

بررسی رفتار کششی و اثر محصورشدگی آزمون‌های بتنی مقاوم سازی شده توسط توری منسوج (TRC)

جمشید اسماعیلی^{۱*}، ایرج شریفی^۲، میلاد نوری زاده^۳، علی ابراهیمی امامیه^۳

۱- دانشیار دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی دانشکده عمران دانشگاه تبریز

J-esmaeili@tabrizu.ac.ir

چکیده

همواره استفاده بهینه و اقتصادی از مصالح موجود یکی از دغدغه‌های دست‌اندرکاران عرصه‌ی ساخت‌وساز بوده است. بدین منظور طی سال‌های اخیر بحث ترمیم و مقاوم سازی سازه‌های بتنی فرسوده جایگاه ویژه‌ای در مجموعه مهندسی عمران یافته است. برای این مهم روش‌های متنوعی توجه مهندسان را به خود جلب کرده است که یکی از معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده در مقاوم سازی سازه‌ها، استفاده از ورق‌های FRP می‌باشد. این روش خالی از عیب نبوده و اشکالاتی نظیر استفاده از چسباننده‌های اپوکسی را دارد که علاوه بر عملکرد نامناسب در مقابل حرارت، صرفه‌ی اقتصادی نیز ندارد. همچنان مهندسان در تلاش برای یافتن روش‌های جدیدی هستند که علاوه بر برطرف کردن مشکلات موجود، از لحاظ اقتصادی و فنی باصرفه باشند. یکی از روش‌های نوین در این زمینه بکارگیری توری منسوج می‌باشد که به جای استفاده از چسباننده‌های اپوکسی، چسباننده‌های پایه‌سیمانی بکار گرفته می‌شود. در این مطالعه به منظور بررسی کارآمدی این روش در مقاوم سازی اعضای فشاری بتنی، ابتدا ظرفیت کششی و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی آزمون‌های بتنی مقاوم سازی شده با توری منسوج TRC با ملات‌های معمول در این روش مورد آزمایش قرار گرفته و سپس آزمون‌های استوانه‌ای با استفاده از ملات انتخاب شده دورگیری گردیدند. برای ارزیابی روش ترمیمی TRC و اثر محصورشدگی، آزمون‌های دورگیری شده در یک و دو لایه از توری منسوج و همچنین آزمون‌های شاهد (بدون دورگیری) تحت آزمایش بارگذاری فشاری قرار گرفتند. در نهایت مشخص گردید که دورگیری آزمون‌های استوانه‌ای با استفاده از TRC تاثیر چشمگیری در افزایش مقاومت فشاری این آزمون‌ها داشته است که بیانگر کارآمدی این روش در مقاوم سازی اعضای فشاری بتنی می‌باشد.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، توری منسوج، TRC، محصورشدگی، ظرفیت کششی، سخت‌شدگی کرنشی

۱- مقدمه

سازه‌های بتنی موجود با گذشت زمان فرسوده می‌شوند و یا در اثر عواملی طبیعی نظیر زلزله آسیب‌هایی را متحمل شده و کارایی خود را از دست می‌دهند. باتوجه به اینکه اکثر این صدمات قابل ترمیم و مقاوم سازی هستند، تخریب و بازسازی این سازه‌ها از لحاظ اقتصادی و فنی و زیست محیطی، راه حل معقولی به نظر نمی‌رسد. بدین منظور روش‌های متنوعی برای ترمیم و مقاوم سازی سازه‌های بتنی پیشنهاد شده است. اگرچه این روش‌ها تحت شرایط خاصی مناسب و مقرون به صرفه می‌باشند.

باشند اما هر یک دارای معایبی نیز هستند. از انواع روش های پذیرفته شده برای این منظور میتوان به استفاده از ژاکت های فلزی^۱ و بتنی، اضافه نمودن دیوار برشی، اضافه نمودن بادبند، بتن پاشی^۲ دیوارها، استفاده از FRP اشاره کرد [۱]. از جمله معایب این روش ها میتوان به بالا بودن هزینه ساخت و غیر اقتصادی بودن مصالح مورد استفاده، اجرای سخت و زمان گیر، نداشتن مقاومت در برابر خوردگی (خصوصا در ورقهای فولادی)، ضعف در برابر آتش سوزی، افزایش وزن سازه، مشکلات سنگینی مصالح و نصب و حمل و نقل مصالح نام برد.

