تحقیقات بتن
سال هفدهم، شمارهٔ سوم
پاییز ۱۴۰۳
ص ۷۹ – ۶۳
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

بررسی تأثیر استفاده از مصالح FRP بر مقاومت‌کششی بتن پارچه‌ای

علی طاهری
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، آب و انرژی ، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ایران.
محمد فیاض *
استادیار گروه عمران دانشکده عمران، آب و انرژی دانشگاه جامع امام حسین (ع) تهران، ایران.
مجتبی ضیاء شمامی
گروه مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین (ع) تهران، ایران.

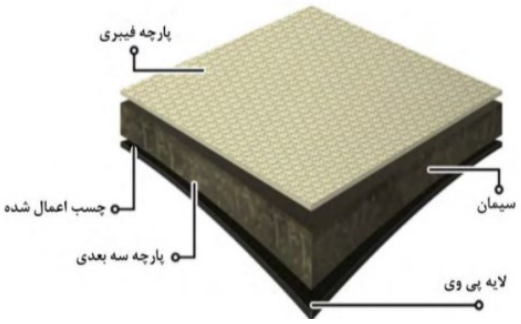
چکیده
بتن پارچه‌ای یک کامپوزیت ساخته شده با پارچه اسپیسر سه‌بعدی است که با استفاده از مواد سیمانی و از طریق آغشته نمودن پارچه با سیمان ساخته می‌شود. بتن پارچه‌ای ضعف‌هایی در خواص مکانیکی خود از جمله مقاومت کششیدارد. تقویت بتن پارچه‌ای با مصالح FRP می‌تواند به‌طور مؤثری موجب بهبود و ارتقای خواص مکانیکی بتن پارچه‌ای و به‌طور خاص مقاومت کششی آن گردد؛ لذا این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از مواد پلیمری FRP به‌منظور بهبود و ارتقای خواص کششی بتن پارچه‌ای پرداخته شده است. در این پژوهش از سه نوع الیاف شیشه (GFRP)، کربن (CFRP) و آرامید (AFRP) نوع کولار، در تعداد لایه‌های مختلف در دو تنوع تاروپود برای تقویت بتن پارچه‌ای تحت بارکششی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، استفاده از الیاف FRP به‌طور قابل‌توجهی سبب ارتقای خواص مکانیکی بتن پارچه‌ای می‌شود به‌نحوی‌که استفاده از الیاف شیشه تک‌لایه سبب رشد قابل‌ملاحظه‌ای شده، و تقویت با لایه‌های الیاف کربن و آرامید (کولار) منجر به ارتقای بیش از ۵ و ۷برابری مقاومت کششی، نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن پارچه‌ای، خواص مکانیکی، مقاومت کششی، الیاف شیشه GFRP،کربن CFRP، آرامید AFRP.

* نویسنده مسئول: m.fayyaz@modares.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی با مصرف بیش از ۱۳ میلیارد تن در سال جایگاه ویژه‌ای را در ساخت انواع سازه‌ها در جهان را دارا می‌باشد [۱]. در سالیان اخیر با ایجاد تغییرات و ابتکارات نوآورانه، محصولات جدیدی در حوزهٔ سازه‌های بتنی ارائه گردیده است. از جمله این ابتکارات می‌توان به بتن پارچه‌ای که نوع خاص و جدیدی از این مصالح ساختمانی می‌باشد اشاره نمود. بتن پارچه‌ای یک محصول کامپوزیتی انعطاف‌پذیر متشکل از پارچه‌های سه بعدی آغشته به پودر سیمان است (شکل۱) که در صورت پاشیده شدن آب بر روی سطح آن، در مدت زمان کوتاهی(بسته به نوع سیمان مصرفی متفاوت است) سخت‌شده و لایه‌ای نازک،بادوام ، ضدآب و مقاوم دربرابر آتش ایجاد می‌کند. [۲] بتن پارچه‌ای اولین‌بار در سال۲۰۰۵میلادی توسط بروین و کراوفورد ارائه گردید.این محصول امروزه صنعتی سازی گردیده و کشورهای مختلفی اقدام به تولید این محصول نموده‌اند. باتوجه به اینکه شرکت Concrete Canvas نخستین بار اقدام به تولید صنعتی این محصول نمود امروزه نیز این محصول با همین نام،بتنCC معرفی می‌گردد. [۳].. عمل‌آوری این محصول از دو طریق اسپری نمودن آب و یا غوطه‌ور شدن کامل در آب صورت می‌گیرد.. سرعت اجرا بتن پارچه‌ای در مقایسه با بتن معمولی ۱۰ برابر سریع‌تر است [۴].



شکل ۱- اجزای بتن پارچه‌ای[۴]

از جمله کاربردهای بتن پارچه‌ای می‌توان به استفاده در تثبیت خاک‌ها و ترانشه‌ها، ترمیم و تقویت دیوارها و گابیون‌ها، لاینینگ کانال‌ها، دیوارهٔ مخازن و پالایشگاه‌ها و نیز ساخت پناهگاه‌ها و سنگرهای سریع‌الاحداث گردیده است.تاکنون مطالعات محدودی در خصوص بررسی خواص و ارتقائ عملکرد بتن پارچه‌ای صورت گرفته است.. تان [۵] در سال ۱۹۹۶، مقاوم‌سازی دال با استفاده از ورق‌های FRPرا مورد مطالعه قرار داده است. او در این پژوهش به تأثیر نوع الیاف، تعداد لایه‌ها (۱،۲و ۳ لایه)، ابعاد و فاصله الیاف‌ها نسبت به یک‌دیگر را مورد مقایسه قرارداد. وانگ و همکاران۲۰۱۰[۶] ، به بررسی خواص مکانیکی از جمله مقاومت خمش، مقاومت کشش و فشار کامپوزیت‌های پارچه اسپیسر سه‌بعدی تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداخته‌اند. هان و همکاران [۷] سال ۲۰۱۶، به بررسی تأثیر پارچه اسپیسر سه بعدی در میزان افت و انقباض بتن پارچه‌ای پرداختند. نتایج نشان می‌دهد پارچه اسپیسر سه‌بعدی علاوه بر اینکه ازترک‌خوردگی‌ناشی‌از انقباض بتن جلوگیری می‌کند بلکه موجب افزایش ظرفیت کششی بتن پارچه‌ای نیز می‌گردد. ژانگ و همکاران[۸] سال ۲۰۱۷، مطالعات محدودی را با اسافاده از الیاف کولارAFRP[1] به منظور بهبود خواص مکانیکی بتن‌پارچه‌ای مورد بررسی قراردادند. آن‌ها در طی بررسی تجربی نمونه‌های بتن‌پارچه تولید شده با سیمانCSA[2] را به مدت ۱۰ روز عمل‌آوری نموده و سپس نمونه‌ها را با الیافFRP[3] آرامید (کولار) و با رزین اپوکسی تقویت و در دو جهت تار و پود مورد بررسی مقاومت فشاری، کششی و خمشی قراردادند.پس از تقویت، استحکام کششی بتن پارچه‌ای در جهت تار و در جهت پود به ترتیب به مقدار ۸/۷۴ و ۸/۷۶ مگاپاسکال رسید که به ترتیب ۶ و ۹ برابر بیشتر از بتن پارچه‌ای‌فاقد تقویت می‌باشد. لی و همکاران[۹]، به مقایسه خواص‌مکانیکی و پایداری حفاظت از شیب بتن پارچه‌ای و سایر روش‌های معمول همچون استفاده از شاتکریت در پایداری شیب‌ها پرداختند. آنان نشان دادند استفاده از بتن پارچه‌ای تقویت شده با AFRP موجب افزایش مقاومت کششی تا ۹ مگاپاسکال می‌گردد؛ در حالی که مقاومت بتن پارچه‌ای فاقد تقویت ۱/۴۳ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با AFRP قابلیت برآورده کردن الزامات شیب‌هایی با ارتفاع حدود ۱۰ متر را دارد به علاوه بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با AFRP برای پروژه‌های محافظت از شیب‌هایی که نیازمند ساخت و ساز سریع و در مواجهه با باران و محیط‌های سخت هستند، مناسب است. در سال ۲۰۲۱، جیانگانگ نیو[4] و

[1] - Aramid Fiber Reinforced Polymers
[2] - Calcium Sulfo Aluminate cement-
[3] Fiber Reinforced Polymers
[4] Jiangang Niu

همکاران [۱۰]، به بررسی تأثیر شکل مقطع ستون‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی بتن پارچه‌ای تقویت‌شده (مسلح) با الیاف کربن CFRP پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌داد استفاده از بتن پارچه‌ای(CC) می‌تواند گسیختگی تُرد نمونه‌ها را کاهش دهد همچنین ظرفیت باربری نمونه‌های پوشش‌داده شده با بتن پارچه-ای(CC)و CFRP بیشتر از نمونه‌هایی است که تنها با الیاف کربنCFRP پوشش داده شده‌اند. فیاض و همکاران [۱۱]، به بررسی عملکرد حفاظتی بتن پارچه‌ای در ساخت سنگرهای نظامی در برابر انفجارهای نزدیک به زمین پرداختند که نشان می‌دهد که بتن پارچه‌ای با ضخامت مناسب به‌طور مؤثری عملکرد حفاظتی سنگرها و پناهگاه‌ها را را تحت بارهای انفجاری بهبود می‌بخشد. جعفری و همکاران[۱۲] ، به بررسی پاسخ دینامیکی خطوط لوله مدفون تقویت‌شده شده با پانل‌های بتن پارچه ای تحت بارگذاری انفجاری پرداختند که نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های بتن پارچه‌ای، تنش ناشی از بارگذاری انفجار سطح در دیواره های خطوط لوله ی دفن شده در بیشتر موارد کاهش یافته است.

در این پژوهش علاوه بر ارزیابی خواص بتن پارچه‌ای فاقد تقویت تولید داخل، ۱۶طرح در دو تنوع تاری و پودی به منظور بهبود خواص وارتقا عملکرد بتن پارچه‌ای با استفاده از مواد FRP در سه نوع الیاف شیشه[1](GFRP)،کربن(CFRP)[2]وآرامید[3](AFRP) تحت بار کششی مورد بررسی قرارگرفته است.

