



Investigating the Affecting Factors on the Bond of FRP Rebars in Concrete

ARTICLE INFO

Authors

Ekrami Kakhki S.A.¹,
Kheyroddin A.^{1*}

¹ Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* Correspondence

Address: Faculty of Civil Engineering,
Semnan University, Semnan, Iran, Tel
+98-23-33654040
kheyroddin@semnan.ac.ir

How to cite this article

Ekrami Kakhki SA, Kheyroddin A,
Investigating the Affecting Factors on
the Bond of FRP Rebars in Concrete.
Proceedings of the 6th National
Conference on Mechanical-Civil
Engineering and Advanced Technologies.
2024; 24(11):109-116.

ABSTRACT

The use of steel bars in the construction industry goes back more than a hundred years. Despite having high resistance, steel is subject to corrosion in corrosive environments, and this results in high maintenance costs. Therefore, it is necessary to use FRP rebars as an alternative to steel rebars, and the bond of FRP rebars and concrete is very important. Considering that the bond of FRP rebars and concrete is less than that of steel rebars and concrete, it is necessary to study the effective factors in the bond of FRP rebars and concrete experimentally and numerically and determine the optimal conditions, which is discussed in this research. The investigations showed that the rebar surface, rebar diameter, embedment length, concrete compressive strength, concrete cover, stirrup around the reinforcement and the distance of the reinforcements from each other are influential factors on the bond behavior of FRP rebar and concrete.

Keywords Corrosion, Bond Behavior, FRP Rebars

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری های پیشرفته



بررسی عوامل موثر بر پیوستگی میلگردهای FRP در بتن



چکیده

استفاده از میلگردهای فولادی در صنعت ساخت و ساز به بیش از صد سال پیش باز می گردد. فولاد علیرغم داشتن مقاومت بالا در محیط های خورنده در معرض خوردگی قرار می گیرد و این امر هزینه های نگهداری بالایی را به دنبال دارد. از این رو، استفاده از میلگردهای FRP به عنوان جایگزین میلگردهای فولادی ضروری است و پیوستگی میلگردهای FRP و بتن بسیار با اهمیت است. با توجه به اینکه پیوستگی میلگردهای FRP و بتن کمتر از میلگردهای فولادی و بتن است، لازم است عوامل موثر در پیوستگی میلگردهای FRP و بتن به صورت تجربی و عددی بررسی و شرایط بهینه تعیین شوند که در این پژوهش به آن پرداخته می شود. بررسی ها نشان داد که سطح میلگرد، قطر میلگرد، طول تعبیه، مقاومت فشاری بتن، پوشش بتن، خاموت دور آرماتور و فاصله آرماتورها از یکدیگر از عوامل تأثیرگذار بر رفتار پیوستگی میلگرد FRP و بتن می باشد.

مشخصات مقاله

نویسنده ها

سید علی اکرامی کاخکی^۱
علی خیرالدین^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه
سمنان، سمنان، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، تلفن
+۳۳۶۵۴۰۴۰-۲۳-۹۸
kheyroddin@semnan.ac.ir

کلیدواژه ها خوردگی، رفتار پیوستگی، میلگردهای FRP

۱- مقدمه

سازه‌های بتن آرمه (RC) به مرور زمان دچار خرابی می‌شوند و عمر مفید آنها کاهش می‌یابد و برای حفظ سلامت خود نیاز به تعمیر و نگهداری دارند. هنگامی که اعضای سازه ترک می‌خورند، نفوذ مواد معدنی به داخل بتن منجر به خوردگی فولاد و تخریب بتن می‌شود. کربناته شدن بتن تأثیر زیادی در زوال بتن دارد و موجب ورود کلرید و خوردگی فولاد به ویژه در مناطق ساحلی می‌شود. تاریخچه کاربرد بتن آرمه و بتن پیش تنیده در کارهای دریایی به سال ۱۸۹۶ برمی‌گردد. دلیل این امر، مقاومت خوب، خواص ذاتی بتن و سهولت در کاربرد آن در بتن‌ریزی درجا و در بتن پیش تنیده می‌باشد. در محیط‌های دریایی و ساحلی، در خاک، آب زیرزمینی و هوا اکثراً مقادیر زیادی از ترکیب‌های کلرید و سولفور وجود دارد. اخیراً استفاده از میلگردهای غیر فلزی در بتن به صورت محدود شروع شده و تحقیقات بیشتر در زمینه استفاده وسیع‌تر آنها و عملکرد طولانی مدت این نوع میلگردها در حال انجام است [1].

خرابی ناشی از خوردگی در بتن آرمه بدین صورت است که ترک‌های ریز ایجاد شده در سازه‌های بتنی در اثر انقباض و تغییرات دمایی و رطوبتی در مجاورت آب موجب تشدید نفوذ کلریدها و سولفات‌های مهاجم به داخل بتن شده و شرایط مستعدی را برای خوردگی فولاد فراهم می‌آورد. میلگردهای فلزی درون بتن زنگ زده و اکسید می‌شوند. حرکت این اکسیدها به سمت سطح بیرونی سازه بتنی و انتشار آنها در داخل بتن موجب از بین رفتن آن می‌شود. بدین ترتیب با خورده شدن دو جزء بتنی و فلزی سازه، زمینه تخریب کامل سازه‌ها و مخازن بتنی فراهم می‌شود. به منظور جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی سازه‌های بتنی آرمه راهکارهای زیادی وجود دارد مانند تزریق پلیمر به سطوح داخلی و خارجی مخازن بتنی و حفاظت کاتدی که هر یک تا حدودی موفق بودند؛ ولی استفاده از میلگردهای پلیمری به جای میلگردهای فلزی مشکل فوق را به طور چشمگیری حل و عمر سازه‌ها را افزایش می‌دهد زیرا از دلایل عمده استفاده از ترکیبات FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه، وزن کم و مقاومت خوب این مصالح در برابر پدیده خوردگی است [2].