با تولید تکنولوژی کامپوزیت های پلیمری FRP و استفاده در بحث های مقاوم سازی سازه های بتنی و فولادی برخی از نقاط ضعف سیستم های مقاوم سازی سنتی بهبود یافت. به همین دلیل این روش در سال های اخیر مورد توجه ویژه مهندسان قرار گرفته و استفاده از آن در پروژه های مقاوم سازی توسعه یافته است. این در حالی است که مهمترین نقطه ضعف این روش بکارگیری چسباننده های اپوکسی است که عملکرد نامناسبی در مقابل حرارت از خود نشان می دهند. بدین منظور جایگزینی این چسباننده ها با سایر چسباننده هایی که مقاومت مناسبی در مقابل حرارت از خود نشان می دهند راه حل مناسبی برای رفع این مشکل می باشد. از جمله این چسباننده ها میتوان به چسباننده های پایه سیمانی اشاره کرد. اما آنچه که باعث عدم استفاده از این چسباننده ها در تکنولوژی FRP می شود، چسبندگی نامناسب ورق های FRP با این نوع چسباننده ها می باشد.

برای رفع این مشکلات در سال های اخیر روش های جایگزینی ارائه گردیده است. یکی از روش های نوین در این زمینه بکارگیری توری منسوج همراه با چسباننده های پایه سیمانی می باشد که با عنوان TRM^۳ شناخته می شود. بتن مسلح شده با توری منسوج (TRC) نوعی کامپوزیت می باشد که شامل ملات پایه سیمانی با سنگدانه های ریز و کارایی بالا و الیاف بافته شد از جنس شیشه، کربن و یا بازالت می باشد [۲]. شاخص ترین ویژگی های TRC مقاومت کششی و تغییر شکل بالا، ایجاد ترک های زیاد قبل از شکست^۴ و دوام زیاد در برابر خوردگی می باشد. این مشخصه های مکانیکی، توری منسوج را در دهه اخیر به یکی از تکنولوژی های قابل استفاده در پروژه های مقاوم سازی تبدیل کرده است [۷-۳].

اسماعیلی و همکاران مطالعاتی در مورد افزایش تنش نهایی و همچنین امکان ایجاد ترک های زیاد قبل از شکست که منجر به وقوع رفتار سخت شدگی کرنشی بتن قبل از شکست می شود را انجام داده اند. آن ها همچنین افزایش جذب انرژی بتن های مسلح شده با تکستایل را نیز نتیجه گیری کرده اند. اسماعیلی و همکاران همچنین ملات UHPC را که در کشش، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد را به عنوان یک نوع مصالح نوآورانه که علاوه بر کاربرد ترمیمی می تواند عملکرد سازه ای نیز داشته باشد، معرفی کرده اند [۸].

استفاده از TRC امکان های جدیدی را در زمینه مقاوم سازی و ترمیم سازه های آسیب دیده به روی ما گشوده است اما پیش از آن که TRC به عنوان یک نوع مصالح ساختمانی مورد قبول جوامع مهندسی قرار گیرد، باید مطالعات و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گیرد [۹، ۱۰].

در این مطالعه به منظور بررسی کارآمدی این روش در مقاوم سازی اعضای فشاری بتنی، ابتدا ظرفیت کششی و رفتار سخت شوندهگی کرنشی آزمون های TRC^۵ با ملات های معمول در این روش مورد آزمایش قرار گرفته و سپس آزمون های استوانه ای با استفاده از ملات انتخاب شده دورگیری گردیدند. برای ارزیابی روش ترمیمی TRC و اثر محصور شدگی، آزمون های

^۱ Steel jacketing

^۲ Shotcrete

^۳ Textile Reinforced Mortar

^۴ Multiple cracking

^۵ Textile Reinforced Concrete

دورگیری شده در یک و دولایه از توری منسوج و همچنین آزمون‌های شاهد (بدون دورگیری) تحت آزمایش بارگذاری فشاری قرار گرفتند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مورد استفاده

آزمونه‌های بتنی استوانه‌ای ساخته شده به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر با مقاومت مشخصه $30MPa$ به عنوان بتن پایه در این آزمایش انتخاب گردیده است. نسبت مخلوط این بتن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - نسبت مخلوط آزمون‌های استوانه‌ای

