



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۷۳ تا ۸۲  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 73-82



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد برای بررسی روابط آیین نامه ACI 440.1R-06 در پیش‌بینی مقاومت پیوستگی آرماتورهای GFRP

مهرا له رخشانی مهر<sup>۱</sup>، محمدرضا اصفهانی<sup>۲\*</sup>، سید روح الله موسوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(دریافت ۱۳۹۱/۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۹)

### چکیده

رابطه ACI 440.1R-06، مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای پلیمری الیافی (FRP) را دست بالا تخمین می‌زند و اثر آرماتورگذاری جانبی وصله را در محاسبات مقاومت پیوستگی در نظر نمی‌گیرد. در این مقاله ابتدا به کمک تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها و نتایج آزمایش‌های موجود، رابطه ACI 440.1R-06 برای تعیین مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار بدون آرماتور جانبی وصله، اصلاح شده است. سپس، برای بررسی اثر آرماتور جانبی بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار، ۱۳ نمونه تیری وصله‌دار، مسلح به آرماتورهای GFRP ساخته و آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که آرماتور جانبی وصله یکی از عوامل مهمی است که اثر آن با توجه به مشخصات سطح ظاهری آرماتور باید در محاسبات مقاومت پیوستگی در نظر گرفته شود. در پایان به کمک نتایج حاصل از آزمایش‌های این مقاله و نتایج آزمایشگاهی موجود در سایر مراجع و با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی ارائه شد. در این رابطه اثر آرماتورگذاری جانبی وصله به صورت تابعی از مشخصات سطح ظاهری آرماتور در محاسبات در نظر گرفته شده است. رابطه مقاومت پیوستگی پیشنهادی در مقایسه با ضوابط آیین‌نامه‌ای، همبستگی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

### کلمات کلیدی

آرماتور FRP، آرماتور جانبی، تحلیل قابلیت اعتماد، روش مونت‌کارلو، مقاومت پیوستگی.

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: esfahani@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

داروین و همکاران [۵] نشان دادند اثر آرماتورگذاری جانبی در وصله آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج زیاد، بیشتر از اثر آنها بر آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج کم است. بر این اساس با توجه به این که سطح نسبی آج در آرماتورهای FRP کم است، در آیین‌نامه [۲] ACI 440.1R-06 از اثر آرماتورگذاری جانبی در محاسبات مقاومت پیوستگی صرف‌نظر شده است. آلی [۷] نشان داد با افزایش آرماتور جانبی وصله، مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP در نمونه‌های تیری وصله‌دار افزایش می‌یابد. هراجللی و ابونیاچ [۳] نشان دادند آرماتورگذاری جانبی وصله، مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن را مشابه آرماتورهای فولادی افزایش می‌دهد.

در این مقاله ابتدا به کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۵] یک ضریب کاهش مقاومتی برای رابطه وامبک و شیلد که اساس رابطه پیشنهادی [۲] ACI 440.1R-06 است، پیشنهاد شده است. سپس برای بررسی اثر آرماتورگذاری جانبی وصله بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار، ۱۳ نمونه تیری مسلح به آرماتورهای GFRP ساخته و آزمایش شدند. در پایان به کمک روش مونت کارلو [۵] رابطه پیشنهادی نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله برای در نظر گرفتن اثر آرماتورگذاری جانبی اصلاح شده است.

## ۲- تعیین ضریب کاهش مقاومت برای رابطه [۲] ACI 440.1R-06

وامبک و شیلد [۶] به روشی مشابه اورنگان و همکاران [۸]، رابطه (۱) را برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول مهاری آرماتورهای GFRP پیشنهاد نمودند:

$$\frac{u}{0.083\sqrt{f'_c}} = \frac{1}{\alpha} (4.0 + 0.3 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{L_d}) \quad (1)$$

که در آن  $u$  مقاومت پیوستگی آرماتور FRP و بتن بر حسب MPa،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن بر حسب MPa،  $C$  کم‌ترین فاصله بین پوشش زیرین تا مرکز آرماتور و نصف فاصله مرکز تا مرکز آرماتورهای وصله‌شده بر حسب mm،  $d_b$  قطر آرماتور بر حسب mm و  $L_d$  طول پیوستگی بین آرماتور و بتن بر حسب mm و  $\alpha$  ضریب اثر آرماتور بالایی بوده که آیین‌نامه [۲] ACI 440.1R-06 بر اساس یافته‌های موزلی [۹] مقدار  $\alpha$  را برابر با ۱/۵ پیشنهاد نموده است. رابطه (۱) اساس رابطه پیشنهادی [۲] ACI 440.1R-06 است.

هراجللی و ابونیاچ [۳] با مقایسه نتایج آزمایش تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای GFRP و رابطه (۱) نشان دادند که رابطه

در سال‌های اخیر استفاده از آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) به عنوان یکی از روش‌های مقابله با خوردگی آرماتورهای فولادی در سازه‌های بتن مسلح پیشنهاد شده است [۱]، [۲]. از آنجا که خصوصیات غیرهمگن آرماتورهای FRP مقاومت برشی، عمل شاخه‌ایو پیوستگی بتن و آرماتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، رفتار پیوستگی بتن و آرماتور FRP با آرماتور فولادی متفاوت است [۲]. پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن، به عوامل زیادی مانند مدول الاستیسیته، مشخصات سطح ظاهری آرماتور، ضخامت پوشش بتن و قطر آرماتور بستگی دارد [۱]، [۲]، [۳]، [۴].

تاکنون تلاش‌های زیادی برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول پیوستگی آرماتورهای مسلح به الیاف شیشه (GFRP) انجام شده و بر اساس نتایج آزمایش‌ها مدل‌های تجربی متعددی ارائه شده است. با این حال بیشتر مدل‌های موجود بر اساس تحلیل یقین‌اندیشانه ارائه شده و در آنها عدم قطعیت‌های ناشی از طبیعت آماری متغیرها در نظر گرفته نشده است [۱].

