

ویژه نامه نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

رابطه سازی کرنش کامپوزیت های نوین الیافی در آزمون های خمشی

هاشم جهانگیر^۱، محمدرضا اصفهانی^{۲*}

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

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

پلیمرهای تقویت شده با الیاف، FRP، به علت دارا بودن ویژگی های مکانیکی مناسب، نصبی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، معمول ترین گونه از کامپوزیت ها هستند که برای تقویت و بهسازی کاربری های سازه ای استفاده می شوند. در کنار این برتری ها، مقاومت کم در برابر آتش، ناتوانی در اعمال بر روی سطح های مرطوب و در دماهای پایین را می توان از کاستی های کامپوزیت های FRP دانست. از این رو، کامپوزیت های نوین پایه سیمانی تقویت شده با الیاف با ویژگی ها و برتری های خود نسبت به کامپوزیت های FRP، در سال های اخیر جایگزینی مناسب برای آن ها به حساب می آیند. در این مقاله، در راستای شناخت بیشتر رفتار این کامپوزیت ها، رابطه ای بین کارایی نمونه های تقویت شده به کمک این کامپوزیت ها در آزمون خمشی و نتیجه های آزمون برشی به دست آمد. برای این منظور، نتیجه های آزمون خمشی سه نقطه ای چندین نمونه تیر بتن آرمه ی تقویت شده با یک لایه از کامپوزیت های نوین الیافی به کمک تحلیل مقطع واریسی شدند و رابطه ای برای محاسبه ی کرنش الیاف در آن ها پیشنهاد شد. از طرفی، کرنش های الیاف در نمونه های مختلف تقویت شده با کامپوزیت های مشابه در آزمون های برش مستقیم محاسبه و اندازه گیری شد. مقایسه ی نتیجه ها به دست آمده از رابطه ی پیشنهادی در آزمون خمشی با نتیجه های آزمون برش مستقیم نشان می دهند که رابطه ی پیشنهادی به خوبی کرنش الیاف را پیش بینی می کند.

کلمات کلیدی: آزمون خمشی، آزمون برش مستقیم، کامپوزیت های پایه سیمانی تقویت شده با الیاف، تحلیل مقطع، کرنش الیاف.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.91828.1255	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.91828.1255	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۷/۲۵	۱۳۹۶/۰۴/۱۸
محمد رضا اصفهانی					*نویسنده مسئول:	
esfahani@um.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Strain of newly – developed composites relationship in flexural tests

Hashem Jahangir¹, Mohammad Reza Esfahani^{2*}

1- Ph.D. Student of structural engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Extending service life and preventing demolition of existing structures are the primary goals of structural strengthening and rehabilitation. Fiber-reinforced polymer (FRP) composites have been the most common type of composite in the realm of structural strengthening applications. In recent years, as a new type of composite, epoxy is replaced by an inorganic matrix, named fiber reinforced cementitious mortar (FRCM), and have attracted a great deal of interest among researchers. Focusing of these kind of novel composites, this paper tries to find a connection between FRCM composites behaviour, as their maximum fiber strain, in flexural and direct shear tests. To achieve this goal, a cross section analysis of previous research works on strengthened RC beams with one layer of composites was conducted and the maximum strain of the fibers was obtained. Calculated fiber strains in flexural strengthening specimens compared with corresponding measured maximum fiber strains in direct shear test specimens. Comparison of results show that the average of maximum fiber strain obtained from flexural specimens is in good agreement with corresponding one measured in direct shear test specimens. Consequently, maximum fiber strains could be designated as the lost link between flexural and direct shear tests as two separated part of a chain..

ARTICLE INFO

Received: 09/07/2017

Revised: 17/10/2017

Accepted: 24/10/2017

Keywords:

*Flexural Test
Direct Shear Test
FRCM Composites
Section Analysis
Fiber Strain*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.91828.1255

*Corresponding author: Mohammad Reza Esfahani.

Email address: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

سامانه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف را می‌توان یکی از مهم‌ترین سامانه‌ها در بهبود رفتار سازه‌ها در برابر بارهای وارد بر آن‌ها دانست که علاوه بر آن، به پیشبرد هدف‌های مقاوم‌سازی و بهسازی کمک می‌کنند. پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، FRP^۱، معمول‌ترین گونه از سامانه‌های کامپوزیتی هستند که برای تقویت و بهسازی کاربری‌های سازه‌ای استفاده می‌شوند. پایه‌آی کامپوزیت‌های FRP، چسبی^۲ از جنس مواد آلی^۳، به‌طور ویژه اپوکسی^۴، است که به کمک الیافی از جنس شیشه، کربن، آرامید^۵ یا بازالت^۶ تقویت می‌شوند. وزن کم، سختی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری، سرعت بالا در نصب و تغییرهای هندسی اندک را می‌توان از برتری‌های مقاوم‌سازی به کمک سامانه‌های FRP دانست [۱]. با وجود این برتری‌ها، کاستی‌هایی این سامانه‌ها شامل، مقاومت کم در برابر آتش و قابلیت انتقال گرمایی اندک به علت جنس پلیمری بخش پایه، ناتوانی در اعمال بر روی سطوح‌های مرطوب و در دماهای پایین، خطر مسمویت سمی برای افراد اجرا کننده و توانایی اندک در نفوذپذیری بخارها [۲]، پژوهش‌گران را بر آن داشت تا به دنبال جایگزینی برای مواد مرکب FRP باشند. استفاده از مواد مرکب با پایه‌ای از جنس مواد معدنی به عنوان جایگزین مواد آلی در پایه‌ی پلیمری مواد مرکب FRP، راه‌حل پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بود. از این رو، مواد مرکب با پایه‌ی سیمانی و در نتیجه کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف (FRCM)^۸، معرفی شدند [۳]. در کامپوزیت‌های FRCM، الیاف به‌طور معمول در هم تنیده هستند و از مواد معدنی (غیرآلی)^۹ به‌جای چسب اپوکسی به عنوان پایه استفاده می‌شود. مواد معدنی به علت ویژگی‌ها و توانایی‌های خود شامل استقامت حرارتی بالا [۴]، مقاومت در برابر اشعه‌های فرابنفش، ایجاد تشعشع‌های اندک هنگام تولید و نصب [۵]، داشتن تجربه‌های مناسبی در مورد استفاده درست از آن‌ها، می‌توانند به عنوان پایه‌ی سامانه‌های FRCM مورد استفاده قرار گیرند.

الیافی که در کامپوزیت‌های FRCM به کار می‌روند شامل کربن، شیشه، فولاد و PBO^{۱۰} هستند. الگوهای این الیاف به‌هم تنیده^{۱۱} می‌تواند در قالب بافت پارچه‌ای یک‌سوی^{۱۲} و دوسوی^{۱۳} دسته‌بندی می‌شوند تا کارایی و میزان پیوستگی^{۱۴} بین پایه‌ی سیمانی و الیاف را افزایش دهند. کارایی گونه‌های متفاوت الیاف در پژوهش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. الیاف کربنی در پژوهش‌های Wiberg [۶]، Pareek و همکاران [۷]، Taljsten و Blanksvard [۸]، Triantafillou [۹]، Hashemi و Al-Mahaidi [۱۰]، D'Ambrisi و همکاران [۱۱]، Napoli و همکاران [۱۲]، Tetta و همکاران [۱۳]، D'Antino و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. الیاف PBO نیز در پژوهش‌های Bisby و همکاران [۴]، Ombres [۱۵ و ۱۶]، Loreto و همکاران [۱۷]، Babaeidarabad و همکاران [۱۸]، Tzoura و همکاران [۱۹]، و D'Antino و همکاران [۱۴] مطالعه شده‌اند. Elsanadedy و همکارانش [۲۰] و Santandrea و همکاران [۲۱] الیاف بازالت را مورد ارزیابی قرار دادند و الیاف شیشه‌ای، در پژوهش Bruckner و همکاران [۲۲]، Koutas و همکاران [۲۳]، بررسی شده‌اند. مقایسه‌ای بین سامانه‌های مختلف FRCM با الیاف گوناگون در گزارش پژوهش‌های Weiland و همکارانش [۲۴] و پژوهش Libreros و همکارانش [۲۵] و D'Antino و همکارانش [۱۴] انجام شده است.

