

## Bond of FRP bars with different surface characteristics to concrete

Gholamreza Havaei<sup>1\*</sup>, SeyedAli Mohseni<sup>2</sup>

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

2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Due to the various scenarios for practical applications of Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars, FRP bars with different surface characteristics have emerged in recent years. Since the bond performance of FRP bars with concrete is highly dependent on the geometric features of the bars, the bond strength of FRP bars with different surface characteristics may show significant differences. To investigate the effect of bar surface type on bond properties, a database containing 407 tensile test results of FRP bars with various surface types, including sand-coated (SC), helical winding (HW), ribbed (RB), and indented (IN), has been compiled based on existing studies. A review of the reported results in the database reveals that the effects of concrete compressive strength, concrete cover, embedment length, and bar diameter on the bond properties of modified bars (i.e., HW, RB, IN) are generally greater than those of SC bars. These parameters have a moderate effect on HWSC and INSC bars due to composite surface treatments. Finally, the performance of several existing models in predicting the bond strength between FRP bars and concrete has been evaluated, and a new model has been proposed by introducing several geometric factors to quantify the impact of bar surface characteristics on bond strength. This model can provide more accurate predictions of the results from existing experiments.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 August 2024

**Revise Date:** 23 October 2024

**Accept Date:** 05 November 2024

### Keywords:

FRP rebar

Fiber-Reinforced Polymer

Rehabilitation

Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525691.3737>

\*Corresponding author: Gholamreza Havaei

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

## پیوند میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف به بتن

غلامرضا هوائی<sup>۱\*</sup>، سیدعلی محسنی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

به دلیل سناریوهای مختلف برای کاربردهای عملی میلگردهای پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP)، میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف در سال‌های اخیر به وجود آمده است. از آنجایی که عملکرد پیوند میلگردهای FRP به بتن به شدت وابسته به ویژگی‌های هندسی میلگردها است، مقاومت پیوند میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف ممکن است تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر داشته باشد. به منظور بررسی تأثیر نوع سطح میلگردها بر ویژگی‌های پیوند، یک پایگاه داده شامل ۴۰۷ نتیجه آزمایش کشش میلگردهای FRP با انواع مختلف سطح شامل پوشش ماسه‌ای (SC)، پیچش مارپیچی (HW)، شیار دار (RB) و فرورفته (IN) جمع‌آوری شده است که بر اساس مطالعات موجود ساخته شده است. بررسی نتایج گزارش شده در پایگاه داده نشان می‌دهد که تأثیرات مقاومت فشاری بتن، پوشش بتن، طول غوطه‌وری و قطر میلگرد بر ویژگی‌های پیوند میلگردهای تغییر یافته (یعنی میلگردهای HW، RB، IN) به طور کلی بیشتر از میلگردهای SC است و این پارامترها تأثیر متوسطی برای میلگردهای HWSC و INSC به دلیل درمان‌های سطحی کامپوزیتی دارند. در نهایت، عملکرد چندین مدل موجود در پیش‌بینی مقاومت پیوند بین میلگردهای FRP و بتن ارزیابی شده و یک مدل جدید با معرفی چندین عامل هندسی برای کمیت‌بندی تأثیر ویژگی‌های سطح میلگردها بر مقاومت پیوند پیشنهاد شده است که می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از نتایج آزمایش‌های موجود ارائه دهد.

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

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525691.3737	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525691.3737">10.22065/jsce.2025.525691.3737</a>	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۸/۱۵	۱۴۰۳/۰۸/۱۵	۱۴۰۳/۰۸/۰۲	۱۴۰۳/۰۶/۰۶
				*نویسنده مسئول:		غلامرضا هوائی
				پست الکترونیکی:		<a href="mailto:Havaei@aut.ac.ir">Havaei@aut.ac.ir</a>

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، میلگردهای پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) به طور گسترده‌ای به عنوان تقویت‌کننده داخلی در زیرساخت‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه با فولاد، مواد FRP دارای مزایای بسیاری از جمله نسبت بالای استحکام به وزن، مقاومت عالی در برابر خوردگی و هدایت حرارتی پایین هستند [۱-۷]. با این حال، به دلیل رفتار الاستیک خطی تا شکست و ویژگی‌های شکننده FRP، روش‌های طراحی مختلفی باید برای سازه‌های FRP-بتن نسبت به سازه‌های بتن مسلح با فولاد اتخاذ شود [۸-۱۱]. با توجه به اینکه پیوند بین تقویت‌کننده و بتن اطراف آن اساس نظریه طراحی سازه‌های بتن مسلح است، رفتار پیوند میلگردهای FRP و بتن برای کاربردهای عملی سازه‌های FRP-بتن بسیار حائز اهمیت است.

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که رفتار پیوند بین میلگردهای FRP و بتن تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند مقاومت فشاری بتن [۱۲-۱۴]، پوشش بتن [۱۵، ۱۶]، قطر میلگرد [۸، ۱۷، ۱۸]، مدول الاستیک [19, 20] FRP، طول غوطه‌وری [۲۱-۲۳] و نوع [24, 25] FRP قرار دارد. برای بررسی کمی تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت پیوند بین میلگردهای FRP و بتن، بسیاری از مطالعات در سال‌های اخیر انجام شده است. سلیوم و بالاز [۲۶] و ژانگ و همکاران [۲۷] تأثیر مقاومت فشاری بتن را بررسی کرده و گزارش داده‌اند که افزایش مقاومت فشاری بتن می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت پیوند بین میلگردهای FRP و بتن را بهبود بخشد. به طور مشابه، بانا و همکاران [۱۲] دریافتند که زمانی که مقاومت فشاری بتن از ۲۹ MPa به ۵۳ MPa افزایش می‌یابد، مقاومت پیوند نهایی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد و حداکثر بهبود ۲۱۰٪ است. احسانی و همکاران [۲۸] مشاهده کردند که پوشش بتن به اندازه ۲.۵ d که در آن قطر میلگرد است (برای تأمین تنش پیوند کافی بدون شکست پوشش بتن کافی است. علاوه بر این، اسلام و همکاران [۱۵] همچنین نتیجه‌گیری کردند که بهبود کمی زمانی به دست می‌آید که پوشش بتن از ۲.۵ d برای میلگردهای گلاس FRP (GFRP) با قطر ۱۲ میلی‌متر و ۱۶ میلی‌متر بیشتر شود. در مورد قطر میلگردهای FRP، فیراس و همکاران [۱۷] بیان کردند که با افزایش قطر میلگردها، مقاومت پیوند FRP به بتن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این با مشاهدات مطالعات مربوطه [۲۹، ۳۰] مطابقت دارد.

با وجود عوامل زیادی که بر رفتار پیوند میلگردهای FRP با بتن تأثیر می‌گذارند طبق بحث‌های ذکر شده در بالا، اثر خاص یک پارامتر منفرد ممکن است برای میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف به طور قابل توجهی متفاوت باشد [۳۰-۳۶]. سلیوم و بالاز [۳۷] نتیجه‌گیری کردند که با افزایش قطر میلگردها از ۸ میلی‌متر به ۱۶ میلی‌متر، مقاومت پیوند نهایی میلگردهای FRP ماریچی (HW) حدود ۲۶٪ کاهش می‌یابد، در حالی که مقدار مربوط به نمونه‌های با میلگردهای FRP فرورفته (IN) فقط ۱۰٪ کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، آریاس و همکاران [۳۸] گزارش دادند که مقاومت پیوند میلگردهای FRP پوشش ماسه‌ای (SC) از میلگردهای شیار دار (RB) تحت همان شرایط بیشتر است، اما هاو و همکاران [۳۴] روشن کردند که پیوند میلگردهای FRP شیار دار با فاصله شیار برابر با قطر میلگردها بهتر از میلگردهای پوشش ماسه‌ای عمل می‌کند. علاوه بر این، مشخص شده است که انواع سطح میلگردهای FRP باعث تغییراتی در حالت‌های شکست نیز می‌شود [۲۶]. لو و همکاران [۳۹] یک مطالعه تجربی بر روی ویژگی‌های پیوند میلگردهای FRP پوشش ماسه‌ای و شیار دار در بتن با مقاومت بالا انجام دادند و دریافتند که شکست از نوع شکاف و شکست کششی به ترتیب برای میلگردهای FRP شیار دار و پوشش ماسه‌ای مشاهده می‌شود که این با مشاهدات بانا و همکاران [۱۲] مطابقت دارد. این به دلیل تأثیر زیاد ویژگی‌های سطح بر مکانیزم پیوند است همانطور که توسط [9] ACI 440.1R-15 و ال محمود و همکاران [۴۰] بیان شده است. با این حال، مطالعات کمی برای حساب کردن تأثیرات چشمگیر ویژگی‌های سطحی میلگردهای FRP بر رفتار پیوند انجام شده است، که نشان‌دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر برای توسعه درک عمیق‌تری از این زمینه است.