سیمان	آب	شن	ماسه
$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
۳۹۱	۲۱۵	۸۲۷	۸۸۲

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد TRC در کشش مستقیم از سه نوع ملات ترمیمی استفاده گردیده است. ملات $C1$ شامل سیمان، خاکستر بادی، میکرو سیلیس، ماسه، آب و روان کننده با $W/Cm=0.4$ می باشد. ملات $C2$ شامل سیمان، خاکستر بادی، میکرو سیلیس، ماسه، آب و روان کننده با $W/Cm=0.3$ می باشد. ملات $C3$ شامل سیمان، ماسه، آب و روان کننده با $W/Cm=0.33$ می باشد. همچنین به منظور بررسی اثر محصورکنندگی و افزایش مقاومت فشاری بتن‌های پایه در اثر دورگیری نمودن آن‌ها، ملات $C2$ انتخاب و بکار برده شده است. توری منسوج بکار رفته در این آزمایش برای دورپیچ نمودن آزمون‌های استوانه‌ای، از نوع شیشه ضدقلیای است که مشخصات مکانیکی و هندسی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۲ آماده سازی آزمون‌ها و روش انجام آزمایش (Test setup)

۲-۲-۱ آزمون‌های مربوط به آزمایش کشش مستقیم

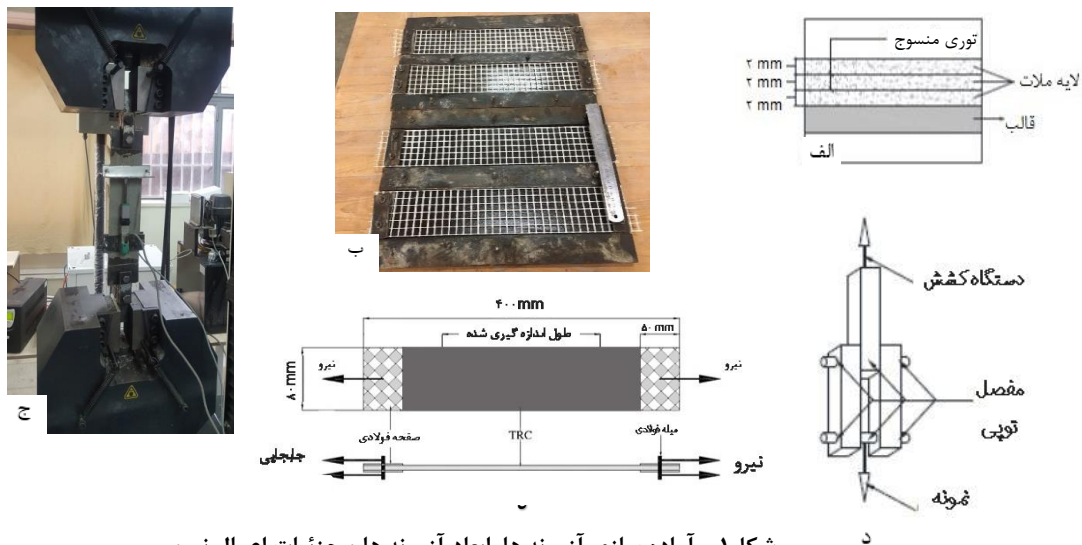
به منظور انجام آزمایش کشش مستقیم، ۹ آزمون مستطیلی به طول ۴۰۰ میلی‌متر و عرض ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر، از ملات‌های مختلف تهیه گردید. در ساخت این آزمون‌ها دو ورقه از توری منسوج به فاصله دو میلی‌متر از هم و سطوح جانبی ملات در قالب قرار داده شده (شکل ۱-الف) و در ابتدا و انتهای قالب تثبیت گردیدند. سپس ملات ترمیمی در قالب ریخته شده و سطح آن صاف گردید. در ادامه آزمون‌ها به مدت ۹۰ روز در مخزن آب با دمای 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد عمل آوری گردیدند. نحوه آماده سازی آزمون‌ها در (شکل ۱-ب) نشان داده شده است. پس از ۹۰ روز سوراخ‌هایی در دو انتهای آزمون‌ها، به منظور اعمال نیروی کششی ایجاد شد. برای جلوگیری از آسیب دیدن آزمون‌ها به هنگام اعمال نیروی

