

## بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی و سن کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی (HPFRCC)

مهدیه صباغیان

دانشجوی کارشناسی ارشد-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

علی خیرالدین \*

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

### چکیده

کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی (HPFRCC)، ملات‌هایی هستند که تحت آزمایش کشش، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهند و همچنین ویژگی‌هایی از جمله، انعطاف‌پذیری، دوام و ظرفیت جذب انرژی بالا را دارا می‌باشند. در این مقاله، اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی، الگوی شکست و ظرفیت جذب انرژی HPFRCC ها پرداخته شد. از آنجایی که برای مصالح HPFRCC، آیین‌نامه مشخصی وجود ندارد، لذا ابتدا، ۱۸ طرح اختلاط با نسبت‌های متفاوت مصالح ساخته شد، طرح اختلاطی که مناسب‌ترین مشخصات مکانیکی را داشت، انتخاب شده است و طرح اختلاط منتخب، با ۶۰ نمونه در سه حالت بدون الیاف، با یک و دو درصد الیاف در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سن نمونه‌ها در هر ۳ حالت، مقاومت کششی و فشاری افزایش داشته است، همچنین الگوی شکست نمونه‌ها با افزودن الیاف از حالت ترک‌های عمیق و تکه‌تکه شدن نمونه به ریز ترک‌های سطحی بهبود یافته است. ظرفیت جذب انرژی را به ترتیب برای ۱ و ۲ درصد الیاف، ۲۴ و ۵۲ درصد افزایش داده است. سپس روابطی که جهت تعیین مقاومت فشاری در سنین مختلف و همچنین محاسبه مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری، برای بتن‌های معمولی در آیین‌نامه‌ها ارائه شده است، برای HPFRCC ها نیز ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی، مقاومت فشاری و کششی، الگوی شکست، ظرفیت جذب انرژی، HPFRCC.

\* نویسنده مسئول: kheyroddin@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

۲۰۰۱ [۱۴]، رابطه خطی  $f_{sp} = 0.09f_c$  بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی آزمایش دونیم شدن را برای بتن‌های الیافی از نوع الیاف فولادی پیشنهاد کردند. پرومال در سال ۲۰۱۴ [۱۵] با کمک گرفتن از داده‌های ارائه شده در مقالات چاپ شده نیز رابطه  $f_{sp} = 0.188f_c^{0.84}$  بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی آزمایش دونیم شدن را برای بتن‌های توانمند الیافی از نوع الیاف فولادی پیشنهاد کردند. روابطی بین مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی توسط محققین ارائه شده است [۱۶، ۱۷]. همچنین روابطی بین مشخصه‌های مهم از جمله درصد الیاف، نسبت آب به سیمان و مشخصه‌های مقاومتی ارائه شده است [۱۸، ۱۹].

## ۲- برنامه آزمایش

در این تحقیق، ابتدا، ۱۸ طرح اختلاط با نسبت‌های متفاوت مصالح ساخته شد [۲۰]، طرح اختلاطی که مناسب‌ترین مشخصات مکانیکی را داشت، انتخاب شده است رفتار مصالح HPFRCC تحت بار فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفت، به این منظور تعداد ۶ نمونه مکعبی و استوانه‌ای ساخته شد و در سنین ۱، ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه برای مقاومت فشاری و سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه برای مقاومت کششی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲-۱- مشخصات مصالح و طرح اختلاط‌ها

طرح اختلاط HPFRCC با نسبت پایین آب به مصالح سیمانی (مجموع مقدار سیمان و میکروسیلیس) برای ۳ گروه، در جدول ۱ ارائه شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس درصد وزنی الیاف موجود در آن‌ها است، با ۱ درصد الیاف (HPFRCC-1%)، با ۲ درصد الیاف (HPFRCC-2%) و نمونه‌های بدون الیاف و مرجع (Reference) است. مصالح سنگی بکار گرفته شده در طرح اختلاط HPFRCC شامل ماسه شسته شده با کمترین میزان فیلر و ماسه سیلیسی<sup>۴</sup> به جهت تأمین پرکننده‌های موردنیاز و بهبود ترک‌های ریز با ۲ اندازه مختلف شامل ۰/۱۸ تا ۰/۷۱ میلی‌متر و ۰/۹ تا ۰/۳۵ میلی‌متر به ترتیب با نام تجاری T141 و T181 استفاده شده است. مصالح سیمانی شامل سیمان پرتلند نوع II و پودر میکروسیلیس هست. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در شکل ۱ قابل مشاهده است. فوق روان کننده PX-MIX

بتن توانمند<sup>۱</sup>، بتنی با مقاومت و دوام بالا هست که از معایب آن، حالت‌های شکنندگی و مقاومت کششی پایین و قابلیت انعطاف‌پذیری محدود را می‌توان نام برد. ایده اضافه کردن الیاف به منظور افزایش مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری، قابل تأمل بوده و کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف سازه‌ای پیدا کرده است [۱-۷]. بکار بردن الیاف در بتن در دهه ۱۹۵۰ برای اولین بار در کشور شوروی انجام شده، سپس در دهه ۱۹۶۰، از انواع الیاف در مصالح مهندسی نظیر گچ، سرامیک، پلاستیک و سیمان، استفاده شده است. همچنین استفاده از الیاف فولادی در FRC ها در سال ۱۹۶۳ توسط رامولدی انجام گرفت [۸].

کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی (HPFRCC)<sup>۲</sup> را می‌توان به عنوان مواد پیشرفته کامپوزیتی که رفتار سخت‌شوندگی کرنشی تحت بار کششی از خود نشان می‌دهند، تعریف کرد؛ بنابراین HPFRCC ها می‌توانند به‌طور بالقوه مشکلاتی از قبیل شکل‌پذیری کم و ازدیاد میلگردها در مقاطع پر فولاد را از طریق توانایی ذاتی در پیوستگی و محصورشدگی، رفع کنند. از جمله مشخصات HPFRCC ها، می‌توان به ظرفیت برشی و کششی نسبتاً زیاد به همراه ظرفیت کنترل ترک و توانایی اتلاف انرژی، اشاره کرد [۹، ۱۰].

مشخصات نمودار تنش-کرنش برای کامپوزیت‌های مسلح شده به الیاف تحت فشار مورد بررسی قرار گرفت و رابطه‌ای برای پیش‌بینی کامل آن نمودار، پیشنهاد شد [۱۱]. همچنین مطالعاتی در زمینه به دست آوردن پاسخ تنش-کرنش برای بتن‌های با مقاومت ۳۵ تا ۸۵ مگاپاسکال و مسلح شده با الیاف انجام گرفته است [۱۲]. عرض ترک‌های ریز به شدت تحت تأثیر نوع الیاف و ماسه هست. می‌توان گفت استفاده از ماسه سیلیسی در HPFRCC ها به همراه الیاف فولادی مقاومت بالا منجر به بهبودی سریع ترک‌های ریز با عرض ترک کمتر از ۲ میکرون می‌شود [۱۳].