ویژگی‌های فراوان و پدیده‌های مختلفی که در رفتار کامپوزیت‌های FRCM نقش دارند، ساز و کار انتقال تنش سطحی در آن‌ها پیچیده کرده است و هنوز شناخت کامل و یگانه‌ای از این کامپوزیت‌ها در دسترس نیست. ارزیابی کارایی کامپوزیت‌های FRCM در برابر نیروهای خمشی به شناخت رفتار آن‌ها کمک می‌کند. آزمایش بر روی تیرهای تمام‌مقیاس در گذشته و هم‌اکنون، آزمون‌های بهینه برای

¹ Fiber Reinforced polymers

² Matrix

³ Resin

⁴ Organic

⁵ Epoxy

⁶ Aramid

⁷ Basalt

⁸ Fiber reinforced cementitious matrix

⁹ Inorganic Materials

¹⁰ Polyparaphenylene benzobisoxazole

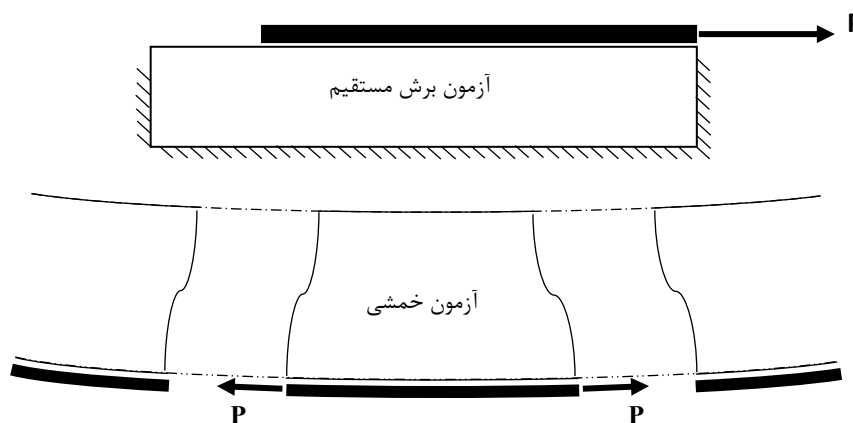
¹¹ Bundled

¹² Unidirectional

¹³ Bidirectional

¹⁴ Bond

ارزیابی ویژگی‌های پیوستگی بتن - FRP بوده‌اند [۲۵ - ۲۷]. اگرچه، هزینه‌های بالای دستگاه آزمایش و پیچیدگی رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده که شامل تقسیم نیرو بین میلگردها و لایه‌های خارجی FRP است، در کنار رفتار شبه شکننده بتن و توانایی اندک در پیش‌بینی الگوی ترک‌های ایجاد شده در تیر، بسیاری از پژوهش‌گران را واداشته تا دستگاه آزمون تک کاره‌ای^{۱۵} برای ارزیابی جداسازی بتن و کامپوزیت‌های FRP توسعه دهند. Ritchie و همکاران [۲۸]، Sharif و همکاران [۲۹]، Arduini و همکارانش [۳۰] از اولین پژوهش‌گرانی بودند که به مطالعه‌ی تجربی و آزمایشگاهی بر روی پدیده‌ی جداسازی تیرها پرداختند. Chajes و همکاران [۳۱]، Taljsten [۳۲] و Bizindavvi و Neale [۳۳] نخستین کسانی بودند که از دستگاه آزمایش برشی تک‌لبه^{۱۶} برای ارزیابی چگونگی انتقال تنش بین بتن و FRP بهره جستند. Chen و Teng [۳۴] در پژوهش خود رایج‌ترین دستگاه‌های آزمون برش مستقیم را گزارش کرده‌اند. در دهه‌ی اخیر، برخی از این دستگاه‌های آزمایش محبوبیت بیشتری یافته‌اند [۳۵ - ۳۸]. پژوهش‌گران هنوز هم بر سر تفاوت توانایی دستگاه‌های مختلف آزمایش در تعیین جداسازی در تیرها بحث می‌کنند. نشان داده شده است که دستگاه‌های آزمایش برشی تک لبه و دولبه^{۱۷} پدیده‌ی جداسازی را بهتر نمایان می‌کنند. از این دستگاه‌های آزمایش برای کامپوزیت‌های FRM نیز استفاده شده است. شکل ۱ در حالت کلی تفاوت رفتار نمونه در آزمون‌های برش مستقیم و آزمون خمشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تفاوت باربری نمونه‌ها در آزمون‌های برش مستقیم و آزمون خمشی

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در آزمون‌های برش مستقیم، بار به‌صورت تدریجی به سامانه‌ی کامپوزیتی اعمال می‌شود و تا جداسازی آن از نمونه ادامه می‌یابد. از طرف دیگر، در آزمون‌های خمشی، سامانه‌های کامپوزیتی بین ترک‌های متوالی خمشی زیر بار برشی قرار می‌گیرند. در این آزمون‌ها در اثر انحنای مود شکست می‌تواند متفاوت از آزمون‌های برش مستقیم باشد. هم‌چنین، توالی ترک‌ها و فاصله‌ی آن‌ها می‌تواند کارایی کامپوزیت‌ها را در این آزمون تغییر دهد.

با وجود پیچیده‌گی رفتار شکست در بهسازی المان‌های بتن آرمه به کمک کامپوزیت‌های FRM، بیشتر روش‌های طراحی موجود فقط به تعریفی از تنش یا کرنش موثر الیاف نیاز دارند که نشان‌دهنده‌ی آستانه‌ای برای از دست رفتن پیوستگی بین الیاف و زمینه‌ی سیمانی یا بین زمینه‌ی سیمانی و زیرلایه‌ی بتنی می‌باشد. در مورد کامپوزیت‌های FRP، رابطه‌های فراوانی برای دست‌یابی به کرنش موثر در آزمون‌های خمشی ارائه شده است [۳۹]، در حالی که نتیجه‌ها نشان می‌دهند، به علت تفاوت رفتاری کامپوزیت‌های FRP و FRM، رابطه‌های پیشنهادی برای کامپوزیت‌های FRP نمی‌تواند پاسخ مناسبی برای کامپوزیت‌های FRM نیز در بر داشته باشد [۲۷]. برخی از روش‌های طراحی در پژوهش‌های Wiberg [۶]، Curbach و همکاران [۴۰]، Ombres و همکاران [۴۱] در بهسازی خمشی مطرح شده‌اند، ولی هیچ‌کدام از آن‌ها به رابطه‌ای یکتا برای محاسبه‌ی کرنش موثر الیاف در نمونه‌های خمشی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRM دست نیافته‌اند. در حالت کلی،

¹⁵ Ad hoc

¹⁶ Single-lap shear test

¹⁷ Double-lap shear test

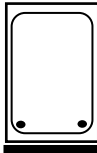
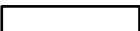
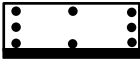
در بیشتر روش‌های طراحی مورد مطالعه، با داشتن کرنش موثر، الگوهای آیین‌نامه‌ای طراحی می‌توانند در هر دو حالت تقویت خمشی و برشی مورد استفاده قرار گیرند.

در این مقاله، با تمرکز بر کامپوزیت‌های پایه‌سیمانی تک‌لایه که با الیاف PBO تقویت شده‌اند و با بهره‌گیری از مفهوم کرنش موثر، رفتار سامانه‌های FRCM در آزمون‌های برش مستقیم و آزمون‌های خمشی مقایسه می‌شوند. برای این منظور، از پاسخ‌های آزمایشگاهی تیرهای بتنی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM که زیر بار خمشی قرار گرفته‌اند و شکست در آن‌ها همراه با لغزش الیاف درون لایه‌های ملات پیرامونی رخ می‌دهد، استفاده می‌شود تا به کمک رابطه‌ی پیشنهادی بر اساس تحلیل مقطع و منحنی‌های لنگر - انحنا، کرنش‌های موثر در الیاف کامپوزیت به‌دست آیند و نتیجه‌ها با کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمون‌های برش مستقیم مقایسه می‌شوند. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که می‌توان از روش پیشنهادی برای ایجاد رابطه بین این دو آزمون بهره جست.

۲- داده‌های آزمایشگاهی

در این مقاله، پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی مصالح بتنی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM با یک لایه از الیاف PBO مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. داده‌های آزمایشگاهی در دو حالت خمشی و برش مستقیم جمع‌آوری شدند که به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ گزارش شده‌اند.

