



افزایش کارایی منسوج کربن در تقویت بتن ریزدانه: مطالعه تجربی ظرفیت باربری خمشی

روح اله کمانی¹، مهدی کمالی دولت‌آبادی^{2*}، علی اصغر اصغریان جدی³، کورش نصراله زاده⁴

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران

2- استادیار، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- کارشناس، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 14515-775، kamalimehdi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/02/18

پذیرش: 97/07/01

کلیدواژگان:

رفتار خمشی

بتن تقویت شده با منسوج

کارایی نیمچه‌نخ کربن

چکیده

استفاده از بتن تقویت شده با منسوج در صنعت ساختمان سازی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، سبکی سازه، مقاومت در برابر خوردگی و ظرفیت تحمل بار بالا در حال توسعه می باشد. عدم نفوذ کامل ذرات سیمانی به درون نیمچه‌نخ باعث کاهش بهره‌وری الیاف در تحمل بار کششی و افزایش شکل پذیری سازه پس از شکست اولیه بتن می شود. مقدار کارایی الیاف در رفتار خمشی بتن تقویت شده با منسوج به عنوان یک عامل اساسی محسوب می شود. لذا هدف از این تحقیق افزایش کارایی نیمچه‌نخ در تقویت بتن بوده است. در این تحقیق کارایی پارچه‌های حلقوی تار ی پودگذاری شده در تقویت کننده بتن، میزان باربری و چقرمگی بتن تقویت شده با منسوج تحت آزمون خمشی چهار نقطه بررسی شده است. همچنین افزایش کارایی سازه با آغشته سازی منقطع منسوج تقویت کننده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که آغشته سازی جزئی اپوکسی در کارایی منسوج تقویت کننده بتن مؤثر بوده و آغشته سازی منقطع با اپوکسی بهره‌وری سازه را تا 50% ارتقاء داده است.

Increasing the efficiency of carbon textiles in reinforcing fine grained concrete: an experimental study of flexural bearing capacity

Roohollah Kamani¹, Mehdi Kamali Dolatabadi^{1*}, Ali. A.A. Jeddi², Kourosch Nasrollahzadeh³

1- Department of Textile Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Civil Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14515-775, Tehran, Iran, kamalimehdi@yahoo.com

Keywords

Bending behavior
Textile reinforced concrete
Bundle of carbon fibers
efficiency

Abstract

The use of Textile Reinforced Concrete (TRC) materials have been developed in the construction industry due to their superior mechanical properties as well as corrosion-resistant and light weight concrete with high load-bearing capacity. Fine grained concrete penetrated within the bundle of fibers (rovings) partially. This fact reduce the load bearing capacity of fibers and enhance ductility after the first cracks. The fibers efficiency is the key aspect in the bending behavior of TRCs. The purpose of this study was to increase the fibers efficiency of TRCs. In this research, the influence of weft insertion wrap knitted fabrics by different number of carbon rovings on the flexural strength, ductility, toughness and failure mode under four points bending test evaluated experimentally. Furthermore, the fibers efficiency was improved by partially impregnated fabrics with spotted epoxy. This technique causes increased fiber efficiency in comparison with the fabric without epoxy upper fifty present and improving bending properties of TRCs.

Please cite this article using:

Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., A.A. Jeddi, A., Nasrollahzadeh, K., "Increasing the efficiency of carbon textiles in reinforcing fine grained concrete: an experimental study of flexural bearing capacity", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 310-318, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1-مقدمه

مسئله نمودن بتن به وسیله الیاف با مدول یانگ و استحکام مناسب به شرط وجود چسبندگی کافی می‌تواند خصوصیات منحصر به فردی در کامپوزیت تقویت‌شده ایجاد نماید. امکان تولید سازه‌های سبک با اشکال پیچیده، مقاومت در مقابل خوردگی و استفاده بهینه از مصالح می‌تواند از نمونه‌هایی از این خصوصیات باشد [1, 2]. این ویژگی‌های بتن مسلح شده، به دلیل سطح جانبی فراوان الیاف با بستر و تعدد الیاف ظریف در یک دسته فراهم می‌شود. الیاف کربن ظریف بوده و قطر هر لیف عمدتاً در محدوده کمتر از ده میکرون قرار می‌گیرد به همین دلیل نفوذ مواد سیمانی به درون نیمچه‌نخ محدود شده است. این امر سبب ایجاد پدیده تلسکوپی در قسمت‌های مغزی نیمچه‌نخ در روند شکست نمونه می‌شود. روند شکست نمونه به گونه‌ای است که پس از گسترش ترک، الیافی که به‌طور مستقیم در بدنه بستر سیمانی قرار گرفته‌اند پس از رسیدن به کرنش نهایی دچار گسیختگی شده و الیاف باقی‌مانده در مغز نیمچه‌نخ شروع به سرخوردن می‌کنند. بنابراین تقویت-کنندگی بتن عمدتاً به وسیله الیاف حاشیه‌ای رخ می‌دهد و اصطکاک بین الیاف مغزی به دلیل پدیده تلسکوپی فقط در رفتار پس از ترک سبب عدم جدایی ناگهانی بتن مسلح می‌شود [3-5]. ظرفیت باربری این سازه به دلیل عدم استفاده از ظرفیت کششی الیاف مغزی کاهش یافته و به ظرفیت کششی الیاف حاشیه‌ای محدود شده است. برای حفظ ظرفیت باربری و یا رفتار سخت‌شونده پس از ترک اولیه، لازم است مقدار قابل‌توجهی از الیاف کربن را برای مسلح کردن بتن بکار گرفت که این روش اقتصادی نبوده و احتمال شکست اتصال بین منسوج و بستر سیمانی افزایش پیدا می‌کند و به لحاظ رفتار شکست استفاده خیلی زیاد از الیاف در تقویت بتن ممکن نیست [6, 7].

از دیگر سو، با آغشته‌سازی کامل منسوج کربن با رزین، FRP تولید شده و مکانیزم شکست بتن‌های تقویت‌شده با FRP به صورت ترد و شکننده بوده و تخریب یک‌باره سازه را به همراه داشته است که می‌تواند فاجعه‌بار باشد [8]. برای افزایش بهره‌وری الیاف روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است از جمله استفاده از روش پالتروژن در تولید کامپوزیت [9]، افزایش فصل مشترک بین نیمچه‌نخ تقویت‌کننده و بستر سیمانی [10]، استفاده از پرکننده‌های معدنی و اپوکسی در اندازه‌های میکرو و نانو [11, 12] که مقداری بهره‌وری سازه ارتقاء می‌دهد.

