

ارزیابی مقاومت پیوستگی آرماتورهای پلیمری تقویتی الیاف شیشه در تیرهای بتن آرمه

علی زحمتکش

استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فردوس، ایران.

امیر باغبان*

استادیار گروه عمران، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

چکیده

عملکرد سازه های بتنی متأثر از انتقال نیرو بین آرماتور و بتن است که به عوامل زیادی مانند مقاومت بتن، تنش تسلیم آرماتور، هندسه آج ها، قطر آرماتور، پوشش بتن و طول پیوستگی وابسته است. در سال های اخیر استفاده از مصالح پلیمری تقویت شده به دلایلی از قبیل سهولت کاربرد و نتایج مناسب در سراسر دنیا رواج یافته است. در این پژوهش، اثر عوامل مختلف بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه، استفاده شده در تیرهای بتنی، بررسی و دقت روابط پیشنهاد شده توسط آیین نامه ها و محققین مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای بررسی اثر عوامل مختلف بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای پلیمری، نتایج ۴۳ آزمایش انجام شده توسط محققین مختلف استفاده شده است. عوامل مورد بررسی بر ظرفیت پیوستگی شامل اثر شکل سطحی آرماتور، مقاومت فشاری بتن، میزان پوشش بتن روی آرماتور، طول وصله و وجود آرماتورهای جانبی (خاموت) می باشد. پس از بررسی اثر عوامل مختلف، دقت روابط ارائه شده توسط آیین نامه ها و محققین در تعیین مقاومت پیوستگی برای این نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان دقت و انحراف معیار هر رابطه در تخمین نتایج بررسی گردید. نتایج نشان دادند که افزایش مقاومت فشاری بتن در نمونه های بدون مهار جانبی، سبب افزایش مقاومت پیوستگی می شود و در نمونه های دارای مهار جانبی تأثیری بر روی مقاومت پیوستگی ندارد. همچنین، غالب روابط موجود مقدار تنش پیوستگی را بیشتر از مقادیر به دست آمده از آزمایش ها تخمین می زنند که می تواند سبب گسیختگی های ناشی از عدم پیوستگی شود.

واژه های کلیدی: الیاف شیشه، مقاومت پیوستگی، مقاومت فشاری بتن، طول وصله.

* نویسنده مسئول: abaghban@gonabad.ac.ir

۱- مقدمه

در این روابط d_b قطر آرماتور، A_b سطح مقطع آرماتور، l_d طول مهاری، f_s تنش موجود در آرماتور و u یا τ تنش پیوستگی می‌باشد.

در خلال سه دهه گذشته موضوع پیوستگی بین بتن و آرماتور به‌طور وسیعی مورد بررسی قرار گرفته است [۸-۱۲]. یکی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه پیوستگی متعلق به ژنگ^۲ [۱۳] می‌باشد. او با استفاده از یک بررسی احتمال اندیشانه رابطه ۳ را برای مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن ارائه کرد:

$$\tau = \frac{\sqrt{f'_c}}{0.0306\pi d_b} \quad (۳)$$

در این رابطه f'_c مقاومت بتن و d_b قطر آرماتور می‌باشد. او برای توسعه تابع حالت حدی پیوستگی از ۵ متغیر مقاومت بتن، مقاومت کششی GFRP، طول مهاری، قطر آرماتور GFRP و ضریب عدم قطعیت محاسباتی استفاده کرد.

کویوم^۳ از داده‌های مختلفی که در پژوهش‌های مختلف وجود داشت برای بررسی مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP استفاده کرد [۱۴]. او به این نتیجه رسید که وجود آرماتورهای عرضی می‌تواند مقاومت پیوستگی را افزایش دهد، در نتیجه در رابطه‌ای که ارائه کرد این عامل را در نظر گرفت. رابطه ۴ توسط این محقق برای مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن پیشنهاد شده است [۱۴]:

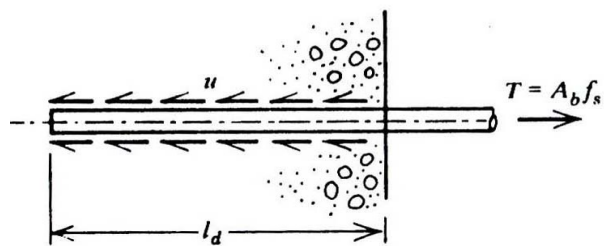
$$\frac{\tau}{\sqrt{f'_c}} = 0.03 + 0.14 \frac{C}{d_b} + 9 \frac{d_b}{l_d} + 2.9 \frac{A_{tr}}{s n d_b} \quad (۴)$$

در این رابطه، C پوشش بتن، l_d طول مهاری، A_{tr} و S مساحت و فاصله آرماتورهای جانبی و n تعداد آرماتورهای وصله شده می‌باشد.

اصفهان‌ی و همکاران به صورت آزمایشگاهی بر پیوستگی میلگردهای FRP تحقیق کردند [۷]. مطالعات آن‌ها بر مؤثر بودن آرماتورهای عرضی در افزایش پیوستگی آرماتورهای طولی تیرها تأکید دارد. آن‌ها همچنان نشان دادن که رابطه ارائه شده توسط [15] ACI 440.1R-06، دقت و اطمینان لازم را در محاسبه

فولاد در سازه‌های بتن مسلح با همه‌ی خصوصیات با ارزش و رفتار خوب سازه‌ای در برابر بارها مثل مقاومت بسیار بالا و شکل‌پذیری بسیار خوب، دارای خاصیت زنگ‌زدگی و خورده شدن در طول زمان است. عواملی از قبیل نمک‌های موجود در آب‌های دریاها، فاضلاب کارخانجات و گاز کربنیک و سایر عناصر آلاینده در هوا، به تدریج باعث از بین رفتن آرماتورهای فولادی در داخل بتن می‌شوند که می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری در سازه داشته باشد. یک روش برای رفع این مشکل استفاده از آرماتورهای پلیمری الیافی (FRP^۱) می‌باشد. این آرماتورها علاوه بر مقاومت در برابر خوردگی، سبک‌تر و مقاوم‌تر نیز می‌باشند [۱]. تاکنون مطالعات مختلفی در مورد این آرماتورها انجام شده است [۶-۲]. یک زمینه مورد مطالعه مربوط به مقاومت پیوستگی و طول مهاری این آرماتورها می‌باشد.

مقاومت پیوستگی اشاره به توانایی انتقال نیروی کششی از آرماتور به بتن اطراف آن دارد. انتقال نیروها بین بتن و آرماتور یک مسئله مهم در سازه‌های بتن مسلح است. به منظور طراحی بهینه سازه‌های بتن مسلح، نیروهای بین بتن و آرماتور بایستی به‌طور قابل اطمینان و مناسب از طریق پیوستگی بین دو ماده انتقال یابند. در شکل ۱ تنش پیوستگی به نمایش در آمده است.



شکل ۱- تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور [۷]

برای به‌دست آوردن تنش پیوستگی متوسط می‌توان از تعادل نیروها در شکل ۱ بهره گرفت:

$$A_b f_s = u l_d \pi d \quad (۱)$$

$$\rightarrow u = \tau = \frac{A_b f_s}{l_d \pi d} \quad (۲)$$

³ - Quayyum

¹ - Fiber Reinforced Polymer

² - Zheng

GFRP را مورد بررسی قرار دارند. پارامترهای اصلی مورد بررسی قطر آرماتور و طول وصله بود.

آرماتورهای GFRP مورد استفاده دارای دو قطر ۱۲/۷ میلیمتر و ۱۵/۹ میلیمتر بودند. طول وصله مورد آزمایش نیز از ۰/۶ld تا ۱/۶ld متغیر بود.

۱۶ نمونه تیری بتن مسلح با آرماتورهای GFRP با طول دهانه ۳ متر در معرض آزمایش خمش ۴ نقطه ای قرار گرفتند. وصله ها در منطقه خمش ثابت، که در نتیجه اعمال دو بار نقطه ای متقارن در طول تیر ایجاد می شد، قرار گرفته بودند. پوشش پایینی و کناری بتن ۳۰ میلیمتر بود.

۲-۲- آزمایش های موسلی^۳ و همکاران [۱۷]

این محققین در تحقیقات خویش سه گروه تیر بتنی مسلح را مورد آزمایش قرار دادند. در هر گروه چهار نمونه وجود داشت که یک نمونه با آرماتور فولادی و سه نمونه دیگر تیرهای بتنی با آرماتورهای الیافی پلیمری بودند تا امکان مقایسه خصوصیات سازه ای آنها از قبیل مقاومت پیوستگی، مقدار ترک ها و تغییر مکان ها فراهم شود.

۲-۳- آزمایش های حراجلی و ابونیاچ^۴ [۱۸]

در این تحقیق تیرهای بتنی وصله دار به صورت دو سر ساده تحت اثر دو بار متمرکز مورد آزمایش قرار گرفتند. طول نمونه ها ۲ متر و ابعاد مقطع ۳۰×۱۱ سانتی متر و ۳۰×۱۵ سانتی متر انتخاب شدند. قطر آرماتورهای کششی اعم از FRP و فولادی ۱۲ میلی متر و قطر خاموت های دور وصله ۸ میلی متر در نظر گرفته شدند.