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پلیمری (FRP) از سال ۱۹۴۰ در سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۱۹۵۴ برای اولین بار گلدس ورشی تولی میلگردهای کامپوزیتی به روش بولت تراش را پیشنهاد کرد. به کاربردن میلگردهای FRP به عنوان جایگزین میلگردهای فولادی در اواخر ۱۹۸۰ شروع شد ولی استفاده گسترده از آنها از سال ۱۹۹۰ رشد یافت. استفاده ساختاری میلگرد FRP در مهندسی عمران و پلسازی به عنوان یک محصول جدید با پتانسیل بالا در اواخر ۱۹۹۰ تأیید شد. آیین نامه طراحی و اجرای سازه‌های بتن آرمه با میلگردهای کامپوزیت پلیمری برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در کشور ژاپن توسط انجمن مهندسی عمران

تدوین گردید [3]. با توجه به خوردگی میلگردهای فولادی و ضرورت استفاده از میلگردهای FRP به عنوان جایگزین میلگردهای فولادی، شناخت ویژگی‌های این نوع میلگرد و عوامل موثر در پیوستگی آنها با بتن بسیار اهمیت دارد که در این پژوهش به آنها پرداخته می‌شود.

۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی FRP

میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) به دلیل خواص منحصر به فرد در مقایسه با میلگردهای فولادی سنتی، به طور فزاینده ای در ساخت و ساز استفاده می‌شوند. این خواص شامل استحکام بالا، چگالی کم و مقاومت در برابر خوردگی است. میلگردهای FRP به طور قابل توجهی سبکتر از فولاد هستند، با چگالی تقریباً بین ۱/۲۵ تا ۲/۱ گرم بر سانتی متر مکعب در مقایسه با چگالی فولاد که حدود ۷/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. چگالی کمتر، وزن کلی سازه‌ها را کاهش می‌دهد و موجب کاهش در هزینه حمل و نقل و انبار و تسریع در جابجایی و جاگذاری می‌شود. یکی از بارزترین مزایای میلگردهای FRP مقاومت بسیار خوب آنها در برابر خوردگی است. برخلاف فولاد که در معرض رطوبت و مواد شیمیایی زنگ می‌زند، میلگردهای FRP یکپارچگی خود را در محیط‌های سخت، از جمله شرایط اسیدی و شور حفظ می‌کنند. میلگردهای FRP نارسا هستند و خاصیت مغناطیسی ندارند که این امر آنها را برای کاربردهایی که میدان‌های الکتریکی وجود دارد یا تداخل مغناطیسی باید به حداقل برسد مناسب می‌سازد. استحکام کششی میلگردهای FRP بر اساس نوع الیاف استفاده شده بسیار متفاوت است. برای مثال استحکام کششی پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) ۴۸۳ تا ۴۵۸۰ مگاپاسکال، پلیمر تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) ۶۰۰ تا ۳۹۲۰ مگاپاسکال و پلیمر تقویت شده با الیاف آرامید (AFRP) ۴۱ تا ۱۷۵ مگاپاسکال می‌باشد. نرخ ازدیاد طول برای میلگردهای FRP به طور کلی کمتر از فولاد است که نشان دهنده شکل پذیری کمتر است. به منظور افزایش شکل پذیری اعضای بتن آرمه FRP از روش‌هایی مانند میلگرد ترکیبی (ترکیب الیاف کربن + شیشه یا شیشه + آرامید و ...) و الیاف درون بتن می‌توان استفاده کرد. میلگردهای FRP در مقایسه با فولاد مقاومت خستگی بالاتری از خود نشان می‌دهند که در کاربردهایی که تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند بسیار مهم است. آنها تمایل دارند بدون تغییر شکل پلاستیکی قابل توجه، شکست بخورند و حالت شکست قابل پیش‌بینی‌تری را ارائه می‌دهند. مواد FRP در مقایسه با فولاد رسانایی حرارتی پایینی دارند که می‌تواند در کاربردهایی که عایق حرارتی مورد نظر است سودمند باشد. بتن و میلگرد به کار رفته در آن باید هر دو دارای مشخصات حرارتی یکسانی باشند. ضریب انبساط حرارتی بتن بین 10^{-6} تا 6×10^{-6} تا 11×10^{-6} درجه سانتی‌گراد متغیر است. خواص مکانیکی میلگردهای FRP می‌تواند در دماهای

چسبندگی و قابلیت‌های مکانیکی در هم قفل شدن را کاهش می‌دهد. اصلاح سطحی (به عنوان مثال، پوشش شنی یا آجدار) نیز می‌تواند با قطر میلگرد متفاوت باشد. در حالی که اصلاح سطحی مقاومت پیوستگی را افزایش می‌دهد، کارایی آنها ممکن است به دلیل کاهش سطح مؤثر پیوستگی با افزایش قطر کاهش یابد [8]. طول مهاری مورد نیاز برای دستیابی به مقاومت پیوستگی کافی تحت تأثیر قطر میلگرد است. قطرهای بزرگتر برای ایجاد مقاومت پیوستگی کافی به طول‌های تعبیه بیشتری نیاز دارند. با این حال، اگر به درستی طراحی نشود می‌تواند به مقاومت پیوستگی کمتر منجر شود [9].

بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش قطر میلگرد، میزان تنش بتن و آرماتور و مقاومت چسبندگی کاهش می‌یابد. البته از آنجایی که با تغییر قطر میلگرد، پوشش بتن و نوع گسیختگی نیز تغییر می‌کند، تعیین دقیق این اثر آسان نیست. علاوه بر این، با افزایش قطر میلگرد، مقدار نیروی لازم برای بیرون کشیدن میلگرد نیز افزایش می‌یابد و موجب گسیختگی از نوع شکافت می‌شود.

برون و بارتولومئو به صورت تجربی پیوستگی میلگردهای FRP در بتن را بررسی نمودند و مشخص گردید با افزایش قطر میلگرد، پیوستگی کاهش می‌یابد. همچنین در صورت استفاده از بتن با مقاومت فشاری بالا، پیوستگی قوی‌تری ایجاد می‌شود [1]. اولکو و یوهان با آزمایش بیرون کشیدن (Pull-out) پیوستگی میلگردهای CFRP، AFRP و GFRP را در بتن با مقاومت فشاری معمولی بررسی کردند. دستگاه بیرون کشیدن میلگرد در شکل ۱ نشان داده می‌شود. قطرهای مختلف ۶، ۸، ۱۰، ۱۶ و ۱۹ میلی‌متر و سطوح متفاوت پوشش شن و ماسه، ماریچ با پوشش شن و ماسه و ماریچ میلگردها آزمایش شد. شکست در تمام نمونه‌ها مشاهده شد. مشخص گردید میلگردهای با پوشش شن و ماسه پیوستگی بیشتری به بتن نسبت به میلگردهای صاف دارند. همچنین نتایج نشان داد میلگردهای FRP نسبت به میلگردهای فولادی پیوستگی کمتری دارند [10]. آچیلدز و پیلاکوتاس در سال ۲۰۰۶ یک مطالعه تحلیلی المان محدود را برای بررسی رفتار پیوستگی میلگردهای FRP در بتن انجام دادند. آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد و آزمایش‌های تیر با استفاده از انسیس (ANSYS50a) و آباکوس (ABAQUS FE) مدل‌سازی شدند. در مورد آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد، یک روش مدل‌سازی معرفی شد که در آن از فنرهای غیرخطی برای مدل‌سازی رفتار پیوستگی در سطح مشترک میلگرد-بتن استفاده شد. تحقیقات اچیلدز و پیلاکوتاس نشان داد که پیوستگی میلگردهای FRP با افزایش طول تعبیه کاهش می‌یابد (شکل ۲) [11].

بالا کاهش یابد. به عنوان مثال، استحکام کششی GFRP در دماهای بالاتر از حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای CFRP در حدود ۳۲۵ درجه سانتی‌گراد به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. عواملی مانند نوع، جهت‌گیری و حجم الیاف، ابعاد، کیفیت تولید، مدت زمان بارگذاری، رطوبت و دما بر مشخصات مکانیکی میلگردهای FRP تأثیر می‌گذارند. مقاومت کششی FRP تابع قطر میلگرد می‌باشد. سختی فشاری میلگردهای FRP به عواملی مانند نوع، اندازه، کنترل کیفیت تولید و نسبت قطر به طول نمونه بستگی دارد. سختی فشاری میلگردهای FRP کمتر از مدول کششی ارتجاعی است. الیاف کربن و شیشه در برابر خزش مقاوم هستند. حجم و جهت‌گیری الیاف بر روی خزش تأثیرگذار است [3-6].

۳- عوامل موثر بر پیوستگی میلگردهای FRP در بتن

رفتار پیوستگی میلگردهای FRP و بتن در عملکرد ساختاری عناصر بتن آرمه بسیار اهمیت دارد. عوامل متعددی بر رفتار پیوستگی تأثیر می‌گذارند که می‌توان آنها را به خواص مواد، ویژگی‌های هندسی، شرایط محیطی و روش‌های آزمایش دسته‌بندی کرد. عواملی مانند جنس میلگرد، سطح میلگرد، طول تعبیه میلگرد در بتن، قطر میلگرد، پوشش بتن اطراف میلگرد، فواصل آرماتورها، میزان خاموت (محصور شدگی)، مقاومت فشاری و کششی بتن و نوع الیاف از عوامل موثر هستند که در این پژوهش به برخی از آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- قطر میلگرد و پوشش سطح میلگرد

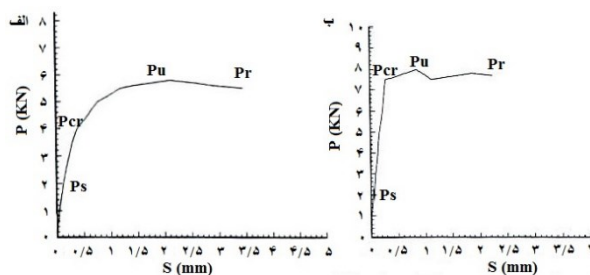
قطر میلگردهای FRP نقش مهمی در رفتار پیوستگی آنها با بتن دارد. اثر قطر میلگرد را می‌توان از جنبه‌های مختلفی مانند ارتباط قطر میلگرد با مقاومت پیوستگی، اتصال مکانیکی و مساحت سطح، طول مهاری و جنبه‌های تجربی مورد بررسی قرار داد. مشخص گردید که با افزایش قطر میلگردهای FRP، مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان به عوامل متعددی مانند توزیع تنش برشی و اثر تأخیر برشی نسبت داد. قطرهای بزرگتر منجر به توزیع غیریکنواخت تنش‌های برشی در اطراف میلگرد می‌شود که این امر منجر به کاهش متوسط تنش پیوستگی در سطح مشترک بین FRP و بتن می‌شود. اثر تأخیر برشی با قطرهای بزرگتر آشکارتر می‌شود، جایی که بیشترین تنش‌ها در نزدیکی سطح میلگرد متمرکز می‌شوند در حالی که تنش‌های کمتری در عمق هسته وجود دارد. این نابرابری می‌تواند مقاومت پیوستگی را تضعیف کند زیرا میلگردهای بزرگتر واریانس بیشتری در توزیع تنش دارند [7].