۲- روش انجام تحقیق و آزمایش‌ها

۲-۱-مواد و روش‌ها

همان‌طور که اشاره گردید بتن پارچه‌ای از سه بخش، پارچه اسپیسر، سیمان و لایه آب‌بند کننده پی وی سی تشکیل‌شده است. با توجه به آنکه مطالعات محدود انجام‌شده در خصوص خواص مکانیکی بتن پارچه‌ای عمدتا مبتنی بر استفاده از سیمان CSA می‌باشند و به علت دردسترس نبودن این نوع سیمان آلومیناتی،سیمان معمول مورد استفاده در نمونه داخلی بتن پارچه‌ای، سیمان پرتلند تیپ۲ می‌باشد. بدین منظور ابتدا خواص مقاومتی سیمان پرتلند تیپ۲ مورد استفاده، ارائه می‌گردد. آزمون خواص مکانیکی سیمان (مقاومت فشاری و بلین) بر اساس استانداردASTM C109 ،ASTM C204و همچنین استاندارد ملی ۳۹۰ در سنین ۱، ۱۰ و۲۸ روزه صورت پذیرفته است. سپس نمونه‌های بتن پارچه‌ای با و بدون تقویت با مصالح تحت ازمون کشش بر اساس استاندارد ASTM D6768 در۳ تکرار برای هر طرح در دوجهت تار و پود صورت گرفته است. سیمان مورد استفاده از در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ۲ تهران و پارچه اسپیسر مورد استفاده از نوع پارچه می‌باشد که خواص آن‌ها به ترتیب در جداول۲،۱ و۳ ارائه گردیده است. همچنین برای تقویت بتن پارچی نیز از الیاف شیشه کربن و کولار با وزن۲۰۰ گرم با بافت پلین استفاده شده است که خواص هر یک از این الیاف‌ها در جدول۴ و رزین اپوکسی مورد استفاده در جدول ۵ ارائه گردیده است.

جدول۱- نتایج خواص مکانیکی سیمان پرتلند تیپ۲

ویژگی		استاندارد	مقدار
میزان نرمی تست بلین		ASTMC204	۲۸۰۰cm^2/gr
مقاومت فشاری	۳ روزه	ASTMC109	۱۹/۶۱Mpa
	۱۰روزه		۳۰/۴۰Mpa
	۲۸ روزه		۳۸/۲۶Mpa

جدول۲-مشخصات چسب هات ملت مورد استفاده [۱۹]

دمای ذوب	مدت‌زمان سفت‌شدگی	مقاومت کششی
۱۱۰-۹۰۰C°	۳۰ ثانیه‌تا۵ دقیقه	۵۰kg/cm^2

جدول ۳- مشخصات پارچه اسپیسر

نوع پارچه	عرض (cm)	ضخامت (mm)	دانسیته(gr/m^2)	مقدار تراکم نخ پارچه اسپیسر ($1/cm^2$)
پارچه اسپیسرPET	۱۱۰	۱۳	۹۰۰≥	۷۰

[1] -Glass Fiber Reinforced Polymers
[2] -Carbon Fiber Reinforced Polymers
[3] - Aramid Fiber Reinforced Polymers

جدول ۴-خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌هایFRP مورد استفاده[۲۲]

نوع الیاف	نوع بافت	دانسیسته (Kg/m^3)	وزن (g/m^2)	مقاومت‌کششی (GPa)	مدول‌کششی (MPa)	درصدتغییر طول (٪)	ضریب انبساط حرارتی ($\times^{-6}$۱۰/°C)
شیشه	Plain	۲۵۴۰	۲۰۰	۳۴۵۰	۷۲/۴	۳/۲	۵
کربن	Plain	۱۷۸۰	۲۰۰	۳۸۰۰	۲۳۰	۱/۲	۱۲
کولار	Plain	۱۴۷۹	۲۰۰	۳۷۹۲	۱۳۱	۲/۲	۵۹

جدول۵- خصوصیات مکانیکی اپوکسی LR630 مورد استفاده[۲۲]

نوع رزین[۱]	دانسیته(Kg/m^3)	مقاومت کششی(MPa)	مدول کششی(GPa)	درصدتغییر طول(٪)	حداکثر حرارت(C°)	زمان ژل شدن(ساعت)	زمان پخت اولیه(ساعت)
اپوکسی	۱۱۵۰	۹۰	۳/۵۱	۵/۵	۹۰	۲	۸

۱- ضریب انبساط حرارتی رزین اپوکسی LR630، ۷۰ ($\times^{-6}$۱۰/°C) می‌باشد.

۲-۲-مقاومت فشاری

از منظر استحکام و مقاومت سیمان مهم‌ترین جز بتن پارچه‌ای محسوب می‌گردد. در واقع حتی با وجود پارچه‌اسپیسر با خواص مکانیکی بالا،تراکم فشرده و جنس آرامید (بهترین نوع پارچه اسپیسر) در نهایت عامل تعیین‌کننده مقاومت بتن پارچه‌ای سیمان مورد استفاده در بتن پارچه‌ای می‌باشد[۱۳]. منطبق با نظر ASTM D8329دو ویژگی نرمی (ریزی) سیمان و مقاومت فشاری خمیر-سیمان اهمیت بیشتری دارد[۱۳]؛ چراکهکه نرمی سیمان بر جاگیری آن در داخل پارچه اسپیسر تأثیر مستقیمی دارد. نرمی سیمان موجب توزیع صحیح‌تر و یکنواخت‌تر سیمان در داخل پارچه می‌گردد. به سبب آنکه در مقاومت فشاری بتن پارچه‌ای می‌توان با درصدی خطا از مقاومت فشاری پارچه صرف نظر نموده و تمام خاصیت فشاری بتن پارچه‌ای را مستقیما به مخلوط سیمانی نسبت داد لذا بر اساس استاندارد بتن پارچه‌ای، مقاومت فشاری بتن پارچه‌ای با استفاده از روش استاندارد ASTM C109تعیین می‌شود [۱۳-۱۴].

نمونه‌های مورد بررسی مقاومت فشاری خمیر سیمان مطابق با استاندارد ASTM C109[۱۵] در سه سن ۳، ۱۰و ۲۸ روز در ۳ تکرار در آزمایشگاه خاک و مصالح دانشگاه جامع امام حسین(ع) مورد بررسی قرارگرفتند. مقاومت فشاری متوسط خمیرسیمان در سن ۳ روزه، ۱۹/۶۱مگاپاسکال، درسن۱۰ روز ۳۰/۴ مگاپاسکال و در سن ۲۸ روز۳۸/۲۶ مگاپاسکال می‌باشد که افزایش-۲۲/۵۶درصدی را نسبت به مقاومت فشاری ۱۰ روزه خمیر سیمان نشان می‌دهد. یکی از روش‌های ارزیابی میزان نرمی سیمان که در این مقاله صورت پذیرفته تعیین آن به کمک روش بلین می‌باشد. بر اساس استانداردASTMC204 تعیین میزان نرمی –بلین شامل چهار مرحله اصلی می‌باشد[۱۶].

ابتدا صفحه مشبک درون استوانه دستگاه بلین قرار می‌گیرد. در ادامه مقدار مشخصی از محصول که طبق رابطه خاصی بدست می‌آید را درون محفظه ریخته سطح صاف می‌گردد؛ سپس با پیستون مخصوص به سطح آن فشار وارد کرده تا بطور کامل فشرده شود. در این مرحله باید هوای یک بازو از لوله U شکل را خارج گردد. پس از آن باید شیر تخلیه هوا را بسته و پیستون را از لوله خارج شود. در گام چهارم باید هوای موجود در یک بازوی لوله U شکل را به آهستگی تخلیه شود. به طوری که محلول داخل لوله به بالاترین نشانه لوله برسد. در لحظه‌ای که مایع سنج به نشانه دوم لوله رسید آن را به کار اندازید و زمانی که به نشانه سوم لوله U شکل رسید آن‌را متوقف می‌کنیم. با استفاده از فرمول مندرج در استاندارد ASTMC204سطح مخصوص(میزان نرمی) بدست آمده، ۲۸۰۰cm^2/gr می‌باشد.

زمان گیرش اولیه سیمان پرتلند تیپ۲ تهران بر اساس داده برگ کارخانه تولیدکننده ۱۲۰ دقیقه و مدت زمان گیرش نهایی این سیمان ۲۱۰ دقیقه(۳/۵ ساعت) می‌باشد[۱۷]. پس از اندازه‌گیری میزان بلین و مقاومت فشاری خمیر سیمان مورد استفاده در پنل‌های بتن پارچه‌ای ساخته شد.

۲-۳- مقاومت کششی بتن پارچه‌ای تقویت‌شده‌بامصالح FRP

اجزای اصلی بتن پارچه‌ای عبارتند از: پارچه‌ی اسپیسر سه بعدی، مواد پرکننده مبتنی بر سیمان و لایه PVC که به به وسیله چسب مخصوص به بتن پارچه‌ای متصل می‌گردد. پارچه اسپیسر سه‌بعدی مورد استفاده در این بخش از نوع پارچه اسپیسر با نخ‌های پلی اتیلن ترفتالات(PET) شرکت بی بافت اصفهان می‌باشد.پارچه اسپیسر مورد استفاده در بتن پارچه‌ای دارای یک وجه متراکم و یک وجه مش مانند می‌باشد و در فضای میان این دو دو لایه پارچه نخ‌های اسپیسر قرارگرفته‌اند که این دو لایه را به یک‌دیگر وصل کرده‌اند. در جدول ۳ ویژگی‌های پارچه اسپیسر مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن پارچه مطابق داده برگ شرکت بی بافت اصفهان[۱۸] آورده شده است. سیمان مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کششی بتن پارچه‌ای از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان تهران می‌باشد. لایه PVC مورد استفاده نیز از به ضخامت ۱ میلی‌متر و از شرکت ایران پی وی سی تهیه گردید و توسط چسب هات ملت[1] به بتن پارچه‌ای متصل گردید.

این لایه(چسب هات ملت) با چسبیدن به پارچه‌ی حاوی سیمان مانع از ریختن مواد به بیرون از آن می‌شود و حالت ایزوله بودن رطوبتی را در بتن پارچه‌ای به‌وجود می‌آورد. مشخصات این چسب در جدول۲ [۱۹]آمده است. بعد از ساخت پنل‌ها،در معرض پاشش اسپری‌شده آب با دمای ۱۹ درجه سلسیوس بر روی سطح پارچه متراکم قرارگرفتند در این مرحله تمام قسمت‌های نمونه‌های بتن پارچه‌ای به صورت یکنواخت با آب اسپری گردید. مجددا پس از گذشت نیم ساعت از آب‌دهی اولیه مجددا سطح تمامی نمونه‌ها با اسپری مورد آب‌پاشی قرارگرفت.