در مسائل مهندسی یک سری عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به کمک روش‌های آماری در طراحی سازه وارد نمود و بر اساس تحلیل قابلیت اعتماد، احتمال خرابی یک سازه را بررسی نمود. علاوه بر این با استفاده از تئوری قابلیت اعتماد، می‌توان ضرایب ایمنی ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود را بر اساس یک یا چند شاخص قابلیت اعتماد و شرایط مورد نظر بهینه نمود [۱]، [۵].

ژنگ و تیان [۱] بر اساس تئوری قابلیت اعتماد رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول پیوستگی آرماتورهای FRP ارائه نمودند. در آیین‌نامه [۲] ACI 440.1R-06 رابطه وامبک و شیلد [۶] با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۵] برای تعیین مقاومت پیوستگی در طول پیوستگی اصلاح شد. علاوه بر این داروین و همکاران [۵] به کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک ضریب کاهش مقاومت پیوستگی برای رابطه مقاومت پیوستگی آرماتورهای فولادی پیشنهاد نمودند.

در رابطه با اثر آرماتورگذاری جانبی بر پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن در نمونه‌های تیری وصله‌دار، تحقیقات ناچیزی انجام شده است. از سوی دیگر در تحقیقات انجام‌شده در مورد اثر آرماتورگذاری جانبی وصله بر پیوستگی آرماتورهای FRP اختلاف‌هایی وجود دارد. وامبک و شیلد [۶] نشان دادند آرماتورگذاری جانبی وصله بر مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن تأثیری ندارد.

جدول ۱: مقایسه رابطه پیشنهادی با ضوابط آیین‌نامه‌ای در نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله

ردیف	تیر	سطح	$u_{test}$	$u_{test}/u_{Eq1}$	$u_{test}/u_{Eq3}$	$u_{test}/u_{CAN}$	
[۴]	B-G1-3	W-SC	۲/۹۵	۰/۸۲	۱/۲۱	۰/۶۱	
	B-G2-3	R	۲/۷۹	۰/۷۸	۱/۱۴	۰/۵۸	
	B-A-3	R	۳/۱	۰/۸۸	۱/۲۹	۰/۸۲	
	B-A-1	R	۲/۴۲	۰/۸۹	۱/۳۰	۰/۹۵	
	B-A-2	R	۱/۸۶	۰/۶۵	۰/۹۶	۰/۸۵	
	B-G1-1	W-SC	۲/۲۹	۰/۸۵	۱/۲۴	۰/۷۲	
	B-G2-1	R	۱/۹۴	۰/۷۳	۱/۰۶	۰/۶۲	
	B-G1-2	W-SC	۱/۷۳	۰/۶	۰/۸۸	۰/۶۳	
	B-G2-2	R	۱/۷۷	۰/۶۴	۰/۹۴	۰/۶۷	
	میانگین			-	۰/۷۶	۱/۱۱	۰/۷۲
انحراف معیار			-	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۳	
[۳]	R1.25-L15	R	۳/۵۲	۰/۵۵	۰/۹۲	۰/۷۵	
	R1.25-L20	R	۳/۱۹	۰/۵۸	۰/۹۹	۰/۶۸	
	R2-L15	R	۳/۶	۰/۵۵	۰/۹۲	۰/۵۲	
	R2-L20	R	۳/۶۷	۰/۶۵	۱/۱۱	۰/۵۴	
	R1.25-L30	R	۲/۲۴	۰/۴۸	۰/۸۱	۰/۴۶	
	میانگین			-	۰/۵۶	۰/۹۵	۰/۵۹
انحراف معیار			-	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۱۲	
[۷]	G70z-A23	SC	۲/۵۴	۰/۶۲	۱/۰۵	۰/۴۰	
	G70z-A22	SC	۲/۴۰	۰/۵۸	۰/۹۷	۰/۳۷	
	میانگین			-	۰/۶۰	۱/۰۱	۰/۳۸
انحراف معیار			-	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۲	
کل	میانگین			-	۰/۷۰	۱/۰۵	۰/۶۰
	انحراف معیار			-	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰

W-SC=Wrapped – Sand Coated, SC=Sand Coated, R=Ribbed

آزمایش‌های موجود استفاده می‌شود. نوع توزیع، مقدار میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی مسأله در روند شبیه‌سازی دخیل هستند. تحلیل قابلیت اعتماد به کمک روش مونت‌کارلو هفت مرحله دارد: (۱) تعریف تابع حالت حدی، (۲) تعیین نوع توزیع و مقدار میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی، (۳) تولید مجموعه‌ای از ورودی‌های تصادفی (شبیه‌سازی)، (۴) ارزیابی تابع حالت حدی به کمک نتایج شبیه‌سازی، (۵) یافتن تعداد ورودی‌هایی که با تابع حالت حدی هم‌خوانی نداشته باشند، (۶) تکرار مراحل ۲ تا ۵ و ۷ یافتن احتمال شکست. احتمال شکست عبارت است از تعداد شبیه‌سازی‌هایی که با تابع حالت حدی هم‌خوانی ندارند تقسیم بر تعداد کل شبیه‌سازی‌ها.

همان‌طور که اشاره شد برای انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو، پس از تعریف تابع حالت حدی باید نوع توزیع و مقدار میانگین و انحراف معیار هر یک از متغیرهای تصادفی تعیین شوند. نوع توزیع و مقدار میانگین و انحراف معیار هر یک از متغیرهای

(۱) نتایج مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری مسلح به آرماتورهای FRP را دست بالا (حدود دو برابر) تخمین می‌زند. در جدول (۱)، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش‌های موجود [۳]، [۴]، [۷] و رابطه (۱) انجام شده است. در این جدول، میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی به مقادیر حاصل از رابطه (۱) به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۱۰ به دست آمده است. دیده می‌شود که این رابطه، مقاومت پیوستگی نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله را دست بالا تخمین می‌زند. بنابراین، می‌توان گفت استفاده از رابطه (۱) برای محاسبه مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP وصله‌شده بدون آرماتور جانبی وصله، قابل اعتماد نیست و در صورت استفاده از این رابطه، احتمال شکست پیوستگی زیاد است. برای کاهش احتمال شکست پیوستگی در رابطه (۱)، باید یک ضریب کاهش مقاومتی  $\phi_b$  در سمت راست این رابطه ضرب شود [۵]:

$$\frac{u}{0.083\sqrt{f'_c}} = \phi_b \frac{1}{\alpha} (4.0 + 0.3 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{L_d}) \quad (2)$$

تعیین مقدار  $\phi_b$  با هدف کاهش احتمال شکست پیوستگی فقط به کمک تئوری قابلیت اعتماد امکان‌پذیر است [۵].