دو مشخصه مهم مکانیکی بتن‌های الیافی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش دونیم شدن<sup>۳</sup>) هست. تاکنون روابط تجربی کمی توسط محققانی که بر روی خواص بتن‌های الیافی کار کرده‌اند، ارائه شده است. ناتاراجا و همکاران در سال

<sup>3</sup> Splitting Tensile Strength

<sup>4</sup> Quartz

<sup>1</sup> High Performance Concrete

<sup>2</sup> High performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

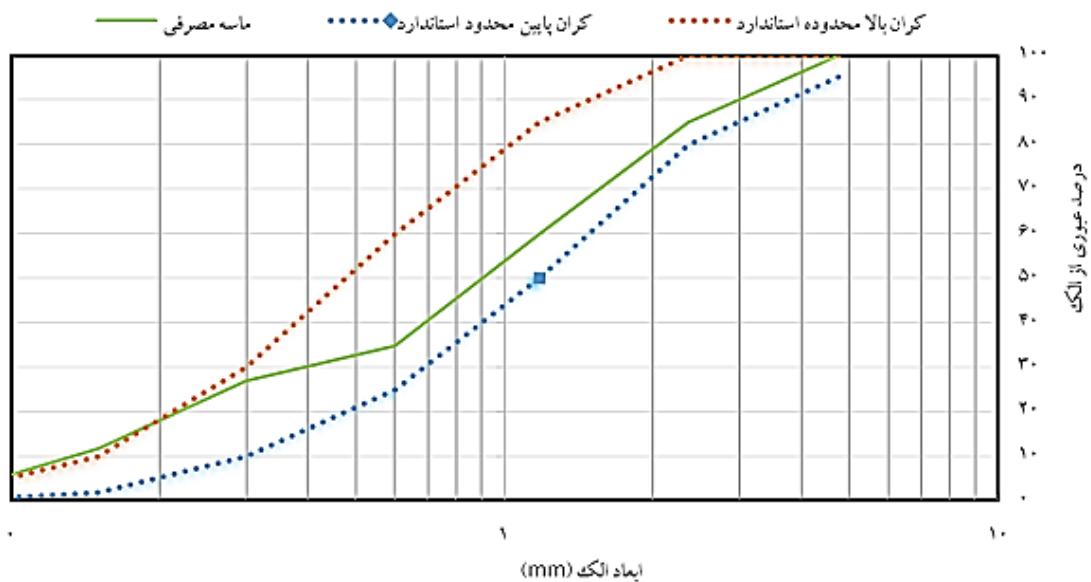
محصولی پلیمری بر پایه پلی کربکسیلات اتر طبق استاندارد ASTM C494 [21] و از نوع F هست که به مقدار ۰/۸ وزن مصالح سیمانی استفاده شده است. الیاف فولادی ۲ سر قلاب باروکش مسی به طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر با نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر الیاف) ۳۷/۵ مطابق شکل ۲، استفاده شده است، مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی مطابق جدول ۲ هست.

جدول ۱- طرح اختلاط کامپوزیت‌های توانمند الیافی

HPFRCC-2%	HPFRCC-1%	Reference	طرح اختلاط مصالح
	مقدار (Kg/m <sup>3</sup> )		
۱۹۴	۱۹۴	۱۹۴	آب
۵۸۰	۵۸۰	۵۸۰	سیمان پرتلند
۶۸	۶۸	۶۸	میکروسیلیس
۱۴۶	۱۴۶	۱۴۶	ماسه سیلیسی (به اندازه ۰/۳۵ تا ۰/۹ میلی‌متر) (T181)
۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰	ماسه سیلیسی (به اندازه ۰/۱۸ تا ۰/۷۱ میلی‌متر) (T141)
۱/۸	۱/۸	۱/۸	ماسه معمولی تا اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر
۰/۸	۰/۸	۰/۸	فوق روان کننده* (%)
۲	۱	۰	الیاف فولادی# (%)
۳۴/۴۵	۳۴/۴۵	۳۴/۴۵	نسبت آب به سیمان (%)
۳۴/۳۴	۳۴/۳۴	۳۴/۳۴	Water/Cement (%)
۲۹/۹۴	۲۹/۹۴	۲۹/۹۴	Water/binder (%)
۳۰/۷۴	۳۰/۷۴	۳۰/۷۴	Water/binder (%)

#منظور درصد حجمی الیاف است.

\*منظور درصد وزنی فوق روان کننده نسبت به مصالح سیمانی (مجموع سیمان و میکروسیلیس) است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی دو سر قلاب

قطر (mm)	طول (mm)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	نسبت ابعادی
۰/۸	۳۰	۷/۸۵	۱۰۵۰	۳۷/۵

سنین کمتر از ۲۸ روز مورد نظر است، ۲ ساعت قبل از آزمایش از آب خارج شده تا خشک شوند. سایر نمونه‌ها در سن ۲۷ روزه از آب خارج شده و در سن مورد نظر، تحت آزمایش قرار می‌گیرند.

### ۲-۳- سن نمونه‌ها

بتن‌ها یا کامپوزیت‌های توانمند الیافی ترکیبی از بتن‌های با عملکرد بالا (HPC)<sup>۱</sup> و بتن‌های الیافی می‌باشند و از آنجایی که رشد مقاومت فشاری در بتن‌های توانمند در سنین کم و حتی در ساعت‌های اولیه پس از ساخت، قابل توجه بوده است، لذا مقاومت فشاری در سنین کم مانند ۱، ۳ و ۷ روزه مورد بررسی قرار گرفته است. در بتن‌های معمولی مقاومت فشاری تا سن ۲۸ روزه روند افزایشی داشته و از آنجا به بعد مقدار آن تقریباً ثابت خواهد شد، اما برای بتن‌های مقاومت بالا تعیین مقاومت فشاری برای سنین ۵۶ و ۹۰ روزه علاوه بر سن ۲۸ روز به دلیل افزایش قابل توجه مقاومت نیز، مرسوم است و می‌توان در طراحی‌ها، مقاومت فشاری در سنین بالاتر و با مقدار بیشتر را ملاک قرار داد تا باعث اقتصادی‌تر شدن طرح گردد. از آنجایی که HPCFRCC ها عملاً مقاومت‌های فشاری بالایی از خود نشان می‌دهند بنابراین روند افزایش مقاومت فشاری تا سنین ۵۶ و ۹۰ روزه نیز در دستور کار قرار گرفته است.

### ۲-۴- مشخصات آزمایش‌های مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی)

مقاومت فشاری که مقاومت در برابر خرابی، تحت بار فشاری است و در جهت تعیین عملکرد مواد در طول مدت سرویس‌دهی مؤثر است. لذا آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های HPCFRCC با کمک استاندارد BS 1881-108 [۲۴] برای نمونه‌های مکعبی مطابق شکل ۳-الف انجام شده است. آزمایش کششی نمونه‌ها در سنین مختلف با کمک دستگاه هیدرولیکی آزمایش مقاومت فشاری مطابق شکل ۳-ب که شامل دو صفحه فولادی با سطح سخت است، با روش دونیم شدن نمونه استوانه‌ای<sup>۲</sup>، طبق استاندارد C496 ASTM [۲۵] انجام شده است. به این صورت که نیروی فشاری قطری در امتداد طول نمونه استوانه‌ای شکل، باعث ایجاد تنش کششی متعامد در نمونه شده است. بار با سرعت ثابت به صورت پیوسته در محدوده‌ی ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر ثانیه وارد شده است.



شکل ۲- الیاف فولادی دو سر قلاب‌دار

### ۲-۲- روند ساخت

جهت ساخت کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی، ابتدا مصالح سنگی و مواد سیمانی شامل سیمان و پودر میکروسیلیس با یک‌دیگر ترکیب شده است، سپس ۷۵ درصد از آب را به مخلوط اضافه کرده تا اجزا مرطوب شوند، بعد از یک دقیقه فوق روان کننده، ۲۵ درصد دیگر آب و سپس الیاف‌های فولادی به مخلوط اضافه شده و هنگامی که مخلوط همگن شد که از روی تجربه مدت ۵ الی ۷ دقیقه بعد از افزودن فوق روان کننده و آب است، می‌توان مخلوط‌کن را خاموش کرد.

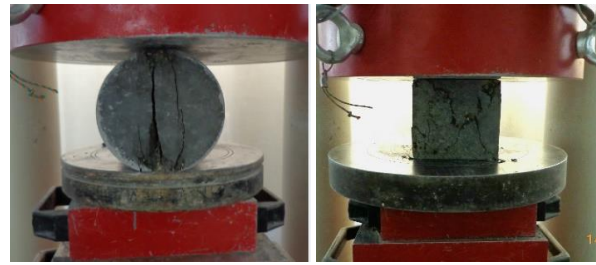
آزمون اسلامپ بر اساس آیین‌نامه ASTM C143 [۲۲] انجام شده است و مقدار نشست متوسط ۷۰ میلی‌متر گزارش شده است. قالب‌های استفاده شده شامل قالب مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر و قالب استوانه‌ای به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر است. مخلوط آماده شده را در قالب‌ها ریخته و با کمک میز لرزان حباب‌های هوای موجود در آن نیز خارج می‌شود. با توجه به این که در اسلامپ‌های محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر که مخلوط کامپوزیت بدون حضور درشت‌دانه، تقریباً روان است و به دلیل تأثیر قابل توجه لرزش بر مخلوط‌های روان، مؤثرترین روش تراکم با توجه به استاندارد ASTM C31 [۲۳] استفاده از میز لرزان است. عمل لرزش باعث کاهش دادن اصطکاک داخلی بین سنگ‌دانه‌ها شده و همین امر باعث نزدیک شدن سنگ‌دانه‌ها به یک‌دیگر می‌شود، هم‌چنین باعث رسیدن حباب‌های هوا به سطح می‌شود.