جدول ۱: داده‌های آزمون‌های خمشی

نسبت تقویت (/.)		ویژگی بتن		ویژگی‌های ملات		ویژگی‌های نمونه						
فولاد	الیاف	f'_c (MPa)	f'_{mortar} (MPa)	t_{mortar} (mm)	L (mm)	d (mm)	h (mm)	b (mm)	مقطع	نام		
۰/۶۷	۰/۰۲	۲۹/۱	۳۳/۹	۱۰	۱۵۲۴	۲۶۰	۳۰۵	۱۵۲		L_1_1	(I)	Babaeidarabad و همکاران [۱۸]
										L_1_2		
										L_1_3		
		۴۲/۹								H_1_1	(II)	
										H_1_2		
										H_1_3		
۰/۵۴	۰/۰۴	۲۹/۱	*	۱۰	۱۵۲۴	۱۲۹	۱۵۲	۳۰۵		L_1_1	L_1_X	Loreto و همکاران [۱۷]
										L_1_2		
										L_1_3		
		۴۲/۹								H_1_1	H_1_X	
										H_1_2		
										H_1_3		
۲/۰۱	۰/۰۲	۴۷/۷	۲۹/۸	۸	۱۶۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۴۰۰		DC1	D'Ambrisi و Focacci [۲]	
										DC2		

* گزارش نشده است.

جدول ۱ داده‌های آزمایشگاهی تیرهای بتنی مختلف در پژوهش‌های Babaeidarabad و همکاران [۱۸]، Loreto و همکاران [۱۷] و D'Ambrisi و Focacci [۲] زیر بار خمشی را نشان می‌دهد. در این جدول، ویژگی‌های نمونه شامل عرض، ارتفاع و عمق مقطع و طول تیر به ترتیب با نمادهای b ، h و d گزارش شده‌اند. علاوه بر این، ضخامت t_{mortar} و مقاومت فشاری f'_{mortar} ملات، مقاومت فشاری بتن f'_c نیز در جدول ۱ آمده‌اند. نسبت تقویت‌های الیاف ρ_f و فولادهای طولی ρ_s ارائه‌شده در این جدول از رابطه‌های (۱) و (۲) به‌دست می‌آیند:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (2)$$

در رابطه‌های (۱) و (۲)، A_f و A_s به ترتیب مساحت مقطع الیاف و مساحت همگی میلگردهای طولی نمونه تیرهای بتنی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM می‌باشند. همان‌طور که در جدول ۱ می‌توان مشاهده کرد، مقطع برخی از نمونه‌ها بیان‌گر تیر و برخی دیگر بیان‌گر دال می‌باشند. علاوه بر این، ویژگی‌های ملات، مقاومت بتن و مقدار نسبت تقویت‌های میلگردهای طولی و الیاف در نمونه‌ها نیز متفاوت است. از این رو، نمونه‌های خمشی مورد ارزیابی در این مقاله گستره‌ی مناسبی از ویژگی‌های مختلف را پوشش می‌دهند. همگی تیرهای بتن‌آرمه‌ی گزارش‌شده در جدول ۱ در حالت خمش سه‌نقطه‌ای آزمایش شده‌اند.

جدول ۲: داده‌ها و نتیجه‌های آزمون‌های برش مسقیم

ϵ_{fe} (%)	مقاومت فشاری (MPa)		دستگاه آزمون	P_{max} (kN)	ویژگی‌های نمونه				
	بتن	ملات			A_f (mm ²)	B_b (mm)	L_b (mm)	نام	
۰/۹۹				۳/۲۰			۱۵۰	A.1.150	[۴۲] Ombres
۰/۵۲				۱/۶۰				B.1.150	
۰/۶۹	*	۳۰/۴	تکلبه	۳/۴۰	۳/۵۰	۷۰	۲۰۰	A.1.200	
۰/۸۳				۳/۷۰				B.1.200	
۰/۵۴				۳/۵۰			۲۵۰	A.1.250	
۰/۸۴				۳/۱۰				B.1.250	
۰/۸۸				۳/۹۶	۲/۱۵	۴۳	۳۳۰	DS_330_43_S_1T	[۴۳] D'Antino و همکاران
۱/۱۰				۴/۱۷	۲/۱۵	۴۳	۳۳۰	DS_330_43_S_2T	
۰/۸۲				۲/۷۱	۲/۱۵	۴۳	۳۳۰	DS_330_43_S_3T	
۰/۷۸	۴۲/۵	۲۸/۴	تکلبه	۳/۵۱	۲/۱۵	۴۳	۳۳۰	DS_330_43_S_5	
۰/۸۹				۵/۷۴	۳/۰۰	۶۰	۳۳۰	DS_330_60_S_1	
۱/۰۴				۶/۶۵	۳/۰۰	۶۰	۳۳۰	DS_330_60_S_2	
۰/۸۹				۵/۷۰	۳/۰۰	۶۰	۴۵۰	DS_450_60_S_1	
۰/۴۸				۵/۸۲			۵۰	S1L50_1	[۴۴] D'Ambrisi و همکاران
۰/۴۳				۵/۱۹				S1L50_2	
۰/۶۳				۷/۶۴			۱۰۰	S1L100	
۰/۷۴				۹/۰۱			۱۵۰	S1L150_1	
۰/۷۴	*	۱۶/۱	دولبه	۸/۹۷	۵/۰۰	۱۰۰		S1L150_2	
۰/۷۴				۹/۰۲			۲۰۰	S1L200_1	
۰/۸۲				۹/۹۷				S1L200_2	
۰/۸۸				۱۰/۶۴			۲۵۰	S1L250_1	
۰/۷۸				۹/۴۱				S1L250_2	

* گزارش نشده است.

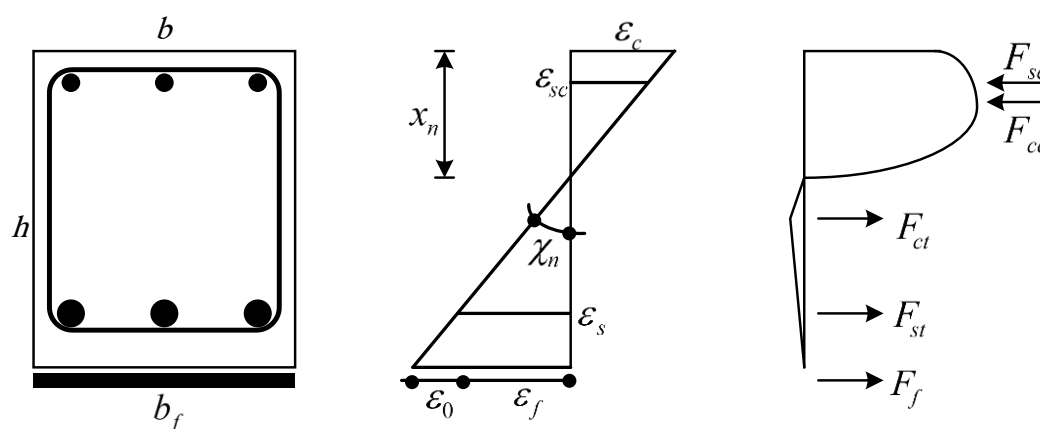
داده‌ها و نتیجه‌های بلوک‌های بتنی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM در آزمون برش مستقیم پژوهش‌های Ombres [۴۲]، D'Antino و همکاران [۴۳] و D'Ambrisi و همکاران [۴۴] در جدول ۲ آمده‌اند. در این جدول، طول پیوستگی L_b ، عرض کامپوزیت B_b و مساحت الیاف درون آن A_f گزارش شده‌اند. علاوه بر این، دستگاه آزمون برشی (تک‌لبه یا دولبه) و مقاومت فشاری ملات و بتن در نمونه‌ها ارایه شده است. نتیجه‌های آزمون برش مستقیم شامل بیشینه نیروی برشی اعمالی به نمونه P_{max} و کرنش الیاف در انتهای بارگذاری شده‌ی متناظر با این نیرو ϵ_{fe} نیز در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در همه‌ی نمونه‌های برشی، کرنش‌سنج‌ها بین لایه‌های درونی و بیرونی پایه و بر روی الیاف نصب شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، ویژگی‌های گوناگون هندسی و مکانیکی نمونه‌ها منجر به نتیجه‌های متفاوت در آن‌ها شده است.

در این مقاله، همان‌طور که در بخش‌های آتی شرح داده خواهد شد، از تحلیل مقطع برای دست‌یابی به کرنش الیاف در کامپوزیت‌های نمونه‌های آزمون خمشی گزارش شده در جدول ۱ استفاده می‌شود و نتیجه‌های تحلیل با نتیجه‌های کرنش‌سنج‌ها در نمونه‌های برشی جدول ۲ مقایسه می‌شوند.