## ۲-۱- تحلیل قابلیت اعتماد

در تئوری قابلیت اعتماد سازه‌ها، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو تنها روش شناخته‌شده‌ای است که به طور دقیق احتمال شکست،  $P_f$ ، یک سازه را صرف‌نظر از پیچیدگی سامانه سازه یا تابع حالت حدی تخمین می‌زند. یکی از مزایای این روش آن است که می‌توان از آن برای تولید برخی نتایج عددی بدون انجام آزمایش استفاده نمود. برای این کار از نتایج

آرماتور جانبی در طول وصله استفاده شد. برای نشان دادن اثر آرماتورگذاری جانبی دو نمونه محصور نشده نیز ساخته و آزمایش شد. جدول (۲) و شکل (۱) مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در هر یک از نمونه‌ها از دو آرماتور طولی کششی در قسمت پایین مقطع عرضی استفاده شد. این آرماتورها در قسمت میانی تیر وصله شدند. در این نمونه‌ها از آرماتورهای طولی کششی به سه قطر متفاوت ۱۰، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. ابعاد کلی مقطع عرضی تیرها  $150 \times 300$  میلی‌متر بود. در این نمونه‌ها از دو نوع آرماتور آج‌دار و ماسه‌پاشی شده استفاده شد. در قسمت بالایی مقطع عرضی دو آرماتور فشاری به قطر ۸ میلی‌متر قرار داده شد. در نواحی بدون وصله نمونه‌ها از آرماتورهای عرضی به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۸۰ میلی‌متر استفاده شد. فاصله آرماتورهای عرضی در ناحیه وصله نیز در جدول (۲) مشخص شده‌اند. آرماتورهای عرضی از فولاد AII با تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال انتخاب شدند. برای ساخت نمونه‌ها از دو نوع بتن با مقاومت‌های استوانه‌ای فشاری ۴۰ و ۷۰ مگاپاسکال استفاده شد. برای تعیین مقاومت فشاری هر یک از تیرهای نمونه، شش نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد  $150 \times 300$  میلی‌متر تهیه و در شرایط مشابه تیرهای نمونه عمل‌آوری شد. آرماتورهای طولی از الیاف شیشه (GFRP) ساخته شدند. مقاومت کششی نهایی و مدول الاستیسیته آرماتورها در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

### ۳-۲- دستگاه و روند آزمایش

دستگاه آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. هر یک از تیرها روی دو تکیه‌گاه ساده با دهانه ۲۰۰۰ میلی‌متری قرار

جدول ۲: مشخصات تیرهای نمونه

نمونه	آرماتور	$f'_c$ MPa	$d_b$ mm	$L$ mm	$S$ mm	$f_u$ MPa	$E_{frp}$ GPa			
B-1	R	۴۰	۱۶	۴۰۰	-	۱۰۰۰	۶۰			
B-2					۱۵۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-3					۱۰۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-4					۵۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-5		۴۰	۱۲	۴۰۰	۱۵۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-6					۱۰۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-7					۵۰	۱۰۰۰	۶۰			
B-8					۷۰	۱۲	۴۰۰	۱۵۰	۱۰۰۰	۶۰
B-9								۱۰۰	۱۰۰۰	۶۰
B-10								۵۰	۱۰۰۰	۶۰
B-11	SC	۴۰	۱۰	۱۸۰	-	۷۰۰	۳۷			
B-12					۸۰	۷۰۰	۳۷			
B-13					۲۲	۷۰۰	۳۷			

تصادفی را می‌توان به کمک نتایج بررسی سایر محققان از مراجع مختلف تعیین نمود. در این مقاله برای تعیین مقدار  $\phi_b$  از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. برای این منظور مقدار میانگین و انحراف معیار  $f'_c$  و  $C$  از روش داروین و همکاران [۵] و میانگین و انحراف معیار  $d_b$  و  $L_d$  از روش ژنگ و تیان [۱] تعیین شد و توزیع تمام متغیرهای تصادفی فوق از نوع نرمال در نظر گرفته شد [۱]، [۵].

برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد از ۱۶ نمونه آزمایشگاهی بدون آرماتور جانبی موجود در سایر مراجع [۳]، [۴]، [۷] استفاده شد. تمام این نمونه‌ها دارای شکل شکست شکافت بوده و از نمونه‌های با طول وصله زیاد و غیرعملی صرف‌نظر شد. برای هر یک از ۱۶ نمونه فوق، ۱۰۰۰ نمونه شبیه‌سازی شده به روش مونت‌کارلو تولید شد [۵]. به کمک نتایج شبیه‌سازی و با احتمال این که نسبت  $u_{test}/u_{Eq2}$  کمتر از یک (احتمال شکست) برابر با ۲٪ باشد [۲]، مقدار  $\phi_b$  برابر با ۰/۵۹ به دست آمد. با اعمال این ضریب رابطه (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{u}{0.083\sqrt{f'_c}} = \frac{1}{\alpha} \left( 2.36 + 0.177 \frac{C}{d_b} + 59 \frac{d_b}{L_d} \right) \quad (3)$$