پیوند بین میلگردهای FRP و بتن به شدت به نیروهای مکانیکی در هم قفل شدن و اصطکاک بستگی دارد. قطرهای بزرگتر ممکن است منجر به کاهش سطح تماس موثر به دلیل ایجاد حفره‌های خالی در زیر میلگردهای بزرگتر در طول عمل آوری شود که

شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقاطع صیقلی با بزرگنمایی بالا برای سری‌های مختلف میلگردهای FRP با پوشش شنی

یو و فان پیوستگی میلگرد با بتن را با توجه به سطح میلگرد، طول تعبیه و قطر میلگرد با آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بررسی کردند. میلگردها با قطر آزمایشگاهی ۵، ۶/۹ و ۱۰ میلی‌متر، سطح ساده و آجدار و طول تعبیه ۵ و ۱۰ برابر قطر، تحت آزمون بیرون کشیدن قرار گرفتند. مشخص گردید میزان پیوستگی با افزایش قطر میلگرد و افزایش طول تعبیه کاهش می‌یابد و میلگردهای با سطح آجدار نسبت به میلگردهای صاف پیوستگی بیشتری با بتن دارند [14].

منحنی P-S نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، برای نمونه آجدار، لغزش کوچکتر از نمونه صاف است و منحنی آن همچنان خطی است، در حالی که برای نمونه صاف، منحنی غیرخطی است. این امر نشان می‌دهد که شکل سطحی نوار FRP تأثیر زیادی بر عملکرد پیوستگی آن دارد.

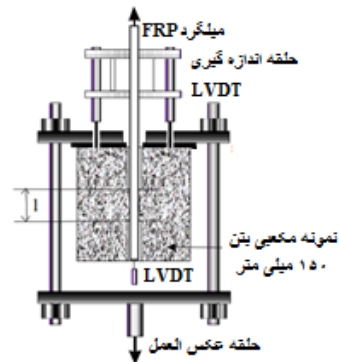


شکل ۵) منحنی P-S (الف) میلگرد FRP صاف و (ب) میلگرد FRP آجدار

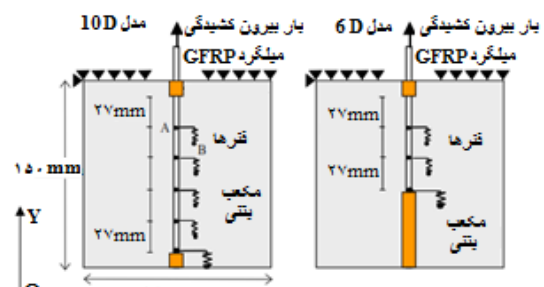
محبی و همکاران تأثیر ابعاد نمونه و قطر میلگرد را در پیوستگی میلگردهای FRP و فولادی با بتن مطالعه نمودند. ابعاد نمونه‌ها ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، میلگردهای فولادی و GFRP با قطر ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر و طول تعبیه ۵ برابر قطر میلگرد استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد میزان پیوستگی با کاهش قطر میلگرد افزایش می‌یابد. همچنین مشخص گردید در میلگرد فولادی، پیوستگی به میزان قابل توجهی به نسبت پوشش بتن روی میلگرد به قطر میلگرد بستگی دارد [15].

پیوستگی میلگردهای FRP متشکل از فیبر شیشه با بتن با مقاومت فشاری بالا توسط صالح و همکاران بررسی شد. ۸۴ نمونه با قطرهای ۷/۵، ۱۲/۷ و ۱۵/۹ میلی‌متر، طول تعبیه ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ برابر قطر میلگرد با تیمارهای سطح شن و ماسه و مارپیچ با پوشش شن و ماسه تحت آزمون بیرون کشیدن میلگرد قرار گرفتند. مشخص گردید پیوستگی و قطر میلگرد با هم نسبت عکس دارند و میزان پیوستگی با افزایش قطر میلگرد، کاهش می‌یابد. طول تعبیه ۲/۵ برابر قطر میلگرد به عنوان طول تعبیه استاندارد انتخاب شد و مشاهده گردید میزان پیوستگی با کاهش طول تعبیه افزایش می‌یابد [16].