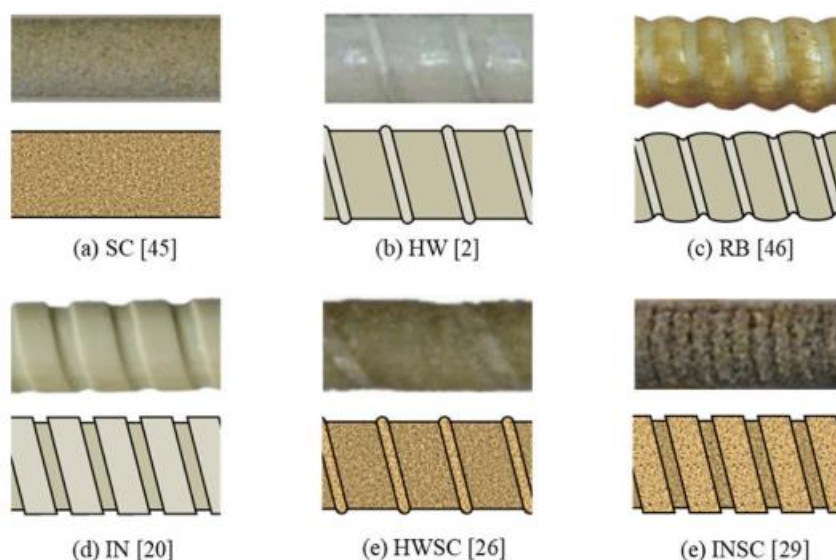
بر اساس مشاهدات تجربی، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تعیین مدل‌های مقاومت پیوند بین میلگردهای FRP و بتن انجام شده است. تیگیوارت و همکاران [۲۱] و اوکلو و یوان [۴۱] نشان دادند که مقاومت پیوند نهایی به طور متناسب با جذر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، پارامترهای دیگر مانند پوشش بتن، طول غوطه‌وری و قطر میلگرد نیز در بیشتر مدل‌های موجود در نظر گرفته شده است [۹، ۴۲، ۴۳]. لازم به ذکر است که [44] CSA S806-12 ضرایب درمان سطحی را در پیش‌بینی مقاومت پیوند میلگردهای FRP مشخص

کرده است، اما این مدل نمی‌تواند تأثیر ویژگی‌های هندسی سطحی برای نوع خاصی از میلگردهای FRP به عنوان مثال، میلگردهای FRP شیار دار (را تفسیر کند. بنابراین، هیچ مدل موجودی نمی‌تواند مقاومت پیوند نهایی میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف را به طور دقیق توضیح دهد و نیاز به یک مدل مقاومت پیوند انعطاف پذیرتر وجود دارد. در این زمینه، هدف این مقاله بررسی ویژگی‌های پیوند بین میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف و بتن است. ویژگی‌های انواع مختلف سطح میلگردهای FRP تفسیر و سپس عوامل هندسی برای کمیت‌دهی به انواع سطح میلگردها در این مقاله پیشنهاد شده است. یک پایگاه داده جامع از نتایج آزمایش‌ها از مطالعات منتشر شده ایجاد شد و چندین پارامتر کلیدی که بر مقاومت پیوند بین میلگردهای FRP و بتن تأثیر می‌گذارد، تحت دسته‌بندی‌های مختلف سطحی مورد بحث قرار گرفت. همچنین، قابلیت اعتماد مدل‌های موجود در پیش‌بینی مقاومت پیوند نهایی میلگردهای FRP و بتن بر اساس نتایج آزمایش‌ها در پایگاه داده گردآوری شده مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، یک مدل جدید مقاومت پیوند که اثرات پیکربندی‌های سطحی میلگردهای FRP را در نظر می‌گیرد، بر اساس تحلیل گسترده‌تر و محکم‌تری از مطالعات موجود در این مقاله پیشنهاد شد.

## ۲- ویژگی‌های سطحی

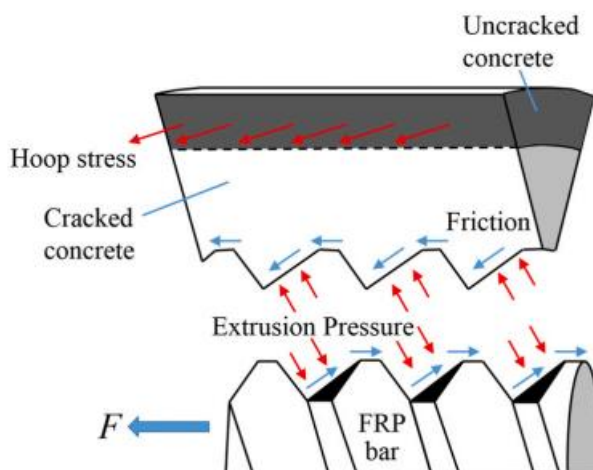
### 2.1. کلیات

ویژگی‌های سطحی میلگردهای FRP که در مطالعات موجود بررسی شده‌اند، عمدتاً به شش نوع تقسیم می‌شوند: پوشش شن (SC)، پیچ‌خورده به صورت حلزونی (HW)، شیار دار (RB)، دارای بریدگی (IN)، پیچ‌خورده به صورت حلزونی با پوشش شن (HWSC) و دارای بریدگی با پوشش شن (INSC) که در شکل ۱ نشان داده شده است [۲،۲۰،۲۶،۲۹،۴۵،۴۶]. به‌طور خاص، میلگردهای SC FRP با پوشاندن میلگردهای صاف اولیه با شن ریز پوشانده می‌شوند بعد از اینکه به رزین پوشانده شده‌اند. بنابراین، اندازه، نوع و تعداد شن‌های پوشانده شده می‌تواند تأثیر زیادی بر ویژگی‌های میلگردهای SC داشته باشد. برای میلگردهای HW FRP، یک رشته حلزونی پیچیده به میلگرد FRP بعد از تولید می‌شود و با استفاده از رزین به سطح میلگرد متصل می‌شود. سطح شیار دار میلگردهای RB با پیچاندن یک رشته محکم به دور میلگردها در طول فرآیند پالترسیون تشکیل می‌شود و رشته‌ها در پایان فرآیند تولید از میلگرد جدا می‌شوند. درمان سطحی IN از طریق برش میلگرد پالتر شده به سطح دنداندار خارجی بعد از سفت شدن رزین به دست می‌آید. علاوه بر انواع سطحی میلگردهای ذکر شده، میلگردهای HWSC و INSC شامل دو ویژگی سطحی به‌طور همزمان هستند، که هر دو با لایه اضافی پوشش شن روی سطح میلگردهای HW یا IN ایجاد می‌شوند. [1] طبق مطالعات موجود [۴۷-۵۱]، به دلیل تفاوت در پیکربندی‌های سطحی میلگردهای FRP، مکانیزم‌های پیوند و همچنین حالات شکست می‌توانند به‌طور قابل توجهی در میان میلگردهای FRP مختلف متفاوت باشند. بنابراین، ابتدا باید مکانیزم‌های پیوند روشن شوند تا بحث‌های بعدی انجام شود. از آنجا که هیچ شیار در سطح میلگردهای شنی پوشش‌دار وجود ندارد، مکانیزم پیوند میلگردهای SC با دیگر میلگردهای تغییرشکل یافته (FRP یعنی میلگردهای RB، HW، IN) متفاوت است و عمدتاً به چسبندگی شیمیایی و اصطکاک وابسته است. زمانی که تنش پیوند از چسبندگی شیمیایی بیشتر شود، میلگردها شروع به لغزش می‌کنند و لایه شن در نتیجه از میلگرد جدا می‌شود که باعث شکست پیوند بین میلگردها و بتن می‌شود. برای میلگردهای FRP شیار دار، تنش پیوند عمدتاً به قفل شدن مکانیکی ناشی از تعاملات بین شیارها و بتن اطراف نسبت داده می‌شود.