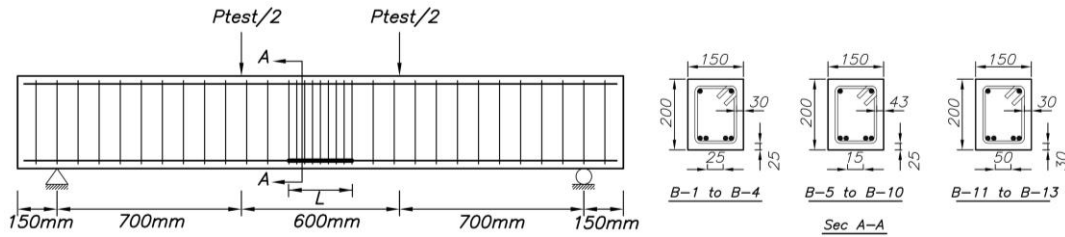
نویسنده دوم این مقاله با انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی بر روی نمونه‌های با طول پیوستگی کوتاه ساخته شده از آرماتورهای (GFRP) نشان داد که ضریب اثر آرماتور بالایی برابر با ۱/۳ است. در آیین‌نامه کانادا [۱۰] CAN/CSA-S6-00 نیز از ضریب آرماتور بالایی ۱/۳ استفاده شده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در رابطه (۳) از ضریب آرماتور بالایی ۱/۳ استفاده شود.

در جدول (۱) رابطه پیشنهادی (۳) با نتایج آزمایش، مقایسه شده است. در این جدول میانگین و انحراف معیار نسبت  $u_{test}/u_{Eq3}$  به ترتیب مقادیر ۱/۰۵ و ۰/۱۵ به دست آمده است. نتایج مقایسه رابطه (۳) با ضوابط آیین‌نامه‌ای [۲] ACI 440.1R-06 و CAN/CSA-S6-00 نشان می‌دهد (جدول ۱) که رابطه (۳) با دقت خوب و بهتر از ضوابط آیین‌نامه‌ای، مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP بدون آرماتور جانبی را پیش‌بینی می‌نماید.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی

در بخش آزمایشگاهی این پژوهش ۱۳ نمونه تیر بتن مسلح به آرماتورهای GFRP ساخته شد و تحت خمش چهارنقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. در ۱۱ نمونه از مجموع ۱۳ نمونه

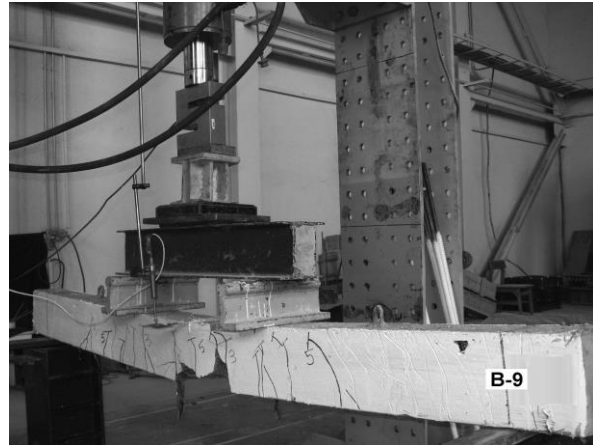


شکل ۱: ابعاد نمونه‌های تیری

آرماتورهای کششی در ناحیه وصله، در دو بخش جانبی و زیرین تیر همراه بود. ایجاد ترک‌های طولی در این دو بخش باعث ریختن بتن اطراف آرماتورها می‌شود (شکل ۳- الف). شکست این نمونه‌ها به طور ناگهانی و با صدای بلند همراه بود.

با کاهش فاصله آرماتورهای جانبی وصله در نمونه‌های B-7,4 و B-10 ترک‌های طولی فقط در قسمت زیرین تیر دیده شد. در این نمونه‌ها وجود آرماتور جانبی وصله علاوه بر این که باعث کند شدن رشد ترک‌ها می‌شود، از بروز ترک‌های جانبی طولی در راستای آرماتورهای وصله شده جلوگیری می‌نماید. در این نمونه‌ها پس از شکست، بتن اطراف آرماتور سر جایش باقی می‌ماند (شکل ۳- ب).

در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده به دلیل پایین بودن مدول الاستیسیته این آرماتورها نسبت به آرماتورهای آج‌دار، ترک‌های مقطع عمیق‌تر بود. همانطور که



شکل ۲: دستگاه آزمایش نمونه‌ها

گرفته و نیرو توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن به یک تیر فولادی صلب و سپس به صورت دو نیروی متمرکز به فاصله ۶۰۰ میلی‌متر، به تیر اصلی منتقل شد. نیروی اعمال شده توسط جک به وسیله یک نیروسنج که در حد فاصل جک و تیر صلب فولادی قرار داشت، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مقدار خیز، یک LVDT در نقطه وسط نصب شد. داده‌های خروجی از نیروسنج و LVDT توسط سامانه جمع‌آوری همزمان اطلاعات در گام‌های زمانی یک ثانیه توسط رایانه ثبت شد. بار به صورت نموی به نمونه اعمال شد که پس از هر نمو معادل دو تن، ترک‌های دیده شده روی سطح تیر علامت زده شدند.

#### ۴- نتایج آزمایش

##### ۴-۱- شکل شکست و توزیع ترک‌ها

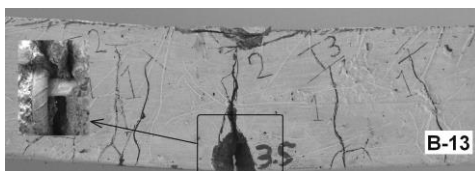
شکست تمام نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای آج‌دار و نمونه B-11 از نوع شکافت بود. در این نمونه‌ها دو نوع شکست شکافت دیده شد. در برخی نمونه‌ها مانند نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله B-1 و B-11 یا نمونه‌های ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و با آرماتورهای جانبی با فاصله زیاد (B-9, B-10) شکست نمونه‌ها با بوجود آمدن ترک‌های طولی در راستای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: نوع شکست نمونه‌های تیری الف) شکست شکافت در دو بخش جانبی و زیرین در نمونه B-8، ب) شکست شکافت در بخش زیرین در نمونه B-7 و ج) شکست بیرون‌کشیدگی در نمونه B-13