شکل ۲- نمونه پنل‌های بتن پارچه‌ای ساخته شده پیش از اسپری آب و شروع عمل‌آوری

در مرحله بعد با شروع فرایند گیرش اولیه سیمان و کسب حداقلی مقاومت در سیمان نمونه‌ها به حوضچه آب خالص مطابق استاندارد ASTMD8364 [۱۰]منتقل شده و به مدت ۱۰ روز تحت عمل‌آوری قرارگرفتند. پس از اتمام مدت زمان کیورینگ مورد نظر نمونه‌ها از حوضچه آب خارج گردید و مطابق استاندارد به مدت به مدت ۲۴ ساعت به صورت کنترل‌شده به منظورجلوگیری از تبخیر ناگهانی با هدف جلوگیری از شوک حرارتی در پنل‌ها، در دمای اتاق خشک شد. سپس به منظور تقویت با ورق‌های FRP آماده‌سازی گردید. به منظور ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌ای تقویت شده با مصالح FRP از سه نوع الیاف شیشه(GFRP)، کربن (CFRP)و کولار (AFRP) و در تعداد لایه‌های ۱،۲و ۳لایه به صورت تک الیاف و ترکیبی ۲ و ۳ لایه الیاف جمعا در ۱۶ طرح و در دو تنوع تار و پود ساخته و تحت بارگذاری کشش مستقیم قرار گرفته است.

پس از آنکه نمونه‌های بتن پارچه‌ای از حوضچه‌های آب خارج شدند و در شرایط آزمایشگاهی خشک گردیدند کار تقویت نمونه‌ها با استفاده الیاف شیشه،کربن وکولار بر روی آن‌ها آغاز گردید. در ابتدا به منظور چسبندگی و اتصال بهتر نمونه‌های الیاف و ماتریس پلیمری با بتن پارچه‌ای می‌بایست سطح بتن پارچه‌ای از هرگونه آلودگی، چربی یا گرد و غبار تمیز گردد برای این منظور سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هوادهی و برس پلاستیکی دستی به آرامی و به نحوی که موجب آسیب دیدن بافت پارچه نگردد تمیز گردید.

در این بررسی از الیاف شیشه ۲۰۰ گرم به همین سبب در این پژوهش از الیاف شیشه۲۰۰ گرمی ریزبافتPlain، که با نام شیشه ریزبافت۲۰۰ گرمی، Eglass-fiber-fabrics-200-gm، یز شناخته می‌شود استفاده شده‌است. الیاف کربن مورد استفاده نیز از نوع۲۰۰ گرمی با بافت دو جهته (Plain) و از نوع PAN بوده است.

دانسیته الیاف‌کولار پایین‌تر از شیشه و کربن بوده و از این‌رو کارایی و مقاومت بهتری دارد. با در نظر گرفتن مقاومت بالا و سختی پایین، سطح زیر منحنی این مواد بسیار زیاد بوده و از اینرو جذب انرژی بالایی داشته و در سازه‌هایی که تحت بارهای ضربه‌ای می‌باشند، مورد استفاده قرارمی‌گیرند. مشکل عمده این الیاف

[1] - Hot Melt Adhesive

مقاومت ضعیف آن‌ها در برابر عوامل محیطی می‌باشد. همچنین برش این الیاف به علت سختی سطحی بالای آنها بسیار مشکل است. از این رو علاوه بر الیاف‌های شیشه و کربن از الیاف کولار نیز برای تقویت نمونه‌های بتن پارچه‌ای استفاده گردیده است. الیاف کولار مورد استفاده از نوع الیاف کولار ۴۹، ۲۰۰ گرمی و به صورت بافت Plain بوده است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های مورد استفاده در تقویت‌های بتن پارچه‌ای در جدول ۴ ارائه گردیده است. در مرحله بعد رزین و سفت‌کننده رزین باید با نسبت صحیح مخلوط شوند.پس از پاکسازی سطح پنل‌های بتن پارچه‌ای از گرد و غبار، الیاف FRP با استفاده از رزین اپوکسی LR۶۳۰، رزین اپوکسی به میزان ۳۰۰گرم با هاردنر H۶۳۰ به نسبت ۳۰ درصد بر روی پنل‌ها نصب و اجرا گردید.

با توجه به اینکه یکی از اهداف مطالعه حاضر بررسی تأثیر خواص بتن پارچه‌ای تقویت شده در دو جهت تاری و پودی می‌باشد لذا از ابتدا برای هر طرح و برای تست کشش، ۳ نمونه تاری و ۳ نمونه پودی تهیه گردید. در مجموع تعداد کل نمونه‌های تقویت شده در این مرحله برای تست‌های کشش و بیش از۹۶ نمونه کشش در دو جهت تاری و پودی تهیه و تقویت گردید. طرح‌های ۱۶گانه تقویتی کششی بتن پارچه‌ای با استفاده از مصالح FRP عبارتند از: طرح تقویت با الیاف شیشه (GFRP) ۱ لایه، ۲ لایه، ۳ لایه؛ طرح تقویت با الیاف کربن (CFRP)۱لایه ،۲ لایه و ۳ لایه؛ طرح تقویت با الیاف کولار(AFRP) ۱ لایه،۲ لایه و ۳ لایه؛ تقویت-های ترکیبی نیز خود به دو دسته طرح‌های هیبریدی ۲لایه‌ای که شامل طرح‌های ۱لایه کربن/ ۱لایه کولار،۱لایه شیشه/ ۱لایه کربن و۱ لایه شیشه/ ۱لایه کولار می‌باشد، و طرح‌های هیبریدی ۳لایه‌ای شامل طرح‌های۲لایه شیشه / ۱ لایه کولار، ۱ لایه شیشه/ ۲لایه کولار،۲ لایه شیشه/۱ لایه کربن و طرح شاهد بتن پارچه‌ای فاقد تقویت است. ویژگی‌های مکانیکی هریک از الیاف‌های مورد استفاده شیشه،کربن و کولار مطابق با داده برگ شرکت تولید-کننده آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.با توجه به اینکه رزین اپوکسی پس از اعمال باید به مدت معینی عمل‌آوری شود تا سخت شود و به نهایت مقاومت مد نظر خود برسد. بنابرتوصیه شرکت سازنده رزین، به منظور عمل‌آوری مناسب نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز تحت عمل‌آوری قرارگرفته و سپس با استفاده میز برش الماسه آزمایشگاهی در ابعاد و تعداد مد نظر برای تست کششی بریده و آماده‌سازی گردیدند.ویژگی‌های رزین اپوکسی LR۶۳۰ در جدول ۵ ارائه گردیده است.

۲-۳-۱- انجام آزمایش کشش مستقیم بتن پارچه‌ای تقویت‌شده

بر اساس استاندارد مرجع در حوزه بتن پارچه‌ای ASTM D8364 و داده‌برگ شرکت concrete canvas و همچنین تحقیقاتی که پیش‌تر در خصوص ارزیابی مقاومت کششی بتن پارچه‌ای بدون نقویت انجام شده نظیر مطالعاتی که توسط ، هان و همکاران(۲۰۱۶) ، زانک و همکاران(۲۰۱۷) و همچنین فیاض و امیری(۲۰۲۰)[۲۰] انجام‌شده، از استاندارد ASTMD676جهت بررسی تأثیر مصالح FRP بر مقاومت کششی بتن پارچه‌ای استفاده شده است[۲۱]. لذا پنل‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف‌های شیشه،کربن و کولار و مطابق با لیست طرح‌های مدنظر ارائه شده در جدول ۶ با تیغ الماسه آزمایشگاهی بریده و آماده گردید. به منظور انجام آزمون کشش ابتدا پنل‌های تقویت‌شده با مواد FRP پس از دورهٔ عمل‌آوری با استفاده از تیغ الماسه آزمایشگاهی در ابعاد مورد نظر استاندارد ASTMD6768، ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر، بریده و آماده‌سازی گردیده و سپس به آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه صنعتی شریف جهت تست منتقل گردید. مطابق با استاندارد فاصله دو گیره دستگاه کشش در شروع تست در فاصله ۳± ۱۰۰میلیمتر تنظیم گردید تا نمونه در هر دو گیره بالا و پایین به میزان ۵۰ میلی‌متر در داخل فیکسچر به طور کامل مهار گردند. به علاوه مطابق استاندارد نرخ تنظیمی دستگاه کشش نیز بر روی ۱۲ اینچ در دقیقه (۳۰۰ میلی‌متر در دقیقه) تنظیم گردید. در این آزمون نمونه‌ها باید توسط یک نرخ نیرو ثابت تحت نیروی کششی قرارگیرند، وتا زمانی که دو قسمت نمونه به طور کامل دچار گسیختگی شده و از یکدیگر جدا گردند ادامه می‌یابد. نمونه‌ها تا گسیختگی کامل تحت بارگذاری محوری کششی قرارگرفتند. خوانش نیرو و زمان نیز با سرعت ۱۰۰ قرائت در ثانیه صورت گرفت. تست کشش مستقیم نمونه‌های بتن پارچه‌ای مطابق با استاندارد ASTMD6768 با گسیختگی کامل دو بخش نمونه از یکدیگر پایان می‌یابد.