شکل ۱- نمای شماتیک میلگردهای FRP با درمان‌های سطحی مختلف.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، وقتی ضخامت پوشش بتن کافی نباشد، ترک‌های بتن ابتدا به دلیل فشار در رابط (یعنی اثر گوه‌ای) ایجاد می‌شوند. سپس، ترک‌ها به تدریج از رابط میلگرد FRP و بتن به سطح بتن گسترش یافته و منجر به شکست ترک‌زدن می‌شوند. با این حال، میلگردهای FRP ممکن است زمانی که ضخامت پوشش بتن از مقدار معینی بیشتر باشد، از بتن کشیده شوند. مکانیزم پیوند مشابهی برای میلگردهای HW و IN نیز معتبر است، اما اثر گوه‌ای در مقایسه با میلگردهای RB کمتر مشهود است. علاوه بر این، برای میلگردهایی که ترکیبی از دو درمان سطحی دارند (یعنی میلگردهای HWSC و INSC)، مکانیزم پیوند ممکن است پیچیده‌تر شود، زیرا عامل غالب ممکن است در طی فرآیند انتقال تنش بین میلگردهای FRP و بتن به راحتی و به طور مکرر تغییر کند.

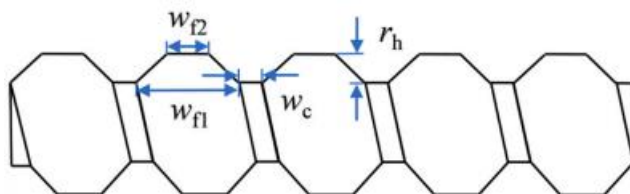


شکل ۲- برهم کنش بین FRP و بتن

## 2.2. عوامل هندسی

طبق مطالعات ذکر شده، ویژگی‌های سطحی میلگردها نقش مهمی در ویژگی‌های پیوند میلگردهای FRP و بتن دارند [۳۴]. بنابراین، تعیین پیکربندی‌های سطحی به روش کمی به نظر ضروری می‌آید تا بتوان ویژگی‌های پیوند میلگردهای FRP را بهتر تفسیر کرد. در این

بخش چندین عامل هندسی ابتدا توسعه داده می‌شوند تا به بحث‌های بعدی پرداخته شود. برای میلگردهای FRP تغییر شکل یافته، فاصله بین دو شیار مجاور برابر با مجموع عرض پشتی بتن  $w_c$  و عرض پایینی شیار  $w_{f1}$  FRP است [۱۲]، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، و عرض بالایی شیار  $w_{f2}$  FRP و ارتفاع شیار  $r_h$  نیز به عنوان عوامل هندسی بحرانی در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده‌اند. به عنوان مثال، مقدار  $w_{f2}$  برای میلگردهای RB و HW برابر با صفر است، در حالی که همان مقدار  $w_{f1}$  و  $w_{f2}$  برای میلگردهای IN به دست می‌آید. باید توجه داشت که این عوامل هندسی برای میلگردهای SC و دو نوع میلگرد ترکیبی (یعنی میلگردهای HWSC و INSC) به دلیل عدم وجود شیارها و پیچیدگی فرآیند تعیین آنها به ترتیب ارائه نشده‌اند. تأثیرات عوامل ذکر شده بر استحکام پیوند در بخش ۴ به طور دقیق معرفی خواهند شد.



شکل شماره ۳- نمای شماتیک پارامترهای ابعادی

### ۳- رفتار پیوند میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف

#### 3.1. پایگاه داده‌ها

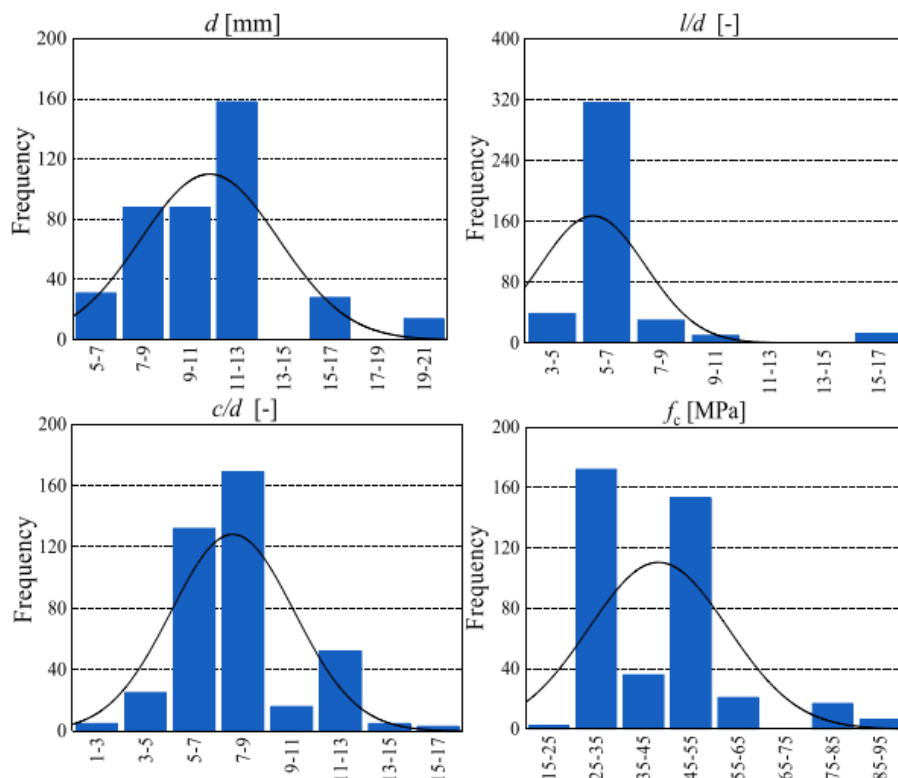
برای توسعه درک عمیق از تأثیرات مرتبط با ویژگی‌های سطح میلگردها بر عملکرد پیوند میلگردهای FRP به بتن، یک پایگاه داده با ۴۰۷ نتیجه آزمایش کشش از مطالعات موجود جمع‌آوری شد [۵۲،۳۹،۳۱،۲۹،۲۷،۲۶،۲۴،۱۶،۱۳،۱۲،۱۱،۵۷]. جدول ۱ خلاصه‌ای از پایگاه داده آزمایش و جزئیات بیشتر نمونه‌ها در جدول A1 (مراجعه به پیوست) آورده شده است. قابل ذکر است که برای اطمینان از اعتبار و همخوانی داده‌های آزمایشی، چندین معیار انتخابی به شرح زیر تعیین شد: (۱) فقط نمونه‌های کشش مرکزی در پایگاه داده گنجانده شدند؛ (۲) میلگردهای FRP صاف به دلیل عملکرد ضعیف پیوند در این پایگاه داده گنجانده نشدند؛ (۳) نمونه‌هایی که مقاومت فشاری استوانه بتن آن‌ها بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال بود در نظر گرفته نشدند؛ (۴) نمونه‌هایی که دارای خاموت‌های داخلی FRP بودند از پایگاه داده حذف شدند؛ (۵) نمونه‌هایی که داده‌های نادرستی به دلیل تجهیزات آزمایشی ناکافی یا خطاهای ابزارآلات داشتند، حذف شدند. از آنجا که پایگاه داده بر اساس بسیاری از نتایج آزمایشی از مطالعات مختلف جمع‌آوری شده است، استفاده از همان شاخص برای ارزیابی ویژگی‌های مصالح بتن منطقی است. در این مقاله، مقاومت فشاری بتن که از مکعب‌های ۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر یا ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر به دست آمده بود، مطابق با معادله (۱) که توسط باساران و همکاران [۴۷] توسعه داده شده است، به مقاومت فشاری استوانه‌ای تبدیل شد. مقاومت فشاری مکعب‌های ۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر بر این، همان مقاومت فشاری که از استوانه‌های ۱۵۰ میلی‌متر × ۳۰۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر × ۲۰۰ میلی‌متر به دست آمده بود، در این مقاله به همان صورت پذیرفته شد، همانطور که در ادبیات موجود پیشنهاد شده است. [59,60]

$$f_c = 0.00002f_{cu}^3 - 0.00190f_{cu}^2 + 0.88271f_{cu} - 1.02579 \quad (\text{رابطه ۱})$$

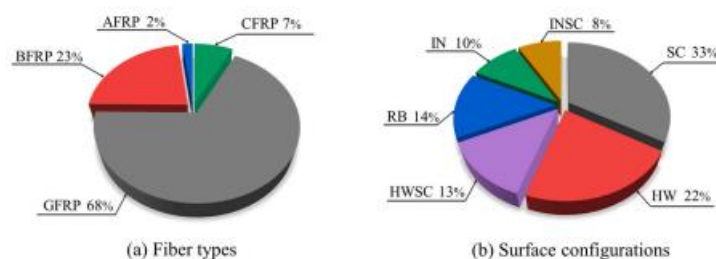
که در آن،  $f_{cu}$  مقاومت فشاری مکعبی از مکعب‌های استاندارد (۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر × ۱۵۰ میلی‌متر) است و  $f_c$  مقاومت فشاری استوانه‌ای از استوانه‌های استاندارد (۱۵۰ میلی‌متر × ۳۰۰ میلی‌متر) است.