عابدینی محمدی و همکاران تأثیر نوع بتن و قطر میلگردهای GFRP را با آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بررسی



شکل ۱) دستگاه آزمایش بیرون کشیدن میلگرد



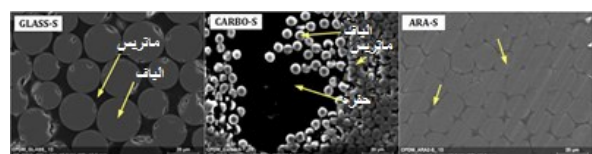
شکل ۲) مدل فنی نمونه‌های G6D و G10D

مظلوم و مومنی در سال ۱۳۹۲ به صورت عددی پیوستگی میلگردهای CFRP، GFRP، و فولادی با بتن خودمتراکم را بررسی کردند. مدلسازی سه بعدی صورت پذیرفت و المان چسب برای چسبندگی بتن و میلگرد به کار برده شد. آنها دریافتند که میلگردهای فولادی پیوستگی قوی‌تری نسبت به میلگردهای FRP با بتن دارد [12].

رولند و همکاران به صورت تجربی پیوستگی میلگردهای CFRP، BFRP، CFRP، AFRP، و فولادی و تیمارهای سطح شامل ساده، مارپیچ، شن و ماسه و مارپیچ با پوشش شن و ماسه را بررسی کردند (شکل ۳ و ۴). مشخص شد میلگردهای CFRP پیوستگی بیشتری را با بتن در مقایسه با سایر میلگردهای FRP دارند و میلگردهای AFRP کمترین پیوستگی با بتن را دارند. پیوستگی میلگردهای GFRP در یکی از نمونه‌ها کمی بیشتر از میلگرد فولادی بود [13].

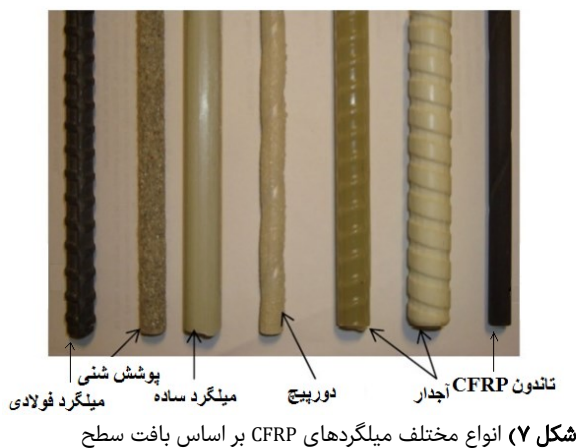


شکل ۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقاطع صیقلی با بزرگنمایی کم، برای سری‌های مختلف میلگردهای FRP با پوشش شنی



کشیدگی میلگرد بررسی کردند. متغیرهای پژوهش قطر میلگرد، جنس میلگرد، سطح میلگرد و مقاومت فشاری بتن بود. سطوح مارپیچ، روکش ماسه‌ای و مارپیچ با روکش ماسه‌ای بررسی شد. انواع مختلف میلگردهای CFRP بر اساس بافت سطح در شکل ۷ نشان داده می‌شود. مشخص شد پیوستگی میلگردهای فولادی در بتن بیشتر از میلگردهای FRP است و میلگردهای فولادی دارای پیوستگی بسیار نزدیک به میلگردهای فولادی است. همچنین نشان داده شد در روش عددی با افزایش قطر میلگرد پیوستگی افزایش و در روش آزمایشگاهی، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، میلگردهای با پوشش‌شن و ماسه بیشترین پیوستگی را با بتن داشتند [22].

به طور خلاصه، افزایش قطر میلگردهای FRP معمولاً به دلیل عواملی مانند توزیع تنش برشی، اثرات تاخیر برشی و کاهش سطح تماس موثر منجر به کاهش مقاومت پیوستگی با بتن می‌شود. درک این دینامیک برای بهینه‌سازی طراحی و کاربرد آرماتور FRP در سازه‌های بتنی برای اطمینان از عملکرد و ایمنی کافی بسیار مهم است.



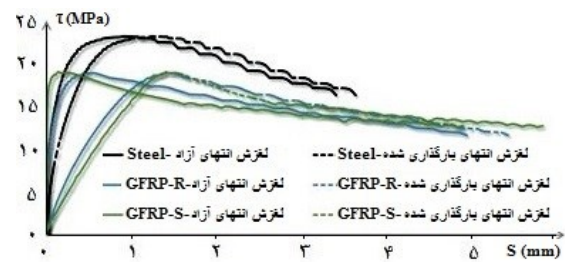
شکل ۷) انواع مختلف میلگردهای CFRP بر اساس بافت سطح

۲-۳- طول گیرایی میلگرد

بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش طول گیرایی میلگرد، مقاومت چسبندگی افزایش می‌یابد ولی این امر برای طول‌های بزرگتر از ۵ برابر قطر میلگرد ادامه نمی‌یابد. با وجود کافی بودن طول مهار و محصورشدگی، آرماتورها پیش از لغزش می‌توانند سطوح تنش بالاتری را تحمل کنند. البته بررسی‌ها تاثیر طول مهار بر مقاومت پیوستگی را متفاوت نشان می‌دهند. نتایج مقایسه‌ای در شکل ۸ نمایش داده می‌شود. شکل ۹ نحوه مدلسازی طول تعبیه میلگرد در بتن را با نرم افزار آباکوس نشان می‌دهد.

کردند. میلگردهای با قطر ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ و انواع بتن معمولی، بتن خودمترکم، بتن پرمقاومت و بتن پودری واکنشی مورد آزمایش قرار گرفتند. مشخص گردید با افزایش قطر میلگرد، پیوستگی افزایش می‌یابد و بیشترین پیوستگی مربوط به بتن پودری واکنشی است. همچنین مشاهده شد به کار بردن روان کننده‌ها در بتن موجب افزایش ۲۴ درصدی پیوستگی می‌شود [17].

