

مقاومت پیوستگی بین آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) و بتن در تیرهای وصله‌دار

مهراله رخشانی‌مهر^۱، محمد رضا اصفهانی^{۲*}، سید روح ا... موسوی^۳

۱- دانشجوی دکترای سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

esfahani@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۲۰

چکیده- برای استفاده از آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) در سازه‌های بتن‌آرمه باید روابط طراحی جدیدی برای آن‌ها ارائه شود. ایجاد پیوستگی کافی بین بتن و آرماتورهای FRP در محل وصله، یکی از بحث‌های مهمی است که در طراحی سازه‌های بتن‌آرمه باید توجه شود.

هدف از این مقاله ارائه رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP وصله شده در تیرهای بتن‌آرمه است. به این منظور نخست به کمک نتایج آزمایش‌های بیرون کشیدگی محققان دیگر، روابطی برای تعیین مقاومت پیوستگی موضعی و مدول تغییر مکان آرماتورهای FRP ارائه می‌شود. سپس به کمک نتایج آزمایش‌های وصله کششی در تیرها، رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول وصله آرماتور FRP به دست می‌آید. این رابطه اثر پوشش بتن و آرماتور جانبی وصله را در مقاومت پیوستگی وارد می‌کند. مقایسه رابطه پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی با دقت مناسبی مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP در نمونه‌های تیری وصله‌دار را پیش‌بینی می‌کند. این رابطه با روابط ارائه شده در دیگر آیین‌نامه‌ها و مراجع نیز مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: آرماتور پلیمری مسلح الیافی FRP، آرماتور جانبی وصله، تیر بتن‌آرمه، مقاومت پیوستگی، وصله.

۱- مقدمه

درباره خصوصیات این نوع آرماتور و رفتار آن‌ها در بتن موجود نیست [۱].

یکی از بحث‌های مهمی که باید در طراحی آرماتورهای FRP توجه شود، تعیین طول وصله است. برای طراحی وصله در آرماتورهای FRP باید اطلاعات کافی درباره پیوستگی این نوع آرماتور با بتن در دست باشد. ایجاد پیوستگی کافی یکی از بحث‌های مهمی است که باید در

آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) از اواسط دهه هشتاد میلادی در صنعت ساختمان استفاده شده است. خصوصیات فوق‌العاده FRP مانند سبکی، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در برابر خستگی سبب شده است تا در سال‌های اخیر استفاده از FRP رشد چشم‌گیری داشته باشد. علی‌رغم رشد روزافزون استفاده از FRP اطلاعات کافی

طراحی سازه‌ها توجه شود [۲].

برای استفاده از آرماتورهای FRP در سازه‌های بتن‌آرمه باید آیین‌نامه‌های طراحی جدیدی برای آن‌ها ارائه شود. یکی از ساده‌ترین روش‌ها، اصلاح روابط آیین‌نامه‌ای سازه‌های مسلح فولادی، برای FRP است [۳]. وامبک و شیلد [۴] از روشی مشابه - آنچه که در گذشته به‌وسیله اورنگان و همکاران [۵] برای آرماتورهای فولادی استفاده شده بود - رابطه‌ای برای محاسبه تنش پیوستگی میانگین در آرماتورهای GFRP ارائه کردند. در این رابطه از اثر آرماتور جانبی صرف‌نظر شده و فقط اثر دورگیری ناشی از پوشش بتن وارد محاسبات شده است. رابطه وامبک و شیلد [۴] اساس رابطه پیشنهادی [۶] ACI 440.1R-06 می‌باشد.

آلی [۷] رابطه مقاومت پیوستگی آرماتورهای فولادی را - که در [۸] ACI 318RM-02 ارائه شده است - با کاهش اثر پوشش بتن بر مقاومت پیوستگی برای آرماتورهای FRP اصلاح کرد. علاوه بر این، در آیین‌نامه [۹] CAN/CSA-S6-00 رابطه مربوط به پیوستگی بین آرماتورهای فولادی و بتن با کاهش اثر آرماتور جانبی، برای آرماتورهای FRP اصلاح شده است. قیوم [۱۰] با روشی مشابه اورنگان و همکاران [۵]، رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP ارائه کرده است.

اصفهانی و همکاران [۱۱؛ ۱۲؛ ۱۳] برای محاسبه مقاومت پیوستگی آرماتورهای فولادی و بتن رابطه‌ای ارائه کردند. آن‌ها برای تعیین تنش پیوستگی در طول وصله یک تیر بتن‌آرمه فولادی، نخست تنش پیوستگی موضعی (تنش پیوستگی در طول‌های کوتاه) را به‌کمک نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی تعیین کردند. از آن‌جا که در این نمونه‌ها طول آرماتور به اندازه کافی کوتاه در نظر گرفته می‌شود، توزیع تنش پیوستگی در طول آرماتور اغلب یکنواخت بوده است که حداکثر تنش پیوستگی به‌دست می‌آید. در

وصله‌هایی که در عمل به‌کار برده می‌شوند، تنش پیوستگی در طول آرماتور یکنواخت نیست. اصفهانی و رنگان [۱۲] برای در نظر گرفتن اثر توزیع غیر یکنواخت تنش پیوستگی در طول وصله از تئوری تپفرز [۱۴] استفاده کرده و سپس به‌کمک نتایج آزمایش‌های تیری، اثر آرماتور جانبی وصله و سایر پارامترهای مؤثر بر پیوستگی را وارد محاسبات کردند. کارهای تحلیلی مختلف نشان می‌دهد، این روابط همبستگی بسیار خوبی با نتایج آزمایش دارند [۱۳].

هدف از این مقاله ارائه رابطه‌ای برای محاسبه تنش پیوستگی آرماتورهای FRP در نمونه‌های تیری وصله‌دار است. این کار با جمع‌آوری نتایج آزمایشگاهی مربوط به آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی و نتایج نمونه‌های تیری وصله‌دار موجود در سایر مراجع انجام شد. نخست به‌کمک نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی روابطی برای تعیین تنش پیوستگی موضعی و مدول تغییر مکان ارائه شد. سپس به‌کمک این روابط و نتایج آزمایش‌های نمونه‌های تیری وصله‌دار، رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول وصله آرماتورهای FRP پیشنهاد شد. در این رابطه اثر توزیع غیریکنواخت تنش در طول وصله و اثر آرماتور جانبی وصله وارد محاسبات شد. رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های موجود و دیگر آیین‌نامه‌ها مقایسه شده است.