در این تحقیق اثر پارچه‌های حلقوی تار پودگذاری شده با تعداد نیمچه‌نخ مختلف در تقویت بتن بر روی باربری، شکل‌پذیری، چقرمگی سازه بررسی می‌شود و با استفاده از آغشته‌سازی منقطع پارچه‌های حلقوی تار پودگذاری شده با رزین اپوکسی در تقویت بتن، افزایش کارایی الیاف تقویت-کننده را با حفظ رفتار چقرمه بتن پس از تسلیم و مکانیزم شکست سازه بررسی شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- بتن ریزدانه

برای تولید FRCها می‌بایست از بتن ریزدانه به دلیل ضخامت کم قطعات و نفوذ مطلوب بتن درون نیمچه‌نخ استفاده نمود. به همین منظور بتن نرم به‌عنوان بستر در این تحقیق استفاده شده است که متشکل از سیمان پرتلند تیپ 1، پودر میکرو سلیس، فوق روان‌کننده کربوکسیلاتی و سلیس می‌باشد (جدول 1). نحوه اختلاط بتن به‌گونه‌ای است که ابتدا مواد خشک با همدیگر مخلوط می‌شوند و فوق روان‌کننده به آب اضافه شده و مخلوط می‌گردد. سپس آب با فوق روان‌کننده به مواد خشک اضافه شده و با همزن مخلوط

می‌کنیم تا بتن همگن شود و به مدت پنج دقیقه به بتن اجازه می‌دهیم تا حباب آن خارج شود. آزمایش مقاومت فشاری بر مبنای استاندارد ASTM 30109 انجام شده است، مقاومت فشاری بتن اشاره شده 65.32 MPa با انحراف معیار 2.27 می‌باشد [14].

2-2- مشخصات نیمچه‌نخ کربن و پارچه

تقویت‌کننده دسته الیاف ممتد کربن بدون تاب (نیمچه‌نخ) 12k می‌باشد. نمره (titer) نیمچه‌نخ کربن 1200 Tex است که توسط شرکت TORAYCA® ژاپن تولید شده است. خصوصیات این الیاف به صورت مختصر در جدول 2 آمده است.

برای بافت پارچه از ماشین راشل شرکت کارل مایر مدل RMJG4F استفاده شده است. سرعت ماشین 170 دور در دقیقه بوده که در این تحقیق از سرعت آهسته استفاده شده است و پود به صورت دستی از پشت سوزن درون پارچه قرار داده شده است. ماشین با سرعت آهسته کار کرده است و تعداد رج‌ها جهت پودگذاری شمارش می‌شود. مشخصات بافت در جدول 3 آمده است.

Table 1 The composition of fine grained concrete

جدول 1 مواد تشکیل‌دهنده بستر سیمانی					
سیمان پرتلند تیپ 1	پودر میکرو سلیس	فوق روان کننده	آب	سلیس-0	سلیس-0
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
650	65	16	255	500	714

Table 2 The carbon-fiber specifications

جدول 2 خصوصیات الیاف کربن				
Tensile Strength	Tensile Modulus	Strain	Density	Filament Diameter
MPa	GPa	%	g/cm ³	μm
4,900	230	2.1	1.80	7

Table 3 The weft insertion warp knitted fabric specifications

جدول 3 مشخصات بافت پارچه حلقوی تار پودگذاری شده	
نوع ماشین	راشل شرکت کارل مایر مدل RMJG4F
گیج	7
Run in نخ حلقه	420 cm
Run in نخ لا	-
Run in نیمچه‌نخ کربن	به صورت پود
سرعت ماشین	سرعت آهسته
نمره نخ حلقه	16.5 TEX
نمره نیمچه‌نخ تراکم	1200TEX
	12 رج در سانتی‌متر

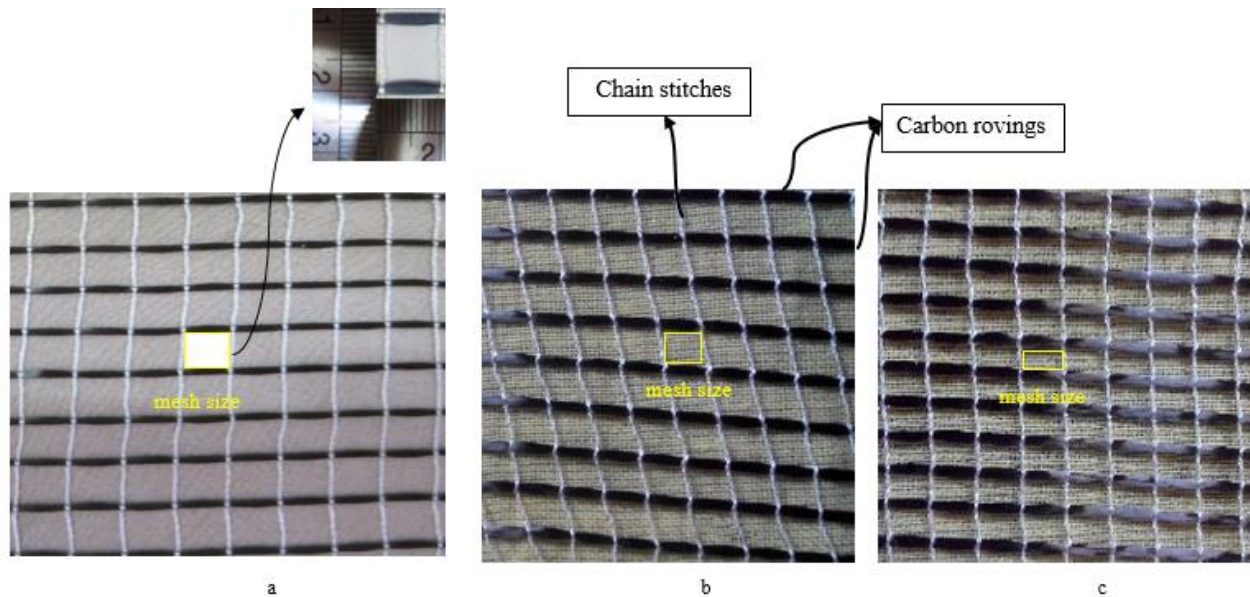


Fig. 1 Three different weft insertion wrap knitted fabrics by three mesh size a. 10*10mm, b. 7.5*10mm and c. 5*10mm

شکل 1 پارچه حلقوی تار با شبکه‌های چهارگوش الف) 10-10 mm ب) 7.5-10 mm پ) 5-10 mm

Table 4 The epoxy resin specifications

جدول 4 مشخصات رزین اپوکسی	
EPL 1012 Resin	نام رزین
EPH 112 Hardener	نام هاردنر
12 گرم هاردنر برای 100 گرم رزین	درصد ترکیب
50 دقیقه در 25 درجه سانتی‌گراد	عمر مفید
60 دقیقه در 25 درجه سانتی‌گراد	زمان ژله‌ای
90 دقیقه در 25 درجه سانتی‌گراد	زمان یخت
7 روز در 25 درجه سانتی‌گراد	یخت کامل

بعد از انجام آزمایش، نمونه مقطع زده شده و میزان نفوذ بتن بررسی شده است [13]. در صورتی که بعد از شکست نمونه بتنی مشاهده شود که منسوج در ارتفاع پنج میلی‌متری نیست نتایج آن نمونه حذف می‌شود. بعد از ثابت نمودن منسوج در جای خود، بتن‌ریزی در قالب‌ها انجام گرفته و برای خروج حباب‌های هوا بتن و بیره شد. تمامی نمونه‌ها 24 ساعت داخل قالب باقی‌مانده سپس بعد از خروج از قالب به مدت 28 روز در شرایط رطوبت نسبی 100% قرار گرفت.

