). Durability of seawater and sea sand concrete filled filament wound FRP tubes under seawater environments. *Compos. Part B Eng.*, 2020, 202, 108409.
- [10] Bazli, M., Heitzmann, M., & Hernandez, B. V. (2021). Hybrid fibre reinforced polymer and seawater sea sand concrete structures: a systematic review on short-term and long-term structural performance. *Constr. Build. Mater.*, 301, 124335.
- [11] Blackburn, B. P., et al. (2015). Effects of hygrothermal conditioning on epoxy adhesives used in FRP composites. *Constr. Build. Mater.*, 96, 679–689.
- [12] Chang, B. P., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2020). Studies on durability of sustainable biobased composites: a review. *RSC Adv.*, 10(31), 17955–17999.
- [13] Correia, J. R. (2015). Fibre-reinforced polymer (FRP) composites. *Mater. Constr. Civ. Eng. Sci. Process Des.*, 501–556.
- [14] Cousin, P., et al. (2019). Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in FRP reinforcing bars. *J. Compos. Mater.*, 53(26–27), 3651–3670.
- [15] Duo, Y., et al. (2021). Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars. *J. Build Eng.*, 43, 102909.

- [16] Eftekhari, M., & Fatemi, A. (2015). Tensile, creep and fatigue behaviours of short fibre reinforced polymer composites at elevated temperatures: a literature survey. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 38(12), 1395–1418.
- [17] Elgabbas, F., Ahmed, E. A., & Benmokrane, B. (2015). Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Constr. Build. Mater.*, 95, 623–635.
- [18] Fan, Y., et al. (2019). Diffusion of water in glass fiber reinforced polymer composites at different temperatures. *J. Compos. Mater.*, 53(8), 1097–1110.
- [19] Fan, Y., et al. (2021). Comparative failure study of different bonded basalt fiber-reinforced polymer (BFRP)-AL joints in a humid and hot environment. *Polymers*, 13(16), 2593.
- [20] Feng, G., et al. (2022). A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions. *Cem. Concr. Compos.*, 104758.
- [21] Ferdosian, F., et al. (2016). Curing kinetics and mechanical properties of bio-based epoxy composites comprising lignin-based epoxy resins. *Eur. Polym. J.*, 82, 153–165.
- [22] Foruzanmehr, M., et al. (2016). Degradation characteristics of new bio-resin based-fiber-reinforced polymers for external rehabilitation of structures. *J. Compos. Mater.*, 50(9), 1227–1239.
- [23] Frigione, M., & Lettieri, M. (2018). Durability issues and challenges for material advancements in FRP employed in the construction industry. *Polymers*, 10(3), 247.
- [24] Frketic, J., Dickens, T., & Ramakrishnan, S. (2017). Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: an additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Addit. Manuf.*, 14, 69–86.
- [25] Gagani, A. I., Mialon, E. P., & Echtermeyer, A. T. (2019). Immersed interlaminar fatigue of glass fiber epoxy composites using the I-beam method. *Int. J. Fatigue*, 119, 302–310.
- [26] Gharde, S., & Kandasubramanian, B. (2019). Mechanochemical and chemical recycling methodologies for the Fibre Reinforced Plastic (FRP). *Environ. Technol. Innov.*, 14, 100311.
- [27] Glaskova-Kuzmina, T., et al. (2016). Effect of moisture on elastic and viscoelastic properties of epoxy and epoxy-based carbon fibre reinforced plastic filled with multiwall carbon nanotubes. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 90, 522–527.
- [28] Goda, E. S., et al. (2021). Smart flame retardant coating containing carboxymethyl chitosan nanoparticles decorated graphene for obtaining multifunctional textiles. *Cellulose*, 28, 5087–5105.
- [29] Gooranorimi, O. (2016). FRP reinforcement for concrete: performance assessment and new construction: volume I: Sierrita De La Cruz Creek bridge. RE-CAST Tier-1 University Transportation Center.
- [30] Gravina, R. J., et al. (2020). Environmental durability of FRP bar-to-concrete bond: critical review. *J. Compos. Constr.*, 24(4), 03120001.
- [31] Guermazi, N., et al. (2016). On the durability of FRP composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning. *Compos. Part B Eng.*, 85, 294–304.
- [32] Gunaselvi, S., Sudarsan, J. S., & Nithyanantham, S. (2022). Electroless nickel (EN) coating of mild steel bar as an innovative material enhancement strategies to resist corrosion in coastal structures. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 7(3), 226.
- [33] Guo, X., et al. (2022). Deterioration of mechanical properties of basalt/carbon hybrid FRP bars in SWSC under seawater corrosive environment. *Constr. Build. Mater.*, 317, 125979.
