

اثربایف بازبافتی از تابر فرسوده بر مشخصات مقاومتی و تغییر شکل پذیری شاتکریت

بهزاد خوش^۱، هادی عطاپور^{۲*}، محسن عباسپور^۳

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۰۲

دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۰۲

چکیده

امروزه شاتکریت به عنوان جزئی از سیستم‌های پایدارسازی گودبرداری‌ها و شیب‌ها، کاربرد گسترده‌ای در فعالیت‌های مهندسی عمران و معدن دارد. در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای به منظور بهبود خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری شاتکریت انجام گرفته است. از جمله مهمترین این پیشرفت‌ها می‌توان به استفاده از انواع الباف‌ها به منظور بهبود رفتار شاتکریت اشاره کرد. شاتکریت مسلح شده بر حسب نوع و مشخصات الباف، خواص مختلفی را از خود نشان می‌دهد، به نحوی که برای هر نوع الباف می‌توان مزایا و معایبی را برشمرد. در این پژوهش، نتایج حاصل از مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر افزودن الباف بازبافتی از تابر فرسوده بر خواص مقاومتی، شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی شاتکریت ارائه شده است. پس از تهیه نمونه‌های بدون الباف و مسلح شده با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الباف، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر روی تمامی نمونه‌ها انجام گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که به‌کارگیری این نوع الباف در شاتکریت سبب حذف رفتار شکننده آن می‌شود و قابلیت جذب انرژی شاتکریت را افزایش می‌دهد. از جمله مزایای به‌کارگیری این نوع الباف در شاتکریت می‌توان به گیرداری مناسب الباف در داخل شاتکریت، وزن کم الباف در مقایسه با دیگر مسلح‌کننده‌ها همچون توری و الباف فلزی، سهولت پمپاژ و مقاومت بالا در محیط‌های اسیدی و مرطوب اشاره کرد. همچنین با توجه به بازبافتی بودن این نوع الباف، به‌کارگیری آن در شاتکریت هم سبب کاهش هزینه‌های پروژه می‌شود و هم سبب حل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفن یا سوزاندن این ضایعات در طبیعت خواهد شد.

کلید واژه‌ها: شاتکریت البافی، مشخصات مقاومتی، تغییر شکل پذیری، الباف بازبافتی از تابر فرسوده، جذب انرژی.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، behzad.khosh@modares.ac.ir

۲. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، h.atapour@arakut.ac.ir

۳. دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، mohsen.abbaspour@aut.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شاتکریت (Shotcrete) یا بتن پاشیده (Sparyed Concrete) ملاتی است که با کمک هوای فشرده و با سرعت بالا، بر روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شود (Cengiz and Turanli, 2003). شاتکریت بعد از معرفی کاربردهای متنوعی را در فعالیت‌های مهندسی ژئومکانیک پیدا کرد. از جمله این کاربردها می‌توان به به‌کارگیری آن در سازه‌های زیرزمینی از جمله انواع تونل‌ها، مغار نیروگاه‌های برق-آبی، ایستگاه‌های مترو، چاه‌ها و همچنین در سازه‌های سطحی از جمله دیواره‌های شیب‌دار، گودبرداری‌ها، محوطه‌سازی و غیره اشاره کرد. در دهه‌های اخیر، محققین تلاش‌های زیادی برای افزایش کیفیت شاتکریت و رفع معایب آن انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به کاربرد مواد افزودنی مختلف و همچنین اصلاح و ارتقاء تجهیزات اجرایی شاتکریت اشاره نمود (Thomas, 2008).