جدول ۳: نتایج آزمایش

نمونه	آرماتور	$f'_c$ MPa	شکست	$P_{test}$ KN	$M_{test}$ KN.m	$u_{test}$ MPa
B-1	R	۴۱/۲	Splittin g	۳۷/۵۹	۱۳/۱۶	۲/۱۸
B-2			Splittin g	۵۵/۲۶	۱۹/۳۴	۳/۲۰
B-3			Splittin g	۷۲/۱۸	۲۵/۲۶	۴/۱۸
B-4			Splittin g	۸۹/۴۷	۳۱/۳۱	۵/۱۸
B-5		۴۱/۲	Splittin g	۵۶/۵۱	۱۹/۷۸	۴/۳۱
B-6			Splittin g	۶۷/۴۲	۲۳/۶۰	۵/۱۴
B-7			Splittin g	۸۱/۵۸	۲۸/۵۵	۶/۲۲
B-8		۷۲	Splittin g	۵۴/۸۸	۱۹/۲۱	۴/۱۹
B-9			Splittin g	۶۷/۴۱	۲۳/۶۰	۵/۱۴
B-10			Splittin g	۸۶/۹۷	۳۰/۴۴	۶/۶۴
B-11	SC	۴۰	Splittin g	۳۲/۳۱	۱۱/۳۱	۶/۷۳
B-12			Pullout	۳۲/۴۸	۱۱/۳۷	۶/۷۷
B-13		۳۸	Pullout	۳۴/۹۶	۱۲/۲۴	۷/۲۹

مگاپاسکال ساخته شده‌اند. تنها متغیر این نمونه‌ها فاصله آرماتورگذاری جانبی وصله است به طوری که نمونه B-1 بدون آرماتور جانبی وصله و فاصله آرماتور جانبی وصله در سایر نمونه‌ها از ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر تغییر می‌نماید. مقاومت پیوستگی هر یک از این نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) و جدول (۳) می‌توان گفت با افزایش مقدار آرماتور جانبی وصله، نیرو و مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد به طوری که مقاومت پیوستگی نمونه B-4 حدود ۲/۴ برابر مقاومت پیوستگی نمونه بدون آرماتور جانبی B-1 است.

اثر آرماتورگذاری جانبی با مقایسه نمونه‌های B-5، B-6 و B-7 در شکل (۵) و نمونه‌های با مقاومت بالای B-8، B-9 و B-10 در شکل (۶) قابل بررسی است. دیده می‌شود با افزایش آرماتور جانبی وصله نیروی پیوستگی و مقاومت پیوستگی (جدول ۳) این نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. اثر آرماتورگذاری جانبی وصله در آرماتورهای ماسه‌پاشی شده را می‌توان با مقایسه نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های B-11، B-12 و B-13 در شکل (۷) بررسی نمود. مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. دیده می‌شود در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده، آرماتور جانبی وصله اثر چندانی بر مقاومت و نیروی پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار ندارد.

داروین و همکاران [۵] نشان دادند اثر آرماتورگذاری جانبی وصله آرماتورهای فولادی با سطح آج زیاد، بیشتر از اثر آنها بر آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج کم است. بر این اساس می‌توان اختلاف بین نمونه‌های آج‌دار و ماسه‌پاشی شده را به اثر

اشاره شد، شکست نمونه B-11 که از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده ساخته شده و بدون آرماتور جانبی وصله است، از نوع شکافت بود. شکست این نمونه با ترک‌خوردگی طولی در راستای آرماتورهای وصله‌شده در دو بخش زیرین و جانبی همراه بود. در حالی که در نمونه‌های B-12 و B-13 شکست بیرون‌کشیدگی اتفاق افتاد. این دو نمونه مشابه نمونه بدون آرماتور جانبی وصله B-11 بود و فقط در آنها از آرماتور جانبی در وصله استفاده شد. در این دو نمونه یک ترک ناگهانی و عریض در قسمت انتهایی وصله ایجاد شد (شکل ۳-ج). می‌توان گفت در نمونه‌های مسلح به آرماتورهای ماسه‌پاشی شده حضور آرماتور جانبی وصله باعث تغییر حالت شکست از شکافت بتن به بیرون‌کشیدگی آرماتور شده است.

#### ۴-۲- مقاومت پیوستگی

مقاومت پیوستگی را می‌توان با استفاده از تنش ایجاد شده در آرماتور تعیین نمود. تنش آرماتور را می‌توان بر اساس روابط الاستو- پلاستیک مقاطع خمشی بتن مسلح بدست آورد. این مسأله پیش‌تر توسط سایر محققان استفاده شده است [۳]، [۴]، [۷]، [۱۱]:

$$f_s = \frac{M}{A_b j d} \quad (۴)$$

در این رابطه  $M$  لنگر نهایی شکست بوده و برابر است با  $0.17 P_{test} A_b$  سطح مقطع کل آرماتورهای کششی وصله شده بر حسب میلی‌متر مربع و  $j d$  بازوی لنگر مقاوم است. برای محاسبه میانگین تنش پیوستگی،  $u_{test}$  نیروی کلی موجودآمده در آرماتور FRP،  $A_b \times f_s$  بر سطح تماس آرماتور با بتن در طول وصله ( $\pi \times d_b \times L$ ) به صورت زیر تقسیم می‌شود:

$$u_{test} = \frac{A_b f_s}{\pi d_b L} \quad (۵)$$

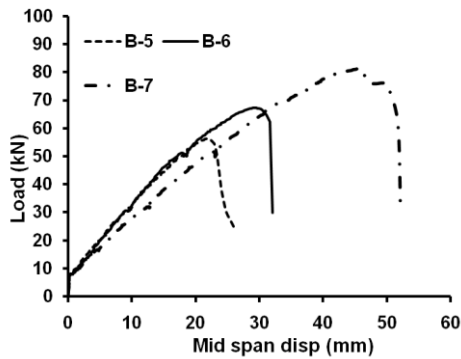
در این رابطه  $f_s$  تنش آرماتور بر حسب MPa است که به کمک رابطه (۴) تعیین می‌شود.  $d_b$  قطر آرماتور طولی بر حسب mm،  $L$  طول پیوستگی بر حسب mm و  $A_b$  سطح مقطع یک آرماتور کششی وصله شده بر حسب  $\text{mm}^2$  است. مقدار تنش پیوستگی محاسبه‌شده به کمک روابط فوق،  $u_{test}$  در جدول (۳) ارائه شده است.