همچنین نیروی کششی نهایی، متوسط آزمونه‌ها و مقامت اسمی و تنش نهایی آن‌ها بر اساس استاندارد از روابط ذیل حاصل می‌گردد.

$$\alpha_{fn}=\frac{\alpha_{f1+\ldots+}\alpha_{fn}}{n}$$

(رابطه۱)

که در رابطه فوق:

α_{f1}= نیروی نهایی بدست‌آمده آزمون کشش‌مستقیم از نمونه اول برحسب N؛

n= تعداد کل آزمونه‌های کشش‌مستقیم ؛

α_{fn}= متوسط نیروی‌نهایی بدست‌آمده هر آزمونه در کشش‌مستقیم است برحسب N [۲۰]

$$\alpha=\frac{\alpha_{fn}}{w_s}$$

(رابطه۲)

که در رابطه فوق[۲۱]:

w_s= عرض آزمونه مورد نظر؛

α= مقاومت کششی آزمونه بر حسب N/m. [۲۰]

با توجه به رابطه ۱و ۲ مقاومت نهایی کششی بتن پارچه‌ای تحت بار کششی منطبق با استاندارد ASTM D6768 از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$\sigma=\frac{\alpha_{fn}}{w_s\times t_s}$$

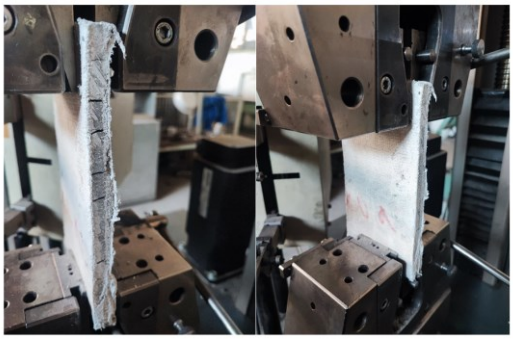
(رابطه۳)

که در این رابطه[۲۱]:

σ= تنش کششی آزمونه بر حسب MPa؛

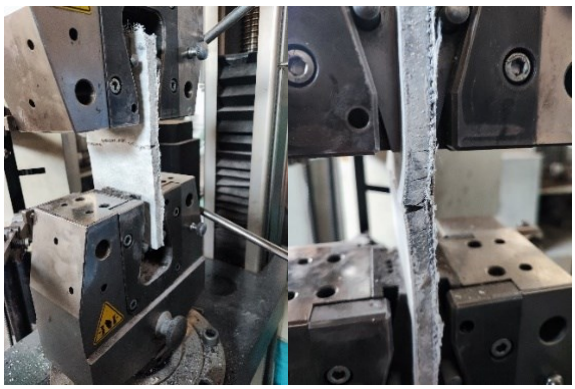
t_s= ضخامت آزمونه بر حسب mm.

بر اساس استاندارد ASTMD6768 دو نوع تنش در گزارش‌دهی مقاومت کششی باید مد نظر قرارگیرد یکی تنش اسمی است که حاصل تقسیم متوسط نیروی گسیختگی بر عرض نمونه است و بر حسب N/m گزارش می‌گردد که در واقع بیانگر توزیع نیرو کششی در عرض آزمونه است و دیگری تنش نهایی(مقاومت کششی) تعریف دقیق خود است که از تقسیم متوسط نیروی کششی شکست بر حاصل ضرب ضخامت در عرض نمونه حاصل می‌گردد. همان‌طور که اشاره گردید آزمون کشش مستقیم برای نمونه‌های بتن پارچه‌ای بدون تقویت و با تقویت با مصالح FRP در دو جهت تار و پود پارچه، در ۱۶ طرح و با استفاده از الیاف‌های شیشه ریزبافت دوجهته۲۰۰گرم، کربن دوجهته پلین دوجهته ۲۰۰ گرم و الیاف کولار بافت پلین دوجهته۲۰۰ گرم در ۳ تکرار صورت پذیرفت که نتایج و تصاویر نمونه‌ها در حین و پس از تست کشش به شرح ذیل ارائه می‌گردد. شکل ۳ بتن پارچه‌ای فقد تقویت را تحت کشش مستقیم نشان می‌دهد.



شکل۳-نحوهٔ و روند توسعه ترک ناشی ازکشش مستقیم‌در بتن-پارچه‌ای فاقد تقویت

همان‌طور که در شکل۴ مشاهده می‌گردد گسیختی کششی در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه به صورت ترد شکن است.



شکل ۴-روند توسعه ترک ونحوه گسیختگی ناشی از کشش مستقیم در بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با ۳ لایه GFRP

در شکل ۵ نحوه رشد ترک و مکانیزیم شکست تحت بار کششی نمونه بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف کولار ارائه گردیده است.

شکل ۵-روند توسعه ترک ونحوه گسیختگی ناشی از کشش مستقیم در بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با ۳ لایه AFRP

جدول ۶-نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با مصالح FRP

سری نمونه	نوع تقویت	متوسط نیرو گسیختگی کششی (N)	متوسط تنش اسمی کششی (N/mm)	متوسط مقاومت کششی(MPa)
Wa[1]-CC	شاهد	۲۱۵۱	۲۱/۲۴	۱/۸۸
We[2]-CC[3]	شاهد	۱۸۱۹	۱۷/۴۳	۱/۵۲
Wa-CC-1GFRP	GFRP ۱لایه	۲۷۹۷	۲۸/۱۵	۲/۴۴
We-CC-1GFRP	GFRP ۱لایه	۲۴۹۷	۲۴/۹۳	۲/۱۴
Wa-CC-2GFRP	GFRP۲لایه	۵۰۷۳/۵۰	۵۰/۹۵	۴/۲۳
We-CC-2GFRP	GFRP۲لایه	۲۷۵۸	۲۸/۵۸	۲/۲۵
Wa-CC-3GFRP	GFRP۳لایه	۶۳۱۷/۵	۶۳/۴۸	۴/۹۲
We-CC-3GFRP	GFRP۳لایه	۵۳۸۶/۵	۵۳/۸۱	۴/۰۵
Wa-CC-1CFRP	CFRP ۱لایه	۱۱۴۴۳	۱۱۵/۱۵	۱۰/۰
We-CC-1CFRP	CFRP ۱لایه	۸۷۰۸/۵	۸۶/۶۸	۷/۵۲
Wa-CC-2CFRP	CFRP۲لایه	۱۹۳۷۶	۱۹۴/۶۵	۱۶/۳۵
We-CC-2GFRP	CFRP۲لایه	۱۵۱۰۵/۵	۱۵۱/۷۳	۱۲/۴۸
Wa-CC-3CFRP	CFRP۳لایه	۳۲۲۲۴/۵	۳۲۲/۰۹	۲۴/۸۸
We-CC-3CFRP	CFRP۳لایه	۲۰۲۶۱	۲۰۲/۸۶	۱۷/۲۹
Wa-CC-1AFRP	AFRP ۱لایه	۱۴۱۹۵/۵	۱۴۳/۲۴	۱۱/۳۳
We-CC-1AFRP	AFRP ۱لایه	۱۳۰۸۰	۱۲۸/۰۶	۱۰/۰
Wa-CC-2AFRP	AFRP ۲لایه	۲۳۲۴۲	۲۳۰/۶۶	۱۷/۳۰
We-CC-2AFRP	AFRP ۲لایه	۱۷۲۵۰	۱۷۱/۶۱	۱۲/۹۵
Wa-CC-3AFRP	AFRP۳لایه	۱۴۱۱۶	۲۷۲/۵۲	۱۹/۹۶
We-CC-3AFRP	AFRP۳لایه	۲۵۵۱۹/۵	۲۵۳/۰۸	۱۸/۱۳
Wa-CC-1CFRP/1AFRP	CFRP۱لایه؛AFRP۱لایه	۲۳۴۴۱	۲۳۵/۲۶	۱۹/۸۵
We-CC-1CFRP/1AFRP	CFRP۱لایه؛AFRP۱لایه	۱۸۸۱۰/۵	۱۸۷/۴۶	۱۵/۶۹
Wa-CC-1GFRP/1CFRP	GFRP۱لایه؛CFRP۱لایه	۱۲۲۷۵	۱۲۲/۱۶	۱۰/۳۱
We-CC-1GFRP/1CFRP	GFRP۱لایه؛CFRP۱لایه	۱۱۵۱۰/۵	۱۱۴/۳۱	۹/۵۸
Wa-CC-1GFRP/1AFRP	GFRP۱لایه؛AFRP۱لایه	۱۷۸۰۹	۱۷۷/۷۸	۱۴/۹۳
We-CC-1GFRP/1AFRP	GFRP۱لایه؛AFRP۱لایه	۱۳۴۹۵	۱۳۴/۸۱	۱۱/۱۴
Wa-CC-2GFRP/1AFRP	GFRP۲لایه؛AFRP۱لایه	۱۱۹۹۱	۱۱۸/۶۲	۹/۱۱
We-CC-2GFRP/1AFRP	GFRP۲لایه؛AFRP۱لایه	۶۴۹۱	۶۴/۳۴	۴/۷۹
Wa-CC-1GFRP/2AFRP	AFRP۲لایه؛AFRP۱لایه	۲۹۳۷۳	۲۹۳/۹۲	۲۲/۰۱
We-CC-1GFRP/2AFRP	AFRP۲لایه؛AFRP۱لایه	۲۱۶۳۷	۲۱۶/۰۵	۱۶/۰۶
Wa-CC-2GFRP/1CFRP	GFRP۲لایه؛CFRP۱لایه	۱۳۴۶۷	۱۳۳/۹۸	۱۰/۸۵
We-CC-2GFRP/1CFRP	GFRP۲لایه؛CFRP۱لایه	۹۳۴۳	۹۳/۷۱	۷/۵۸

۱- عبارت Wa در جدول۶ معرف جهت تار بتن پارچه‌ای می‌باشد.
۲-عبارت We در جدول۶ معرف جهت پود بتن پارچه‌ای می‌باشد.
۳- نماد CC در جدول۶ معرف بتن پارچه‌ای است.

در تقویت بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف کولار، همان طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده علاوه بر افزایش مقامت کششی پنل بتن پارچه‌ای موجب شکل‌پذیری بیشتر پنل تحت بار کشش مستقیم می‌شود؛ که افزایش بیشتری را نسبت به الیاف شیشه و کربن نشان می‌دهد.

۳- نتایج وبحث

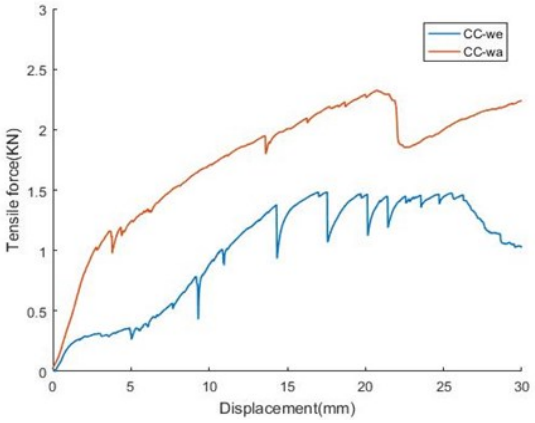
یکی از ضعف‌های جدی بتن پارچه‌ای مقاومت کششی این متریال می‌باشد. بر اساس مشاهدات و نتایج به‌دست آمده استحکام کششی و منحنی رفتاری بتن پارچه‌ای تقویت‌شده باFRP به عوامل متعددی بستگی دارد. در ادامه نتایج حاصل از بارگذاری کششی طرح‌های تقویت بتن پارچه‌ای ارائه می‌گردد.