از معایب شاتکریت معمولی می‌توان به پایین بودن مقاومت کششی و همچنین رفتار شکننده و شکست ناگهانی آن اشاره نمود (مدنی، ۱۳۹۳). به همین دلیل مشاهده ترک‌های زیاد و متعدد در شاتکریت در اثر حرکت توده‌سنگ، غیرمعمول و دور از انتظار نیست (اورعی، ۱۳۸۷). در راستای بهبود خواص شاتکریت، تقویت شاتکریت با توری فلزی به عنوان یک روش اساسی و پرکاربرد در راستای رفع این عیب به‌کار گرفته شد. در واقع این شاتکریت از تلفیق شاتکریت معمولی با توری فلزی ایجاد می‌شود که به طور گسترده در معادن و فضاهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (الهی، ۱۳۹۳). در مورد سنگ‌های سست که چسبندگی شاتکریت به سطح سنگ ضعیف است، استفاده از توری فلزی، حتی بدون شاتکریت نیز باعث تقویت توده‌سنگ در حد قابل توجهی می‌شود (Hoek, Kaiser, and Bawden, 2000). در واقع توری فلزی و شاتکریت مکمل یکدیگر هستند؛ به طوری که شاتکریت از توری فلزی در مقابل خوردگی محافظت می‌کند و توری فلزی هم جهت افزایش مقاومت شاتکریت استفاده می‌شود؛ بنابراین جهت پایدارسازی فضاهای زیرزمینی و

ایجاد نیروی نگهدارنده اضافی، استفاده از شاتکریت با توری فلزی ثمربخش بوده است (الهی، ۱۳۹۳). اگرچه در دو دهه اخیر پیشرفت‌های زیادی در شاتکریت صورت پذیرفته است، اما هنوز استفاده از شاتکریت همراه با توری فلزی در بسیاری موارد رایج است (مدنی، ۱۳۹۳). از مشکلات اصلی به‌کارگیری توری فلزی به همراه شاتکریت، می‌توان به وقت‌گیر بودن نصب توری‌ها و بالا رفتن هزینه عملیات اشاره کرد. این امر سبب شد تا تلاش مهندسین در زمینه ایجاد تحول و پیشرفت در به‌کارگیری شاتکریت با افزودنی‌های جدید ادامه داشته باشد (اورعی، ۱۳۸۷).

از پیشرفت‌های مهم دیگری که اخیراً در توسعه شاتکریت اتفاق افتاده است، افزودن الیاف به شاتکریت می‌باشد که در بخش‌های فنی و اقتصادی تأثیرات زیادی گذاشته است. با استفاده از سیستم شاتکریت تقویت شده با الیاف، انعطاف‌پذیری و همگرایی سیستم نگهداری قابل کنترل است. همچنین استفاده از الیاف در ترکیب شاتکریت تأثیر قابل توجهی بر توزیع ترک‌های ایجاد شده و جلوگیری از بازشدگی آن‌ها دارد (Kuesel, King, and Bickel, 2012).

۲. مروری بر به‌کارگیری الیاف در شاتکریت

امروزه در سراسر دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف‌ها با ویژگی‌های مختلف، به منظور تسلیح نمودن بتن و شاتکریت وجود دارد. از متداول‌ترین الیاف‌ها می‌توان به الیاف فولادی، پلاستیکی، کربنی، شیشه‌ای، پلی‌پروپیلن، پلی‌آمید، و غیره اشاره نمود. الیاف‌ها در ابعاد و اشکال ظاهری مختلف (از قبیل دندانه‌دار، مستقیم، قلاب‌دار و غیره) تولید شده و در طرح اختلاط شاتکریت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الیاف‌ها علاوه بر بهبود مشخصات مقاومتی و شکل‌پذیری شاتکریت، به علت سهولت اجرا به عنوان جایگزینی برای هزینه‌های زیاد توری‌های فلزی مورد توجه قرار گرفته است. الیاف فولادی متداول‌ترین الیاف‌های مصرفی در شاتکریت می‌باشند (هادوی، رهبر، ۱۳۹۸). نقش عمده تقویت‌کننده شاتکریت، افزایش خاصیت شکل‌پذیری آن و حذف رفتار ترد و شکننده