نمونه‌ها بعد از یک روز از قالب خارج شده و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، مطابق با استاندارد ASTM C31 [۲۳] به روش غرقاب عمل‌آوری شده است. نمونه‌هایی که مشخصات مکانیکی آن‌ها در

<sup>2</sup> Splitting Tension Test or Split Cylinder Test

<sup>1</sup> High Performance Concrete

کاهش مقاومت به دلیل افزایش حباب‌های هوا را به همراه داشته است. لذا با توجه به نتایج افزودن الیاف تأثیر کمی بر مقاومت فشاری داشته است. الگوی شکست نمونه‌های Reference تحت نیروی فشاری مطابق شکل ۵-الف است که با گیرش بهتر نمونه‌ها، از سنین ابتدایی به سنین بالاتر، الگوی شکست از حالت تکه‌تکه شدن و جداسدگی به ترک‌های عمیق تبدیل شده است. الگوی شکست نمونه‌های 1% HPFRCC و 2% HPFRCC تحت نیروی فشاری به ترتیب مطابق شکل ۵-ب) و شکل ۵-ج است که با گیرش بهتر نمونه‌ها، از سنین ابتدایی به سنین بالاتر و چسبندگی بهتر ملات و الیاف، الگوی شکست از حالت دو هرم معکوس روی هم قرار گرفته به ترک‌های ریز بهبود یافته است. در تمامی سنین شکست مطلوب از لحاظ تعادل در ایجاد ترک در وجوه نمونه‌ها، اتفاق افتاده است و درعین حال به دلیل وجود الیاف در نمونه‌های 1% HPFRCC و 2% HPFRCC میزان ترک‌ها نسبت به بتن‌های معمولی، به‌ویژه در سنین بالا بسیار کم شده است، به طوری که در سن ۹۰ روزه و برای نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف ترک‌های ریز بسیار کمی مشاهده می‌شود.



شکل ۳- الف) آزمایش فشاری ب) آزمایش کششی غیرمستقیم

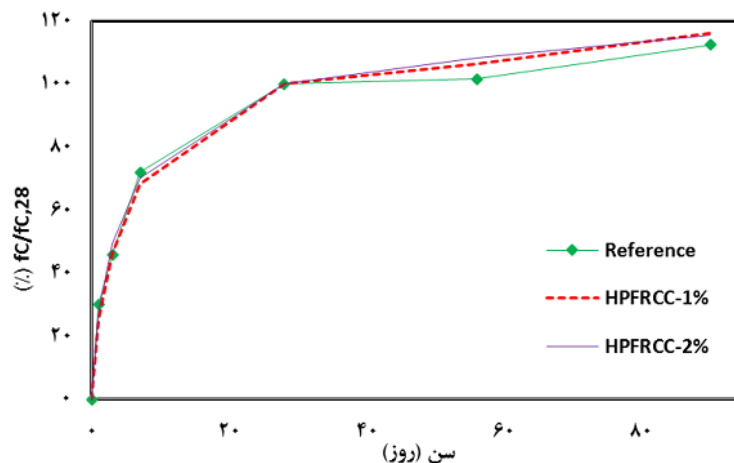
### ۳- نتایج آزمایش

#### ۱-۳- مقاومت فشاری و الگوی شکست

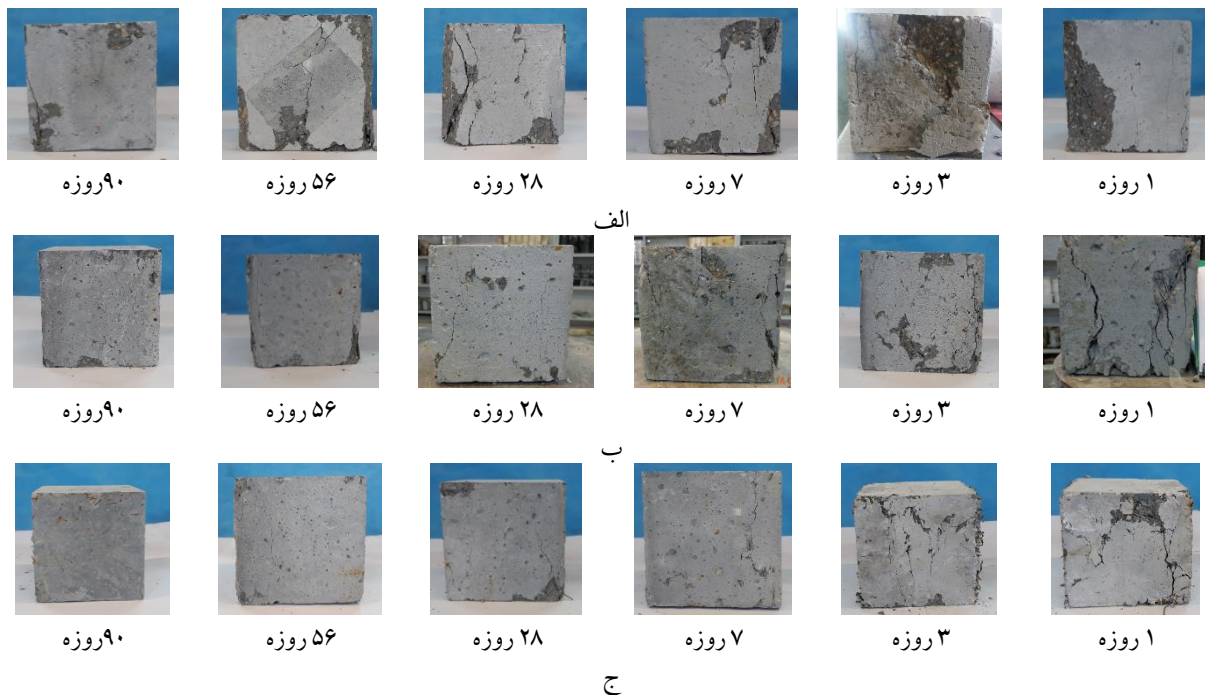
مقاومت فشاری نمونه‌ها که تقسیم بار شکست به مساحت اعمال بار است، در سنین مختلف تعیین شده است، برای هر گروه در سنین موردنظر در جدول ۳ گزارش شده است. روند رشد نسبت مقاومت فشاری در سنین مختلف به مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $f_c/f_{c,28}$ ) نمونه‌های Reference، 1% HPFRCC و 2% HPFRCC مطابق شکل ۴ است، درواقع اضافه کردن الیاف به آن‌ها هم‌زمان اثر مثبت افزایش مقاومت به دلیل مهار ترک‌ها و هم‌چنین اثر منفی

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری متوسط HPFRCC ها در سنین مختلف (MPa)

HPFRCC-2%	HPFRCC-1%	Reference	سن نمونه (روز)
۱۹/۷	۱۷/۸	۲۱	۱
۳۵	۳۲/۵	۳۲	۳
۴۹/۷	۴۸/۱۴	۵۰/۳	۷
۷۰/۹	۷۰/۴	۶۹/۸	۲۸
۷۶/۷	۷۴/۹	۷۰/۹	۵۶
۸۲	۸۱/۸	۷۸/۵	۹۰