برای مقایسه نتایج مقاومت پیوستگی، آرماتورهای کششی از سه نوع فولادی آج دار، پلیمری شیشه ای آج دار و پلیمری شیشه ای با نوارهای ماریچی انتخاب شدند. در هر نمونه از دو آرماتور کششی وصله شده (دو وصله) با طول وصله های 15db، 20db و 30db استفاده شد. نسبت $\frac{C}{d_b}$ برابر ۱،۲۵ و ۲ در نظر گرفته شد (C مقدار پوشش و db قطر آرماتور کششی).

متغیرهای تأثیرگذار روی مقاومت پیوستگی نمونه ها در تحقیق فوق، ساختار سطح جانبی آرماتورها، نسبت $\frac{C}{d_b}$ و وجود

پیوستگی آرماتورهای FRP ندارد.

این مقاله به بررسی عوامل مؤثر بر تنش پیوستگی آرماتورهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP^۱) در تیرهای بتن مسلح می پردازد. عوامل مورد بررسی شامل شکل (سطح) خارجی آرماتور، مقاومت بتن، پوشش بتن روی آرماتورها، طول وصله و آرماتورهای جانبی می باشد. همچنین در این پژوهش دقت روابط ارائه شده توسط آیین نامه ها و پژوهش گران در محاسبه مقاومت پیوستگی توسط آزمایش های موجود صحت سنجی می شود.

۲- انتخاب داده های آزمایشگاهی

آزمایش های مختلفی توسط محققین بر روی آرماتورهای FRP انجام شده است. در مواردی داده های این آزمایش ها به طور کامل در دسترس نیست و در موارد دیگر نوع آرماتور مورد استفاده و یا شرایط آزمایش به گونه ای بوده است که قابل استفاده در پژوهش حاضر نیست. در این پژوهش از نتایج آزمایش های مراجع [۱۹-۱۶] استفاده شده است. این آزمایش ها در مجموع دارای ۵۸ نمونه ساخته شده با آرماتورهای GFRP می باشند. از بین این نتایج، ۴۳ داده آزمایشگاهی با توجه به محدودیت های زیر، به منظور تحلیل رفتار پیوستگی آرماتورهای GFRP و بتن مورد استفاده قرار گرفت.

۱- آرماتورها در پایین مقطع قرار داشته باشند.

۲- قبل از شکست نمونه، شکست آرماتور رخ نداده باشد.

۳- فقط نمونه هایی که در آنها شکست پیوستگی رخ داده در نظر گرفته شوند. به منظور بررسی مقاومت پیوستگی، نتایج نمونه هایی که در آنها شکست خمشی یا فشاری اتفاق افتاده بود، حذف گردید.

در ادامه به اختصار این آزمایش ها توضیح داده می شوند. سپس در جدول ۱ اطلاعات آنها به صورت کامل تری ارائه می گردد. برای اطلاعات بیشتر می توان به مقاله های اصلی رجوع کرد.

۲-۱- آزمایش های تیغیورات^۲ [۱۶]

محققان در این تحقیق با استفاده از آزمایش نمونه های تیری مقاومت پیوستگی تیرهای بتنی وصله دار مسلح با آرماتورهای

3- Mosley

4- Harajli and Abouniaj

1 - Glass Fiber Reinforced Polymer

2 - Tighiouart

خاموت‌های دور وصله می‌باشند. و به ترتیب مربوط می‌شوند به آرماتورهای آج‌دار، با نوارهای مارپیچی، دارای پوشش ماسه‌ای و مارپیچی با پوشش ماسه‌ای.

۲-۴- آزمایش‌های آلی^۱ [۱۹]

۳- بررسی اثر عوامل مختلف بر مقاومت پیوستگی
 نمونه‌های انتخاب شده دارای مقاومت فشاری بتن، پوشش بتن روی آرماتور، طول وصله، قطر آرماتور، شکل سطح آرماتور و آرماتورهای جانبی متفاوت می‌باشند. در این بخش اثر این پارامترها بر روی مقاومت پیوستگی بررسی می‌گردد. لازم به ذکر است که به منظور بررسی اثر عوامل مختلف، تنش پیوستگی توسط ریشه دوم مقاومت فشاری بتن نرمالیزه شده، تا هنگام بررسی عوامل دیگر، تغییرات ایجاد شده در تنش پیوستگی ناشی از تغییرات مقاومت فشاری بتن کاهش یابد. علاوه بر این طول مهار و پوشش بتن نیز به وسیله قطر آرماتور نرمالیزه شدند، تا تغییرات به وجود آمده از اثر قطر در نتایج کاهش یابد. ضمناً تا حد امکان سعی شده است نمونه‌ها در شرایط مشابهی، از نظر پوشش بتن، طول وصله، مهار جانبی و ... مورد بررسی قرار گیرند.

۳-۱- سطح آرماتور

چهار نوع آرماتور از نظر شکل سطحی در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود. این آرماتورها شامل: آج‌دار، با نوارهای مارپیچی، دارای پوشش ماسه‌ای و مارپیچی با پوشش ماسه‌ای می‌باشند. در شکل‌های ۲ و ۳ نمودار تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f'_c}}$ (تنش پیوستگی نرمالیزه شده) نمونه‌ها در برابر $\frac{l_{embed}}{d_b}$ (طول مهار نرمالیزه شده) در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی به ازای پوشش‌های نرمالیزه شده مختلف بتن رسم شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌گردد، آرماتورهای آج‌دار در مقایسه با سایر آرماتورها دارای مقاومت پیوستگی بیشتر و آرماتورهای با نوارهای مارپیچی دارای مقاومت پیوستگی کمتری می‌باشند. این امر را احتمالاً می‌توان به قفل و بست‌های مکانیکی بهتر بین آرماتورهای آج‌دار و بتن نسبت داد. علاوه بر این ملاحظه می‌گردد که آرماتورهای دارای پوشش ماسه‌ای و مارپیچی با پوشش ماسه‌ای رفتار پیوستگی مشابهی دارند. این نیز به تشابه دو آرماتور در شکل سطحی شان بر می‌گردد

برنامه آزمایشگاهی این محققان شامل سه گروه نمونه تیری با مقیاس کامل بود. گروه یک و سه شامل ۱۲ نمونه و گروه دو شامل ۹ نمونه تیر با آرماتورهای FRP وصله شده می‌باشد. دو نوع آرماتور FRP به منظور بررسی اثر عوامل مختلف از قبیل نوع آرماتور، طول وصله، مهار جانبی و غیره مورد استفاده قرار گرفت. آرماتورهای CFRP و GFRP مورد استفاده از نوع دارای پوشش ماسه‌ای بودند. آرماتورهای CFRP دارای قطر ۹/۵ میلیمتر و ۱۲/۷ میلیمتر، و آرماتورهای GFRP دارای قطر ۱۵/۹ میلیمتر و ۱۹/۱ میلیمتر بودند. تمام وصله‌ها در منطقه خمش ثابت قرار داشتند. پوشش کناری و پایینی به ترتیب ۴۰ و ۴۵ میلیمتر بود. خاموت‌ها آرماتور ۸ بودند که فاصله آنها در محل وصله ۱۵۰ میلیمتر و در سایر نقاط ۱۰۰ میلیمتر بود. دو آرماتور ۱۲ فولادی جهت آرماتورهای فشاری مورد استفاده قرار گرفت. رابطه ۵ توسط این محقق برای مقاومت پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن ارائه شده است.

