

## Fiber-Reinforced Polymer (FRP) in Concret, A Review Study

Gholamreza Havaei

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

### ABSTRACT

*This research focuses on how the scientific community has addressed various aspects of the design, testing, and field implementation of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) in concrete. FRP composites have become well-known after their application in civil engineering over the past three decades. This paper provides a comprehensive survey of the existing literature on FRP in concrete from various engineering perspectives. Since the emergence of FRP, research on it has led to the publication of numerous papers in various scientific databases such as Elsevier, ASCE, Springer Nature, ACI, and MDPI. Researchers have explored the use of FRP in concrete from various aspects, including material systems, types of elements, and applications, which together account for 35.8%, 50.3%, and 13.9% of the research papers, respectively. The aim of this paper is to provide an overview and summary of the use of FRP based on highly cited literature and to support the ongoing growth and development of FRP in concrete applications. Therefore, this paper expects to offer benefits for stakeholders involved in the use of FRP, such as owners, engineers, and professionals, with an emphasis on the number of available research papers that could increase confidence in the use of FRP. This article provides an opportunity for researchers to familiarize themselves with the application of FRP in concrete.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 21 May 2020  
**Revise Date:** 24 August 2020  
**Accept Date:** 08 October 2020

### Keywords:

*FRP  
Fiber-Reinforced Polymer  
Rehabilitation  
Concrete*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525687.3735>

\*Corresponding author: Gholamreza Havaei  
Email address: [Havaei@aut.ac.ir](mailto:Havaei@aut.ac.ir)

## پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) در بتن، مطالعه مروری

غلامرضا هوآئی

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

### چکیده

این تحقیق بر نحوه توجه جامعه علمی به جنبه‌های مختلف طراحی، آزمایش و اجرای میدانی پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) در بتن تمرکز دارد. کامپوزیت‌های FRP پس از استفاده در کاربردهای مهندسی عمران در سه دهه گذشته، شناخته شده‌اند. این مقاله یک نظرسنجی جامع از ادبیات موجود درباره FRP در بتن از جنبه‌های مختلف مهندسی ارائه می‌دهد. از زمان پیدایش FRP، تحقیقات آن منجر به انتشار مقالات زیادی در پایگاه‌های داده علمی مختلف مانند Elsevier، ASCE، Springer Nature، ACI و MDPI شده است. پژوهشگران استفاده از FRP در بتن را از جنبه‌های مختلف مانند سیستم‌های مواد، انواع اجزا و کاربردها بررسی کرده‌اند که به ترتیب ۳۵.۸٪، ۵۰.۳٪ و ۱۳.۹٪ از مقالات تحقیقاتی را شامل می‌شود. هدف این مقاله ارائه یک نمای کلی و خلاصه‌ای از استفاده از FRP بر اساس ادبیات پراچاع و حمایت از رشد و توسعه مستمر FRP در کاربردهای بتن است. بنابراین، این مقاله انتظار دارد که مزایایی را برای ذینفعان درگیر در استفاده از FRP، مانند مالکین، مهندسان و حرفه‌ای‌ها، با تأکید بر تعداد مقالات تحقیقاتی موجود ارائه دهد که می‌تواند اعتماد به استفاده از FRP را افزایش دهد. این مقاله فرصتی برای پژوهشگران و محققان فراهم می‌آورد تا با استفاده از FRP در کاربردهای بتن آشنا شوند.

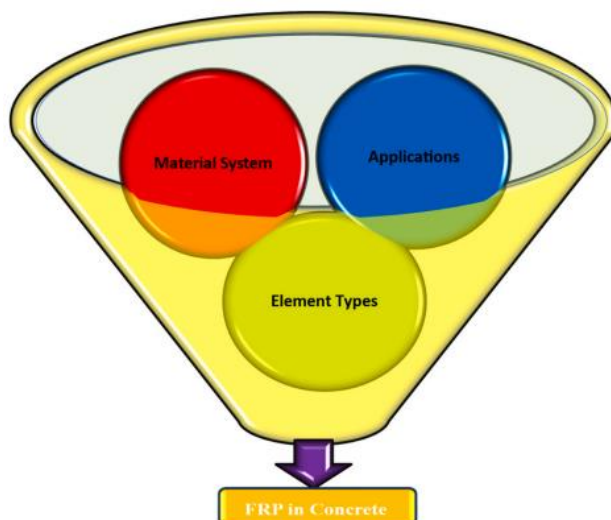
### کلمات کلیدی: FRP، پلیمر تقویت شده با الیاف، مقاوم‌سازی، بتن

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: <a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525687.3735">https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525687.3735</a>	۱۳۹۹/۰۳/۰۱	۱۳۹۹/۰۶/۰۳	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۰۷/۱۷	۱۳۹۹/۱۲/۲۹
doi: <a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525687.3735">10.22065/jsce.2025.525687.3735</a>					
غلامرضا هوآئی					نویسنده مسئول:
<a href="mailto:havaei@aut.ac.ir">havaei@aut.ac.ir</a>					پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

بتن به‌خوبی به دلیل تاب‌آوری و مقاومت فشاری خود شناخته شده است و دومین ماده تولید شده پر استفاده در سطح جهانی است. بتن یکی از اجزای حیاتی در توسعه تمدن بوده است و به‌عنوان ماده اصلی در ساخت انواع مختلف سازه‌ها از جمله ساختمان‌ها، پل‌ها و بسیاری از کاربردهای مهندسی و غیرمهندسی دیگر استفاده می‌شود. از این رو، نیاز مداومی به بهبود عمر خدمات سازه‌های بتنی و ساخت آن‌ها به‌طور مقاوم‌تر، پایدارتر و مقاوم‌تر برای حمایت از نیازهای جامعه وجود دارد. ترکیب مواد غیرفلزی مانند FRP و بتن مزایای زیادی دارد. به‌عنوان مثال، تقویت‌کننده‌های FRP نسبت به فولاد نسبت مقاومت به وزن بالاتری دارند؛ بنابراین، می‌توان وزن کل سازه‌ها را بدون آسیب رساندن به مقاومت سازه‌ای آن‌ها با استفاده از FRP کاهش داد. همچنین می‌تواند فرآیند نصب و ساخت را تسریع کند. علاوه بر این، از آنجایی که FRP خورده نمی‌شود، می‌تواند مشکلات دوام مربوط به خوردگی میلگردهای فولادی در بتن را برطرف کند. این منجر به بهبود استقامت، کاهش هزینه‌های نگهداری و طول عمر بیشتر سازه‌های بتنی می‌شود. علاوه بر این، شفافیت الکترومغناطیسی و عدم قابلیت حمل برق برخی از انواع FRP را برای کاربردهای خاصی مانند اتاق‌های تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI) ایده‌آل می‌سازد [۱]. علاوه بر این، استفاده از کامپوزیت‌های FRP در ساخت بتن به انعطاف‌پذیری طراحی بیشتری اجازه می‌دهد. به دلیل این مزایا، ترکیب FRP با بتن در مهندسی عمران شناخته شده و به‌کار گرفته شده است، همان‌طور که با انتشار دستورالعمل‌ها و کدهای طراحی بین‌المللی شاهد آن هستیم. با این حال، مهندسان و پژوهشگران همچنان به تحقیق و توسعه استفاده از FRP در کاربردهای مختلف بتن برای رفع خلأهای دانشی ادامه می‌دهند. این مقاله استفاده از FRP را در زمینه مهندسی عمران در بخش‌های مختلف بررسی می‌کند. شکل ۱ طبقه‌بندی FRP در بتن را نشان می‌دهد که بر اساس سیستم‌های مواد، انواع اجزا و کاربردها است. این مقاله موارد زیر را ارائه می‌دهد:

- نظرسنجی جامع از کاربرد FRP در بتن از دیدگاه سیستم‌های مواد، انواع اجزا و کاربردها.
- تحلیل آماری از مقالات هم‌ارزی که در پایگاه‌های داده علمی مختلف منتشر شده‌اند.
- مروری بر تحقیقات که به کمبودهای دانشی اشاره می‌کند و تحقیقات با تمرکز و اهمیت بیشتر در این زمینه.
- مسیر آینده تحقیق و توسعه در FRP.



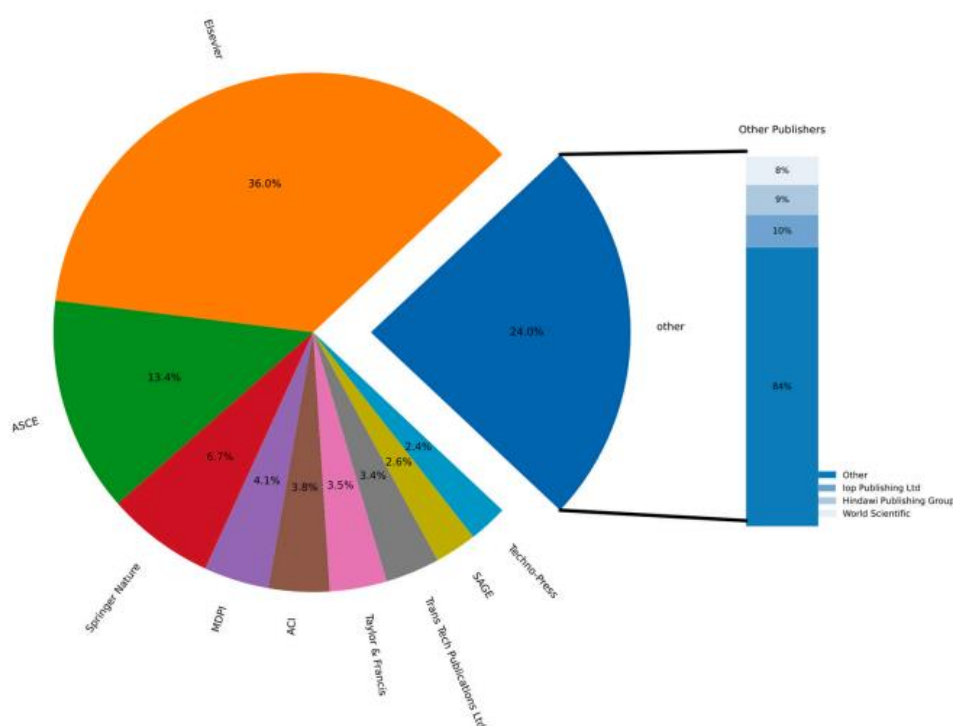
شکل شماره ۱- طبقه‌بندی FRP در بتن

## ۲. پیشینه مواد FRP

مواد کامپوزیت FRP از سه جزء اصلی تشکیل شده‌اند: الیاف، پلیمرها، و افزودنی‌ها و پرکننده‌های مختلف. در کامپوزیت‌های FRP، الیاف پیوسته با مقاومت و سفتی بالا با استفاده از ماتریس پلیمری که مدول الاستیسیته پایین‌تری دارد و کرنش نهایی بالاتری نسبت به الیاف دارد، آغشته می‌شوند. جهت‌گیری الیاف بستگی به تنش اعمال شده به المان کامپوزیت دارد، زیرا الیاف جزء باربری است. در همان زمان، رزین بار را توزیع می‌کند و از الیاف محافظت می‌کند. تنوع افزودنی‌ها ممکن است شامل نرم‌کننده‌ها، ضدآتش‌ها، عامل‌های فوم‌زنی، عامل‌های اتصال‌دهنده و ترکیب‌های مختلف باشد. علاوه بر این، امکان شناسایی پوشش‌ها، رنگدانه‌ها و پرکننده‌ها وجود دارد [۲]. درک ویژگی‌ها و رفتار اجزای تشکیل‌دهنده مواد کامپوزیت برای بهره‌برداری بیشتر از پتانسیل این کامپوزیت‌ها در کاربردهای ساختاری ضروری است.

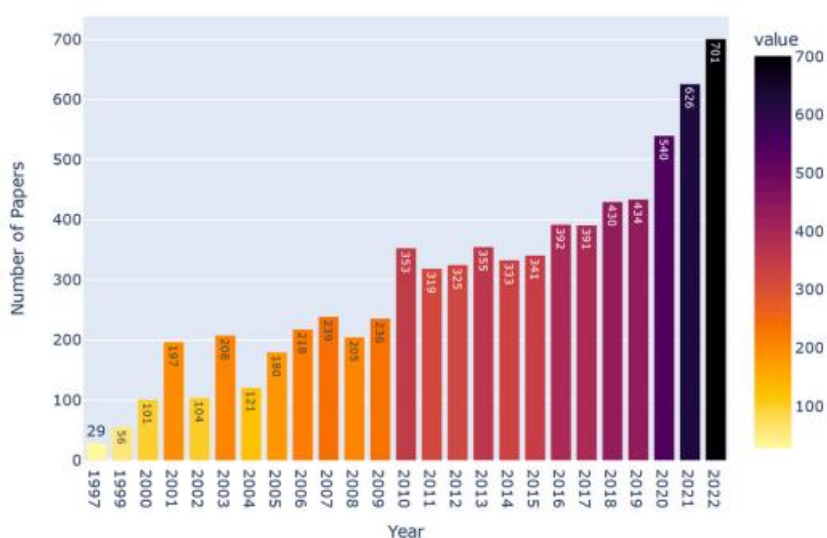
به دلیل هم‌راستایی مولکولی آن‌ها در جهت الیاف و همچنین فرکانس نقص پایین‌تر در مقایسه با ماده عمده‌ای که از آن به دست می‌آید، کامپوزیت‌های FRP به طور قابل توجهی مقاوم‌تر از ماده عمده هستند. الیاف استفاده‌شده در کامپوزیت‌ها معمولاً ویژگی‌های زیر را دارند: مدول الاستیسیته بالا، مقاومت نهایی بالا، تغییرات کم مقاومت بین الیاف جداگانه، ثبات خواص در حین حمل و نقل و ساخت، یکنواختی در قطر الیاف و سطح آن‌ها، سطح بالایی از مقاومت و دوام، در دسترس بودن در هندسه‌ها و اشکال مناسب و هزینه مقرون به صرفه.

پیشرفت‌هایی که در طول جنگ جهانی دوم انجام شد، به ویژه در ساخت اولین رادوم‌ها برای تجهیزات راداری الکترونیکی، انگیزه‌ای برای استفاده از FRP در صنایع ساخت و ساز بعد از پایان جنگ شد. طبق گفته هالاوای [۳]، دهه ۱۹۶۰ آغاز کنجکاوای قابل توجهی در استفاده از کامپوزیت‌های الیاف شیشه/پلی استر در ساخت و ساز و پیشرفت‌های علمی در این زمینه بود. در این زمان، ساختارهای گنبدی در بنگازی (۱۹۶۸) و سقف‌سازی در فرودگاه دبی (۱۹۷۲) با استفاده از GFRP ساخته شدند. هر دو سازه پروژه‌های مهمی هستند. تولیدکنندگان الیاف و FRP در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ بر کاهش هزینه‌ها تمرکز کردند زیرا بازار دفاعی کاهش یافت [۴]. این کار به منظور تضمین توانایی صنعت تولید FRP برای ادامه رشد در طول زمان انجام شد. از اوایل دهه ۱۹۹۰، نیاز به نگهداری و نوسازی زیرساخت‌ها به طور ثابت افزایش یافته است که منجر به رشد استفاده از مواد FRP در کاربردهای ساختاری شده است. به همین دلیل، FRP به طور مؤثری از نظر هزینه به صرفه‌تر شده است. تا به امروز، صدها کاربرد عملی از FRP در سازه‌ها در سراسر جهان مشاهده می‌شود. پل ایباخ در لوسرن، سوئیس، اولین پل تقویت‌شده با CFRP در جهان بود که در سال ۱۹۹۱ با استفاده از سه نوار CFRP بازسازی شد. این دستاورد به پل ایباخ جایگاهی ویژه می‌دهد. منابع دیگری برای مشاهده دیدگاه‌ها و گزارش‌های تاریخی گسترده‌تر در مورد توسعه جهانی FRP قابل مشاوره هستند. [5-8] برای ۲۵ سال، دانشمندان به بررسی رویکردهای مختلف مبتنی بر FRP برای حل مشکلات بتن ساده و بتن مسلح (RC) پرداخته‌اند. در این مطالعه، مقالات مرتبط با FRP در بتن جمع‌آوری شده‌اند. تعداد کل مقالات منتشر شده مرتبط با FRP در RC در شکل ۲ نشان داده شده است که طیف وسیعی از نشریات مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این تحلیل، Elsevier ۳۶٪ از این مقالات را منتشر کرده است. در مقایسه، ASCE سهم ۱۳.۴٪، Springer سهم ۶.۷٪، MDPI سهم ۴.۱٪، ACI سهم ۳.۸٪، Taylor and Francis سهم ۳.۵٪، Trans Tech Publications Ltd سهم ۳.۴٪، SAGE سهم ۲.۶٪، Techno-Press سهم ۲.۴٪ و سایر منابع سهم ۲۴٪ دارند. شکل ۲ همچنین نشان می‌دهد که Elsevier بیشترین مقالات مرتبط با FRP در بتن را منتشر کرده است.



شکل ۲- درصد مقالات مربوط به FRP در بتن در نشریات مختلف.

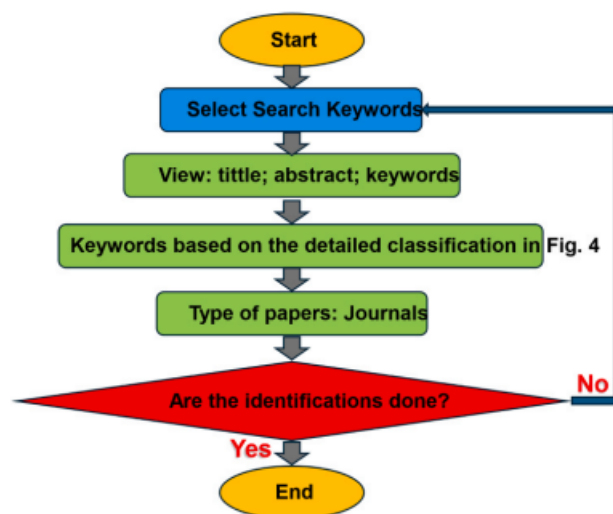
شکل ۳ یک نمودار میله‌ای را نشان می‌دهد که تعداد مقالات مرتبط با FRP را به‌طور سالانه از ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. تعداد مقالات به‌طور ثابت از ۲۹ به ۷۰۱ افزایش یافته است.