2-5- تنظیمات آزمایش

آزمون خمش تیرهای بتنی تقویت‌شده با منسوج به صورت چهار نقطه‌ای شبه استاتیکی است. انتخاب این روش به دلیل بررسی جزئیات تغییر شکل زیاد پلاستیک کامپوزیت‌ها و همچنین عدم ایجاد شکست‌های برشی بوده است [14]. در آزمایش‌های حداکثر ظرفیت بارگذاری اسمی یک تن است (از فک بارگذاری یک تنی استفاده شده است). این دستگاه کنترل کامپیوتری جابجایی با سرعت‌های مختلف را داراست که در آزمایش‌های این تحقیق از سرعت بارگذاری 5mm/min به صورت ثابت استفاده شده است. تغییر شکل نمونه‌ها به کمک یک محفظه به شکل حسگر کرنش سنج اندازه‌گیری می‌شود. این تغییر شکل محوری با سنجش محور اولیه نمونه با محور سیلندری نمونه در طول بارگذاری محاسبه نموده و به کمک کامپیوتر به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی نمایش می‌دهد [15]. تنظیمات آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C 947 در شکل 2 مشاهده می‌شود.

سه نوع پارچه تولید شده است. در پارچه اول به ازای هر 12 رج یک نیمچه‌نخ پود گذاشته شده که شبکه تولید شده مربع شکل با ابعاد 10-10mm (طول و عرض) بوده است. در پارچه دوم به ازای هر 9 رج یک نیمچه‌نخ پود گذاشته شده که شبکه تولید شده مستطیل شکل با ابعاد 7.5-10mm (طول و عرض) بوده است. در پارچه سوم به ازای هر 6 رج یک نیمچه‌نخ پود گذاشته شده است که شبکه تولید شده مستطیل شکل با ابعاد 5-10mm (طول و عرض) بوده است (شکل 1).

2-3- روش آغشته سازی

در این تحقیق مقدار 0.2 سی‌سی از رزین اپوکسی به صورت نقطه‌ای در گوشه‌های روزنه‌های پارچه تقویت‌کننده بتن به‌وسیله قطره‌چکان مدرج استفاده شده است. ایجاد این نقاط برای ایجاد قفل و بسط‌هایی برای متراکم کردن نیمچه‌نخ در نقاطی منظم بوده است. مشخصات رزین مورد استفاده در این تحقیق به صورت مختصر در جدول 4 آمده است. برای جلوگیری از جمع‌شدگی نیمچه‌نخ در پارچه، پارچه در قالبی با کشش حداقلی (حدود 1kg/cm بسته شده است).

2-4- روش تهیه نمونه‌های بتنی

بتن ریزدانه پیشنهادی در این تحقیق دارای نسبت آب به سیمان پایینی (0.4) به دلیل دستیابی مقاومت فشاری بالا در نظر گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا سیمان، پودر میکرو سیلیس و سنگ‌دانه‌ها با همدیگر مخلوط شده است. از طرف دیگر فوق روان‌ساز به آب اضافه شده و به‌وسیله مخلوط-کن به صورت مطلوب مخلوط شده است. سپس آب و فوق روان‌کننده به مواد خشک اضافه شده و با همزن مخلوط شده تا بتن همگن شود و به مدت پنج دقیقه به بتن اجازه خارج شدن حباب داده شده است.

برای آزمون خمش چهارنقطه‌ای بتن مسلح شده با منسوج، با توجه به استاندارد ASTM C 947 نمونه‌ها با ابعاد 330mm, 50mm, 20mm تقویت‌شده با منسوج دارای تعداد نیمچه‌نخ مختلف با سه تکرار و نمونه بدون تقویت‌کننده به‌عنوان نمونه مرجع ساخته شده است. منسوج به صورت دستی در ارتفاع 5mm از کف قالب با کشش حداقلی جایگذاری و ثابت شد.

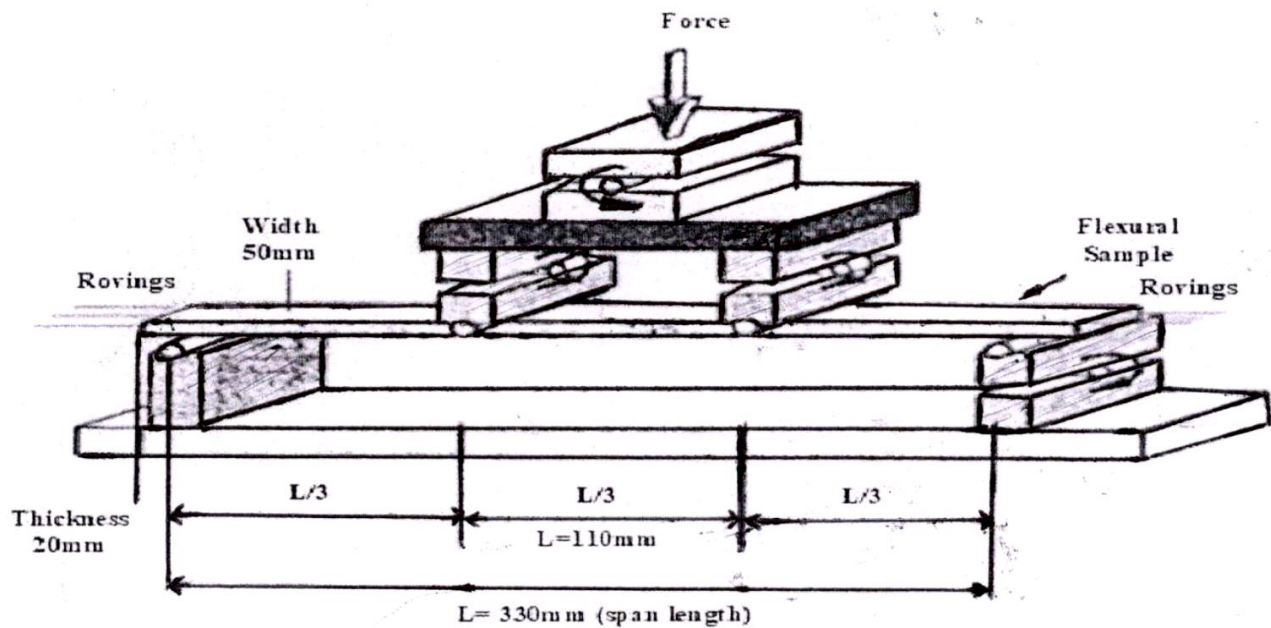


Fig. 2 four-point bending test set-up [15]

شکل 2 تنظیمات آزمایش مقاومت خمشی مطابق استاندارد [15]