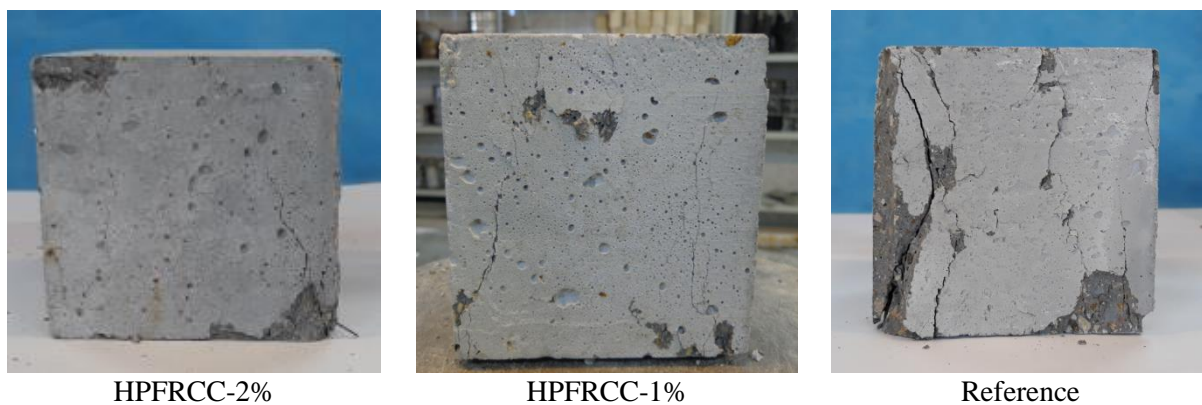


شکل ۴- روند رشد مقاومت فشاری در سنین مختلف نسبت به سن ۲۸ روزه



شکل ۵- الگو شکست نمونه‌های الف) Reference (ب) HPFRCC-1% (ج) HPFRCC-2% تحت بار فشاری در سنین مختلف مقایسه الگوی شکست نمونه‌ها تحت نیروی فشاری در سن ۲۸ روزه برای طرح اختلاط‌های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% در شکل ۶ قابل مشاهده است که بر اساس آن می‌توان نتیجه گرفت پل زدن الیاف در هنگام ترک خوردگی، مانع از تکه‌تکه شدن نمونه‌ها شده و الگوی شکست هرمی شکل را به ترک‌های ریز چندگانه تبدیل کرده است. همچنین باعث انسجام بهتر نمونه‌ها بعد از شکست نهایی شده است. الگوی شکست نمونه‌های Reference تحت بار فشاری در سنین مختلف به صورت دو هرم معکوس است و دلیل آن وجود اصطکاک بین نمونه‌ها و فک دستگاه است که برای مقایسه آن با الگوی مناسب پیشنهادی استاندارد BS-EN 12390-3 [۲۶]، برای سن ۲۸ روزه در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی تحت

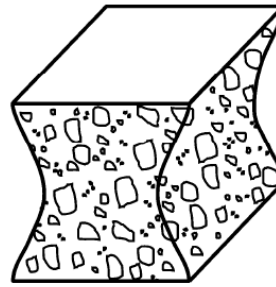
$$P_1 = P_2 \frac{0.84 * A_2}{A_1} \quad (1)$$



شکل ۶- الگو شکست نمونه‌های الف) Reference (ب) HPFRCC-1% (ج) HPFRCC-2% تحت بار فشاری در سن ۲۸ روزه

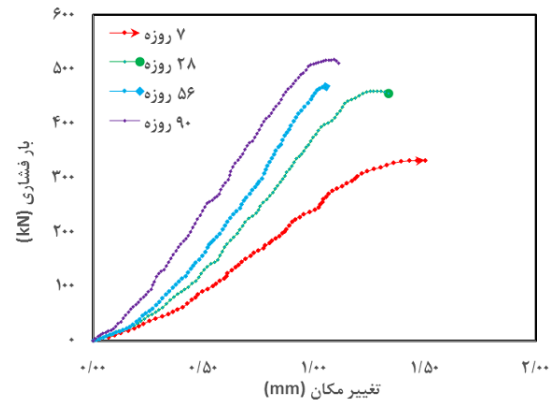
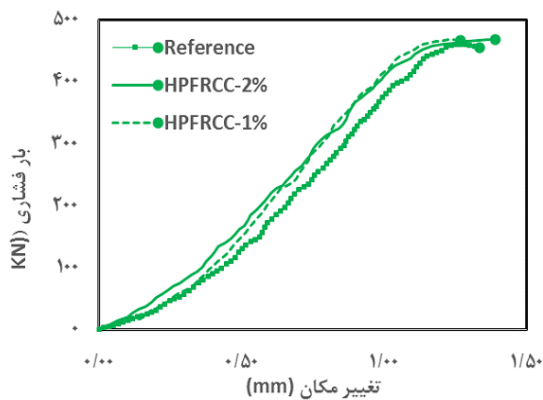


ب



الف

شکل ۷- الگوی شکست الف) استاندارد BS EN 1239-3 [۲۶] ب) نمونه Reference برای سن ۲۸ روزه



شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های بار-تغییر مکان در سن ۲۸ روزه برای ۳ گروه

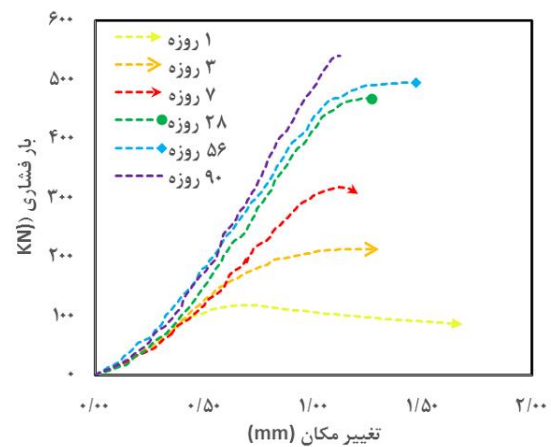
شکل ۸- منحنی‌های بار-تغییر مکان در سنین مختلف برای Reference

### ۲-۳- ظرفیت جذب انرژی

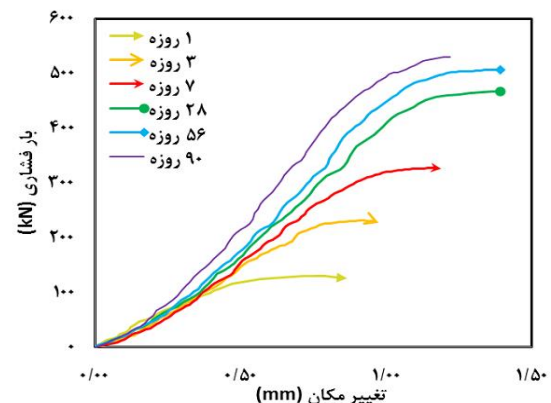
مقاومت در برابر شکست در اثر اعمال نیرو که چقرمگی یا طاقت نامیده می‌شود، به صورت انرژی جذب شده قبل از شکست تعریف می‌شود که با محاسبه سطح زیر منحنی بار فشاری-تغییر مکان تا زمان شکست نمونه محاسبه می‌شود. مقدار انرژی جذب شده برای هر ۳ نمونه Reference، HPMFRCC-1% و HPMFRCC-2% در سن ۲۸ روزه در جدول ۴ گزارش شده است. ستون سوم جدول با عنوان "اختلاف" به صورت نسبت اختلاف ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های الیاف دار و مرجع به ظرفیت جذب انرژی نمونه مرجع است که به صورت درصد بیان شده است. نتایج حاکی از آن است که، افزودن الیاف باعث بالا رفتن جذب انرژی و افزایش مقاومت هنگام اعمال نیرو شده است.

