

## بررسی استفاده از ماکرو الیاف بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی

### مقاله پژوهشی

امین چوبدار، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

امین فرج‌اللهی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷- پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۱۴۴-۱۳۵

### چکیده

افزودن الیاف ماکرو به دال‌های بتنی بر روی زمین، افزایش ظرفیت خمشی، مقاومت خستگی، کاهش نرخ زوال ترک‌ها و کمک به انتقال برش در اتصالات و ترک‌ها را نشان می‌دهد. این مطالعه آزمایشگاهی برای تعیین مزایای الیاف ماکرو در بتن غلتکی (RCC) برای روسازی‌ها با اندازه‌گیری تغییر در خواص مکانیکی RCCs و مقایسه آن با بتن الیاف معمولی برای روسازی‌ها انجام شد. شش نوع الیاف، چهار نوع مصنوعی و دو فولاد، با شکل‌های فیبر مختلف در مخلوط‌های RCC در دو سطح دوز (۰.۲٪ و ۰.۴٪ حجمی) ترکیب شدند. افزودن ماکروفیبرهای مصنوعی حداکثر تراکم خشک (MDD) را بر روی مخلوط کنترل RCC با کاهش اصطکاک داخلی بین سنگ دانه‌ها افزایش داد. در حالی که الیاف فولادی تاثیر محدودی بر MDD بتن غلتکی داشت. برای انواع مختلف فیبر، RCC حاصل با فیبرها افزایش آماری قابل‌توجهی در مقاومت فشاری و کشش شکاف نسبت به مخلوط کنترل RCC داشت. افزودن فیبرها، مقاومت خمشی RCC را افزایش نداد. اما به طور قابل‌توجهی ظرفیت مقاومت پس از پیک و مقاومت باقی مانده RCC را بهبود بخشید. افزایش در مقاومت باقی مانده به نوع الیاف و شکل، شبیه به عملکرد در بتن سیمان پورتلند معمولی بود. خواص شکست RCC با فیبرها براساس تست‌های کشش فشرده دیسک شکل (DCT) مشابه یا بیشتر از PCC با فیبرها نشان داده شد که هر دو روسازی‌های RCC و PCC، وقتی به درستی ساخته شوند، مقاومت به شکست و خستگی مشابهی خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: فیبرها، روسازی بتن غلتکی، عملکرد خمشی، مقاومت خمشی، شکست

### ۱- مقدمه

سیمانی روسازی‌های RCC به ترتیب ۱۲ درصد وزنی و ۱۵ درصد وزنی هستند. با توجه به روش ساخت، RCC اجازه قرار دادن سستی میله‌های دویل را نمی‌دهد. بنابراین، انتقال بار در اتصالات انقباضی در روسازی‌های RCC ممکن است یک نگرانی به خصوص در سطوح ترافیکی بالاتر باشد. الیاف ماکرو ساختاری ممکن است انتقال بار برشی بهبود یافته و مقاومت باقی مانده در RCC را همانطور که برای روسازی‌های مرسوم PCC ذکر شد، فراهم کند (Bordelon, 2009). الیاف ماکرو برای کاهش ضخامت

علاقه به بتن غلتکی (RCC<sup>1</sup>) به عنوان یک مصالح سنگ فرش در سال‌های اخیر به دلیل سود اقتصادی آن نسبت به دیگر مصالح ساختمانی پایدار، مصلحت ساخت، تکنولوژی پیشرفته و توانایی باز شدن در ابتدای ترافیک افزایش یافته است. از دیدگاه مصالح، RCC در مقایسه با روسازی‌های بتنی سیمان پورتلند (PCC<sup>2</sup>) در نتیجه افزایش محتوای سنگ دانه‌ها، درجه‌بندی پیوسته سنگ دانه‌ها (ACI, 1995; Harrington, 2010) و افزایش انرژی فشرده‌سازی ساخت‌وساز، محتوای سیمانی را کاهش داده‌است. محتویات