شکل ۴ توزیع‌های آماری چندین پارامتر مهم در پایگاه داده را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها در پایگاه داده از ۲۰.۳ مگاپاسکال تا ۹۲.۴ مگاپاسکال متغیر است. علاوه بر این، پایگاه داده همچنین دامنه وسیعی از سایر پارامترها را پوشش می‌دهد، از جمله قطر

میلگردها ( $6 \leq d \leq 20$  mm)، طول نفوذ نرمال شده ( $4 \leq l/d \leq 15$ )، و پوشش بتن نرمال شده ( $1.5 \leq c/d \leq 16.2$ ) شکل‌های (a) و (b) به ترتیب نسبت هر نوع الیاف FRP آرمید (AFRP)، FRP بازالت (BFRP)، FRP شیشه‌ای (GFRP) و FRP کربن (CFRP) و هر نوع پیکربندی سطحی (یعنی SC، HW، RB، IN، HWSC و INSC) را نشان می‌دهند.



شکل ۴- توزیع‌های آماری پارامترهای مهم.

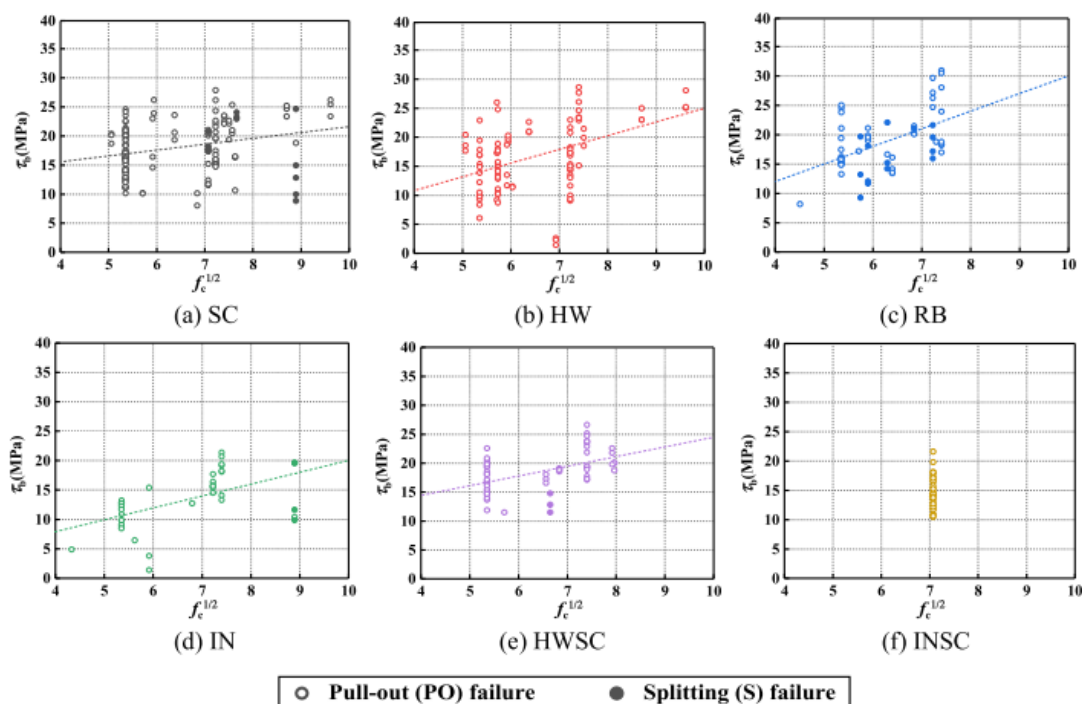


شکل ۵- توزیع ویژگی‌های سطح میلگرد و نوع الیاف

### 3.2. تأثیر مقاومت فشاری بتن

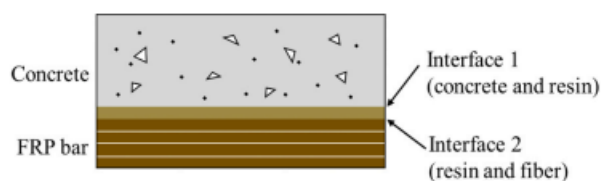
شکل ۶ رابطه بین استحکام نهایی پیوند  $\tau_b$  و مقاومت فشاری بتن و همچنین حالت شکست هر نمونه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که خط نقطه‌چین در شکل، خط روند نتایج آزمایش برای تمام نمونه‌ها است. به طور کلی، هنگامی که جذر مقاومت بتن ( $fc^{1/2}$ ) در بازه ۴-۱۰ قرار دارد، استحکام نهایی پیوند نمونه‌هایی که شکست به صورت بیرون کشیدن (PO) دارند، به طور مثبت با  $fc^{1/2}$  همبستگی دارد که با مطالعات قبلی همخوانی دارد [۱۲، ۱۶، ۲۶، ۳۰، ۶۱]. اگرچه استحکام پیوند می‌تواند با افزایش مقاومت فشاری بتن به طور قابل توجهی بهبود

یابد، بتن در زیر مقاومت فشاری بالاتر شکننده‌تر می‌شود، که منجر به تغییر حالت‌های شکست از شکست بیرون کشیدن به شکست خرد شدن (S) می‌شود. برای مثال، وقتی مقدار  $f_c^{1/2}$  به ۹ نزدیک می‌شود، بیشتر نمونه‌های IN به شکست S تبدیل می‌شوند، در حالی که مقدار انتقال برای میلگردهای RB و SC به ترتیب به ۵.۵ و ۷ کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده این است که ویژگی‌های سطحی ممکن است تأثیر زیادی بر روابط بین عملکرد پیوند و مقاومت بتن داشته باشد.



شکل ۶- رابطه بین استحکام نهایی پیوند و استحکام فشاری.

لی و همکاران [۱۳] بیان کردند که عملکرد پیوند بین میلگردهای FRP و بتن به دو رابط بستگی دارد که در شکل ۷ نشان داده شده است، یعنی رابط بتن-رزین (رابط ۱) و رابط رزین-الیاف (رابط ۲). با افزایش مقاومت فشاری بتن، آسیب‌های شدیدتری در رابط ۲ رخ می‌دهد و این می‌تواند در صورت تجاوز مقاومت فشاری بتن از ۷۵ مگاپاسکال، کنترل‌کننده نهایی شکست باشد.



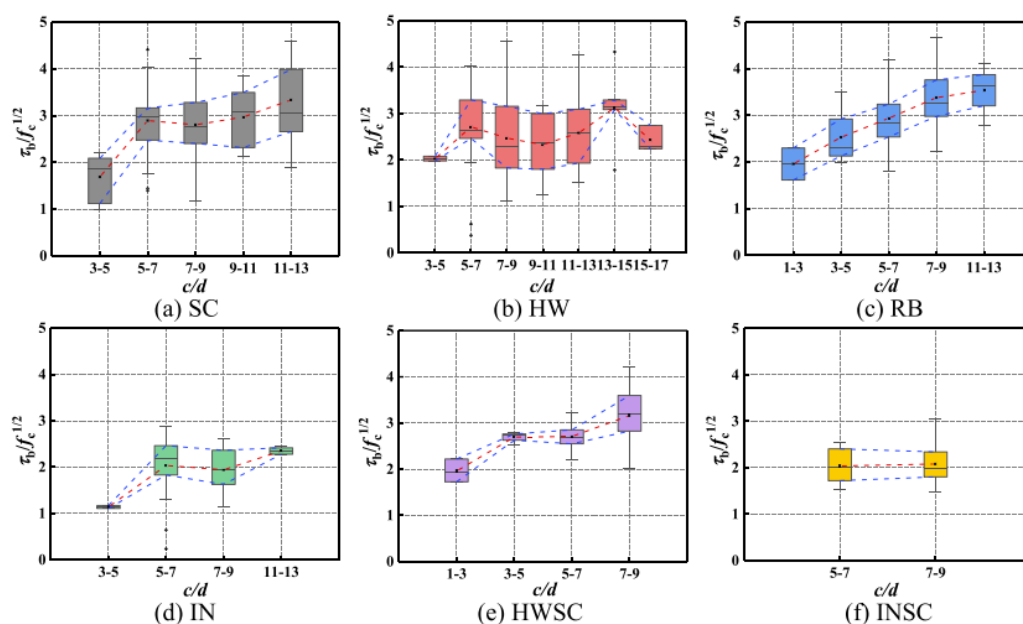
شکل ۷- پیوند سطحی بین میلگردهای FRP و بتن [۱۳]