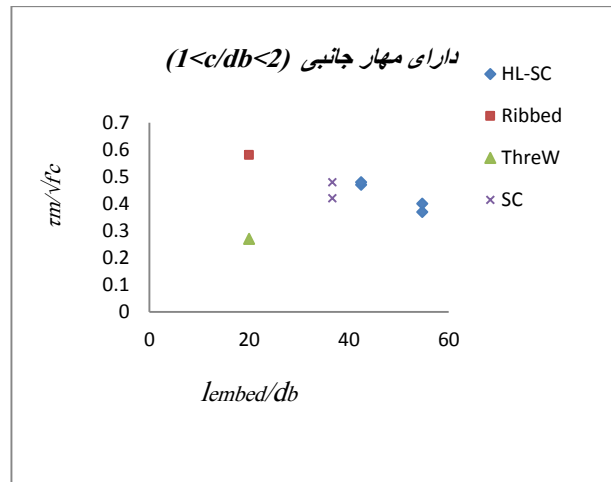
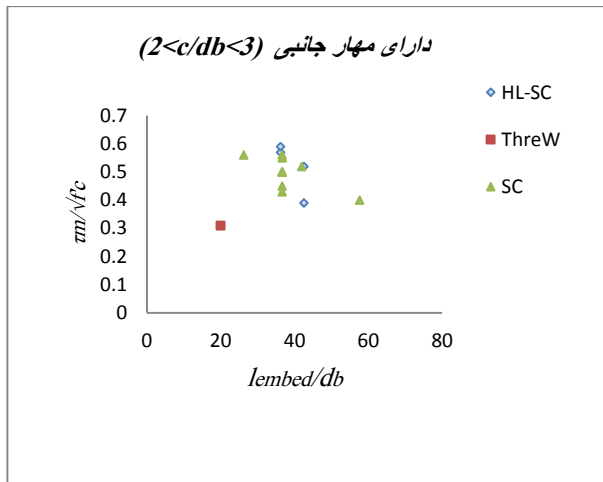
$$\tau = \left(\left(\frac{1}{4490} + \frac{C}{1800d_b} + \frac{d_b}{108l_s} \right) \sqrt{E_f} + \frac{A_{tr}f_{yt}}{41.5sd_b} \right) \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

پارامترهای این رابطه قبلاً در سایر روابط تشریح شده اند به جز l_s که طول وصله و E_f که مدول الاستیسیته آرماتور می‌باشد. اطلاعات بیشتر در مورد آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است. در این جدول Cy، Cx و Cs به ترتیب پوشش کناری، پوشش پایینی و فاصله بین آرماتورها در محل وصله بر حسب میلیمتر، d_b قطر میلگرد کششی و d_{tr} قطر خاموت هر دو بر حسب میلیمتر، f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، E_f مدول الاستیسیته آرماتور بر حسب گیگا پاسکال، s فاصله خاموت‌های دور وصله و L_d طول مهار هر دو بر حسب میلیمتر می‌باشند. همچنین در جدول ۱ عبارات Ribbed، SC، ThreW و HL-SC به شکل سطحی آرماتور اشاره دارند

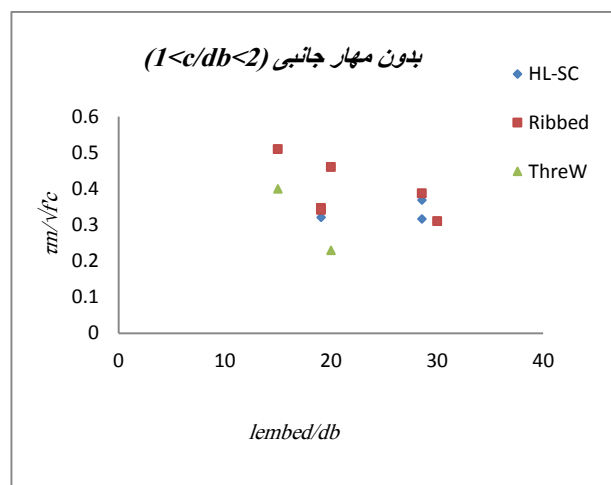
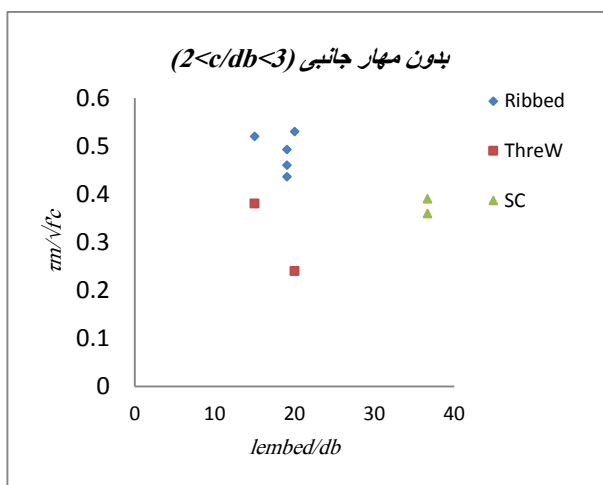
^۱- Aly

جدول ۱- اطلاعات آزمایش‌های مورد استفاده در پژوهش

ردیف	محصور شدگی	شکل سطحی آرماتور	$d_b(mm)$	$\sqrt{f_c}$	L_d	c_x	c_y	c_s	d_{tr}	s	E_f	مرجع آزمایش
1	دارای مهار	HL-SC	12/7	6/48	460	30	30	115	11/3	80	45	[16]
2	دارای مهار	HL-SC	12/7	6/48	460	30	30	115	11/3	80	45	[16]
3	دارای مهار	HL-SC	12/7	6/48	540	30	30	115	11/3	80	45	[16]
4	دارای مهار	HL-SC	12/7	6/48	540	30	30	115	11/3	80	45	[16]
5	دارای مهار	HL-SC	15/9	6/52	675	30	30	124	11/3	80	45	[16]
6	دارای مهار	HL-SC	15/9	6/52	675	30	30	124	11/3	80	45	[16]
7	دارای مهار	HL-SC	15/9	6/52	870	30	30	124	11/3	80	45	[16]
8	دارای مهار	HL-SC	15/9	6/52	870	30	30	124	11/3	80	45	[16]
9	دارای مهار	Ribbed	12	7/21	240	15	15	30	8	80	37	[18]
10	دارای مهار	ThreW	12	7/21	240	15	15	30	8	80	37	[18]
11	دارای مهار	ThreW	12	7/21	240	25	25	50	8	80	37	[18]
12	بدون مهار	Ribbed	12	6/93	180	15	15	30	0	60	37	[18]
13	بدون مهار	Ribbed	12	6/93	240	15	15	30	0	80	37	[18]
14	بدون مهار	Ribbed	12	6/93	180	25	25	50	0	60	37	[18]
15	بدون مهار	Ribbed	12	6/93	240	25	25	50	0	80	37	[18]
16	بدون مهار	Ribbed	12	7/21	360	15	15	30	0	120	37	[18]
17	بدون مهار	ThreW	12	7/21	180	15	15	30	0	60	37	[18]
18	بدون مهار	ThreW	12	7/21	240	15	15	30	0	80	37	[18]
19	بدون مهار	ThreW	12	7/21	180	25	25	50	0	60	37	[18]
20	بدون مهار	ThreW	12	7/21	240	25	25	50	0	80	37	[18]
21	دارای مهار	SC	19/1	6/4	500	40	45	80	8	150	37	[19]
22	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	40	45	80	8	150	37	[19]
23	دارای مهار	SC	19/1	6/4	800	40	45	80	8	150	37	[19]
24	دارای مهار	SC	19/1	6/4	1100	40	45	80	8	150	37	[19]
25	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	40	45	83/6	8	300	37	[19]
26	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	40	45	83/6	8	150	37	[19]
27	دارای مهار	SC	19/1	6/71	700	40	45	83/6	8	50	37	[19]
28	دارای مهار	SC	19/1	6/71	700	25	45	83/6	8	150	37	[19]
29	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	25	45	83/6	8	150	37	[19]
30	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	40	45	83/6	8	150	37	[19]
31	دارای مهار	SC	19/1	6/71	700	40	45	83/6	8	150	37	[19]
32	دارای مهار	SC	19/1	6/56	700	40	70	83/6	8	150	37	[19]
33	بدون مهار	SC	19/1	6/56	700	40	45	83/6	0	150	37	[19]
34	بدون مهار	SC	19/1	6/71	700	40	45	83/6	0	150	37	[19]
35	بدون مهار	Ribbed	16	6/42	305	38	60	121	0	80	40/5	[17]
36	بدون مهار	Ribbed	16	6/4	305	38	60	121	0	80	37/6	[17]
37	بدون مهار	Ribbed	16	6/29	305	38	60	121	0	80	47/1	[17]
38	بدون مهار	Ribbed	16	6/26	457	38	38	25	0	80	47/1	[17]
39	بدون مهار	Ribbed	16	5/36	305	38	38	25	0	80	47/1	[17]
40	بدون مهار	HL-SC	16	6/21	457	38	38	25	0	80	40/5	[17]
41	بدون مهار	HL-SC	16	6/15	457	38	38	25	0	80	37/6	[17]
42	بدون مهار	HL-SC	16	5/39	305	38	38	25	0	80	40/5	[17]
43	بدون مهار	Ribbed	16	5/2	305	38	38	25	0	80	37/6	[17]



شکل ۲- نمودار مقایسه تنش پیوستگی نرمالیزه شده برای شکل های سطحی مختلف آرماتورهای FRP در نمونه های دارای مهار جانبی



شکل ۳- نمودار مقایسه تنش پیوستگی نرمالیزه شده برای شکل های سطحی مختلف آرماتورهای FRP در نمونه های بدون مهار جانبی