Table 5 The samples specifications

جدول 5 مشخصات نمونه‌ها				
کد نمونه	تعداد روپنگ	تعداد اپوکسی	فاصله بین دو لایه‌ها	تعداد لایه‌ها
T ₁₂ 5-1	5	-	-	1
T ₉ 6-1	6	-	-	1
Group A				
T ₆ 8-1	8	-	-	1
T ₆ 10-1	10	-	-	1
T ₁₂ 10-2	10	-	-	2
T ₁₂ 15-3	15	-	-	3
T ₁₂ 3-E10-1	3	*	10mm	1
T ₁₂ 5-E10-1	5	*	10mm	1
Group B				
T ₆ 8-E5-1	8	*	5mm	1
T ₆ 10-E5-1	10	*	5mm	1
T ₆ 10-E5-2	10	*	10mm	2

2-6- معرفی نمونه‌های مورد آزمایش و کدگذاری

به طور کلی در این تحقیق تقویت‌کننده بتن به صورت پارچه حلقوی تار پودگذاری شده است که به دو گروه تقسیم شده است در گروه اول تقویت‌کننده بدون رزین اپوکسی بوده است و در گروه دوم برای افزایش بهره‌وری الیاف از رزین اپوکسی به صورت نقطه‌ای استفاده شده است. پارامترهای پارچه‌های مختلف و لایه گذاری مختلف و آغشته‌سازی جزئی تقویت‌کننده با رزین اپوکسی و فاصله مختلف نقاط اپوکسی در تقویت بتن با منسوج مورد آزمایش قرار گرفته است. برای سهولت شناخت نمونه‌های مورد آزمایش نمونه‌ها را به صورت اختصار به صورت (T(j/d) a-Eb-c) بیان شده است که در آن T: منسوج، j: تعداد پود (نیمچه‌نخ)، d: تعداد رج، a: تعداد نیمچه‌نخ تقویت‌کننده، E: اپوکسی، b: فاصله بین دونقطه اپوکسی، c: تعداد لایه‌ها است. مشخصات نمونه‌های تولید شده پارچه حلقوی تار تقویت‌کننده بتن در جدول 5 به صورت خلاصه آمده است.

3- معادلات تعادل حاکم بر مقاطع بتنی مسلح شده با منسوج روش

مقطع معادل

در این روش، رفتار خمشی مقطع به صورت خطی فرض می‌شود. سپس برای کل مقطع یک مقطع معادل در نظر می‌گیریم. بین مقطع الیاف و مقطع بتن رابطه I برقرار است.

$$A_e = \alpha A_f n \quad (1)$$

که:

A_e مقطع معادل، α میزان نفوذ بتن درون نیمچه‌نخ یا به عبارت دیگر فاکتور عملکرد الیاف، A_f سطح مقطع منسوج کربن، n نسبت مدول الاستیک الیاف به مدول بتن.

فاصله عمق مقطع تا مرکز (centroid) منطقه فشاری c از رابطه 2 قابل محاسبه است.

$$\frac{b}{2} c^2 + N \alpha A_f n * c - N \alpha A_f n * d = 0 \quad (2)$$

که:

b عرض مقطع، N تعداد نیمچه‌نخ، d عمق مؤثر (فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز نیمچه‌نخ کربن ممان اینرسی مقطع تیر از رابطه 3 قابل محاسبه است.

$$I = \frac{b * c^3}{3} + N \alpha A_f n * (d - c)^2 \quad (3)$$

با توجه به شکست تحت مسلح که الیاف پاره می‌شوند و شکست فوق مسلح که انهدام بتن رخ می‌دهد، $M_{n(over)}$ و $M_{n(under)}$ به ترتیب از رابطه 4 و 5 محاسبه می‌شود. با تسلیم الیاف و یا انهدام بتن در مقطع کل سازه دچار

4-1- تیرهای بتنی تقویت شده با منسوج بدون رزین اپوکسی (گروه

(A)

میانگین خصوصیات مکانیکی سه تکرار از نمونه‌های بتنی مسلح شده با پارچه‌های حلقوی تار با پودگذاری با تعداد نیمچه‌نخ مختلف (با سه شبکه مختلف) گروه A تحت خمش چهار نقطه‌ای در جدول 6 به صورت خلاصه آمده است. پارامترهای F_{cr} حداکثر نیرو تا ترک اول، δ_{cr} تغییرشکل نمونه تا ترک اول، A_{cr} چقرمگی نمونه تا ترک اول، f_{max} نیروی بیشینه، δ_{fmax} تغییرشکل در نیروی بیشینه، B_{max} حداکثر تنش، A_{fmax} چقرمگی در نیروی بیشینه و A_{ult} تغییرشکل نهایی است. همان‌طور که از جدول 6 مشخص است در گروه نمونه‌های کامپوزیتی با تعداد نیمچه‌نخ بیشتر دارای استحکام خمشی و چقرمگی بالاتر و تغییرشکل بیشتری دارند و به طور کلی در نمونه‌های تقویت شده با 10 نیمچه‌نخ خواص خمشی آن‌ها ارتقاء یافته است. میزان نفوذ بتن درون نیمچه‌نخ در نمونه‌های تقویت شده با منسوج دارای نیمچه‌نخ برابر متفاوت است و این امر سبب مقدار بالای انحراف معیار نمونه‌های مختلف می‌شود که این پدیده به دلیل ماهیت بتن‌های مسلح شده با منسوج است و اجتناب‌ناپذیر است [13].

شکل 3 نمودار نیرو- تغییرشکل نمونه‌های کامپوزیتی گروه A دارای تعداد مختلف نیمچه‌نخ کربن و نمونه بدون تقویت کننده را نشان می‌دهد. شکل 4 نمودار نیرو- تغییرشکل نمونه‌های کامپوزیتی گروه A با لایه گذاری مختلف را نشان می‌دهد.

شکست شده است به همین دلیل مطابق رابطه 6 کمترین مقدار هر دو ممان به عنوان ممان خمشی مقطع در نظر گرفته می‌شود.

$$M_n(under) = \frac{\sigma_{uf} * I}{(d - c)n} \quad (4)$$

$$M_n(over) = \frac{\sigma_{uc} * I}{c} \quad (5)$$

$$M_n = \text{Min}(M_n(under), M_n(over)) \quad (6)$$

پس از محاسبه ممان خمشی، با استفاده از رابطه 7 نیروی بیشینه تحمل شده توسط مقطع محاسبه می‌شود [6, 16].

$$f_{max} = \frac{6M_n}{l_{span}} \quad (7)$$

4- نتایج و بحث

خواص مکانیکی نمونه‌های تقویت شده با منسوج و نمونه بدون تقویت کننده (نمونه مرجع) در تغییرشکل مختلف تحت خمش چهارنقطه‌ای بررسی شده است. سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان به عنوان نشانه‌ای از چقرمگی نمونه کامپوزیتی (A) یا فراهم آوردن مکانیزم جذب انرژی در نظر گرفته می‌شود.