کششی از محل سوراخ شده و همچنین انتقال هر چه بهتر نیرو، صفحات آهنی به ضخامت ۴ میلی متر در دو انتها آزمون ها با استفاده از چسب اپوکسی تثبیت گردید (شکل ۱-ه). تغییر شکل های در امتداد نیروی هر کدام از آزمون ها با استفاده از دو $LVDT$ ثبت گردیده است. اتصال بین صفحات آهنی و دستگاه بارگذاری طوری تعبیه گردیده تا اثرات لنگر خمشی بر روی آزمون های کششی کاملاً از بین برود (شکل ۱-د). برای اعمال نیروی کششی از دستگاه یونیورسال جابجایی-کنترل با سرعت بارگذاری 0.5 mm/min استفاده گردید (شکل ۱-ج).

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی و مکانیکی توری منسوج مورد استفاده

نام محصول*		GRID Q20/20-AAS-13	
جنس الیاف های بافته شده		شیشه ضدقلیایی (AR-Glass)	
فاصله مرکز به مرکز شبکه ها	طول و عرضی (mm)	۱۳	
سطح مقطع الیاف های بافته شده	طول و عرضی (mm ²)	۰/۲۵	
تعداد الیاف های موجود در سطح مقطع	طول و عرضی	۲۰	
مقاومت کششی	میانگین (MPa)	۱۵۰۰	
	کمترین (MPa)	۱۴۵۰	
	بیشترین (MPa)	۱۶۰۰	
	میانگین (MPa)	۱۶۰۰	
	کمترین (MPa)	۱۵۵۰	
	بیشترین (MPa)	۱۷۵۰	

* مشخصات نوشته در جدول بالا اعداد اعلام شده از سوی کارخانه سازنده می باشد.



شکل ۱ - آماده سازی آزمون ها، ابعاد آزمون ها و جزئیات اعمال نیرو

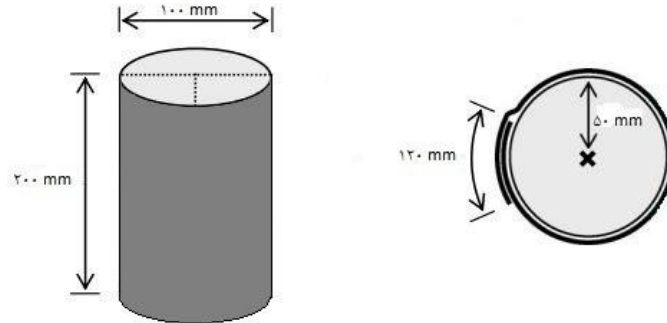
۲-۲-۲ آزمون‌های استوانه‌ای

در جهت پیش برد این پژوهش، ۹ آزمون بتنی استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شده و به مدت ۹۰ روز در مخزن آب با دمای 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری گردیدند. در ادامه به منظور ایجاد چسبندگی هرچه بیشتر ملات ترمیمی (C2) بر روی بتن پایه، سطح آزمون‌ها با شیارهایی به موازات محور استوانه و به فاصله‌ی دوسانتی متری از هم آماده‌سازی گردیدند (شکل ۲-الف). سپس به منظور پاکسازی و از بین بردن ذرات ریز چسبیده به سطح بتن که مانع چسبندگی مناسب ملات ترمیمی می‌شوند، تمامی آزمون‌ها توسط آب تحت فشار کاملاً شسته شدند (شکل ۲-ب). پس از آماده‌سازی آزمون‌ها یک لایه ملات روی آزمون‌ها کشیده شد و توسط توری منسوج دورگیری شدند (شکل ۲-ج). همینطور برای رعایت طول مهاری، در هر لایه به میزان ۱۲۰ میلی‌متر همپوشانی صورت گرفت (شکل ۳) و سپس لایه بعدی ملات روی توری منسوج کشیده شد. ۳ آزمون استوانه‌ای با یک لایه توری منسوج و ۳ آزمون دیگر با دولایه توری منسوج دورگیری گردیدند. ۳ آزمون باقی مانده نیز به عنوان آزمون‌های شاهد مورد استفاده قرار گرفتند تا بدین‌سان میزان تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌ها تحت اثر دورگیری و محصورشدگی نمایان شود. در مرحله پوشش‌دادن توری منسوج، روانی ملات ترمیمی باید به‌گونه‌ای باشد که چسبندگی هرچه بهتر ملات بر روی بتن پایه تامین گردد. بدین منظور، میزان بازشدگی قطر ملات ترمیمی در آزمایش میز جریان ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر پس از ۲۵ ضربه تعیین گردید. نحوه اجرای ملات ترمیمی بر روی آزمون‌های استوانه‌ای در (شکل ۲-د) نشان داده شده است. پس از اجرای ملات ترمیمی، آزمون‌ها به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری گردیدند. قبل از بارگذاری آزمون‌ها، به منظور جلوگیری از تمرکز تنش و شکست نامطلوب، آزمون‌های استوانه‌ای با مخلوطی از ماسه ریز و گوگرد کلاهدک گذاری شدند. آزمون‌های بتنی با استفاده از دستگاه یونیورسال جابجایی کنترل و با سرعت 0/5 میلی‌متر در دقیقه بارگذاری گردیدند (شکل ۲-ه).