۲- پیوستگی موضعی بین بتن و آرماتورهای FRP

در شکل (۱) مقاومت پیوستگی ترک‌خوردگی محاسبه شده به‌وسیله روابط استوانه ضخیم نیمه ترک‌خورده و پلاستیک تپفرز [۱۴] با نتایج آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی همراه شکل شکست پیوستگی شکافت [۱۵؛ ۱۶؛ ۱۷] مقایسه شده است.

در این شکل نسبت مقادیر آزمایشگاهی u_c/f_{ct} در برابر مقدار C/d_b ترسیم شده است که در آن u_c تنش پیوستگی در زمان ترک‌خوردن پوسته بتن، f_{ct} مقاومت کششی بتن، C

$$u_c = 4.2 \frac{\frac{C}{d_b} + 0.5}{\frac{C}{d_b} + 1.4} f_{ct} \quad (1)$$

در جدول (۱) رابطه پیشنهادی (۱) با نتایج آزمایش مقایسه شده‌اند. در این جدول نسبت مقاومت پیوستگی موضعی حاصل از نتایج آزمایش به مقدار حاصل از رابطه (۱) نشان داده شده است. مقدار میانگین این نسبت ۱/۰۲ و انحراف معیار آن ۰/۱۴ به دست آمده است.

۳- توزیع تنش پیوستگی در طول وصله

رابطه (۱) برای محاسبه طول مهاری در نمونه‌هایی که در آن‌ها طول مهاری کوتاه بوده و توزیع تنش در طول پیوستگی اغلب یکنواخت است، مناسب می‌باشد. در وصله‌هایی که در عمل به کار برده می‌شوند، تنش پیوستگی در طول وصله یکنواخت نیست [۱۲].

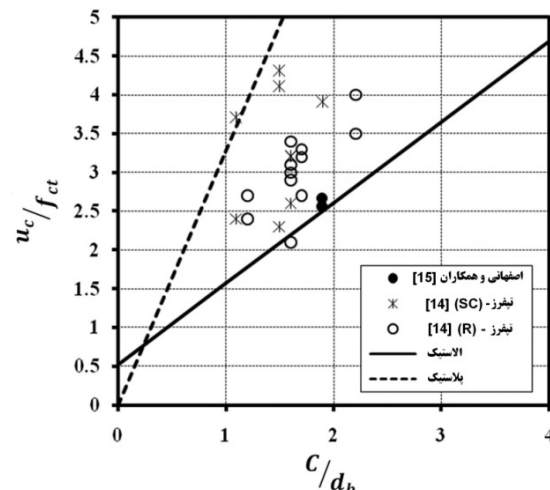
اصفهانی و رنگان [۱۲] برای وارد کردن اثر توزیع غیریکنواخت تنش در آرماتورهای فولادی از تئوری تپفرز [۱۴] استفاده کردند. تپفرز [۱۴] نشان داد، رابطه توزیع تنش پیوستگی در طول وصله یک آرماتور فولادی به صورت زیر است:

$$u(x) = a \cos h(jx) \quad (2)$$

رابطه (۲) که به تئوری تپفرز [۱۴] معروف است، براساس تئوری مدول تغییر مکان به دست آمده است. آلی [۱۸] نشان داد، رابطه (۲) برای تعیین توزیع تنش پیوستگی در آرماتورهای FRP نیز صادق است. در این رابطه:

$$a = \frac{j \sigma_{so} A_b}{2 \pi d_b} \times \frac{1}{\sinh\left(\frac{jL}{2}\right)}, \quad j^2 = \frac{K \pi d_b}{A_b E_s}$$

حداقل مقدار بین پوشش جانبی و تحتانی آرماتور و d_b قطر آرماتور است. علاوه بر این روابط استوانه ضخیم نیمه ترک خورده و پلاستیک تپفرز [۱۴] در این شکل نشان داده شده‌اند. برای ترسیم روابط استوانه ضخیم نیمه ترک خورده و پلاستیک تپفرز [۱۴]، برای زاویه α مقادیر مختلفی فرض می‌شود تا در نهایت نمودارهایی به دست آید که به خوبی مقادیر آزمایشگاهی را در برگیرد که α زاویه شکافت است [۱۴؛ ۱۱]. در شکل (۱) ملاحظه می‌شود که مقادیر آزمایشگاهی بین دو حالت استوانه نیمه ترک خورده و پلاستیک پراکنده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد نتایج آزمایش از حالت الاستیک نیمه ترک خورده فاصله گرفته‌اند.



شکل (۱) همبستگی نتایج آزمایش با تئوری الاستیک نیمه ترک خورده

تپفرز [۱۴] نشان داد، به دلیل وجود برخی تغییرشکل‌های پلاستیک در بتن و اثر دورگیری ناشی از بتن اطراف استوانه ضخیم، نتایج از حالت نیمه ترک خورده فاصله می‌گیرند. با دنبال کردن روشی مشابه اصفهانی و رنگان [۱۱] و به کمک نتایج آزمایش‌های جمع‌آوری شده از سایر مراجع [۱۵؛ ۱۶؛ ۱۷] رابطه زیر برای تعیین مقاومت پیوستگی موضعی (مقاومت پیوستگی طول‌های کوتاه) آرماتورهای FRP به دست آمد:

جدول ۱ مقایسه رابطه پیشنهادی (۱) با نتایج آزمایش برای تنش

پیوستگی موضعی

(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)
مرجع	C/d_b	$\left(u_c/f_{ct}\right)_{\text{exp}}$	$\left(u_c/f_{ct}\right)_{\text{theo}}$	$\frac{Col.3}{Col.4}$
[١٥]	١/٩٠	٢/٥٥	٣/٠٧	٠/٨٣
	١/٩٠	٢/٧٠	٣/٠٧	٠/٨٧
	٣/١٤	٣/٢٨	٣/٣٨	٠/٩٧
	٣/١٤	٣/٣٢	٣/٣٨	٠/٩٨
	Mean			١/١٠
	S.D.			٠/٠٩
[١٦]	١/١٠	٣/٧٠	٢/٧٠	١/٣٧
	١/١٠	٢/٤٠	٢/٧٠	٠/٨٩
	١/٦٠	٣/٢٠	٢/٩٦	١/٠٨
	١/٦٠	٢/٦٠	٢/٩٦	٠/٨٨
	١/٦٠	٣/٢٠	٢/٩٦	١/٠٨
	Mean			٠/٩٧
	S.D.			٠/١٧
[١٧]	٢/٢٠	٣/٥٠	٣/١٦	١/١٠
	٢/٢٠	٤/٠٠	٣/١٦	١/٢٦
	١/٧٠	٣/٣٠	٣/٠٠	١/١٠
	١/٧٠	٢/٧٠	٣/٠٠	٠/٩٠
	١/٧٠	٣/٢٠	٣/٠٠	١/٠٧
	١/٦٠	٣/٤٠	٣/٠٠	١/١٥
	١/٦٠	٣/١٠	٣/٠٠	١/٠٥
	١/٦٠	٣/٠٠	٣/٠٠	١/٠١
	١/٦٠	٢/٩٠	٣/٠٠	٠/٩٨
	١/٢٠	٢/٤٠	٢/٧٦	٠/٨٧
	١/٢٠	٢/٧٠	٢/٧٦	٠/٩٨
	mean			٠/٩٧
	S.D.			٠/١٠
کل	mean			١/٠٢
	S.D.			٠/١٤