شکل ۳- تعداد مقالات مربوط به FRP و بتن از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲

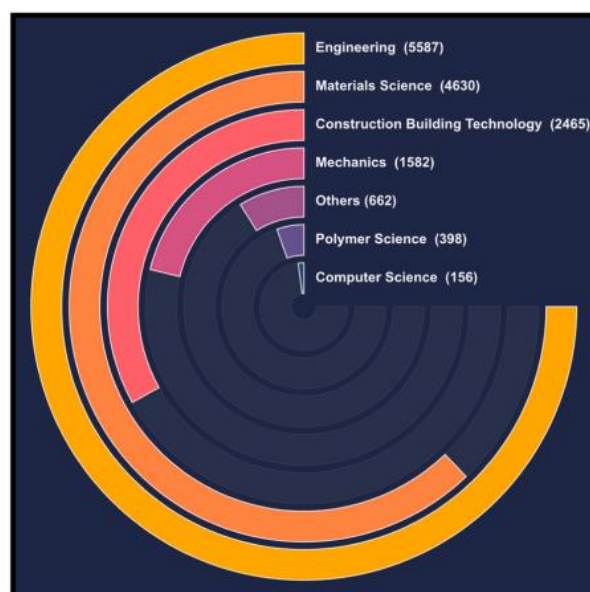
یک جستجوی جامع در تمام پایگاه‌های داده معتبر انجام شد و مقالات مرتبط بر اساس عناوین، کلمات کلیدی و چکیده‌ها جمع‌آوری شدند. پس از تحقیق اولیه، هر مقاله به‌طور دقیق بررسی شد و در این فرایند، هم موضوع و هم دسته‌بندی مورد استفاده برای روشن‌سازی دست‌نوشته‌ها در نظر گرفته شدند. در طول فرآیند غربالگری، موارد تکراری حذف شدند. در نهایت، مقالات مرتبط با FRP در بتن گروه‌بندی شدند. شکل ۴ یک نمودار جریان از مراحل فرایند تحقیق را نشان می‌دهد FRP. تنها یک موضوع مرتبط با مهندسی سازه نیست؛ ارتباط آن

به سایر رشته‌ها مانند علم کامپیوتر، علم مواد، مکانیک و غیره گسترش یافته است، همان‌طور که در مقالات تحقیقاتی منتشر شده در این زمینه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۴ - نمودار جریان فرآیند بررسی

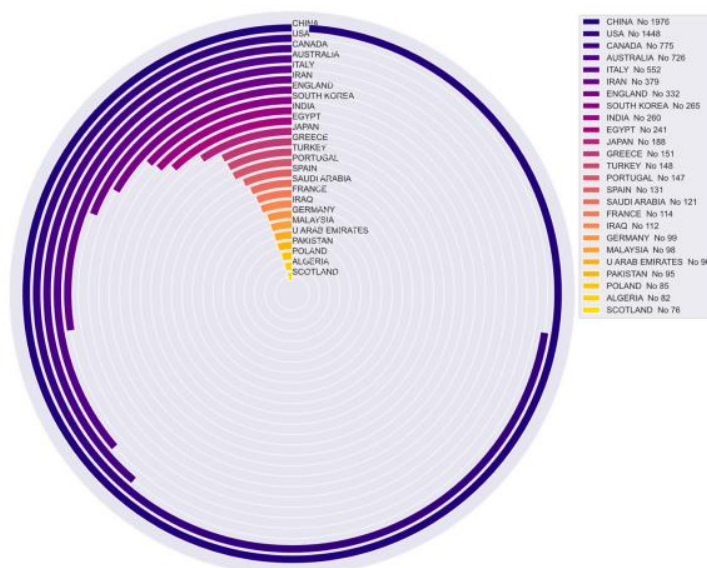
شکل ۵ تعداد کارهای مرتبط با FRP در رشته‌های مختلف، از جمله علم مواد، ساخت‌وساز و فناوری ساخت را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در زمینه علم کامپیوتر فرصت‌های زیادی وجود دارد که بر پیش‌بینی رفتار FRP تحت شرایط و آزمایش‌های مختلف تمرکز دارد.



شکل ۵ - تعداد مقالات در زمینه‌های مختلف مرتبط با FRP

شکل ۶ نشان می‌دهد که چین و ایالات متحده پیشگامان تحقیق در زمینه FRP هستند و به ترتیب ۱۹۷۶ و ۱۴۴۸ مقاله منتشر کرده‌اند. این تعداد بالاتر از مقالات به اقتصاد پیشرفته این دو کشور مربوط می‌شود که این امکان را برای آن‌ها فراهم می‌کند تا بودجه بیشتری را برای تحقیق و توسعه در این زمینه اختصاص دهند. علاوه بر این، نگرانی‌های فزاینده در مورد تعمیر زیرساخت‌های فرسوده و علاقه به یافتن راه‌حلی برای ساخت و ساز آینده به‌منظور جلوگیری از هزینه‌های تعمیر و نگهداری غیرضروری در ایالات متحده، نیروی محرکه دیگری

در توسعه FRP است. کشورهایی مانند کانادا، استرالیا، ایتالیا و ایران نیز به طور قابل توجهی در تحقیقاتی مرتبط با FRP بتن مشارکت دارند. این علاقه جهانی نشان دهنده اهمیت FRP در کشورهای مختلف است و همکاری بین المللی در پروژه‌ها در این زمینه را تقویت می‌کند.

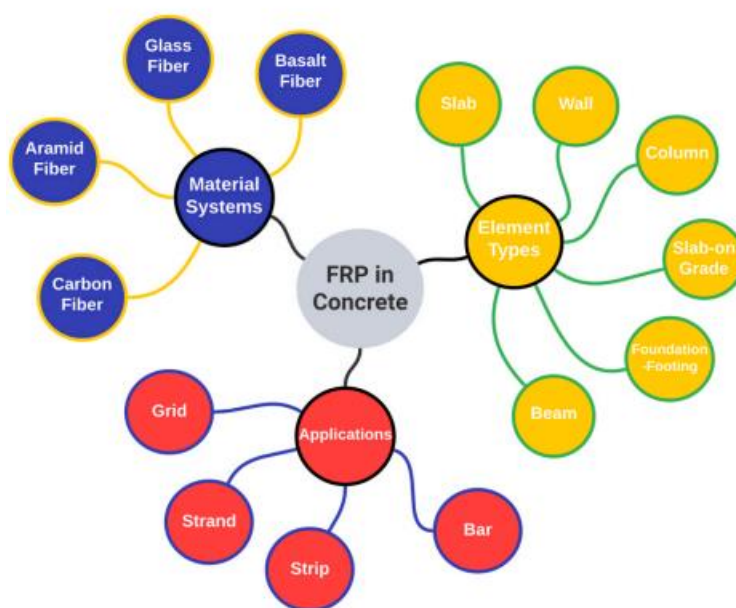


شکل ۶ - مقایسه کشورهای مختلف از نظر تعداد مقالات در زمینه FRP

### ۳. طبقه‌بندی FRP در بتن

سه دسته‌بندی مجزا در اینجا برای انجام نظرسنجی جامع از ادبیات FRP در بتن توسعه داده شده است. این طبقه‌بندی‌ها به زیرمجموعه‌هایی تقسیم شدند تا تحلیل دقیق‌تری بر اساس مقالات پرارجاع منتشر شده انجام شود. باید توجه داشت که ترتیب تحقیق‌های مرتبط در هر زیرمجموعه طبق اهمیت مطالعات سازماندهی شده است.

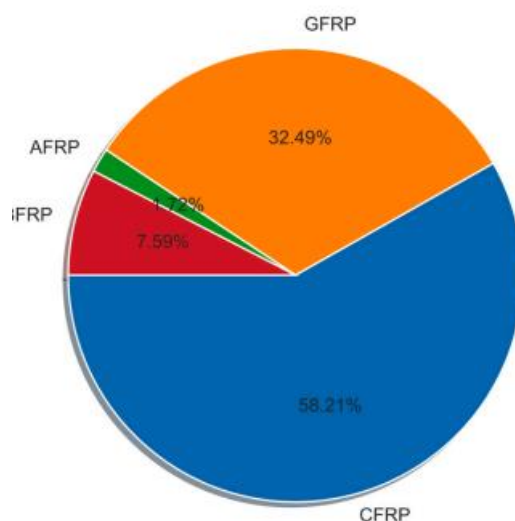
بررسی جامع اطمینان حاصل می‌کند که درک کاملی از موضوع به دست آید و منابع متنوعی برای ایجاد تصویری واضح از وضعیت کنونی تحقیق در زمینه FRP گردآوری شود. شکل ۷ طبقه‌بندی نقشه ذهنی FRP در بتن را ارائه می‌دهد. طبقه‌بندی در این شکل بر اساس سیستم‌های مواد، انواع اجزا و کاربردها است. برای ساده‌سازی پیچیدگی تحلیل ادبیات و ارائه یک تحقیق دقیق‌تر در یک حوزه محدود، نویسندگان دسته‌بندی سیستم‌های مواد را به تنها زیرمجموعه انواع الیاف محدود کرده‌اند.



شکل ۷ - طبقه‌بندی دقیق FRP در بتن

### ۳.۱. سیستم‌های مواد

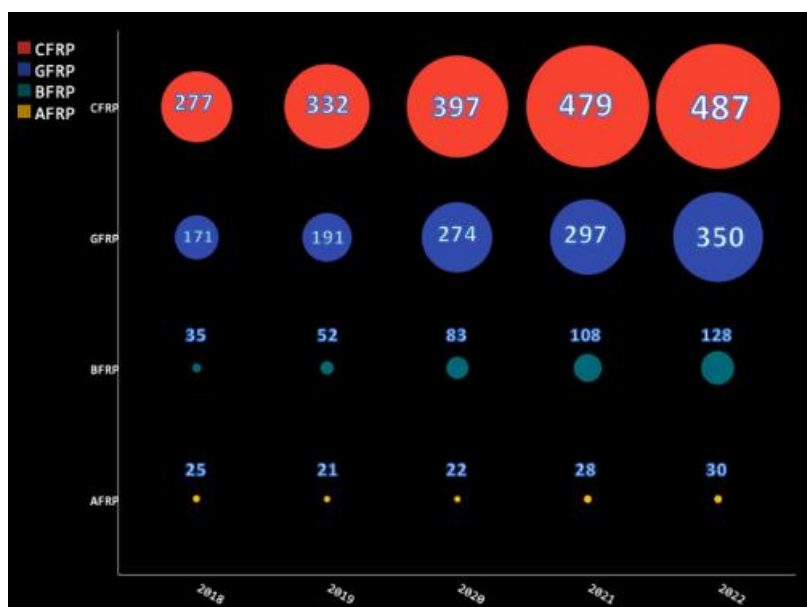
شیشه، بازالت، کربن و آرامید الیاف اصلی مورد استفاده برای تولید کامپوزیت‌های FRP هستند و هر یک از آن‌ها رفتار فیزیکی و مکانیکی خاص خود را دارند [۹،۱۰]. الیاف اجزای باربری FRP هستند و ویژگی‌های آن‌ها تأثیر زیادی بر رفتار مکانیکی محصول نهایی دارند [۱۱]. زمانی که FRP را در سیستم‌های مواد با تمرکز بر نوع الیاف طبقه‌بندی می‌کنیم، چهار دسته اصلی می‌توان تعریف کرد: CFRP، CFRP، BFRP و AFRP. طبق شکل ۸، CFRP پیشتر است با ۵۸.۲۱٪ و به عنوان پرمطالع‌ترین نوع شناخته می‌شود GFRP. در جایگاه دوم قرار دارد و ۳۲.۴۹٪ از مقالات را به خود اختصاص داده است.



شکل ۸ - درصد GFRP، CFRP، BFRP و AFRP در انتشارات مرتبط با FRP



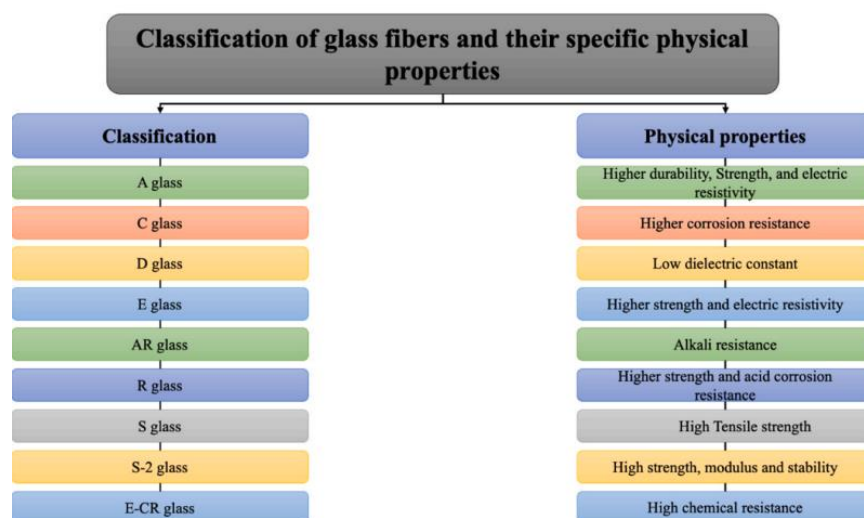
این موضوع نشان دهنده این است که این مواد کمتر در زمینه FRP در بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. موضوع CFRP در حال حاضر در تحقیق محبوب است، در حالی که BFRP و AFRP به عنوان موادی که نیاز به بررسی و توسعه بیشتر دارند، شناسایی شده‌اند. این موارد به وضوح تمرکز کنونی و جهت گیری آینده تحقیق در زمینه FRP در بتن را نشان می‌دهند. طبق شکل ۹، افزایش قابل توجهی در تعداد مقالات منتشر شده از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ مشاهده شد. این سطح بالای فعالیت تحقیقاتی در مقالات مربوط به CFRP و GFRP انعکاس یافت، به طوری که تعداد مقالات به ترتیب به ۴۸۷ و ۳۵۰ رسید. افزایش قابل توجهی در مقالات مربوط به BFRP از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ مشاهده شد، به طوری که تعداد آن از ۳۵ به ۱۲۸ رسید (شکل ۹)، که نشان دهنده پتانسیل این موضوع برای تبدیل شدن به یک حوزه تحقیقاتی مهم در آینده است. این علاقه روزافزون به تحقیقات مرتبط با BFRP به افزایش عرضه الیاف بازالت در ایالات متحده از سال ۲۰۱۸ [۱۲] نسبت داده می‌شود که تولید آن را مقرون به صرفه‌تر کرده است. با این حال، در مورد AFRP، تعداد مقالات منتشر شده در همان بازه زمانی نسبتاً ثابت باقی مانده است.



شکل ۹ - تعداد مقالات منتشر شده برای CFRP، GFRP، BFRP و AFRP از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲

### ۳.۱.۱. الیاف شیشه

پرکاربردترین الیاف در ساخت FRP، الیاف شیشه به دلیل قیمت پایین تر آن‌ها است. بسته به درصد موادی که در تولید الیاف شیشه استفاده می‌شود، انواع مختلفی از الیاف شیشه با رفتار مکانیکی خاص وجود دارند [۱۳]. شکل ۱۰ انواع مختلف الیاف شیشه و ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - انواع مختلف الیاف شیشه

فو و همکاران [۱۴] تأثیر الیاف کوتاه در کامپوزیت‌های پلی پروپیلن را ارزیابی کردند. نمونه‌ها با استفاده از فرآیندهای ترکیب اکستروژن و تزریق قالب‌گیری آماده شدند. علاوه بر این، از دو عامل کارایی الیاف برای تفسیر مقاومت و مدول کامپوزیت استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش حجم الیاف، عامل کارایی الیاف را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، در خصوص عامل کارایی الیاف، این عدد برای مدول کامپوزیت بسیار بالاتر از مقاومت کامپوزیت بود.

او و همکاران [۱۵] تأثیر سطوح مختلف نرخ کرنش را در دماهای مختلف بین ۲۵- درجه سانتی‌گراد تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت بارگذاری شبه‌استاتیک ارزیابی کردند. نتایج نمونه‌های آزمایش شده نشان داد که افزایش نرخ‌های کرنش در دمای اتاق، مقاومت کششی، کرنش حداکثری و سختی را بهبود می‌بخشد. با این حال، در نرخ کرنش ۴۰ ثانیه ۱-، افزایش دما باعث کاهش مقاومت کششی، سختی و مدول یانگ می‌شود. علاوه بر این، از آمار ویبول برای ارزیابی میزان تغییرات در مقاومت کششی استفاده شد و پارامترهای ویبول به دست آمد که می‌توانند در شبیه‌سازی‌های عددی و کاربردهای مهندسی استفاده شوند.

تأثیر عوامل محیطی مختلف بر ویژگی‌های کششی الیاف شیشه توسط آگاروال و همکاران [۱۶] بررسی شد. نتایج نشان داد که شرایط محیطی تأثیر منفی بر مقاومت کششی الیاف شیشه دارند.

زغلولو و همکاران [۱۷] سه مجموعه نمونه مختلف تهیه کردند، شامل کامپوزیت‌های پلی استر بدون تقویت (UR)، کامپوزیت‌های سطحی تقویت شده به صورت مرتب (SRA) و کامپوزیت‌های تقویت شده به صورت انبوه (BRA) به منظور ارزیابی تأثیر چیدمان الیاف بر رفتار کششی و خستگی پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه. برای تحلیل عملکرد نمونه‌ها تحت استرس‌های خستگی و کششی از میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه خستگی با چرخش خمشی و دستگاه آزمایش جهانی استفاده شد. نتایج نشان داد که SRA نسبت به دو نمونه دیگر بیشترین طول عمر را دارد.

موکاپادیا و همکاران [۱۸] ۲۴ نمونه ریخته‌گری کردند تا تأثیر شرایط محیطی تهاجمی بر رفتار مفاصل بتنی تقویت شده با GFRP را بررسی کنند. نمونه‌ها با دو مقاومت فشاری مختلف در معرض محیط‌های پیری تسریع شده به مدت ۹ ماه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تمام رژیم‌های محیطی باعث افزایش طول انتقال پیوند، میزان توزیع تنش برشی و لغزش صفحه شدند. باید توجه داشت که زمان قرارگیری نمونه‌ها در شرایط تسریع شده برای بررسی تأثیر آن‌ها بر مقاومت مفاصل کافی نبود.

حبیب و همکاران [۱۹] آزمایش‌هایی برای ارزیابی تأثیر میزان تقویت بر عملکرد خمشی تیرهای پیوسته تقویت شده با میلگردهای GFRP انجام دادند. نتایج نشان داد که تقویت بیش از حد تیرهای پیوسته یا پشتیبانی شده نقش مهمی در عرض ترک‌ها دارد. علاوه بر این،

تقویت بیش از حد یک جزء کلیدی در گسترش ترک‌ها و افزایش ظرفیت بار تیر است. همچنین، تقویت بیش از حد تیرهای پیوسته و پشتیبانی‌شده باعث کاهش انحراف آن‌ها می‌شود.

رابرت و همکاران [۲۰] تأثیر شرایط پیری بر قدرت پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن را بررسی کردند. پژوهشگران میلگردهای GFRP را در بتن وارد کرده و آن‌ها را تحت تاثیر آب شیر در دماهای مختلف قرار دادند تا فرآیند تخریب تسریع شود. نتایج نشان داد که دوام میلگردهای GFRP در بتن به طور قابل توجهی تحت تاثیر شرایط پیری قرار نمی‌گیرد.

محمود و همکاران [۲۱] مطالعه‌ای انجام دادند که در آن از هشت ستون بتنی مستطیلی تقویت‌شده با میلگردهای GFRP استفاده کردند تا عملکرد این ستون‌ها تحت بارهای لرزه‌ای را بررسی کنند. نمونه‌ها تحت ترکیبی از بار جانبی ثابت و بار چرخه‌ای شبه‌استاتیک در حین آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ظرفیت انحراف نمونه‌های آزمایش‌شده در نقطه شکست ۸.۵٪-۱۲.۵٪ بود. انرژی لرزه‌ای اتلاف‌شده نیز نشان می‌دهد که ستون‌های GFRP-RC می‌توانند به جای ستون‌های فولادی RC-برای بار جانبی ثابت استفاده شوند.

کوموتا و همکاران [۲۲] مطالعه‌ای انجام دادند تا تأثیر پوشش GFRP بر پاسخ محوری ستون‌های مستطیلی را بررسی کنند. نه نمونه فراهم شد و تحت نیروی محوری تا شکست قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هر چه تعداد لایه‌های استفاده شده برای تقویت بیشتر باشد، ظرفیت باربری ستون‌ها نیز بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، استفاده از پوشش GFRP به‌عنوان روش تقویت برای ستون‌های بتنی به تقویت مقاومت فشاری آن‌ها کمک زیادی می‌کند.

کوی و همکاران [۲۳] هشت تیر بتنی تقویت‌شده با ترکیب میلگردهای GFRP و فولادی ریخته‌گری کردند تا تأثیر نسبت تقویت و نسبت میلگردهای FRP به میلگردهای فولادی را بر عملکرد خمشی تیرهای تقویت‌شده ترکیبی ریخته‌شده بررسی کنند. طبق نتایج آزمایش‌ها، تیرهای با نسبت تقویت نرمال داکتیلیته، قابلیت خدمات‌دهی و ظرفیت بار قابل قبولی داشتند. علاوه بر این، روش تحلیلی پیشنهادی توافق قابل قبولی با نتایج تجربی ارائه داد.