جدول ۴- جذب انرژی (J)

نام طرح اختلاط	ظرفیت جذب انرژی	اختلاف (%)
HPMFRCC-2%	۵۴۰	۵۲/۱
HPMFRCC-1%	۴۴۲	۲۴/۵
Reference	۳۵۵	



شکل ۹- منحنی‌های بار-تغییر مکان در سنین مختلف برای HPMFRCC-1%



شکل ۱۰- منحنی‌های بار-تغییر مکان در سنین مختلف برای HPMFRCC-2%

### ۳-۳ - مقاومت کششی

است. شکل ۱۲ مقایسه شکست کششی نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه برای نمونه‌های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% و شکل ۱۳-الف، ۱۳-ب و ۱۳-ج به ترتیب الگوی شکست کششی نمونه‌های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه است که با توجه به آن وجود الیاف الگوی شکست نمونه‌های استوانه‌ای تحت بار کششی را تغییر داده است. به این صورت که در نمونه‌های Reference و بدون الیاف تعداد ترک‌های موجود کم ولی عمق ترک زیاد بوده و در تمامی سنین شکست به صورت دونیم شدن کامل نمونه اتفاق افتاده است، این در حالی است که در نمونه‌های HPFRCC-1% و HPFRCC-2% ترک‌های عمیق دیده نشده ولی تعداد ترک‌های ریز افزایش یافته و با گذشت زمان عرض ترک ایجاد شده در هنگام شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

مقاومت کششی گسیختگی ( $f_r$ ) نمونه‌ها با رابطه پیشنهادی استاندارد ASTM C496 [25] (رابطه (۲)) بر حسب مگاپاسکال، در سنین مختلف تعیین شده است. در این رابطه  $P$  بار وارده در لحظه شکست،  $L$  طول استوانه بر حسب میلی‌متر و  $D$  قطر استوانه بر حسب میلی‌متر است.

$$f_r = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

مقاومت کششی متوسط نمونه‌های HPFRCC در سنین مختلف بر اساس نتایج آزمایش دونیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای، در جدول ۵ گردآوری شده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت، افزودن الیاف تأثیر قابل توجهی بر افزایش نیروی شکست نمونه و در نهایت مقاومت کششی محاسبه شده از رابطه پیشنهادی استاندارد مربوطه [۲۵] داشته

جدول ۵- نتایج مقاومت کششی متوسط HPFRCC ها در سنین مختلف (MPa)

HPFRCC-2%	HPFRCC-1%	Reference	سن نمونه (روز)
۶/۵۸	۵/۸۱	۳/۳	۷
۹/۳۹	۶/۱۷	۴/۸	۲۸
۱۰/۴	۶/۷۵	۵	۵۶
۱۱/۱۴	۸/۹۷	۵/۱۲	۹۰



HPFRCC-2%



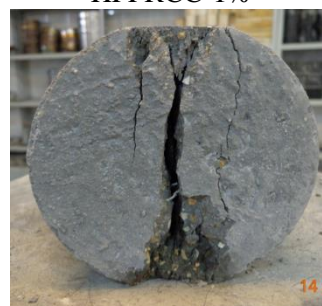
HPFRCC-1%



Reference



HPFRCC-2%



HPFRCC-1%



Reference

شکل ۱۲- شکست نمونه‌ها تحت آزمایش برزیلی در سن ۲۸ روزه برای Reference، HPFRCC-1%، HPFRCC-2%





روزه ۹۰



روزه ۵۶



روزه ۲۸

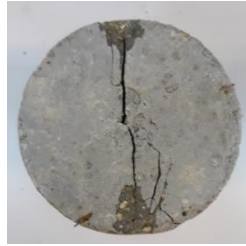


روزه ۷

الف



روزه ۹۰



روزه ۵۶



روزه ۲۸



روزه ۷

ب



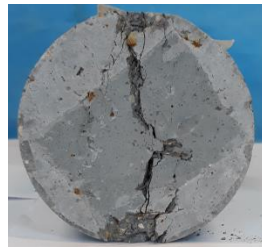
روزه ۹۰



روزه ۵۶



روزه ۲۸



روزه ۷

ج

شکل ۱۳- شکست نمونه‌ها تحت بار کششی در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه (الف Reference (ب ۱% HPFRCC-1 (ج ۲% HPFRCC-2 مطابق شکل ۱۴- الف و ۱۴- ب با اندازه‌گیری تقریبی عرض ترک‌ها ۲ میلی‌متر و برای نمونه‌های با ۲ درصد الیاف از ۵۰ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر کاهش یافته است که در واقع به ترتیب برای نمونه‌های ۱% HPFRCC و ۲% HPFRCC-۱ و ۲% HPFRCC-۲ ۹۳ و ۹۵ درصد کاهش یافته است. ۷ روزه به ۹۰ روزه برای نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف از ۱۵۰ میلی‌متر به



روزه ۹۰



روزه ۵۶



روزه ۲۸



روزه ۷

الف



روزه ۹۰



روزه ۵۶



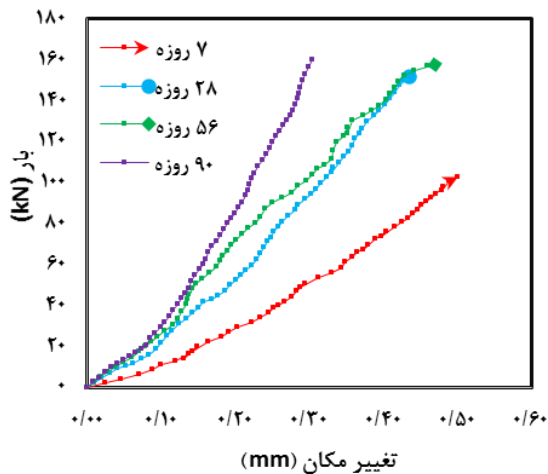
روزه ۲۸



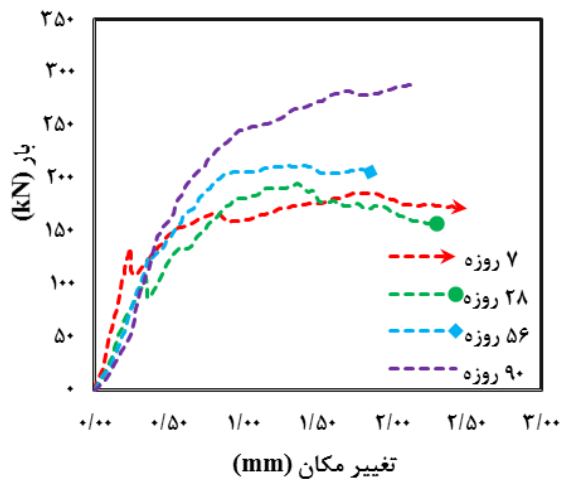
روزه ۷

ب

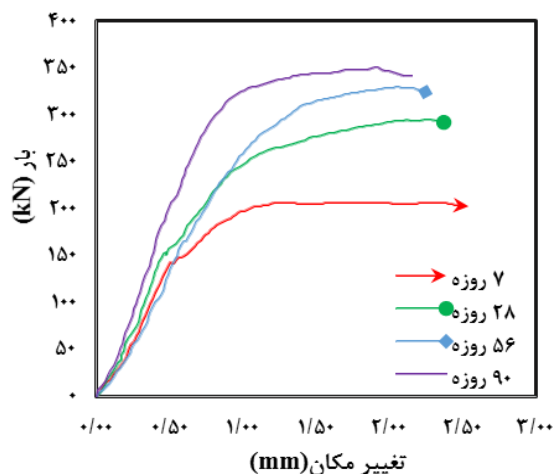
شکل ۱۴- اندازه تقریبی عرض ترک‌ها در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه (الف ۱% HPFRCC-1 (ب ۲% HPFRCC-2



شکل ۱۷- مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان در سنین مختلف برای Reference

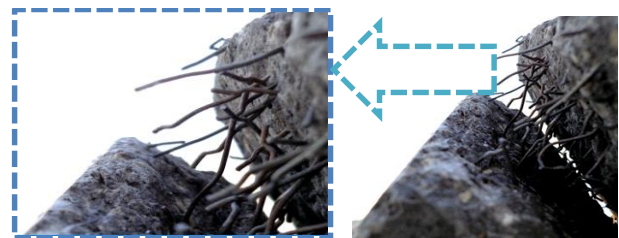


شکل ۱۸- مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان در سنین مختلف برای HPFRCC-1%



شکل ۱۹- مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان در سنین مختلف برای HPFRCC-2%

هم چنین به دلیل پل زدن الیاف‌های فولادی دو سر قلاب که در شکل ۱۵ به طور واضح قابل مشاهده است، در هنگام شکست نهایی، مانع دونیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای می‌شود. تصویری از سطوح شکست برای نمونه‌های بدون الیاف و حاوی الیاف در شکل ۱۶ نشان داده شده است که بر طبق آن نمونه‌های بدون الیاف سطح شکستی صاف و هموار داشته، درحالی‌که برای نمونه‌های حاوی الیاف سطحی خشن و نامسطح قابل ملاحظه بود.