چسبنده را امکان پذیر می‌سازد. اندازه این الیاف ۱ تا ۲ اینچ بوده و تجهیزات و پروسه اجرای این نوع شاتکریت با شاتکریت معمولی متفاوت است؛ زیرا این نوع الیاف در هنگام مخلوط شدن با مصالح دیگر خرد می‌گردند. همچنین کاربرد این مواد نیاز به نازل و سیستم اجرای متفاوت دارد. بنابراین این نوع الیاف کاربرد چندانی در فعالیتهای ژئوتکنیکی پیدا نکرده است. نوع دیگری از الیاف، الیاف کربنی است که در حرارت‌های بالا نیز دارای دوام مناسبی می‌باشد. از نقطه نظر فنی، خواص مکانیکی الیاف‌های کربنی قاعدتاً برای نگهداری سنگ ایده‌آل است، ولی در عمل به دلیل قیمت بالا از آنها استفاده نمی‌شود (هادوی، رهبر، ۱۳۹۸). الیاف‌های پلاستیکی مورد توجه صنعت بوده و در مواردی که سایر الیاف‌ها به دلایل گوناگون نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، یک افزودنی مهم برای شاتکریت می‌باشند؛ به عنوان مثال در سطح و جاهایی که تقویت ثمربخشی برای بهبود شکل پذیری شاتکریت مورد نیاز است، استفاده از این الیاف‌ها موثر واقع می‌شود. یکی دیگر از الیاف‌های مصنوعی، الیاف پلیمری است. این الیاف در شاتکریت، سبب افزایش چسبندگی و کاهش فروریز می‌شود. از طرفی، یکی از روش‌های مفید و اقتصادی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی و کنترل ترک‌های سطحی، استفاده از این نوع الیاف است. بررسی ادبیات فنی، نشان‌دهنده فعالیت‌های تحقیقاتی متنوع، در زمینه کاربرد آن در بتن و شاتکریت می‌باشد (اسماعیلی، قهاری، ۱۳۹۰). افضلی و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی رفتار مکانیکی شاتکریت حاوی الیاف پلیمری دریافتند که استفاده از این الیاف سبب بهبود عملکرد سایشی و مقاومت خمشی شاتکریت گردیده است.

سالانه در جهان بالغ بر یک میلیارد حلقه تایر فرسوده بر محیط‌زیست تحمیل می‌شود که تنها ۳۳ درصد آن به طور کامل بازیافت می‌گردد و باقی‌مانده آن یا در طبیعت رها شده و یا سوزانده و دفن می‌شود. سهم ایران در این میان، مصرف سالانه ۷ میلیون حلقه تایر بوده که معادل ۲۰۰ هزار تن است (صمدیان، ۱۳۸۵). امروزه بازیافت تایرهای فرسوده در

شاتکریت است (مدنی، ۱۳۹۳). به همین دلیل، استفاده از شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی (Steel Fiber Reinforced Shotcrete (SFRS))، در چند سال اخیر گسترش یافته و به مرور جایگزین شاتکریت تقویت شده با توری فلزی شده است (رویانفر، ۱۳۸۹). در زمینه تقویت شاتکریت با الیاف فولادی، مشکلاتی همچون مخلوط کردن یکنواخت الیاف و انتقال شاتکریت الیافی به کمک دستگاه و پاشیدن آن به سطح مورد نظر وجود دارد. برای رفع این مشکلات اقداماتی مانند ساخت الیاف با نسبت ظاهری (نسبت طول به قطر) کم، تغییر شکل سطح مقطع الیاف و اصلاح شکل صورت گرفته است. الیاف فولادی به طول‌های ۰/۵ تا ۳ اینچ وجود دارند که معمولاً برای مخلوط شاتکریت از الیاف با ابعاد ۰/۷۵ تا ۱/۵ اینچ و مقدار ۱ تا ۲ درصد حجم شاتکریت (۱/۵ تا ۶ درصد وزنی) استفاده می‌شود (رویانفر، ۱۳۸۹). طول الیاف فولادی مورد استفاده در نهایت می‌تواند ۰/۲۵ اینچ بزرگتر از درشت‌ترین دانه سنگدانه باشد. استفاده از الیاف با طول کم، باعث راحتی عملیات پمپ کردن و پاشش می‌گردد؛ اما در این حالت به منظور کسب کارایی معادل با نمونه‌های دیگر، بایستی مقدار مصرف الیاف افزایش یابد (Brown, 2005). اجرای شاتکریت با درصد الیاف بالاتر از ۲ درصد، باعث ایجاد مشکل در مراحل آماده‌سازی و پاشش خواهد شد (Bhawani and Rajnish, 2006).