و A_b سطح آرماتور فولادی، E_s مدول الاستیسیته فولاد،
 σ_{so} تنش کششی آرماتور فولادی، L طول وصله، K مدول

تغییر مکان و d_b قطر آرماتور فولادی است. براساس یافته‌های تپفرز [۱۴] مقدار K (مدول تغییر مکان) در آرماتورهای فولادی متناسب با مقاومت فشاری بتن است؛ یعنی $K = rf'_c$ که مقدار r به نوع آج‌های آرماتور وابسته است و f'_c مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال است. رفتار پیوستگی در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای FRP با نمونه‌های فولادی کاملاً متفاوت است. بنابراین نمی‌توان از روابط مربوط به فولاد برای تعیین مقدار K در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای FRP استفاده کرد. در ادامه به بررسی پارامترهای مهم مؤثر بر رفتار پیوستگی در آرماتورهای FRP پرداخته و سپس رابطه‌ای برای تعیین مقدار K در آرماتورهای FRP ارائه خواهد شد.

۴- تعیین مدول تغییر مکان K

۴-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر پیوستگی

رابطه بین تنش پیوستگی و ریشه دوم مقاومت فشاری بتن در آرماتورهای فولادی در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش $\sqrt{f'_c}$ تنش پیوستگی u افزایش پیدا می‌کند. این مطلب به‌وسیله بسیاری از محققان به اثبات رسیده است [۱۱؛ ۱۲].

داروین و همکاران [۱۹] و اصفهانی و رنگان [۱۱؛ ۱۲] نشان دادند سطح نسبی آج پارامتر بسیار مهمی در تعیین مقاومت پیوستگی آرماتورهای فولادی و بتن به‌شمار می‌آید. می‌توان فرض کرد مقدار K در آرماتورهای فولادی به مقاومت فشاری بتن و نوع سطح آج وابسته است. بر این اساس تپفرز [۱۴] مقدار K (مدول تغییر مکان) در آرماتورهای فولادی را مساوی rf'_c قرار داد.

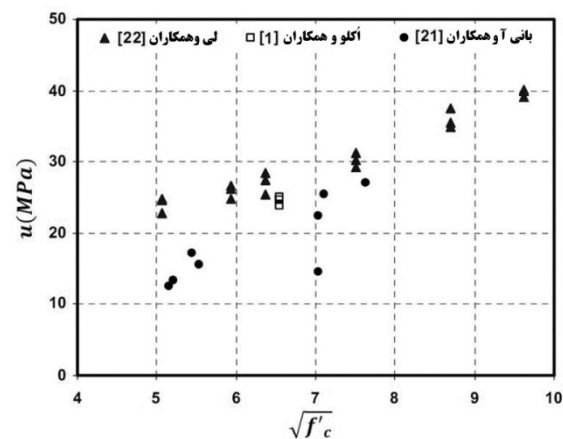
مکانیسم شکست پیوستگی در آرماتورهای FRP با آرماتورهای فولادی به‌طور کامل متفاوت است. آچیلیدز و پیلاکوتاس [۲۰] با بررسی نمودارهای تنش پیوستگی -

بانی آ و همکاران [۲۱]، لی و همکاران [۲۲]، داوالوس و همکاران [۲۳] و تپفرز [۲۴] یافته‌های آچیلیدز و پیلاکوتاس [۲۰] در رابطه با رفتار پیوستگی آرماتورهای FRP را تأیید کردند. آن‌ها نشان دادند در نمونه‌های با مقاومت بالا رفتار پیوستگی تحت اثر قطر آرماتور و در نمونه‌های با مقاومت کم رفتار پیوستگی تحت تأثیر مقاومت بتن قرار دارد.

هاو و همکاران [۲۵] نشان دادند، منحنی پیوستگی- لغزش در آرماتورهای GFRP تحت تأثیر قطر آرماتور قرار دارد و با افزایش قطر آرماتور علاوه بر این‌که مقاومت پیوستگی کاهش پیدا می‌کند، لغزش نیز در انتهای بارگذاری شده نیز افزایش پیدا می‌کند. لی و همکاران [۲۲] نشان دادند توزیع غیر خطی تنش در طول آرماتورهای FRP به قطر آرماتور وابسته است. در شکل (۳) عمل شکست پیوستگی آرماتورهای FRP مشاهده می‌شود. در این شکل شکست در سطح میان‌رویه (۱) زمانی اتفاق می‌افتد که مقاومت برشی بین بتن و رزین از مقاومت برشی بین رزین و الیاف کم‌تر باشد. این نوع شکست در نمونه‌های بتنی با مقاومت پایین اتفاق می‌افتد، در صورتی‌که شکست در سطح میان‌رویه (۲) زمانی اتفاق می‌افتد که مقاومت برشی بین رزین و الیاف از مقاومت برشی بین بتن و رزین کم‌تر باشد. آچیلیدز و پیلاکوتاس [۲۰]، بانی آ و همکاران [۲۱]، تپفرز [۲۴] نشان دادند، مقاومت برشی بین رزین و الیاف تابعی از قطر آرماتور است و با افزایش قطر آرماتور احتمال وقوع شکست در سطح میان‌رویه (۲) افزایش پیدا می‌کند. براساس آنچه تاکنون بحث شد، می‌توان گفت که قطر آرماتور یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رفتار پیوستگی- لغزش به حساب می‌آید.