۳- تحلیل مقطع

۳-۱- رابطه‌سازی

با در نظر گرفتن نظریه‌ی برنولی مبنی بر صفحه باقی‌ماندن هر مقطع از تیر بتن‌آرمه پس از اعمال لنگر خمشی و هم‌چنین با فرض پیوستگی کامل بین کامپوزیت و سطح بتن زیرین، مطابق با شکل ۲، کارایی لایه‌های کامپوزیت‌های FRCM را می‌توان با اضافه کردن عبارتی به رابطه‌ی تعادل تیرهای بتن‌آرمه بدون تقویت، به حساب آورد.

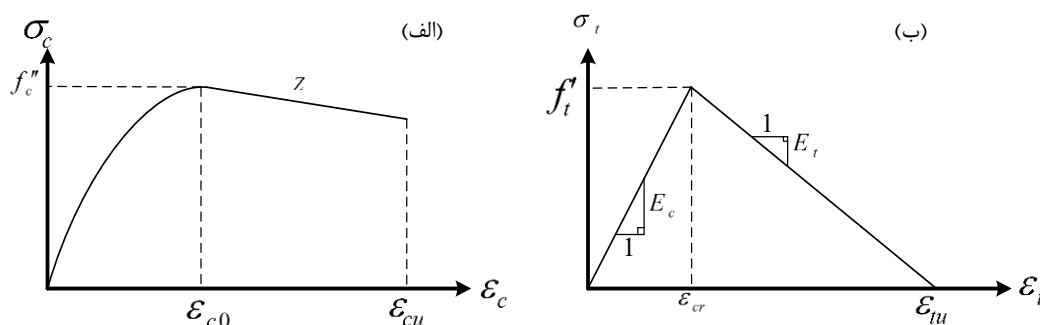


شکل ۲: نظریه‌ی برنولی برای مقطع تیر بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM

در شکل ۲، F_{cc} و F_{ct} به ترتیب معادل نیروهای فشاری و کششی بتن، F_{sc} و F_{st} نیز به ترتیب برابر نیروهای محوری در میلگردهای طولی در حالت فشاری و کششی هستند و F_f بیان‌گر نیروی کششی وارد بر الیاف در سامانه‌ی کامپوزیتی می‌باشد. از طرف دیگر، ϵ_c کرنش بتن در بحرانی‌ترین تار فشاری، ϵ_{sc} و ϵ_s به ترتیب معادل مقدار کرنش در فولادهای فشاری و کششی، ϵ_f کرنش در الیاف درونی کامپوزیت و χ_n مقدار انحنای موجود در مقطع در عمق خنثی χ_n می‌باشند. بسته به زمان و چگونگی اعمال کامپوزیت به زیر لایه‌ی بتنی، کرنش کششی نخستین ϵ_0 می‌تواند در سطح بتن وجود داشته باشد. اگرچه فرآیند رابطه‌سازی در این بخش همراه با کرنش ϵ_0 پیش خواهد رفت،

در همه‌ی نمونه‌های در نظر گرفته‌شده در این مقاله، کامپوزیت‌های FRCM بدون هیچ‌گونه کرنش کششی نخستین ($\varepsilon_f = 0$) به نمونه اعمال شده‌اند. در شکل ۲، b و h به ترتیب برابر عرض و ارتفاع مقطع تیر و b_f معادل عرض نوار کامپوزیت هستند.

الگوهای فراوانی برای مصالح بتنی در تحلیل سازه‌های بتن‌آرمه پیشنهاد شده‌اند. از میان آن‌ها، الگوی ارایه‌شده در پژوهش Bunni و همکارانش [۴۵] در این مقاله استفاده می‌شود. در این الگو، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، رفتار مصالح در فشار و کشش به دو بخش تقسیم‌بندی می‌شود. رابطه‌های (۳) و (۴) بیان‌گر رفتار تنش - کرنش بتن هستند.



شکل ۳: رابطه‌ی تنش - کرنش بتن (الف) قسمت فشاری؛ (ب) قسمت کششی

$$\sigma_c = f_c'' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} \quad (3)$$

$$\sigma_c = f_c'' [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_{c0})], \quad \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (4)$$

که عامل‌های رابطه‌های (۳) و (۴) در رابطه‌ی (۵) تعریف شده‌اند:

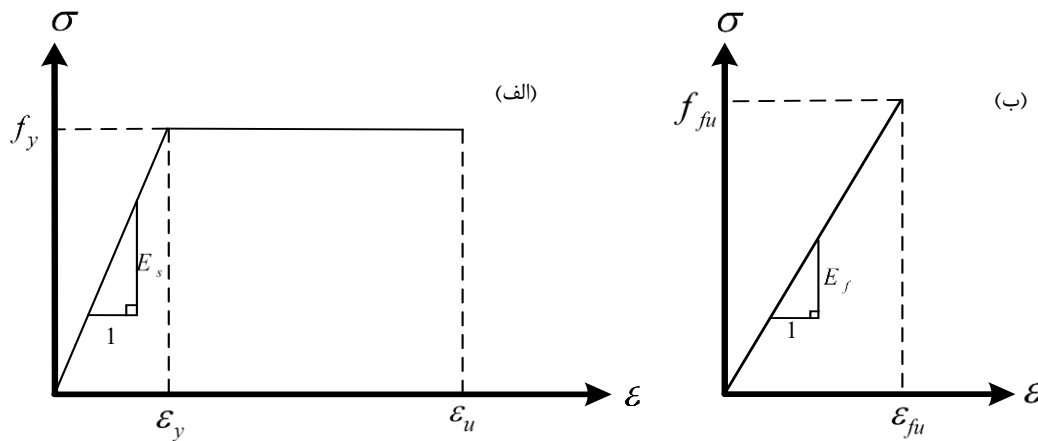
$$\varepsilon_0 = 2 \frac{f_c''}{E_c}, \quad f_c'' = 0.85 f_c', \quad Z = \frac{0.15}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c0}} \quad (5)$$

در رابطه‌های (۳) تا (۵)، ε_{c0} کرنش بتن در بیشینه تنش فشاری، Z شیب بخش نرم‌شدگی کرنش و f_c' مقاومت فشاری بتن بر حسب MPa می‌باشند. در این الگو، رابطه‌ی تنش - کرنش در قسمت کششی، دوخطی در نظر گرفته شده است. بر این اساس، شکست نهایی بتن در بخش کششی هنگام رسیدن کرنش به ε_{tu} رخ خواهد داد. مقدار کرنش‌های ε_{cr} و ε_{tu} بر اساس f_t' ، E_c و E_t ، به کمک رابطه‌ی (۶) به دست می‌آیند:

$$f_t' = 0.1 f_c', \quad E_c = 4730 \sqrt{f_c'}, \quad E_t = 0.4 E_c \quad (6)$$

که f_t' مقاومت کششی بتن، ε_{tu} کرنش کششی شکست و پایان بخش نرم‌شدگی کرنشی هنگام تبدیل ترک‌های ریز به ترک‌های درشت‌تر، E_c و E_t به ترتیب ضریب کشسانی بتن در فشار و کشش می‌باشند.

الگوی مصالح فولادی به صورت کشسان - مومسان خطی، مطابق شکل ۴ - الف، با تنش جاری شدن f_y در نظر گرفته شدند. در این شکل، E_s و ϵ_u به ترتیب بیانگر ضریب کشسانی و کرنش نهایی فولاد می‌باشند. همچنین، رابطه‌ی تنش - کرنش الیاف PBO در کامپوزیت‌ها به صورت کشسان خطی با تنش و کرنش نهایی به ترتیب برابر f_{fu} و ϵ_{fu} مطابق با شکل ۴ - ب تعریف شده‌اند.