Table 6 Flexural properties of composite samples (group A)

پارامتر	F_{cr}	δ_{cr}	A_{cr}	f_{max}	δ_{fmax}	B_{max}	A_{fmax}	A_{ult}
کد نمونه	N	mm	N.mm	N	mm	MPa	N.mm	N.mm
T_{15-1} $\frac{12}{12}$	395.32 (87.94)*	0.47 (0.03)	61.46 (12.14)	624.90 (40.27)	5.44 (0.55)	11.42 (0.74)	2731.43 (350.89)	8447.55 (1492.71)
T_{16-1} $\frac{9}{9}$	366.56 (110.70)	0.58 (0.19)	58.71 (28.64)	648.65 (44.37)	5.29 (0.46)	11.86 (0.81)	2494.92 (627.50)	9342.09 (1457.87)
T_{18-1} $\frac{6}{6}$	509.08 (138.75)	0.63 (0.11)	122.97 (47.07)	1007.95 (71.80)	5.87 (0.16)	18.43 (1.31)	4125.30 (12.49)	5696.44 (424.45)
T_{110-1} $\frac{6}{6}$	399.50 (47.18)	0.50 (0.15)	89.18 (23.31)	1061.41 (149.35)	6.47 (0.44)	19.41 (2.73)	4877.07 (321.69)	14529.02 (1150.42)
T_{110-2} $\frac{12}{12}$	405.02 (187.58)	0.51 (0.08)	66.00 (39.03)	1149.65 (168.16)	6.49 (0.43)	21.02 (3.07)	5696.13 (482.61)	17168.98 (1781.75)

* Parenthesis values are standard deviation

Table 7 ANOVA statistical analysis for flexural properties of composite samples in group A

جدول 7 آنالیز آماری آزمون تحلیل واریانس برای خواص مکانیکی نمونه کامپوزیتی در گروه A

پارامتر	fcr	δcr	Acr	fmax	δfmax	Afmax	Ault
تعداد	.103	.462	.391	.000	.038	.000	.000
روینگ	بدون	بدون	بدون	با اهمیت	با اهمیت	با اهمیت	با اهمیت
مختلف	اهمیت	اهمیت	اهمیت				
تعداد	.963	.899	.427	.534	.957	.071	.097
لایه	بدون	بدون	بدون	بدون	بدون	بدون	بدون
مختلف	اهمیت	اهمیت	اهمیت	اهمیت	اهمیت	اهمیت	اهمیت

با توجه به نتایج، تیرهای بتنی تقویت شده با منسوج دارای 5 تا 15 نیمچه نخ کربن، در آزمون خمشی ابتدا بتن شکست خورده است به عبارت دیگر حالت کنترل کننده با بتن بوده است. زمانی که نمونه تحت خمش چهار نقطه‌ای است با افزایش نیرو در ابتدا بتن ترک خورده و الیاف بار اضافی تحمل نموده و سپس در تیر بتنی ترک‌های متعددی ایجاد شده است. این ناحیه ترک خوردگی متعدد سخت شونده نامیده شده است. با استفاده از تقویت کننده با تعداد نیمچه نخ بیشتر در یک لایه منسوج رفتار خمشی با شیب ملایمی بهبود یافته است و این روند تا نمونه تقویت شده با 10 نیمچه نخ ادامه داشته است. در نمونه تقویت شده با دو لایه و سه لایه منسوج (T10-2) مقاومت خمشی و چقرمگی کامپوزیت کمی افزایش یافته ولی تغییر شکل نمونه تغییرات محسوسی نداشته است. تیر بتنی مسلح شده با این نوع پارچه‌ها وقتی تحت خمش قرار گیرد، با افزایش بار وارده تیر ترک خورده است. سپس منسوج در بین ترک پل زده و بار اضافی وارده را تحمل نموده و دچار ترک خوردگی متعدد می‌شود. با افزایش نیرو ترک جدیدی رخ نداده و عرض ترک افزایش پیدا می‌کند و الیاف منسوج شروع به پاره شدن می‌کنند. این روند تا بیشترین نیروی وارده ادامه دارد (شکل 5). این منطقه پس از ترک خوردگی در بتن تقویت شده با منسوج همانند نیمچه نخ تقویت کننده بتن وجود دارد. پس از نیروی حداکثر نمونه بتنی تقویت شده با الیاف به شکست نهایی می‌رسد ولی در بتن تقویت شده با منسوج بعد از نیروی حداکثر به دلیل پیوستگی منسوج و داشتن الیاف مغزی بیشتر (به دلیل نفوذ کمتر بستر سیمانی درون نیمچه نخ کربن به دلیل متراکم شدن نیمچه نخ به وسیله فشار حلقه‌های بافت زنجیره‌ای) فرآیند شکست نمونه با شکل پذیری بسیار زیادی همراه است و شکست نهایی نمونه تدریجی خواهد بود. الگوی ترک خوردگی متعدد در شکل 6 نشان داده شده است.



Fig.5 Flexibility of the failure of reinforced samples

شکل 5 شکل پذیری شکست نمونه‌های تقویت شده

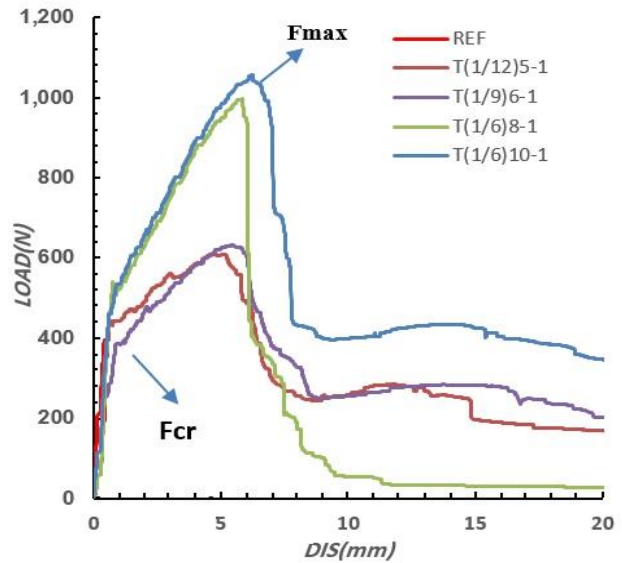


Fig.3 load-displacement curves of composite samples (group A) with different carbon roving weft

شکل 3 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی گروه A با نیمچه‌نخ‌های مختلف پدی کربن

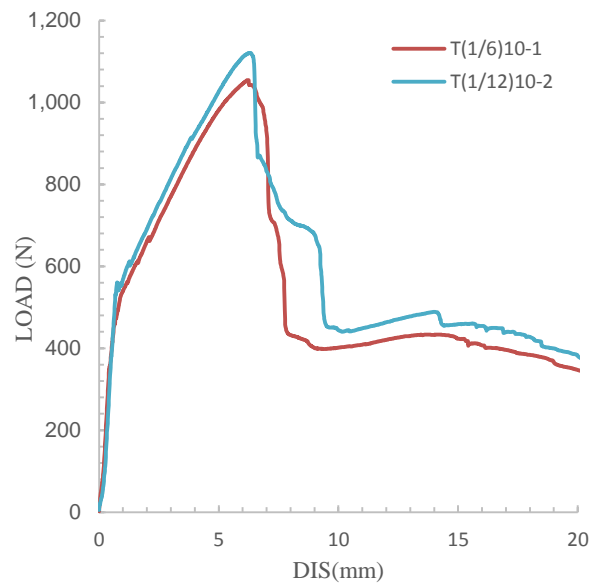


Fig.4 load-displacement curves of composite samples group A with different layers

شکل 4 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی گروه A با لایه‌گذاری مختلف

تیرهای بتنی تقویت شده با منسوج گروه A با تعداد نیمچه نخ مختلف و لایه گذاری مختلف تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها جهت بررسی اثر تعداد نیمچه نخ و لایه گذاری مختلف در منسوج تحت آنالیز آماری قرار گرفت. نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در سطح 95% تعداد نیمچه نخ کربن روی حداکثر نیرو، تنش، جابه‌جایی در نیروی حداکثر، چقرمگی در نیروی حداکثر و چقرمگی نهایی اثر داشته ولی در نیروی ترک اول، جابجایی در ترک اول و چقرمگی ترک اول تأثیر ندارد. همچنین نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در سطح 95% لایه گذاری اثر قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی نمونه کامپوزیتی ندارد (جدول 7).