### ۳.۱.۲. الیاف کربن

الیاف کربن دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنعت هستند. ساخت قطعات ابزار، ابزار پزشکی، تیغه‌های چرخشی، هلیکوپترها، قطعات موتور، ماهواره‌ها و مواد ترمیمی و تقویتی در ساخت‌وساز نمونه‌های واضحی از کاربرد این الیاف در شیوه‌های مهندسی است. با اینکه هزینه الیاف یک مانع است [۲۴]، ویژگی‌های برجسته آن‌ها مانند آسیب‌پذیری کمتر در برابر گسیختگی ناشی از کرنش، مقاومت در برابر محلول‌های قلیایی و اسیدی و توانایی تحمل تنش‌های بالا باعث می‌شود این مواد در کاربردهای مختلفی مانند پیش‌تنیدگی مناسب باشند [25,26].

نرم‌شدن حرارتی در لایه‌های اپوکسی کربنی یک مکانیزم نرم‌شدن است که باعث شکست این ماده در هنگام آتش‌سوزی می‌شود. فیه و همکاران [۲۷] مقاومت کششی و مکانیزم نرم‌شدن T700 الیاف کربن را به‌طور تجربی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دما (بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) باعث کاهش مدول الیاف می‌شود. خوردگی لایه با سختی بالاتر در ناحیه نزدیک به سطح الیاف علت این کاهش است. باید توجه داشت که گرمایش الیاف بدون اکسیداسیون سطحی تأثیری بر مدول الیاف ندارد. این نشان می‌دهد که محتوای اکسیژن عامل فعال در از دست دادن سختی الیاف کربن در معرض آتش است. برخلاف مدول الیاف، مقاومت کششی الیاف هیچ ارتباطی با وجود محتوای اکسیژن ندارد. نتایج نشان داد که مقاومت کششی الیاف کربن تا ۵۰٪ در دمای بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. تست‌های کرنش کششی و خمشی توسط گورتنز و همکاران [۲۸] برای بررسی رفتار کرنش الیاف کربن کامپوزیت‌ها استفاده شد. طبق یافته‌ها، هیچ شکست کرنشی در زمانی که کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارهای کرنش کششی تا ۷۷٪ از مقاومت کششی نهایی خود در مدت زمان کوتاه و در دمای اتاق قرار گرفتند، مشاهده نشد. علاوه بر این، استفاده از فرضیه انرژی فعال‌سازی ثابت برای به‌دست آوردن عامل جابجایی برای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن تنها برای نمونه‌هایی که دمای آن‌ها زیر دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) بود، قابل قبول است. کائو و همکاران [۲۹] روشی برای پیش‌بینی مقاومت کششی وابسته به دما در کامپوزیت‌های CFRP تک‌جهته با استفاده از تحلیل

عددی و شبیه‌سازی مدل پیشنهاد دادند و نتایج را با مقادیر تجربی مقایسه کردند. انتقال شیشه‌ای ماتریس، ناحیه انتقال شیشه‌ای و مقاومت کششی باقی‌مانده پس از ناحیه انتقال شیشه‌ای از پارامترهای مدل بودند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی ورق‌های CFRP در دمای پایین‌تر از Tg ثابت می‌ماند. با این حال، مقاومت کششی در هنگام Tg به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. علاوه بر این، مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی مقاومت کششی CFRP در دماهای مختلف توافق خوبی با نتایج تجربی نشان داد. شیا و همکاران [۳۰] تأثیر نرخ کرنش بر رفتار کششی آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف کربن را ارزیابی کردند. دامنه نرخ کرنش بین ۰.۰۰۱ تا ۱ ثانیه تا ۱۲۰۰ ثانیه -۱ بود. نتایج نشان داد که مقاومت کششی این ماده و کرنش شکست با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مدل سخت‌شدن کرنشی خطی و توزیع ویبول برای به‌دست آوردن معادله سازگاری برای این ماده استفاده شد. تحلیل‌ها نشان داد که پارامتر مقیاس ویبول به نرخ کرنش حساس است و با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. الیاف کربن کاربردهای صنعتی گسترده‌ای دارند. ساخت قطعات ابزار، ابزار پزشکی، تیغه‌های چرخشی برای هلیکوپترها، قطعات موتور، ماهواره‌ها و مواد ترمیمی و تقویتی در ساخت‌وساز نمونه‌های واضحی از کاربرد این ماده در شیوه‌های مهندسی است. با این حال، هزینه ساخت مانع استفاده گسترده از این نوع الیاف است [31]. ژو و همکاران [۳۲] تأثیر ضخامت لایه‌ها بین ۰.۰۲ میلی‌متر تا ۰.۱ میلی‌متر را بر ویژگی‌های کششی و رفتار شکست لایه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به‌طور تجربی و نظری بررسی کردند. چهار لایه با استفاده از تکنیک جدید ترکیب جریان هوا با پخش مکانیکی تهیه شدند. این تکنیک به بررسی تأثیر تکنیک نازک کردن لایه بر تنظیمات الیاف و در نتیجه ویژگی‌های کششی و شکست لایه‌ها کمک می‌کند. مدل پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی برای لایه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن نسبت به نتایج تجربی عملکرد خوبی داشت. لی و همکاران [۳۳] تأثیر دماهای بالا (۱۵۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) را بر ریزساختار و ویژگی‌های میکروسختی CFRP ارزیابی کردند. ویژگی‌های ساختار بلوری رزین اپوکسی و الیاف کربنی که برای ساخت CFRP استفاده شده بودند، بررسی شدند تا ریزساختار نمونه‌ها تحت دماهای ذکر شده مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که دماهای بالا باعث کاهش سختی CFRP و تخریب مکانیکی رزین، جدا شدن الیاف/ماتریس، و گسترش میکروترک‌ها در سطح نمونه‌ها می‌شود که علت این کاهش است.

رافی و همکاران [۳۴] چهار تیر بتنی تقویت‌شده با میلگردهای CFRP ریخته‌گری کردند تا عملکرد خمشی تیرهای CFRP-RC را در خمشی ارزیابی کنند. مدلی برای پیش‌بینی عملکرد خمشی نمونه‌های آزمایش‌شده پیشنهاد شد. نتایج نشان داد که حالت شکست با مدل پیش‌بینی شده هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، تیرهای CFRP-RC شکست داکتیل داشتند زیرا عامل تغییرشکلی برای این تیرها بالاتر از ۶ بود و تیرها هیچ مشکلی در انحراف نداشتند. این به دلیل مدول الاستیسیته بالای میلگردهای CFRP نسبت به سایر میلگردهای FRP است.

فیرس و همکاران [۳۵] تحقیقی تجربی در مورد عملکرد پیوند میلگردهای FRP در بتن تقویت‌شده با الیاف فوق توانمند (UHPFRC) انجام دادند به دلیل اهمیت رفتار پیوند میلگردهای CFRP در اجزای پیش‌تینیده. عملکرد پیوند میلگردهای CFRP با درمان‌های مختلف سطحی، شامل سطوح صاف و پوشش‌دار با شن، در یک دستگاه آزمایش کشش مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت پیوند میلگردهای CFRP با درمان‌های مختلف سطحی تفاوت چشمگیری ندارد. علاوه بر این، قطر میلگرد و طول مدفون شدن تأثیر منفی بر مقاومت پیوند میلگردها داشتند.

تأثیر میلگردهای CFRP نصب‌شده در نزدیکی سطح (NSM) در تقویت تیرهای T در برابر برش توسط رحال و همکاران [۳۶] مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر جهت‌گیری میلگرد و نوع میلگرد (فولاد و CFRP) مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که این روش تقویت می‌تواند ظرفیت برشی تیرهای بتنی T را به میزان ۳۷٪-۹۲٪ نسبت به نمونه کنترل افزایش دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که قرار دادن میلگردها در زاویه ۴۵ درجه بهترین جهت برای تقویت این تیرها با استفاده از مواد فولادی یا FRP در برابر برش است. همچنین، ظرفیت برشی نمونه‌های تقویت‌شده با میلگردهای CFRP حدود ۱۰٪ بیشتر از میلگردهای فولادی بود.

مقاومت پیوند میلگردهای CFRP و GFRP در بتن با مقاومت بالا به‌عنوان موضوعی که شایسته مطالعه است توسط داوالوس و همکاران [۳۷] شناسایی شد. میلگردهای CFRP تحت دو شرایط محیطی مختلف قرار گرفتند، شامل آب شیر با دمای محیطی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دماهای متغیر بین ۲۰- درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درجه سانتی‌گراد. نتایج ۴۸ آزمایش کشش نشان داد که شرایط محیطی تأثیر منفی بر مقاومت پیوند میلگردهای CFRP با کاهش ۴٪-۱۰٪ دارد. برای میلگردهای GFRP، این کاهش در دامنه ۰٪-۲۰٪ بود.

بارنز و همکاران [۳۸] سه تیر بتنی مسلح به CFRP را برای تحقیق در مورد تأثیر این ماده بر عملکرد خستگی تیرها فراهم کردند. تمام نمونه‌ها تحت سه شرایط بارگذاری مختلف آزمایش شدند، که شامل اعمال بارهای معادل در نمونه‌های تقویت‌شده و غیرتقویت‌شده، اعمال بارها به هر دو تیر به طوری که همان تنش در میلگردها اعمال شود، و اعمال همان بخش از ظرفیت نهایی به هر تیر آزمایش‌شده بود. نتایج نشان داد که شکست تقویت داخلی فولادی در تیرهای آزمایش‌شده، شکست غالب است.

بخاری و همکاران [۳۹] هفت تیر بتنی پیوسته را در دو دهانه برای ارزیابی تأثیر مساحت و موقعیت ورق‌های CFRP در طول دهانه بر تقویت برشی ساخته‌اند. در مجموع پانزده تیر ریخته‌گری شد، که شامل چهار تیر مرجع و یازده تیر تقویت‌شده با ورق‌های CFRP چسبیده به‌طور خارجی با پیکربندی‌های مختلف بود. طبق نتایج، استفاده از ورق‌های CFRP در تقویت ظرفیت برشی تیرهای بتنی مفید واقع شد. علاوه بر این، پیشنهاد شد که هم‌راستایی ورق‌های CFRP در زاویه ۴۵ درجه با محور تیر، مفید است.

### ۳.۱.۳. الیاف بازالت

الیاف بازالت از سنگ‌های بازالت ذوب‌شده به‌دست می‌آیند. در مقایسه با تولید الیاف شیشه که نیاز به یک ماده اولیه ثانویه دارند، الیاف بازالت نیازی به ماده اولیه دیگری ندارند [۴۰]. علاوه بر این، به دلیل رفتار مکانیکی قابل قبول و قیمت مناسب، استفاده از مواد BFRP در شیوه‌های ساخت در حال افزایش است. این زمینه مورد توجه تحقیقات زیادی قرار گرفته است.

وانگ و همکاران [۴۱] آزمایشی انجام دادند تا دوام شیمیایی و خواص مکانیکی الیاف بازالت ضد قلیایی ساخته شده با رزین اپوکسی F46 را ارزیابی کنند. در این مطالعه، ابتدا الیاف در آب مقطر، هیدروکسید سدیم و اسید هیدروکلریک غوطه‌ور و جوشاندند و سپس از دست دادن جرم و مقاومت الیاف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقاومت الیاف بازالت در برابر قلیا بهتر از مقاومت آن‌ها در برابر اسید است.

گریکو و همکاران [۴۲] چسبندگی الیاف بازالت به ماتریس‌های پلی‌پروپیلن (PP) را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش کششی تک‌فیلامنت برای تعیین مقاومت انواع مختلف الیاف از منابع مختلف با درمان‌های سطحی مختلف استفاده شد. علاوه بر این، طول بحرانی الیاف در ماتریس PP هموپلیمر و ماتریس PP اصلاح‌شده با انیدرید مالییک تعیین شد، که در آن آزمایش شکست تک‌فیلامنتی به‌کار گرفته شد. مطالعات نشان داد که منشاء یا درمان سطحی تأثیر ناچیزی بر مقاومت کششی الیاف دارد. علاوه بر این، الیاف با هر نوع پوشش، ویژگی‌های مکانیکی کمتری نسبت به سایر الیاف نشان دادند. همچنین، نتایج نشان داد که مقاومت کششی الیاف بستگی به طول فیلامنت دارد.

تأثیر بار دینامیک بر مقاومت کششی، مدول کششی و کرنش شکست در نرخ‌های کرنش مختلف الیاف بازالت توسط چن و همکاران [۴۳] ارزیابی شد. مشخص شد که خواص کششی الیاف بازالت زمانی که نرخ کرنش بیش از ۱۲۰ ثانیه<sup>-۱</sup> باشد، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده شد که مقاومت کششی دینامیکی الیاف بازالت تقریباً دو برابر مقاومت کششی شبه‌استاتیک آن‌ها است.

الیاف بازالت یک الیاف معدنی طبیعی است. برخلاف الیاف طبیعی که به شدت در برابر تنش‌های حرارتی و جذب رطوبت آسیب‌پذیر هستند، الیاف بازالت رفتار مکانیکی قابل قبولی در چنین شرایطی دارند. الیاف بازالت از سنگ‌های بازالت ذوب‌شده به‌دست می‌آیند. در مقایسه با تولید الیاف شیشه که نیاز به ماده اولیه ثانویه دارند، این الیاف نیازی به ماده اولیه دیگری برای تولید خود ندارند. [44]

فیگاده و همکاران [۴۵] اجزای شیمیایی، خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت را مرور کردند و هزینه الیاف بازالت را با الیاف کربن و شیشه مقایسه کردند. مشخص شد که الیاف بازالت از نظر هزینه مؤثرتر از الیاف کربن هستند. علاوه بر این، باید به مقاومت الیاف بازالت توجه شود. این الیاف نسبت به الیاف شیشه عملکرد بهتری دارند. همچنین، نتایج نشان داد که الیاف بازالت در مقاومت خمشی و چسبندگی بهتر از الیاف کربن و شیشه عمل می‌کنند. با این حال، کاهش خواص حرارتی الیاف بازالت در دماهای بالا یکی از جنبه‌های منفی این الیاف است.

پلاپرت و همکاران [۴۶] ویژگی‌های مکانیکی شبه‌استاتیک کامپوزیت‌های الیاف بازالت/رزین اپوکسی یک‌جهته، از جمله کشش، فشردگی و برش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با توجه به مقاومت و سختی، الیاف بازالت یک‌جهته عملکرد مشابه یا بهتری نسبت به کامپوزیت‌های الیاف شیشه/رزین اپوکسی یک‌جهته دارند. علاوه بر این، از نظر هزینه تولید این مواد، کامپوزیت‌های الیاف بازالت هزینه تولید کمتری دارند. باید توجه داشت که کامپوزیت‌های الیاف بازالت خواص بازیافت خوبی دارند. این دلایل منجر به استفاده از کامپوزیت‌های الیاف بازالت در بسیاری از شیوه‌های مهندسی می‌شود.

عملکرد خمشی تیرهای بتنی تقویت‌شده با ترکیب BFRP و میلگردهای فولادی توسط گی و همکاران [۴۷] مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد پیوند و مقاومت کششی میلگردهای BFRP با استفاده از آزمایش خمشی بر روی تیرهای بتنی، آزمایش‌های کشش و آزمایش‌های بیرون کشیدن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت پیوند بین میلگردهای BFRP و بتن مشابه میلگردهای فولادی است. فرمولی که توسط پژوهشگران برای برآورد عملکرد خمشی تیرهای ترکیبی RC پیشنهاد شده بود، زمانی که با داده‌های تجربی مقایسه شد، دقیق بود.

مهرگ و همکاران [۴۸] مطالعه‌ای بر روی چهار دال بتنی پیوسته و دو دال بتنی پشتیبانی‌شده ساده تقویت‌شده با میلگردهای BFRP در موقعیت‌های بالایی، پایینی یا هر دو انجام دادند. هدف این تحقیق، توسعه یک مدل کد بود. نتایج نشان داد که دال‌های BFRP-RC پیوسته بیشترین انحراف و عرض ترک‌ها را تجربه کردند. علاوه بر این، دال بتنی با تقویت BFRP در موقعیت‌های بالا و پایین، بالاترین ظرفیت باربری و کمترین میزان انحراف را نسبت به تنظیمات دیگر نشان داد.

تأثیر الیاف بازالت بر عملکرد خمشی ۱۲ تیر بتنی توسط عابد و همکاران [۴۹] بررسی شد. تیرهای بتنی با میلگردهای GFRP یا فولادی تقویت شدند و عملکرد خمشی آن‌ها با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف بازالت در بتن باعث افزایش داکتیلیته و ظرفیت خمشی تیرهای آزمایش‌شده می‌شود. افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی ناشی از توانایی تأخیر در وقوع کرنش شکست بتن است.

حسن و همکاران [۵۰] از بارگذاری کششی مستقیم و آزمایش‌های بیرون کشیدن برای ارزیابی عملکرد دوام میلگردهای BFRP بعد از قرار گرفتن در معرض محلول قلیایی به مدت شش ماه در شرایط محیطی سخت استفاده کردند. نتایج نشان داد که نمونه‌های شرایط داده‌شده در دماهای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درجه سانتی‌گراد طی اولین ۱.۵ ماه قرارگیری افزایش ۳۵٪-۶۰٪ در مقاومت پیوند خود را تجربه کردند. در مقابل، برای میلگردهای FRP شرایط داده‌شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در اولین ۱.۵ ماه از زمان قرارگیری ثابت باقی ماندند. علاوه بر این، میلگردهای FRP شرایط داده‌شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش در مقاومت پیوند خود را پس از ۶ ماه از زمان قرارگیری تجربه کردند.

۳۶ میلگرد BFRP-RC و ۱۲ میلگرد GFRP-RC توسط الف رفائی و همکاران [۵۱] برای مطالعه عملکرد پیوند میلگردهای FRP ارزیابی شدند. منحنی‌های پیوند-لغزش میلگردهای BFRP و GFRP به‌طور آماری مشابه تعیین شدند. با این حال، مطالعه نشان داد که مقاومت پیوند میلگردهای BFRP تنها ۷۵٪ مقاومت پیوند میلگردهای GFRP است.

یوکیم و همکاران [۵۶] روشی برای تعیین از دست دادن پیش‌تنیدگی در رشته‌های AFRP پیشنهاد کردند که نیاز به استفاده از ضرایب تجربی نداشت و به تأمین شرایط تعادل و سازگاری می‌پرداخت. نتایج نشان داد که از دست دادن پیش‌تنیدگی در رشته‌های فولادی بیشتر از رشته‌های FRP است. ذکر شد که کاهش از دست دادن تنش در رشته‌های FRP به دلیل مدول الاستیسیته پایین‌تر این رشته‌ها است. علاوه بر این، نوع رشته FRP و توزیع اولیه تنش در هر مقطع خاص می‌تواند تأثیر زیادی بر میزان تغییرات تنش‌های بتن و انحراف داشته باشد که از آنچه در تیرهای فولادی با پیش‌تنیدگی مشابه مشاهده می‌شود، در طول زمان متفاوت است.