- [34] Gustke, K., et al. (2021). Enhancement of the adhesion of wire arc sprayed coatings on carbon fiber-reinforced plastic by surface laser structuring. *Coatings*, 11(4), 467.
- [35] Hadigheh, S. A., Gravina, R. J., & Smith, S. T. (2017). Effect of acid attack on FRP-to-concrete bonded interfaces. *Constr. Build. Mater.*, 152, 285–303.
- [36] Hadigheh, S. A., & Kashi, S. (2018). Effectiveness of vacuum consolidation in bonding fibre reinforced polymer (FRP) composites onto concrete surfaces. *Constr. Build. Mater.*, 187, 854–864.
- [37] Han, W., Zhou, J., & Shi, Q. (2022). Research progress on enhancement mechanism and mechanical properties of FRP composites reinforced with graphene and carbon nanotubes. *Alex. Eng. J.*
- [38] Heshmati, M., Haghani, R., & Al-Emrani, M. (2016). Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges. *Compos. Part B Eng.*, 92, 447–462.
- [39] Hu, J., et al. (2020). A two-step combination strategy for significantly enhancing the interfacial adhesion of CF/PPS composites: the liquid-phase oxidation followed by grafting of silane coupling agent. *Compos. Part B Eng.*, 191, 107966.
- [40] Hunter-Alarcon, R. A., et al. (2018). Effect of the natural aging process on the shear strength of FRP composite single lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 86, 4–12.
- [41] Iqbal, N., et al. (2016). Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation: a review. *RSC Adv.*, 6(111), 109706–109717.
- [42] Jehanno, C., et al. (2022). Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers. *Nature*, 603(7903), 803–814.
- [43] Jia, D., et al. (2020). Durability of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments. I: Experiments and analysis. *Compos. Struct.*, 234, 111687.

- [44] Jia, Z., et al. (2018). An experimental investigation of the temperature effect on the mechanics of carbon fiber reinforced polymer composites. *Compos. Sci. Technol.*, 154, 53–63.
- [45] Kalidas, V. K., et al. (2021). Study of synthesis and analysis of bio-inspired polymers-review. *Mater. Today Proc.*, 44, 3856–3860.
- [46] Kim, Y. J. (2019). State of the practice of FRP composites in highway bridges. *Eng. Struct.*, 179, 1–8.
- [47] Kini, M. V., & Pai, D. (2022). The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment-a review. *Mater. Today Proc.*, 52, 689–696.
- [48] Kodur, V. K. (2016). Strategies for enhancing fire performance of NSM FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Multi-Hazard Approaches Civ. Infrastruct. Eng.*, 253–264.
- [49] Lau, D., et al. (2016). Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Constr. Build. Mater.*, 126, 573–585.
- [50] Lee, S., et al. (2023). Aquavoltaic system for harvesting salt and electricity at the salt farm floor: field test year-round operation results and power generation improvement strategies. *Sol. Energy*, 258, 88–94.
- [51] Lee, W., Lee, J. U., & Byun, J. H. (2015). Catecholamine polymers as surface modifiers for enhancing interfacial strength of fiber-reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.*, 110, 53–61.
- [52] Li, C., et al. (2017). Effect of high temperature on the bond performance between basalt fibre reinforced polymer (BFRP) bars and concrete. *Constr. Build. Mater.*, 141, 44–51.
- [53] Li, F., et al. (2018). Sensing performance assessment of twisted CFRP with embedded fiber Bragg grating sensors subjected to monotonic and fatigue loading. *Sens. Actuators A Phys.*, 271, 153–161.
- [54] Li, J., et al. (2019). A critical review and assessment for FRP-concrete bond systems with epoxy resin exposed to chloride environments. *Compos. Struct.*, 229, 111372.
- [55] Li, Y., et al. (2019). Modeling the effects of interfacial properties on the temperature dependent tensile strength of fiber reinforced polymer composites. *Compos. Sci. Technol.*, 172, 74–80.
- [56] Liang, X., Bao, W., & Gao, Y. (2018). Decay-like fracture mechanism of silicone rubber composite insulator. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 25(1), 110–119.
- [57] Liu, T., Liu, X., & Feng, P. (2020). A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects. *Compos. Part B Eng.*, 191, 107958.
- [58] Liu, X., Liu, T., & Feng, P. (2022). Long-term performance prediction framework based on XGBoost decision tree for pultruded FRP composites exposed to water, humidity and alkaline solution. *Compos. Struct.*, 284, 115184.
- [59] Liu, Z., et al. (2022). Research on mechanical properties and durability of flax/glass fiber bio-hybrid FRP composites laminates. *Compos. Struct.*, 290, 115566.