#### ۴-۳- اثر آرماتور جانبی

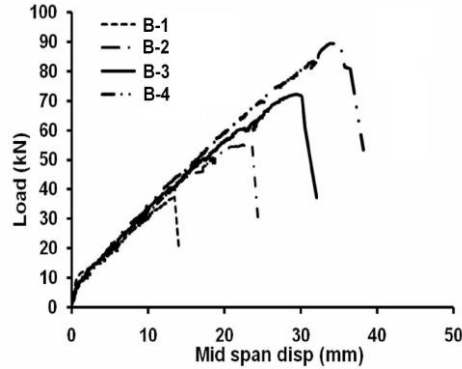
نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های B-1، B-2، B-3 و B-4 در شکل (۴) نشان داده شده است. این نمونه‌ها از آرماتورهای آج‌دار به قطر ۱۶ میلی‌متر و بتن با مقاومت ۴۰

که در این رابطه  $u_c$  مقاومت پیوستگی در حالت بدون آرماتور جانبی و  $u_{tr}$  مقاومت پیوستگی حاصل از آرماتورگذاری جانبی است. اورنگان و همکاران [۸] نشان دادند  $u_{tr}$  تابعی از سطح

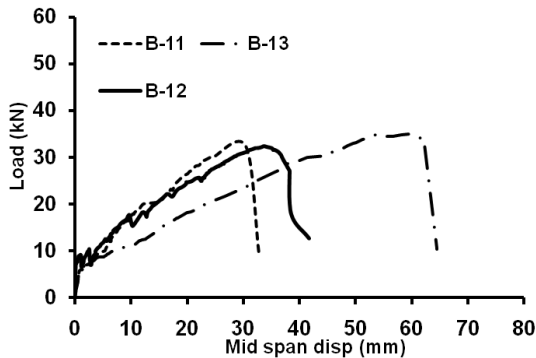
مشخصات سطح ظاهری آرماتور نسبت داد به طوری که اثر سطح نسبی آج سبب می‌شود آرماتورگذاری جانبی وصله باعث افزایش مقاومت پیوستگی نمونه‌های آج‌دار شود. در حالی که در نمونه‌های ماسه‌پاشی‌شده، آرماتور جانبی



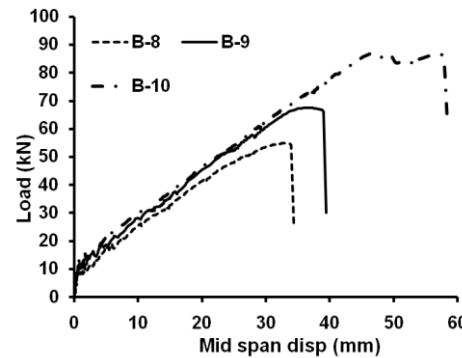
شکل ۵: نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های B-5 تا B-7



شکل ۴: نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های B-1 تا B-4



شکل ۷: نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های B-11 تا B-13



شکل ۶: نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های B-8 تا B-10

مقطع آرماتور جانبی  $A_{tr}$ ، مقاومت جاری شدن آرماتور جانبی  $f_{yt}$ ، فاصله آرماتورهای جانبی  $S$  و قطر آرماتور کششی  $d_b$  است، به‌طوریکه:

$$u_{tr} = \beta \frac{A_{tr} f_{yt}}{S d_b} \quad (7)$$

آلی [۷] نشان داد این رابطه در مورد آرماتورهای FRP نیز صادق است. از جایگزینی روابط (۷) و (۳) در رابطه (۶) رابطه مقاومت پیوستگی عبارت خواهد بود با:

$$u = \frac{1}{\alpha} \left[ 0.083 \sqrt{f'_c} (2.36 + 0.177 \frac{C}{d_b} + 59 \frac{d_b}{L_d} + \beta \frac{A_{tr} f_{yt}}{S d_b}) \right] \quad (8)$$

مشابه روش ارائه شده در بخش (۲-۱)، برای تعیین ضریب  $\beta$  از روش مونت‌کارلو استفاده شد. بدین منظور از ۲۱ نمونه آزمایشگاهی دارای آرماتور جانبی وصله جمع‌آوری شده از مراجع [۳]، [۷]، [۱۱] و ۹ نمونه آزمایش‌شده در این مقاله استفاده شد. مشخصات سطح ظاهری این نمونه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. مشابه قبل، از آزمایش‌هایی استفاده شد که در آنها حالت

وصله اثر چندانی بر مقاومت پیوستگی ندارد.

## ۵- رابطه پیشنهادی

با توجه به مطالب ارائه شده در رابطه با اثر آرماتورگذاری جانبی وصله بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای FRP، می‌توان گفت که آرماتورگذاری جانبی وصله یکی از عوامل مهمی است که اثر آن با توجه به مشخصات سطح ظاهری آرماتور باید در محاسبات مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار در نظر گرفته شود. برای وارد کردن اثر آرماتورگذاری جانبی وصله در رابطه پیشنهادی (۳) از روشی مشابه اورنگان و همکاران [۸] استفاده شد. اورنگان و همکاران [۸] نشان دادند مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای فولادی دارای آرماتور جانبی وصله را می‌توان به صورت حاصل جمع مقاومت پیوستگی در حالت بدون آرماتور جانبی و مقاومت حاصل از آرماتور جانبی در نظر گرفت:

$$u = u_c + u_{tr} \quad (6)$$

## ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف از این مقاله ارائه رابطه‌ای برای تعیین مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای GFRP است. در این پژوهش ابتدا به کمک تئوری قابلیت اعتماد سازه‌ها و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو رابطه‌ای برای تعیین