دولومیت درشت (حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر)، تراشه‌های دولومیت (حداکثر اندازه اسمی ۹٫۵ میلی‌متر)، و ماسه طبیعی، برای هدف قرار دادن دانه بندی ترکیبی که به منحنی حداکثر تراکم با توان ۰٫۴۵، نزدیک شد، متناسب شدند. قبلا نشان داده شد که درجه بندی سنگ دانه‌های انتخاب شده، نقاط قوت کافی برای یک روسازی RCC با همان مقدار سیمان مورد استفاده در این مطالعه را فراهم می‌کند (Bordelon, 2009). تمام توده‌های سنگ به اندازه‌های جداگانه توزین شدند و برای رسیدن به دانه بندی هدف مجدداً ترکیب شدند. سپس مصالح جهت خشک شدن و از بین رفتن رطوبت در گرمخانه قرار گرفتند. برای این مطالعه، ۱۲ مخلوط RCC (جدول ۱) با استفاده از روش حجمی توسعه داده شدند: یک مخلوط کنترل بدون فیبر، شش مخلوط با مقدار فیبر ۰٫۴٪ حجمی، و پنج مخلوط با مقدار فیبر ۰٫۲٪ حجمی. شکل و خواص مواد شش فیبر در جدول ۲ نشان داده شده است. ویژگی بافت سطحی یا فیبر که با طول فیبر (در میلی‌متر) و سطح دوز فیبر دنبال می‌شود. به عنوان مثال، برجسته - ۴۸ - ۰٫۴ نشان دهنده یک فیبر منبسط شده، طول ۴۸ میلی‌متر و مقدار ۰٫۴٪ حجمی است. تمام مخلوط‌های RCC دارای مقدار سیمان ثابت ۲۸۱٫۸ کیلوگرم در مترمکعب بودند. تست‌های پروکتور اصلاح شده مطابق با ASTM D ۱۵۵۷ برای تعیین رابطه رطوبت - چگالی برای یک نوع فیبر داده شده انجام شد. پنج پردازنده اصلاح شده نقطه‌ای در محتوای رطوبت اسمی که از ۵٪ تا ۹٪ تغییر می‌کرد اجرا شدند تا حداکثر تراکم خشک ( $MDD^5$ ) و رطوبت بهینه ( $OMC^6$ ) بدست آید که در جدول ۳ آمده است. تست پروکتور اصلاح شده تنها برای مخلوط‌های RCC با حجم فیبر ۰٫۴٪ انجام شد. فرض بر این بود که تفاوت ناچیزی در OMC برای حجم فیبر پایین‌تر ۰٫۲٪ وجود دارد. به طور کلی، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، فیبرهای ماکرو مقادیر مشابه یا کمی بیشتری از OMC را برای مخلوط‌های RCC نسبت به کنترل تولید کردند. MDD هر مخلوط با الیاف بیشتر از مخلوط کنترل RCC بود (جدول ۳ را ببینید)، که همچنین توسط Neocleous و همکاران برای حجم‌های بالاتر الیاف فولادی نسبت به آنچه در این مطالعه استفاده شد یافت شد. به منظور تعیین اینکه آیا وزن فیبر دلیل اصلی افزایش

تختال، کنترل پهنای ترک و کاهش نرخ زوال ترک، افزایش فاصله اتصال و افزایش خواص شکست به روسازی‌های پی سی‌سی اضافه شده‌اند (Roesler, 2008; Altoubat, 2004). با کاهش پهنای ترک در یک اتصال، مکانیزم برشی بین قفل سنگ دانه افزایش می‌یابد و در نتیجه انتقال بار را افزایش می‌دهد و به طور بالقوه تنش‌های کششی بحرانی دال‌ها را کاهش می‌دهد. مطالعات قبلی RCC تقویت شده با فیبر در ابتدا، به استثنای یک مطالعه که از الیاف مصنوعی استفاده کرد، به بررسی میکرو فیبرهای فولادی پرداخته‌اند (Jianxin et al, 2017). اضافه کردن فیبرها به RCC مقاومت، مدول الاستیک، انرژی شکست، چگالی و عمر خستگی را نسبت به RCC بدون فیبرها افزایش یا کاهش می‌دهد. واضح است که نوع فیبر (فولاد یا ترکیبی)، ویژگی‌های هندسی فیبر (نسبت ابعاد، طول، شکل و بافت سطح) و مقدار فیبر بر خواص مکانیکی مخلوط بتن مسلح شده با فیبر تاثیر می‌گذارد. در این مطالعه، اثر نوع الیاف، هندسه و سطح دوز بر خواص مکانیکی و شکست RCC برای یک مجموعه ثابت از اجزا تعیین خواهد شد. نوع و مقدار سیمان مصرفی.

## ۲- اهداف

افزودن الیاف ماکرو به بتون ساده، مزایای ساختاری و عملکردی بیشتری را برای روسازی‌های بتونی به ویژه برای روسازی‌های بتونی در سال‌های اخیر فراهم کرده است. مطالعات محدودی در مورد میکرو فیبرها، به ویژه فیبرها مصنوعی، بر روی مقاومت، سختی و خواص شکست RCC وجود دارد. اهداف این مطالعه مشخص کردن مقاومت RCC تقویت شده با فیبر، مدول الاستیک، پارامترهای سختی بتون مسلح با فیبر ( $FRC^3$ )، و پارامترهای شکست کشش فشرده دیسک شکل ( $DCT^4$ ) برای انواع مختلف فیبر، شکل و درصد با توجه به طرح مخلوط RCC ثابت برای روسازی‌ها است.