قابلیت استفاده از ورق AFRP برای تقویت ستون‌های بتنی توسط توتانجی و همکاران [۵۷] بررسی شد و نتایج حاصل با نمونه‌های ستون‌های بتنی بدون تقویت مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های AFRP برای تقویت ستون‌های بتنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت و داکتیلیته را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، روشی برای پیش‌بینی پاسخ تنش-کرنش ارائه شد. هنگام مقایسه مدل پیشنهادی با

نتایج آزمایش‌ها، مشخص شد که روش پیشنهادی پیش‌بینی‌های قابل قبولی ارائه داده است. در ادامه این تحقیق، وو و همکاران [۵۸] استفاده از الیاف آرامید پیوسته و گسسته به‌عنوان پوشش خارجی برای ستون‌های بتنی با مقاومت فشاری بالا را بررسی کردند. مشابه تحقیق توتانجی و همکاران [۵۷]، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌ها ارائه شد. نتایج در رابطه با مقاومت نمونه‌ها با تحقیق توتانجی مطابقت داشت. با این حال، از نظر داکتیلیته، استفاده از ورق AFRP گسسته قادر به افزایش داکتیلیته نمونه‌های پوشش داده‌شده به‌طور قابل توجهی نبود.

ده تیر تقویت‌شده با AFRP و میلگردهای فولادی توسط رشید و همکاران [۵۹] برای مقایسه عملکرد این دو ماده در آزمایش سه‌نقطه‌ای خمشی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های تقویت‌شده با میلگردهای AFRP در دوران پس از ترک‌شدن نسبت به تیرهای فولادی RC از نظر انعطاف‌پذیری عملکرد بهتری دارند و شکست غالب تیرها در حالت شکست خمشی-برشی بود.

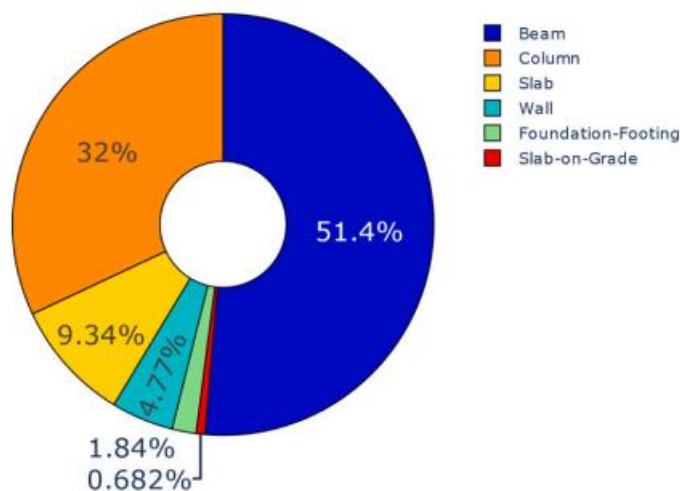
تحقیقات زیادی در مورد ستون‌های بتنی کوچک مقیاس تقویت‌شده با ورق‌های AFRP انجام شده است و تعداد کمی مطالعه در مورد تأثیر اندازه بر عملکرد محوری ستون‌های بتنی تقویت‌شده با ورق‌های AFRP صورت گرفته است. تحقیقات گسترده‌ای توسط وانگ و همکاران [۶۰] برای ارزیابی عملکرد اثر اندازه ستون‌ها تقویت‌شده با ورق‌های AFRP انجام شده است. ۹۹ ستون بتنی مربعی و دایره‌ای کوتاه با سه بعد مختلف مقیاس مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اثر اندازه تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ستون‌های تقویت‌شده با ورق‌های آرامید دارد. برخلاف مقاومت، اثر اندازه تأثیر جزئی بر منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها داشت.

تأثیر جهت‌گیری ورق‌های AFRP بر عملکرد محوری ستون‌های بتنی دایره‌ای توسط وینسنت و همکاران [۶۱] مطالعه شد. در این تحقیق، ۲۴ ستون بتنی تقویت‌شده با ورق‌های AFRP با مخلوط بتنی دارای مقاومت فشاری ۵۰ MPa و ۸۰ MPa فراهم شد و سه جهت‌گیری مختلف الیاف با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به محور طولی در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها نشان داد که کاهش زاویه الیاف عملکرد نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

## ۳.۲. انواع المان‌ها

دسته دوم مربوط به انواع المان‌ها در زمینه FRP در بتن است. این بخش مروری جامع بر ادبیات موجود در مورد استفاده از انواع المان‌های سازه‌ای FRP ارائه می‌دهد، که شامل دال‌ها، تیرها، دیوارها، ستون‌ها، دال‌های روی زمین (SOG) و پی‌ها/فونداسیون‌ها می‌شود. کاربردهای FRP در این المان‌ها را می‌توان به دو کلاس اصلی تقسیم کرد: کاربردهای تعمیر و ساخت جدید. زیرمجموعه‌های بیشتری می‌توانند در دسته کاربردهای تعمیر وجود داشته باشند: تقویت چسبیده به‌طور خارجی (EB) و تقویت نصب‌شده نزدیک به سطح (NSM). کلاس ساخت جدید شامل استفاده از تقویت داخلی FRP برای افزایش ظرفیت یا جلوگیری از ترک‌های ناشی از دما و انقباض است.

بررسی داده‌های به‌دست‌آمده از مقالات مختلف نشان داد که تحقیقات در مورد تیرها ۵۱.۴٪ از تمام تحقیقات در این دسته را تشکیل می‌دهند. ستون‌ها با سهم ۳۲٪ در رده دوم قرار دارند (شکل ۱۱). فراتر از این دو موضوع محبوب، دال‌ها و دیوارها دیگر زمینه‌های اصلی تحقیقاتی هستند که به ترتیب ۹.۳۴٪ و ۴.۷۷٪ از تحقیق در این دسته را به خود اختصاص داده‌اند. از FRP در طراحی و ساخت المان‌های مختلف بتن مسلح به‌طور موفقیت‌آمیز استفاده شده است، اما فونداسیون‌پی و SOG از موضوعاتی هستند که هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. اخیراً علاقه‌مندی به استفاده از FRP به‌عنوان تقویت‌کننده ثانویه در کاربردهای غیرسازه‌ای افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، FRP می‌تواند جایگزین میلگردهای فولادی دما و انقباض در فونداسیون‌های ساده، SOG و دیوارها شود [۷۷]. بنابراین، استفاده از FRP به‌عنوان تقویت‌کننده ثانویه می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات باشد که پژوهشگران می‌توانند به آن بپردازند.



شکل ۱۱ - درصد مقالات مرتبط با FRP در انواع المان‌ها

### ۳.۲.۱.۱. دال

#### ۳.۲.۱.۱.۱. تقویت چسبیده به‌طور خارجی

موسالم و موسالم [۷۸] مطالعات تجربی و تحلیلی انجام دادند تا اثربخشی دال‌های بتن مسلح تعمیر یا تقویت‌شده با نوارهای CFRP و GFRP را ارزیابی کنند. در مجموع، ۱۰ دال بتنی ساخته شد و روش منحصر به فردی برای اعمال بار توزیع‌شده یکنواخت به سطح زیرین دال استفاده شد تا سطح کششی در بالا با استفاده از کیسه‌های آب با فشار بالا ایجاد شود. طبق نتایج، هر دو سیستم FRP به‌طور موفقیت‌آمیز مقاومت دال‌های تعمیر شده را به حدود پنج برابر دال‌های کنترل افزایش دادند. استفاده از نوارهای FRP برای نوسازی دال‌ها ظرفیت نمونه‌های کنترل نشده و تقویت‌شده را به ترتیب تا ۵۰٪ و ۲۰۰٪ افزایش داد. مدل‌های محاسباتی مبتنی بر روش اجزای محدود نتایج آزمایش‌ها را به‌طور دقیق ثبت کردند و کرنش‌های تقویت‌کننده فولادی نشان دادند که کامپوزیت‌های CFRP به‌طور قابل توجهی آسیب به دال‌ها را کاهش داده‌اند.

یک مطالعه تجربی توسط یائو و همکاران [۷۹] انجام شد تا شایع‌ترین نوع شکست در اعضای خمشی تقویت‌شده از طرف کشش را بررسی کنند. این نوع شکست توسط ترک‌های خمشی یا ترک‌های برشی خمشی ایجاد می‌شود و به نام شکست ناشی از ترک میانه شناخته می‌شود. در این مطالعه، ۱۸ دال کنسول و ۴ دال پشتیبانی‌شده آزمایش شدند. نوع نوارهای FRP، عرض و طول آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به جز یک دال با عرض نوار تقریباً برابر عرض دال که به دلیل خرد شدن بتن شکست، تمام دال‌های باقی‌مانده به دلیل جدا شدن نوارهای FRP شکست خوردند. سفتی محوری نوارها به‌طور قابل توجهی بر کرنش جدا شدن در نوارها تأثیر می‌گذارد. به دلیل تعداد محدود نتایج آزمایش، این آزمایش‌ها نمی‌توانستند تأثیر نسبت عرض FRP به بتن را تأیید کنند. یکی از دال‌های کنسول با میلگردهای فولادی در عمق میانه تقویت شد و آزمایش بار نشان داد که پوشش بتنی بزرگ می‌تواند تأثیر منفی بر کرنش جدا شدن داشته باشد. نویسندگان از نتایج برای ارزیابی دقت چهار مدل موجود قدرت استفاده کردند. این ارزیابی نشان داد که سه مدل از چهار مدل موجود قدرت به اندازه کافی ایمن نیستند که در طراحی استفاده شوند و تنها یک مدل تخمین‌های ایمن‌تری از کرنش‌های جدا شدن ارائه می‌دهد. با این حال، این مدل نیز می‌تواند به طراحی محافظه‌کارانه منجر شود.

در مقاله‌ای از اسمیت و همکاران [۸۰]، از سیستم لنگر FRP برای حل مشکلات مربوط به جدا شدن در دال‌های بتن مسلح تقویت‌شده با FRP استفاده شد. هشت دال بتن مسلح شامل دو دال مرجع و شش دال دیگر که در سطح کشش با ورق‌های CFRP و انواع مختلف پیکربندی/نوع لنگرهای FRP تقویت شده بودند، ساخته و آزمایش شدند. در مقایسه با دال مرجع بدون لنگر، بهترین عملکرد به‌عنوان



افزایش ۳۰٪ در ظرفیت و افزایش ۱۱۰٪ در انحراف مشاهده شد. علاوه بر این، سیستم لنگر باعث افزایش کرنش قابل استفاده ورق‌های FRP از ۴۵٪ به ۸۰٪ در مقایسه با دال مرجع بدون لنگر شد. این مطالعه نشان داد که نوع و موقعیت لنگر می‌تواند بر کارایی سیستم لنگر تأثیر بگذارد. علاوه بر این، مطالعه نشان داد که قرار دادن لنگرها در ناحیه برش بیشتر مؤثر است؛ استفاده از فاصله نزدیک‌تر لنگرها باعث کاهش نرخ گسترش ترک‌های جدا شدن می‌شود که به نوبه خود انحرافات بیشتری فراهم می‌کند. در نهایت، مطالعه نشان داد که لنگرهایی با محتوای بالای الیاف که در نزدیکی ناحیه بیشترین گشتاور فاصله‌بندی شده‌اند و لنگرهایی با محتوای کمتر الیاف با فاصله نزدیک‌تر و در نزدیکی انتهای بدون ورق FRP، به بهبودهای بیشتری در عملکرد مقاومت و انحراف منجر می‌شوند.

### ۳.۲.۱.۲. نصب نزدیک به سطح

فرناندس و همکاران [۸۱] مطالعه‌ای انجام دادند که عملکرد پیوند و خمشی لامینت CFRP را در تقویت نصب نزدیک به سطح (NSM) بررسی کرد. برای دستیابی به این هدف، شش دال ساخته شد و تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت که شامل آزمایش‌های مونوترونیک و خستگی بود. وقتی دال‌ها تحت آزمایش خستگی قرار گرفتند، دال‌های تقویت‌شده با CFRP افزایش کمتری در انحراف در مرکز نسبت به دال‌های بدون تقویت نشان دادند. آزمایش‌های مونوترونیک که بعد از آزمایش خستگی انجام شد، افزایش اندکی در ظرفیت و سختی در مقایسه با نمونه‌های کنترل نشان دادند. خرد شدن بتن در سطح فشاری دال‌ها در میانه دهانه، رایج‌ترین حالت شکست در دال‌ها بود.

کانکری و پرکاش [۸۲] عملکرد دال‌های هسته توخالی تقویت‌شده با تکنیک‌های مختلف تقویت را مورد بررسی قرار دادند. چهارده دال ساخته شد، تقویت گردید و در نسبت‌های مختلف دهانه به عمق (a/d) پایین ۳.۷۵ و بالای ۷.۵۰ آزمایش شدند. سطح کششی دال‌ها با لامینت‌های CFRP نصب نزدیک به سطح (NSM) و CFRP چسبیده به‌طور خارجی (EB) تقویت شد. دال‌ها همچنین با پوشش چسبیده بر روی سطح فشاری تقویت شدند. نتایج نشان داد که روش NSM ظرفیت دال را در نسبت a/d پایین ۴۹.۴٪ و در نسبت a/d بالا ۶۸.۹٪ افزایش داد. روش EB ظرفیت دال را در نسبت a/d پایین ۱۶.۹٪ و در نسبت a/d بالا ۸۷.۶٪ افزایش داد. ترکیبی از هر دو روش نیز استفاده شد که منجر به بالاترین بهبود ظرفیت بدون به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافتن انحراف نهایی شد.

### ۳.۲.۱.۳. تقویت داخلی

اوپینا و همکاران [۸۳] تحقیقی تجربی انجام دادند تا نحوه رفتار دال‌های دوطرفه GFRP-RC تحت برش پانچ را بررسی کنند. آن‌ها چهار اتصال دال-ستون ساختند و آزمایش کردند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های پیوند و سختی FRP بر شکست پانچ تأثیر می‌گذارد و سختی بالاتر میلگردها ظرفیت پانچ را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده شد که شکست با پارگی FRP آغاز نمی‌شود. علاوه بر این، نتیجه‌گیری شد که عملکرد پیوند میلگردها بر رفتار بار-انحراف تأثیر می‌گذارد. ذکر شد که استاندارد [84] ACI 318-99 و [85] BS 8110-97 برای برآورد مستقیم ظرفیت پانچ دال‌های FRP-RC مناسب نیستند، اما معادله Matthys [86] و Taerwe [86] برای ارزیابی ظرفیت پانچ دال‌های FRP-RC معتبرتر است.

ال‌سید و همکاران [۸۷] مقاومت برشی دال‌های FRP-RC یک‌طرفه را ارزیابی کردند. برای این منظور، هشت دال آماده شد تا تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای آزمایش شوند. عوامل مختلفی مانند نسبت تقویت، نوع و قطر میلگردها مورد بررسی قرار گرفت. میلگردهای CFRP و GFRP پوشش داده‌شده با شن انتخاب شدند و پنج دال با GFRP و بقیه با CFRP تقویت شدند. همه دال‌ها پیش از رسیدن به مقاومت خمشی طراحی‌شده در برش شکستند. محققان اشاره کردند که مقاومت برشی دال‌ها با افزایش نسبت تقویت افزایش می‌یابد، به‌ویژه این اثر در دال‌های CFRP-RC قابل توجه است. این مطالعه نتیجه‌گیری کرد که سفتی محوری میلگردها بر مقاومت برشی بتن تأثیر می‌گذارد. مقایسه نتایج آزمایش‌ها با راهنمایی‌های [88] ACI 440.1R-03، [89] CSA S806-02 و توصیه‌های [90] JSCE نشان داد که راهنمای ACI برای پیش‌بینی مقاومت برشی خیلی محافظه‌کارانه است.

### ۳.۲.۲. تیر

#### ۳.۲.۲.۱. تقویت چسبیده به‌طور خارجی

تریانافیلو [۹۱] استفاده از پارچه FRP چسبیده به طور خارجی را در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح مطالعه کرد. این تحقیق تجربی شامل تقویت یازده تیر با پارچه CFRP با پیکربندی‌های مختلف الیاف و کسر مساحت بود. بر اساس یافته‌های این تحقیق، اثربخشی تقویت برشی زمانی به حداکثر می‌رسد که جهت‌گیری الیاف در پارچه FRP نزدیک به جهت عمود بر ترک مورب باشد. در مطالعه تحلیلی، مدلی برای ارزیابی میزان تقویت ظرفیت برشی تیرهای تقویت‌شده با پارچه‌ها توسعه داده شد. نشان داده شد که افزایش سفتی محوری FRP می‌تواند به طور خطی کارایی تکنیک تقویت را افزایش دهد.

تحقیقی توسط تنگ و همکاران [۹۲] انجام شده است تا یکی از انواع اصلی شکست در تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با ورق‌های FRP، که به‌عنوان جدا شدن ناشی از ترک میانه شناخته می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه با هدف ایجاد مدلی جامع و خاص برای تجزیه و تحلیل شکست جدا شدن در تیرهای بتن مسلح (RC) تقویت‌شده با ورق‌های FRP طراحی شد. مدل مقاومت جدا شدن معرفی شد که برآورد قابل اعتمادی از مقاومت تیرهای RC زمانی که با ورق‌های FRP تقویت شده باشند، ارائه می‌دهد. علاوه بر این، روشی که مدل پیشنهادی را در تقویت تیرهایی که ظرفیت خمشی ندارند، گنجانده است نیز ارائه شد.

مدل اجزای محدود توسط هوانگ و همکاران [۹۳] برای تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با ورق FRP پیشنهاد شد. صحت مدل پیشنهادی با استفاده از سه مطالعه آزمایشی مختلف در ادبیات موجود اعتبارسنجی شد: آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای، آزمایش‌های خمشی چهار نقطه‌ای، و آزمایش برش چهار نقطه‌ای. تحلیل‌ها نشان دادند که ترک‌های مورب تأثیر منفی بر اثربخشی تقویت FRP دارند. تلاش‌های عددی نشان می‌دهند که نادیده گرفتن اثرات لغزش مماسی و جدایش عمودی در interface ورق FRP و بتن منجر به ارزیابی بیش از حد ظرفیت و انعطاف‌پذیری تیر می‌شود. ضریب اصطکاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتیجه حاصل از مدل داشته باشد، زیرا یک ضریب اصطکاک نادرست می‌تواند حالت شکست را تغییر دهد.

### ۳.۲.۲.۲. نصب نزدیک به سطح

در مطالعه‌ای که توسط لورنزیس و نانی [۹۴] انجام شد، میله‌های CFRP نصب نزدیک به سطح (NSM) برای تقویت برشی تیرهای بتن مسلح استفاده شد. در این مطالعه، مجموعاً هشت تیر آزمایش شدند که شامل دو نمونه کنترل و شش تیر تقویت‌شده با پیکربندی‌های مختلف میله‌های CFRP بودند. سایر متغیرها شامل وجود میلگردهای فولادی، فاصله میله‌های CFRP و چینش میله‌های CFRP بودند. با استفاده از تکنیک NSM، افزایش ظرفیت تیر تا ۱۰۶٪ حاصل شد و یک مدل ساده نیز برای پیش‌بینی نتایج تجربی این مطالعه ارائه شد. نتیجه پیش‌بینی شده از مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌ها تطابق خوبی داشت.

اثر بخشی روش‌های NSM و EB برای تقویت خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح در مطالعه‌ای توسط باروس و همکاران [۹۵] مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت برای هر دو روش تقویت انتخاب شد. تقویت خمشی و برشی در طول مرحله آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت. سه سری تیر مختلف برای مطالعه خمشی آماده و آزمایش شدند و هر سری شامل چهار نوع نمونه بود: (۱) تیر بدون تقویت خمشی، (۲) تیر با لامینت CFRP نصب نزدیک به سطح (NSM)، (۳) تیر با لامینت CFRP چسبیده به طور خارجی (EB)، (۴) و تیر آخر با ورق‌های CFRP چسبیده به طور خارجی. برای تقویت برشی، چهار سری تیر استفاده شدند که شامل (۱) تیر بدون تقویت برشی، (۲) تیر با میلگردهای فولادی به‌عنوان تقویت برشی، (۳) تیر با نوارهای CFRP به شکل U (۴ و ۵)، و دو تیر با پیکربندی‌های مختلف لامینت‌های CFRP بودند. در مقایسه با روش EB، نتایج نشان داد که تقویت برشی با استفاده از روش NSM رفتار بهتری از نظر تغییر شکل، ظرفیت باربری و رفتار انعطاف‌پذیرتر فراهم می‌آورد. آزمایش‌های خمشی نیز نشان دادند که روش NSM مؤثرترین روش برای افزایش ظرفیت تیر است.