جدول ۴: مقایسه رابطه پیشنهادی با ضوابط آیین‌نامه‌ای در نمونه‌های دارای آرماتور جانبی

ردیف	تیر	آرماتور	$U_{test}$	$U_{test}/U_{Eq1}$	$U_{test}/U_{Eq9}$	$U_{test}/U_{CAN}$	
[۷]	G50N-A8	SC	۳/۶۰	۰/۷۹	۱/۱۳	۰/۵۸	
	G70N-A9	SC	۳/۲۸	۰/۸۰	۱/۱۲	۰/۵۱	
	G80N-A10	SC	۳/۳۰	۰/۸۷	۱/۲۰	۰/۵۳	
	G110N-A11	SC	۲/۵۶	۰/۷۴	۱/۰۱	۰/۴۱	
	G70L-A25	SC	۲/۹۵	۰/۷۲	۱/۱۱	۰/۴۶	
	G70N-A26	SC	۳/۲۸	۰/۸۰	۱/۱۲	۰/۵۱	
	G70M-A27	SC	۳/۷۹	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۵۸	
	G70N-KW28	SC	۲/۸۳	۰/۷۰	۰/۹۷	۰/۵۸	
	G70N-FX29	SC	۳/۱۸	۰/۸۱	۱/۱۲	۰/۶۷	
	G70N-KX30	SC	۳/۲۸	۰/۸۰	۱/۱۲	۰/۵۱	
	G70N-PX31	SC	۲/۹۱	۰/۷۰	۰/۹۷	۰/۴۵	
	G70N-KY32	SC	۳/۶۱	۰/۸۹	۱/۲۴	۰/۵۷	
	G70N-KY33	SC	۳/۲۲	۰/۷۷	۱/۰۸	۰/۴۹	
میانگین			-	۰/۷۹	۱/۰۹	۰/۵۳	
انحراف معیار			-	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۷	
[۱۱]	A460-1	HW	۳/۷۳	۰/۹۱	۱/۲۸	۰/۵۹	
	A460-2	HW	۳/۸۳	۰/۹۴	۱/۳۱	۰/۶۱	
	A540-1	HW	۲/۵۲	۰/۶۵	۰/۹۰	۰/۴۰	
	A540-2	HW	۳/۳۵	۰/۸۷	۱/۲۰	۰/۵۳	
	B-675-1	HW	۳/۱۱	۰/۸۲	۱/۱۷	۰/۴۹	
	B-675-2	HW	۳/۱۴	۰/۸۲	۱/۱۸	۰/۵۰	
	B-870-1	HW	۲/۴۴	۰/۶۹	۰/۹۸	۰/۳۸	
	B-870-2	HW	۲/۶۴	۰/۷۵	۱/۰۶	۰/۴۲	
	میانگین			-	۰/۸۱	۱/۱۴	۰/۴۹
	انحراف معیار			-	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۰۹
[۳]	R1.25L20-C	G	۴/۱۸	۰/۷۴	۱/۰۱	۰/۷۹	
نویسنده‌گان	B-2	R	۳/۲۰	۰/۷۲	۰/۹۵	۰/۹۳	
	B-3	R	۴/۱۸	۰/۹۴	۱/۱۲	۱/۱۸	
	B-4	R	۵/۱۸	۱/۱۶	۱/۰۷	۱/۳۶	
	B-5	R	۴/۳۱	۱/۱۱	۱/۳۱	۱/۳۹	
	B-6	R	۵/۱۴	۱/۳۲	۱/۳۶	۱/۵۹	
	B-7	R	۶/۲۲	۱/۶۰	۱/۱۹	۱/۷۴	
	B-8	R	۴/۱۹	۰/۸۱	۰/۹۷	۱/۰۲	
	B-9	R	۵/۱۴	۱/۰۰	۱/۰۳	۱/۲۱	
	B-10	R	۶/۶۴	۱/۲۹	۰/۹۶	۱/۴۱	
	میانگین			-	۱/۱۰	۱/۱۱	۱/۳۱
انحراف معیار			-	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۲۶	
کل	میانگین			-	۰/۸۸	۱/۱۰	۰/۷۵
	انحراف معیار			-	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۴۰

NOTE: SC=Sand Coated, HW=Helical Wrapped, G=Grooved, R=Ribbed

مقاومت پیوستگی نمونه‌های بدون آرماتور جانبی به دست آمد.

شکست از نوع شکافت بود و از نمونه‌های دارای طول وصله زیاد چشم‌پوشی شد.

برای هر یک از ۳۰ نمونه ۱۰۰۰ نمونه شبیه‌سازی شده به روش مونت‌کارلو تولید شد. برای انجام شبیه‌سازی، نوع توزیع متغیرهای تصادفی  $A_{tr}$  و  $S$  نرمال در نظر گرفته شده‌اند [۵]. میانگین و انحراف معیار  $A_{tr}$  و  $S$ ، به ترتیب، از مراجع [۱۳] و [۵] تعیین شدند. علاوه بر این، توزیع  $f_{yt}$  از نوع لوگ‌نرمال [۱۲]، [۱۳] و میانگین و انحراف معیار آن از مرجع [۱۲] تعیین شد. با انجام تحلیل قابلیت اعتماد و با فرض این احتمال که نسبت  $U_{test}/U_{pre}$  کمتر از یک (احتمال شکست)، برابر با ۰/۲۲٪ شود [۲] مقدار  $\beta$  برای نمونه‌های هراجیلی و ابونیاچ [۳] برابر با ۰/۰۸، برای نمونه‌های آلی [۷]، برابر با ۰/۱۷، برای نمونه‌های تیقارت [۱۱]، برابر با ۰/۰۳ و برای نمونه‌های نویسندگان این مقاله، برابر با ۰/۲۱ به دست آمد. بنابراین می‌توان رابطه (۸) را بسته به مشخصات سطح ظاهری آرماتور به صورت رابطه (۹) بازنویسی نمود:

$$u = \frac{0.083}{\alpha} \sqrt{f'_c} (2.36 + 0.177 \frac{C}{d_b} + 59 \frac{d_b}{L_u} + 0.03 f_R \frac{A_{tr} f_{yt}}{s d_b}) \quad (9)$$

که مقدار  $f_R$  در نمونه‌های آج‌دار این برنامه آزمایشگاهی ۰/۷۰، در نمونه‌های ماسه‌پاشی شده آلی ۰/۶۷، در نمونه شیاردار هراجیلی ۰/۶۷ و در نمونه‌های با الیاف دورپیچ تیقارت ۱/۰۰ است.