## ۳- روش تحقیق

### ۳-۱- طراحی مخلوط RCC

نوع و درجه اختلاط یکی از عوامل کلیدی در طراحی مخلوط RCC است که نشان داده شده است بر خواص تازگی و مکانیکی آن تاثیر می‌گذارد. سه منبع سنگ دانه،

مخلوط کنترل افزایش دادند، در حالی که الیاف فولادی تنها MDD را تا ۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب یا ۰,۵٪ افزایش دادند. مکانیزم پیشنهادی برای افزایش MDD در RCC حاوی الیاف مصنوعی، کاهش اصطکاک داخلی بین توده‌های تهیه‌شده توسط فیبر پلیمری بود.

MDD است، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده‌است، وزن الیاف به ازای هر متر مکعب RCC از MDD کم شد. نتایج در جدول ۳ به وضوح نشان می‌دهد که اضافه کردن هر نوع فیبر ماکروی مصنوعی به فشرده‌سازی RCC کمک می‌کند، در حالی که الیاف فولادی تنها تاثیر محدودی بر MDD دارد. به طور متوسط، مخلوط‌های الیاف مصنوعی، MDD را تا ۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب یا ۲,۳٪ نسبت به

جدول ۱. نسبت‌های مخلوط (کیلوگرم بر مترمکعب)

کد نمونه	نوع سیمان تپ ۱	سنگدانه	اب	فیبرها
کنترلی	282	2093	154	-
برجسته-۴۸-۰,۲	282	2169	156	1.8
برجسته-۴۸-۰,۴	282	2168	156	3.6
برجسته-۵۰-۰,۲	282	2142	170	1.8
برجسته-۵۰-۰,۴	282	2140	170	1.8
صاف-۴۸-۰,۲	282	2132	172	3.6
صاف-۴۸-۰,۴	282	2130	172	1.8
صاف-۵۰-۰,۲	282	2155	155	1.8
صاف-۵۰-۰,۴	282	2154	155	3.7
مارپیچ-۲۵-۰,۴	282	2099	178	31.4
قلابی-۶۰-۰,۲	282	2125	172	15.7
قلابی-۶۰-۰,۴	282	2109	172	31.4

جدول ۲. خصوصیات مواد فیبر

شماره فیبر	کد فیبر	مواد	نسبت منظر	طول (میلیمتر)	تغییر شکل سطحی	مقاومت کششی	مدول الاستیک
1	برجسته- ۴۸	فیبر ماکرو مصنوعی	67	48	به طور پیوسته برجسته شده	640	10
2	صاف-۴۰	فیبر ماکرو مصنوعی	90	40	صاف	620	9.5
3	برجسته- ۵۰	فیبر ماکرو مصنوعی	75	50	تغییر شکل سطحی	550	7
4	صاف-۵۸	فیبر ماکرو مصنوعی	-	58	صاف	620	7
5	قلابی-۶۰	فیبر فلزی	55	60	انتها قلاب دار	1500	207
6	مارپیچ-۲۵	فلز با کرن بالا	50	25	انتها مارپیچ	1700	-

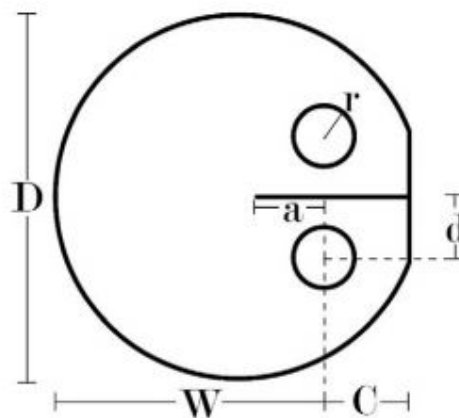
جدول ۳. نتایج پروکتور اصلاح شده

درصد اختلاف در MDD نسبت به نمونه کنترلی	منهای MDD وزن فیبر (kg/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	MDD (kg/m <sup>3</sup> )	کد مخلوط
-	-	6.5	2374	نمونه کنترل
3.20%	2449	6.4	2453	برجسته-۴۸-۰,۴
2%	2422	7	2425	برجسته-۵۰-۰,۴
1.60%	2412	7.1	2416	صاف-۴۰-۰,۴
1.80%	2435	6.4	2439	صاف-۵۸-۰,۴
0.30%	2381	7.4	2412	مارپیچ-۲۵-۰,۴
0.70%	2391	7.1	2422	قلابی-۶۰-۰,۴

### ۳-۲- مخلوط کردن، ساخت و آزمایش نمونه

۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی متری با یک چکش ارتعاشی مشابه ASTM ۱۴۳۵C با تفاوت اندازه صفحه بارگذاری (قطر ۸۸ میلی متر)، و اندازه سیلندر (۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی متر در مقابل ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر) فشرده شدند. سه نمونه استوانه برای هر تست مقاومت و مدول ساخته شد. در این پژوهش مدول الاستیک، مقاومت فشاری موثر و تست مقاومت کشش به ترتیب مطابق با انجام شد. تمام آزمایش‌ها در ۲۸ روز با تست مقاومت فشاری اضافی در ۷ روز انجام شدند.