### ۳.۲.۲.۳. تقویت داخلی

مقاومت پیوند میله‌های GFRP در تیرهای بتن مسلح توسط تیگیوارت و همکاران [۹۶] مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه شامل ۶۴ تیر بتن مسلح و ۱۸ نمونه آزمایشی کشش با دو نوع میله GFRP و چهار قطر مختلف بود. علاوه بر این، سه طول مختلف دهن میله‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از میله‌های GFRP منجر به مقاومت پیوند پایین‌تر از فولاد می‌شود، چسبندگی و اصطکاک رفتار پیوند را کنترل می‌کنند، و قطر بزرگتر میله‌ها مقاومت پیوند کمتری دارد. افزایش طول دهن به میله کمک می‌کند تا به مقاومت نهایی

خود نزدیک شود. اثر میله بالایی نیز در تیرهای GFRP-RC مشاهده شد و یک عامل اصلاحی معادل ۱.۳۰ برای در نظر گرفتن این اثر پیشنهاد شد. نویسندگان همچنین مدلی برای منطقه صعودی منحنی پیوند-لغزش ارائه دادند.

تورین و فروش [۹۷] رویکرد ساده‌ای برای طراحی برشی تیرهای FRP-RC پیشنهاد دادند. برای اعتبارسنجی مدل خود، نویسندگان داده‌هایی از ۳۷۰ تیر FRP-RC از ۲۵ مطالعه مختلف موجود در ادبیات جمع‌آوری کردند. معادله ساده شده‌ای که در این مطالعه ارائه شده است، می‌تواند برای طراحی برشی تیرهای فولادی RC و FRP-RC استفاده شود. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از ادبیات، مقایسه‌ای بین مقادیر به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی و معادله طراحی در [98] ACI 318-02 انجام شد. این مقایسه نشان داد که معادله پیشنهادی عامل ایمنی بالاتری را ارائه می‌دهد.

### ۳.۲.۳. دیوار

#### ۳.۲.۳.۱. تقویت چسبیده به‌طور خارجی

مطالعه‌ای توسط المسالم و السلوم [۹۹] انجام شده است تا امکان‌سنجی و اثربخشی ورق‌های GFRP چسبیده به‌طور خارجی (EB) در تعمیر یا تقویت دیوارهای پرکننده غیرمسلح تحت بارهای لرزه‌ای درون‌صفحه‌ای و چرخه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از ورق‌های GFRP پتانسیل زیادی برای بهبود عملکرد دیوارهای پرکننده از طریق افزایش ظرفیت تغییر شکل و یکپارچگی دیوار در معرض بارگذاری لرزه‌ای درون‌صفحه‌ای دارد.

بینجی و همکاران [۱۰۰] استفاده از کامپوزیت‌های FRP چسبیده به‌طور خارجی (EB) را برای مقاوم‌سازی دیوارهای پرکننده در برابر بارهای جانبی مورد بررسی قرار دادند. این مقاله طراحی و تحلیل یک ساختمان دارای نقص ساختاری در ترکیه را ارائه می‌دهد. از یک مدل ساده‌شده برای پیش‌بینی عملکرد دیوارهای تقویت‌شده استفاده شده است. نویسندگان اشاره کردند که این رویکرد فقط در صورتی قابل اجرا است که ساختار دارای دیوارهای پرکننده به‌خوبی توزیع‌شده در نقشه باشد و هیچ آسیبی در گذشته نداشته باشد. نتایج این مطالعه انتظار می‌رود که به تصمیم‌گیری در کاربردهای مقاوم‌سازی کمک کند زیرا مدل پیش‌بینی‌های واقع‌بینانه‌ای از ظرفیت تغییر شکل و مقاومت تولید می‌کند. برای مطالعه رفتار برشی دیوارهای بنایی که با سیستم‌های EB FRP و بتن تقویت‌شده با منسوجات (TRC) مقاوم‌سازی شده‌اند، مطالعه‌ای تجربی توسط بوی و همکاران [۱۰۱] انجام شده است. مجموعاً شش دیوار بنایی ساخته و با کامپوزیت‌های GFRP، CFRP و TRC تقویت شدند. سپس این دیوارها تحت بارگذاری فشاری برشی آزمایش شدند تا تقاضای لرزه‌ای را شبیه‌سازی کنند. برای افزایش کارایی، اتصال مکانیکی، نوارهای کامپوزیتی را به پیوند وصل می‌کند. نتیجه‌گیری شد که اتصال جزء ضروری سیستم است و بدین‌وسیله عملکرد دیوارها بهبود می‌یابد. این مطالعه نشان داد که سیستم EB FRP یکپارچگی ساختاری را با تقویت مناسب بهبود می‌بخشد. در خصوص ظرفیت جابه‌جایی نهایی، GFRP و TRC مناسب‌تر از CFRP هستند. سیستم TRC همچنین انعطاف‌پذیری بیشتری فراهم می‌آورد، اما مقاومت جانبی کمتری دارد.

#### ۳.۲.۳.۲. نصب در سطح نزدیک

یک مطالعه تحلیلی توسط لی و همکاران [۱۰۲] انجام شد تا مدلی برای تخمین اثربخشی میله‌های FRP نصب‌شده در سطح نزدیک (NSM) در مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی غیرمسلح توسعه یابد. دوازده دیوار ساخته شده و تحت فشاری مورب آزمایش شدند تا مدل کالیبره شود. نتایج نشان داد که استفاده از FRP در این کاربرد به‌طور کارآمدی عملکرد ساختاری دیوارها را افزایش می‌دهد و مدل با داده‌های تجربی به‌طور معقولی توافق دارد. بزرگترین افزایش در ظرفیت برشی در حدود ۸۰٪ در دیوارهایی بود که میله‌ها در اتصالات لایه خوابیده قرار داده شده بودند. دیوارهای تقویت‌شده داکتیلیتی به‌مراتب بالاتری دارند و پس از شکست پایداری بیشتری فراهم می‌آورند، به‌طوری‌که احتمال فروپاشی کاهش می‌یابد. الجبری و همکاران [۱۰۳] مطالعه‌ای مقایسه‌ای انجام دادند تا عملکرد دیوارهای بنایی تقویت‌شده با سیستم‌های FRP نصب‌شده در سطح نزدیک (NSM) و ماتریکس سیمانی تقویت‌شده با الیاف (FRCM) را ارزیابی کنند. در این مطالعه، مجموعاً دوازده دیوار بنایی انتخاب شدند و این دیوارها با استفاده از میله‌های CFRP یا GFRP در سیستم NSM یا با استفاده از کربن یا پلی‌پارا فنیلین

بنزوایسوکسازول (PBO) در سیستم FRCM تقویت شدند. دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند و پارامترهای بحرانی مورد بررسی در این مطالعه شامل الگوی پیوند، نوع و مقدار میله‌های NSM یا FRCM بود. نتایج نشان داد که نوع الیاف استفاده شده تاثیر زیادی بر رفتار دیوار دارد. بیشترین بهبود در خمیدگی ۹۷٪ و ۷۵٪ برای سیستم‌های FRCM و NSM به ترتیب بود. علاوه بر این، افزایش ۳۸٪ و ۶۲٪ در اتلاف انرژی با استفاده از سیستم‌های FRCM و NSM به ترتیب مشاهده شد. در این مطالعه، حالت‌های مختلف شکست مانند خرد شدن بلوک‌های بتنی، جداسدن سیستم یا پارچه NSM و لغزش پارچه در ماتریکس سیمانی مشاهده شد.

### ۳.۲.۳.۳. تقویت داخلی

قاضی‌زاده و همکاران [۱۰۴] به‌طور تحلیلی امکان استفاده از ترکیب میله‌های GFRP و فولاد برای تقویت دیوارهای برشی بتنی را بررسی کردند. به دلیل عدم داکتیلیته، میله‌های GFRP نمی‌توانند در سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی در مناطقی که در معرض خطر زلزله شدید هستند، استفاده شوند. طراحی ترکیبی می‌تواند هم داکتیلیته و هم ویژگی‌های خودمرکزی را بهبود بخشد. مدل با داده‌های موجود در ادبیات موجود اعتبارسنجی شد و تلاش شد تا مناسب‌ترین پیکربندی ترکیبی ارائه شود. این مطالعه نشان داد که پیکربندی ترکیبی قدرت و داکتیلیته مشابهی با فولاد معمولی دارد در حالی که ظرفیت خودمرکزی بالاتری دارد. رفتار این سیستم که در معرض زمین‌لرزه گذشته قرار داشت، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مطالعه شد. نتیجه‌گیری شد که زمانی که به‌طور مناسب ساخته شود، سختی و قابلیت خدمات سیستم مذکور معادل سیستم‌های معمولی است. در مقاله دیگری توسط غازی‌زاده و همکاران [۱۰۵]، یک مطالعه پارامتری بر روی دیوارهای برشی RC ترکیبی-GFRP فولاد انجام شد. مدل ابتدا برای بررسی حضور بار محوری و پیکربندی میله‌های GFRP استفاده شد. استاندارد [106] CSA A23.3-14 برای بررسی اعتبار تحلیل عددی به کار رفت. ویژگی‌های خودمرکزی و جنبه‌های مالی استفاده از این سیستم ترکیبی نیز مورد بحث قرار گرفت. نتیجه این مطالعه می‌تواند به طراحان کمک کند تا دیوار برشی قابل اعتمادتر و عملی‌تری طراحی کنند. استفاده از میله‌های GFRP در نیم‌عرض مرکزی دیوار مفید است و منجر به شکست داکتیل بدون پارگی GFRP می‌شود در حالی که قدرت کافی و جابجایی‌های باقی‌مانده بسیار کمتری نشان می‌دهد. این مطالعه نشان داد که فشار محوری به‌طور قابل توجهی خودمرکزی دیوارها را بهبود می‌بخشد. تحلیل اعتبار نشان داد که ضریب کاهش مقاومت ۰.۸۰ می‌تواند برای محاسبه ظرفیت دیوارها در خمیدگی استفاده شود.

### ۳.۲.۴. ستون‌ها

#### ۳.۲.۴.۱. لوله FRP

میرمیران [۱۰۷]، ۳۵ نمونه را تحت فشار یک‌محوره با سه مقاومت مختلف بتن و سه ضخامت متفاوت لایه FRP آزمایش کرد. بر اساس این آزمایش‌ها، سمان و همکاران [۱۰۸] مدلی برای تخمین پاسخ تنش-کرنش بی‌خطی ستون‌های بتنی محصور شده با FRP پیشنهاد کردند. این مدل بر اساس رابطه‌ای بین نرخ انبساط بتن و سختی حلقه‌ای کامپوزیت FRP است. ویژگی‌های مواد FRP و بتن به‌طور نزدیک به پارامترهای مدل مرتبط است. این مدل منحنی‌های تنش-کرنش را ارائه می‌دهد که با نتایج تجربی تحقیقات قبلی در مورد ستون‌های محصور شده با FRP و FRP پیچیده سازگار است.

#### ۳.۲.۴.۲. تقویت به‌طور خارجی

میرمیران و شاه‌اوی [۱۰۹] عملکرد ستون‌های بتنی محصور شده با لوله‌های FRP را مورد مطالعه قرار دادند تا رفتار آنها را بهتر درک کرده و به‌منظور طراحی صحیح این المان‌ها، بهبود حاصل از سیستم محصورکننده را پیش‌بینی کنند. در زمان انتشار این مقاله، مدل‌های موجود تنها توسعه‌های ساده‌ای از مدل‌های پیشنهاد شده برای ستون‌های بتنی مسلح بودند. طبق این مطالعه، مدل‌های موجود در ادبیات معمولاً قدرت را بیش از حد تخمین زده و منجر به طراحی‌های ناامن می‌شوند. این مطالعه نشان می‌دهد که برخلاف فولاد، FRP تمایل بتن به انبساط را با معکوس کردن جهت کرنش حجمی کاهش می‌دهد.

شاهوی و همکاران [۱۱۰]، ۴۵ سیلندر بتنی پیچیده شده با CFRP را با استفاده از دو مقاومت مختلف بتن و لایه های مختلف CFRP ارزیابی کردند. این تلاش تجربی برای اعتبارسنجی مدلی از محصورکنندگی که برای لوله های GFRP پر شده با بتن پیشنهاد شده بود، انجام شد. مشخص شد که اتصال چسبی بین لایه CFRP و بتن تأثیر قابل توجهی در عملکرد محصورکنندگی ندارد. بنابراین، این مدل می تواند برای هر دو سیستم لوله های FRP و پیچ های FRP به کار رود. همان مدل همچنین می تواند برای هر دو CFRP و GFRP استفاده شود، در حالی که پتانسیل بتن برای انبساط بسته به سختی ماده کامپوزیت در نظر گرفته می شود. برای تعیین کرنش شکست مؤثر حلقه پوشش، تحلیل قابلیت اطمینان مورد نیاز است. پوشش به طور قابل توجهی داکتیلیته سیستم را با محدود کردن انبساط جانبی بتن بهبود می بخشد.

### ۳.۲.۴.۳. تقویت نصب نزدیک سطح

در مطالعه ای توسط مصطفی نژاد و مشیری [۱۱۱]، تحقیق تجربی برای ارزیابی کارایی روش شیارزنی (GM) در بهبود عملکرد فشاری ستون های بتن مسلح (RC) انجام شد. ویژگی این روش توانایی آن در محدود کردن انحنا جهانی کامپوزیت ها است. روش GM پیشنهاد شده در این مطالعه با تکنیک های NSM و EB مقایسه شد و ۲۲ ستون تحت فشار ارزیابی شدند. طبق نتایج، روش GM به طور قابل توجهی بارهای نهایی ستون ها را افزایش داد. علاوه بر این، نشان داده شد که استفاده از روش GM ظرفیت تنش فشاری بیشینه کامپوزیت ها را بر اساس تنش های فشاری میانگین الیاف کربن به طور قابل توجهی افزایش می دهد.

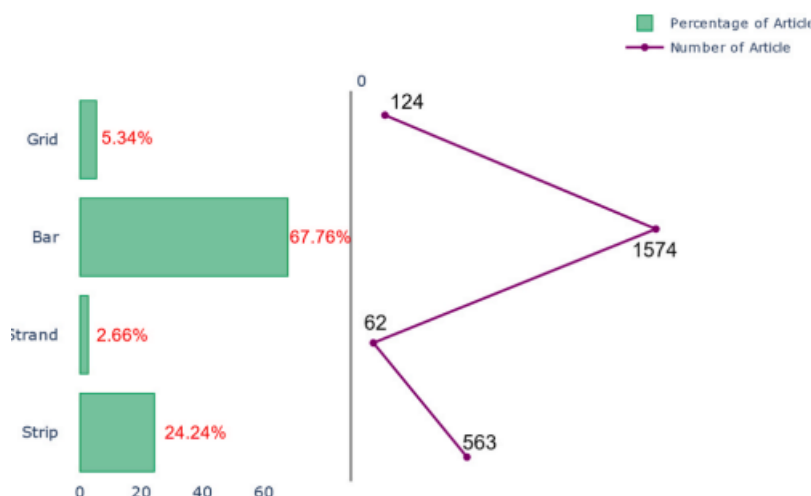
استفاده ترکیبی از لایه CFRP نصب شده نزدیک سطح (NSM) و پارچه های CFRP برای بهبود داکتیلیته و قدرت ستون های بتنی توسط چلبندیان و همکاران [۱۱۲] انجام شد. در این مطالعه، مجموعاً ۱۰ ستون بتنی مربعی ساخته و تحت نیروی فشاری محوری ارزیابی شدند تا کارایی روش های تقویت شده بررسی شود. مدل های موجود از ادبیات برای تخمین ظرفیت ستون ها به کار گرفته شدند. یک رابطه قوی بین ظرفیت محاسبه شده و نتایج تجربی مشاهده شد. مقایسه این نتیجه با نمونه کنترل نشان داد که قدرت نهایی و داکتیلیته به ترتیب ۲۶٪ و ۵۰٪ افزایش یافته است. محصورکنندگی پارچه های CFRP کمک کرد تا میکرو انحنای لایه های NSM به تعویق بیفتد. این رفتار با الگوی شکست و الگوی آسیب مشاهده شده در روش ترکیبی برجسته شد.

### ۳-۳ کاربردها

در این بخش، چهار کاربرد ماده FRP در مهندسی سازه که بر صنعت ساخت و ساز تأثیر می گذارند، خلاصه شده اند. اولین کاربرد شبکه های FRP است، که مواد تقویت کننده سازه ای هستند و قابلیت تحمل بار را فراهم می کنند و معمولاً در کاربردهایی مانند دک های پل و روسازی های بتنی استفاده می شوند. در این موارد، سختی بالا و وزن کم آن ها مزایای زیادی را ارائه می دهند. علاوه بر شبکه های FRP، میلگردها، نوارها و تاندون های FRP برای تقویت سازه های بتنی به کار می روند. میلگردهای FRP مقاومت کششی عالی دارند و به طور فزاینده ای در کاربردهای مختلف جایگزین تقویت کننده های فولادی سنتی می شوند. از سوی دیگر، نوارهای FRP برای تقویت برش در تیرها و ستون های بتنی استفاده می شوند. علاوه بر این، تاندون های FRP از الیاف پیش تنیده که در یک غلاف حفاظتی محصور شده اند، در کاربردهای پس تنیدگی استفاده می شوند که باعث افزایش استحکام و کاهش تغییر شکل سازه ای می شوند.

بخش کاربردها به چهار دسته تقسیم شده است، همانطور که قبلاً ذکر شد. یک نمایش هم زمان از درصد و تعداد مقالات در شکل ۱۲ ارائه شده است. بر اساس این داده ها، مشخص می شود که بخش عمده ای از تحقیقات، یعنی ۶۷.۷۶٪، مربوط به کاربرد میلگرد است.

در مورد رتبه بندی ها، دسته برجسته بعدی نوار است که ۲۴.۲۴٪ از تمام مقالات را شامل می شود. اما شبکه و رشته توجه کمتری را جلب کرده اند به ترتیب با ۵.۳۴٪ و ۲.۶۶٪. این دسته ها در حال حاضر موضوعات داغی در این زمینه نیستند، که نشان دهنده یک حوزه از فرصت و نیاز به تحقیقات و توسعه بیشتر در آینده است.



شکل ۱۲ - درصد کاربردها از نظر انتشار مقاله در زمینه FRP

### 3.3.1. میلگرد

پرکاربردترین مصالح ساختمانی، بتن مسلح به فولاد است. با این حال، به طور کلی پذیرفته شده است که خوردگی میلگردهای فولادی می تواند منجر به خرابی یا شکست اجزای سازه ای تحت شرایط خاص محیطی شود. تعمیر و تقویت سازه های بتنی خورده شده، هزینه ای جهانی است که سالانه میلیاردها دلار هزینه در پی دارد و این امر مطالعاتی را برای توسعه رویکردهای جدید برانگیخته است.