شکل ۴: الف) رابطه‌ی تنش - کرنش الف) مصالح فولادی؛ ب) الیاف کامپوزیت

با داشتن الگوی مصالح بتن، فولاد و الیاف به کار رفته در کامپوزیت FRCM، با فرض شکست نمونه با رسیدن الیاف به کرنش نهایی خود و جاری شدن فولادها پیش از شکست، ظرفیت خمشی نمونه M_R را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M_R = b \cdot \int \sigma_c(\chi_u \cdot \xi) \cdot \xi \, d\xi + b \cdot \int \sigma_t(\chi_u \cdot \mu) \cdot \mu \, d\mu + A_s \cdot f_y \cdot (d - x_n) + A'_s \cdot f'_s \cdot (x_n - d') + A_f E_f \cdot \epsilon_{fe} \cdot (H - x_n) \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷)، $\sigma_c(\epsilon)$ و $\sigma_t(\epsilon)$ به ترتیب رابطه‌ی تنش فشاری و کششی بتن، A_s و A'_s به ترتیب مساحت میلگردهای طولی در قسمت کششی و فشاری، A_f سطح مقطع الیاف کامپوزیت و E_f ضریب کشسانی الیاف می‌باشند. در این مقاله به علت ناچیز بودن تنش کشش در بتن از $\sigma_t(\epsilon)$ (و نیروی معادل آن، F_{ct}) چشم‌پوشی می‌شود. χ_u انحنا در زمان شکست نمونه است که از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

$$\chi_u = \frac{\epsilon_{fe} + \epsilon_0}{H - x_n} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)، x_n عمق تار خنثی در مقطع است که از رابطه‌ی تعادل محاسبه می‌شود:

$$b \cdot \int_0^{x_n} \sigma_c(\chi_u \cdot \xi) \cdot d\xi = A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_s + A_f E_f \cdot \epsilon_{fe} \quad (9)$$

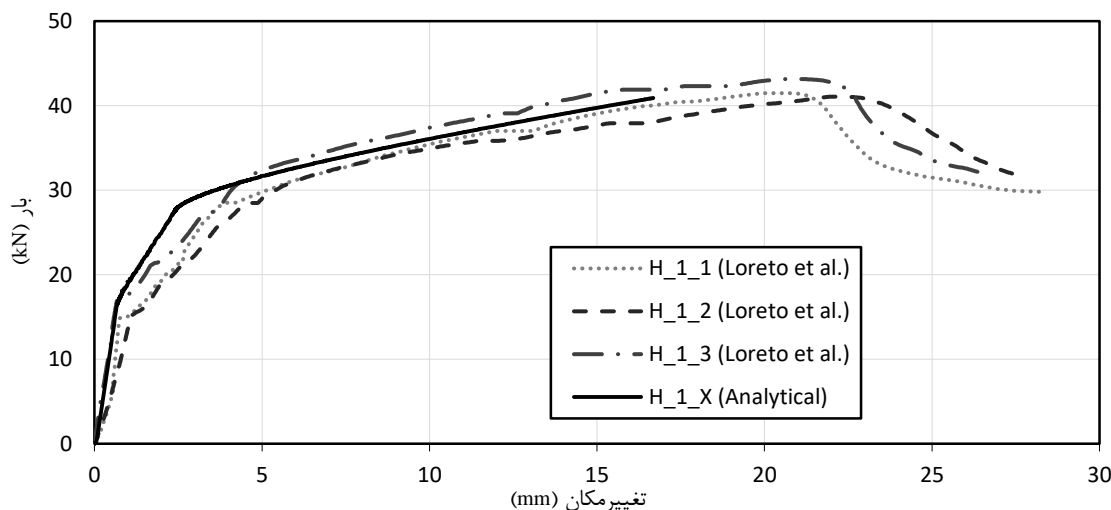
عامل‌های به کار رفته در رابطه‌ی (۹) در شکل ۲ نیز نمایش داده شده‌اند. f'_s تنش فولادهای فشاری است که بسته به جاری شدن یا نشدن آن‌ها برابر f_y یا $E_s \cdot \epsilon_{sc}$ خواهد بود. ظرفیت خمشی گزارش شده در رابطه‌ی (۷) را می‌توان با لنگرگیری حول محل اعمال نیروی فشاری بتن (ϵ_0 در شکل ۲) نیز بازنویسی کرد:

$$M_R = \alpha \cdot A_s \cdot f_y \cdot d + \beta \cdot A_f E_f \cdot h \cdot \varepsilon_{fe} + \lambda \cdot A'_s \cdot f'_s \cdot d' \quad (10)$$

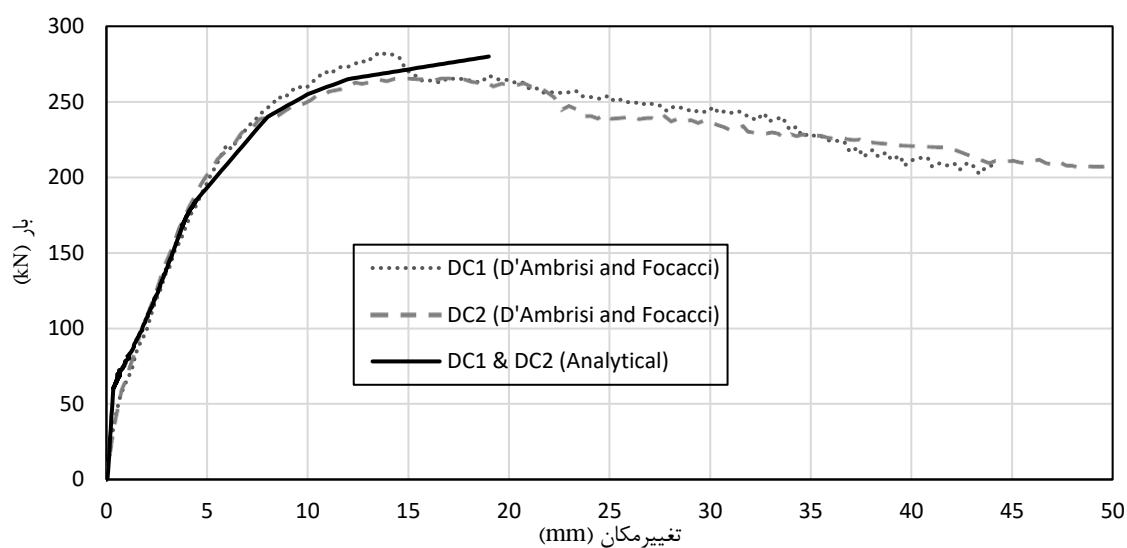
در رابطه‌ی (۱۰)، α ، β و λ ضریب‌هایی هستند که بر اساس عمق محور خنثی در مقطع بتنی به دست می‌آیند. آیین‌نامه‌ی ACI پیشنهاد می‌کند که به جای استفاده از مقدارهای محاسباتی برای ضریب β ، از مقدار ۰/۹ استفاده شود [۴۶]. این پیشنهاد به طور دقیق در بخش‌های آتی در این مقاله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۲- فرآیند تحلیل

در این مقاله، بر اساس نظریه‌ی برنولی و با تحلیل مقطع تیر بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRM، کرنش موثر الیاف ε_{fe} به دست می‌آید. برای این منظور، برای هر نمونه‌ی خمشی گزارش شده در جدول ۱، انحنا χ به صورت تدریجی از صفر آغاز می‌شود و تا انحنای متناظر با شکست نمونه ادامه خواهد یافت. در هر گام تحلیل برای هر یک از انحنایها، لنگر خمشی متناظر محاسبه می‌شود و در پایان نمودار لنگر - انحنا برای هر نمونه به دست می‌آید. به منظور اطمینان از درست انجام شدن فرآیند دستیابی به نمودارهای لنگر - انحنا، بر اساس آن‌ها نمودارهای بار - تغییرمکان در میانه‌ی دهانه‌ی تیر محاسبه و با نمودارهای متناظر آزمایشگاهی نمونه‌ها مقایسه شدند. شکل ۵ و شکل ۶، راست‌آزمایی نمودارهای بار - تغییرمکان به دست آمده از تحلیل عددی و نمودارهای متناظر آزمایشگاهی را نشان می‌دهند.