تمام نمونه‌ها با استفاده از نسبت‌های مخلوط نهایی در جدول ۲ در یک مخلوط‌کن قالبی با توجه به ASTM C ۱۹۲ مخلوط شدند و تا زمان تست در یک اتاق مرطوب عمل‌آوری شدند. مشابه با بتن معمولی، الیاف در RCC باید در زمان مناسب و با برش کافی در میکسر برای پراکندگی کافی اضافه شود، در غیر این صورت ممکن است برخورد الیاف رخ دهد. فیبرها و دوزهای مورد استفاده در این مطالعه تاثیر قابل توجهی بر قابلیت کارایی RCC ندارند. برای آزمایش فشار، کشش شکاف، و مدول الاستیک، سیلندرهایی



شکل ۱. شکل شماتیک نمونه DCT

RCC معمولی است که به ترتیب به ۲۴ MPa و ۳۱ MPa نیاز دارد. مخلوط‌های الیاف RCC که منجر به بیشترین قدرت تراکم شدند نیز مخلوط‌های RCC با بزرگ‌ترین MDD بودند. مخلوط‌های الیاف مصنوعی افزایش استحکام فشاری بیشتری از ۷ تا ۲۸ روز نسبت به کنترل داشتند در حالی که مخلوط‌های الیاف فولادی افزایش استحکام مشابهی نسبت به کنترل داشتند. همه الیاف، به استثنای ۶۰ - ۲۵، میانگین قدرت تراکم ۲۸ روزه بیشتری نسبت به مخلوط کنترل داشتند اما تنها ۴ تا از ۱۱ مخلوط فیبر از نظر آماری بیشتر بودند (با توجه به آزمون t با فاصله اطمینان ۹۵٪). چهار مخلوط RCC بزرگ‌تر از نظر آماری همگی حاوی الیاف مصنوعی هستند که احتمالاً به افزایش بیشتر در چگالی ارائه شده توسط الیاف مصنوعی نسبت داده می‌شوند. تحقیقات قبلی یافته‌های مشابهی را گزارش کرده‌اند که شامل شدن الیاف مصنوعی یا فولادی در بتن، مقاومت فشاری را بدون ایجاد مکانیزمی برای این رفتار مشاهده شده افزایش داده‌است. افزایش مقدار فیبر از ۰٫۲٪ به ۰٫۴٪، افزایش آماری در مقاومت فشاری تنها برای یک نوع فیبر نشان داد (صاف ۴۰) در حالی که هیچ یک از فیبرهای باقی مانده از نظر آماری مقاومت فشاری متفاوت نداشتند وقتی که تنها مقدار فیبر تغییر می‌کرد. نسبت به مخلوط کنترل RCC، تمام مخلوط‌های فیبر دارای میانگین قدرت کشش شکاف ۲۸ روزه بالاتری بودند، که در مقالات برای الیاف فولادی نشان داده شده‌است، ۷ از ۱۱ مخلوط فیبر RCC که از نظر آماری قدرت کشش شکاف بیشتری دارند (با مقادیر پرننگ در جدول ۴ نشان داده شده‌است). از چهار مخلوط الیاف بدون تفاوت آماری در قدرت کشش شکاف در مقایسه با کنترل RCC، سه مخلوط الیاف مصنوعی صاف بودند که احتمالاً پیوند سطحی بین فیبر و خمیر را کاهش داده بودند. سه مخلوط الیاف فولادی بیشترین افزایش را در قدرت کشش شکاف با مخلوط نشان دادند که قدرت کشش شکاف را نسبت به شاهد ۶۸٪ افزایش داد. حضور فیبرها هیچ اثر آماری بر مدول الاستیک RCCs مشابه با تحقیقات Sahin و Kksai نداشت. اما در مقایسه با پژوهش‌های دیگر مدول الاستیسیته می‌تواند افزایش یا کاهش یابد.