مقاومت کششی در بتن پارچه‌ای شاهد در جهت تار دارای مقاومت متوسط کششی ۱/۸۸ مگاپاسکال و در جهت پود دارای مقاومت ۱/۵۲ مگاپاسکال می‌باشد.

در نمونه‌های شاهد بتن پارچه‌ای فاقد تقویت، تحت بار کشش مستقیم مشاهده شد عملکرد کلی نمونه‌های تار بهتر از نمونه‌های پودی می‌باشد به طوری که مقاومت متوسط کششی در نمونه‌های تاری ۲۳/۷ درصد بیشتر از نمونه‌های پودی می‌باشد. در خصوص رفتار بتن پارچه‌ای تحت بار کشش مستقیم باید اشاره نمود.

بر اساس مشاهدات بتن پارچه‌ای تا لحظه گسیختگی و جدایش کامل دو بخش نمونه از یک دیگر مطابق تعریف استاندارد ASTMD6768 رفتار شکل‌پذیری را از خود نشان می‌دهد. به طوری که نمونه تاری در کشش مستقیم دارای متوسط تغییرشکل ۲۹/۸۰میلی‌متر بوده است.

در عملکرد نیز مشاهده گردید هنگام بارگذاری ابتدا ترک‌های کششی در وسط نمونه شکل گرفته و با رشد بار میزان آن‌ها نیز افزایش می‌یابد تا در یک روند شکل‌پذیر درنهایت با پارگی، کشیدگی و گسسته شدن نخ‌های اسپیسر پایان پذیرد. نمودارهای نیرو تغییر- تغییر مکان نمونه شاهد تاری و پودر در شکل۶ ارائه گردیده است.



شکل۶-منحنی‌های نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای فاقد تقویت در دو تنوع تار و پود

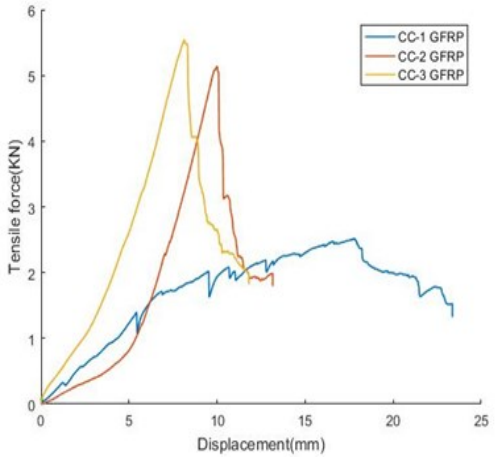
در طرح‌های تقویت با الیاف شیشه ۱، ۲و۳ لایه، بتن پارچه‌ای در دو تنوع تار و پود نیز مشاهده گردید مقاومت کششی متوسط در طرح ۱ لایه در تنوع تار ۲/۴۴ و در پود ۲/۱۴ مگاپاسکال، در طرح تقویتی ۲ لایه الیاف شیشه مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۴/۲۳ و در پود ۲/۲۵ مگاپاسکال و در طرح طرح تقویتی ۳ لایه الیاف شیشه مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۴/۹۲ و در پود ۴/۰۵ مگاپاسکال بوده است.

در این سری طرح‌ها نیز به طور کلی نمونه‌های تاری تحت اثر کشش مستقیم مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های پودی ارائه داده اند. این رفتار تا حد زیادی وابسته به تراکم پارچه در جهت تار و پود آن می‌باشد.

از دیگر نتایج به‌دست آمده در طرح‌ها تقویتی ۱ تا ۳ لایه می‌توان نتیجه گرفت اضافه نمودن تنها ۱ لایه الیاف شیشه با ماتریس پلیمری سبب افزایش ۲۹/۷۹درصدی مقاومت کششی می‌گردد؛ همچنین اضافه نمودن هر لایه الیاف شیشه ۲۰۰ گرمی ریزبافت با تراکم ۱۰۰ می‌تواند موجب رشد ۷۳/۳۶ درصدی در طرح ۲ لایه و ۱۶/۳۱درصدی مقاومت کششی در طرح ۳لایه گردد. در خصوص کیفیت رفتار بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه نیز باید اشاره نمود به طور کلی استفاده از الیاف شیشه برای بهبود خواص مقاومت کششی بتن پارچه‌ای سبب تردشکنی و کاهش تغییرشکل در بتن پارچه‌ای می‌گردد.

الیاف تقویت‌کننده شیشه به رغم وزن و بافت مشابه، به‌دلیل ساختار، جنس و مواد به کار رفته در تولید الیاف دارای مقاومت و مدول کششی کمتری نسبت به الیاف کربن و کولار می‌باشد و

همین امر سبب گشته تا در تقویت بتن پارچه‌ای نیز مقاومت کششی کمتری را در هر لایه نسبت به طرح مشابه در تقویت با سایر الیاف‌ها نشان دهد. همان طور که در شکل۶ و۷ ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه رفتار کلی متریال ترد و میزان تغییرشکل در آن کاهش می‌یابد. پ

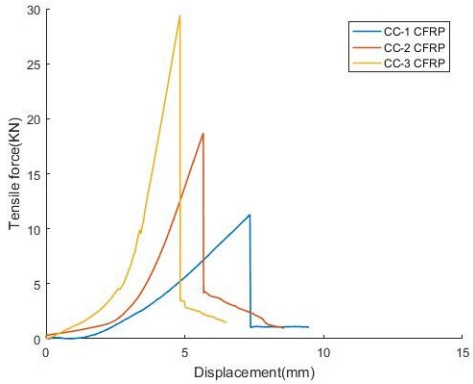


شکل۷-منحنی‌های نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای تقویت-شده با الیاف شیشه در تعداد لایه‌های مختلف

نکته حائز اهمیت در خصوص شکل‌پذیری کمتر در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه آن است که اگر چه میزان شکل‌پذیری و تغییرشکل در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های فاقد تقویتبتن پارچه‌ای کاهش یافته اما اضافه نمودن الیاف شیشه سبب ارتقاء مقاومت کششی بتن پارچه‌ای به میزان ۲۹/۷۹ درصد نسبت به حالت بدون تقویت شده است که این میزان حتی با تغییرشکل بیشتر از آنچه در نمونه شاهد مشاهده گردیده نیز محقق نمی‌گردد. اگرچه به طور کلی تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP علی رغم ارتقاء بسیار زیاد خواص به خصوص در کشش سبب ترد شکنی در متریال می‌شود و این امر منحصر به بتن پارچه‌ای نبوده و در تقویت‌سازه‌های بتنی نیز چنین استو جز خواص ذاتی الیاف شیشه محسوب می‌گردد، ولی مقاومت ناچیز کششی بتن پارچه‌ای عملا به نحو دیگری و از بعد سازه‌ای کارایی و عملکرد بتن پارچه‌ای را با محدودیت مواجهه می‌سازد چنان که فیاض و همکاران [۱۹]طی پژوهش خود نقصان در مقاومت کششی بتن پارچه‌ای را به عنوان چالشی در توسعه سنگرهای بادشونده معرفی نمودند. در مقابل استفاده از الیاف‌های شکل‌پذیرتر نظیر کولار و ترکیبات آن با الیاف شیشه که در ادامه بیان می‌گردد می‌تواند ضمن افزایش میزان شکل-پذیری مقاومت کششی را نیز تاحد بسیار زیادی ارتقاء بخشد.

در طرح های تقویت با الیاف کربن۱،۲و۳ لایه بتن پارچه‌ای در دو تنوع تار و پود نیز مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در طرح ۱لایه در تنوع تار ۱۰/۰ و در پود ۷/۵۲ مگاپاسکال، در طرح تقویتی۲ لایه الیاف‌کربن مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۱۶/۳۵ و در پود۱۲/۴۸مگاپاسکال و در طرح طرح تقویتی ۳ لایه الیاف کربن مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۲۴/۸۸ و در پود ۱۷/۲۹ مگاپاسکال بوده است. در این سری طرح‌ها نیز به طور کلی نمونه‌های تاری تحت اثر کشش مستقیم مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های پودی ارائه داده اند. به علاوه مشاهده گردید اضافه نمودن ۱لایه الیاف کربن ۲۰۰ گرمی دوجهته بافت پلین سبب رشد ۵/۳۲برابری مقاومت کششی نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد و همچنین بهبود۴/۰۹ برابری مقاومت کششی نسبت به طرح ۱ شیشه می‌باشد. همچنین اضافه نمودن هر لایه الیاف کربن۲۰۰ گرمی بافت پلین می‌تواند موجب رشد ۶۳/۵۰ درصدی در طرح ۲ لایه ۵۲/۱۹درصدی مقاومت کششی در طرح ۳لایه گردد (طرح ۲به۳ لایه ۵۲/۱۹ درصد افزایش مقاومت کششی داشته است).

استفاده از الیاف CFRP در مقایسه با الیاف GFRP به سبب آنکه دارای مقاومت و مدول کششی بالاتری می‌باشد، مطابق جدول۲ مقاومت کششی بسیار بالاتری را در بتن پارچه‌ای ایجاد کرده است. الیاف کربن مورد استفاده علی رغم بافت و وزن یکسان با الیاف شیشه به سبب آنکه مطبق جدول۴ دارای دانسیته کمتری ایست که سبب شده رفتار شکل پذیرتری را نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه ارائه دهد که در شکل ۷ و ۸ قابل ملاحظه می‌باشد.