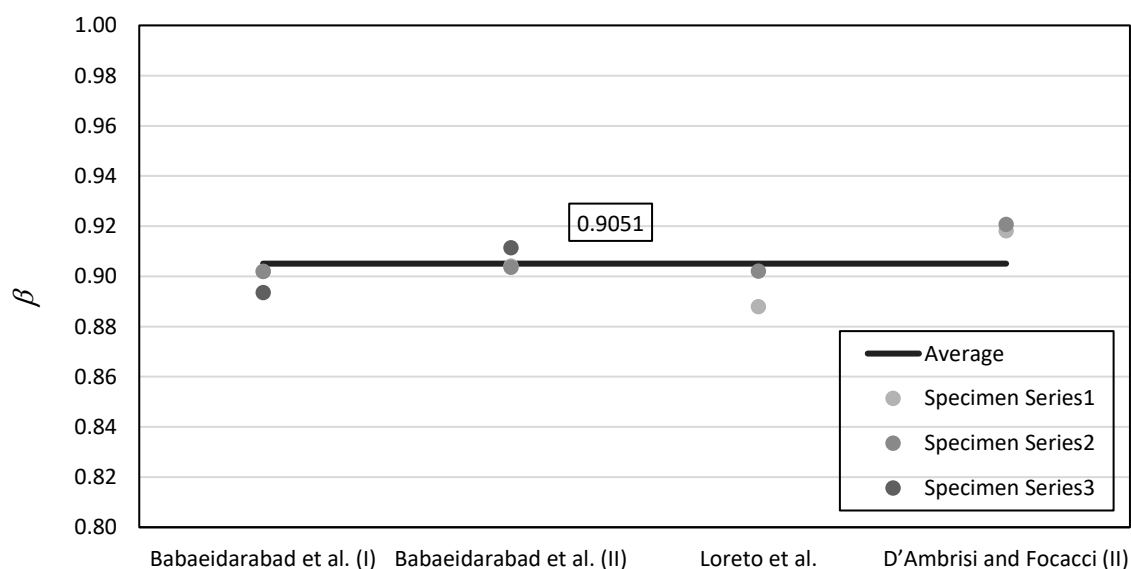


شکل ۵: نمودارهای بار - تغییرمکان بیشینه نمونه‌های آزمایشگاهی [۱۷] و تحلیل عددی



شکل ۶: نمودارهای بار - تغییرمکان بیشینه نمونه‌های آزمایشگاهی [۲] و تحلیل عددی

هم‌خوانی مناسب نمودارهای بار - تغییرمکان در میانه‌ی دهانه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی و نتیجه‌های به‌دست آمده از تحلیل عددی در شکل ۵ و شکل ۶، بیان‌گر درستی نمودارهای لنگر - انحنای تحلیلی است. با داشتن نمودارهای لنگر - انحنای، به کمک بار یا لنگر خمشی بیشینه‌ی آزمایشگاهی، انحنای متناظر δ_{II} در حالت بیشینه به‌دست می‌آید. مقدار انحنای متناظر با بیشینه لنگر خمشی آزمایشگاهی، محل دقیق تار خنثی و بارهای وارد بر مقطع تیر بتن‌آرمه را مشخص می‌کند. با داشتن محل و مقدار بارهای وارد بر مقطع تیر، به کمک رابطه‌ی (۱۰) می‌توان ضریب β را برای نمونه‌های آزمایشگاهی به‌دست آورد. مقدارهای دقیق ضریب β به‌همراه میانگین آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مقدارهای دقیق ضریب β برای نمونه‌های آزمایشگاهی

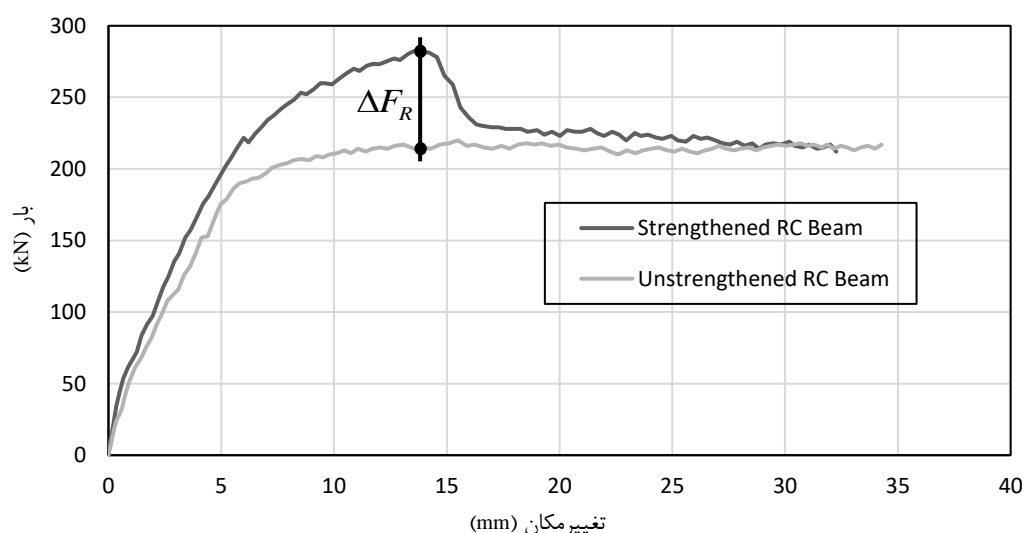
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، میانگین مقدارهای محاسبه‌شده برای ضریب β ۰/۹۰۵۱ به‌دست آمد. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن پراکندگی در پاسخ‌ها، مقدار میانه، انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز محاسبه شدند که برای ضریب β به ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ محاسبه شدند. نتیجه نشان می‌دهد که هر دو مقدار میانگین (۰/۹۰۵۱) و میانه (۰/۹۱) با مقدار پیشنهادی آیین‌نامه (۰/۹) بسیار سازگار است [۴۶]. استفاده از این ضریب برای هر نمونه‌ی آزمایشگاهی، می‌توان برآوردی از بیشینه کرنش الیاف کامپوزیت در آزمون خمشی به کمک رابطه‌ی (۱۱) ارائه کرد:

$$\varepsilon_{fe} = \frac{\Delta M_R}{\beta \cdot h \cdot A_f E_f} \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، ΔM_R سهم کامپوزیت FRCM از لنگر خمشی بیشینه تیر بتن آرمه تقویت‌شده می‌باشد و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

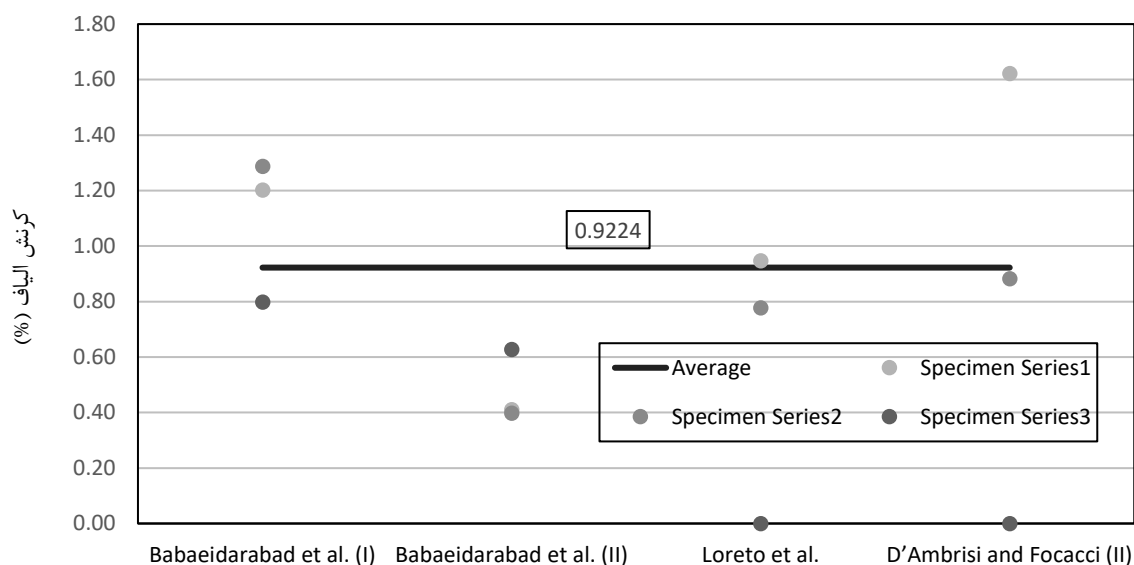
$$\Delta M_R = \frac{\Delta F_R}{4} \cdot L \quad (12)$$

در رابطه‌ی (۱۲)، L بر اساس جدول ۱ بیان‌گر طول تیر و ΔF_R ، مطابق با شکل ۸، اختلاف بیشینه بار در تیر تقویت‌شده و مقدار بار متناظر تیر تقویت‌نشده در همان تغییرمکان می‌باشد.



شکل ۸: برآورد ΔF_R بر اساس نمودار بار - تغییرمکان تیرهای تقویت‌شده و بدون تقویت

محاسبه‌ی ΔF_R بر اساس تغییرمکان یکسان برای نمونه‌های تقویت‌شده و بدون تقویت، مقدار اندکی تقریب در مقدار کرنش برآوردشده در رابطه‌ی (۱۱) ایجاد می‌کند و از این رو مقدار ε_{fe} را باید میانگین کرنش الیاف در کامپوزیت FRCM تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده دانست. در این مقاله، با توجه به ویژگی‌های مکانیکی و هندسی نمونه‌ها و با تمرکز بر الیاف PBO که ضریب کشسانی آن‌ها E_f از سوی کارخانه‌ی سازنده برابر ۲۷۰ GPa، کرنش میانگین آن‌ها به کمک رابطه‌ی (۱۱) محاسبه شده است و در شکل ۹ گزارش می‌شود.