کاتر پیوستگی میلگردهای FRP با تغییر شکل‌های سطح فیبر پیچیده شده دور میلگرد، پوشش‌شن و ماسه و تغییر شکل به وسیله ماشین کاری را با آزمایش بیرون کشیدن میلگرد بررسی کرد. مشخص گردید خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در پیوستگی بتن و میلگرد بسیار موثر است. مشاهده شد میلگرد با سطح پیچیده شده با فیبر پیوستگی بسیار خوبی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارد [18]. پیوستگی میلگردهای FRP با تغییر شکل‌های سطح چون سطح آج دار با پیچش الیاف دور میله، پوشش‌شن و ماسه و پوشش دوگانه ترکیب دو سطح با یکدیگر توسط رضادوست و همکاران بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش زبری به هر روش در افزایش مقدار چسبندگی میلگرد به بتن اثر مثبت دارد. میلگردها با سطوح صاف و بدون آج کمترین استحکام چسبندگی را دارند، پس از آن به ترتیب میلگرد با آج دورپیچ و میلگرد با آج دورپیچ و شن پاشی شده (آج دوگانه) در مراتب بعدی قرار می‌گیرند. مشخص گردید میلگرد با آج دوگانه پیوستگی مناسب‌تری با بتن دارد [19]. پیوستگی میلگردهای GFRP با تیمارهای مختلف سطح از جمله روکش ماسه‌ای نوع ۱، روکش ماسه‌ای نوع ۲ و خط نایلون با بتن توسط جانوس و همکاران ارزیابی شد. روکش ماسه-ای نوع ۱، روکش منظم و قوی بود و میلگرد با پوشش آن، پیوستگی بیشتری با بتن داشت [20]. نتایج کار آقای جانوس و همکاران در شکل ۶ نشان داده می‌شود.



شکل ۶) نمودارهای حاصل از مطالعه جانوس و همکاران

پیوستگی میلگردهای BFRP با شرایط سطح متفاوت روکش ماسه ای اولیه و ثانویه و بتن توسط هنین و همکاران بررسی شد. میلگردهای با روکش ثانویه، سطحی منظم و بدون نقص داشتند و پیوستگی آنها ۸۰ درصد بیشتر از پیوستگی میلگردهای با پوشش‌شن و ماسه اولیه با بتن بود [21]. بینا و همکاران پیوستگی میلگردهای فولادی، CFRP و GFRP با بتن را با آزمایش بیرون

۳-۵- مقاومت فشاری بتن

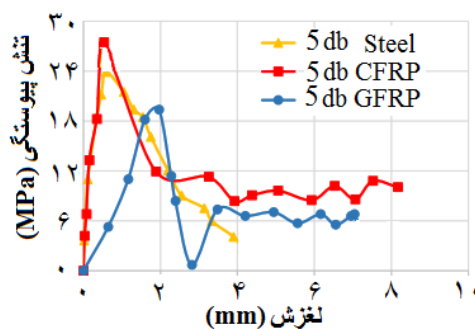
در آیین نامه ACI318، مقاومت چسبندگی به صورت تابعی از جذر مقاومت فشاری بیان شده است. در تحقیق داروین و همکاران مشخص گردید ارزیابی مقاومت چسبندگی به صورت تابعی از ریشه چهارم مقاومت فشاری بتن مطابقت زیادتری با واقعیت دارد که توسط محققان دیگر نیز تایید شد. این امر به دلیل برهمکنش میلگرد و بتن، مقاومت فشاری و کششی بتن از عوامل موثر در مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن است. ACI408 بیان می کند که مقاومت پیوستگی بتن با ریشه چهارم مقاومت فشاری بتن تناسب مستقیم دارد. لی و همکاران به صورت تجربی دریافتند که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت پیوستگی آن نیز افزایش می یابد [25]. غزالی و همکاران برای بتن های با مقاومت فشاری متفاوت و میلگردهایی با قطرهای مختلف، مقاومت پیوستگی را بررسی کردند و دریافتند که افزایش مقاومت فشاری بتن موجب افزایش مقاومت پیوستگی آن می شود [26].

۳-۶- مقاومت کششی بتن و تاثیر الیاف

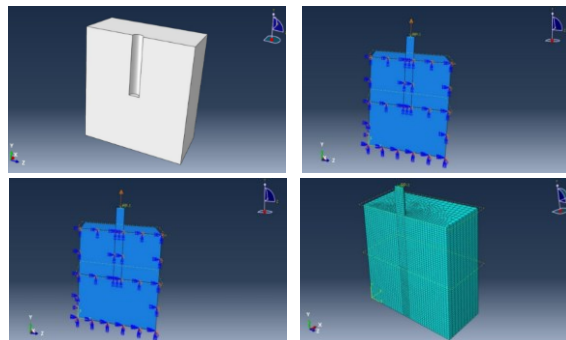
از آنجایی که ماهیت گسیختگی چسبندگی بتن و آرماتور از نوع کششی است، با استفاده از الیاف و افزایش مقاومت کششی بتن، مقاومت چسبندگی بتن و آرماتور بهبود می یابد. علاوه بر این، افزایش الیاف موجب می شود شکست نمونه با شکل پذیری بیشتری باشد. در صورت استفاده از الیاف با جلوگیری از گسترش ترک ها در بتن، مقاومت مکانیکی آن افزایش می یابد و چسبندگی آرماتور به بتن نیز بهبود می یابد. کرینز و پریزالی نشان دادند که تاثیر مثبت مقادیر کم الیاف در مقاومت پیوستگی بتن با محصورشدگی پایین نیز می تواند صورت پذیرد [27]. دنسیجر و همکاران به صورت تجربی نشان دادند که افزایش الیاف به دلیل گلوله ای شدن موجب کاهش مقاومت پیوستگی بتن تا حدود ۳۰ درصد می شود. این امر می تواند به دلیل عدم تراکم مناسب بتن در اطراف میلگرد با افزایش الیاف باشد که تاثیر منفی در مقاومت پیوستگی بتن دارد [28]. دنسیجر و کاتز نشان دادند که تاثیر الیاف در چقرمگی پیوستگی در بتن های با مقاومت بسیار بالاتر، بیشتر است [24]. عزالدین و باراکورا به صورت تجربی دریافتند که استفاده از الیاف در بتن های با مقاومت فشاری تا ۴۰ مگاپاسکال قابل صرفه نظر است [29]. هراجلی و ساروخ نیز مشاهده کردند که به کار بردن الیاف فولادی به اندازه ۱۵۶ کیلوگرم می تواند مقاومت پیوستگی بتن را تا حدود ۵۵ درصد بهبود بخشد [30].