نتایج مقایسه بین رابطه پیشنهادی (۹) و ضوابط آیین‌نامه‌ای [۲] ACI 440.1R-06 و [۱۰] CAN/CSA-S6-00 در نمونه‌های دارای آرماتور جانبی وصله در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر میانگین و انحراف معیار نسبت  $U_{test}/U_{Eq9}$  در رابطه پیشنهادی به ترتیب مقادیر ۱/۱۰ و ۰/۱۲ به دست آمد. مقایسه مقادیر میانگین و انحراف معیار رابطه پیشنهادی (۹) با ضوابط آیین‌نامه‌ای نشان داد، این رابطه با دقت خوب و بهتر از ضوابط آیین‌نامه‌ای [۲] ACI 440.1R-06 و [۱۰] CAN/CSA-S6-00 مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP را پیش‌بینی می‌نماید.

در جدول (۵) نسبت تنش پیوستگی آزمایشگاهی به محاسباتی حاصل از رابطه (۹) و نسبت تنش پیوستگی به محاسباتی حاصل از رابطه (۱) و نسبت تنش پیوستگی آزمایشگاهی به محاسباتی حاصل از آیین‌نامه کانادا، آمده است. میانگین نسبت  $U_{test}/U_{Eq9}$  در تمام نمونه‌ها برابر با ۱/۱۰ و انحراف معیار ۰/۱۲ است. این مقادیر نشان می‌دهند که رابطه پیشنهادی با دقت خوبی و بهتر از ضوابط آیین‌نامه‌ای، مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP را پیش‌بینی می‌نماید.



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.

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.

Darwin, D., Idun, E.K., Zou, J., and Tholen, M.L. ,“Reliability – Based Strength Reduction Factor for Bond”, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 4, pp. 434-443, 1998.

Wambeke, B., and Shield, C. ,“Development Length of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in Concrete”, *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, pp. 11-17, 2006.

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.

Orangun, C.O., Jirsa, J.O., and Breen, J.E.,“Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices”, *ACI JOURNAL*, Proceedings Vol. 74, No. 3, pp. 114-122, 1977.

Mosley, C.P. ,“Bond Performance of Fiber Reinforcing Plastic (FRP) Reinforcement in Concrete”, MS. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Ind, 2002.

CAN/CSA-S6-00 ,“Canadian Highway Bridge Design Code”, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, pp. 192, 2000.

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, 1999.

Val, D.V., and Chernin, L. ,“Serviceability Reliability of Reinforced Concrete Beams with Corroded Reinforcement”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 8, pp. 896 – 905, 2009.

سپس با انجام ۱۳ آزمایش تیری وصله‌دار، نشان داده شد که آرماتور جانبی عامل مهمی در پیوستگی به شمار می‌رود و اثر آن باید در محاسبات مقاومت پیوستگی در نظر گرفته شود. بر این اساس و به کمک روش مونت کارلو و نتایج آزمایش، رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت پیوستگی در نمونه‌های تیری وصله‌دار ارائه شد. بر اساس این مطالعه نتایج زیر حاصل شد:

[۳] (۱) آرماتورگذاری جانبی وصله در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده باعث تغییر شکل شکست از حالت شکافت به بیرون کشیدگی می‌شود. در نمونه‌های دارای شکل شکست بیرون کشیدگی، لغزش آرماتورها از درون بتن باعث افزایش شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون وصله می‌شود. علاوه بر این لغزش آرماتور در نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای GFRP ماسه‌پاشی شده باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های ساخته شده از آرماتورهای آج‌دار می‌شود. در نمونه‌های آج‌دار حضور آرماتورگذاری جانبی وصله باعث محدود شدن ترک‌های شکافت به قسمت زیرین تیر می‌شود.

[۴] (۲) اثر آرماتورگذاری جانبی بر مقاومت پیوستگی نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای GFRP، به مشخصات سطح ظاهری آرماتور وابسته است. به طوری که آرماتور جانبی وصله در تیرهای وصله‌دار مسلح به آرماتورهای GFRP آج‌دار باعث افزایش مقاومت پیوستگی می‌شود و آرماتورگذاری جانبی در تیرهای مسلح به آرماتورهای ماسه‌پاشی شده تغییر قابل توجهی در مقاومت پیوستگی ایجاد نمی‌نماید.

[۵] (۳) در رابطه پیشنهادی برای محاسبه مقاومت پیوستگی وصله آرماتورهای GFRP اثر آرماتورگذاری جانبی وصله در نظر گرفته شده است. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی حاصل از نتایج آزمایش به مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی و آیین‌نامه‌ها محاسبه شده است. مقدار میانگین حاصل از رابطه پیشنهادی ۱/۱۰ با انحراف معیار ۰/۱۲ به دست آمده است. رابطه پیشنهادی علاوه بر این که همبستگی خوبی با نتایج آزمایش موجود دارد، نسبت به سایر روابط نیز جواب‌های به مراتب بهتری ارائه می‌نماید.

## ۷- مراجع

[۱] He, Z., and Tian, G., “Reliability Based Bond Design for GFRP-Reinforced Concrete”, *Material and Structures*, in press, 2011.

[۲] American Concrete Institute (ACI). ,“Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars”, ACI440.1R-06, Farmington Hills, Mich, 2006.

Lee, J.O., Yang, Y.S., and Ruy, W.S. ,“A [۱۳]  
Comparative Study on Reliability - Index and  
Target - Performance-Based Probabilistic  
Structural Design Optimization”, Computers  
and Structures, Vol. 80, pp. 257 – 269, 2002.