علاوه بر آزمایش‌های مقاومت استاندارد، نمونه‌های شکست نیز ساخته شدند. مزیت تست شکست این است که پارامترهایی مانند ضریب شدت تنش بحرانی ( $K_{IC}$ ) و انحراف بحرانی نوک ترک ( $CTOD_c^V$ )، اندازه و ویژگی‌های مستقل از نمونه هستند (Jenq, 1985)، که امکان مقایسه با دیگر داده‌های منتشر شده را فراهم می‌کند. شکل نمونه‌های دیسک شکل (DCT) (شکل ۱) به این دلیل انتخاب شد که نمونه‌های RCC را می‌توان از سیلندرهای ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری ساخت، که می‌تواند با یک روش استاندارد ایجاد شود، برخلاف مطالعات قبلی که از یک روش تراکم غیر استاندارد برای تست خواص شکست تیره‌ای RCC استفاده کردند. برای تست خواص شکست هندسه DCT، یک استوانه ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متری مطابق با ASTM C ۱۴۳۵ ساخته شد که از آن پنج نمونه برش، آماده‌سازی، آزمایش، و مطابق با فرآیند مشخص شده توسط امیرخانیان و همکاران (Amirkhanian, 2016) مشخص شدند. ویژگی‌های شکست گزارش شده مهم هستند. عبارتند از: فاکتور شدت تنش ( $K_{IC}$ )، تغییر مکان بحرانی نوک ترک (CTODC)، انرژی شکست اولیه ( $G_f$ )، انرژی شکست کل ( $eGF$ ) و انرژی شکست برای رسیدن به ۵ میلی‌متر ( $eGF$ ). برای آزمایش تیر خمشی مطابق با ASTM ۱۶۰۹C، پنج نمونه تیر (۱۵۰ تا ۱۵۰ تا ۵۲۵ میلی‌متر) با استفاده از ASTM ساخته شدند. به سادگی تیرهای پشتیبانی شده تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای (نقطه سوم) با استفاده از یک قاب بار هیدرولیک، و غلتک‌های نامحدود تست شدند (ASTM ۲۰۱۰). نرخ‌های بارگذاری مبتنی بر انحراف پیشنهاد شده در ASTM ۱۶۰۹C باعث شکست زودرس نمونه‌ها شده‌است (Banthia, 2013)، به خصوص تیرهای مقاومت بالاتر و در نتیجه نرخ‌های تغییر شکل پیشنهاد شده توسط بانثیا (Banthia, 2013) به کار گرفته شده‌اند.

#### ۴-نتایج

##### ۴-۱- استحکام و مدول الاستیک

میانگین سه نمونه برای مقاومت و مدول در جدول ۴ همراه با ضریب تغییر نشان داده شده‌است. قدرت تراکم ۷ و ۲۸ روزه برای همه مخلوط‌ها بسیار بالاتر از ویژگی‌های

جدول ۴. مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول برجهنگی نمونه‌ها

کد نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مدول الاستیک ۲۸ روزه (گیگاپاسکال)
کنترلی	40.5	46.7	4	31.6
برجسته-۴۸-۰,۲	42.7	52.3	5.3	33
برجسته-۴۸-۰,۴	42	56.6	5.35	29
برجسته-۵۰-۰,۲	41.7	51	5.25	31.8
برجسته-۵۰-۰,۴	40	48.2	4.85	28.8
صاف-۴۸-۰,۲	38.1	47.2	4.25	30.2
صاف-۴۸-۰,۴	37.2	54.5	4.25	30.4
صاف-۵۰-۰,۲	40.2	49.9	4.8	30.8
صاف-۵۰-۰,۴	42	53.9	4.45	32.6
مارپیچ-۲۵-۰,۴	34.9	41.1	5.9	-
قلابی-۶۰-۰,۲	43.2	50.3	6.75	32
قلابی-۶۰-۰,۴	39.4	46.3	6.3	30.8

#### ۴-۲- آزمایش عملکرد خمشی

روسازی‌های بتونی با مقدار قدرت باقی مانده وابسته به نوع الیاف، هندسه و مقدار مورد انتظار، قابل قبول خواهد بود. RCC با الیاف فولادی قلاب دار می‌تواند منجر به مقاومت باقی مانده مشابه با بتون سیمان پرتلند مسلح شده با فیبر معمولی (FRC) شود، به عنوان مثال،  $1/6 \text{ MPa}$  برای  $150\text{F}$  در  $35 / 0\%$ ، در حالی که RCC حاوی الیاف مصنوعی در همان نسبت حجمی از فولاد که مقاومت‌های پسماند کمتری تولید می‌کند. به طور کلی، مانند FRC متداول، افزایش نسبت حجمی الیاف مصنوعی ممکن است برای به دست آوردن استحکام باقی مانده مشابه با انواع خاص الیاف فولادی مورد نیاز باشد. روش تراکم RCC، الیاف فولادی را به گونه‌ای تغییر شکل می‌دهد که مقاومت باقی‌مانده و چقرمگی را برای الیاف فولادی خاص نسبت به الیاف مصنوعی افزایش می‌دهد. این تغییر شکل فیبر در طول فشردگی نیز برای الیاف مصنوعی رخ می‌دهد و در واقع افزایش قابل توجهی در قدرت در جدول ۵ ایجاد می‌کند، اما این مکانیزم احتمالاً منجر به کاهش در قدرت باقی مانده RCC با الیاف می‌شود زیرا فیبرهای بیشتری در طول بارگذاری پاره می‌شوند تا بیرون کشیده شوند.