شکل شماره ۲

- الف - آماده‌سازی سطح آزمون‌ها (ایجاد شیار بر روی آزمون‌ها)
 ب- شستوی سطح آزمون‌ها با استفاده از آب پر فشار
 ج- دورگیری کردن آزمون‌ها با توری منسوج
 د- اجرای ملات ترمیمی بر روی آزمون‌ها و دورگیری کردن آن‌ها با استفاده از توری منسوج
 ه- آزمون‌های بتنی تحت فشار در دستگاه یونیورسال

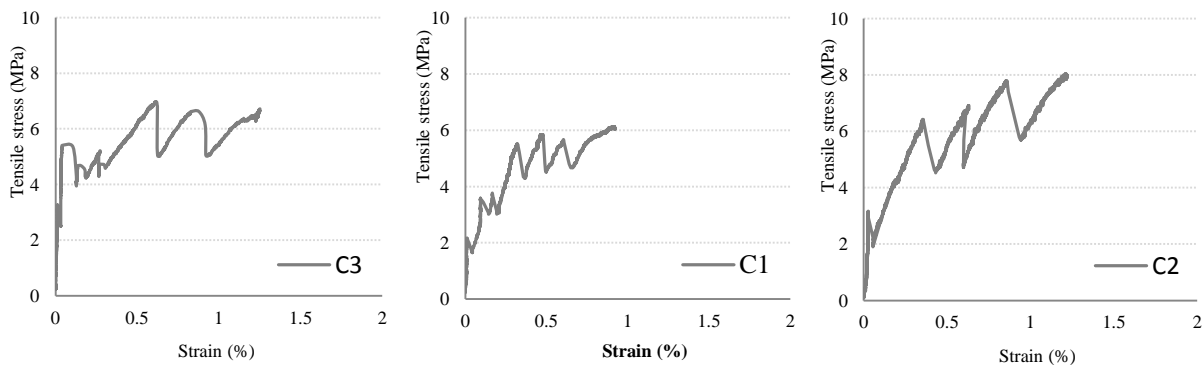


شکل ۳- جزئیات آزمون‌های بتنی، میزان همپوشانی توری منسوج

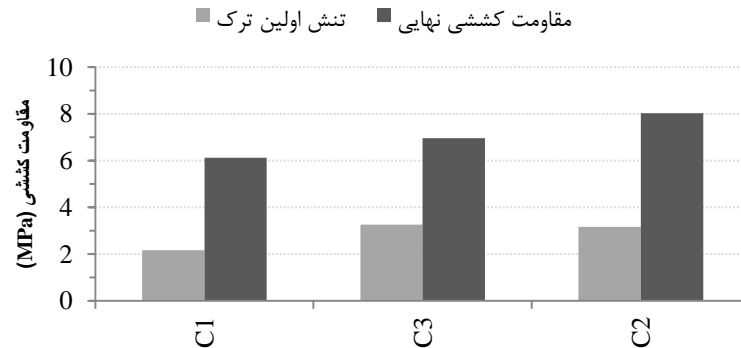
۳- نتایج آزمایشگاهی

منحنی تنش-کرنش آزمون‌های کششی ساخته شده با انواع ملات‌ها در شکل 4 ارائه گردیده است. همچنین شکل 5 نشان دهنده تاثیر نوع ملات بکار رفته در تنش مربوط به اولین ترک و مقاومت کششی نهایی آزمون‌های TRC می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود نوع ملات بکار رفته تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تنش اولین ترک و مقاومت نهایی کسب شده داشته است. ملاحظه می‌گردد که نوع ملات‌های مورد استفاده تاثیر بسزایی بر رفتار آزمون‌های TRC دارد. از جمله این تاثیرات می‌توان به تعداد ترک‌های ایجاد شده در آزمون بتنی، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و انرژی جذب شده توسط آزمون‌ها اشاره کرد.

در آزمایش کشش مستقیم رفتار سه نوع ملات معمول و پرکاربرد در ساخت TRC مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که تنش اولین ترک و مقاومت کششی نهایی آزمون‌های ساخته شده از ملات C3 نسبت به ملات C1 به ترتیب ۵۰٪ و ۱۴٪ افزایش یافته