- [60] Majerski, K., Surowska, B., & Bienias, J. (2018). The comparison of effects of hygrothermal conditioning on mechanical properties of fibre metal laminates and fibre reinforced polymers. *Compos. Part B Eng.*, 142, 108–116.
- [61] Mayandi, K., et al. (2020). An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites. *J. Mater. Res. Technol.*, 9(6), 15962–1588.
- [62] Mikami, C., Wu, H.-C., & Elarbi, A. (2015). Effect of hot temperature on pull-off strength of FRP bonded concrete. *Constr. Build. Mater.*, 91, 180–186.
- [63] Mirabedini, A., et al. (2020). Evolving strategies for producing multiscale graphene-enhanced fiber-reinforced polymer composites for smart structural applications. *Adv. Sci.*, 7(11), 1903501.
- [64] Mi'skiewicz, M., Łukasz, Pyrzowski, & Sobczyk, B. (2020). Short and long term measurements in assessment of FRP composite footbridge behavior. *Materials*, 13(3), 525.
- [65] Moges, F. D., et al. (2020). Mechanistic insights into diverse nano-based strategies for aquaculture enhancement: a holistic review. *Aquaculture*, 519, 734770.
- [66] Morampudi, P., et al. (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites. *Mater. Today Proc.*, 43, 314–319.
- [67] Nan, J., et al. (2023). Seawater aging effect on fiber-reinforced polymer composites: mechanical properties, aging mechanism, and life prediction. *Text. Res. J.*, 00405175231152666.
- [68] O'Ceallaigh, C., et al. (2018). Mechano-sorptive creep in reinforced glulam. In: *Proceedings of the WCTE 2018 world conference on timber engineering*, Seoul, Rep. of Korea, August 20–23, 2018. National University of Ireland Galway; 2018.
- [69] Ostrowski, K. A., et al. (2022). Consideration of critical parameters for improving the efficiency of concrete structures reinforced with FRP. *Materials*, 15(8), 2774.
- [70] Pawlak, F., et al. (2019). Effect of different compatibilizers on injection-molded green fiber-reinforced polymers based on poly (lactic acid)-maleinized linseed oil system and sheep wool. *Polymers*, 11(9), 1514.
- [71] Rajesh, P. S. M., Sirois, F., & Therriault, D. (2018). Damage response of composites coated with conducting materials subjected to emulated lightning strikes. *Mater. Des.*, 139, 45–55.
- [72] Ray, B. C., & Rathore, D. (2015). Environmental damage and degradation of FRP composites: a review report. *Polym. Compos.*, 36(3), 410–423.
- [73] Sadowski, Ł., et al. (2021). Enhanced adhesive performance of epoxy resin coating by a novel bonding agent. *Constr. Build. Mater.*, 301, 124078.

- [74] Salas, M., et al. (2018). Measuring material moisture in fiber reinforced polymers by integrated Sensors. *IEEE Sens. J.*, 18(9), 3836–3843.
- [75] Sandinge, A., et al. (2021). The necessity of accelerated ageing in fire performance assessments of composite materials. *Saf. Sci.*, 141, 105358.
- [76] Serbescu, A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2015). Mechanical characterization of basalt FRP rebars and long-term strength predictive model. *J. Compos. Constr.*, 19(2), 04014037.
- [77] Sethi, S., & Ray, B. C. (2015). Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 217, 43–67.
- [78] Shahabaz, S. M., et al. (2021). Influence of temperature on mechanical properties and machining of fibre reinforced polymer composites: a review. *Eng. Sci.*, 16, 26–46.
- [79] Shojaei, A. K., & Wedgewood, A. R. (2017). An anisotropic cyclic plasticity, creep and fatigue predictive tool for unfilled polymers. *Mech. Mater.*, 106, 20–34.
- [80] Shrestha, J., Ueda, T., & Zhang, D. (2015). Durability of FRP concrete bonds and its constituent properties under the influence of moisture conditions. *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(2), A4014009.
- [81] Siddika, A., et al. (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: a review. *J. Build. Eng.*, 25, 100798.
- [82] Sun, G., et al. (2021). On the effects of temperature on tensile behavior of carbon fiber reinforced epoxy laminates. *Thin-Walled Struct.*, 164, 107769.
- [83] Sutherland, S. L., et al. (2016). Quasi-static indentation response of pedestrian bridge multicellular pultruded GFRP deck panels. *Constr. Build. Mater.*, 118, 307–318.
- [84] Wang, F., et al. (2018). Improvement of the FRP sheet bonded to concrete substrate by silane coupling agent. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 33, 117–123.