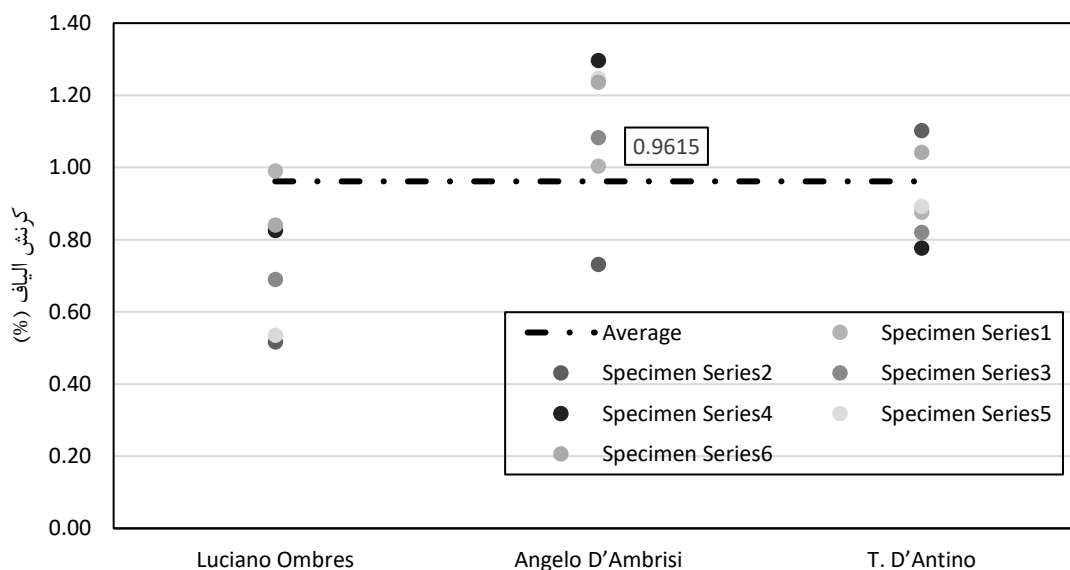


شکل ۹: کرنش الیاف PBO نمونه‌ها در آزمون‌های خمشی

مطابق با ضریب β ، به منظور در نظر گرفتن پراکندگی کرنش الیاف در نمونه‌های خمشی، علاوه بر میانگین (۰/۹۲۲۴)، مقدار میانه (۰/۸۴)، انحراف معیار (۰/۳۸) و ضریب تغییرات (۰/۴۲) برای کرنش‌ها نیز محاسبه شدند. برای دستیابی به هدف این مقاله و در راستای مقایسه‌ی کرنش‌های معادل در الیاف کامپوزیت نمونه‌های خمشی و میانگین کرنش‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های برش مستقیم در بخش آتی، کرنش‌های محاسباتی گزارش شده در شکل ۹ با نتیجه‌های آزمون برش مستقیم مقایسه می‌شوند.

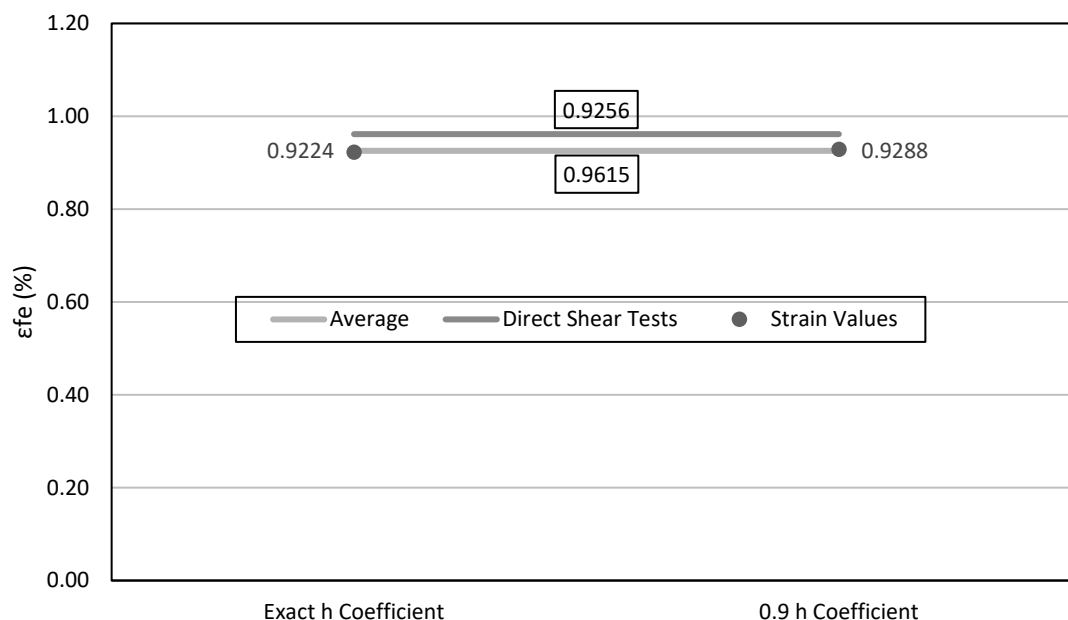
۴- مقایسه‌ی نتیجه‌های آزمون خمشی و برش مستقیم

در این بخش، نتیجه‌های آزمون خمشی با آزمون برش مستقیم مقایسه می‌شوند. کرنش‌های اندازه‌گیری شده‌ی الیاف PBO در نمونه‌های برشی و میانگین آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: کرنش الیاف PBO در نمونه‌های آزمون برش مستقیم (از جدول ۲)

علاوه بر میانگین کرنش الیاف در آزمون‌های برش مستقیم (۰/۹۶۱۵)، مقدار میانه، انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز برای آن‌ها محاسبه شد که به ترتیب برابر ۰/۸۹، ۰/۳۲ و ۰/۳۴ می‌باشند و با مقدارهای متناظر خود در آزمون خمشی مطابقت دارند. به منظور راست‌آزمایی روش پیشنهادی این مقاله در محاسبه‌ی کرنش معادل الیاف کامپوزیت ارایه‌شده در رابطه‌ی (۱۱)، میانگین کرنش‌های محاسباتی آزمون‌های خمشی و کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمون‌های برش مستقیم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه‌ی کرنش محاسبه‌شده‌ی الیاف بر اساس ضریب دقیق β و مقدار پیشنهادی آیین‌نامه (۰/۹)

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقدار میان کرنش الیاف به‌دست آمده از ضریب دقیق β و مقدار پیشنهادی آیین‌نامه (۰/۹) بسیار نزدیک هستند (به ترتیب برابر ۰/۹۲۲۴ و ۰/۹۲۸۸)، از این رو می‌توان از ضریب پیشنهادی آیین‌نامه برای β بهره جست. از طرف دیگر، مقدار میانگین کرنش‌های به‌دست آمده از روش پیشنهادی به کمک تحلیل مقطع نمونه‌های خمشی (۰/۹۲۵۶)، با مقدار میانگین کرنش الیاف اندازه‌گیری‌شده در آزمون‌های برش مستقیم (۰/۹۶۱۵)، هم‌خوانی مناسبی دارد. علاوه بر میانگین کرنش الیاف در آزمون‌های خمشی و برش مستقیم (۰/۹۶۱۵ و ۰/۹۲۵۶)، مقدار میانه (۰/۸۹ و ۰/۳۲)، انحراف معیار (۰/۳۸ و ۰/۳۴) و ضریب تغییرات (۰/۴۲ و ۰/۳۴) در این دو آزمون نیز سازگار هستند. این هم‌خوانی، بیان‌گر کارآمدی و توانایی روش پیشنهادی این مقاله در راستای دستیابی به کرنش الیاف کامپوزیت‌ها در نمونه‌های خمشی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای ایجاد رابطه بین آزمون‌های خمشی و برش مستقیم نمونه‌های تقویت‌شده با کامپوزیت‌های نوین پایه‌سیمانی پیشنهاد شد. به منظور ارزیابی کارایی روش ارایه‌شده، نمونه‌های مختلف تیرهای بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM با یک‌لایه از الیاف PBO که در آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای آزمایش شده بودند انتخاب شد. پس از تحلیل مقطع و دستیابی به نمودارهای لنگر-انحنای هر یک از نمونه‌ها، رابطه‌ای برای محاسبه‌ی کرنش الیاف در سامانه‌ی تقویت آن‌ها پیشنهاد شد. درستی نتیجه‌های به‌دست آمده از رابطه‌ی پیشنهادی با مقایسه‌ی آن‌ها با کرنش‌های اندازه‌گیری نمونه‌های تقویت‌شده با کامپوزیت‌های مشابه در آزمون برش مستقیم ارزیابی شد. نتیجه‌ها نشان دادند که روش ارایه‌شده توانایی فراوانی در برآورد کرنش الیاف تیرهای بتنی تقویت‌شده دارد و می‌توان از آن در تحلیل نمونه‌های آزمون خمشی بهره جست.