به‌منظور بررسی اثر مقاومت فشاری بتن بر پیوستگی آرماتورهای FRP و تعیین حد مقاومتی بتن به‌طوری‌که برای مقادیر کم‌تر از این حد، شکست در سطح میان‌رویه (۱) و

لغزش آرماتورهای CFRP و GFRP نشان دادند که معمولاً در آرماتورهای FRP لغزش در انتهای آزاد آرماتور از همان لحظه شروع بارگذاری آغاز می‌شود. این به این معنا است که بلافاصله پس از از بین رفتن چسبندگی بین بتن و آرماتور لغزش اتفاق می‌افتد و از آن جایی که مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر پیوستگی در آرماتورهای FRP چسبندگی بین بتن و آرماتور است، پس از از بین رفتن چسبندگی بین بتن و آرماتور عامل مؤثر دیگری برای ادامه پیوستگی وجود نداشته و در نتیجه لغزش آغاز می‌شود. آن‌ها نشان دادند که مقاومت پیوستگی حاصل از چسبندگی بین بتن و آرماتورهای FRP تابعی از قطر آرماتور است [۲۰]. آچیلیدز و پیلاکوتاس [۲۰] نشان دادند با افزایش قطر آرماتور مقاومت پیوستگی میانگین کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این آن‌ها نشان دادند که در بتن با مقاومت بیش‌تر از ۳۰ مگاپاسکال مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP تحت اثر مقاومت بتن قرار ندارد بلکه تحت تأثیر مقاومت برشی بین الیاف و رزین قرار دارد و مقاومت برشی بین الیاف و رزین تابعی از قطر آرماتور است. آن‌ها نشان دادند که در بتن با مقاومت کم‌تر، بتن جلوی آج‌های آرماتور شکافت خورده و در نتیجه در نمونه‌های بتنی با مقاومت پایین مقاومت بتن در پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP مؤثر است.



شکل (۲) تأثیر مقاومت بتن بر مقاومت پیوستگی در آرماتورهای فولادی

به آنچه در رابطه با تأثیر مقاومت بتن و قطر آرماتور بر رفتار پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن بحث شد و با توجه به تعیین حد مقاومتی ۳۰ مگاپاسکال بر رفتار پیوستگی می توان گفت مقدار K در نمونه های با مقاومت فشاری کم تر از ۳۰ مگاپاسکال تابعی از مقاومت بتن و در نمونه های با مقاومت فشاری بیش تر از ۳۰ مگاپاسکال تابعی از قطر آرماتور است.

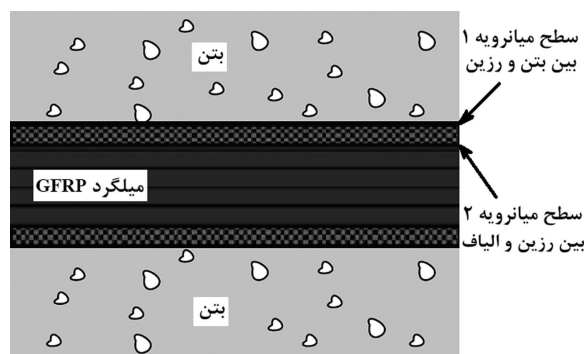
به کمک مقادیر حاصل از نتایج آزمایش، در نمونه های با مقاومت فشاری بیش تر از ۳۰ مگاپاسکال، بهترین رابطه بین K و قطر آرماتور به صورت زیر به دست آمد:

$$K = \frac{500}{d_b} \Leftrightarrow (f'_c) \geq 30 MPa \quad (3)$$

در رابطه بالا d_b قطر آرماتور بر حسب mm است. در نمونه های با مقاومت کم تر از ۳۰ مگاپاسکال، بهترین رابطه برای K به صورت زیر به دست آمد:

$$K = 42 \quad (f'_c) < 30 MPa \quad (4)$$

می توان از این روابط برای تعیین توزیع تنش پیوستگی در آرماتورهای FRP به کمک رابطه (۲) استفاده کرد (برای جزییات بیش تر به مرجع [۲۶] رجوع شود).



شکل (۳) شکست پیوستگی بین دو سطح آرماتور و بتن در آرماتورهای GFRP پس از آزمایش [۲۲]

برای مقادیر بیش تر از این حد در سطح میان رویه (۲) اتفاق بیفتد، از نمودار شکل (۴) استفاده می شود. در این نمودار مقاومت پیوستگی حاصل از انجام آزمایش بیرون کشیدگی روی نمونه های مسلح به آرماتورهای GFRP ([۲۳؛۲۲؛۲۱؛۱]) در برابر $\sqrt{f'_c}$ ترسیم شده است. با دقت در این نمودار ملاحظه می شود که در نمونه های با $\sqrt{f'_c} \geq 5.5 MPa$ مقاومت بتن بر تنش پیوستگی مؤثر نیست و در نمونه های با $\sqrt{f'_c} < 5.5 MPa$ تنش پیوستگی تابعی از مقاومت فشاری بتن است. حد $\sqrt{f'_c} = 5.5 MPa$ مربوط به بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال است.

در تحقیقات آچیلدز و پیلاکوتاس [۲۰]، بانای آ و همکاران [۲۱]، تپفرز [۲۴] نیز به این محدوده مقاومتی اشاره شده است. لی و همکاران [۲۲] نشان دادند، رفتار پیوستگی در نمونه های CFRP مشابه نمونه های GFRP است.

۴-۲- مقدار K

به منظور تعیین مقدار K در آرماتورهای FRP، نمودارهای تنش پیوستگی - لغزش مربوط به نمونه های بیرون کشیدگی دارای شکل شکست بیرون کشیدگی از مراجع مختلف ([۲۲؛۲۱؛۷؛۱]) جمع آوری شده و مدول وتری (مدول تغییر مکان) هر یک از این منحنی ها با استفاده از روش های ریاضی تعیین می شوند. با توجه

به کمک رابطه (۲) تعیین کرد. با جایگزین کردن مقدار $A_b = \pi d_b^2/4$ در رابطه (۲) مقدار j برای آرماتور FRP به صورت زیر در خواهد آمد:

$$j^2 = \frac{K \pi d_b}{A_b E_{frp}} \rightarrow j = \sqrt{\frac{4K}{d_b E_{frp}}} \quad (۷)$$

با قرار دادن رابطه (۷) در رابطه (۶)، رابطه زیر برای تعیین M در آرماتورهای FRP به دست می آید:

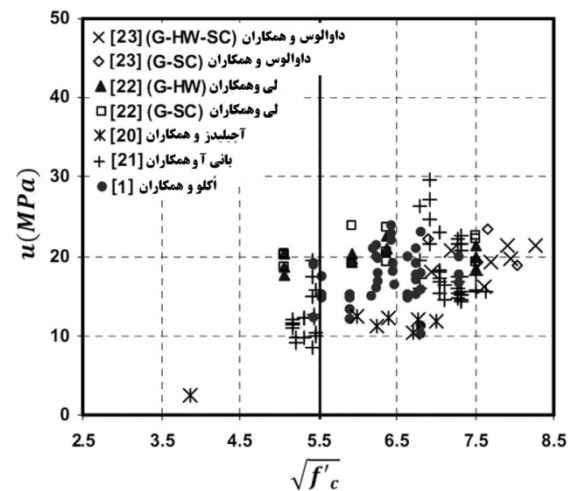
$$M = \cos h \left(L \sqrt{\frac{K}{d_b E_{frp}}} \right) \quad (۸)$$

که در این رابطه مقدار K به کمک روابط (۳) و (۴) تعیین می شود. d_b قطر یک آرماتور وصله شده، E_{frp} مدول الاستیسیته آرماتور FRP و L طول وصله است.