شکل۸-منحنی‌های نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای تقویت-شده با الیاف کربن در تعداد لایه‌های مختلف

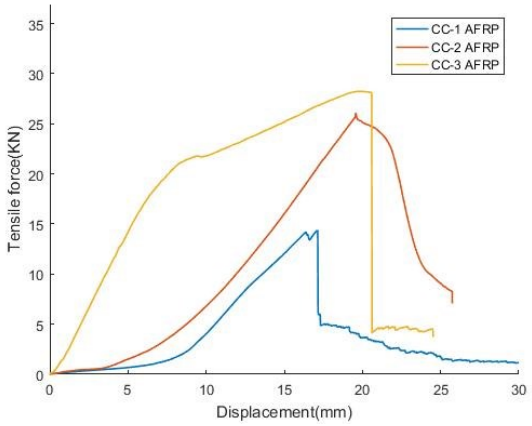
در طرح‌های تقویت با الیاف‌کولار ۱، ۲و ۳ لایه بتن پارچه‌ای در دو تنوع تار و پود نیز مشاهده گردید مقاومت کششی متوسط در طرح ۱ لایه در تنوع تار ۱۱/۳۳و در پود ۱۰ مگاپاسکال، در طرح تقویتی ۲ لایه الیاف کولار مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۱۷/۳۰و در پود ۱۲/۹۵ مگاپاسکال و در طرح طرح تقویتی ۳ لایه الیاف کولار مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۱۹/۹۶ و در پود ۱۸/۸۳ مگاپاسکال بوده است.

در این سری طرح‌ها نیز به طور کلی نمونه‌های تاری تحت اثر کشش مستقیم مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های پودی ارائه داده اند. در خصوص مکانیزم رفتاری کششی، استفاده از الیاف کولار سبب شکل‌پذیری بیشتر بتن پارچه‌ای می‌گردد. ترک‌های کششی به وجود آمده در نمونه‌های تقویت شده با الیاف کولار به صورت مستقیم و موازی با یکدیگر همچون ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تقویت‌شده با شیشه و کربن مشاهده شده و در نهایت نمونه از محل ترک میانی نمونه که دارای بیشترین عرض و حداکثر تنش اعمالی بوده است گسیخته گردیده است.

به علاوه مشاهده‌گردید اضافه نمودن ۱لایه الیاف کولار ۲۰۰ گرمی دوجهته بافت پلین سبب رشد ۶/۰۳ برابری مقاومت کششی نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد و همچنین بهبود۴/۶۴ برابری مقاومت کششی نسبت به طرح ۱ شیشه می‌باشد.

همچنین اضافه نمودن هر لایه الیاف کولار۲۰۰ گرمی بافت پلین می‌تواند موجب رشد ۵۲/۷۹ درصدی در طرح ۲ لایه ۲۰/۳۷درصدی مقاومت کششی در طرح ۳لایه گردد.(طرح ۲به۳ لایه ۵۲/۱۹ درصد افزایش مقاومت کششی داشته است.)

همان‌طور که بیان گردید هر چند الیاف کولار به سبب دارابودن مدول و مقاومت کششی کمتر ارتقاء کششی کمتری را به نسبت الیاف کربن داشته است ولی به سبب نوع بافت و درصد تغییر طول بیشتر، مطابق جدول۴توانسته است رفتارکششی شکل‌پذیرتری را نسبت به سایر الیاف‌های تقویت‌کننده ارائه کند. این امر با افزایش تعدادلایه‌های تقویت‌کننده محسوس‌تر ملاحظه گردیده است. در شکل ۹ نحوه تأثیر افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده کولار و میزان نیرو بحرانی گسیختگی کششی نمونه‌های بتن پارچه‌ای ارائه گردیده است. الیاف کولار به سبب نوع ساختار مولکولی منظم رشته‌ای، می‌تواند تغییر شکل بیشتری را را نسبت به نمونه‌های بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه و کربن ارائه نماید.



شکل۹- منحنی نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف کولار در تعداد لایه‌های مختلف

میزان مقاومت کششی بر اساس مطالعات صورت پذیرفته توسط توسط زانک و همکاران[۸] که در آن بتن پارچه‌ای با ۱ لایه الیاف کولار در دو تنوع تار و پود تقویت گردیده است و تحت بارکشش مستقیم قرارگرفته است مشاهده گردیده که نمونه تاری بتن پارچه‌ای تقویت شده دارای مقاومت کششی ۸/۷۴ مگاپاسکال و در جهت پود نیز ۸/۷۶ مگاپاسکال بوده است. در حالی که در این پژوهش مقاومت کششی با استفاده از ۱لایه الیاف کولار در جهت تار ۱۱/۳۳مگاپاسکال و در جهت پود ۱۰مگاپاسکال می‌باشد. که علت این تفاوت به سبب آن است که الیاف کولار در این پژوهش نسبت به الیاف مورد استفاده در پژوهش زانک دارای تراکم، مدول و وزن بیشتری‌میباشد که در جدول۴ به آن اشاره گردید.

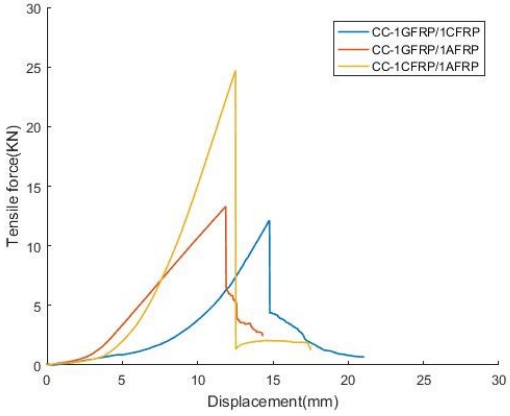
طرح های تقویتی ترکیبی مورد بررسی در این پژوهش را می‌توان به دو دسته کلی طرح‌های ترکیبی دو لایه و سه لایه دسته‌بندی نمود. در طرح تقویت ترکیبی بتن پارچه‌ای با۱ لایه الیاف شیشه و ۱لایه الیاف کربن تحت بار کششی که در دو تنوع تار و پود صورت پذیرفت، مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در تنوع تار این طرح ۱۰/۳۱ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۹/۵۸ مگاپاسکال می‌باشد. نکته حائز اهمیت آنکه ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی ۱ لایه شیشه و ۱لایه کربن می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۱ لایه الیاف کربن را ارائه دهد به خصوص این طرح توانسته رشد مناسبی را در نمونه‌های کششی پودی نسبت به نمونه‌های مشابه در طرح ۱ کربن ارائه نماید. هر چند که در این طرح نیز به طور کلی نمونه‌های تاری تحت اثر کشش مستقیم مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های

پودی ارائه داده‌اند. در طرح تقویتی ترکیبی بتن پارچه‌ای با۱لایه الیاف شیشه و ۱لایه الیاف کولار تحت بار کششی که در دو تنوع تار و پود صورت پذیرفت، مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در تنوع تار این طرح ۱۴/۹۳ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۱۱/۱۴مگاپاسکال می‌باشد. ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی ۱ لایه شیشه و ۱لایه کولار می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۱ لایه الیاف کولار را ارائه دهد به خصوص این طرح توانسته رشد مناسبی را در نمونه‌های کششی پودی نسبت به نمونه‌های مشابه در طرح ۱ کولار ارائه نماید.

این میزان بهبود عملکرد کماکان کمتر از مقاومت کششی بتن پارچه‌ای با ۲ لایه الیاف کولار خواهد بود. همچنین استفاده از الیاف کولار به عنوان الیاف تقویت‌کننده شیشه در ترکیب با بتن پارچه‌ای رفتار شکل‌پذیرتری را در کل متریال حاصل ایجاد می‌نماید.

میزان تغییرشکل در این طرح به میزان ۱۷/۷۷ میلی‌متر می‌باشد. طرح تقویتی ترکیبی بتن پارچه‌ای با۱لایه الیاف کربن و ۱لایه الیاف کولار مقاوم‌ترین طرح ترکیبی بتن پارچه‌ای می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از آزمون کشش مستقیم،مقاومت‌کششی متوسط بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با ۱ لایه کربن و ۱لایه الیاف کولار در تنوع تار این طرح ۱۹/۸۵ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۱۵/۶۹مگاپاسکال می‌باشد.

ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی ۱ لایه کربن و ۱لایه کولار می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲ لایه الیاف کولار را ارائه دهد به خصوص این طرح توانسته رشد مناسبی را در نمونه‌های کششی پودی نسبت به نمونه‌های مشابه در طرح ۲ کولار ارائه نماید. هر چند که این میزان بهبود عملکرد کماکان کمتر از مقاومت کششی بتن پارچه‌ای با ۳ لایه الیاف کولار خواهد بود. بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف کربن و کولار با نسبت مساوی توانسته است ۱۶/۷۶ درصد نسبت به بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف ۲ کولار و ۲۱/۴۵ درصد نسبت به بتن پارچه‌ای تقویت شده مقاومت کششی بیشتری را کسب نماید که این طرح را به یک طرح منحصر به فرد در میان طرح‌ها ترکیبی بتن پارچه‌ای بدل می‌نماید. همچنین این ترکیب توانسته است مقاومت کششی ۲/۲ برابری را در مقایسه با بتن پارچه‌ای تقویت شده در مطالعه زانک(۲۰۱۷) کسب نماید. میزان تغییرشکل این طرح در لحظه شکست نیز به میزان ۱۱/۲۷میلی‌متر به ثبت رسیده است. در شکل۱۰نمودار مقایسه‌ای نیرو-جابجایی هریک از طرح‌های ترکیبی دولایه نشان داده شده و همان‌طور که ملاحظه می‌شود طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۱لایه الیاف کربن و کولار بیشترین میزان مقاومت کششی را کسب نموده است. با توجه به شکل ۱۰ طرح‌های ترکیبی تقویتی دارای الیاف کولار دارای تغییر شکل بیشتری نسبت به طرح‌های دارای کربن و شیشه در بتن پارچه‌ای می‌باشد و این تا حد زیادی ناشی از خواص ساختاری و رشته‌ای الیاف کولار در مقایسه با ساختار متراکم و نا منظم الیاف کربن که امکان تغییر شکل را علی رغم کسب مقاومت کششی بالا محدود می‌سازد.



شکل ۱۰-منحنی نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف‌های ترکیبی ۲لایه

در طرح تقویت ترکیبی بتن پارچه‌ای با۲ لایه الیاف شیشه و ۱لایه الیاف‌کربن تحت بار کششی که در دو تنوع‌تار و پود صورت پذیرفت، مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در تنوع تار این طرح ۱۰/۸۵ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۷/۵۸ مگاپاسکال می‌باشد. نکته حائز اهمیت آن است که ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی۲لایه شیشه و ۱لایه کربن می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲لایه و حتی ۳ لایه الیاف شیشه را ارائه نماید.