پارامترهای عملکرد خمشی حاصل در جدول ۵ فهرست شده‌اند. افزودن فیبرها، در مقایسه با مخلوط کنترل RCC برای ۷ تا ۱۱ مخلوط الیاف RCC، مقاومت‌های خمشی کمتری تولید کرد. مقادیر استحکام خمشی RCC بین  $4.3$  تا  $5.7 \text{ MPa}$  را می‌توان براساس منابع (ACI, 1995) برای تیره‌ای برش خورده از روسازی‌های RCC پیش‌بینی کرد. مقاومت خمشی پایین‌تر همه مخلوط‌های RCC در این مطالعه احتمالاً به سختی مرتبط با تراکم تیر RCC و فقدان یک روش استاندارد نسبت داده می‌شود. برای یک نسبت حجم فیبر ثابت، مخلوط با  $0.4\%$  فیبر بالاترین مقاومت باقیمانده و نسبت قدرت موجی معادل همه مخلوط‌های فیبر RCC را داشت، که یک روند مشابه برای بتون معمولی نشان داده شده توسط آلتابات و همکاران را تایید می‌کند. بوراتی و همکاران (Buratti et al, 2010) نیز مقادیر چقرمگی بالاتری را برای الیاف فولادی نشان داده شده‌اند. با افزایش مقدار فیبر، مقادیر مقاومت باقی مانده ( $600\text{F}$  و  $150\text{F}$ ) و چقرمگی خمشی ( $150\text{T}$ ) برای هر نوع فیبر افزایش یافت، که مطابق با منابع FRC است. نتایج در جدول ۵ نشان داد که تمام مخلوط‌های RCC حاوی الیاف، مقاومت‌های باقی مانده را تولید کردند که برای استفاده در

جدول ۵. نتایج آزمایش عملکرد خمشی

RT150 (%)	T150 (N.m)	F150 (Mpa)	F600 (Mpa)	MOR (Mpa)	کد نمونه
-	-	-	-	4.65	کنترلی
17.4	18.5	0.4	0.7	4.15	برجسته-۴۸-۰,۲
32.5	36.5	1.05	1.45	4.35	برجسته-۴۸-۰,۴
15.4	16	0.5	0.55	4.1	برجسته-۵۰-۰,۲
29.2	30	1.05	1.05	4	برجسته-۵۰-۰,۴
14.2	14.5	0.25	0.6	3.95	صاف-۴۸-۰,۲
25.7	26	0.55	1.15	4	صاف-۴۸-۰,۴
16.1	17.5	0.6	0.5	4.25	صاف-۵۰-۰,۲
23.5	25.5	1.05	0.85	4.15	صاف-۵۰-۰,۴
29.3	31	0.75	1.2	5.05	مارپیچ-۲۵-۰,۴
36.6	47	1.35	2	4.5	قلابی-۶۰-۰,۲
59.8	68.5	1.95	3.1	4.7	قلابی-۶۰-۰,۴
42.8	51	1.6	2.1	4.7	نمونه بتنی با فیبر فولادی ۰,۳۵٪
21.8	26	0.85	0.95	4.8	نمونه بتنی با فیبر صاف ۰,۳۲٪
39.5	48.4	1.55	2		نمونه بتنی با فیبر صاف مصنوعی ۰,۴۸٪

#### ۴-۳- تست شکست

یکنواختی نمونه ۰,۴ در جدول ۶ در سن ۲۲۰ روزگی تست شد و هنوز پارامترهای شکست کمتری نسبت به مخلوط‌های RCC با فیبرها داشت که در ۲۸ روزگی تست شدند.

#### ۵- کاربرد در طراحی روسازی‌های RCC

در حال حاضر، تعداد کمی از روش‌های طراحی روسازی بتنی از مقادیر مقاومت پسماند بتون مسلح شده با الیاف استفاده می‌کنند. آلتوبات و همکاران (Altoubat et al, 2008) نشان دادند که برای نسبت مقاومت خمشی معادل ۳۰٪، ضخامت دال حدود ۱۵٪ کاهش یافت. وو و مهدی (Wu et al, 2015) نشان دادند که عمر خستگی نمونه RCC بسیار بیشتر از آن چیزی است که توسط روش طراحی ضخامت انجمن‌های سیمان پورتلند (PCA) برای RCC پیش‌بینی شده بود. با اضافه شدن فیبر ماکرو، عمر خستگی می‌تواند به دلیل بهبود خواص شکست که در