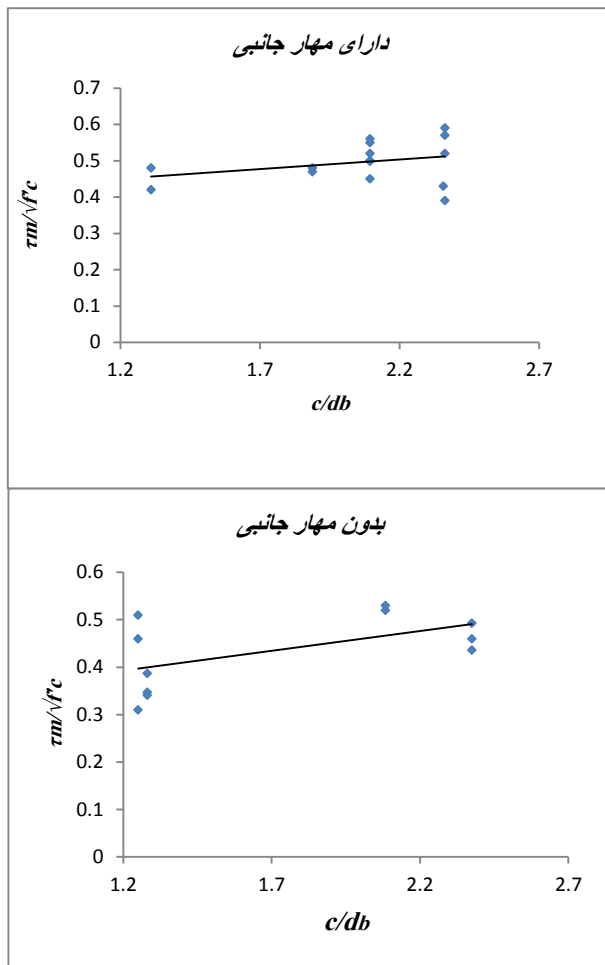
بدون مهار جانبی افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش در مقاومت پیوستگی شده است. این مطلب این گونه می تواند توضیح داده شود که در نمونه های دارای مهار جانبی محصور شدگی آرماتورها بیشتر توسط خاموت ها تأمین می شود و نقش محصور کنندگی بتن اطراف کمتر است. برعکس، در نمونه های بدون مهار جانبی بتن اطراف آرماتور نقش اصلی را در محصور کنندگی آرماتورها ایفا می کند و در نتیجه با افزایش مقاومت بتن، محصور شدگی بیشتری برای آرماتورهای محل وصله ایجاد می شود و بنابراین نیروی بیشتری برای ایجاد ترک در بتن لازم است، در نتیجه تنش پیوستگی افزایش می یابد.

۳-۳- پوشش بتن

در نمونه های مورد بررسی ۱۹ نمونه دارای $1 < \frac{c}{d_b} < 2$ و ۲۴

۳-۲- مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری نمونه های مورد بررسی بین ۲۷ و ۵۲ مگا پاسکال متغیر هستند. شکل ۴ تغییرات مقاومت پیوستگی نمونه ها در برابر $\sqrt{f'_c}$ را در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی نشان می دهد. در بررسی اثر مقاومت فشاری به منظور کاهش تغییرات ایجاد شده در تنش پیوستگی با توجه به شکل سطحی آرماتورها، در نمونه های دارای مهار جانبی فقط آرماتورهای دارای پوشش ماسه ای و ماریچی با پوشش ماسه ای، که در قسمت قبل رفتار مشابهی روی مقاومت پیوستگی نشان داده بودند مورد استفاده قرار گرفتند و در نمونه های بدون مهار جانبی نیز فقط نمونه های مسلح به آرماتورهای آج دار در نظر گرفته شدند. از شکل ۴ می توان دریافت که افزایش مقاومت فشاری در نمونه های دارای مهار جانبی تأثیری بر روی مقاومت پیوستگی ندارد، ولی در نمونه های

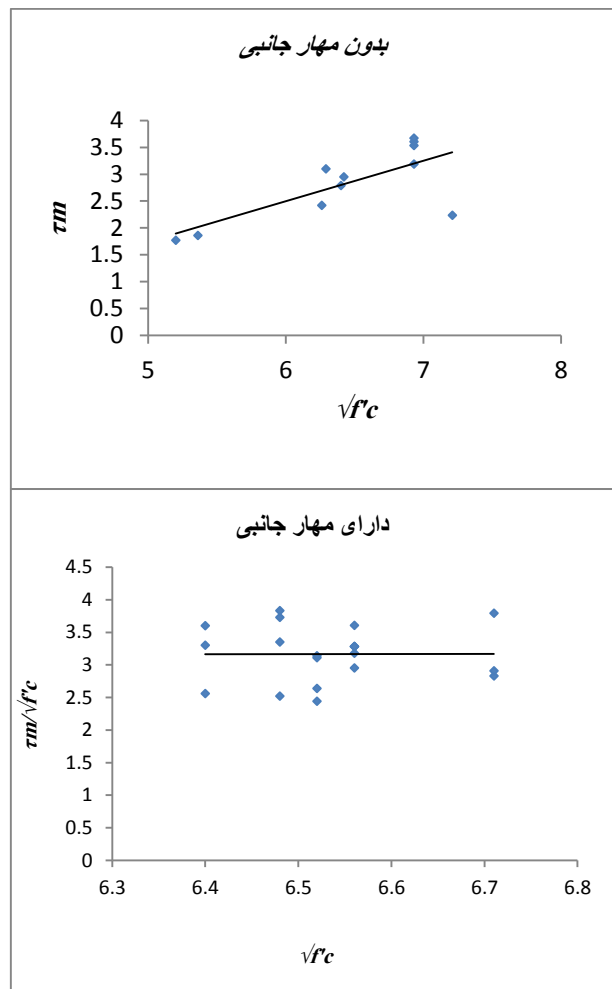


شکل ۵- نمودار تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در مقابل $\frac{c}{d_b}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی

۳-۴- طول وصله

طول وصله در نمونه‌های مورد بررسی بین $15d_b$ و $57d_b$ متغیر است. ۲۱ نمونه دارای طول وصله کمتر از $30d_b$ و ۲۲ نمونه نیز دارای طول وصله بیشتر از $30d_b$ می‌باشند. در شکل ۶ تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در برابر $\frac{l_{embed}}{d_b}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی رسم شده است. مانند حالت قبل در حالت دارای مهار جانبی آرماتورهای دارای پوشش ماسه ای و مارپیچی با پوشش ماسه ای و در حالت بدون مهار جانبی آرماتورهای آج دار در نظر گرفته شده است. همان طور که از شکل ۶ می‌توان دریافت، با افزایش طول وصله تنش پیوستگی کاهش می‌یابد. مشابه این رفتار قبلاً توسط [19] نیز گزارش شده است. این امر را می‌توان ناشی از این عامل دانست که افزایش طول وصله یکنواختی توزیع تنش در طول وصله را کاهش داده و در نتیجه تنش پیوستگی معادل یکنواخت در لحظه شکست کاهش می‌یابد.

نمونه دارای $2 < \frac{c}{d_b} < 3$ می‌باشند. در شکل ۵ تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در مقابل $\frac{c}{d_b}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی رسم شده است. لازم به ذکر است که در حالت دارای مهار جانبی فقط از آرماتورهای دارای پوشش ماسه ای و مارپیچی با پوشش ماسه ای که دارای $36 < \frac{l_d}{d_b} < 43$ هستند استفاده شده و در حالت بدون مهار جانبی از آرماتورهای آج دار که دارای $15 < \frac{l_d}{d_b} < 30$ هستند استفاده شده است. ملاحظه می‌گردد که در هر دو قسمت افزایش پوشش بتن سبب افزایش مقاومت پیوستگی می‌گردد و این به علت افزایش محصور شدگی آرماتورهای محل وصله توسط بتن می‌باشد. این رفتار تأیید کننده روابط ارائه شده توسط برخی مراجع از قبیل [14] و [19] می‌باشد.

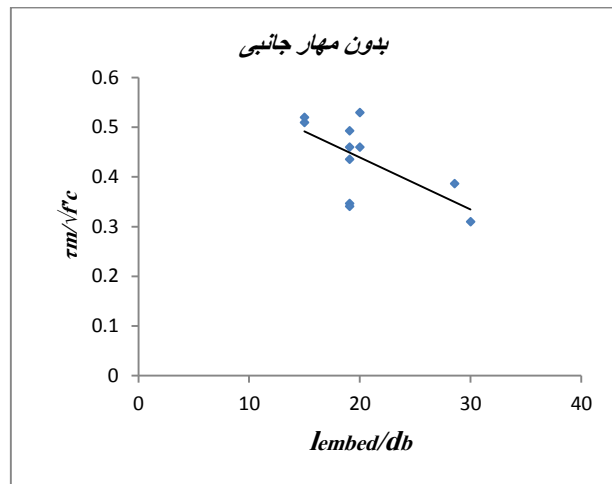
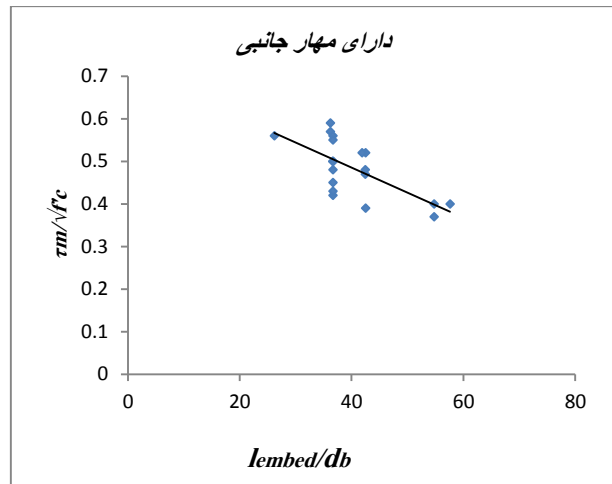