با توجه به اهمیت پوشش‌های سطحی در تأثیر مقاومت بتن، تفسیر دقیق‌تری در ادامه ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که میلگردهای INSC در این بحث‌ها درگیر نیستند زیرا تنها یک مقاومت بتن برای این نوع میلگرد FRP موجود است. همانطور که در شکل ۶ (a) - (d) نشان داده شده است، بهبود واضح‌تری در استحکام پیوند برای میلگردهای HW، RB و IN نسبت به میلگردهای SC در هنگام افزایش مقاومت بتن مشاهده می‌شود. برای مثال، بیشترین بهبود در استحکام نهایی پیوند میلگردهای RB و SC به دلیل افزایش  $f_c^{1/2}$  به ترتیب ۲۷۸٪ و ۱۷۵٪

است که ممکن است نتیجه ویژگی‌های مختلف مکانیزم‌های پیوند این میلگردهای FRP باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد، عملکرد پیوند میلگردهای HW، RB و IN FRP به بتن عمدتاً به تداخل مکانیکی بین دنده‌ها و لبه‌های بتن بستگی دارد. این تعاملات تداخلی می‌توانند به طور مؤثری با افزایش مقاومت برشی بتن با افزایش مقاومت بتن تقویت شوند که منجر به بهبود استحکام پیوند می‌شود. با این حال، از آنجا که هیچ دنده‌ای به وضوح بر روی سطح میلگردهای SC وجود ندارد جز لایه شن، تنها بهبود اندکی در  $tb$  مشاهده می‌شود زمانی که مقاومت بتن  $fc1/2$  در بازه ۴-۱۰ تغییر می‌کند.

شکل ۶ (e) نشان می‌دهد که شیب خط روند صعودی برای میلگردهای HWSC FRP تقریباً در حدی بین میلگردهای HW و SC است که به دلیل ترکیب این دو روش سطحی به وجود آمده است. به طور خاص، هنگامی که مقاومت فشاری بتن پایین است ( $fc^{1/2} < 6$ )، استحکام نهایی پیوند میلگردهای SC و HWSC به طور نسبی در سطح بالاتری قرار دارد که حدود ۱۵-۲۰ درصد بیشتر از نمونه‌های HW است. این به این دلیل است که چسبندگی شیمیایی و اصطکاک در این شرایط نسبت به قفل مکانیکی اهمیت بیشتری دارند. با این حال، با افزایش مقاومت فشاری بتن، استحکام نهایی پیوند میلگردهای HWSC در سطحی مشابه با میلگردهای HW قرار می‌گیرد که از استحکام میلگردهای SC بیشتر است. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، استحکام پیوند میلگردهای SC نسبت به بهبود مقاومت فشاری بتن نسبت به سایر میلگردهای دفرمه‌شده حساس نیست. با توجه به رشته‌های پیچیده‌شده در میلگردهای HWSC تحت لایه شن، اثر میانه‌ای از تداخل مکانیکی در عملکرد پیوند برای میلگردهای HWSC مشاهده می‌شود که منجر به نتایج ذکر شده می‌شود. متأسفانه، نتایج آزمایش کافی برای میلگردهای INSC در دسترس نیست تا تأثیر مقاومت بتن را بررسی کنند. با این حال، بر اساس مشاهدات تجربی میلگردهای HWSC، می‌توان حدس زد که روند مشابهی ممکن است برای میلگردهای INSC نیز برقرار باشد به دلیل شباهت در پیکربندی‌های سطحی آن‌ها.

شکل ۸ روابط بین استحکام پیوند نرمال‌شده ( $tb/fc1/2$ ) میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف و پوشش بتن نرمال‌شده  $c/d$  را نشان می‌دهد. جعبه در شکل نشان‌دهنده دامنه استحکام پیوند نرمال‌شده است و میله خطا نمایانگر انحراف معیار است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استحکام پیوند نهایی نرمال‌شده میلگردهای SC، HW، RB و IN به طور قابل توجهی زمانی که پوشش بتن نرمال‌شده  $c/d$  از ۳-۵ به ۵-۷ افزایش می‌یابد، بهبود می‌یابد. شایان ذکر است که نسبت نمونه‌هایی که با شکست از نوع ترک‌خوردگی ماتریس بتن مواجه می‌شوند، از ۴۸٪ به ۵٪ در پایگاه داده کاهش می‌یابد هنگامی که پوشش بتن نرمال‌شده از محدوده ۳-۵ به ۵-۷ تغییر می‌کند. بنابراین، استحکام پیوند افزایش‌یافته مذکور ممکن است ناشی از انتقال الگوهای شکست باشد که با مشاهدات مطالعه‌ای که توسط Alves et al. [7] انجام شده است، سازگاری دارد. برای نمونه‌هایی که پوشش بتن نسبتاً کوچکی دارند، شکست زود هنگام از نوع ترک‌خوردگی ممکن است به راحتی رخ دهد و در نتیجه منجر به رفتار ضعیف پیوند شود. با این حال، بسیاری از مطالعات [۳۹،۶۲-۶۷] نشان داده‌اند که مقدار ۵ برای نسبت  $c/d$  کافی است تا از شکست زود هنگام ترک‌خوردگی جلوگیری شود. بنابراین، بحث‌های زیر عمدتاً بر روی محدوده  $c/d$  بالاتر از ۵ برای میلگردهای FRP متمرکز است. برای میلگردهای SC همانطور که در شکل ۸ (a) نشان داده شده است، روند افزایشی  $tb/fc1/2$  در شرایطی که  $c/d > 5$  کند می‌شود و تنها ۱۳٪ بهبود میانگین مشاهده می‌شود زمانی که  $c/d$  از ۵-۷ به ۱۱-۱۳ تغییر می‌کند. این به این دلیل است که پیوند میلگردهای SC عمدتاً به چسبندگی شیمیایی و اصطکاک وابسته است نه به تداخل مکانیکی. هنگامی که  $c/d$  در محدوده ۵-۷ است، ۹۵٪ از نمونه‌های دارای میلگردهای SC شکست از نوع بیرون کشیدن (pullout failure) را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده این است که محصور شدن ارائه شده توسط پوشش بتن تحت این شرایط نسبتاً کافی است. بنابراین، با افزایش بیشتر  $c/d$ ، تنها تعداد کمی از نمونه‌ها تغییر الگوی شکست از شکست زود هنگام ترک‌خوردگی به شکست بیرون کشیدن را تجربه می‌کنند که منجر به افزایش اندک استحکام‌های پیوند نرمال‌شده همانطور که در شکل ۸ (a) نشان داده شده است، می‌شود.



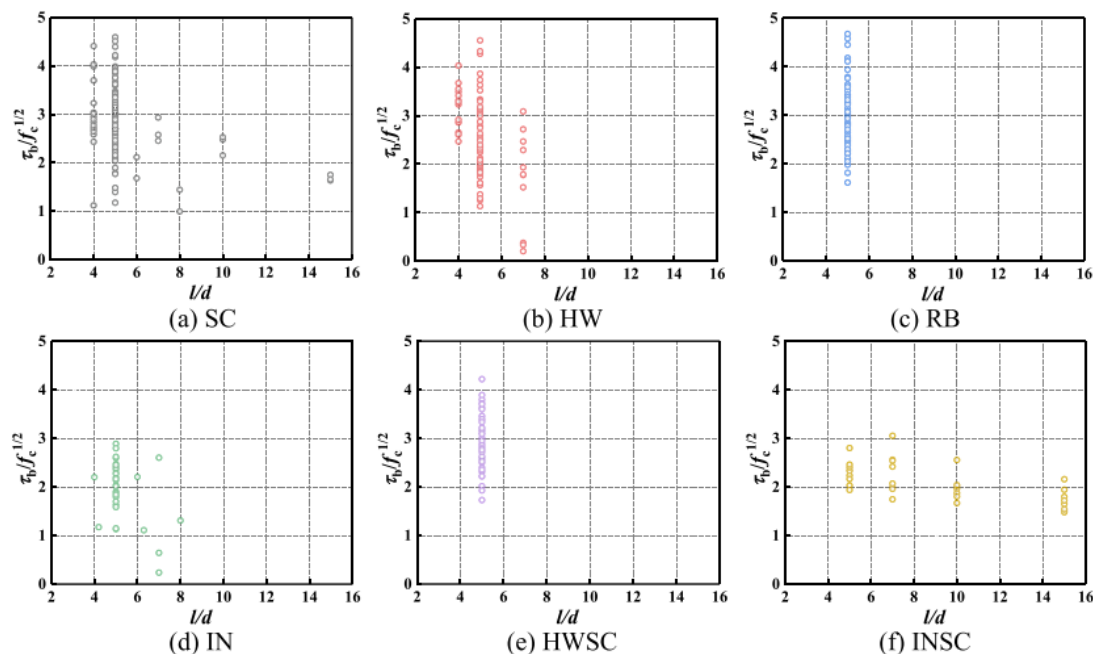
شکل ۸- تأثیر پوشش بتن نرمال شده بر استحکام پیوند نرمال شده