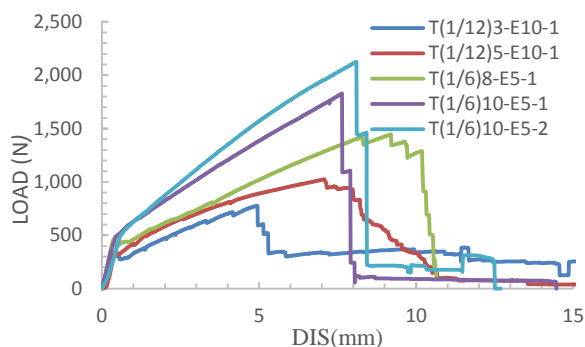


Fig.7 Load-displacement curves of composite samples (group B) with different carbon roving weft

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی گروه B با نیمچه‌نخ‌های مختلف کربن

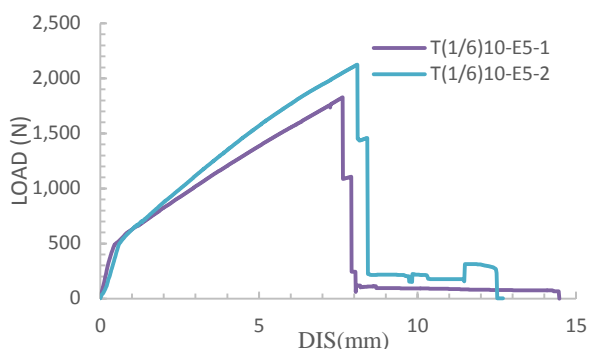


Fig.8 Load-displacement curves of composite samples (group B) with different layers

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی گروه B با لایه‌گذاری مختلف

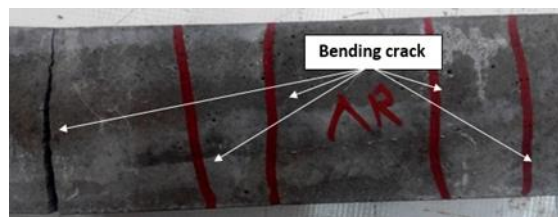


Fig.6 Crack pattern of TRCs code $T_{1/6} - 1$ on tension face

شکل 6 الگوی ترک‌خوردگی متعدد خمشی نمونه تقویت‌شده با منسوج دارای 8 نیمچه‌نخ

4-2- نمونه‌های تقویت‌شده با منسوج آغشته شده جزئی اپوکسی (گروه B)

خواص خمشی نمونه‌های تقویت‌شده با پارچه‌های آغشته شده جزئی اپوکسی (گروه B) در جدول 8 خلاصه شده است.

شکل 7 نمودار نیرو- تغییرشکل نمونه‌های کامپوزیتی گروه B دارای تعداد مختلف نیمچه‌نخ کربن را نشان می‌دهد. شکل 8 نمودار نیرو-تغییرشکل نمونه‌های کامپوزیتی گروه B با لایه گذاری مختلف را نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها جهت بررسی اثر تعداد نیمچه‌نخ و لایه گذاری مختلف نمونه‌های کامپوزیتی گروه B تحت آنالیز آماری قرار گرفت. نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در سطح 95% تعداد نیمچه‌نخ کربن روی خواص مکانیکی اثر قابل توجهی دارد. همچنین نتایج آزمون تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در سطح 95% لایه گذاری مختلف روی حداکثر نیروی، تنش، چقرمگی در نیروی حداکثر، چقرمگی نهایی، نیروی ترک اول و چقرمگی در ترک اول تأثیر داشته ولی در جابجایی در ترک اول و جابجایی در نیروی ماکزیمم اثر قابل توجهی ندارد. در خصوصیات مکانیکی نمونه کامپوزیتی ندارد (جدول 9).

Table 8 Flexural properties of composite samples (group B)

جدول 8 مشخصات مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی گروه B

پارامتر	Fcr	δ_{cr}	Acr	fmax	δf_{max}	Bmax	Afmax	Ault
کد نمونه	N	mm	N.mm	N	mm	MPa	N.mm	N.mm
$T_{1/12}3 - E10 - 1$	400.10 (23.43)	0.47 (0.10)	101.29 (22.97)	789.24 (46.84)*	5.12 (0.17)	14.43 (0.86)	2664.13 (157.71)	5444.84 (1069.81)
$T_{1/12}5 - E10 - 1$	392.81 (2.27)	0.52 (0.20)	47.02 (8.99)	1077.09 (89.70)	7.99 (0.81)	19.69 (1.15)	5872.56 (627.66)	7739.99 (994.42)
$T_{1/6}8 - E5 - 1$	472.24 (44.42)	0.40 (0.03)	104.16 (15.98)	1501.63 (146.83)	9.05 (0.69)	27.45 (2.68)	8551.35 (1415.49)	6760.12 (5892.24)
$T_{1/6}10 - E5 - 1$	-	-	-	1831.32 (29.74)	7.67 (0.41)	33.48 (0.54)	8791.03 (771.11)	9563.95 (1058.45)
$T_{1/6}10 - E5 - 2$	-	-	-	2159.80 (76.98)	8.32 (0.19)	39.49 (1.41)	11026.39 (127.76)	11656.78 (687.03)

* Parenthesis values are standard deviation

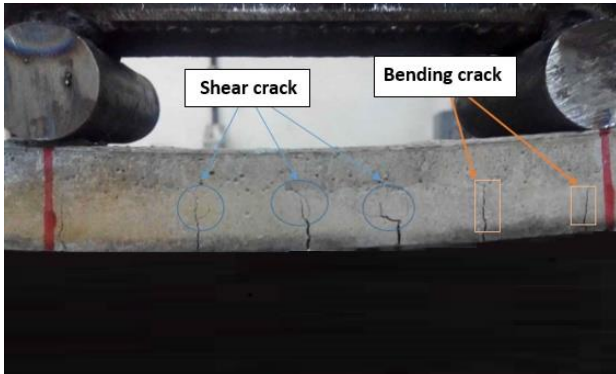


Fig.11 Failure mechanism and cracks pattern of TRCs beam code $T_{18} - E5 - 1$ (lateral view)