۴- نتیجه و جمع بندی

در این پژوهش عوامل موثر بر پیوستگی میلگردهای FRP در بتن بررسی شد و نشان داده شد پارامترهایی مانند قطر میلگرد، سطح میلگرد، نوع میلگرد، طول تعبیه، میلگردهای عرضی و مقاومت فشاری بتن از عوامل تاثیرگذار هستند. مشخص گردید با افزایش قطر میلگرد، پیوستگی کاهش می یابد. نتایج نشان می دهد با طول



شکل ۸) نمودار لغزش-تنش پیوستگی میلگردهای مختلف در طول تعبیه 5db



شکل ۹) مدل سازی طول تعبیه میلگرد در بتن در نرم افزار آباکوس

۳-۳- میزان خاموت

خاموت ها با محصور کردن آرماتورهای طولی موجب جلوگیری از توسعه ترک های گسیختگی بتن می شوند و نیروی نهایی شکست نمونه را افزایش می دهند. با این وجود خاموت ها محدودیتی برای کرنش جانبی بتن هستند. این امر در اثر فشار از تمام جهات بر نمونه بتن و یا خاموت و یا هر دو عامل ایجاد می شود. ایجاد شرایط محصورشدگی برای بتن در محدوده طول مهار می شود بهبود مقاومت پیوستگی می شود. اصفهانی و همکاران نشان دادند که پیوستگی میلگردهای FRP و فولادی به میلگردهای عرضی استفاده شده در بتن نیز بستگی دارند و نتیجه گرفتند که در میلگردهایی که با میلگرد عرضی محصور شدند، پیوستگی بهتری با بتن ایجاد می شود [23].

۳-۴- پوشش بتن و فاصله آرماتورها

با افزایش میزان پوشش بتن و فاصله آزاد میلگردها، شیب دیاگرام نیروی چسبندگی-لغزش و مقاومت چسبندگی افزایش می یابد. حالت گسیختگی نیز به این عامل بستگی دارد. حالت گسیختگی بیرون آمدن آرماتور در مواردی که میزان پوشش بتن و فواصل آزاد بین آرماتورها زیاد باشد مشاهده می شود و در صورت کم بودن پوشش بتن و فاصله آزاد بین میلگردها، گسیختگی بتن رخ می دهد. همچنین نشان داده شد که افزایش پوشش بتن صرفه نظر از مقاومت فشاری آن موجب بهبود مقاومت پیوستگی بتن می شود [24].

- 7- Waleed A, Bilal R. A review of bond behavior of steel and GFRP bars to concrete. *Eurasian Journal of Engineering and Technology*. 2022; 11:112-27.
- 8- Hong Y, Hou X, Zhu Y. Influencing factor analysis on bond behaviors of FRP bars and concrete. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2022; 18:222-9.
- 9- Doost Mohamadi A, Vatani Oskouei A, Kheyroddin A. An experimental study on effect of concrete type on bond strength of GFRP bars. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 2021; 9:57-70.
- 10- Okelo R, Yuan RL. Bond splitting behavior of FRP rebars in normal strength concrete. 46th Structural Dynamics & Materials Conference. Austin, Texas, 2005.
- 11- Achillides Z, Pilakoutas K. FE modelling of bond interaction of FRP bars to concrete. *Journal of Structural Concrete*. 2006; 7:7-16.
- 12- Mazloom M, Momeni K. Bonding of steel and FRP bars in self compacting concrete. *Amirkabir Journal of Science & Research*. 2014; 46:101-16.
- 13- Rolland A, Quiertant M, Khadour A, Chataigner S, Benzarti K, Argoul P. Experimental investigation on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars. *Journal of Construction and Building Materials*. 2018; 173:136-48.
- 14- Yu N, Fan J. Experimental study of bond stress between concrete and FRP rebars. *Journal of Applied Mechanics and Materials*. 2014; 488-489:774777.
- 15- Hasani Mohebi Z, Badie Behnmiri AA, Dehestani M. Experimental investigation of the effect of specimens dimensions and rebar diameter on the adhesion strength of high-strength concrete and steel and composite bars. 3rd International conference on architectural, civil and urban development at the beginning of the third millennium. Tehran, 2018. (In Persian).
- 16- Saleha N, Ashourb A, Sheehanb T. Bond between glass fiber reinforced polymer bars and high – strength concrete. *Journal of Structures*. 2019; 22:139-53.
- 17- Mohammadi AA, dashti rahmatabadi MA, Haji Safari M. Investigating the bond stress of GFRP rebars made in-house with different types of concrete. The First National Conference on Civil Defense, Architecture and Urban Planning. Tabriz, 2019. (In Persian).
- 18- Katz A. Bond mechanism of FRP rebars to concrete. *Journal of Materials and Structures*. 1999; 32:761-8.
- 19- Rezadoust AM, Esfandeh M, Sabet A, Alavi M. Construction of composite rebars and investigation of their bonding to concrete. *Journal of Polymer Science & Technology*. 2007; 20:79-86. (In Persian).
- 20- anuš O, Girle F, Kostih V, Štěpánek P. Bond behavior of FRP bars in concrete. *Journal of Solid State Phenomena*. 2018; 272:3-8.
- 21- Henin E, Tawadrous R, Morcou G. Effect of surface condition on the bond of basalt fiber-reinforcement polymer bars in concrete. *Journal of Construction and Building Materials*. 2019; 226:449-58.
- 22- Baena M, Torres L, Turon A, Barris C. Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Journal of Composites Part B: Engineering*. 2009; 40:784-97.
- 23- Esfahani MR, Rakhshanimehr M, Mousavi SR. Bond strength of lap-spliced GFRP bars in concrete beams.