از آنجا که اثر گوه‌ای برای میلگردهای RB همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، واضح است، با افزایش پوشش بتن برای آن‌ها می‌توان بهبودهای قابل توجه‌تری نسبت به سایر میلگردها دستیابی یافت. همانطور که در شکل ۸(c) نشان داده شده است، با افزایش مداوم پوشش بتن، استحکام پیوند نرمال شده به طور مداوم افزایش می‌یابد بدون هیچ گونه کاهش. اما نرخ افزایش در طول تغییرات  $c/d$  از ۷-۹ به ۱۱-۱۳ کاهش می‌یابد که ممکن است ناشی از محصور شدن کافی توسط بتن باشد [۶۸]. از طرف دیگر، به دلیل اثر گوه‌ای کمتر مشهود برای میلگردهای IN و HW، توسعه‌های استحکام پیوند در شکل‌های ۸(b) و ۸(d) نسبتاً منطقی است. ویژگی‌های هندسی دندانه‌ها در میلگردهای HW باعث می‌شود که استحکام پیوند تقریباً به پوشش بتن وابسته نباشد، در حالی که یک "اثر گوه‌ای" ثانویه که از بتن خرد شده در یک طرف دندانه‌ها ناشی می‌شود ممکن است باعث افزایش جزئی استحکام پیوند برای میلگردهای IN شود. شکل‌های ۸(e) و ۸(f) تأثیر  $c/d$  بر میلگردهای HWSC و INSC را نشان می‌دهند. باید توجه داشت که تمامی نمونه‌های حاوی میلگردهای HWSC هنگامیکه پوشش بتن نرمال شده بیشتر از سه باشد، الگوهای شکست از نوع بیرون کشیدن را نشان می‌دهند. علاوه بر این، وقتی که  $c/d$  بیشتر از ۷ باشد، یک روند افزایشی واضح دوباره مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از "اثر گوه‌ای" محلی به دلیل تجمع شن آسیب‌دیده بین دو رشته مجاور تحت محصور شدن کافی باشد. علاوه بر این، میلگردهای INSC توسعه‌های مشابهی در استحکام پیوند نسبت به میلگردهای IN و SC دارند.

### 3.4. تأثیر طول کاشت

طبق پایگاه داده جمع‌آوری شده در این مطالعه، طول کاشت نرمال شده از ۴ تا ۱۵ متغیر است، اما مقدار ۷۶.۷٪ از نمونه‌ها برابر با ۵ است، که این مقدار همچنین به عنوان مقدار پیشنهادی در بیشتر کدهای موجود مانند CSA S806-12، ACI 440.3R-12 و ASTM D7913/D7913M-14 مشخص شده است [۴۴، ۶۹، ۷۰]. به طور کلی، استحکام پیوند نرمال شده میلگردهای FRP به بتن با افزایش طول کاشت کاهش می‌یابد [۱۷، ۲۹، ۳۰]. این امر به دلیل توزیع‌های غیرخطی تنش پیوند در طول کاشت است [۷۱، ۷۲]. علاوه بر این، اثر پواسون نیز باعث کاهش تعامل بین میلگردهای FRP و بتن می‌شود زمانی که میلگردهای FRP در کشش طولی تحت فشار قرار می‌گیرند که باعث کاهش اثرات اصطکاکی در طول طول می‌شود.

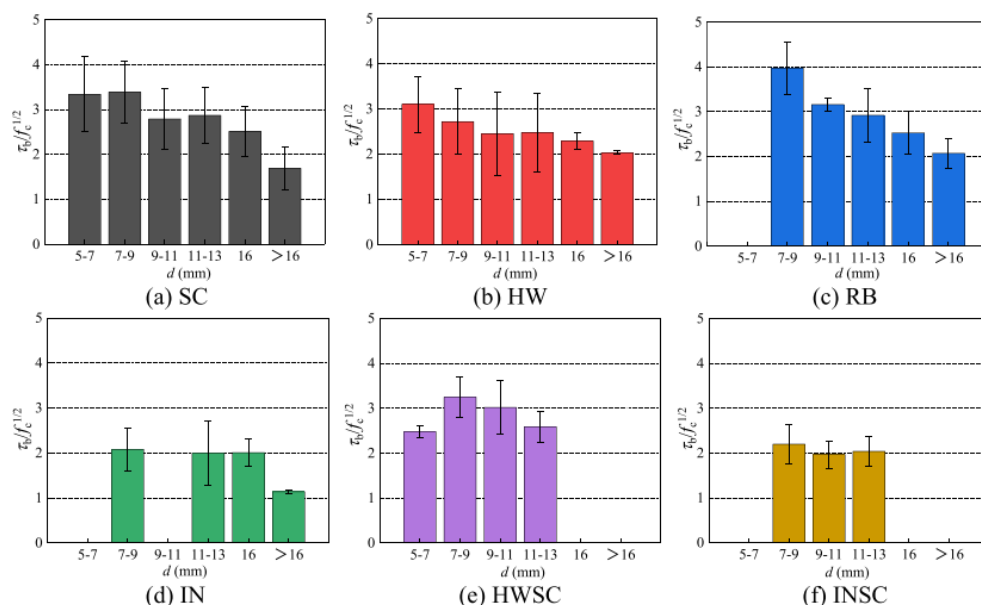
شکل ۹ تأثیر طول کاشت بر استحکام پیوند نرمال شده میلگردهای FRP به بتن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استحکام پیوند میلگردهای SC دارای پراکندگی نسبتاً زیادی است و نتایج آزمایشی موجود برای میلگردهای IN, RB, HW و SC به نظر نمی‌رسد که برای نتیجه‌گیری‌های قابل اعتماد کافی باشند. بنابراین، برای توسعه درک عمیق‌تری از تأثیر طول کاشت بر عملکرد پیوند میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف، باید آزمایش‌های بیشتری با دامنه وسیع‌تری از  $l/d$  در آینده انجام شود.



شکل ۹- تأثیر طول دفن نرمال شده بر استحکام پیوند نرمال شده

### 3.5. تأثیر قطر میلگرد

شکل ۱۰ رابطه بین استحکام پیوند نرمال شده و قطر میلگرد را نشان می‌دهد و خطای موجود در این شکل نمایانگر انحراف معیار است. به طور کلی، افزایش قطر میلگرد استحکام پیوند نمونه‌های کاشته شده با انواع مختلف میلگردهای FRP را کاهش می‌دهد که با مشاهدات انجام شده در مطالعات قبلی هم‌راستا است [۱۲، ۱۷، ۲۹، ۳۰]. دلایل اصلی این امر می‌تواند به چهار جنبه زیر نسبت داده شود: (۱) با افزایش قطر میلگرد، طول کاشت طولانی‌تری مورد نیاز است که منجر به کاهش استحکام پیوند متوسط همان‌طور که قبلاً ذکر شد، می‌شود؛ (۲) آب خون‌ریزی شده که در اطراف میلگردهای FRP با قطر بزرگ‌تر محبوس شده است، ممکن است فضای خالی واضح‌تری ایجاد کند که سطح تماس بین میلگردها و بتن اطراف را کاهش دهد و در نتیجه استحکام پیوند کاهش یابد؛ (۳) اثر پواسون با افزایش قطر میلگرد بیشتر مشهود است؛ (۴) حرکت‌های متفاوت بین سطح میلگرد و هسته میلگردها به راحتی می‌تواند تشکیل شود، زیرا سختی برشی میلگردهای FRP کمتر از میلگردهای فولادی معمولی است. بنابراین، توزیع غیر یکنواخت تنش‌های نرمال در سراسر مقطع قابل شناسایی است که در آن تنش نرمال سطحی بیشتر از تنش نرمال هسته‌ای است که به عنوان اثر "شکاف برشی" شناخته می‌شود [۱۷]. علاوه بر این، تفاوت در میلگردهای با قطر بزرگ‌تر بیشتر مشهود است که پیش‌بینی می‌شود استحکام پیوند متوسط را کاهش دهد.



شکل ۱۰- تأثیر قطر میله بر استحکام پیوند نرمال شده نهایی.