شکل ۴- نمودار تغییرات مقاومت پیوستگی نمونه‌ها در برابر $\sqrt{f_c}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی

همان گونه که ملاحظه می گردد مقاومت پیوستگی نمونه های دارای مهار جانبی بطور قابل توجهی از مقاومت پیوستگی نمونه های بدون مهار جانبی بیشتر است. در نتیجه با اینکه این عامل در بسیاری از آیین نامه مغفول مانده است، می تواند به طور اثر گذاری مقاومت پیوستگی را بالا ببرد. در برخی آیین نامه ها مانند مبحث نهم مقررات ملی ایران [۲۰] یا ACI 318-19 [21] در تیرهای خمشی ویژه در محله وصله پوششی آرماتورهای فولادی، فواصل خاموت ها به مقادیر کمتری محدود شده است. این رفتار تایید کننده روابط ارائه شده توسط برخی مراجع از قبیل [14] و [19] می باشد.

۴- مدل ها و روابط موجود

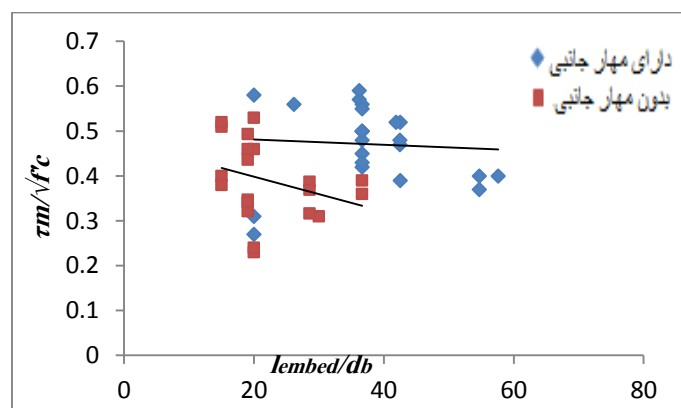
تاکنون روابط مختلفی از سوی پژوهشگران برای تخمین طول مهاری و مقاومت پیوستگی ارائه شده است. عموماً این روابط بر پایه تعداد محدودی از داده های آزمایشگاهی است که پژوهشگر در مورد مدل خود انجام داده است. علاوه بر این با توجه به اینکه نتایج آزمایش ها معمولاً تحت تأثیر عواملی از قبیل خصوصیت های ظاهری و فیزیکی مخلوط بتن، نوع نصب وسایل آزمایشگاهی، سرعت بارگذاری، مقیاس نمونه ها، خطاهای انسانی می باشد، غالباً مدل ها نسبت به داده های آزمایشگاهی که براساس آن ارائه شده است تخمین مناسبی داشته و در مورد سایر داده ها پیش بینی واقع بینانه ارائه نمی کنند. بنابراین انتخاب مدلی که بتواند به صورت کلی تر و عمومی تر پیوستگی و طول مهاری را تخمین بزند، ضروری به نظر می رسد. در این بخش تعدادی از روابط مربوط به مقاومت پیوستگی و طول مهاری آرماتورهای FRP که توسط پژوهشگران و آیین نامه ها بیان شده است بررسی می گردند. این روابط در جدول ۲ به صورت خلاصه آورده شده است.



شکل ۶- نمودار تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در برابر $\frac{l_{embed}}{d_b}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی

۳-۵- مهار جانبی (خاموت)

از نمونه های مورد بررسی ۲۳ نمونه دارای مهار جانبی و ۲۰ نمونه بدون مهار جانبی می باشند. شکل ۷ تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در برابر $\frac{l_{embed}}{d_b}$ را در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی نشان می دهد.



شکل ۷- تغییرات $\frac{\tau_m}{\sqrt{f_c}}$ در برابر $\frac{l_{embed}}{d_b}$ در دو حالت دارای مهار جانبی و بدون مهار جانبی

جدول ۲- خلاصه‌ای از مدل‌های مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن

شماره رابطه	رابطه	مرجع
(۶)	$\frac{\tau}{\sqrt{f'_c}} = 0.33 + 0.25 \frac{C}{d_b} + 8.3 \frac{d_b}{l_{embed}}$	ACI 440.1R-15 [22]
(۷)	$\tau = \frac{14.25\sqrt{f'_c}}{d_b}$	ACI 440.1R-03 [23]
(۸)	$\tau = \frac{d_{CS}\sqrt{f'_c}}{1.15(k_1k_2k_3k_4k_5)\pi d_b}$	CAN/CSA-S806-12 [24]
(۹)	$\tau = \frac{f_{cr}(d_{CS} + k_{tr} \frac{E_{frp}}{E_S})}{0.45\pi d_b k_1 k_4}$	CAN/CSA-S806-06 [25]
(۵) تکراری	$\tau = \left(\frac{1}{4490} + \frac{C}{1800d_b} + \frac{d_b}{108l_s} \right) \sqrt{E_{frp} + \frac{A_{tr}f_{yt}}{41.5sd_b}} \sqrt{f'_c}$	Aly (2005) [19]
(۳) تکراری	$\tau = \frac{\sqrt{f'_c}}{0.0306\pi d_b}$	Zheng (2011) [13]
(۴) تکراری	$\frac{\tau}{\sqrt{f'_c}} = 0.03 + 0.14 \frac{C}{d_b} + 9 \frac{d_b}{l_d} + 2.9 \frac{A_{tr}}{s d_b}$	Quayyum (2010)

۵- ارزیابی روابط ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی

در این بخش سنجش عدم قطعیت هفت مدل مربوط به مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد، که معادله‌های اصلی هر مدل در جدول ۲ آورده شده است. مدل‌ها در سه بخش، بدون مهار جانبی، دارای مهار جانبی و در حالت کلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای بازنگری مدل‌های فوق از تخمین نتایج ۴۳ آزمایش که در قبل تشریح گردید استفاده شده است. به منظور سنجش و ارزیابی این روابط از شاخص‌های زیر استفاده شده است:

$$Mean = \bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\tau_{test}}{\tau_{analy}} \right) \quad (10)$$

$$St. Dev = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad x = \left(\frac{\tau_{test}}{\tau_{analy}} \right) \quad (11)$$

که در این روابط $n=43$ (تعداد نمونه‌های مورد بررسی)، τ_{analy} مقدار به دست آمده از روابط، τ_{test} مقدار به دست آمده از آزمایش، Mean میانگین نسبت نتایج حاصل از روابط به نتایج آزمایشگاهی و St.Dev انحراف معیار داده‌ها می‌باشد.

نتایج به دست آمده از تحلیل روابط در مورد هر یک از مدل‌ها به تفکیک بدون مهار جانبی، دارای مهار جانبی و در حالت کلی در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است. در قسمت تحلیل داده‌های بدون مهار جانبی، انحراف معیار در مدل‌ها از ۱۰۴٪ تا ۳۲۲٪ متغیر است که کمترین این مقدار در مدل ACI 440.1R-15 و بیشترین آن در مدل آلی مشاهده شد. همچنین در این بخش میانگین نسبت میزان آزمایشگاهی به مقدار ارائه شده توسط مدل از ۴۹۵٪ تا ۱/۳۴۵ متغیر است که کمترین آن در مدل ACI 440.1R-03 و بیشترین آن در مدل آلی مشاهده شد. هرچه مقدار میانگین به عدد یک نزدیکتر باشد نشان از دقت بالاتر رابطه در تخمین مقاومت پیوستگی می‌باشد. اعداد کوچکتر از یک نشان دهنده تخمین بالاتر از واقعیت روابط می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود در تمامی مدل‌ها به جز مدل آلی میانگین تخمین‌ها کوچکتر از یک و در خلاف جهت اطمینان می‌باشد. انحراف معیار در داده‌های دارای مهار جانبی از ۱۰۶٪ تا ۳۴۳٪ متغیر است (جدول ۴) که کمترین آن در مدل CAN/CSA-S806-06 و بالاترین آن در مدل آلی مشاهده می‌گردد. نسبت میانگین نیز از ۵۱۱٪ در مدل CAN/CSA-S806-06 تا ۸۰۹٪ در مدل آلی متغیر است.