است. تنش اولین ترک و مقاومت کششی نهایی آزمون‌های ساخته شده از ملات C2 نسبت به ملات C1 به ترتیب ۴۶٪ و ۳۱٪ افزایش داشته است. همچنین مقاومت کششی نهایی آزمون‌های C2 نسبت به آزمون‌های C3 به میزان ۱۵٪ افزایش یافته است. به نظر می‌رسد استفاده از مواد پوزولانی (خاکستر بادی) و نسبت آب به مواد سیمانی کمتر در ملات‌های ترمیمی C2 منجر به چسبندگی هرچه بیشتر ملات و توری منسوج شده که عملکرد کششی مناسب آزمون‌های C2 را نسبت به آزمون‌های C1 به همراه دارد. در واقع چسبندگی هر چه بیشتر بین ملات ترمیمی و توری منسوج، افزایش ظرفیت کششی و بهبود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در TRC را بدنبال دارد.



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش ملات‌های مختلف در آزمایش کشش مستقیم آزمون‌های TRC

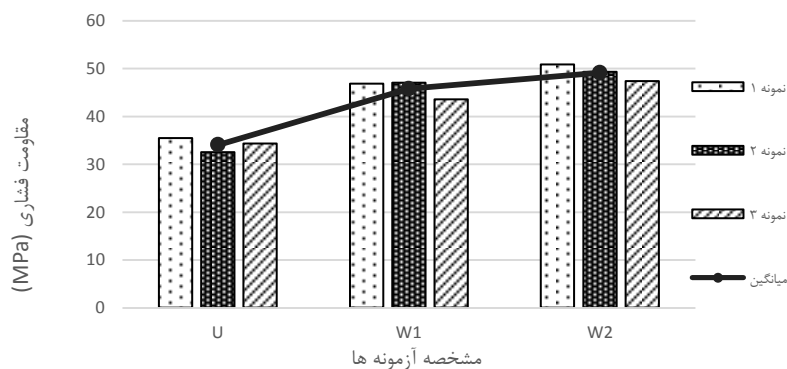


شکل ۵- تنش اولین ترک و مقاومت نهایی مربوط به آزمون‌های کشش مستقیم TRC

از بین ملات‌های آزمایش شده، ملات C2 به دلیل چسبندگی بالا ضمن کارایی مناسب، مقاومت کششی نهایی بالا، رفتار مناسب سخت شوندگی کرنشی با توجه به نمودار تنش-کرنش ارائه شده و تعداد ترک‌های ایجاد شده در آزمون در مقایسه با سایر ملات‌های معمول، برای ترمیم و مقاوم سازی آزمون‌های استوانه‌ای انتخاب گردید. آزمون‌های استوانه‌ای ساخته شده پس از دورگیری توسط TRC، تحت آزمایش بارگذاری فشاری قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی آزمون‌های شاهد و دورگیری شده در جدول ۳ و شکل 6 ارائه شده است.