البته استفاده از ۲ لایه شیشه در ترکیب با الیاف‌کربن سبب ایجاد محدودیت‌هایی نیز در نمونه‌های تقویت‌شده با بتن پارچه‌ای می‌گردد چراکه الیاف کربن استحکام کششی بالاتری نسبت به الیاف شیشه دارند. همچنین با توجه الیاف شیشه و کربن هر دو به تردشکنی نمونه‌ها کمک می‌کنند لذا مشاهده گردید استفاده از

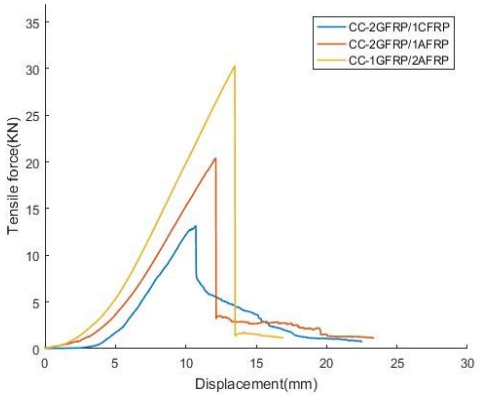
طرح‌هایی با نسب۶۶/۸ درصد الیاف شیشه و بیش از آن سبب تغییرشکل کمتر و در نتیجه کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به حالت ترکیب ۵۰درصدی الیاف شیشه و کربن می‌گردد.

اما به هر حیث استفاده از تنها ۱لایه الیاف کربن موجب ساخت ، کامپوزیتی با مقاومت کششی بالاتر از حالت تقویت۳لایه شیشه در در بتن پارچه‌ای می‌گردد. در طرح تقویت ترکیبی بتن پارچه‌ای با۲ لایه الیاف شیشه و ۱لایه الیاف‌کولار تحت بار کششی که در دو تنوع‌تار و پود صورت پذیرفت، مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در تنوع تار این طرح ۹/۱۱ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۷/۷۹ مگاپاسکال می‌باشد.

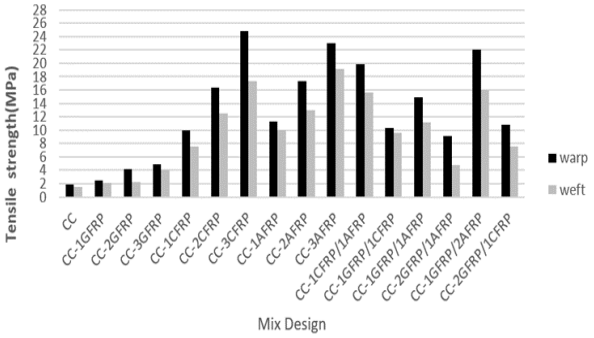
نکته حائز اهمیت آن است که ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی۲لایه شیشه و ۱لایه کولار می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲لایه و حتی ۳ لایه الیاف شیشه را ارائه نماید. استفاده از ۱ لایه کولار به منظور تقویت بتن پارچه‌ای دارای ۲ لایه شیشه می‌تواند موجب افزایش مقاومت کششی بتن پارچه‌ای به میزان ۲/۱۵ برابر تقویت با دو لایه شیشه گردد. به علاوه استفاده از تنها ۱لایه الیاف کولار در ترکیب با ۲لایه شیشه بتن پارچه‌ای می‌تواند مقاومت کششی را به میزان ۸۵/۳۷ درصد نسبت به بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۳ لایه شیشه بهبود بخشد.

در این طرح نیز همچون طرح تقویت بتن پارچه‌ای با ۲لایه شیشه و۱ لایه کربن، به سبب آنکه استفاده از الیاف شیشه موجب تردشکن شدن کلی بتن پارچه‌ای می‌گردد؛ سبب می‌شود تا الیاف کولار قادر نباشد از تمام ظرفیت مقاومتی خود استفاده نماید به همین جهت نمونه‌ها در مقادیر کمتری از حداکثر مقاومت مورد انتظار خود دچار شکست می‌شوند.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از تست کشش مستقیم بتن پارچه‌ای در طرح‌های تقویتی ۳لایه، مطابق شکل۱۱ مشاهده می‌گردد استفاده از نسبت‌های بیش از ۵۰درصد الیاف شیشه در ترکیب با الیاف کولار سبب کاهش مقاومت کششی و کاهش تغییر شکل کششی در بتن پارچه‌ای می‌گردد. در این طرح تقویت مشاهده‌گردید مقاومت کششی متوسط در تنوع تار این طرح ۲۲/۰۱ مگاپاسکال و تنوع پودی این طرح ۱۶/۰۶ مگاپاسکال می‌باشد. نکته حائز اهمیت آن است که ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی۲لایه کولار و ۱لایه شیشه می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲لایه کولار را ارائه نماید. استفاده از ۱لایه الیاف شیشه در ترکیب با ۲ لایه الیاف کولار تحت بار کششی منجر به رشد ۳۴/۶۴بیش از درصدی مقاومت کششی بتن پارچه‌ای به خصوص در تنوع پودی می‌گردد. به طور کلی اضافه نمودن ۱لایه شیشه در طرح‌های ترکیبی کولار و کربن تأثیر چندانی بر مقاومت کششی ندارد. در شکل۱۲، نمودار مقایسه‌ای مقاومت (تنش گسیختگی)کششی در طرح‌های مختلف ارائه گردیده است.



شکل۱۱-منحنی‌های نیرو- جابجایی کششی بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف‌های ترکیبی۳لایه



شکل۱۲- مقایسه حداکثر میزان مقاومت‌کششی نمونه‌های بتن-پارچه‌ای، تقویت‌شده با مصالح FRP در طرح‌های مختلف

نکتهٔ حائز اهمیت در تقویت و مقاوم‌سازی بتن پارچه‌ای با استفاده از مصالح FRP آن است که استفاده از این مصالح نه تنها سبب محدودشدن کاربری محصول بتن پارچه‌ای نمی‌گردد بلکه بلعکس سبب ارتقاء خواص مکانیکی و دوام طولانی‌تر آن می‌گردد. مقاومت ناچیز بتن پارچه‌ای تحت بارهای کششی (۱/۸۸ مگاپاسکال)عملا مانع از استفاده از بتن پارچه‌ای در کاربردهایی همچون سنگرهای باد شونده و استفاده از آن‌ها در پایدارسازی

شیب‌ها و ترانشه‌ها می‌گردد. لذا استفاده از مصالح FRP به شرط انتخاب رزین اپوکسی مناسب می‌تواند سبب افزایش مقاومت و دوام سازه‌های ساخته شده از بتن پارچه‌ای گردد. در خصوص موارد اجرایی و اقتصادی استفاده از مصالح FRP برای تقویت بتن پارچه‌ای، الیاف شیشه (GFRP) دارای خواص مکانیکی متوسطی بوده ولی از نظر اقتصادی مناسب‌ترین قیمت را نسبت به سایر الیاف‌های کربن(CFRP) و کولار(AFRP) دارد ولی در عین حال مقاوت کمتری را به نسبت الیاف‌های کربن وکولار ارائه می‌دهد. الیاف کربن وکولار به سبب مدول قابل توجه خود قادراند مقاومت وتقویت بسیار بیشتری را در سازه ایجاد کنند به نحوی که اضافه کردن تنها یک لایه الیاف کربن به بتن پارچه‌ای مقاومت کششی آن را از ۱/۸۸ مگاپاسکال به ۱۱/۴۵ مگاپاسکال می‌رساندحال آنکه استفاده از یک لایه الیاف شیشه مقاومت کششی را تا ۲/۷۹ مگاپاسکال ارتقاء می‌دهد. لذا استفاده از هر یک از این الیاف‌ها به نوع پروژه، ابعاد، و نوع کاربرد بتن پارچه‌ای وابسته است. لذا توصیه می‌شود در کاربردهایی که نیازی به مقاومت بالا وجود ندارد و خواص مکانیکی متوسطی مد نظر است از قبیل استفاده در لاینیگ کانال‌ها از الیاف شیشه استفاده گردد اما چنانچه تقویت بتن پارچه‌ای به منظور اهداف سازه‌ای صورت می‌گیرد نظیر ساخت سنگرهای بادشونده،پناهگاه‌ها و دیواره مخازن و پوشش سازه‌های بتنی بهتر است از الیاف کربن (CFRP) استفاده گردد و از الیاف کولار(AFRP) نیز با توجه به قیمت آن در پروژه‌هایی که علاوه بر ارتقاء خواص مکانیکی تاب‌آوری آن در برابر بارهای دینامیکی نظیر بار انفجار و ضربه مد نظر است استفاده گردد.

٤- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار مکانیکی بتن پارچه‌ای تقویت شده با FRP تحت بارکششی مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاصل‌از تست‌های کششی نشان می‌دهد استفاده از مصالح FRP در تقویت بتن پارچه‌ای به‌صورت بالقوه‌ای سبب ارتقاء و بهبود مقاومت کششی و رفتار متریال تحت بار محوری ناشی از کشش مستقیم می‌گردد. تعدادی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این مطالعه عبارت اند از:

۱- رفتار بتن پارچه‌ای در تقویت با مصالح FRP و بدون تقویت تحت بار کشش مستقیم در جهت تار بهتر از جهت پود آن می‌باشد به طوری که مقاومت کششی در بتن پارچه‌ای شاهد در جهت تار دارای مقاومت متوسط کششی ۱/۸۸ مگاپاسکال و در جهت پود دارای مقاومت ۱/۵۲ مگاپاسکال می‌باشد. به علاوه هرچه بافت پارچه اسپیسر متراکم تر و حلقوی‌تر باشد مقاومت کششی بیشتری را برای بتن پارچه‌ای ایجاد می‌کند.

۲-به‌دلیل اینکه الیاف در FRP جزء اصلی تحمل کننده بار هستند، نوع الیاف، تعدادلایه‌ای تقویت کننده،آرایش آن و وزن و تراکم کلی الیاف در خواص کششی بتن پارچه‌ای تقویت شده با FRP مؤثر می‌باشند.