در حالت کلی نیز انحراف معیار از ۱۵۰/ تا ۴۲/ متغیر می باشد آلی متغیر است. این نتایج نشان می دهد که از نظر میانگین، رابطه (جدول ۵) که کمترین آن در مدل CAN/CSA-S806-06 و آلی دقت مناسب تری را نسبت به سایر روابط ارائه می دهد و قابل بیشترین آن در مدل آلی مشاهده شد. نسبت میانگین نیز در حالت کلی از ۵۴۶/ در مدل CAN/CSA-S806-06 تا ۱۰۷/ در مدل روابط بسیار بیشتر و تا مواردی حدود ۳ برابر نیز می باشد.

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از روابط با نتایج آزمایش نمونه‌های بدون آرماتور جانبی

شماره تیر	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}
	$\tau_{[ACI\ 03]}$	$\tau_{[ACI\ 15]}$	$\tau_{[CSA\ 12]}$	$\tau_{[CSA\ 06]}$	$\tau_{[Aly\ (2005)]}$	$\tau_{[Quayyum\ (2010)]}$	$\tau_{[Zheng\ (2011)]}$
B-G1-3	۰.۶۴۷	۰.۵۵۷	۰.۷۲۵	۰.۶۱۴	۱.۱۲۶	۰.۵۵۱	۰.۷۰۷
B-G2-3	۰.۶۱۴	۰.۵۲۹	۰.۶۸۸	۰.۵۸۳	۱.۱۰۹	۰.۵۲۲	۰.۶۷۱
B-A-3	۰.۶۹۴	۰.۵۹۸	۰.۷۷۸	۰.۸۲۳	۱.۱۲۰	۰.۵۹۰	۰.۷۵۸
B-A-1	۰.۵۴۴	۰.۵۹۲	۰.۸۹۳	۰.۹۴۵	۱.۸۱۶	۰.۸۵۱	۰.۵۹۵
B-A-2	۰.۴۸۸	۰.۴۳۵	۰.۸۰۱	۰.۸۴۸	۱.۴۰۰	۰.۵۶۷	۰.۵۳۴
B-G1-1	۰.۵۱۹	۰.۵۶۵	۰.۸۱۱	۰.۷۲۱	۱.۸۶۸	۰.۸۱۱	۰.۵۶۷
B-G2-1	۰.۴۴۴	۰.۴۸۳	۰.۶۹۴	۰.۶۱۷	۱.۶۵۸	۰.۶۹۴	۰.۴۸۵
B-G1-2	۰.۴۵۲	۰.۴۰۲	۰.۷۰۶	۰.۶۲۸	۱.۳۹۶	۰.۵۲۵	۰.۴۹۴
B-G2-2	۰.۴۷۹	۰.۴۲۷	۰.۷۸۶	۰.۶۶۶	۱.۵۳۶	۰.۵۵۷	۰.۵۲۴
R1.25L15	۰.۵۳۸	۰.۵۵۸	۰.۸۸۴	۰.۷۴۹	۱.۷۲۸	۰.۶۳۴	۰.۵۸۸
R1.25L20	۰.۴۸۶	۰.۵۹۳	۰.۷۹۸	۰.۶۷۶	۱.۷۳۳	۰.۷۰۲	۰.۵۳۱
R2L15	۰.۵۴۹	۰.۵۵۶	۰.۶۳۱	۰.۵۳۵	۱.۳۵۳	۰.۵۶۴	۰.۶۰۰
R2L20	۰.۵۵۹	۰.۶۶۵	۰.۶۴۳	۰.۵۴۵	۱.۴۹۵	۰.۶۸۷	۰.۶۱۱
R1.25L30	۰.۳۲۷	۰.۴۸۶	۰.۵۳۸	۰.۴۵۵	۱.۳۱۵	۰.۶۱۴	۰.۳۵۸
T1.25L15	۰.۴۲۲	۰.۴۳۷	۰.۶۶۱	۰.۵۸۸	۱.۳۵۵	۰.۴۹۷	۰.۴۶۱
T1.25L20	۰.۲۴۳	۰.۲۹۶	۰.۳۸۰	۰.۳۳۸	۰.۸۶۶	۰.۳۵۱	۰.۲۶۵
T2L15	۰.۴۰۱	۰.۴۰۶	۰.۴۳۹	۰.۳۹۱	۰.۹۸۹	۰.۴۱۲	۰.۴۳۸
T2L20	۰.۲۵۳	۰.۳۰۱	۰.۲۷۷	۰.۲۴۷	۰.۶۷۷	۰.۳۱۱	۰.۲۷۷
6G70z-A23	۰.۶۵۱	۰.۶۳۶	۰.۴۴۸	۰.۳۹۸	۱.۲۲۸	۰.۶۸۱	۰.۷۱۱
6G70z-A22	۰.۶۰۱	۰.۵۸۷	۰.۴۱۳	۰.۳۶۸	۱.۱۳۵	۰.۶۲۹	۰.۶۵۷
میانگین	۰.۴۹۵	۰.۵۰۵	۰.۶۵۰	۰.۵۸۷	۱.۳۴۵	۰.۵۸۸	۰.۵۴۲
انحراف معیار	۰.۱۲۴	۰.۱۰۴	۰.۱۷۷	۰.۱۸۳	۰.۳۲۲	۰.۱۳۶	۰.۱۳۶

نمونه‌های بدون آرماتور جانبی (Aly(2005), Mosley(2008), Harajli(2010))

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از روابط با نتایج آزمایش نمونه‌های دارای آرماتور جانبی