شکل 11 مکانیزم شکست و الگوی ترک تیر بتنی تقویت شده با منسوج آغشته شده جزئی اپوکسی کد $T_{18} - E5 - 1$ (نمای جانبی)

باید توجه داشت که با افزایش بهره‌وری منسوج در رفتار خمشی تیرهای TRC می‌توان میزان استفاده از منسوج را کاهش داد. این موضوع در کاهش قیمت تمام شده این نوع تیرها مؤثر است. آغشته سازی جزئی با اپوکسی در بهره‌وری الیاف مؤثر است. وقتی تیر بتنی تقویت شده با منسوج آغشته شده جزئی با اپوکسی تحت بار خمشی قرار گرفته، با افزایش نیرو تیر ترک خورده و با گسترش ترک دو حالت پیش خواهد آمد: 1- ترک به قسمت منسوج بدون اپوکسی برخورد کرده و با افزایش نیرو به منسوج انتقال یافته و الیاف منسوج شروع به پاره شدن کرده و ترک به صورت مستقیم (خمشی) گسترش می‌یابد. 2- اگر ترک به نقاط اپوکسی روی منسوج برخورد کند، به دلیل چسبندگی بالای اپوکسی با بتن، بتن در برابر گسترش ترک مقاومت می‌نماید. در نتیجه ترک نمی‌تواند از نقاط اپوکسی عبور نماید و تغییر مسیر داده و به صورت برشی پیشروی می‌نماید. در نهایت ترک نقاط اپوکسی را دور زده و سپس به صورت ترک خمشی ادامه پیدا می‌کند (شکل 11). این مکانیزم رفتار ترک باعث تحمل اضافی بار وارده و شکل پذیری بیشتر نمونه بتنی خواهد شد.

در حقیقت استفاده جزئی و یا نقطه‌ای اپوکسی بر روی منسوج تقویت کننده باعث افزایش ثبات ابعادی پارچه شده است. نقاط اپوکسی باعث افزایش اتصال مکانیکی با بستر سیمانی شده و مهم‌تر از آن مشارکت الیاف در باربری را افزایش داده است. در نتیجه رفتار تیر بتنی تقویت شده با منسوج آغشته شده جزئی اپوکسی دارای مقاومت خمشی و شکل پذیری بیشتری نسبت به تیر تقویت شده با منسوج بدون اپوکسی است. اثر اپوکسی با توجه به نتایج آزمون تحلیل واریانس در جدول 10 آمده است.

Table 10 debonding failure of concrete beam reinforced with one layers of textiles impregnated partially by epoxy

جدول 10 آنالیز آماری آزمون تحلیل واریانس برای اثر اپوکسی در تقویت بتن با

منسوج گروه A و B

پارامتر	fcr	δ_{cr}	Acr	fmax	δf_{max}	Afmax	Ault
	0.06	0.07	0.06				0.840
	7	1	5	0.001	0.000	0.000	
اپوکسی	بدون	بدون	بدون	با اهمیت	با اهمیت	با اهمیت	بدون
	اهمیت	اهمیت	اهمیت				اهمیت

Table 9 ANOVA statistical analysis for flexural properties of reinforced concrete samples in the group B

جدول 9 آنالیز آماری آزمون تحلیل واریانس برای خواص مکانیکی نمونه کامپوزیتی در گروه B

پارامتر	fcr	δ_{cr}	Acr	fmax	δf_{max}	Afmax	Ault
تعداد	000	000	000	000	.000	.000	.001
روینگ	بااهمیت	بااهمیت	بااهمیت	بااهمیت	بااهمیت	بااهمیت	بااهمیت
مختلف							
تعداد	.002	.069	.008	.002	.069	.008	.045
لايه	بااهمیت	بدون	بااهمیت	بااهمیت	بدون	بااهمیت	بااهمیت
مختلف		اهمیت			اهمیت		

در نمونه‌های تقویت شده با منسوج دارای 3 تا 8 نیمچه‌نخ، ترک متعدد خورده و روندی سخت شونده داشته و در انتها نمونه با افزایش عرض یک ترک شکست می‌خورد. نمونه تقویت شده با منسوج دارای 8 نیمچه‌نخ بیشترین تغییر شکل را داشته و در نمونه‌ها ترک‌های برشی هم مشاهده شده است. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های تقویت شده با منسوج دارای 10 نیمچه‌نخ تا نیروی بیشینه پیش رفته و ترک ایجاد نشده یا ترک‌ها به صورت مویی می‌باشند. استحکام خمشی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های تقویت شده با منسوج دارای نیمچه‌نخ کمتر بیشتر بوده ولی شکل پذیری کمتری دارد. رفتار خمشی این تیرها ترد و شکننده بوده و روند شکست نمونه با قله کن شدن بتن در منطقه فشاری بوده و بعد از شکست فشاری شکست اتصال رخ داده است (شکل 9 و 10). استحکام خمشی نمونه‌های تقویت شده با منسوج دو لا نسبت به نمونه یک‌لا ارتقاء داده شده است ولی لایه گذاری در تغییر شکل و چقرمگی نمونه تقویت شده اثر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

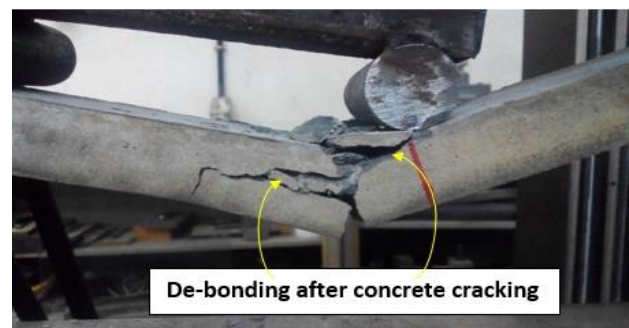


Fig.9 Comprehensive failure of concrete beam reinforced with two layers of textiles impregnated partially by epoxy

شکل 9 شکست فشاری تیر بتنی تقویت شده با دو لایه منسوج آغشته سازی جزئی اپوکسی

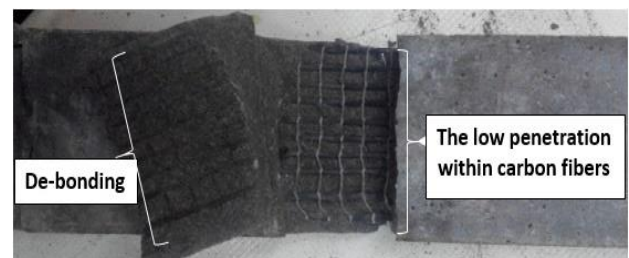


Fig.10 Debonding failure of concrete beam reinforced with one layers of textiles impregnated partially by epoxy

شکل 10 شکست اتصال تیر بتنی تقویت شده با یک لایه منسوج با آغشته سازی جزئی اپوکسی

خواص خمشی در تیرهای مسلح شده با منسوج آغشته سازی جزئی با اپوکسی در مقایسه با منسوج بدون اپوکسی 50% ارتقاء داده شده است.