شکل ۱۵- نحوه‌ی پل زدن الیاف در نمونه‌های HPFRCC برای نمونه استوانه‌ای تحت نیروی کششی غیر مستقیم



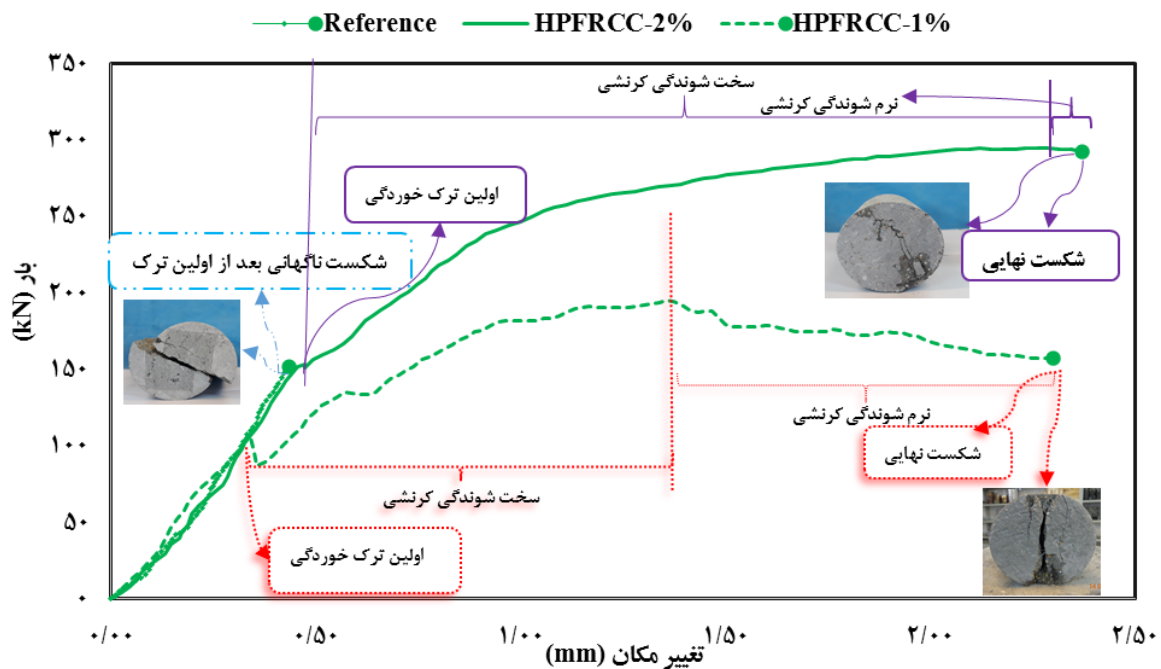
(الف) بدون الیاف (ب) با الیاف

شکل ۱۶- مقایسه سطوح شکست نمونه‌های (الف) بدون الیاف (ب) با الیاف

همچنین منحنی‌های بار-تغییر مکان حاصل از آزمایش برزیلی در سن ۲۸ روز برای نمونه‌های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% به ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود.

مطابق آن می‌توان گفت نمونه‌های Reference، در هنگام اولین ترک خوردگی، حداکثر نیروی قابل تحملشان را تجربه کرده و دچار شکست ناگهانی می‌شوند، افزودن ۱ و ۲ درصد الیاف به همین مخلوط، باعث ایجاد رفتار سخت‌شوندگی کرنشی بعد از اولین ترک خوردگی در نمونه‌ها شده است.

با مقایسه منحنی بار-تغییر مکان آزمایش برزلی شکل ۲۰ مقادیر، حداکثر نیروی کششی قابل تحمل، نیروی کششی متناظر با اولین ترک خوردگی و نیروی کششی نهایی بر حسب کیلو نیوتن همچنین حداکثر مقاومت کششی قابل تحمل، مقاومت کششی متناظر با اولین ترک خوردگی و مقاومت کششی نهایی بر حسب مگا پاسکال که با توجه به رابطه (۲) محاسبه شده است، برای نمونه‌های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% و مقایسه تغییرات نتایج نسبت به HPFRCC-2% بزرگ تر بوده است.



شکل ۲۰- منحنی‌های بار-تغییر مکان در سن ۲۸ روزه برای نمونه Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2%

جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت کششی و تغییرات نمونه‌های الیاف دار نسبت به نمونه شاهد

نام طرح اختلاط	حداکثر نیروی قابل تحمل (kN)	نیروی اولین ترک خوردگی (kN)	نیروی نهایی (kN)	حداکثر مقاومت کششی (MPa)	مقاومت کششی متناظر با اولین ترک خوردگی (MPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)
Reference	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۴/۸	۴/۸	۴/۸
HPFRCC-1%	۱۹۵	۱۰۵	۱۵۷	۶/۲	۳/۳	۵
HPFRCC-2%	۲۹۵	۱۵۰	۲۹۲	۹/۴	۴/۸	۹/۳

مقایسه تغییرات نتایج نمونه‌های حاوی الیاف HPFRCC-1% و HPFRCC-2% نسبت به نمونه شاهد بدون الیاف Reference

HPFRCC-1%	۳۰	-۳۰	۴/۷	۲۹/۴	-۳۱/۹	۴/۲
HPFRCC-2%	۵۰/۸	۴۲/۹	۸۶	۵۱/۲	۴۶/۸	۸۵/۸

۳-۴- بررسی روابط

۳-۴-۱- مقاومت فشاری و سن نمونه‌ها

وابسته به نوع سیمان است که برای سیمان‌های معمولی ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری متوسط محاسبه شده در سنین مختلف با توجه به رابطه (۲) و (۳) و مقاومت فشاری در سنین مختلف که با توجه به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های Reference، 1%-HPFRCC و 2%-HPFRCC در جدول ۷ قابل مشاهده است، ستون "اختلاف" در این جدول، نشان‌دهنده نسبت اختلاف مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به مقادیر آزمایشگاهی است که به صورت درصد آورده شده است.

$$f_c(t) = f_{c,28} \left( \frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (3)$$

$$f_c(t) = \exp \left[ s \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] f_{c,28} \quad (4)$$

مقاومت فشاری با گذشت زمان برای بتن‌های ساخته شده با سیمان نوع I و به صورت مرطوب عمل‌آوری شده تا سن موردنظر آزمایش و در دما C ۲۱° بر اساس پیشنهاد استاندارد ACI209.2R-08 [۲۷] با توجه به رابطه (۳) است که در آن t زمان موردنظر پس از ریختن بتن بر حسب روز، و  $f_c(t)$  و  $f_{c,28}$  به ترتیب مقاومت فشاری بتن پس از گذشت t روز و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن است. هم‌چنین استاندارد اروپایی CEB-FIP [۲۸]، در شرایط مشابه رابطه (۴) را برای ارزیابی مقاومت بتن در طول زمان ارائه داده است که در آن  $f_c(t)$  و  $f_{c,28}$  به ترتیب مقاومت فشاری متوسط بتن در زمان t و سن ۲۸ روزه است و s ضریب

جدول ۷- مقایسه مقاومت فشاری متوسط محاسبه شده از رابطه (۲) با توجه به زمان و مقادیر آزمایشگاهی نمونه‌ها