برای ارزیابی رفتار پیوند میلگردهای FRP تحت شرایط کشش مستقیم، Achillides و Pilakoutas [135] یک سری آزمایش های تجربی با استفاده از انواع مختلف میلگردهای FRP که در نمونه های بتنی قرار گرفته بودند، انجام دادند. آزمایش ها شامل شرایط کشش مستقیم است که در آن میلگردهای FRP تحت نیروهای کششی محوری قرار می گیرند تا شکست رخ دهد. این آزمایش ها به طور دقیق طراحی شده اند تا تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار پیوند، مانند قطر میلگرد، طول فرورودن، مقاومت بتن و آماده سازی سطح، بررسی شود. نتایج آزمایش ها سپس ارائه و تحلیل شدند. نویسندگان به بحث در مورد مقاومت پیوند، رفتار لغزش و حالت های شکست مشاهده شده در آزمایش ها پرداختند. آن ها همچنین اثرات پارامترها بر رفتار پیوند را مورد بررسی قرار دادند. از طریق این آزمایش ها، درک بهتری از رفتار میلگردهای FRP در شرایط کشش مستقیم فراهم شد. شکست پیوند میلگردهای FRP با میلگردهای فولادی در مقاومت بتن های بالای ۳۰ مگاپاسکال متفاوت است، که باعث کندگی سطح میلگرد می شود. از طرف دیگر، مقاومت بتن های پایین تر از ۱۵ مگاپاسکال باعث خرد شدن بتن در جلوی تغییر شکل های میلگرد می شود، که نشان می دهد مقاومت پیوند میلگردهای FRP تحت تأثیر مقاومت برشی بین لایه ها است نه مقاومت بتن.

عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای FRP توسط Benmokrane و Masmoudi [136] مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که الگوی ترک ها و فاصله ها در تیرهای FRP و فولاد-بتنی مشابه است در بار کم، اما در تیرهای FRP-بتنی ترک های بیشتری با عرض های بزرگتر ایجاد می شود. این مطالعه در سال ۱۹۹۶ انجام شد، قبل از توسعه کد یا دستورالعمل طراحی تیرهای GFRP-بتنی. نویسندگان اشاره کردند که حتی اگر عرض ترک ها بزرگتر از میلگردهای فولادی باشد، محدودیت عرض ترک قابل قبول می تواند به دلیل مقاومت در برابر خوردگی میلگردهای FRP تغییر کند.

در سال ۲۰۱۲، Tobbi et al. [137] یک برنامه آزمایشی جامع انجام دادند که شامل ستون های بتنی مسلح با میلگردهای GFRP بود. ستون ها تحت بارهای محوری و جانبی قرار گرفتند تا رفتار آن ها تحت شرایط مختلف بارگذاری ارزیابی شود. متغیرهای آزمایشی شامل نسبت تقویت، قطر میلگرد، و پیکربندی تقویت طولی و عرضی بودند. مطالعه نتایج آزمایشی را در خصوص ظرفیت باربری، تغییرات عمودی، تغییرات افقی، الگوهای شکست و روند ترک خوردن ارائه و بررسی کرد. این دیدگاه ها عملکرد ستون های GFRP-بتنی را روشن کردند.

نویسندگان همچنین عملکرد ستون‌های GFRP بتنی را با ستون‌های معمولی بتنی مقایسه کردند و مزایا و محدودیت‌های تقویت با میلگردهای GFRP را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها به بحث در مورد مزایای استفاده از میلگردهای GFRP، مانند افزایش دوام، کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود پایداری پرداختند.

برای توسعه یک روش طراحی ساده برای تیرهای مسلح با FRP و ارزیابی امکان استفاده از یک رویکرد یکپارچه برای اعضای مسلح با فولاد و FRP، Tureyen و Frosch [97] یک بررسی جامع از عواملی که بر رفتار برشی تأثیر می‌گذارند ارائه دادند. این مطالعه مدل‌هایی برای تعیین مشارکت بتن در مقاومت برشی در تیرهای بتن مسلح ارائه کرد که با مقایسه ظرفیت‌های برشی محاسبه‌شده با نتایج تجربی از ۳۷۰ نمونه مورد تأیید قرار گرفت. آن‌ها به بحث در مورد پارامترهای مختلف، از جمله خواص مواد بتن مانند مقاومت فشاری، ویژگی‌های دانه‌ها و دیگر ملاحظات ساختاری مانند تقویت برشی، شرایط بارگذاری و هندسه اعضا پرداختند. مقاله بر اهمیت در نظر گرفتن عوامل مربوط به مواد و ساختار برای پیش‌بینی و ارزیابی دقیق مقاومت برشی بتن تأکید می‌کند. این مدل به‌طور ساده‌تر برای ارائه معادله طراحی که مقادیر محافظه‌کارانه‌ای را در برابر عوامل مختلف مؤثر بر مقاومت برشی ارائه می‌دهد، ارائه شده است. بر اساس این یافته‌ها، آن‌ها معادله‌ای پیشنهاد کردند که می‌تواند برای طراحی تیرهای بتن مسلح با هر دو تقویت‌کننده فولادی و FRP استفاده شود.

در نهایت، میلگردهای FRP، به‌ویژه میلگردهای FRP در شکل‌های مختلف، ویژگی‌های منحصر به فردی نسبت به تقویت‌کننده‌های فولادی دارند. این میلگردها از مواد غیرایزوتروپیک ساخته شده‌اند که قدرت طولی استثنایی را نشان می‌دهند، اما قدرت عرضی آن‌ها نسبتاً ضعیف است. این ویژگی به‌ویژه مهم است زیرا بر طراحی و کاربرد میلگردهای FRP تأثیر می‌گذارد، به‌ویژه زمانی که آن‌ها برای ایجاد قلاب‌ها خم می‌شوند و بر قدرت کششی کلی و یکپارچگی سازه‌ای آن‌ها تأثیر می‌گذارد [138].

فرآیند خم کاری میلگردهای FRP بسیار حیاتی است زیرا می‌تواند به‌طور قابل توجهی استحکام آن‌ها را در نواحی خم‌شده کاهش دهد، عمدتاً به دلیل طبیعت غیرایزوتروپیک مواد FRP. دستورالعمل‌های موسسه بتن آمریکا، به‌ویژه ACI 440.6، تعیین می‌کنند که تنها میلگردهای FRP ساخته‌شده با رزین ترموستینگ مجاز هستند و خم کاری تنها زمانی مجاز است که رزین در حالت مایع خود قرار داشته باشد [۱۳۹]. این به این دلیل است که فرآیند تولید می‌تواند منجر به "صاف شدن" در گوشه‌های خم شود که ضخامت میلگرد را در آن نواحی کاهش داده و باعث کاهش نامساوی الیاف داخلی می‌شود. چنین تغییراتی باعث ایجاد تنش‌های شعاعی و احتمال شکست زود هنگام زمانی که میلگرد تحت کشش قرار می‌گیرد، می‌شود. برخلاف قلاب‌های فولادی که برای سازگاری با خم‌ها تغییر شکل پلاستیک را تجربه می‌کنند بدون اینکه استرس تسلیم را به خطر بیندازند، میلگردهای FRP نمی‌توانند به چنین پلاستیسیته‌ای تکیه کنند و بنابراین نیاز به دقت بیشتری در کاربرد آن‌ها دارند [140].

برای کاهش این چالش‌ها، ACI 440.1 الزامات خاصی را برای استفاده از میلگردهای FRP خم‌شده یا ماریچ‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده برشی ارائه می‌دهد. پیشنهاد می‌شود از خم‌های تیز که می‌توانند منجر به تمرکز تنش‌ها و کاهش قابل توجه استحکام کششی شوند، اجتناب شود، که ممکن است استحکام میلگرد را تا ۵۰٪ ظرفیت آن کاهش دهد. دستورالعمل‌ها حداقل شعاع خم کاری برابر سه برابر قطر میلگرد و حداقل طول دم میلگرد را برای اطمینان از انتقال مؤثر تنش به بتن توصیه می‌کنند. علاوه بر این، حداکثر فاصله قلاب‌ها که تعیین شده است، اطمینان می‌دهد که ترک‌های برشی احتمالی مسدود شوند و یکپارچگی ساختاری عضو بتن مسلح حفظ شود. این الزامات تخصصی نیاز به طراحی و اجرای دقیق برای استفاده از قلاب‌های FRP را برای بهره‌برداری از مزایای آن‌ها در حالی که به خواص منحصر به فرد مواد آن‌ها رسیدگی می‌کند، تأکید می‌کند [141].

### 3.3.2. نوار

نوارها و ورق‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف (FRP) پیشرفت بزرگی در مهندسی سازه به شمار می‌روند و راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای تقویت و بازسازی عناصر مختلف زیرساختی ارائه می‌دهند. این مواد در بهبود یکپارچگی ساختاری و طول عمر ساختمان‌ها و پل‌ها نقش حیاتی دارند و از آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی و مکانیکی حمایت و مقاومت لازم را فراهم می‌آورند. میلگردها و نوارهای FRP نصب شده نزدیک به سطح به‌طور مؤثر از شکست‌های لایه‌ای جلوگیری می‌کنند و یک جایگزین قابل اعتماد برای تقویت‌های چسبانده شده خارجی ارائه

می‌دهند، به‌ویژه در مناطقی که آسیب‌پذیر به آسیب هستند. این روش برای تقویت خمشی در مناطق منفی گشتاور در دال‌ها و عرشه‌ها ایده‌آل است. این تکنیک که در اروپا در سال ۱۹۴۷ آغاز شد، کارایی آن توسط آزمایش‌های اسپلوندر در سال ۱۹۴۹ تأیید شد که نشان می‌دهد میلگردهای فولادی قرار گرفته در شیارها مشابه تقویت‌های چسبانده شده خارجی عمل می‌کنند. [142]

در تحقیقی که توسط بانک و آرورا [۱۴۳] انجام شد، ظرفیت باربری و عملکرد تیرهای بتنی مسلح با نوارهای FRP متصل مکانیکی بررسی شد. هدف از مطالعه بانک و آرورا مقایسه کارایی این تیرهای تقویت‌شده با تکنیک‌های تقویت سنتی‌تر بود. تیرهای بتنی مسلح به‌طور تجربی آزمایش و با نوارهای FRP تقویت شدند. پارامترهای بحرانی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند شامل پاسخ بار-تغییر مکان، گسترش ترک‌ها، ظرفیت بار نهایی و انواع شکست‌های تیرهای تقویت‌شده بود. نتایج تجربی تجزیه و تحلیل و با نتایج تیرهای تقویت‌شده سنتی مقایسه شد. یافته‌ها نشان دادند که استفاده از نوارهای FRP متصل مکانیکی ظرفیت باربری و سفتی تیرها را بهبود می‌بخشد. نوارهای FRP به‌طور مؤثری گسترش ترک‌ها را کند می‌کنند در حالی که انعطاف‌پذیری و عملکرد کلی تیرها را افزایش می‌دهند. مطالعه همچنین انواع شکست‌های مشاهده شده در این تیرهای تقویت‌شده را ذکر کرد که شامل جداشدن FRP، خرد شدن بتن و پارگی FRP بود. رفتار تیرهای تقویت‌شده با FRP تجزیه و تحلیل شد و بینش‌هایی در مورد کارایی نوارهای FRP متصل مکانیکی و تعامل آن‌ها با بستر بتن ارائه شد.

یازمان و همکاران [۱۴۴] چندین آزمایش روی تیرهای T بتنی مسلح انجام دادند که با نوارهای CFRP متصل شده یا غیرمتصل در منطقه برشی تقویت شده بودند. نتایج نشان داد که هر دو تکنیک به‌طور مؤثر توانایی تیرهای T را در مقاومت در برابر نیروهای برشی افزایش می‌دهند. با این حال، رفتار و انواع شکست‌های دو تکنیک با تفاوت‌هایی در پاسخ بار-تغییر مکان، گسترش ترک‌ها و مکانیزم‌های جداشدگی متفاوت بود. این مقاله انواع شکست‌های مشاهده شده از جمله جداشدن CFRP، جداشدگی پوشش بتن و خرد شدن را مورد بحث قرار می‌دهد. مکانیزم‌ها و عواملی که بر کارایی تقویت برشی نوارهای CFRP و گسترش‌های غیرمتصل تأثیر می‌گذارند تجزیه و تحلیل و بینش‌هایی در مورد عملکرد و قابلیت کاربرد این تکنیک‌ها برای تقویت تیرهای T ارائه می‌دهند. انتخاب بین این دو روش بستگی به نیازهای ساختاری، ملاحظات طراحی و محدودیت‌های عملی دارد.

در مورد عملکرد اتصالات تیر-ستون بتنی مسلح، که با نوارهای FRP در پیکربندی‌های مختلف تقویت شده‌اند، موکریجی و جوشی [۱۴۵] آن‌ها را تحت بارگذاری چرخه‌ای شبیه‌سازی نیروهای زلزله مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای بحرانی که در این تحقیق بررسی شدند شامل پاسخ مفصل، ویژگی‌های تغییر شکل، استحکام و انواع شکست‌ها تحت تحریک چرخه‌ای بودند. مطالعه نشان می‌دهد که هم مواد کامپوزیت شبیه‌ای و هم کربنی برای مقاوم‌سازی و بازسازی اتصالات بتنی مسلح مناسب هستند. این مواد به‌طور قابل توجهی استحکام اتصالات را افزایش می‌دهند، صرف‌نظر از مشخصات تقویت یا میزان آسیب. استفاده از این کامپوزیت‌ها می‌تواند ظرفیت بار اولیه اتصالات را به‌طور چشمگیری افزایش دهد، و سفتی اولیه به تعداد لایه‌های اعمال شده به ناحیه مفصل بستگی دارد. اتصالات تقویت‌شده با CFRP سفت‌تر از اتصالات تقویت‌شده با GFRP هستند. استفاده از تعداد کمی از کامپوزیت‌ها همچنین می‌تواند ظرفیت جذب انرژی اتصالات را افزایش دهد. آزمایش‌های روی نمونه‌های تعمیر شده نشان داد که FRP استحکام اصلی اتصالات را حفظ کرده و ظرفیت بار اولیه، سفتی اولیه و ظرفیت جذب انرژی اتصالات را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

### 3.3.3. رشته‌ها

در حوزه زیرساخت و ساخت و ساز، کابل‌های فولادی سنتی مدت‌هاست که انتخاب ترجیحی بوده‌اند. این تاندون‌های فولادی که از رشته‌های سیم با استحکام بالا در پیکربندی‌های خاص تشکیل شده‌اند، مزایای قابل توجهی مانند استحکام کششی عالی، مهار و مدول الاستیسیته بالا را ارائه می‌دهند. با این حال، علی‌رغم مزایای خود، تاندون‌های فولادی سنتی از چندین معایب رنج می‌برند که شامل اثرات افت، آسیب شدید خوردگی، کارایی پایین باربری، عملکرد ضعیف در برابر خستگی و وزن خود بیش از حد است. رشته‌های FRP به عنوان جایگزینی برای این مشکلات ظاهر شده‌اند که دارای مقاومت بالا در برابر خستگی، ویژگی‌های ضد خوردگی و نسبت استحکام به وزن عالی هستند. به همین دلیل، رشته‌های FRP در تقویت ساختارهای جدید و بازسازی و تقویت ساختارهای موجود به کار رفته‌اند. با وجود تحقیقاتی



که در زمینه استفاده از کابل‌های FRP در ساخت و ساز انجام شده است، هنوز شکاف قابل توجهی بین یافته‌های مطالعاتی و کاربرد عملی استفاده از رشته‌های FRP پیش‌تنیده در ساخت ساختمان‌ها و انواع دیگر زیرساخت‌ها وجود دارد. این تفاوت ممکن است به دلایل مختلفی از جمله ویژگی‌های مکانیکی که رشته‌های FRP دارند، محدودیت‌ها در اجرای یافته‌های تحقیقاتی و نگرانی‌های ساختاری پیچیده مرتبط با استفاده از رشته‌های FRP توضیح داده شود. [146]

در سه دهه گذشته، مطالعات زیادی در مورد روش‌های مختلف مهار نوارهای FRP انجام شده است. یکی از مطالعات مهم در این زمینه توسط نانی و همکاران [۱۴۷] انجام شد. یک تحقیق تجربی برای ارزیابی عملکرد مکانیکی ده نوع مختلف نوارهای FRP آرمید، شیشه‌ای و کربنی انجام شد. تمرکز این مطالعه بر ارزیابی تأثیر دستگاه مهار پیشنهادی تولیدکننده بود. این مقاله جنبه‌های طراحی و ساخت سیستم‌های مهار نوار FRP را مورد بحث قرار می‌دهد، از جمله انتخاب تاندون‌های FRP، انواع مهارها و تکنیک‌های نصب. همچنین به چالش‌ها و ملاحظات استفاده از مواد FRP در کاربردهای بتن پیش‌تنیده پرداخته است. در نهایت، نتیجه‌گیری می‌کند که مهار عمدتاً ظرفیت بار نهایی را کنترل می‌کند، نه تاندون، که نشان‌دهنده پتانسیل بهبود کارایی مهار است. سه دسته سیستم‌های مهار (گوه‌ای، رزین پوت‌کرده و میخ‌دار) مزایا و معایب مختلفی را با پیچیدگی نصب متفاوت ارائه می‌دهند.

بیست سال بعد، در سال ۲۰۱۵، وانگ و همکاران [۱۴۸] از یک مطالعه تحلیل عددی نوآورانه برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل رفتار سیستم مهار تحت شرایط بارگذاری مختلف استفاده کردند. یک مهار نوآورانه برای کابل FRP با اندازه بزرگ با چندین تاندون پیشنهاد شد، و عوامل کلیدی که بر کارایی مهار تأثیر می‌گذارند با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) بهینه‌سازی شدند. نتایج مطالعه عددی ارائه و مورد بحث قرار گرفتند و بر پارامترهایی مانند توزیع تنش، انتقال بار و رفتار کلی سازه تمرکز کردند. این تحلیل بر چهار عامل کلیدی که بر کارایی مهار تأثیر می‌گذارند متمرکز بود: تغییر مدول، درجه مخروطی، طول مهار و ضخامت مؤلفه انتقال بار. یافته‌ها نشان داد که مهار پیشنهادی مزایای قابل توجهی از نظر پیوند از طریق ادغام مؤلفه انتقال بار و کابل FRP ارائه می‌دهد. علاوه بر این، مهار با تغییر زاویه پیچش روتینگ فیبر، مدول متغیر مؤلفه انتقال بار را به دست می‌آورد.

بریمیا و همکاران [۱۴۹] عملکرد و دوام تیرهای بتنی مسلح با تاندون‌های CFRP بدون پیوند را تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. آن‌ها به دنبال درک رفتار خستگی تیرهای پیش‌تنیده، ظرفیت باربری و انواع شکست‌ها بودند. آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های تیر بتنی مسلح با تاندون‌های CFRP بدون پیوند انجام شد. تیرها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند تا شرایط خستگی شبیه‌سازی شود. پارامترهای بحرانی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند شامل عمر خستگی، گسترش ترک‌ها و تغییرات در رفتار تیر تحت چرخه‌های بارگذاری تکراری بودند. تحقیق نتیجه‌گیری کرد که تیرهای بتنی پیش‌تنیده با تاندون‌های CFRP بدون پیوند می‌توانند مقاومت به خستگی را افزایش دهند. استفاده از تاندون‌های CFRP مزایای بالقوه‌ای در افزایش دوام و طول عمر خدمات نسبت به تاندون‌های فولادی سنتی ارائه می‌دهد.