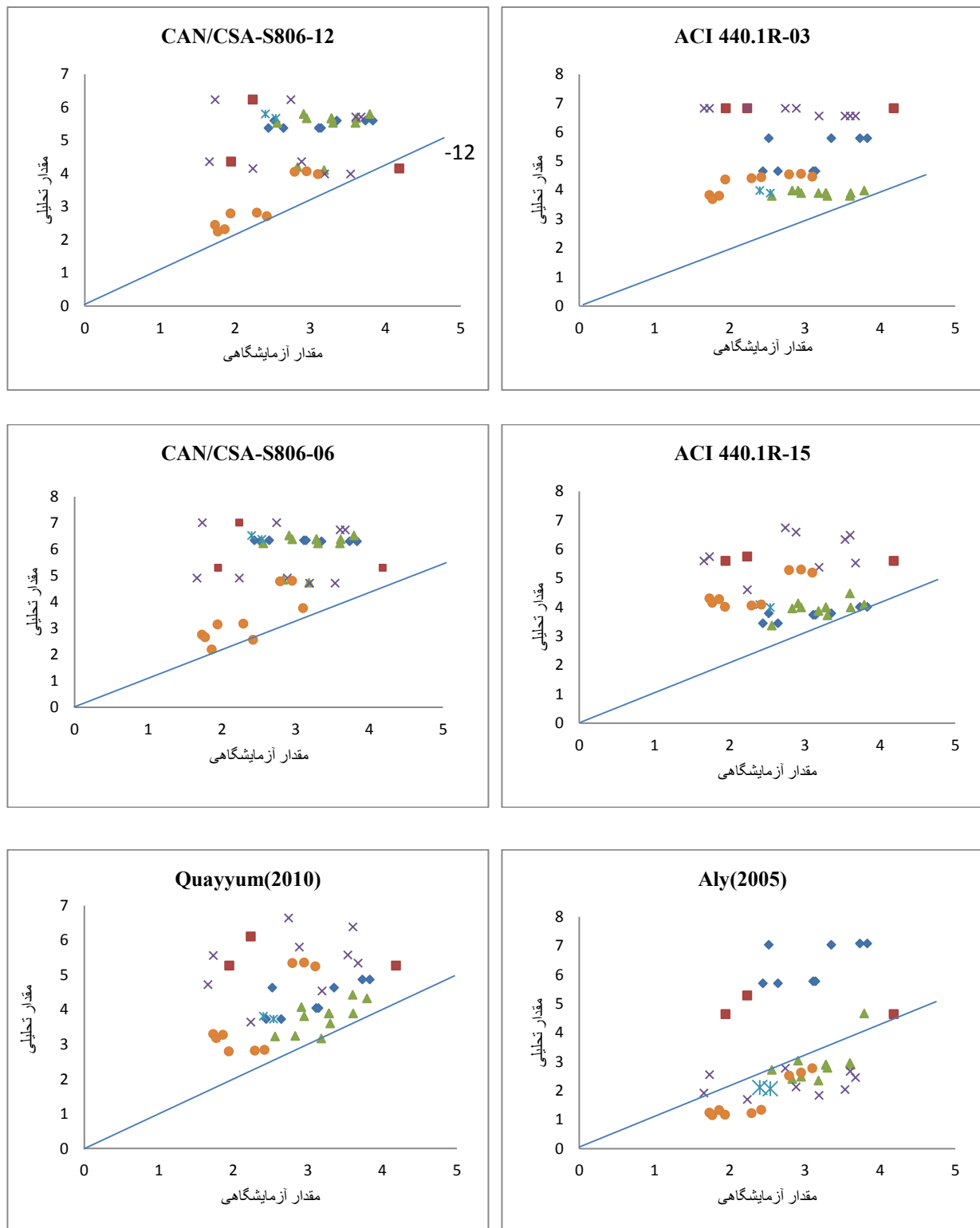
شماره تیر	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}
	$\tau_{[ACI\ 03]}$	$\tau_{[ACI\ 15]}$	$\tau_{[CSA\ 12]}$	$\tau_{[CSA\ 06]}$	$\tau_{[Aly\ (2005)]}$	$\tau_{[Quayyum\ (2010)]}$	$\tau_{[Zheng\ (2011)]}$
6G50N-A8	۰.۹۴۵	۰.۸۰۴	۰.۶۵۰	۰.۵۷۸	۱.۲۱۹	۰.۸۱۲	۱.۰۳۳
6G70N-A9	۰.۸۴۰	۰.۸۲۱	۰.۵۷۸	۰.۵۱۴	۱.۱۳۱	۰.۸۴۱	۰.۹۱۸
6G80N-A10	۰.۸۶۶	۰.۸۸۸	۰.۵۹۶	۰.۵۳۰	۱.۱۸۳	۰.۹۱۵	۰.۹۴۷
6G110N-A11	۰.۶۷۲	۰.۷۶۰	۰.۴۶۲	۰.۴۱۱	۰.۹۴۳	۰.۷۹۲	۰.۷۳۴
6G70L-A25	۰.۷۵۶	۰.۷۳۹	۰.۵۲۰	۰.۴۶۲	۱.۱۸۸	۰.۷۷۳	۰.۸۲۶
6G70N-A26	۰.۸۴۰	۰.۸۲۱	۰.۵۷۸	۰.۵۱۴	۱.۱۳۱	۰.۸۴۱	۰.۹۱۸
6G70M-A27	۰.۹۴۹	۰.۹۲۸	۰.۶۵۳	۰.۵۸۱	۰.۸۱۲	۰.۸۷۶	۱.۰۳۷
6G70N-KW28	۰.۷۰۹	۰.۷۱۶	۰.۶۷۴	۰.۵۸۴	۱.۱۷۸	۰.۸۷۱	۰.۷۷۴
6G70N-FX29	۰.۸۱۴	۰.۸۲۳	۰.۷۷۵	۰.۶۷۲	۱.۳۵۴	۱.۰۰۱	۰.۸۹۰
6G70N-KX30	۰.۸۴۰	۰.۸۲۱	۰.۵۷۸	۰.۵۱۴	۱.۱۳۱	۰.۸۴۱	۰.۹۱۸
6G70N-PX31	۰.۷۲۹	۰.۷۰۵	۰.۵۰۱	۰.۴۴۶	۰.۹۵۹	۰.۷۱۴	۰.۷۹۶
6G70N-KY30	۰.۹۲۴	۰.۹۰۳	۰.۶۳۶	۰.۵۶۵	۱.۲۴۴	۰.۹۲۶	۱.۰۱۰
A460-1	۰.۶۴۳	۰.۹۳۱	۰.۶۶۵	۰.۵۹۲	۰.۵۲۶	۰.۷۶۵	۰.۷۰۳
A460-2	۰.۶۶۰	۰.۹۵۶	۰.۶۸۳	۰.۶۰۸	۰.۵۴۱	۰.۷۸۶	۰.۷۲۲
A540-1	۰.۴۳۴	۰.۶۶۶	۰.۴۵۰	۰.۴۰۰	۰.۳۵۸	۰.۵۴۴	۰.۴۷۵
A540-2	۰.۵۷۸	۰.۸۸۵	۰.۵۹۸	۰.۵۳۲	۰.۴۷۶	۰.۷۲۳	۰.۶۳۱
B-675-1	۰.۶۶۷	۰.۸۳۳	۰.۵۷۸	۰.۴۹۰	۰.۵۳۸	۰.۷۶۹	۰.۷۲۹
B-675-2	۰.۶۷۴	۰.۸۴۱	۰.۵۸۳	۰.۴۹۵	۰.۵۴۴	۰.۷۷۶	۰.۷۳۶
B-870-1	۰.۵۲۳	۰.۷۰۸	۰.۴۵۳	۰.۳۸۵	۰.۴۲۷	۰.۶۵۳	۰.۵۷۲
B-870-2	۰.۵۶۶	۰.۷۶۶	۰.۴۹۰	۰.۴۱۶	۰.۴۶۳	۰.۷۰۷	۰.۶۱۹
R1.25L20-C	۰.۶۱۲	۰.۷۴۷	۱.۰۰۶	۰.۷۸۹	۰.۹۰۱	۰.۷۹۴	۰.۶۶۹
T1.25L20-C	۰.۲۸۵	۰.۳۴۸	۰.۴۴۶	۰.۳۶۸	۰.۴۱۹	۰.۳۶۹	۰.۳۱۱
T2L20-C	۰.۳۲۷	۰.۳۸۹	۰.۳۵۸	۰.۳۱۹	۰.۴۲۳	۰.۳۶۶	۰.۳۵۸
میانگین	۰.۶۸۹	۰.۷۷۴	۰.۵۸۷	۰.۵۱۲	۰.۸۳۰	۰.۷۵۹	۰.۷۵۳
انحراف معیار	۰.۱۸۳	۰.۱۵۰	۰.۱۳۳	۰.۱۰۶	۰.۳۴۳	۰.۱۵۶	۰.۲۰۰

نمونه‌های دارای آرماتور جانبی (Tighiouart(1999), Aly(2005), Harajli(2010))

جدول ۵- مقایسه نتایج حاصل از روابط با نتایج آزمایش در حالت کلی

حالت کلی	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}	τ_{test}
	$\tau_{[ACI\ 03]}$	$\tau_{[ACI\ 15]}$	$\tau_{[CSA\ 12]}$	$\tau_{[CSA\ 06]}$	$\tau_{[Aly\ (2005)]}$	$\tau_{[Quayyum\ (2010)]}$	$\tau_{[Zheng\ (2011)]}$
میانگین	۰.۵۹۹	۰.۶۴۹	۰.۶۱۶	۰.۵۴۶	۱.۰۷۰	۰.۶۷۹	۰.۶۵۵
انحراف معیار	۰.۱۸۴	۰.۱۸۷	۰.۱۵۷	۰.۱۵۰	۰.۴۲۰	۰.۱۶۹	۰.۲۰۲

شکل ۸ نیز تأیید کننده نتایج فوق می باشد. در این شکل نتایج حاصل از تخمین روابط مختلف در مقابل نتایج آزمایشگاهی رسم شده است.



شکل ۸- نمودار پراکندگی مربوط به تخمین مقاومت پیوستگی مدل های مختلف (MPa)

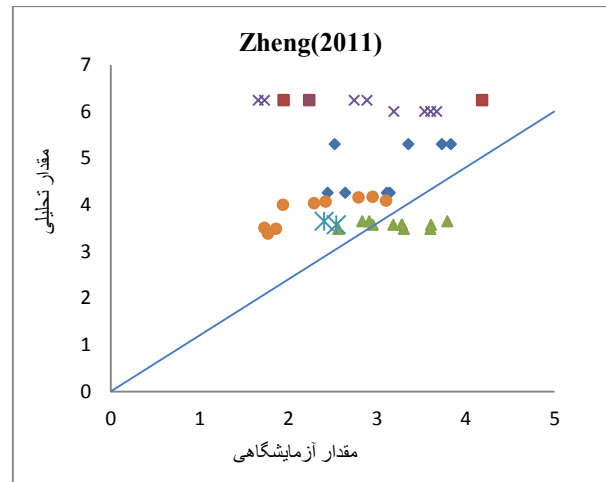
نسبت میانگین ۱/۳۴۵ و ۰/۶۴۹ می باشد. مدل CAN/CSA-S806-12 دارای انحراف معیاری در حدود نصف مدل Aly می باشد و از این لحاظ مناسب تر به نظر می رسد. اما بایستی توجه نمود که تخمین نتایج توسط مدل CAN/CSA-S806-12 بسیار بیش از حد صورت می گیرد، در صورتی که مدل Aly در این زمینه نتایجی با میزان محافظه کارانه بالا ارائه می دهد. در نمونه های دارای آرماتور جانبی بهترین نسبت میانگین به ترتیب مربوط به مدل های Aly، ACI 440.1R-15 و Quayyum با مقادیر ۰/۸۲۹، ۰/۷۷۴ و ۰/۷۵۷ می باشد. مدل ACI 440.1R-15 با داشتن انحراف معیار ۰/۱۵، دارای کمترین انحراف معیار در میان مدل های فوق می باشد.

۶- نتایج

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار پیوستگی آرماتورهای GFRP در تیرهای بتنی مسلح نتایج آزمایشگاهی این تیرها مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تأثیر عوامل مختلف از قبیل پوشش بتن، مقاومت بتن، طول وصله و... بر روی پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن بررسی شد. علاوه بر این، دقت روابط موجود در تخمین مقاومت پیوستگی نمونه های آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفت. در این گام، میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی مقدار آزمایشگاهی به مقدار بدست آمده از روابط مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج بدست آمده را به صورت خلاصه می توان به شکل زیر بیان نمود.