۳- مقاومت کششی بتن پارچه‌ای با افزایش تعداد لایه‌های تقویت کنندهFRP به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد به طور مثال در در طرح های تقویت با الیاف شیشه ۱، ۲و۳ لایه، بتن پارچه‌ای در دو تنوع تار و پود نیز مشاهده گردید مقاومت کششی متوسط در طرح ۱ لایه در تنوع تار ۲/۴۴ و در پود ۲/۱۴ مگاپاسکال، در طرح تقویتی ۲ لایه الیاف شیشه مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۴/۲۳ و در پود ۲/۲۵ مگاپاسکال و در طرح طرح تقویتی ۳ لایه الیاف شیشه مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۴/۹۲ و در پود ۴/۰۵ مگاپاسکال بوده است.

۴- اضافه نمودن ۱لایه الیاف کربن ۲۰۰ گرمی دوجهته بافت پلین سبب رشد ۵/۳۲برابری مقاومت کششی نسبت به بتن پارچه‌ای شاهد و همچنین بهبود۴/۰۹ برابری مقاومت کششی نسبت به طرح ۱ شیشه می‌باشد. همچنین اضافه نمودن هر لایه الیاف کربن۲۰۰ گرمی بافت پلین می‌تواند موجب رشد ۶۳/۵۰ درصدی در طرح ۲ لایه ۵۲/۱۹درصدی مقاومت کششی در طرح ۳لایه گردد.

۵- الیاف آرامید کولار در مجموع نسبت شیشه در شرایط یکسان و تعداد لایه‌های تقویتی مشابه توانسته است مقاومت کششی بیشتری را ارائه نماید. به طوری که در طرح های تقویت با الیاف-کولار۱، ۲و۳ لایه بتن پارچه‌ای در دو تنوع تار و پود نیز مشاهده گردید مقاومت کششی متوسط در طرح ۱ لایه در تنوع تار ۱۱/۳۳و در پود ۱۰ مگاپاسکال، در طرح تقویتی ۲ لایه الیاف کولار مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۱۷/۳۰و در پود ۱۲/۹۵ مگاپاسکال و در طرح طرح تقویتی ۳ لایه الیاف کولار مقاومت کششی متوسط در تنوع تار ۱۹/۹۶ و در پود ۱۸/۸۳ مگاپاسکال بوده است ولی در مقایسه با الیاف کربن در شرایط یکسان در تعداد لایه‌های ۱و۲ عملکرد مشابهی داشته‌اند اما در تعدادلایه‌های بالاتر

الیاف کربن مقاومت کششی بالاتری را نسبت به الیاف کولار ارائه نموده است.

۶- در میان طرح‌های تقویتی ترکیبی و چندگانه طرح تقویت کربن و کولار توانسته است ظرفیت کششی و مقاومت بیشتری را نسبت به طرح‌های مشابه ایجاد کند به طوری که بتن پارچه‌ای تقویت شده با الیاف کربن و کولار با نسبت مساوی توانسته است ۱۶/۷۶ درصد نسبت به بتن پارچه‌ای تقویت‌شده با الیاف ۲ کولار و ۲۱/۴۵ درصد نسبت به بتن پارچه‌ای تقویت شده مقاومت کششی بیشتری را کسب نماید.

۷- استفاده از ۲ لایه شیشه در ترکیب با الیاف‌کربن سبب ایجاد محدودیت‌هایی نیز در نمونه‌های تقویت‌شده با بتن پارچه‌ای می‌گردد چراکه الیاف کربن استحکام کششی بالاتری نسبت به الیاف شیشه دارند. همچنین با توجه الیاف شیشه و کربن هر دو به تردشکنی نمونه‌ها کمک می‌کنند استفاده از طرح‌هایی با نسب۶۶/۸ درصد الیاف شیشه و بیش از آن سبب تغییرشکل کمتر و در نتیجه کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به حالت ترکیب ۵۰درصدی الیاف شیشه و کربن می‌گردد.

۸- ترکیب بتن پارچه‌ای با استفاده از الیاف تقویتی۲لایه کولار و ۱لایه شیشه می‌تواند خواص کششی بهتری از بتن پارچه‌ای تقویت شده با ۲لایه کولار را ارائه نماید. استفاده از ۱لایه الیاف شیشه در ترکیب با ۲ لایه الیاف کولار تحت بار کششی منجر به رشد ۳۴/۶۴بیش از درصدی مقاومت کششی بتن پارچه‌ای به خصوص در تنوع پودی می‌گردد.

۹- با توجه به نتایج به‌دست آمده از میزان تأثیر و هزینه اقتصادی مورد نیاز برای تقویت بتن پارچه‌ای با هر یک از الیاف‌های شیشه،کربن وکولار مشخص‌گردید الیاف شیشه(GFRP) خواص مکانیکی متوسطی را به‌نسبت الیاف‌های کربن(CFRP) و کولار(AFRP) به بتن پارچه‌ای اضافه می‌کند ولی از نظر اقتصادی مناسب‌ترین قیمت را نسبت به سایر دارد. لذا توصیه می‌شود در کاربردهایی که نیازی به مقاومت بالا وجود ندارد و خواص مکانیکی متوسطی مد نظر است استفاده از الیاف شیشه دراولویت قرارگیرد و چنانچه تقویت بتن پارچه‌ای به منظور اهداف سازه‌ای صورت می‌گیرد بهتر است از الیاف کربن (CFRP) استفاده گردد و از الیاف کولار(AFRP) نیز در مواردی که شکل‌پذیری بیشتری مورد نیاز است و همچنین علاوه بر و ارتقاء خواص مکانیکی تاب‌آوری آن در برابر بارهای دینامیکی نظیر بار انفجار و ضربه مد نظر است استفاده از الیاف آرامیدی(کولار) برای تقویت بتن پارچه‌ای مناسب‌تر است.

۵- منابع

[۱] می،سیدنی،یانگ،فرانسیس؛ترجمه دکترمحمدشکرچی زاده، قدوسی پرویز وعلی‌اکبر رمضانیانپور؛ بتن، تهران: انتشارات دانشگاه تهران،۱۳۹۳.

[2] Concrete Canvas GCCM, England: concrete canvas companies., Retrieved from: www.concretecanvas.com.

[3] SPECIFICATION GUIDE: SLOPE PROTECTION, England: concrete canvas companies. Retrieved from www.concretecanvas.com.

[4] ABRASIONRESISTANCE. England: concrete canvas companies ,. Retrieved from www.concretecanvas.com. 2022.

[5] Tan, K. H. "Punching shear strength of RC slabs bonded with FRP systems." Proc., 2nd Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures,1996.

[6] Wang ,S. M. Li, Z. Zhang, and B. Wu, "Properties of facesheet-reinforced 3- D spacer fabric composites and the integral multi-facesheet structures.,"Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 28, p. 224-232, 2010.

[7] Han, F., Chen, H., Zhang, W., Lv, T., & Yang, Y.,Influence of 3D spacer fabric on drying shrinkage of concrete canvas. Journal of Industrial Textiles, 45(6), 1457-1476, 2016.

[8] Zhang, F., Chen, H., Li, X., Li, H., Lv, T., Zhang, W., & Yang, Y. Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels. Composite Structures, 176, 608-616,2017.

[9] Li H, Chen H, Li X, et al. Design and construction application of concrete canvas for slope protection. Powder Technol; 344(15): 937–946,2019.

[10] Niu, J., Xu, W., Li, J., & Liang, J. (2021). Influence of cross-sectional shape on the mechanical properties of concrete canvas and CFRP-reinforced columns. Advances in Materials Science and Engineering, 1-14,2021.

[11] Fayyaz M, Nejad AG and Khosravi F. Numerical investigation of damages on concrete canvas shell under near-field blast. Adv Def Sci Technol; 2: 79–87,2019.

[12] Jafari, H, Mohammadreza, A and Younes D.

Dynamic response of buried pipelines retrofitted with concrete canvas panels under blast loading. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 44: 105-119,2020.

[13] ASTM D8329-21. Standard Test Method for Determination of Water/Cementitious Materials Ratio for Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCMs) and Measurement of the Compression Strength of the Cementitious Material Contained Within.

[14] ASTM D8364/ D8364M-21. Standard Specification for Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Materials.

[15] ASTM C109/C109M-20. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.

[16] ASTM C204-18e1. Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.

[۱۷] گزارش خواص مکانیکی سیمان پرتلند تیپ۲،سیمان تهران، برگرفته از: www.tehrancement.co.ir

[۱۸] چسب هات ملت، شرکت رزین‌های صنعتی ایران،برگرفته از:. www. iirc-co.com

[۱۹] امیری هنزا, ف، فیاض, م, امین رعیا, م. ارزیابی عملکرد بتن پارچه‌ای در پناهگاه تعجیلی،مجله ی مهندسی عمران شریف,; دوره۳۸، شماره۳. ،۱۴۰۱

[21] ASTM D6768/D6768M-20 Standard Test Method for Tensile Strength of Geosynthetic Clay Liners.

[۲۲] خواص مکانیکی الیاف‌های FRP، ایران کامپوزیت کاویان، برگرفته از:www. ircomposite.ir

Investigation of the Effect of FRP Materials on the Tensile Strength of Concrete Canvas

Ali Taheri
Msc. Student, Faculty of Civil Engineering, Imam Hosein University, Tehran, Iran.
Mohammad Fayyaz *
Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Imam Hosein University, Tehran, Iran.
ZiaShamami
Faculty of Engineering, Imam Hosein University, Tehran, Iran.

Abstract

Concrete canvas is a composite material made with three-dimensional spacer fabric, which is manufactured by impregnating the fabric with cementitious materials. Concrete canvas has weaknesses in its mechanical properties including tensile strength. Strengthening concrete canvas with Fiber-reinforced polymer (FRP) materials can effectively improve its mechanical properties, particularly its tensile strength. Therefore, this study focuses on examining the impact of using FRP polymers to enhance the tensile properties of concrete canvas. Three types of fibers, namely Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP; known as a Kevlar fiber) in various layer configurations, both warp and weft, were utilized to reinforce concrete canvas under tensile loading. The test results demonstrate that the use of FRP fibers significantly enhances the mechanical properties of concrete canvas. Specifically, single-layer glass fibers lead to considerable growth and reinforcement with carbon and Kevlar fiber layers results in more than five to seven times improvement in tensile strength compared to control concrete canvas.

Keywords: Concrete canvas, Mechanical properties, Tensile strength, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP).

* Corresponding Author: m.fayyaz@modares.ac.ir