#### 3.3.4 شبکه‌ها

شبکه‌های FRP در کاربرد دیگری در کنترل و جلوگیری از تشکیل ترک‌های انقباض پلاستیکی در المان‌های بتنی به کار می‌روند که معمولاً در مراحل اولیه سخت شدن به دلیل از دست رفتن سریع رطوبت رخ می‌دهند. یوست و همکاران [۱۵۰] تحقیقاتی در مورد عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح با شبکه FRP دو بعدی انجام دادند و بر تأثیر سطوح تقویت FRP طولی تمرکز کردند. آنها تیرها را تحت شرایط مختلف تقویت آزمایش کردند و نتایج را با پیش‌بینی‌های نظری بر اساس روش‌های استاندارد بتن مقایسه کردند. این مطالعه نشان داد که پیش‌بینی ظرفیت خمشی دقیق است اما برای استحکام برشی نتایج دقیقی به دست نیامد و دقت انحراف بستگی به نسبت تقویت دارد. علیرغم برخی تفاوت‌ها در پیش‌بینی‌ها، مدل بتن بی‌خطی تجزیه و تحلیل انحراف را به طور قابل اعتمادی ارائه داد. شبکه FRP به طور مؤثر انتقال نیرو را حفظ کرد، با الگوهای خاص ترک خوردگی و بدون کاهش یکپارچگی ساختاری.

شائو و همکاران [۱۵۱] مکانیسم‌ها و چالش‌های مرتبط با ترک‌های انقباض پلاستیکی را بررسی کردند و بر مزایای شبکه‌های CFRP به عنوان ماده تقویتی برای کاهش این مشکل تأکید کردند. محققان آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های بتنی با و بدون شبکه‌های CFRP

تحت شرایط محیطی کنترل شده که ترک‌های انقباض پلاستیکی را ایجاد می‌کردند، انجام دادند. عملکرد نمونه‌ها از طریق مشاهدات بصری، اندازه‌گیری عرض ترک‌ها و تجزیه و تحلیل الگوهای ترک بررسی شد. نتایج نشان داد که گنجاندن شبکه‌های CFRP به طور قابل توجهی وقوع و شدت ترک‌های انقباض پلاستیکی را با توزیع مؤثر تنش‌های کششی و ممانعت از پیشرفت ترک‌ها کاهش می‌دهد. این امر به دوام و یکپارچگی کلی بتن کمک می‌کند. این مقاله همچنین ملاحظات طراحی برای استفاده از شبکه‌های CFRP به عنوان اقدام پیشگیرانه در برابر ترک‌های انقباض پلاستیکی را مورد بحث قرار می‌دهد. به طور کلی، مطالعه نشان می‌دهد که شبکه‌های CFRP به عنوان راه‌حلی مؤثر در کنترل این نوع ترک‌ها در بتن عمل می‌کنند و بینش‌های ارزشمندی برای استفاده عملی از آنها در بهبود عملکرد و طول عمر ساختارهای بتنی ارائه می‌دهند.

مطالعه‌ای که توسط فانگ و همکاران [۱۵۲] انجام شد، بر روی رفتار خمشی دال‌های بتنی مرکب تقویت‌شده با صفحات صورت شبکه FRP متمرکز بود. از طریق آزمایش‌های تجربی، محققان دریافتند که این دال‌های مرکب ظرفیت باربری بالا، تقویت خمشی و سختی بیشتری نسبت به دال‌های RC سنتی دارند. صفحات صورت شبکه FRP به طور مؤثر بارهای اعمالی را توزیع و مقاومت می‌کنند و در عین حال محصورسازی فراهم می‌کنند و اجازه می‌دهند که پاسخ پس از اوج به تدریج انجام شود و ظرفیت انحراف افزایش یابد. مطالعه همچنین انواع مختلف حالت‌های شکست، از جمله ترک‌خوردگی خمشی، جداسازی و پارگی عناصر شبکه FRP را شناسایی کرد. این منجر به توصیه‌های طراحی برای نسبت تقویت، فاصله و تقویت مکمل شد. یافته‌ها به درک و بهینه‌سازی طراحی دال‌های بتنی مرکب تقویت‌شده با صفحات صورت شبکه FRP کمک می‌کند که برای کاربردهای مختلف ساختاری که نیاز به عملکرد خمشی و دوام بهبود یافته دارند، مناسب است.

برای مقایسه عملکرد خمشی دال‌های بتنی تقویت‌شده با شبکه‌های FRP با تقویت فولادی سنتی، آزمایش‌های تجربی توسط متیوس و تائرو [۱۵۳] انجام شد. بارهای خمشی یک‌طرفه به نمونه‌های آزمایشی تقویت‌شده با میله‌های فولادی یا شبکه‌های FRP اعمال شد. جنبه‌های بحرانی مانند پاسخ بار-انحراف، رفتار ترک‌خوردگی و ظرفیت باربری نهایی دال‌ها تمرکز اصلی مطالعه بود. دال‌های تقویت‌شده با فولاد و دال‌های تقویت‌شده با شبکه‌های FRP تحت آزمایش‌های سخت قرار گرفتند و نتایج به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که تقویت با شبکه FRP می‌تواند به طور مؤثر رفتار خمشی دال‌های بتنی را بهبود بخشد. شبکه‌های FRP به افزایش ظرفیت باربری، مقاومت بهتر در برابر ترک‌ها و عملکرد کلی بهبود یافته دال‌ها کمک می‌کنند. علاوه بر این، مطالعه به حالت‌های شکست مشاهده شده در هر دو نوع دال پرداخته و مکانیزم‌های رفتار را بررسی کرده است. تفاوت‌ها بین تقویت فولادی و تقویت با شبکه FRP از نظر سختی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بررسی شده است. یافته‌های تحقیق بینش‌های ارزشمندی در مورد رفتار دال‌های بتنی تقویت‌شده با شبکه FRP و کمک به پیشرفت شیوه‌های ساخت پایدار و بادوام ارائه می‌دهند.

در سال ۲۰۲۰، شای و همکاران [۱۵۴] تحقیقاتی در مورد عملکرد ستون‌های بتنی با شبکه‌های FRP و مقطع مربعی تحت فشار محوری انجام دادند. شبکه‌های FRP به صورت عرضی در اطراف محیط ستون‌ها برای تقویت آنها قرار گرفتند. هدف اصلی مطالعه این بود که واکنش بار-انحراف، ظرفیت باربری نهایی و حالت‌های شکست مشاهده شده در ستون‌ها را بررسی کند. یافته‌ها نشان داد که افزودن تقویت با شبکه FRP به طور قابل توجهی رفتار فشاری محوری ستون‌ها را بهبود می‌بخشد. شبکه‌های FRP به افزایش ظرفیت باربری، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر شکست زودرس کمک می‌کنند. مقاله حالت‌های شکست مشاهده شده در ستون‌های تقویت‌شده با FRP را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد، از جمله پارگی FRP، خرد شدن بتن و جداسازی بین شبکه‌های FRP و بتن. مکانیزم‌های پشت این حالت‌های شکست تجزیه و تحلیل می‌شوند و بینش‌هایی در مورد رفتار ستون‌های بتنی تقویت‌شده با FRP تحت فشار محوری ارائه می‌دهند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

FRP (پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف) به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه محققان در حوزه‌های مختلف قرار گرفته است. ویژگی‌های منحصر به فرد آن، از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی و انعطاف‌پذیری طراحی، فرصت‌های جدیدی برای نوآوری فراهم می‌آورد. علاوه بر این، با توجه به اینکه پایداری و استفاده بهینه از منابع در جامعه امروزی از اهمیت بیشتری برخوردار شده است، پتانسیل استفاده از FRP به جای مواد سنگین‌تر یا آسیب‌پذیرتر در برابر خوردگی بالا است. تنوع استفاده از FRP این ماده را به یک حوزه

جذاب برای مطالعه تبدیل کرده است که کاربردهایی در زمینه‌های مختلفی از جمله زیرساخت‌ها و ساخت‌وساز تا صنایع هوافضا و خودرو دارد. این مقاله درک بهتری از روند تاریخی انتشار مقالات مرتبط با FRP در بتن ارائه می‌دهد، شکاف‌های موجود در این زمینه را برجسته می‌کند و یک مرور خلاصه از ادبیات موجود ارائه می‌دهد. نتایج زیر از تحلیل انتشارات و مرور ادبیات قابل استخراج است:

- تعداد مقالات مرتبط با FRP از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲ افزایش یافته است. انتشار تحقیقات مرتبط با FRP در زمینه‌های مختلف مهندسی، علم مواد، ساخت‌وساز و فناوری ساختمان و غیره نشان‌دهنده تنوع و کاربرد وسیع این ماده است.
- چین و ایالات متحده بیشترین تعداد مقالات مرتبط با FRP در بتن را در سطح جهانی منتشر کرده‌اند، به ترتیب با ۱۹۷۶ و ۱۴۴۸ مقاله. این تعداد بالای مقالات به اقتصادهای پیشرفته این دو کشور برمی‌گردد که این امکان را برای آنها فراهم می‌آورد که بودجه بیشتری برای تحقیق و توسعه در این زمینه اختصاص دهند. علاوه بر این، نگرانی‌های فزاینده در ایالات متحده در مورد زیرساخت‌های فرسوده و نیاز به یافتن راه‌حلی برای ساخت‌وسازهای آینده جهت جلوگیری از هزینه‌های بی‌مورد تعمیر و نگهداری احتمالاً عامل دیگری در توسعه FRP برای تقویت و استحکام‌بخشی به سازه‌های بتنی در ایالات متحده است.
- انتشار ACI 440.11-22 در سپتامبر ۲۰۲۲ تأثیر زیادی بر روند انتشار مقالات مرتبط با GFRP خواهد داشت. انتظار می‌رود که نرخ انتشار مقالات در زمینه BFRP به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. نیاز به تحقیقات بیشتر برای پایه‌گذاری استفاده از BFRP در نسخه‌های آینده کد وجود دارد. از آنجایی که کد فعلی شامل GFRP است، بسیاری از زمینه‌های مرتبط با GFRP قبلاً تحقیق شده‌اند و این ماده می‌تواند با اعتماد بیشتری در ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گیرد. این امر ممکن است نرخ انتشار مقالات در زمینه GFRP را کاهش دهد اما نرخ استفاده از GFRP در میدان را افزایش دهد.
- تحلیل‌ها نشان داد که بخش عمده‌ای از تحقیقات بر روی عملکرد FRP در تیرها و ستون‌های بتنی متمرکز شده است که در ۸۳.۴٪ از مقالات منتشرشده مشاهده می‌شود. این امر به نیاز به تحقیقات منتشرشده در زمینه‌های پایه‌های زیرسطحی (slab-on-ground) و فونداسیون‌ها اشاره دارد که مانع از گنجاندن آنها در کد ساختمان فعلی و استفاده گسترده آنها در صنعت ساخت‌وساز می‌شود. علاوه بر این، پایه‌های غیرساختاری زیرسطحی به نظر می‌رسد که یک فرصت تحقیقاتی قابل توجه باشد، زیرا پروژه‌های زیادی می‌توانند از فناوری FRP بهره‌مند شوند اگر ادبیات کافی در این زمینه فراهم شده و در کد و دستورالعمل‌های فعلی منعکس شود.
- علیرغم وجود یک کد جدید ساختمانی برای عناصر GFRP-RC، همچنان جای تحقیق در زمینه‌هایی که توسط کد پوشش داده نشده‌اند، مانند زمینه‌هایی با تحقیق محدود وجود دارد. درک و توافق مشترک بین محققان در زمینه‌هایی مانند سیستم‌های مقاوم در برابر نیروی زلزله، مقاومت در برابر آتش، تیرهای عمیق، دیافراگم‌ها، اتصال به بتن، انتقال برش، اصطکاک برشی، تقویت‌کننده‌های گروهی، مدل‌های تیر، مدل‌های گره‌ای، شاتکریت، ساخت‌وساز ترکیبی، بتن سبک، اعضای دوطرفه که دارای میله‌های GFRP هستند، براکت‌ها و گیره‌ها وجود ندارد. به دلیل کمبود تحقیقات منتشرشده، مشخصات مربوطه یا تعداد ناکافی از پیاده‌سازی‌های میدانی، این زمینه‌ها نیاز به پوشش در کد فعلی دارند. کاوش در این موضوعات به کمک در زنده نگه‌داشتن و شکوفا کردن تحقیق در زمینه GFRP-RC کمک خواهد کرد.

## مراجع

- [1] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. I., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *J. Compos. Constr.*, 6, 73–87.
- [2] GangaRao, H. V. S., Taly, N., & Vijay, P. V. (2006). *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. CRC press.
- [3] Hollaway, L. (2012). *Polymer Composites for Civil and Structural Engineering*. Springer Science & Business Media.
- [4] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. I., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *J. Compos. Constr.*, 6, 73–87.
- [5] Teng, J. G., Chen, J.-F., Smith, S. T., Lam, L. (2002). *FRP: Strength*. RC Struct.
- [6] Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons.
- [7] Motavalli, M., & Czaderski, C. (2007). FRP composites for retrofitting of existing civil structures in Europe: State-of-the-art review. *International Conference of Composites & Polycon*, American Composites Manufacturers Association, Tampa, FL, USA, 17–19.
- [8] Meier, U. (2000). Composite materials in bridge repair. *Appl. Compos. Mater.*, 7, 75–94.
- [9] Szmigiera, E. D., Protchenko, K., Urbanski, M., Garbacz, A., Urbanski, M., & Garbacz, A. (2019). Mechanical properties of hybrid FRP bars and nano-hybrid FRP bars. *Arch. Civ. Eng.*, 65, 97–110. <https://doi.org/10.2478/ace-2019-0007>.
- [10] Nanni, A., De Luca, A., & Jawaheri Zadeh, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars. <https://doi.org/10.1201/b16669>.
- [11] Mirdarsoltany, M., Abed, F., & Homayoonmehr, R. (2022). A Comprehensive Review of the Effects of Different Simulated Environmental Conditions and Hybridization Processes on the Mechanical Behavior of Different FRP Bars.
- [12] Schmidt, A., Kampmann, R., Telikapalli, S., Empananza, A. R., & De Caso, F. (2019). Basalt FRP production: Market analysis and state-of-the-art report. *Proc. Fib Symp*, 189–196.
- [13] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 33, 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
- [14] Fu, S.-Y., Lauke, B., Mader, E., Yue, C.-Y., & Hu, X. (2000). Tensile properties of short-glass-fiber-and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Compos Part A Appl. Sci. Manuf.*, 31, 1117–1125.
- [15] Ou, Y., & Zhu, D. (2015). Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures. *Constr. Build. Mater.*, 96, 648–656.
- [16] Agarwal, A., Garg, S., Rakesh, P. K., Singh, I., & Mishra, B. K. (2010). Tensile behavior of glass fiber reinforced plastics subjected to different environmental conditions.
- [17] Zaghoul, M. Y. Mahmoud, & Zaghoul, M. M. Yousry. (2023). Physical analysis and statistical investigation of tensile and fatigue behaviors of glass fiber-reinforced polyester via novel fibers arrangement. *J. Compos Mater.*, 57, 147–166. <https://doi.org/10.1177/00219983221141154>.
- [18] Mukhopadhyaya, P., Swamy, R. N., & Lynsdale, C. J. (1998). Influence of aggressive exposure conditions on the behaviour of adhesive bonded concrete-GFRP joints. *Constr. Build. Mater.*, 12, 427–446.
- [19] Habeeb, M. N., & Ashour, A. F. (2008). Flexural behavior of continuous GFRP reinforced concrete beams. *J. Compos. Constr.*, 12, 115–124.
- [20] Robert, M., & Benmokrane, B. (2010). Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 32, 461–467.
- [21] Ali, M. A., & El-Salakawy, E. (2016). Seismic performance of GFRP-reinforced concrete rectangular columns. *J. Compos. Constr.*, 20, 4015074.
- [22] Kumutha, R., Vaidyanathan, R., & Palanichamy, M. S. (2007). Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. *Cem. Concr. Compos.*, 29, 609–615.
- [23] Qu, W., Zhang, X., & Huang, H. (2009). Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. *J. Compos. Constr.*, 13, 350–359.
- [24] Al-Furjan, M. S. H., Shan, L., Shen, X., Zarei, M. S., Hajmohammad, M. H., & Kolahchi, R. (2022). A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites. *J. Mater. Res. Technol.*, 19, 2930–2959. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>.
- [25] ACI Committee 440. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [26] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. I., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. *J. Compos. Constr.*, 6, 73–87.
- [27] Feih, S., & Mouritz, A. P. (2012). Tensile properties of carbon fibres and carbon fibre-polymer composites in fire. *Compos Part A Appl. Sci. Manuf.*, 43, 765–772.
- [28] Goertzen, W. K., Kessler, M. R., & Kessler, R. M. (2006). Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Mater. Sci. Eng.: A*, 421, 217–225.

- [29] Cao, S., Wang, X., & Wu, Z. (2011). Evaluation and prediction of temperature-dependent tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced polymer composites. *J. Reinf. Plast. Compos*, 30, 799–807.
- [30] Xia, Y., Wang, Y., Zhou, Y., & Jeelani, S. (2007). Effect of strain rate on tensile behavior of carbon fiber reinforced aluminum laminates. *Mater. Lett*, 61, 213–215.
- [31] Al-Furjan, M. S. H., Shan, L., Shen, X., Zarei, M. S., Hajmohammad, M. H., & Kolahchi, R. (2022). A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites. *J. Mater. Res. Technol*, 19, 2930–2959.
- [32] Zhou, Y.-G., Wang, C.-Y., Zhang, J.-N., & Wu, H.-H. (2020). Experimental and theoretical investigation on tensile properties and fracture behavior of carbon fiber composite laminates with varied ply thickness. *Compos Struct*, 249, 112543.
- [33] Lee, S. W., Han, S., Kim, S., & Choi, S. (2023). Influence of elevated temperature on the microhardness and microstructure of carbon fiber reinforced polymers. *J. Reinf. Plast. Compos*, 42, 1220–1228.
- [34] Rafi, M. M., Nadjai, A., Ali, F., & Talamona, D. (2008). Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending. *Constr. Build. Mater*, 22, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.014>.
- [35] Ahmad, F. S., Foret, G., & Le Roy, R. (2011). Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Experimental study. *Constr. Build. Mater*, 25, 479–485.
- [36] Rahal, K. N., & Rumaih, H. A. (2011). Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars. *Eng. Struct*, 33, 53–62.
- [37] Davalos, J. F., Chen, Y., & Ray, I. (2008). Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete. *Cem. Concr. Compos*, 30, 722–730.
- [38] Barnes, R. A., & Mays, G. C. (1999). Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates. *J. Compos. Constr*, 3, 63–72.
- [39] Bukhari, I. A., Vollum, R. L., Ahmad, S., & Sagasetta, J. (2010). Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP. *Mag. Concr. Res*, 62, 65–77. <https://doi.org/10.1680/macr.2008.62.1.65>.
- [40] Bashtannik, P. I., Kabak, A. I., & Yakovchuk, Y. Y. (2003). The effect of adhesion interaction on the mechanical properties of thermoplastic basalt plastics. *Mech. Compos. Mater*, 39, 85–88.
- [41] Wang, M., Zhang, Z., Li, Y., Li, M., Sun, Z., & Cao, M. (2008). Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. *J. Reinf. Plast. Compos*, 27, 393–407. <https://doi.org/10.1177/0731684407084119>.
- [42] Greco, A., Maffezzoli, A., Casciaro, G., & Caretto, F. (2014). Mechanical properties of basalt fibers and their adhesion to polypropylene matrices. *Compos B Eng*, 67, 233–238.
- [43] Chen, W., Hao, H., Jong, M., Cui, J., Shi, Y., Chen, L., & Pham, T. M. (2017). Quasi-static and dynamic tensile properties of basalt fibre reinforced polymer. *Compos B Eng*, 125, 123–133.
- [44] Bashtannik, P. I., Kabak, A. I., & Yakovchuk, Y. Y. (2003). The effect of adhesion interaction on the mechanical properties of thermoplastic basalt plastics. *Mech. Compos. Mater*, 39, 85–88.
- [45] Fegade, V., Ramachandran, M., Madhu, S., Vimala, C., Malar, R. K., Rajeshwari, R., & Rajesh, R. (2022). A review on basalt fibre reinforced polymeric composite materials. *AIP Conf. Proc*, 2393. <https://doi.org/10.1063/5.0074178>.
- [46] Plappert, D., Ganzenmüller, G. C., May, M., & Beisel, S. (2020). Mechanical properties of a unidirectional basalt-fiber/epoxy composite. *J. Compos. Sci*, 4, 1–12. <https://doi.org/10.3390/jcs4030101>.
- [47] Ge, W., Zhang, J., Cao, D., & Tu, Y. (2015). Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars. *Constr. Build. Mater*, 87, 28–37.
- [48] Mahroug, M. E. M., Ashour, A. F., & Lam, D. (2014). Experimental response and code modelling of continuous concrete slabs reinforced with BFRP bars. *Compos Struct*, 107, 664–674. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.029>.
- [49] Abed, F., & Alhafiz, A. R. (2019). Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars. *Compos Struct*, 215, 2.
- [50] Hassan, M., Benmokrane, B., ElSafty, A., & Fam, A. (2016). Bond durability of basalt-fiber-reinforced-polymer (BFRP) bars embedded in concrete in aggressive environments. *Compos B Eng*, 106, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.039>.
- [51] El Refai, A., Ammar, M. A., & Masmoudi, R. (2015). Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete. *J. Compos. Constr*, 19, 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000487).
- [52] S, P., KM, S., N, K., & SS, S. (2017). Fiber Reinforced Composites - A Review. *J. Mater. Sci. Eng*, 06, <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000341>.
- [53] Zhang, B., Jia, L., Tian, M., Ning, N., Zhang, L., Wang, W. (2021). Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. *Eur. Polym. J*, 147, 110352. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110352>.
- [54] Singh, T. J., & Samanta, S. (2015). Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. *Mater. Today Proc*, 2, 1381–1387. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.057>.