تعبیه ۵ برابر قطر میلگرد، با افزایش قطر میلگرد تنش پیوستگی افزایش می‌یابد. همچنین در صورت استفاده از بتن با مقاومت فشاری بالا، پیوستگی قوی‌تری ایجاد می‌شود. در بررسی سطوح متفاوت از جمله پوشش‌شن و ماسه، مارپیچ با پوشش‌شن و ماسه، مارپیچ میلگردها مشخص گردید میلگردهای با پوشش‌شن و ماسه پیوستگی بیشتری به بتن نسبت به میلگردهای صاف دارند. همچنین نتایج نشان داد میلگردهای FRP نسبت به میلگردهای فولادی پیوستگی کمتری دارند. بررسی‌ها نشان داد که پیوستگی میلگردهای FRP با افزایش طول تعبیه کاهش می‌یابد. میلگردهای CFRP پیوستگی بیشتری را با بتن در مقایسه با سایر میلگردهای FRP دارند و میلگردهای AFRP کمترین پیوستگی با بتن را دارند. پیوستگی میلگردهای GFRP کمی بیشتر از میلگرد فولادی بود. همچنین مشخص گردید پیوستگی میلگردهای FRP و فولادی به میلگردهای عرضی استفاده شده در بتن نیز بستگی دارند و در میلگردهایی که با میلگرد عرضی محصور شدند، پیوستگی بهتری با بتن ایجاد می‌شود.

تشکر و قدردانی: از حمایت مالی دانشگاه سمنان کمال تشکر را داریم. این مقاله از طرح پسادکتری دانشگاه سمنان با شماره قرارداد ۲۴۷۲۵ استخراج گردیده است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه دیگری منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی: این مقاله از طرح پسادکتری دانشگاه سمنان می‌باشد.

مراجع

- 1- Brown VL, Bartholomew CL. FRP reinforcing bars in reinforced concrete members. *Journal of ACI Materials*. 1993; 90:34-9.
- 2- Okelo R, Yuan RL. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. *Journal of Composites for Construction*. 2005; 9:203-13.
- 3- Vatani Oskouei A. Reinforced concrete structures with polymer composite rebars. Publications of Shahid Rajaee Teacher Training University. Tehran, Iran. 1396. (In Persian).
- 4- Blaznov AN, Krasnova AS, Krasnov AA, Zhurkovsky ME. Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. *Polymer Testing*. 2017; 63:434-9.
- 5- Spagnuolo S, Rinaldi Z, Donnini J, Nanni A. Physical, mechanical and durability properties of GFRP bars with modified acrylic resin (modar) matrix. *Composite Structures*. 2021; 262:113557.
- 6- Gudonisa E, Timinskasa E, Gribniakab V, Kaklauskasa G, Arnautovc AK, Tamulėnas V. FRP reinforcement for concrete structures: state of-the-art review of application and design. *Engineering Structures and Technologies*. 2013; 5:147-58.

- Journal of Composites for Construction. 2013; 17:314-23.
- 24- Dancygier N, Katz A. Bond over direct support of deformed rebars in normal and high strength concrete with and without fibers. *Materials and Structures*. 2012; 45:265-75.
- 25- Li X, Zhang J, Liu J, Cao W. Bond behavior of spiral ribbed ultra-high strength steel rebar embedded in plain and steel fiber reinforced high-strength concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23:4417-30.
- 26- Ghazaly N, Rashad A, Kohail M, Nawawy O. Evaluation of bond strength between steel rebars and concrete for heat-damaged and repaired beam-end specimens. *Engineering Structures*. 2020; 175:661-8.
- 27- Cairns, Plizzari GA. Bond behaviour of conventional reinforcement in fibre reinforced concrete. 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. 2004; 321-30.
- 28- Dancygier AN, Katz A, Wexler U. Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers. *Materials and Structures*. 2010; 43:839-56.
- 29- Ezeldin A, Balaguru P. Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete. *Materials Journal*. 1989; 86:515-24.
- 30- Harajli MH, Mabsout ME. Evaluation of bond strength of steel reinforcing bars in plain and fiber-reinforced concrete. *Structures*. 2002; 99:509-17.