نتایج تست شکست و همچنین مقایسه با مقالات در جدول ۶ نشان داده شده است. به طور کلی،  $K_{IC}$  برای نمونه‌های کنترل RCC و مخلوط‌های دارای الیاف از نظر آماری یکسان بودند. الیاف ماکرو در این بخش‌های حجمی برای RCC یا PCC بر توسعه ترک‌های کوچک و بزرگ در نمونه‌های آزمایشگاهی تاثیر نمی‌گذارد. همه مخلوط‌های الیاف RCC از لحاظ آماری انرژی شکست بیشتری نسبت به مخلوط کنترل RCC داشتند، همانطور که انتظار می‌رفت با انرژی شکست با افزایش درصد فیبر افزایش می‌یابد [۲۰، ۲۶]. مشابه با تست‌های سختی خمشی تیر مخلوط‌های الیاف فولادی انتهای خمیده، بزرگ‌ترین انرژی‌های شکست را تولید کردند. مقایسه نتایج شکست RCC با نتایج آسفالت FRC نشان داده شده در جدول ۶، RCC (صاف و تقویت شده با فیبر) به ترتیب دارای خواص شکست بیشتری (KIC و یا GF۵) نسبت به ترکیب صاف بتنی یا نمونه بتنی با ۰/۴ درصد (برای همان مقدار فیبر) است. علاوه بر این،

جدول ۶ نشان داده شده است و همچنین امکان افزایش استحکام با انواع خاص فیبر، بیشتر گسترش یابد. به طور خلاصه، طراحی مناسب فیبرهای ماکرو در RCC ممکن است منجر به کاهش ضخامت، کاهش پهنای ترکها برای اتصالات/ترکهای بین قفل شده انبوه و کاهش نرخ زوال ترکها شود (Banthia et al, 2007).

جدول ۶. نتایج آزمایش شکست

Gfs (N/m)	Gf (N/m)	CTODc (mm)	E (Gpa)	K1C (Mpa.m)	کد نمونه
164	56.3	0.0216	28.6	1.28	کنترلی
779	66.3	0.0295	33.3	1.47	برجسته-۴۸-۰,۲
1049	64.3	0.0246	29.8	1.38	برجسته-۴۸-۰,۴
523	50	0.0205	34.6	1.32	برجسته-۵۰-۰,۲
701	56.4	0.0202	29.4	1.31	برجسته-۵۰-۰,۴
579	72.1	0.0298	33.8	1.56	صاف-۴۸-۰,۲
1010	66.4	0.0229	30.4	1.41	صاف-۴۸-۰,۴
354	47.1	0.0173	32.1	1.22	صاف-۵۰-۰,۲
642	49.7	0.0232	26.5	1.13	صاف-۵۰-۰,۴
1210	61.1	0.0217	30.7	1.37	مارپیچ-۲۵-۰,۴
1476	64	0.0242	35.3	1.51	قلابی-۶۰-۰,۲
1480	74	0.0254	30.1	1.47	قلابی-۶۰-۰,۴
120	38.2	0.015	-	1.02	نمونه بتنی
630	32.1	0.0132	36.6	1.08	نمونه بتنی با فیبر صاف-۴۰-۰,۴

## ۶- نتیجه گیری

مخلوطهای RCC با الیاف، با دوز فیبر بالاتر، افزایش یافت. برای نسبت حجمی مشابه و الیاف تست شده در این مطالعه، فیبر فولادی انتهایی قلابدار دارای چقرمگی خمشی و مقادیر قدرت باقیمانده بیشتری نسبت به الیاف مصنوعی در RCC بود. آزمونهای عملکرد خمشی نشان داد که RCC تقویت شده با فیبر می تواند چقرمگی خمشی قابل قبول و مقادیر قدرت باقی مانده را برای کاربردهای روسازی تولید کند. اما این مقادیر یا مشابه و یا کم تر از چقرمگی و مقاومت باقی مانده ناشی از FRC معمولی بسته به نوع و مقدار فیبر هستند.