- [55] Raja, S. N., Basu, S., Limaye, A. M., Anderson, T. J., Hyland, C. M., & Ritchie, R. O. (2015). Strain-dependent dynamic mechanical properties of Kevlar to failure: Structural correlations and comparisons to other polymers. *Mater. Today Commun*, 2, e33–e37.
- [56] Youakim, S. A., & Karbhari, V. M. (2007). An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons. *Constr. Build. Mater*, 21, 1052–1060. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.006>.
- [57] Toutanji, H., & Deng, Y. (2002). Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets. *Compos B Eng*, 33, 255–261.
- [58] Wu, H.-L., Wang, Y.-F., Yu, L., & Li, X.-R. (2009). Experimental and computational studies on high-strength concrete circular columns confined by aramid fiber-reinforced polymer sheets. *J. Compos. Constr*, 13, 125–134.
- [59] Rashid, M. A., Mansur, M. A., & Paramasivam, P. (2005). Behavior of aramid fiber-reinforced polymer reinforced high strength concrete beams under bending. *J. Compos. Constr*, 9, 117–127.
- [60] Wang, Y., & Wu, H. (2011). Size effect of concrete short columns confined with aramid FRP jackets. *J. Compos. Constr*, 15, 535–544.
- [61] Vincent, T., & Ozbakkaloglu, T. (2013). Influence of fiber orientation and specimen end condition on axial compressive behavior of FRP-confined concrete. *Constr. Build. Mater*, 47, 814–826.
- [62] Robert, M., Cousin, P., & Benmokrane, B. (2009). Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete. *J. Compos. Constr*, 13, 66–73.
- [63] Wang, Z., Zhao, X.-L., Xian, G., Wu, G., Raman, R. K. S., Al-Saadi, S., & Haque, A. (2017). Long-term durability of basalt-and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. *Constr. Build. Mater*, 139, 467–489.
- [64] Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2014). Axial capacity of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. *J. Compos. Constr*, 18, 4013017.
- [65] Ashour, A. F. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Constr. Build. Mater*, 20, 1005–1015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.023>.
- [66] Yost, J. R., Gross, S. P., & Dinehart, D. W. (2001). Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *J. Compos. Constr*, 5, 268–275.
- [67] Wang, Z., Zhao, X.-L., Xian, G., Wu, G., Raman, R. K. S., Al-Saadi, S. (2018). Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass-and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment. *Constr. Build. Mater*, 156, 985–1004.
- [68] Yost, J. R., Gross, S. P., & Dinehart, D. W. (2001). Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *J. Compos. Constr*, 5, 268–275.
- [69] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., & Tajari, A. R. (2007). Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Eng. Struct*, 29, 2428–2444.
- [70] Abdalla, H. A. (2002). Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Compos Struct*, 56, 63–71.
- [71] Wang, Z., Zhao, X.-L., Xian, G., Wu, G., Raman, R. K. S., Al-Saadi, S. (2017). Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass-and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment. *Constr. Build. Mater*, 156, 985–1004.
- [72] Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2014). Strength and axial behavior of circular concrete columns reinforced with CFRP bars and spirals. *J. Compos. Constr*, 18, 4013035.
- [73] Dong, Z., Wu, G., Xu, B., Wang, X., & Taerwe, L. (2016). Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction. *Mater. Des*, 92, 552–562. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.066>.
- [74] Wu, G., Dong, Z.-Q., Wang, X., Zhu, Y., & Wu, Z.-S. (2015). Prediction of Long-Term Performance and Durability of BFRP Bars under the Combined Effect of Sustained Load and Corrosive Solutions. *J. Compos. Constr*, 19, 04014058. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000517](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000517).
- [75] Okelo, R., & Yuan, R. L. (2005). Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *J. Compos. Constr*, 9, 203–213.
- [76] Rashid, M. A., Mansur, M. A., & Paramasivam, P. (2005). Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams under Bending. *J. Compos. Constr*, 9, 117–127. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:2\(117\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:2(117)).
- [77] Ekenel, M., Roghani, H., & Basalo, F. D. C. y. (2022). Evaluation of FRP Bars & Meshes Used as Secondary Reinforcement for Nonstructural Concrete Members for Building Code Compliance. *Spec. Publ*, 356, 109–119.
- [78] Mosallam, A. S., & Mosalam, K. M. (2003). Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates. *Constr. Build. Mater*, 17, 43–54.
- [79] Yao, J., Teng, J. G., & Lam, L. (2005). Experimental study on intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC flexural members. *Adv. Struct. Eng*, 8, 365–396.

- [80] Smith, S. T., Hu, S., Kim, S. J., & Seracino, R. (2011). FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. *Eng. Struct*, 33, 1075–1087.
- [81] Fernandes, P. M. G., Silva, P. M., & Sena-Cruz, J. (2015). Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Eng. Struct*, 84, 350–361.
- [82] Kankeri, P., & Prakash, S. S. (2017). Efficient hybrid strengthening for precast hollow core slabs at low and high shear span to depth ratios. *Compos Struct*, 170, 202–214.
- [83] Ospina, C. E., Alexander, S. D. B., & Cheng, J. J. R. (2003). Punching of two-way concrete slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids. *Struct. J*, 100, 589–598.
- [84] ACI Committee 318. (1999). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318R-99)*. Farmington Hills, MI.
- [85] British Standards Institution. (1997). *Structural Use of Concrete, BS8110: Part 1—Code of Practice for Design and Construction*. London.
- [86] Matthys, S., & Taerwe, L. (2000). Concrete slabs reinforced with FRP grids. II: Punching resistance. *J. Compos. Constr*, 4, 154–161.
- [87] El-Sayed, A., El-Salakawy, E., & Benmokrane, B. (2005). Shear strength of one-way concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer composite bars. *J. Compos. Constr*, 9, 147–157.
- [88] ACI Committee 440. (2003). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-03)*. American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [89] Canadian Standard Association (CSA). (2002). *Design and construction of building components with fibre reinforced polymers. CAN/CSA S806-02*, Rexdale, Canada.
- [90] Machida, A., & Uomoto, T. (1997). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*. Japan Soc. of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
- [91] Triantafyllou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. *Acids Struct. J*, 95, 107–115.
- [92] Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., Chen, J.-F. (2003). Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Constr. Build. Mater*, 17, 447–462.
- [93] Huang, Y., Zhang, W., Liu, X. (2022). Assessment of diagonal macrocrack-induced debonding mechanisms in FRP-strengthened RC beams. *J. Compos. Constr*, 26, 04022056.
- [94] De Lorenzis, L., & Nanni, A. (2001). Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods. *Struct. J*, 98, 60–68.
- [95] Barros, J. A. O., Dias, S. J. E., Lima, J. L. T. (2007). Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cem. Concr. Compos*, 29, 203–217.
- [96] Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D. (1998). Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Constr. Build. Mater*, 12, 453–462.
- [97] Tureyen, A. K., Frosch, R. J. (2003). Concrete shear strength: another perspective. *Struct. J*, 100, 609–615.
- [98] ACI Committee 318. (2002). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02)*. Farmington Hills, MI.
- [99] Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A. (2007). Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading. *J. Compos. Constr*, 11, 308–318.
- [100] Binici, B., Ozcebe, G., Ozcelik, R. (2007). Analysis and design of FRP composites for seismic retrofit of infill walls in reinforced concrete frames. *Compos B Eng*, 38, 575–583.
- [101] Bui, T.-L., Larbi, A. S., Reboul, N., Ferrier, E. (2015). Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC. *Compos Struct*, 132, 923–932.
- [102] Li, T., Galati, N., Tumialan, J. G., Nanni, A. (2005). Analysis of unreinforced masonry concrete walls strengthened with glass fiber-reinforced polymer bars. *Acids Struct. J*, 102, 569.
- [103] Al-Jaberi, Z., Myers, J. J., ElGawady, M. A. (2018). Pseudo-static cyclic loading comparison of reinforced masonry walls strengthened with FRCM or NSM FRP. *Constr. Build. Mater*, 167, 482–495.
- [104] Ghazizadeh, S., Cruz-Noguez, C. A. (2018). Analytical model for hybrid FRP-steel reinforced shear walls. *Eng. Struct*, 156, 556–566.
- [105] Ghazizadeh, S., Cruz-Noguez, C. A., Li, Y. (2019). Numerical study of hybrid GFRP-steel reinforced concrete shear walls and SFRC walls. *Eng. Struct*, 180, 700–712.
- [106] Canadian Standards Association (CSA). (2014). *Design of Concrete Structures*. Mississauga, ON: CAN/CSA A23.3-14.
- [107] Mirmiran, A. (1997). Analytical and experimental investigation of reinforced concrete columns encased in fiberglass tubular jacket and use of fiber jacket for pile splicing.
- [108] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M. (1998). Model of concrete confined by fiber composites. *J. Struct. Eng*, 124, 1025–1031.

- [109] Mirmiran, A., Shahawy, M. (1997). Behavior of concrete columns confined by fiber composites. *J. Struct. Eng.*, 123, 583–590.
- [110] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman, T. (2000). Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. *Compos B Eng*, 31, 471–480.
- [111] Mostofinejad, D., Moshiri, N. (2015). Compressive strength of CFRP composites used for strengthening of RC columns: Comparative evaluation of EBR and grooving methods. *J. Compos. Constr.*, 19, 04014079.
- [112] Chellapandian, M., Prakash, S. S., Sharma, A. (2017). Strength and ductility of innovative hybrid NSM reinforced and FRP confined short RC columns under axial compression. *Compos Struct*, 176, 205–216.
- [113] Elmessalami, N., El Refai, A., Abed, F. (2019). Fiber-reinforced polymers bars for compression reinforcement: A promising alternative to steel bars. *Constr. Build. Mater.*, 209, 725–737.
- [114] Elmesalami, N., Abed, F., El Refai, A. (2021). Concrete columns reinforced with GFRP and BFRP bars under concentric and eccentric loads: Experimental testing and analytical investigation. *J. Compos. Constr.*, 25, 4021003.
- [115] Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., Benmokrane, B. (2014). Axial capacity of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. *J. Compos. Constr.*, 18, 04013017.
- [116] Mohamed, H. M., Afifi, M. Z., Benmokrane, B. (2014). Performance evaluation of concrete columns reinforced longitudinally with FRP bars and confined with FRP hoops and spirals under axial load. *J. Bridge Eng.*, 19, 04014020.
- [117] Villen Salan, E.A., Rahman, M.K., Al-Ghamdi, S., Sakr, J., Al-Zahrani, M.M., Nanni, A. (2021). A monumental flood mitigation channel in Saudi Arabia. *Concr. Int.*, 43.
- [118] Roghani, H., Basalo, F.D.C.y., De Caso, F., Nanni, A. (2022). Constructability of slabs-on-ground with FRP meshes as secondary reinforcement. In: *Proceedings of FRPRCS-15 and APFIS-2022*, p. 109–119.
- [119] Al-Zahrani, M.M., Rahman, M.K., Fasil, M., Al-Abduljabbar, S., Nanni, A., Al-Osta, M.A., Najamuddin, S.K. (2023). Punching shear capacity of GFRP bar-reinforced concrete slabs-on-ground. *Eng. Struct.*, 289, 116285.
- [120] Oskoueii, A.V., Kivi, M.P., Araghi, H., Bazli, M. (2017). Experimental study of the punching behavior of GFRP reinforced lightweight concrete footing. *Mater. Struct.*, 50, 1–14.
- [121] Saleh, K.A., Hadad, H.S., Nooman, M.T. (2022). Punching shear behavior of isolated footing reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. *J. Al-Azhar Univ. Eng. Sect.*, 17, 189–218.
- [122] Abdalla, H.A. (2002). Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Compos Struct.*, 56, 63–71.
- [123] Foret, G., Limam, O. (2008). Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods. *Constr. Build. Mater.*, 22, 2025–2030.
- [124] Wu, C., Oehlers, D.J., Rebentrost, M., Leach, J., Whittaker, A.S. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Eng. Struct.*, 31, 2060–2069.
- [125] Benmokrane, B., Masmoudi, R. (1996). Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars. *Struct. J.*, 93, 46–55.
- [126] El-Hacha, R., Rizkalla, S.H. (2004). Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Struct. J.*, 101, 717–726.
- [127] Sim, J., Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Compos B Eng.*, 36, 504–512.
- [128] Hamilton, H.R., Dolan, C.W. (2001). Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls. *J. Compos. Constr.*, 5, 170–178.
- [129] Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M.R., Modena, C. (2006). Flexural and shear strengthening of unreinforced masonry with FRP bars. *Compos. Sci. Technol.*, 66, 289–296.
- [130] Ghazizadeh, S., Cruz-Noguez, C.A. (2018). Damage-resistant reinforced concrete low-rise walls with hybrid GFRP-steel reinforcement and steel fibers. *J. Compos. Constr.*, 22, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000834](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000834).
- [131] Lam, L., Teng, J.G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Constr. Build. Mater.*, 17, 471–489.
- [132] Bournas, D.A., Triantafillou, T.C. (2009). Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. *J. Compos. Constr.*, 7, 39–49.
- [133] Hassan, T., Rizkalla, S. (2003). Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips. *J. Compos. Constr.*, 7, 248–257.
- [134] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2020). Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 16, 787–802.
- [135] El-Saikaly, G., Godat, A., Chaallal, O. (2015). New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope. *J. Compos. Constr.*, 19, 04014064.
- [136] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2019). Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida. *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 8, 128–151.
- [137] Nanni, A., Bakis, C.E., O'Neil, E.F., Dixon, T.O. (1996). Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures. *PCI J.*, 41, 34–43.



- [138] Wang, X., Xu, P., Wu, Z., Shi, J. (2015). A novel anchor for large-sized FRP cable with multiple tendons: Concept and FE study. *Compos. Struct.*, 120, 552–564.
- [139] Braimah, A., Green, M.F., Campbell, T.I. (2006). Fatigue behavior of concrete beams post-tensioned with unbonded carbon fiber reinforced polymer tendons. *Can. J. Civ. Eng.*, 33, 1140–1155.
- [140] Yost, J.R., Goodspeed, C.H., Schmeckpeper, E.R. (2001). Flexural performance of concrete beams reinforced with FRP grids. *J. Compos. Constr.*, 5, 18–25.
- [141] Shao, Y., Mirmiran, A. (2007). Control of plastic shrinkage cracking of concrete with carbon fiber-reinforced polymer grids. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19, 441–444.
- [142] Fang, H., Xu, X., Liu, W., Qi, Y., Bai, Y., Zhang, B., Hui, D. (2016). Flexural behavior of composite concrete slabs reinforced by FRP grid facesheets. *Compos. B Eng.*, 92, 46–62.
- [143] Matthys, S., Taerwe, L. (2000). Concrete slabs reinforced with FRP grids. I: One-way bending. *J. Compos. Constr.*, 4, 145–153.
- [144] Sha, X., Wang, Z., Feng, P., Yang, J.-Q. (2020). Axial compressive behavior of square-section concrete columns transversely reinforced with FRP grids. *J. Compos. Constr.*, 24, 04020028.
- [145] Cosenza, E., Manfredi, G., Realfonzo, R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *J. Compos. Constr.*, 1, 40–51.
- [146] Chen, Y., Davalos, J.F., Ray, I., Kim, H.-Y. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Compos. Struct.*, 78, 101–111.
- [147] El-Hacha, R., Rizkalla, S.H. (2003). Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Struct. J.*, 101, 717–726.
- [148] Sim, J., Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Compos. B Eng.*, 36, 504–512.
- [149] Hamilton, H.R., Dolan, C.W. (2001). Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls. *J. Compos. Constr.*, 5, 170–178.
- [150] Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M.R., Modena, C. (2006). Flexural and shear strengthening of unreinforced masonry with FRP bars. *Compos. Sci. Technol.*, 66, 289–296.
- [151] Ghazizadeh, S., Cruz-Noguez, C.A. (2018). Damage-resistant reinforced concrete low-rise walls with hybrid GFRP-steel reinforcement and steel fibers. *J. Compos. Constr.*, 22, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000834](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000834).
- [152] Lam, L., Teng, J.G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Constr. Build. Mater.*, 17, 471–489.
- [153] Bournas, D.A., Triantafillou, T.C. (2009). Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. *J. Compos. Constr.*, 7, 39–49.
- [154] Hassan, T., Rizkalla, S. (2003). Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips. *J. Compos. Constr.*, 7, 248–257.
- [155] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2020). Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 16, 787–802.
- [156] El-Saikaly, G., Godat, A., Chaallal, O. (2015). New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope. *J. Compos. Constr.*, 19, 04014064.
- [157] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2019). Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida. *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 8, 128–151.
- [158] Yost, J.R., Goodspeed, C.H., Schmeckpeper, E.R. (2001). Flexural performance of concrete beams reinforced with FRP grids. *J. Compos. Constr.*, 5, 18–25.
- [159] Ye, Y.-Y., Smith, S.T., Zeng, J.-J., Zhuge, Y., Quach, W.-M. (2021). Novel ultra-high-performance concrete composite plates reinforced with FRP grid: Development and mechanical behaviour. *Compos. Struct.*, 269, 114033.
- [160] Liu, Y., Tafsirojjaman, T., Dogar, A.U.R., Hückler, A. (2020). Shrinkage behavior enhancement of infra-lightweight concrete through FRP grid reinforcement and development of their shrinkage prediction models. *Constr. Build. Mater.*, 258, 119649.
- [161] Antonopoulos, C.P., Triantafillou, T.C. (2003). Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. *J. Compos. Constr.*, 7, 39–49.
- [162] Hassan, T., Rizkalla, S. (2003). Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips. *J. Compos. Constr.*, 7, 248–257.
- [163] Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., Lima, J.L.T. (2007). Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cem. Concr. Compos.*, 29, 203–217.
- [164] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2020). Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 16, 787–802.
- [165] El-Saikaly, G., Godat, A., Chaallal, O. (2015). New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope. *J. Compos. Constr.*, 19, 04014064.

[166] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., Nanni, A. (2019). Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida. *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 8, 128–151.