برای تعیین نسبت ω/ψ ، از نتایج آزمایشگاهی استفاده می شود. به کمک رابطه (۵) و نتایج آزمایش نمونه های بدون آرماتور جانبی [۲۸؛۲۷؛۷] که در آنها نسبت $G_{med}/C = 1$ است، مقدار ω/ψ محاسبه می شود که G_{med} مقدار میانه بین C_x ، C_y و $(C_s + d_b)/2$ است. C حداقل بین این سه مقدار، C_x پوشش جانبی آرماتورها، C_y پوشش تحتانی آرماتورها و C_s فاصله بین دو آرماتور وصله شده مجاور در مقطع عرضی است.

در شکل (۵) نسبت ω/ψ برای نمونه های بدون آرماتور جانبی وصله، در برابر مقدار M ترسیم شده است. شکل (۵) نشان می دهد نسبت ω/ψ را می توان مقدار ثابت $4/25$ فرض کرد. با جایگذاری این مقدار در رابطه (۵) و ساده سازی، رابطه بین تنش پیوستگی معادل یکنواخت و تنش پیوستگی موضعی از رابطه (۹) به دست می آید.

$$u_m = 0.24 u_c \left(1 + \frac{1}{M} \right) \quad (۹)$$



شکل (۴) تأثیر مقاومت بتن بر مقاومت پیوستگی در آرماتورهای GFRP

۵- مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP در نمونه های تیری وصله دار

۵-۱- نمونه های بدون آرماتور جانبی وصله

بر اساس یافته های اصفهانی و رنگان [۱۲]، رابطه زیر بین مقاومت پیوستگی موضعی u_c و تنش پیوستگی معادل یکنواخت u_m در محل وصله در لحظه شکست وجود دارد:

$$\frac{\omega}{\psi} = \frac{u_c}{u_m} \left(1 + \frac{1}{M} \right) \quad (۵)$$

که در رابطه بالا u_c مقاومت پیوستگی موضعی (رابطه ۱)، u_m تنش پیوستگی معادل یکنواخت و نسبت ω/ψ اثر عوامل پیش بینی نشده و اختلاف بین نمونه های بیرون کشیدگی و تیری وصله دار و اثر توزیع غیر یکنواخت تنش پیوستگی را وارد محاسبات می کند. نسبت ω/ψ به کمک نتایج آزمایش تعیین می شود. مقدار M را می توان به کمک رابطه زیر تعیین کرد [۱۲]:

$$M = \cos h \left(j \frac{L}{2} \right) \quad (۶)$$

در این رابطه L طول وصله است و مقدار j را می توان

$$u_m = 0.24 u_c \left(1 + \frac{1}{M} \right) \left(0.85 + 0.15 \frac{C_{med}}{C} \right) \quad (11)$$

از این رابطه می‌توان برای تعیین مقاومت پیوستگی وصله در نمونه‌های بدون آرماتور جانبی استفاده کرد. در جدول (۲) مقایسه‌ای بین نتایج مقاومت پیوستگی حاصل از رابطه (۱۱) و نتایج آزمایش نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله [۲۸؛ ۲۷؛ ۷] و دیگر روابط موجود انجام شده است.

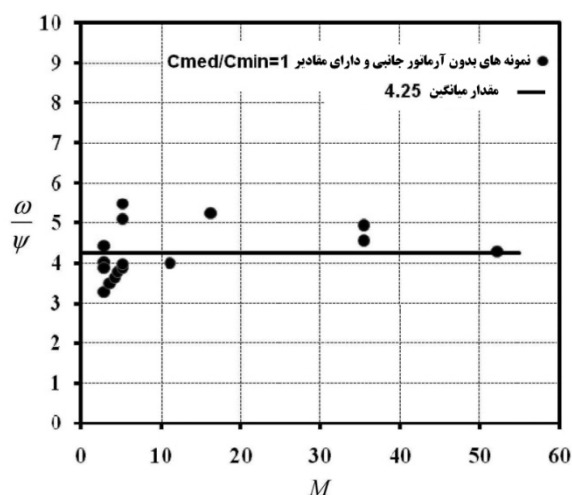
جدول (۲) مقایسه رابطه پیشنهادی (۱۱) با نتایج آزمایش بدون آرماتور جانبی و دیگر آیین‌نامه‌ها

ردیف	Beam No.	$\frac{u_{test}}{u_{(Eq11)}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[6]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[9]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[29]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[7]}}$
نمونه‌های بدون آرماتور جانبی [۲۸]، [۲۷]، [۷]	B-G1-3	۱/۱۶	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۷۳	۱/۱۳
	B-G2-3	۱/۱۲	۰/۵۳	۰/۵۸	۰/۶۹	۱/۱۱
	B-A-3	۱/۲۱	۰/۶۰	۰/۸۲	۰/۷۸	۱/۱۲
	B-A-1	۱/۱۱	۰/۵۹	۰/۹۵	۰/۸۹	۱/۲۶
	B-A-2	۰/۹۱	۰/۴۴	۰/۸۵	۰/۸۰	۱/۰۱
	B-G1-1	۱/۰۸	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۸۱	۱/۳۰
	B-G2-1	۰/۹۳	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۷۰	۱/۱۵
	B-G1-2	۰/۸۶	۰/۴۰	۰/۶۳	۰/۷۱	۱/۰۱
	B-G2-2	۰/۹۲	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۷۹	۱/۱۲
	R1.25L15	۱/۰۶	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۸۸	۱/۷۳
	R1.25L20	۱/۰۷	۰/۵۹	۰/۶۸	۰/۸۰	۱/۷۳
	R2L15	۰/۹۶	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۶۳	۱/۳۵
	R2L20	۱/۱۰	۰/۶۷	۰/۵۵	۰/۶۴	۱/۵۰
	R1.25L30	۰/۸۱	۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۵۴	۱/۳۲
	T1.25L15	۱/۲۹	۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۶۶	۱/۳۶
	T1.25L20	۰/۸۴	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۸۷
	T2L15	۱/۱۰	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۹۹
	T2L20	۰/۷۸	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۶۸
	G70z-A23	۰/۹۳	۰/۶۴	۰/۴۰	۰/۴۵	۱/۲۴
	G70z-A22	۰/۸۶	۰/۵۹	۰/۳۷	۰/۴۲	۱/۱۴
	mean	۱/۰۰	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۶۵	۱/۲۱
	S.D.	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۶