-آزمایش شکست نشان داد که RCC (ساده و تقویت شده با فیبر) خواص شکست بیشتری نسبت به بتون معمولی دارد. مخلوطهای آسفالت (صاف و تقویت شده با الیاف) از متون،

این تحقیق آزمایشگاهی تاثیر نوع الیاف، چهار نوع الیاف مصنوعی ماکرو و دو نوع الیاف فولادی را در دو درصد (۰,۲٪ و ۰,۴٪ حجمی)، بر مقاومت، مدول الاستیک، سختی بتن مسلح حاوی فیبر (FRC)، و پارامترهای شکست برای یک مخلوط بتن غلتکی داده شده (RCC) مورد مطالعه قرار داده است. چندین مخلوط RCC حاوی انواع فیبر مصنوعی افزایش قابل توجهی در MDD و مقاومت فشاری نسبت به مخلوط کنترل RCC داشت. از نظر استحکام کشش شکاف، الیاف فولادی تست شده مقاومت نمونه کنترل RCC را بیشتر از الیاف مصنوعی افزایش دادند. هیچ تفاوت آماری بین مدول الاستیک مخلوط الیاف و نمونه کنترل وجود نداشت. مطابق با ASTM C ۱۶۰۹، همانطور که انتظار می رفت، سختی پلاستیک و مقاومت باقی مانده برای



shaped compact tension test”, J. Test. Eval.44.

-ASTM C1435, (2008), “Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer”, ASTM International.

-Banthia. N., M. Sappakittipako, (2007), “Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization Cement and Concrete Research”, 37, pp.1366–1372.

-Bordelon, A, Cervantes. V, J.R. Roesler, (2009), “Fracture properties of concrete containing recycled concrete aggregates”, Mag. Concr. Res. 61, pp. 665–670.

-Harrington, D, F. Abdo, W. Adaska, C.V. Hazaree, H. Ceylan, F. Bektas, (2010), “Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements”, National Concrete Pavement Technology Center, Technical Report.

Jenq, Y. S.P. Shah, (1985), “Two parameter fracture model for concrete”, J. Eng. Mech, 111, pp.1227–1241.

-Jianxin Ma , Jorge Dietz ; (2017), “Investigation of Influence of Recycled Plastics from Cable”, Ethylene Vinyl Acetate and Polystyrene Waste on Lightweight Concrete Properties Procedia Engineering Volume 195, 2017, pp. 127-133

-Wu. Z, M. M., (2015), “Roller compacted concrete over soil cement under accelerated loading, in: Airfield and Highway Pavements”.

پیشنهاد می‌کند که RCC، اگر به درستی ساخته شود، مقاومت خستگی مشابه یا بهتری نسبت به نمونه های بتنی دارد. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف خواص شکست را نسبت به مخلوط کنترل RCC بهبود بخشید که بیشترین بهبود در افزایش انرژی شکست است. به دلیل این افزایش ها در استحکام و خواص شکست، RCC با فیبرها باید مقاومت خستگی کلی و عمر مفید روسازی های RCC را افزایش دهد.

#### ۷- پی نوشت ها

- 1- Roller compacted concrete
- 2- Portland Cement Concrete
- 3- Fiber Reinforced Concrete
- 4- Disk-shaped compact tension
- 5- Maximum dry density
- 6- Optimum moisture content
- 7- Critical crack tip opening deflection

#### ۸- مراجع

- ACI 325.10R-95, (1995), “State-of-the-art report on roller compacted concrete pavements”, Technical Report, American Concrete Institute.
- Amirkhanian, A. D. Spring, J. Roesler, G. Paulino, (2016), “Forward and inverse analysis of concrete fracture using the disk-

# Evaluation of the Use of Macro Fibers on Performance Properties of Roller Compacted Concrete (RCC) Pavement

*Amin Choubdar, M.Sc., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*E-mail: AminFarajollahi@gmail.com*

Received: September 2020-Accepted: January 2021

## **ABSTRACT**

The addition of macro-fibers to concrete slabs on ground have been shown to increase flexural capacity, fatigue resistance, reduce crack deterioration rates, and assist in shear transfer across joints and cracks. A laboratory study was performed to determine the benefits of macro-fibers in roller-compacted concrete (RCC) for pavements by measuring the change in RCCs mechanical properties and comparing it to conventional fiber-reinforced concrete for pavements. Six fiber types, four synthetic and two steel, with several fiber geometries were incorporated into RCC mixtures at two dosage levels (0.2% and 0.4% by volume). The addition of synthetic macro-fibers increased the maximum dry density (MDD) over the control RCC mix by reducing the internal friction between aggregates whereas steel fiber had a limited impact on the MDD of RCC. For several fiber types, the resultant RCC with fibers had a statistically significant increase in compressive and split tensile strength relative to the control RCC mix. The addition of fibers did not increase the flexural strength of RCC but did noticeably improve the post-peak and residual strength capacity of RCC. The increases in residual strength were dependent on the fiber type and geometry, similar to the behavior in conventional Portland cement concrete (PCC). The fracture properties of RCC with fibers based on disk-shaped compact tension (DCT) tests were shown to be similar or greater than PCC with fibers which indicates both RCC and PCC pavements, when properly constructed will have similar fracture and fatigue resistance.

**Keywords:** Fibers, Roller-Compacted Concrete, Flexural Performance, DCT, Fracture