به طور خاص، درجه کاهش استحکام پیوند نرمال شده به دلیل افزایش قطر میله (d) FRP برای هر نوع میله FRP یکسان نیست. همانطور که در شکل ۱۰ (a)، (c) و (d) نشان داده شده است، زمانی که قطر میله‌های SC، RB و IN به میزان ۱۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد، حداکثر کاهش‌های استحکام پیوند نرمال شده به ترتیب ۴۹٪، ۴۸٪ و ۴۵٪ است. با این حال، کاهش‌های مربوطه برای میله‌های HW، HWSC و INSC بسیار کمتر است. در واقع، تغییر قطر میله (d) با اندازه ثابت نمونه منجر به تغییر در پوشش بتن نرمال شده  $c/d$  می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد، پوشش بتن نقش مهمی در استحکام پیوند بین میله‌های FRP و بتن ایفا می‌کند. از طرف دیگر، ممکن است هنگامی که قطر میله‌ها تنظیم می‌شود، حالت‌های شکست مختلفی برای نمونه‌ها رخ دهد. با افزایش قطر میله‌ها، نمونه‌ها مستعد تجربه شکست تفکیک شده به دلیل کاهش پوشش بتن هستند که منجر به کاهش استحکام پیوند می‌شود. به عنوان مثال، زمانی که قطر میله از ۱۶ میلی‌متر فراتر می‌رود، تقریباً نیمی از نمونه‌های کاشته شده با میله‌های IN شکست تفکیک شده را نشان می‌دهند که منجر به کاهش ناگهانی همانطور که در شکل ۱۰ (d) نشان داده شده است، می‌شود. علاوه بر این، در مقایسه با میله‌های SC، هرچند که مقدار مطلق استحکام پیوند نرمال شده برای میله‌های HWSC و INSC نسبتاً کم است، این میله‌ها به تغییرات قطر میله حساسیت کمتری دارند. بنابراین، برای کاهش تأثیر قطر میله‌ها بر عملکرد پیوند میله‌های SC، استفاده از الگوی دفرمه اضافی روی سطح میله ممکن است انتخاب معقولی باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مقاله مطالعات موجود در مورد عملکرد پیوند میله‌های FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف و بتن را بررسی می‌کند. بر اساس پایگاه داده آزمایشی جمع‌آوری شده، چندین عامل تأثیرگذار مرتبط با عملکرد پیوند مورد بحث قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، دقت برخی از مدل‌های موجود برای پیش‌بینی مقاومت پیوند ارزیابی شده و یک مدل جدید پیش‌بینی با دقت بالاتر در این مقاله پیشنهاد شده است. نتیجه‌گیری‌های زیر از نتایج حاضر قابل استنباط است:

- از آنجا که درمان سطح تأثیر زیادی بر عملکرد پیوند میله‌های FRP با بتن دارد، یک پایگاه داده آزمایشی جامع حاوی ۴۰۷ نتیجه آزمایشی در این مطالعه جمع‌آوری شده است تا اثر چندین پارامتر مهم تحت ویژگی‌های سطحی مختلف مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، دو شاخص هندسی  $w$  و  $y$  برای کمی‌سازی تفاوت در پیکربندی‌های سطح میله‌ها توسعه یافته است.

۲. بهبود اندکی در مقاومت پیوند میلگردهای SC با افزایش مقاومت بتن نسبت به سایر میلگردهای تغییر یافته مشاهده می‌شود، در حالی که میلگردهای RB بیشترین بهبود را نشان می‌دهند. به طور خاص، زمانی که مقاومت فشاری بتن از  $20.3 \text{ MPa}$  به  $54.8 \text{ MPa}$  افزایش می‌یابد، مقاومت نهایی پیوند تا  $278\%$  افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، میلگردهای HWSC نرخ افزایش فوری بین SC و HW را نشان می‌دهند.
۳. شکست کشش می‌تواند در صورتی انتظار داشته باشد که یک پوشش بتن کافی موجود باشد، و آستانه  $c/d$  برای میلگردهای FRP با ویژگی‌های سطحی مختلف متفاوت است. به طور خاص، پوشش‌های بتن بزرگتر برای میلگردهای RB نسبت به میلگردهای SC، HW و IN نیاز است. علاوه بر این، مقاومت پیوند و حالت‌های شکست میلگردهای HWSC و INSC با تغییرات  $c/d$  نسبتاً پراکنده هستند، که باعث دشواری در تعیین آستانه معقول برای  $c/d$  می‌شود.
۴. بر اساس پایگاه داده آزمایشی، طول تثبیت نرمال شده اکثر نمونه‌ها عمدتاً در محدوده ۵-۷ متمرکز است، که این امر باعث عدم توانایی برای ارزیابی تاثیر  $l/d$  به دلیل عدم وجود نتایج آزمایشی کافی می‌شود. علاوه بر این، با افزایش قطر میلگردها، بیشترین کاهش در مقاومت پیوند برای میلگردهای SC مشاهده می‌شود و سایر انواع میلگردها کاهش‌های مختلفی را نشان می‌دهند.

## مراجع

- [1] Fahmy, M., Ahmed, S. A. S., & Wu, Z. (2021). Bar surface treatment effect on the bond-slip behavior and mechanism of basalt FRP bars embedded in concrete. *Constr Build Mater*, 289, 122844.
- [2] Henin, E., & Morcou, G. (2021). Bond behavior of helically wrapped sand coated deformed glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars in concrete. *Constr Build Mater*, 288, 123120.
- [3] Rostami, M., Sennah, K., & Afefy, H. (2017). Ultimate capacity of barrier-deck anchorage in MTQ TL-5 barrier reinforced with headed-end, high-modulus, sand-coated GFRP bars. *Can J Civ Eng*, 45, 263–278.
- [4] Masmoudi, R., Masmoudi, A., Ouezdou, M. B., & Daoud, A. (2011). Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperature ranging from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $80^{\circ}\text{C}$ . *Constr Build Mater*, 25(2), 486–493.
- [5] Hajiloo, H., & Green, M. (2015). Bond strength of glass fibre reinforced polymer bars in concrete at high temperature. *Proc Conf Can Soc Civ Eng*, Regina, SK.
- [6] Benmokrane, B., Mohamed, H. M., Manalo, A., & Cousin, P. (2017). Evaluation of physical and durability characteristics of new headed glass fiber-reinforced polymer bars for concrete structures. *J Compos Constr*, 21(2), 04016081.
- [7] Alves, J., El-Ragaby, A., & El-Salakawy, E. (2011). Durability of GFRP bars' bond to concrete under different loading and environmental conditions. *J Compos Constr*, 15(3), 249–262.
- [8] Cosenza, E., Manfredi, G., & Realfonzo, R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *J Compos Constr*, 1(2), 40–51.
- [9] ACI 440.1R-15. (2015). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI.
- [10] CSA S6-14. (2014). Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association. Mississauga, Canada.
- [11] CNR 203-06. (2007). Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Rome, Italy*.
- [12] Baena, M., Torres, L., Turon, A., & Barris, C. (2009). Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Compos B Eng*, 40(8), 784–797.
- [13] Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, T. J., Yi, C. K., You, Y. C., & Park, J. S. (2008). Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Compos B Eng*, 39(2), 258–270.
- [14] Soong, W. H., Raghavan, J., & Rizkalla, S. H. (2011). Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer reinforcement to concrete. *Constr Build Mater*, 25(6), 2813–2821.
- [15] Islam, S., Afefy, H. M., Sennah, K., & Azimi, H. (2015). Bond characteristics of straight and headed-end, ribbed-surface, GFRP Bars embedded in high-strength concrete. *Constr Build Mater*, 83, 283–298.
- [16] Veljkovic, A., Carvelli, V., Haffke, M. M., & Pahn, M. (2017). Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading. *Compos B Eng*, 124, 40–53.
- [17] Firas, S. A., Gilles, F., & Robert, L. 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.
- [18] Tepfers, R. (2006). Bond clause proposals for FRP bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: Design bond stress for FRP reinforcing bars. *Struct Concr*, 7, 47–55.