در نمونه‌های با آرماتور فوقانی از ضریب اصلاح آرماتور فوقانی ۱/۳ استفاده شده است [۱۵]. در جدول (۲) مقدار

رابطه (۹) با فرض $C_{med}/C = 1$ به دست آمده است. اصفهانی و همکاران [۱۲] نشان دادند که توزیع تنش پیوستگی تحت تأثیر نسبت C_{med}/C قرار دارد. پارامتر $\beta + (1 - \beta) \frac{C_{med}}{C}$ به عنوان ضریب اصلاحی برای وارد کردن اثر C_{med}/C در نظر گرفته می‌شود. پس از اعمال این ضریب در سمت راست رابطه (۹)، این رابطه به صورت پارامتری زیر در می‌آید:

$$u_m = 0.24 u_c \left(1 + \frac{1}{M} \right) \left(\beta + (1 - \beta) \frac{C_{med}}{C} \right) \quad (10)$$



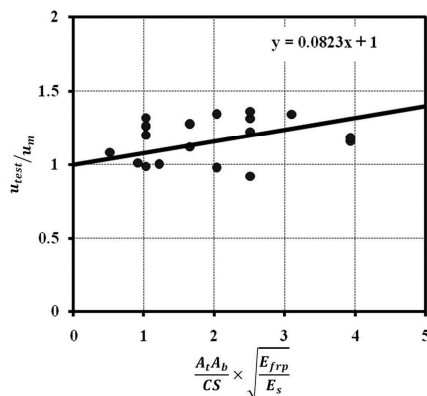
شکل (۵) رابطه بین ω/ψ و M در نمونه‌های با $C_{med}/C = 1$

در این رابطه M از رابطه (۸) و u_c به کمک رابطه (۱) تعیین می‌شود. برای تعیین مقدار β از نتایج آزمایش نمونه‌های بدون آرماتور جانبی و با نسبت $C_{med}/C > 1$ استفاده می‌شود. به کمک نتایج آزمایش ضریب β به گونه‌ای تعیین می‌شود که مقادیر تنش پیوستگی محاسبه شده به کمک رابطه اصلاحی بیش‌ترین همبستگی را با نتایج آزمایش داشته باشد. با جایگزینی u_{test} به جای u_m در رابطه (۱۰) و حل رابطه و درونیابی نتایج، بهترین مقدار برای β مساوی ۰/۸۵ به دست می‌آید. با جایگزینی ۰/۸۵ به جای β در رابطه (۱۰)، رابطه زیر به دست می‌آید:

این که تأثیر آرماتورگذاری جانبی بر آرماتورهای FRP کم تر از آرماتورهای فولادی است، اثر پارامتر $A_t A_b / CS$ باید کاهش پیدا کند. در آیین نامه [۹] CAN/CSA-S6-00 پارامتر نشان دهنده اثر آرماتور جانبی بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای فولادی با ضرب نسبت E_{frp} / E_s برای آرماتورهای FRP اصلاح شده است. در رابطه آلی [۷] از ضریب $\sqrt{E_{frp} / E_s}$ برای کاهش اثر ضخامت پوشش بتن استفاده شد.

در شکل (۶) نسبت تنش پیوستگی آزمایشگاهی به مقادیر تنش پیوستگی حاصل از رابطه (۱۱) در نمونه های دارای آرماتور جانبی [۷؛ ۲۸؛ ۳۰] در برابر $(\sqrt{E_{frp} / E_s})(A_t A_b / CS)$ رسم شده است. با توجه به این شکل ضریب اصلاحی $1 + 0.08 (A_t A_b / CS)(\sqrt{E_{frp} / E_s})$ برای اعمال اثر آرماتور جانبی بر مقاومت پیوستگی وصله های FRP به دست می آید. با وارد کردن این عبارت در رابطه (۱۱) رابطه زیر برای تعیین مقاومت پیوستگی در وصله نمونه های تیری مسلح به آرماتورهای FRP پیشنهاد می شود:

$$u_m = 0.24 u_c \left(1 + \frac{1}{M} \right) \times \left(0.85 + 0.15 \frac{C_{med}}{C} \right) \times \left(1 + 0.08 \frac{A_t A_b}{C S} \times \sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}} \right) \quad (12)$$



شکل (۶) رابطه بین u_{test} / u_m و $(A_t A_b / CS)(\sqrt{E_{frp} / E_s})$

میانگین نسبت مقاومت پیوستگی حاصل از نتایج آزمایش به مقدار محاسبه شده از رابطه (۱۱) $1/0.0$ و انحراف معیار آن 0.14 به دست آمده است. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت مقدار آزمایشگاهی به مقدار محاسبه شده از روابط [۶] ACI 440.1R-06 [۹] CAN/CSA-S6-00، [۲۹] CAN/CSA-S806-02 و آلی [۷] به ترتیب مقادیر $(0.51 و 0.11)$ ، $(0.59 و 0.18)$ ، $(0.65 و 0.18)$ و $(1.21 و 0.26)$ به دست آمده است. ملاحظه می شود که بهترین میانگین و انحراف معیار مربوط به رابطه پیشنهادی (۱۱) است.

۵-۱- نمونه های دارای آرماتور جانبی وصله

به منظور بررسی اثر آرماتورگذاری جانبی وصله، در جدول (۳) مقاومت پیوستگی نمونه های دارای آرماتور جانبی [۷؛ ۲۸؛ ۳۰] به کمک رابطه (۱۱) که برای نمونه های بدون آرماتور جانبی وصله به دست آمده است، محاسبه شد. این مقدار در ستون (۸) جدول (۳) نشان داده شده است. مقدار میانگین نسبت مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی به مقدار محاسبه شده از رابطه (۱۱) فقط در نمونه های دارای آرماتور جانبی $1/17$ با انحراف معیار 0.15 به دست آمده است. ملاحظه می شود که این رابطه مقاومت پیوستگی نمونه های با آرماتور جانبی را قدری کم تر از مقدار آزمایشگاهی پیش بینی می کند.