I. شکل سطحی آرماتور بطور قابل توجهی بر روی مقاومت پیوستگی مؤثر است. افزایش پوشش بتن و مهار جانبی مقاومت پیوستگی را افزایش داده و افزایش طول وصله تنش پیوستگی را کاهش می دهد. افزایش مقاومت فشاری بتن نیز در نمونه های بدون مهار جانبی سبب افزایش مقاومت پیوستگی شده و در نمونه های دارای مهار جانبی تأثیری بر روی مقاومت پیوستگی ندارد.

II. با مقایسه انجام شده بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد مقاومت پیوستگی آرماتورهای GFRP و بتن نشان داده شد که عدم قطعیت در اکثر مدل ها عموماً بالا بوده و روابط موجود غالباً مقدار مقاومت پیوستگی را در خلاف جهت اطمینان تخمین می زنند.



ادامه شکل ۸- نمودار پراکنندگی مربوط به تخمین مقاومت پیوستگی مدل های مختلف (MPa)

در مدل آلی توزیع مناسب تری در اطراف خط پایه بدست آمده است. در این مدل برای نمونه های بدون مهار جانبی و دارای مهار جانبی نتایج متفاوتی مشاهده گردید. این مدل نتایج را در قسمت بدون مهار جانبی کمتر از مقدار آزمایشگاهی برآورد می کند و همچنین با وجود در نظر گرفتن اثر مهار جانبی در رابطه، افزایش مقاومت پیوستگی در نمونه های دارای مهار جانبی بسیار بیش از حد تخمین زده می شود، که این در نمونه های موسلی (۲۰۰۸) و حراجلی (۲۰۱۰) کاملاً نمایان می باشد. در این میان تنها در مورد نمونه های مربوط به خود پژوهشگر نتایج مطلوبی در قسمت دارای مهار جانبی بدست آمد. اگر چه این مدل در حالت کلی دارای نسبت میانگین نزدیک به یک می باشد ولی اختلاف قابل توجهی بین نسب میانگین در نمونه های بدون مهار جانبی و نمونه های دارای مهار جانبی وجود دارد. همچنین انحراف معیار بدست آمده در این مدل نیز نسبتاً بالا می باشد. بر این اساس این مدل نیز نمی تواند در محاسبه مقاومت پیوستگی پیش بینی مناسبی داشته باشد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می گردد مدل کوایوم نیز اکثر نتایج را بالاتر از حد تخمین می زند. این مدل به ویژه در مورد نتایج آزمایش های حراجلی (۲۰۱۰) در هر دو قسمت بدون مهار جانبی و دارای مهار جانبی تخمین بسیار نامناسبی نشان می دهد. به گونه ای که در برخی نمونه ها عدد بدست آمده سه تا چهار برابر مقدار آزمایشگاهی می باشد.

مناسب ترین نسبت میانگین در میان نمونه های بدون مهار جانبی به ترتیب مربوط به مدل های Aly و CAN/CSA-S806-12 با

assessment on the flexural bonding performance of concrete beam with GFRP reinforcing bar under repeated loading”, International Journal of Polymer Science, 2015.

[۱۱]. رزمی، مهدی و خدایی، نهمت، "بررسی نقش روانکننده بر روی مقاومت پیوستگی بتن- فولاد به وسیله آزمایش Pull out"، فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات بتن، ۱۴(۱)، ص ۱۰۹-۱۲۱، ۱۴۰۰.

[۱۲]. حج فروش، محمد، خیرالدین، علی و رضایی فر، امید، "اثر میدان مغناطیسی بر مقاومت پیوستگی میلگرد در بتن حاوی الیاف فولادی با استفاده از آزمون بیرون کشیدن میلگرد"، فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات بتن، ۱۳(۴)، ص ۱۶-۵، ۱۳۹۹.

[13]. He, Z. and Tian, G.W., "Reliability-based bond design for GFRP-reinforced concrete". 44, pp. 1477-1489, 2011.

[14]. Quayyum, S., "Bond Behaviour of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete" MS thesis, University of British Columbia, 2010.

[15]. American Concrete Institute (ACI) Committee 440, "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars", ACI 440.1R-06, Farmington Hills, MI, 2006.

[16]. Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Mukhopadhyaya, P., "Bond strength of glass FRP rebar splices in beams under static loading", Construction and Building Materials, 13, pp. 383-392, 1999.

[17]. Mosley, C.P., Tureyen, A.K. and Frosch, R.J., "Bond strength of nonmetallic reinforcing bars." ACI Structural Journal, 105(5), pp. 634-642, 2008.

[18]. 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, 14(6). 2010.

[19]. Aly, R.S.M., "Experimental and Analytical Studies on Bond Behaviour of Tensile Lap Spliced FRP Reinforcement Bars in Concrete," PhD thesis, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 2005, 194 pp.

[۲۰]. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نهم، "طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه"، وزارت راه و شهرسازی، ویرایش پنجم، ۱۳۹۹.

[21]. American Concrete Institute (ACI) Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete." ACI 318-19, 2019.

[22]. ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced

III. در بررسی مدل ها در مورد مقاومت پیوستگی، مدل آلی مناسب ترین تخمین از نتایج نمونه های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده را داشت. با این حال در این مدل اختلاف زیادی بین نسبت میانگین در نمونه های بدون آرماتور جانبی و دارای آرماتور جانبی وجود داشت و همچنین انحراف معیار این مدل نیز نسبتا بالا بود.

۷- مراجع

[1]. Aly, R., Benmokrane, B. and Ebead, U., "Tensile Lap Splicing of Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete", ACI Structural Journal, 103(6): pp. 857-864, 2006.

[۲]. خیرالدین، علی و مالکی، فهیمه، "ارزیابی تغییر مکان قائم کوتاه مدت تیرهای بتن آرمه با میلگردهای کامپوزیت"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۳۱(۴)، ص ۱۲۹-۱۱۳، ۱۳۹۷.

[3]. Kazakevich, T., Mamedov, S., Nizhegorodtsev, D. and Klevan, V., "Improving the reliability of FRP bars tests by increasing the adhesive strength in specimen anchor", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896, 2020.

[4]. Wu, Q., Xiao, S. and Iwashita, K., "Experimental study on the interfacial shear stress of RC beams strengthened with prestressed BFRP rod", Results in Physics, 10, pp. 427-433, 2018.

[5]. Zhao, D., Pan, J., Zhou, Y., Sui, L. and Ye, Z., "New types of steel-FRP composite bar with round steel bar inner core: mechanical properties and bonding performances in concrete," Construction and Building Materials, 242, pp. 118062, 2020.

[6]. Hadhood, A., Mohamed, H.M., Benmokrane, B., Nanni, A. and Shield, C.K., "Assessment of design guidelines of concrete columns reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars", ACI Structural Journal, 116(4), pp. 193-207, 2019.

[7]. Esfahani, M.R., Rakhshanimehr, M. and Mousavi, S.R., "Bond strength of lap-spliced GFRP bars in concrete beams", Journal of Composites for Construction, 17, pp. 314-323, 2013.

[8]. Papakonstantinou, C.G., Balaguru, P.N. and Auyeung, Y., "Influence of FRP confinement on bond behavior of corroded steel reinforcement," Cement and Concrete Composites, 33(5), pp. 611-621, 2011.

[9]. Ding, Y., Ning, X., Zhang, Y., Pacheco-Torgal, F. and Aguiar, J.B., "Fibres for enhancing of the bond capacity between GFRP rebar and concrete," Construction and Building Materials, 51, pp. 303-312, 2014.

[10]. Minkwan Ju, M. and Oh H., "Experimental

with FRP bars (ACI 440.1R-06)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015.

[23]. ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-03)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2003.

[24]. CAN/CSA S806-02, "Design and construction of building components with fibre reinforced polymers", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2012.

[25]. CAN/CSA S6-06, "Canadian highway bridge design code", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2006.

Bond strength of FRP bars in concrete beams

Ali Zahmatkesh

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ferdows branch, Islamic Azad University, Ferdows, Iran.

Amir Baghban*

Assistant professor, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

Abstract

In this study, the effect of various factors on the bond strength of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars, used in concrete beams, is evaluated and the accuracy of the equations proposed by different regulations and researchers is investigated. For this purpose, the results of 43 experiments performed by various researchers are used. Factors studied on the bond strength include the effect of the surface shape of the reinforcement, concrete strength, the amount of concrete cover on the bar, the splice length and the presence of transverse reinforcement. After examining the effect of various factors, the accuracy of the equations provided by regulations and researchers in determining the bond resistance for these laboratory results is evaluated. For this purpose, the mean and standard deviation of these equations are compared in estimating laboratory results. Studies show that most of the existing equations estimate the amount of bond stress more than the values obtained from experiments.

Keywords: GFRP bar, bond, reinforcement shape effect, splice length.

* Corresponding Author: abaghban@gonabad.ac.ir