- [19] Cosenza, E., Manfredi, G., & Realfonzo, R. (2002). Development length of FRP straight rebars. *Compos B Eng*, 33(7), 493–504.
- [20] Mazaheripour, H., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J. M., Pepe, M., & Martinelli, E. (2013). Experimental study on bond performance of GFRP bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Compos Struct*, 95, 202–212.
- [21] Tighiouart, B., Benmokrane, B., & Gao, D. (1998). Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Constr Build Mater*, 12(8), 453–462.
- [22] Rezazadeh, M., Carvelli, V., & Veljkovic, A. (2017). Modelling bond of GFRP rebar and concrete. *Constr Build Mater*, 153, 102–116.
- [23] Al-Zahrani, M. M. (1995). Bond behavior of fiber-reinforced plastic (FRP) reinforcements with concrete. *Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia, USA*.
- [24] Aiello, M. A., Leone, M., & Pecce, M. (2007). Bond performances of FRP rebars-reinforced concrete. *J Mater Civ Eng*, 19(3), 205–213.
- [25] Nanni, A., Al-Zaharani, M., Al-Dulaijan, S., Bakis, C., & Boothby, I. (1995). Bond of FRP reinforcement to concrete-experimental results. *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Proc Second Int RILEM Symp*, Pa State Univ, PA, USA.
- [26] Solyom, S., & Balazs, G. L. (2020). Bond of FRP bars with different surface characteristics. *Constr Build Mater*, 264, 119839.
- [27] Zhang, P., Zhang, S., Gao, D., Dong, F., Liu, Y., Zhao, J., & Sheikh, S. A. (2020). Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar. *Adv Struct Eng*, 24(1), 196–208.
- [28] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., & Tao, S. (1997). Bond behavior of deformed GFRP rebars. *J Compos Mater*, 31(14), 1413–1430.
- [29] El Refai, A., Ammar, M.-A., & Masmoudi, R. (2015). Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete. *J Compos Constr*, 19(3), 04014050.
- [30] Achillides, Z., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Waldron, P. (2004). Tests for the Evaluation of Bond Properties of FRP Bars in Concrete. *Second Int Conf FRP Compos Civ Eng*, Adelaide, Australia.
- [31] Harajli, M., & Abouniaj, M. (2010). Bond performance of GFRP bars in tension: Experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines. *J Compos Constr*, 14(6), 659–668.
- [32] Xue, W., Zheng, Q., Yang, Y., & Fang, Z. (2014). Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars. *J Reinf Plast Compos*, 33(10), 895–910.
- [33] Malvar, L. J. (1994). Bond stress-slip characteristics of FRP rebars. *Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA, USA*.
- [34] Hao, Q., Wang, Y., He, Z., & Ou, J. (2009). Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete. *Constr Build Mater*, 23(2), 865–871.
- [35] Gu, X., & Dong, Q. (2012). Laboratory test and numerical simulation of bond performance between basalt fiber reinforced polymer rebar and concrete. *J Test Eval*, 40, 1–8.
- [36] Katz, A. (1999). Bond mechanism of FRP rebars to concrete. *Mater Struct*, 32(10), 761–768.
- [37] Solyom, S., & Balazs, G. (2015). Bond strength of FRP rebars. *Concr Struct*, 16, 62–68.
- [38] Arias, J. P. M., Vazquez, A., & Escobar, M. M. (2012). Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete. *J Compos Mater*, 46(18), 2271–2278.
- [39] Lu, J., Afefy, H. M., Azimi, H., Sennah, K., & Sayed-Ahmed, M. (2022). Bond characteristics of glass-fibre-reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Struct Build*, 175(10), 748–764.
- [40] Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R., & Tourneur, C. (2007). Effect of surface pre-conditioning on bond of carbon fibre reinforced polymer rods to concrete. *Cem Concr Compos*, 29(9), 677–689.
- [41] Okelo, R., & Yuan, R. (2005). Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *J Compos Constr*, 9(3), 203–213.
- [42] He, Z., & Tian, G. (2011). Probabilistic evaluation of the design development length of a GFRP rod pull-out from concrete. *Eng Struct*, 33(10), 2943–2952.
- [43] Choi, D. U., Chun, S., & Ha, S. (2012). Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete. *Eng Struct*, 34, 303–313.
- [44] CSA S806-12. (2012). Design and construction of building structures with fibre reinforced polymers. *Canadian Standards Association*, Mississauga, Canada.
- [45] El-Nemr, A., Ahmed, E. A., Barris, C., & Benmokrane, B. (2016). Bond-dependent coefficient of glass- and carbon-FRP bars in normal- and high-strength concretes. *Constr Build Mater*, 113, 77–89.
- [46] Zhao, D., Zhou, Y., Xing, F., Sui, L., Ye, Z., & Fu, H. (2021). Bond behavior and failure mechanism of fiber-reinforced polymer bar-engineered cementitious composite interface. *Eng Struct*, 243, 112520.
- [47] Basaran, B., & Kalkan, I. (2020). Development length and bond strength equations for FRP bars embedded in concrete. *Compos Struct*, 251, 112662.

- [48] Larralde, J., & Silva-Rodriguez, R. (1993). Bond and slip of FRP rebars in concrete. *J Mater Civ Eng*, 5(1), 30–40.
- [49] Kanakubo, T., Keisuke, Y., Fukuyama, H., Fujisawa, M., & Sonobe, Y. (1993). Bond performance of concrete members reinforced with FRP bars. *Acids Sp Pub*, 138, 767–788.
- [50] Chen, L., Liang, K., & Shan, Z. (2023). Experimental and theoretical studies on bond behavior between concrete and FRP bars with different surface conditions. *Compos Struct*, 309, 116721.
- [51] Mugahed, A. Y. H., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018). Properties and Applications of FRP in Strengthening RC Structures: A Review. *Structures*, 16, 208–238.
- [52] Wang, Y., Wang, M., Zhang, X., & Xu, Q. (2020). Influence of BFRP lateral constraints on bonding properties of GFRP ribbed reinforcement to concrete. *Compos Sci Eng*, 4, 5–12.
- [53] Yan, F., Lin, Z., Zhang, D., Gao, Z., & Li, M. (2017). Experimental study on bond durability of glass fiber reinforced polymer bars in concrete exposed to harsh environmental agents: Freeze-thaw cycles and alkaline-saline solution. *Compos B Eng*, 116, 406–421.
- [54] Wei, W., Liu, F., Xiong, Z., Yang, F., Li, L., Luo, H. (2020). Effect of loading rates on bond behaviour between basalt fibre-reinforced polymer bars and concrete. *Constr Build Mater*, 231, 117138.
- [55] Ma, G., Huang, Y., Aslani, F., & Kim, T. (2019). Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP-steel bars as concrete reinforcement. *Constr Build Mater*, 201, 62–71.
- [56] Kim, B., Doh, J. H., Yi, C. K., & Lee, J. Y. (2013). Effects of structural fibers on bonding mechanism changes in interface between GFRP bar and concrete. *Compos B Eng*, 45(1), 768–779.
- [57] Davalos, J. F., Chen, Y., & Ray, I. (2008). Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete. *Cem Concr Compos*, 30(8), 722–730.
- [58] GB/T50081-2019. (2019). Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties. *Beijing: China Architecture and Building Press*.
- [59] Oztekin, E., Eker, C., & Derin, E. (2012). Use of 150/300 or 100/200 mm cylinder samples for measuring the compressive strength of concrete. *THBB Hazır Bet Derg*, 75–78.
- [60] Arioglu, E., Arioglu, N., & Girgin, C. (1999). Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi. *THBB Hazır Bet Derg*, 40–50.
- [61] Xiong, Z., Wei, W., Liu, F., Cui, C., Li, L., Zou, R., Zeng, Y. (2021). Bond behaviour of recycled aggregate concrete with basalt fibre-reinforced polymer bars. *Compos Struct*, 256, 113078.
- [62] Quayyum, S. (2010). Bond behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete. *MSc. Dissertation. Univ Br Columbia, Okanagan, Can*.
- [63] Yan, F., Lin, Z., & Yang, M. (2016). Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. *Compos B Eng*, 98, 56–69.
- [64] Moallemi Pour, S., & Alam, M. S. (2016). Investigation of compressive bond behavior of steel rebar embedded in concrete with partial recycled aggregate replacement. *Structures*, 7, 153–164.
- [65] Li, H., Deeks, A. J., & Su, X. (2013). Experimental study on compressive bond anchorage properties of 500 MPa steel bars in concrete. *J Struct Eng*, 139(12), 04013005.
- [66] Butler, L. J., West, J. S., & Tighe, S. L. (2015). Bond of reinforcement in concrete incorporating recycled concrete aggregates. *J Struct Eng*, 141(3), B4014001.
- [67] Su, X., Yin, S., & Zhao, Y. (2021). Experimental study on bond behavior between BFRP bars and seawater sea-sand concrete. *J Cent South Univ*, 28, 2193–2205.
- [68] Li, P., Jin, L., Zhang, R., & Du, X. (2022). Static bond performance between BFRP bars and concrete with stirrup confinement: A refined modelling. *Eng Struct*, 262, 114379.
- [69] ASTM D7913/D7913M-14. (2020). Standard test method for bond strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars to concrete by pullout testing. *Conshohocken, USA: ASTM International*.
- [70] ACI 440.3R-12. (2012). Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRP) composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures. *American Concrete Institute, Michigan, USA*.
- [71] Benmokrane, B., Tighiouart, B., & Chaallal, O. (1996). Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete. *Acids Mater J*, 93(3), 254–259.
- [72] Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Nanni, A., Bakis, C. E., & Boothby, T. E. (1999). Evaluation of bond using FRP rods with axisymmetric deformations. *Constr Build Mater*, 13(6), 299–309.