با توجه به جدول (۳) می توان نتیجه گرفت که اثر آرماتور جانبی در مقاومت پیوستگی بین آرماتورهای FRP قابل ملاحظه نیست. با این حال، در این مقاله به منظور افزایش دقت رابطه پیشنهادی، اثر آرماتورگذاری جانبی وارد محاسبات تنش پیوستگی می شود.

اصفهانی و کیانوش [۱۳] نشان دادند، پارامتر $A_t A_b / CS$ اثر آرماتورگذاری جانبی در نمونه های تیری فولادی را بهتر نشان می دهد. به منظور در نظر گرفتن اثر آرماتورگذاری جانبی در آرماتورهای FRP و با توجه به

جدول (۳) مقایسه رابطه پیشنهادی (۱۱) و (۱۲) با نتایج آزمایش و دیگر آیین‌نامه‌ها

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مرجع	Beam No.	$\frac{u_{test}}{u_{(Eq12)}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[6]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[9]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[29]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{[7]}}$	$\frac{u_{test}}{u_{(Eq11)}}$
نمونه‌های دارای آرماتور جانبی [۷؛ ۲۸؛ ۳۰]	6G50N-A8	۱/۱۷	۰/۸۰	۰/۵۸	۰/۶۵	۱/۲۱	۱/۲۷
	6G70N-A9	۱/۱۱	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۵۸	۱/۱۳	۱/۲۰
	6G80N-A10	۱/۱۶	۰/۹۰	۰/۵۴	۰/۶۰	۱/۱۹	۱/۲۶
	6G110N-A11	۰/۹۱	۰/۷۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۹۴	۰/۹۹
	6G70L-A25	۱/۰۴	۰/۷۴	۰/۴۶	۰/۵۲	۱/۱۹	۱/۰۸
	6G70N-A26	۱/۱۱	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۵۸	۱/۱۳	۱/۲۰
	6G70M-A27	۱/۰۹	۰/۹۲	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۸۱	۱/۳۶
	6G70N-KW28	۰/۹۹	۰/۷۱	۰/۵۸	۰/۶۷	۰/۹۵	۱/۱۳
	6G70N-FX29	۱/۱۴	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۷۷	۱/۳۴	۱/۲۹
	6G70N-KX30	۱/۱۱	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۵۸	۱/۱۳	۱/۲۰
	6G70N-PX31	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۴۴	۰/۵۰	۰/۷۱	۱/۰۲
	6G70N-KY30	۱/۲۲	۰/۹۰	۰/۵۷	۰/۶۴	۱/۲۴	۱/۳۲
	A460-1	۱/۱۱	۰/۹۲	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۵۲	۱/۳۳
	A460-2	۱/۱۴	۰/۹۵	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۵۴	۱/۳۷
	A540-1	۰/۷۶	۰/۶۷	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۹۲
	A540-2	۱/۰۲	۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۶۰	۰/۴۸	۱/۲۲
	B-675-1	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۵۳	۱/۱۸
	B-675-2	۰/۹۰	۰/۸۴	۰/۴۹	۰/۵۸	۰/۵۴	۱/۱۹
	B-870-1	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۹۴
	B-870-2	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۶	۱/۰۲
	R1.25L20-C	۱/۱۶	۰/۷۵	۰/۷۹	۱/۰۰	۰/۹۰	۱/۳۵
	T1.25L20-C	۰/۸۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۹۸
	T2L20-C	۰/۹۱	۰/۳۹	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۴۲	۱/۰۰
	mean	۱/۰۱	۰/۷۷	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۹۵	۱/۱۷
	S.D.	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۳۴	۰/۱۵
کل (نمونه‌های دارای آرماتور جانبی و بدون آرماتور جانبی)	mean	۱/۰۰	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۷	۰/۹۹	۱/۰۹
	S.D.	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۱۶

در این رابطه A_t سطح مقطع آرماتور جانبی، A_b سطح مقطع یک آرماتور وصله شده برحسب $S \text{ mm}^2$ فاصله آرماتورهای جانبی برحسب میلی‌متر، C حداقل بین سه مقدار C_x ، C_y و $(C_s + d_b)/2$ است. E_{frp} مدول الاستیسیته

آرماتورهای FRP و E_s مدول الاستیسیته آرماتورهای فولادی است. دیگر پارامترهای این رابطه در بخش‌های قبل تعریف شده‌اند. به‌منظور ارزیابی رابطه پیشنهادی (۱۲) از نتایج

خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت رابطه پیشنهادی به آزمایشگاهی به ترتیب $1/02$ و $0/14$ به دست آمده است.

(۲) توزیع تنش پیوستگی در طول آرماتور را می توان به کمک تئوری مدول تغییر مکان تعیین کرد. برای تعیین مدول تغییر مکان آرماتورهای FRP رابطه ای پیشنهاد شد. رابطه پیشنهادی همبستگی خوبی با نتایج آزمایش موجود دارد.

(۳) در رابطه پیشنهادی برای محاسبه مقاومت پیوستگی وصله آرماتورهای FRP، توزیع غیر یکنواخت تنش پیوستگی در نظر گرفته شده است. این رابطه اثر آرماتور جانبی وصله و پوشش بتن را نیز در محاسبات مقاومت پیوستگی وارد می کند. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی حاصل از نتایج آزمایش به مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی و آیین نامه ها محاسبه شده است. مقدار میانگین حاصل از رابطه پیشنهادی $1/00$ با انحراف معیار $0/14$ به دست آمده است. رابطه پیشنهادی علاوه بر این که همبستگی خوبی با نتایج آزمایش های موجود دارد، نسبت به دیگر روابط نیز جواب های بهتری ارائه می کند.

۷- مراجع

- [1] Okelo, R. and Yuan, R.; "Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete"; *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No.3, pp. 203-213, 2005.
- [2] American Concrete Institute Committee 408; "Bond and development of straight reinforcing bars in tension"; ACI 408R-03, Farmington Hills, Mich, 2003.
- [3] Tepfers, R. and De Lorenzis, L.; "Bond of FRP reinforcement in concrete"; *Journal of Mechanics of Composite Materials*, Vol. 39, No. 4, pp. 447-496, 2003.
- [4] Wambeke, B., and Shield, C.; "Development length of glass fiber reinforced polymer bars in

آزمایشگاهی موجود که در آن ها شکست پیوستگی اتفاق افتاده باشد، استفاده می شود. برخی از نتایج آزمایشگاهی دارای طول وصله بسیار زیادی هستند که مشابه روش وامبک و شیلد [۴] از این نمونه ها در محاسبات استفاده نمی شود. در نمونه های دارای آرماتور فوقانی از ضریب اثر آرماتور فوقانی $1/3$ استفاده شده است [۱۵]. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و رابطه پیشنهادی در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول مقایسه ای نیز بین رابطه (۱۲) و آیین نامه های موجود انجام شده است.