مراجع

- [1] O. Buyukozturk and B. Hearing, "Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP," *J. Compos. Constr.*, vol. 2, no. 3, pp. 138–144, 1998.
- [2] A. D'Ambrisi and F. Focacci, "Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites," *J. Compos. Constr.*, vol. 15, no. 5, pp. 707–720, 2011.
- [3] A. Foden, P. Balaguru, R. Lyon, and J. Davidovits, "High temperature inorganic resin for use in fiber reinforced composites," in *First International Conference on Composites in Infrastructure*, 1996.
- [4] L. A. Bisby, E. C. Roy, M. Ward, and T. J. Stratford, "Fibre reinforced cementitious matrix systems for fire-safe flexural strengthening of concrete: pilot testing at ambient temperature," *Proc. Adv. Compos. Constr. Edinburgh, UK*, 2009.
- [5] F. J. y Basalo, A. Nanni, and J. P. James, "Qualitative and quantitative environmental impact analysis of BFRC vs GFRP: green building construction rehabilitation systems," in *Engineering sustainability conference. Pittsburgh (PA)*, 2009.
- [6] A. Wiberg, "Strengthening of concrete beams using cementitious carbon fibre composites," *Byggetenskap*, 2003.
- [7] S. Pareek, Y. Suzuki, and A. Kobayashi, "Flexural and shear strengthening of RC beams using newly developed CFRP and polymer-cement pastes as bonding agents," *Proc. Fiber-Reinforced Polym. Reinf. Concr. Struct. FRPRCS-8, Patras, Greece*, 2007.
- [8] B. Täljsten and T. Blanksvärd, "Mineral-based bonding of carbon FRP to strengthen concrete structures," *J. Compos. Constr.*, vol. 11, no. 2, pp. 120–128, 2007.
- [9] T. Triantafillou, "Innovative textile-based composites for strengthening and seismic retrofitting of concrete and masonry structures," in *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer, 2011, pp. 3–12.
- [10] S. Hashemi and R. Al-Mahaidi, "Experimental and finite element analysis of flexural behavior of FRP-strengthened RC beams using cement-based adhesives," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 268–273, 2012.
- [11] A. D'Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano, V. Alecci, and M. De Stefano, "Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 75, pp. 355–366, 2015.
- [12] A. Napoli and R. Realfonzo, "Reinforced concrete beams strengthened with SRP/SRG systems: experimental investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 654–677, 2015.
- [13] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors," *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 225–239, 2016.
- [14] T. D'Antino and C. Papanicolaou, "Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites," *Compos. Part B Eng.*, 2017.
- [15] L. Ombres, "Failure modes in reinforced concrete beams strengthened with PBO fiber reinforced mortars," *Proc. Fiber-Reinforced Polym. Reinf. Concr. Struct. FRPRCS-9, Sydney, Aust.*, 2009.
- [16] L. Ombres, "Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 1, pp. 143–155, 2011.
- [17] G. Loreto, L. Leardini, D. Arboleda, and A. Nanni, "Performance of RC Slab-Type Elements Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious-Matrix Composites," *Am. Soc. Civ. Eng.*, pp. 1–9, 2013.
- [18] S. Babaeidarabad, G. Loreto, and A. Nanni, "Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix," *J. Compos. Constr.*, pp. 1–12, 2014.
- [19] E. Tzoura and T. C. Triantafillou, "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 17–28, 2016.
- [20] H. M. Elsanadedy, T. H. Almusallam, S. H. Alsayed, and Y. A. Al-Salloum, "Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar--Experimental and numerical study," *Compos. Struct.*, vol. 97, pp. 40–55, 2013.
- [21] M. Santandrea, G. Quartarone, C. Carloni, and X. L. Gu, "Confinement of Masonry Columns with Steel and Basalt FRCM Composites," in *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 747, pp. 342–349.
- [22] A. Brückner, R. Ortlepp, and M. Curbach, "Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 39, no. 292, pp. 741–748, 2006.
- [23] L. N. Koutas and D. A. Bournas, "Flexural strengthening of two-way RC slabs with textile-reinforced mortar: experimental investigation and design equations," *J. Compos. Constr.*, p. 4016065, 2016.
- [24] S. Weiland, R. Ortlepp, and M. Curbach, "Strengthening of predeformed slabs with textile reinforced concrete," in *Proceedings of the second International fib-Congress CEB-FIP*, 2006.
- [25] J. H. Gonzalez-Libreros, C. Sabau, L. H. Sneed, C. Pellegrino, and G. Sas, "State of research on shear strengthening of RC beams with FRCM composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 444–458, 2017.
- [26] W. M. Sebastian, "Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams," *J. Struct. Eng.*, vol. 127, no. 7, pp. 792–798, 2001.
- [27] L. H. Sneed, S. Verre, C. Carloni, and L. Ombres, "Flexural behavior of RC beams strengthened with steel-FRCM

- composite," *Eng. Struct.*, vol. 127, pp. 686–699, 2016.
- [28] P. A. Ritchie, D. A. Thomas, L.-W. Lu, and G. M. Connelly, "External reinforcement of concrete beams using fiber-reinforced plastics," 1990.
- [29] A. Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, and B. N. Ghaleb, "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates," *Struct. J.*, vol. 91, no. 2, pp. 160–168, 1994.
- [30] M. Arduini, A. Di Tommaso, and A. Nanni, "Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams," *ACI Struct. J.*, vol. 94, no. 4, pp. 363–370, 1997.
- [31] M. J. Chajes, W. W. Finch, T. F. Januszka, and T. A. Thomson, "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete," *ACI Struct. J.*, vol. 93, no. 2, pp. 208–217, 1996.
- [32] B. Täljsten, "Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 17, no. 4, pp. 319–327, 1997.
- [33] L. Bizindavyi and K. W. Neale, "Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete," *J. Compos. Constr.*, vol. 3, no. 4, pp. 153–160, 1999.
- [34] J. F. Chen and J. G. Teng, "Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete," *J. Struct. Eng.*, vol. 127, no. 7, pp. 784–791, 2001.
- [35] L. H. Sneed, T. D'Antino, C. Carloni, and C. Pellegrino, "A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 64, no. November, pp. 37–48, 2015.
- [36] F. G. Carozzi and C. Poggi, "Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening," *Compos. Part B Eng.*, vol. 70, 2015.
- [37] J. Donnini, V. Corinaldesi, and A. Nanni, "Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments," *Compos. Part B Eng.*, vol. 88, 2016.
- [38] T. D'Antino, L. H. Sneed, C. Carloni, and C. Pellegrino, "Effect of the inherent eccentricity in single-lap direct-shear tests of PBO FRCM-concrete joints," *Compos. Struct.*, vol. 142, 2016.
- [39] E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi, and E. Cosenza, "Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 103–112, 2014.
- [40] M. Curbach, R. Ortlepp, and T. C. Triantafillou, "TRC for rehabilitation," *Text. Reinf. Concr.*, pp. 221–236, 2006.
- [41] L. Ombres, A. Trimboli, G. Mantegazza, and A. Gatti, "Strengthening of old reinforced concrete structures using fiber reinforced cementitious mortars (FRCM): A case study," *Proceeding, fiber-reinforced Polym. Reinf. Concr. Struct. FRPRCS-9, Sydney, Aust.*, 2009.
- [42] L. Ombres, "Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 69, pp. 418–426, 2015.
- [43] T. D'Antino, C. Carloni, L. H. Sneed, and C. Pellegrino, "Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 117, 2014.
- [44] A. D'Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, "Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 524–532, Jan. 2013.
- [45] N. G. Bunni, B. D. SCOTT, R. PARK, and M. J. N. PRIESTLEY, "STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF CONCRETE CONFINED BY OVERLAPPING HOOPS AT LOW AND HIGH-STRAIN RATES-DISCUSSION," *J. Am. Concr. Inst.*, vol. 79, no. 6, pp. 496–498, 1982.
- [46] ACI 440.2R, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems. 2008.