6- مراجع

- [1] Mobasher, B., "Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites", CRC press, 2011 .
- [2] Dolatabadi, M. K., Janetzko, S. and Gries, T., "Geometrical and Mechanical Properties of a Non-Crimp Fabric Applicable for Textile Reinforced Concrete "The Journal of the Textile Institute, Vol. 105, No. 7, pp. 711-716, 2014.
- [3] Ghaharpour, F., Bahari, A. and Abbasi, M., "Synthesis and Characterization of Cement- Cnt Composite Produced by Cvd Process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites ,Vol. 4, No. 3, 1396.
- [4] Cohen, Z. and Peled, A., "Controlled Telescopic Reinforcement System of Fabric-Cement Composites—Durability Concerns" Cement and Concrete Research, Vol. 40, No. 10, pp. 1495-1506, 2010.
- [5] Dolatabadi, M. K., Janetzko, S., Gries, T., Kang, B.-G. and Sander, A., "Permeability of Ar-Glass Fibers Roving Embedded in Cementitious Matrix" Materials and structures, Vol. 44, No. 1, pp. 245-251, 2011.
- [6] Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M. and Jeddi, A. A., "Flexural Design of Textile-Reinforced Concrete (TRC) Using Warp-Knitted Fabric with Improving Fiber Performance Index (Fpi)" The Journal of The Textile Institute, Vol. 109, No. 4, pp. 492-500, 2018.
- [7] Eslami-Farsani, R., Sari, A. and Khosravi, H., "Mechanical Properties of Carbon Fibers/Epoxy Composite Containing Anhydride Self-Healing Material under Transverse Loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, 1395.
- [8] Bank, L. C., "Composites for Construction: Structural Design with Frp Materials", John Wiley & Sons, 2006.
- [9] Peled, A. and Mobasher, B., "Tensile Behavior of Fabric Cement-Based Composites: Pultruded and Cast" Journal of materials in civil engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 340-348, 2007.
- [10] Dolatabadi, M. K., Janetzko, S. and Gries, T., "Segmentary Impregnating Textile Reinforced Concrete, Methodology and Introduction" in Aachen-Dresden international textile conference, Aachen, 2010.
- [11] Dvorkin, D. and Peled, A., "Effect of Reinforcement with Carbon Fabrics Impregnated with Nanoparticles on the Tensile Behavior of Cement-Based Composites" Cement and Concrete Research, Vol. 85, pp. 28-38, 2016.
- [12] Nadv, R., Peled, A., Mechtcherine, V., Hempel, S. and Schroefl, C., "Micro-and Nanoparticle Mineral Coating for Enhanced Properties of Carbon Multifilament Yarn Cement-Based Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 111, pp. 179-189, 2017.
- [13] Kamani, R., Dolatabadi, M. K., Jeddi, A. A. A., & Nasrollahzadeh, K. Damage Detection of Carbon Fiber-reinforced Concrete Under Bending Test.
- [14] Bramshuber, W., "Report 36: Textile Reinforced Concrete-State-of-the-Art Report of Rilem Tc 201-Trc", RILEM publications, 2006.
- [15] ASTM International, Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- [16] Kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Nasrollahzadeh, k., and Jeddi, A. A., " Bending load capacity of carbon fiber reinforced concrete beams as a function of fiber performance index (FPI) " The Journal of The Textile Institute, in Press.

نیروی بیشینه مقطع از روش مقطع برای نیمچه‌نخ‌های مختلف در منسوج از روابط 1 تا 7 محاسبه شده است. از میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در مقایسه با مقادیر تئوری مقدار فاکتور عملکرد الیاف (α) ارزیابی می‌شود. مقدار α در منسوج تقویت‌کننده بتن 0/21 ارزیابی شده است. شکل 12 مقدار نیروی بیشینه برای منسوج تقویت‌شده دارای 5، 8 و 10 نیمچه‌نخ در سه حالت تئوری و منسوج تقویت‌شده با منسوج بدون اپوکسی گروه A و منسوج آغشته‌شده جزئی اپوکسی B را نشان می‌دهد. همانطور که از شکا مشخص است آغشته‌سازی جزئی اپوکسی باعث افزایش نیروی بیشینه می‌شود.

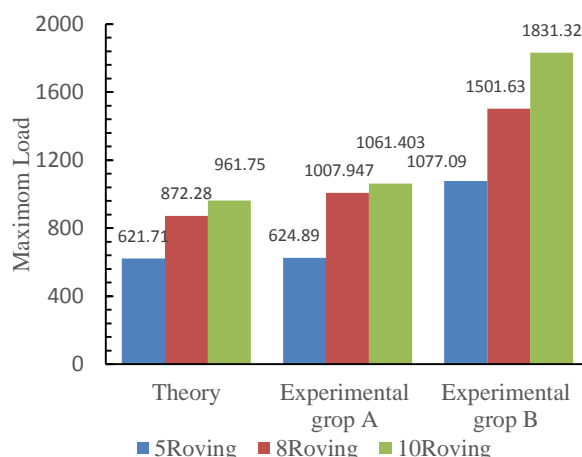


Fig. 12 Compare maximum load of theory and composite samples (group A and group B) with different carbon roving

شکل 12 مقایسه نیروی بیشینه تئوری و نمونه‌های کامپوزیتی گروه A و گروه B با نیمچه‌نخ‌های مختلف کربن

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان مشارکت الیاف در تقویت‌کنندگی بتن و رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با پارچه‌های حلقوی تار پودگذاری شده و آغشته شده منقطع اپوکسی دارای تعداد نیمچه‌نخ مختلف بررسی شده است. رفتار خمشی تیر در تمامی نمونه‌های منسوج تقویت‌کننده بتن ارتقا داده شده است. رفتار تیر بتنی تقویت‌شده با منسوج بعد از ترک اول به گونه است که افزایش نیروی وارده را با ترک‌خوردگی متعدد به صورت سخت شونده تا نیروی بیشینه تحمل نموده است. سپس بعد از نیروی بیشینه مکانیزم شکست نمونه‌ها با شکل‌پذیری زیاد به صورت نرم شونده با افزایش عرض ترک همراه بوده است. تحمل نیرو توسط منسوج بعد از نیروی بیشینه تا جای است که بتن کاملاً جدا شده ولی سازه هنوز فرونریخته است. باربری بتن تقویت‌شده با دولایه منسوج نسبت به یک‌لا مقداری ارتقاء می‌یابد. آغشته سازی منقطع منسوج با اپوکسی در تقویت بتن بسیار مؤثر بوده است. این افزایش محسوس رفتار خمشی به دلیل هندسه اپوکسی در آغشته سازی و افزایش ثبات ابعادی پارچه است. نقاط اپوکسی در چهارگوشه روزنه پارچه باعث شده که ثبات ابعادی پارچه افزایش داده شود و به‌واسطه برجستگی بیشتر و اتصال مکانیکی قوی‌تر با بتن و مهم‌تر از آن به دلیل ایجاد مکانیزم شکست منحصر به فرد در این نمونه‌ها میزان مشارکت الیاف در باربری منسوج‌های آغشته شده منقطع اپوکسی افزایش یافته است و به طور کلی