در این جدول مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی حاصل از نتایج آزمایش به مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی و آیین نامه ها محاسبه شده است. مقدار میانگین حاصل از رابطه پیشنهادی $1/00$ با انحراف معیار $0/14$ به دست آمده است. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت مقدار آزمایشگاهی به مقدار محاسبه شده از روابط [۶] ACI 440.1R-06 [۹]، CAN/CSA-S6-00 [۲۹] و CAN/CSA-S806-02 و آلی [۷] به ترتیب مقادیر $0/65$ و $0/19$ ، $0/55$ و $0/15$ ، $0/67$ و $0/16$ و $0/99$ و $0/36$ به دست آمده است. ملاحظه می شود رابطه پیشنهادی علاوه بر این که همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی موجود دارد، نسبت به سایر روابط نیز جواب های دقیق تری ارائه می کند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به کمک نتایج آزمایش های موجود، با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر، رابطه ای برای تعیین مقاومت پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن در نمونه های تیری وصله دار ارائه شده است. براساس این مطالعه نتایج زیر حاصل شد:

- (۱) برای تعیین مقاومت پیوستگی موضعی آرماتورهای FRP رابطه ای پیشنهاد شد. رابطه پیشنهادی همبستگی

- Deformed Bars"; Publication 73:2, Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 328 pp, 1973.
- [15] Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., Lachemi, M.; "Bond strength of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars in normal and self-consolidating concrete" ; *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, pp. 553-560, 2005.
- [16] Tepfers, R. and Karlsson, M.; "Pull-out and tensile reinforcement splice tests using FRP C-bars"; FRPRCS-3, 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures in Sapporo 14-16 October, pp. 357-364, 1997.
- [17] Tepfers, R.; Hedlund, G.; and Rosinski, B.; "Pull-out and Tensile Reinforcement Splice Test with GFRP Bars"; *2nd International Conference on Composites in Infrastructure*, ICCI, 1998.
- [18] Aly, R.; "Stress along tensile lap-spliced fiber reinforced polymer reinforcing bars in concrete"; *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, pp. 1149-1158, 2007.
- [19] Darwin, D.; Tholen, M. L.; Idun, E. K.; and Zou, J.; "Splice Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars"; *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, pp. 95-107, 1996.
- [20] Achillides, Z., and Pilakoutas, K.; "Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions"; *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No.2, pp. 173-81, 2004.
- [21] Banea, M., Torres, L., Turon, A., and Barris, C.; "Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test," *Composites: Part B*; Vol. 40, pp. 784-797, 2009.
- [22] Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, T. J., Yi, C. K., Park, J. S., You, Y. C. , and Park, Y. H.; "Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete," *Composites: Part B*; Vol. 39, pp. 258-270, 2008.
- [23] F. Davalos, J., Chen, Y., Ray, I.; "Effect of FRP bar degradation on interface bond with concrete"; *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, pp. 11-17, 2006.
- [5] Orangun, C. O.; Jirsa, J. O.; and Breen, J. E.; "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices"; *ACI Journal, Proceeding*, Vol. 74, No. 3, pp. 114-122, 1977.
- [6] American Concrete Institute (ACI); "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars", ACI440.1R-06, Farmington Hills, Mich, 2006.
- [7] Aly, R.; "Experimental and Analytical Studies on Bond Behavior of Tensile Lap Spliced FRP Reinforcing Bars in Concrete"; Ph.D Thesis, University of Sherbrook, Canada, 2005.
- [8] ACI Committee 318M; "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (318RM-02) ", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 443p, 2002.
- [9] CAN/CSA-S6-00; "Canadian Highway Bridge Design Code"; Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 192 pp, 2000.
- [10] Quayyum, S.; "Bond behavior of fiber reinforced polymer (FRP) rebars in concrete"; B.Sc. thesis, Bangladesh University of Engineering and Technology, Bangladesh, 2010.
- [11] Esfahani, M. R., and Rangan, B. V.; "Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete"; *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No.2, pp. 96-106, 1998.
- [12] Esfahani, M. R., and Rangan, B. V.; "Bond between Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC) and Reinforcing Bars in Splices in Beams"; *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 3, pp. 272-280, 1998.
- [13] Esfahani, M. R., and Kianoush, M. R.; "Development/Splice Length of Reinforcing Bars"; *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, pp. 22-30, 2005.
- [14] Tepfers, R. ; "A Theory of Bond Applied to Overlapping Tensile Reinforcement Splices for

- [27] Mosley, C.P., Tureyen, A.K., and Frosch, R.J.; "Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars"; *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 5, pp. 634-642, 2008.
- [28] Harajli, M., and Abouniaj, M.; "Bond Performance of GFRP Bars in Tension: Experimental Evaluation and Assessment of ACI 440 Guidelines;" *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, pp. 659-668, 2010.
- [29] CAN/CSA S806-02; "Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers"; *Canadian Standards Association*, Rexdale, Ontario, Canada, 177 pp, 2002.
- [30] Tighiouart, B.; Benmokrane, B.; and Mukhopadhyaya, P.; "Bond Strength of Glass FRP Rebar Splices in Beams under Static Loading"; *Construction and Building Materials*, Vol. 13, pp. 383-392, 1999s.
- high strength concrete" ;Cement and Concrete Composites: 30, pp.722-730, 2008.
- [24] Tepfers R.;"Bond clause proposal for FRP-bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: design bond stress for FRP reinforcing bars"; *Struct Concrete*; 7(2):47-55, 2006.
- [25] Hao, Q. D., Wang, Y. L., Zhang, Z. C., et al.; "Bond strength improvement of GFRP rebars with different rib geometries"; *J Zhejiang Univ Sci A* 8(9): 1356-1365 , 2007.
- [۲۶] رخشانی مهر، مهراله؛ اصفهانی، محمد رضا؛ موسوی، سید روح ا...؛ "رابطه سازی پارامترهای وابسته به مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP با استفاده از نتایج آزمایش بیرون کشیدگی"، اولین کنفرانس ملی صنعت بتن، کرمان، ایران، خرداد ۱۳۹۱.