رابطه	نام طرح اختلاط	سن (روز)	مقاومت فشاری رابطه	مقاومت فشاری متوسط آزمایشگاهی	اختلاف
۲	Reference	۷	۴۹/۱	۵۰/۳	۲/۳۷
		۲۸	۷۰/۳	۶۹/۸	۰/۷۲
		۵۶	۷۵/۸	۷۰/۹	۶/۸۴
		۹۰	۷۸	۷۸/۵	۰/۵۹
		۷	۴۹/۵	۴۸/۱۴	۲/۸۸
		۲۸	۷۰/۹	۷۰/۴	۰/۷۲
	HPFRCC-1%	۵۶	۷۶/۴	۷۴/۹	۲/۰۱
		۹۰	۷۸/۷	۸۱/۸	۳/۷۸
		۷	۴۹/۹	۴۹/۷	۰/۳۶
		۲۸	۷۱/۴	۷/۹	۰/۷۲
		۵۶	۷۶/۹	۷۶/۷	۰/۳۲
		۹۰	۷۹/۳	۸۲	۳/۳۳
۳	Reference	۷	۵۴/۴	۵۰/۳	۸/۰۷
		۲۸	۶۹/۸	۶۹/۸	۰
		۵۶	۷۵/۱	۷۰/۹	۵/۹۳
		۹۰	۷۸	۷۸/۵	۰/۶۹
		۷	۵۴/۸	۴۸/۱	۱۳/۸۹
		۲۸	۷۰/۴	۷۰/۴	۰
	HPFRCC-1%	۵۶	۷۵/۷	۷۴/۹	۱/۱۳
		۹۰	۷۸/۶	۸۱/۸	۳/۸۸
		۷	۵۵/۲	۴۹/۷	۱۱/۱
		۲۸	۷۰/۹	۷۰/۹	۰
		۵۶	۷۶/۳	۷۶/۷	۰/۵۴
		۹۰	۷۹/۲	۸۲	۳/۴۳

مقاومت فشاری اندازه گیری شده بتن است که می توان آن را معادل  $f_c$  در نظر گرفت. همچنین استاندارد اروپا CEB-FIP [۲۸] رابطه (۶) را برای تخمین مقاومت کششی متوسط آزمایش شکافت  $f_{ctm}$  ارائه داده است. همچنین برای حد بالایی و پایینی  $f_{ctm}$  مقادیر ۰/۱۴ و ۰/۲ پیشنهاد شده است.

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f_{cm}} \quad (۵)$$

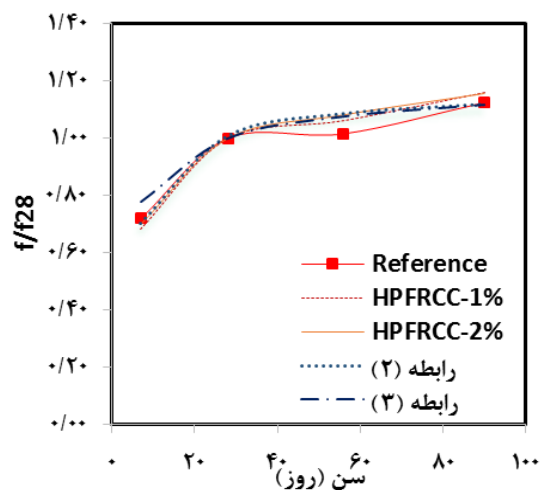
$$f_{ctm} = 0.3\sqrt[3]{f_c'^2} \quad (۶)$$

نسبت مقاومت کششی متوسط آزمایش دونیم شدن به ریشه دوم مقاومت فشاری متوسط در سنین مختلف  $(\frac{f_{ct}}{\sqrt{f_{cm}}})$  برای نمونه های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% در جدول ۸ ارائه شده است که با توجه به آن می توان گفت ضریب ۰/۵۷ برای نمونه های Reference و بدون الیاف در سن ۲۸ روزه بسیار نزدیک به ضریب پیشنهادی ۰/۵۶ بر اساس استاندارد ACI318-14 [۲۹] است. همچنین می توان گفت با افزودن الیاف و افزایش سن نمونه ها که با رشد مقاومت کششی همراه است، این ضریب افزایش خواهد یافت که برای سن ۲۸ روزه نمونه های حاوی ۱ درصد الیاف این ضریب ۰/۷۴ و برای نمونه های ۲ درصد الیاف ۱/۱۲ شده است. نسبت مقاومت کششی متوسط آزمایش دونیم شدن به ریشه سوم مجذور مقاومت فشاری متوسط در سنین مختلف  $(\frac{f_{ct}}{\sqrt[3]{f_{cm}^2}})$  بر اساس جدول ۹ است که با توجه به آن برای نمونه های بدون الیاف، این نسبت ۰/۲۸ است که بسیار نزدیک به ضریب پیشنهادی ۰/۳ استاندارد اروپا CEB-FIP [۲۸] است و برای نمونه های حاوی ۱ و ۲ درصد الیاف به ترتیب ضرایب ۰/۳۶ و ۰/۵۴ محاسبه شده است که در واقع بیانگر این است که بالا رفتن سن نمونه و درصد الیاف موجود در طرح اختلاطها مقاومت کششی افزایش یافته که باعث افزایش نسبت مذکور می گردد.

جدول ۸- نسبت مقاومت کششی متوسط آزمایش دونیم شدن به ریشه دوم مقاومت فشاری متوسط در سنین مختلف  $(\frac{f_{ct}}{\sqrt{f_{cm}}})$

طرح اختلاط سن (روز)	Reference	HPFRCC-1%	HPFRCC-2%
۷	۰/۴۷	۰/۸۴	۰/۹۳
۲۸	۰/۵۷	۰/۷۴	۱/۱۲
۵۶	۰/۵۹	۰/۷۸	۱/۱۹
۹۰	۰/۵۸	۰/۹۹	۱/۲۳

همچنین منحنی  $t - (\frac{f_c}{f_{c,28}})$  که نسبت مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف  $(f_c)$  به مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه  $(f_{c,28})$  و سن نمونه ها برای نمونه های Reference، HPFRCC-1% و HPFRCC-2% در شکل ۲۱ قابل مشاهده است که با توجه به آن می توان گفت استفاده از رابطه (۳) با اختلاف کم تر از ۶ درصد و رابطه (۳) با اختلاف کمتر از ۶ برای سنین بالای ۲۸ روزه و با اختلاف کمتر از ۱۳ درصد برای سن ۷ روزه مجاز است. اختلاف کم موجود بین مقادیر آزمایشگاهی و رابطه را می توان به دلیل تفاوت در روزه های عمل آوری نمونه ها در آب دانست.



شکل ۲۱- نسبت مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف  $f_c(t)$  به مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه  $f_{c,28}$  برای نمونه های Reference

### ۳-۴-۲- مقاومت فشاری و مقاومت کششی

بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی در بتن های معمولی روابطی وجود دارد که نشان می دهد با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی آن نیز افزایش می یابد. بر اساس ACI318-14 [۲۹] مقاومت کششی متوسط اندازه گیری شده از آزمایش دونیم شدن  $(f_{ct})$  مطابق رابطه (۵) تخمین زده شده است؛ که در آن  $f_{cm}$

جدول ۹- نسبت مقاومت کششی متوسط آزمایش دونیم شدن به ریشه سوم مجذور مقاومت فشاری متوسط در سنین مختلف  $(\frac{f_{ct}}{\sqrt[3]{f_{cm}^2}})$

سن (روز)	طرح اختلاط		
	Reference	HPFRCC-1%	HPFRCC-2%
۷	۰/۲۴	۰/۴۳	۰/۴۸
۲۸	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۵۴
۵۶	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۵۷
۹۰	۰/۲۸	۰/۴۷	۰/۵۸