- [85] Wang, J. N., et al. (2016). Durability and prediction models of fiber-reinforced polymer composites under various environmental conditions: a critical review. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 35(3), 179–211.
- [86] Wang, P., et al. (2023). Effects of relative humidity, alkaline concentration, and temperature on the degradation of plain/coated glass fibers: experimental investigation and empirical degradation model. *Constr. Build. Mater.*, 391, 131757.
- [87] Wang, P., et al. (2023). Hygrothermal aging effects on the diffusion-degradation process of GFRP composite: experimental study and numerical simulation. *Constr. Build. Mater.*, 379, 131075.
- [88] Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z., & Xie, Q. (2022). Deterioration of mechanical properties of basalt/carbon hybrid FRP bars in SWSC under seawater corrosive environment. *Constr. Build. Mater.*, 317, 125979.
- [89] Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z., & Zhang, G. (2015). Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *J. Compos. Mater.*, 49(7), 873–887.
- [90] Xu, B., Blok, R., & Teuffel, P. (2023). An investigation of the effect of relative humidity on viscoelastic properties of flax fiber reinforced polymer by fractional-order viscoelastic model. *Compos. Commun.*, 37, 101406.
- [91] Xu, H., et al. (2021). Reappearance of typical characteristics of FRP core rods in the decay-like fracture insulator. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 28(4), 1449–1456.
- [92] Xu, J., Mkaddem, A., & El Mansori, M. (2016). Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: a state-of-the-art review. *Compos. Struct.*, 135, 316–338.
- [93] Xu, Y., et al. (2019). Robust topology optimization for multiple fiber-reinforced plastic (FRP) composites under loading uncertainties. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 59, 695–711.
- [94] Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2015). Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. *Mater. Des.*, 71, 17–25.
- [95] Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibers, their fiber fabric reinforced cementitious, geo-polymer, and polymer composites in civil engineering. *Compos. Part B Eng.*, 92, 94–132.
- [96] Yang, J., Wang, Z., & Wang, J. (2022). Compressive performance of partially CFRP-confined square seawater-sea sand concrete columns with internal epoxy-coated reinforcement. *J. Compos. Constr.*, 26(2), 04021073.
- [97] Yarigarravesh, M., Toufigh, V., & Mofid, M. (2018). Environmental effects on the bond at the interface between FRP and wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 76, 163–174.
- [98] Yue, W., et al. (2023). Creep deformation and damage mechanism of compact graphite cast iron with different pearlite contents. *J. Mater. Res. Technol.*, 23, 5031–5039.
- [99] Zhang, B., et al. (2023). Mechanical properties and durability of FRP-reinforced coral aggregate concrete structures: a critical review. *Mater. Today Commun.*, 105656.
- [100] Zhang, H., et al. (2016). Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composite under varying strain rates and temperatures. *Polym. Test.*, 51, 29–39.
- [101] Zhang, S., Zhang, C., & Chen, X. (2015). Effect of statistical correlation between ply mechanical properties on reliability of fiber reinforced plastic composite structures. *J. Compos. Mater.*, 49(23), 2935–2945.

- [102] Zhang, Y., Lan, L., & Zhao, Y. (2023). Effect of precipitated phases on the mechanical properties and fracture mechanisms of Inconel 718 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 144598.
- [103] Zhao, J., et al. (2017). Deterioration of basic properties of the materials in FRP-strengthening RC structures under ultraviolet exposure. *Polymers*, 9(9), 402.
- [104] Zhao, J., Mei, K., & Wu, J. (2020). Long-term mechanical properties of FRP tendon–anchor systems—a review. *Constr. Build. Mater.*, 230, 117017.
- [105] Zhao, X., et al. (2019). Temperature effect on fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer composites. *Polym. Compos.*, 40(6), 2273–2283.
- [106] Zheng, B., & Dawood, M. (2017). Fatigue crack growth analysis of steel elements reinforced with shape memory alloy (SMA)/fiber reinforced polymer (FRP) composite patches. *Compos. Struct.*, 164, 158–169.
- [107] Zhou, A., et al. (2017). Investigation on interfacial defect criticality of FRP-bonded concrete beams. *Compos. Part B Eng.*, 113, 80–90.
- [108] Zhou, F., et al. (2019). Effect of temperature on material properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons: experiments and model assessment. *Materials*, 12(7), 1025.
- [109] Zhou, L., et al. (2021). Mechanical behavior and durability of coral aggregate concrete and bonding performance with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: a critical review. *J. Clean Prod.*, 289, 125652.
- [110] Zhu, Z.-Z., et al. (2016). Progress in durability study of FRP materials.