جدول ۳- مقاومت‌های آزمون‌ها تحت آزمایش بارگذاری فشاری

مشخصه آزمون	مقاومت فشاری میانگین (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
U	34/1	35/4
		32/5
		34/3
W1	45/8	46/8
		47
		43/5
W2	49/1	50/8
		49/3
		47/3



شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری و مقاومت میانگین آزمون‌های شاهد و دورگیری شده

با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می گردد که مقاومت فشاری آزمون‌ها با دورگیری نمودن آن‌ها و همینطور افزایش تعداد لایه های توری منسوج افزایش می یابد. این افزایش مقاومت فشاری نسبت به آزمون‌های شاهد (بدون دورگیری) در آزمون‌های دورگیری شده توسط یک لایه از توری منسوج (W1) در حدود ۳۴٪ و در آزمون‌های دورگیری شده توسط دو لایه از آن (W2) در حدود ۴۴٪ می باشد. در واقع با افزایش تعداد لایه های دورپیچ و تقویت نمودن نیروی محصور شدگی، مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی افزایش قابل ملاحظه ای می یابد.

۴- نتیجه گیری

- با نظر به مجموعه آزمایش‌های انجام یافته در این پژوهش، نتایجی به شرح زیر قابل بیان می‌باشند.
- طبق نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کشش مستقیم مشاهده گردید که نوع ملات مورد استفاده در TRC تاثیر بسزایی بر مقاومت کششی و تنش مربوط به اولین ترک دارد. همچنین رفتار سخت‌شوندگی کرنشی مشاهده شده در منحنی تنش-کرنش مربوط به آزمون‌های کشش مستقیم نیز متاثر از نوع ملات بکار رفته در TRC می‌باشد.
 - با مقایسه و بررسی نسبت و اجزای اختلاط ملات‌های ترمیمی می توان نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین بکارگیری مواد پوزولانی را از پارامترهای مهم در چسبندگی بین توری منسوج و ملات دانست که منتج به افزایش ظرفیت کششی و حتی بهبود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی می‌گردد.
 - با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های فشاری بر روی آزمون‌های دورگیری شده و شاهد، ملاحظه می گردد که با افزایش تعداد لایه های توری منسوج، مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی افزایش می یابد. این افزایش مقاومت فشاری نسبت به آزمون‌های شاهد (بدون دورگیری) در آزمون‌های دورگیری شده توسط یک لایه از توری منسوج (W1) در حدود ۳۴٪ و در آزمون‌های دورگیری شده توسط دو لایه از آن (W2) در حدود ۴۴٪ می باشد.

۵- تقدیر و تشکر

با تقدیر و تشکر از شرکت Solidian و بالاخص جناب دکتر علی شمس که در تهیه توری منسوج مساعدت بی دریغی داشتند و همچنین همکاری کم نظیر و بی شائبه در آزمایشگاه‌های بتن و سازه دانشگاه تبریز که ما را در انجام این مهم یاری نمودند.

۶- مراجع

- [1] Triantafillou, T. (2016). "Textile Fibre Composites in Civil Engineering". Vol. (1), pp 301-321
- [2] Bramehuber, W. (Ed.), 2006. Textile reinforced concrete: report no. 036 of the RILEM State-of-the-Art Report, RILEM Technical Committee 201-TRC.

- [3] Lieboldt, M., Butler, M., Mechtcherine, V., 2008. Application of textile reinforced concrete (TRC) in prefabrication. In: Gettu, R. (Ed.), Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications. RILEM Publications S.A.R.L, pp. 253–262.
- [4] Weiland, S., Ortlepp, R., Hauptenbuchner, B., Curbach, M., 2008. Textile reinforced concrete for flexural strengthening of RC-structures—Part 2: application on a concrete shell. In: ACI SP-251-3, Design & Applications of Textile-Reinforced Concrete, pp. 41–58.
- [5] Mechtcherine, V., 2012. Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites. *Constr. Build. Mater.* 31, 94–104.
- [6] Banholzer, B. 2004, *Bibliothek der RWTH Aachen*, Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix,
- [7] Hegger, J., et al., 2006. *Materials and Structures*, Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete., 39(8): p. 765-776.
- [8] J. Esmaeil, I. Sharifi, K. Andalibi, J. Kasaei. Effect of Different Matrix Compositions and Micro Steel Fibers on Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete.
- [9] Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Elsevier; 2016; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/c2014-0-01415-3>
- [10] Ortlepp R, Ortlepp S. Textile reinforced concrete for strengthening of RC columns: A contribution to resource conservation through the preservation of structures. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2017 Feb;132:150–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.133>