#### ۴- نتیجه گیری

- افزودن الیاف به مخلوط کامپوزیت های سیمانی، اثر کمی بر مقاومت فشاری داشته، با این حال ظرفیت جذب انرژی را برای نمونه های حاوی ۱٪ و ۲٪ به ترتیب به مقدار ۲۴٪ و ۵۰٪ افزایش داده است. هم چنین الگوی شکست در اثر اعمال نیروی فشاری در نمونه های مکعبی با افزودن الیاف، از حالت دو هرم معکوس به حالت ترک های ریز چندگانه تبدیل شده است. در واقع وجود الیاف مانع جداشدگی و تکه تکه شدن نمونه، بعد از شکست می شود.
- افزودن الیاف تأثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی حاصل از آزمایش دونیم شدن داشته است. به طوری که در سن ۲۸ روزه افزودن ۱ و ۲ درصد الیاف به ترتیب ۳۰ و ۹۵ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد دیده شده است. هم چنین الگوی ترک خوردگی با اضافه کردن الیاف از حالت دونیم شدن کامل به ترک خوردگی تبدیل شده است که در واقع دلیل آن را می توان پل زدن الیاف در مخلوط های حاوی الیاف دانست. سطح شکست نمونه ها نیز از حالت صاف و هموار در مخلوط بدون الیاف، به سطوح ناهموار و خشن در مخلوط های دارای الیاف تغییر یافته است.
- همچنین بالا رفتن سن نمونه باعث افزایش مقاومت کششی شده است، به طوری که مقاومت کششی در سن ۹۰ روزه نسبت ۷ روزه برای نمونه ها ۱٪ و ۲٪ الیاف به ترتیب ۵۴٪ و ۶۹٪ رشد و نسبت به سن ۲۸ روزه به ترتیب ۴۵٪ و ۲۰٪ رشد مشاهده شده است. عرض ترک خوردگی ایجاد شده با بالا رفتن سن نمونه به ترتیب برای ۱٪ و ۲٪ الیاف در سن ۹۰ روزه نسبت به ۷ روزه ۹۳ و ۹۵ درصد کاهش یافته است.
- در منحنی های بار-تغییر مکان ناشی از آزمایش برزیلی، برای نمونه Reference در نقطه ی حداکثر بار قابل تحمل که در واقع همان لحظه ی ایجاد اولین ترک خوردگی است، شکستی ناگهانی رخ داده است. برای نمونه های حاوی ۱٪ و ۲٪ الیاف، بعد از رخداد اولین ترک خوردگی، ناحیه ی سخت شوندگی کرنشی مشاهده شده است. با این تفاوت که بعد از آن در نمونه های ۱-HPFRCC شعاع نرم شوندگی بزرگ تری نسبت به ۲-HPFRCC مشاهده شده است.
- روابطی تجربی جهت محاسبه مقاومت فشاری با توجه به سن نمونه ها و بر حسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه توسط آیین نامه های مختلف پیشنهاد شده است، با مقایسه ی مقادیر محاسبه شده از روابط و مقادیر آزمایشگاهی، اختلاف بین این مقادیر برای رابطه ی پیشنهادی استاندارد ACI209.2R-08 [۲۷] کمتر از ۶٪ و رابطه پیشنهادی استاندارد CEB-FIP [۲۸] کمتر از ۱۳٪ است، اختلاف کم موجود بین مقادیر آزمایشگاهی و رابطه را می توان به دلیل تفاوت در روزه های عمل آوری نمونه ها در آب دانست.
- روابطی تجربی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی حاصل از آزمایش دونیم شدن توسط آیین نامه های مختلف ارائه شده است که از مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و روابط پیشنهادی، می توان گفت رابطه ارائه شده توسط ACI318-14 [۲۹] و CEB-FIP [۲۹] برای نمونه های Reference در سن ۲۸ روزه صدق می کند اما با توجه به اینکه با بالا رفتن سن نمونه و درصد الیاف موجود در نمونه های ۱-HPFRCC و ۲-HPFRCC مقاومت کششی افزایش یافته است، این روابط صادق نبوده و ضرایب موجود در این روابط افزایش داشته است.

performance steel fiber reinforced concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 27, (2015).

[16]. Ramadoss, P. Studies on high performance steel fiber reinforced concrete under static and impact loads. (Anna univ, 2007).

[17]. Xu, B. W. & Shi, H. S. Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 3468–3474 (2009).

[18]. Chang Wang, Y., Jin Qing, J., Ju, Z. & Rui, J. Compressive Strength and Splitting Tensile Strength of Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Ultra High Strength Concrete (PFRC). *Adv. Mater. Res.* 150–151, (2011).

[19]. Tabak, V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction* 21, 1250–1253 (2007).

[20]. Sabbaghian, M. & Kheyroddin, A. Effect of grading and superplasticizer content on mechanical properties of High-performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC). in 11th National Congress on Civil Engineering. At: Shiraz University (2019).

[21]. ASTM C494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete 1. ASTM International (2004).

[22]. ASTM C143. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. (2015).

[23]. ASTM C31. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field 1. (2001).

[24]. BS1881-108. Testing concrete- Part 108. Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete. British Standards Institute (1998).

[25]. ASTM C496/C496M – 17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International (2011).

[26]. British Standards Institution BSI. Testing hardened concrete. 3, 420–457 (2009).

[27]. ACI 209.2R-08. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. American concrete institute (2008).

[28]. CEB-FIP. CEB-FIP Model Code 90. (1993).

[29]. ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI Standard and Report 11, (2014)

## ۵- مراجع

[1]. Mehta, P. & Povindar, K. Concrete structure, properties, and materials. (1993).

[2]. Chen, Y., Yu, J. & Leung, C. K. Y. Use of high strength Strain-Hardening Cementitious Composites for flexural repair of concrete structures with significant steel corrosion. *Constr. Build. Mater.* 167, 325–337 (2018).

[3]. Gefken, P. R. & Ramey, M. R. Increased joint hoop spacing in type 2 seismic joints using fiber reinforced concrete. *ACI Struct. J.* 86 168–172 (1989).

[4]. Parra-Montesinos, G. J., Peterfreund, S. W. & Chao, S. H. Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites. *ACI Struct. J.* 102, 487–495 (2005).

[5]. Hemmati, A., Kheyroddin, A. & Sharbatdar, M. K. Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced HPFRCC Beams. *J. Struct. Eng.* 5, 30–47 (2015).

[6]. Hemmati, A., Kheyroddin, A. & Sharbatdar, M. K. Proposed Equations for Estimating the Flexural Characteristics of Reinforced HPFRCC Beams. 38, 395–407 (2014).

[7]. Hemmati, A., Kheyroddin, A. & Sharbatdar, M. K. Flexural Behavior of Reinforced HPFRCC Beams. 1, 66–77 (2013).

[8]. Brandt, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Compos. Struct.* 86, 3–9 (2008).

[9]. Krstulovic-Opara, N., Watson, K. A. & LaFave, J. M. Effect of increased tensile strength and toughness on reinforcing-bar bond behavior. *Cem. Concr. Compos.* 16, 129–141 (1994).

[10]. Kang, T., Kim, W., Massone, L. & Galleguillos, T. shear-flexure coupling behavior of steel fiber-reinforced concrete beams. *ACI Struct. J.* 109, 435–444 (2012).

[11]. Fanella, D. A. & Naaman, A. E. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression. *ACI J.* 82, 475–483 (1985).

[12]. Ezeldin, B. A. S. & Balaguru, P. N. Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression. 4, 415–429 (1992).

[13]. Kim, D. J., Kang, S. H. & Ahn, T. H. Mechanical characterization of high-performance steel-fiber reinforced cement composites with self-healing effect. *Materials.* 7, 508–526 (2014).

[14]. Nataraja, M., Dhang, N. & Gupta, A. Splitting tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Indian Concr. J* 75, (2001).

[15]. Perumal, R. Correlation of compressive strength and other engineering properties of high

## Experimental Investigation of the Effect of Fiber on Mechanical and the Age Properties of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites

Mahdieh Sabbaghian

M.Sc. Student of structural-Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Ali Kheyroddin \*

Professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.

### Abstract

High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC), are mortars exhibit strain hardening behavior in the tensile test also have features such as flexibility, Durability, and high energy absorption capacity. In this paper, the effect of the fiber on the characteristics of the HPFRCC mechanical properties, the Fracture pattern and the energy absorption capacity have been investigated. Since there is no specific standard test available for HPFRCC, first, 18 mixing designs with different material proportions were made, the mixing that was the most economical and has the most appropriate mechanical properties has been selected. Finally, the selected mixing was evaluated with 60 specimens in three states of non-fibers, one and two percent fibers at different ages. The results indicate that with increasing age of specimens in all three conditions, the tensile and compressive strength increased, also the pattern fracture of the specimens has been improved by adding the fibers has moved from the deep cracks and the fragmentation of the specimens to the surface cracks. Also energy absorption capacity increased by 1 and 2 percent fiber, 24 and 52 percent, respectively. Then the relations for determining the compressive strength at different ages and the calculation of tensile strength with compressive strength for plain concrete presented in the standard were also evaluated for HPFRCCs.

**Keywords:** High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Tensile and Compressive Strength, pattern fracture, Energy Absorption Capacity, HPFRCC.

---

\* Corresponding Author: kheyroddin@semnan.ac.ir