فهیمی‌فر و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر الیاف فولادی در بهبود خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری شاتکریت را مطالعه نمودند. در این تحقیق آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی، برزیلی و کشش مستقیم بوده است. نتایج نشان‌دهنده تاثیر کم الیاف بر مقاومت فشاری نهایی شاتکریت است، اما نمودار بعد از پیک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به افزایش چشمگیر مقاومت کششی و خمشی شاتکریت و همچنین قابلیت جذب انرژی بالاتر آن بعد از پیک اشاره نمود.

شاتکریت تقویت شده با الیاف شیشه‌ای (Glass Fiber Reinforced Shotcrete (GFRS))، کاربرد ذرات شیشه به همراه یک خمیر

در ادامه مشخصات مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه به طور کامل شرح داده شده‌اند.

۳-۱-۱. سنگدانه

در تحقیق حاضر، جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، دو نوع سنگدانه شامل سنگدانه درشت (شن) و سنگدانه ریز (ماسه) آهکی حاصل از سنگ‌شکن تهیه شد. این نوع سنگدانه‌های به علت گوشه‌داری، نسبت به سنگدانه‌های طبیعی گردشده داری چسبندگی بهتر به سیمان می‌باشند. چگالی سنگدانه مورد استفاده ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد. به منظور دستیابی به محدوده دانه‌بندی استاندارد برای سنگدانه شاتکریت، ابتدا چندین نوع سنگدانه تهیه و به کمک سرندهای استاندارد دانه‌بندی شد. به منظور افزایش دقت و حذف خطای انسانی، تمامی آنالیزهای دانه‌بندی به کمک دستگاه شیکر برقی (Electrical Sieve Shaker Used for 8" Frames) انجام پذیرفته است. در نهایت با ترکیب درصد‌های مختلف مصالح موجود، دانه‌بندی استاندارد مورد نظر به دست آمد. به منظور دستیابی به محدوده ابعادی و منحنی دانه‌بندی استاندارد، از ترکیب ۳۰ درصد سنگدانه درشت و ۷۰ درصد سنگدانه ریز استفاده شد. دانه‌بندی به دست آمده از ترکیب سنگدانه‌های درشت و سنگدانه‌های ریز، یک دانه‌بندی با ابعاد متوسط برای شاتکریت محسوب می‌شود که در محدوده مورد نظر کمیسیون استانداردهای اروپایی (European Committee for Standardization (EN 12620)) (American Concrete Institute (ACI 506.5R-09)) و آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI Committee 506 1990) قرار دارد. نتایج سرند سنگدانه مورد استفاده در جدول ۱ به همراه محدوده دانه‌بندی استاندارد موسسه بتن آمریکا (ACI) ارائه شده است.

راستای کاهش مشکلات زیست‌محیطی، به یک امر مهم و ضروری تبدیل شده است. از مشکلات مهم بازیافت تاپرهای فرسوده، تولید حجم قابل توجهی الیاف بازیافتی بوده که در شرایط فعلی کاربرد خاصی نداشته و نیازمند جمع‌آوری و نگهداری تحت شرایط مناسب است. در کشور ما این الیاف بازیافتی دفن و یا در برخی موارد سوزانده می‌شود که خود این امر مشکلات زیست‌محیطی را به همراه دارد. در همین راستا، جهت استفاده مجدد از الیاف بازیافتی ذکر شده، امکان به‌کارگیری آن در شاتکریت ارزیابی شده و نتایج حاصل در مقاله حاضر ارائه شده است.

۳. مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه آزمایشگاهی اثر الیاف بر خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری شاتکریت، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف الیاف تهیه شد. تهیه مصالح و آماده‌سازی نمونه‌ها بر مبنای دستورالعمل‌های موجود انجام پذیرفته است. مصالح شامل سنگدانه، سیمان، آب و نیز الیاف بازیافتی از تاپرهای فرسوده می‌باشد. آزمایش‌های انجام گرفته برای تعیین خواص نمونه‌ها شامل آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی) و آزمایش خمش سه نقطه‌ای بوده است. در این بخش، مشخصات اجزای مختلف مورد استفاده برای تهیه نمونه‌ها، روش آماده‌سازی نمونه‌ها و همچنین شرایط انجام آزمایش‌ها شرح داده شده است.

۳-۱-۱. مصالح مورد استفاده

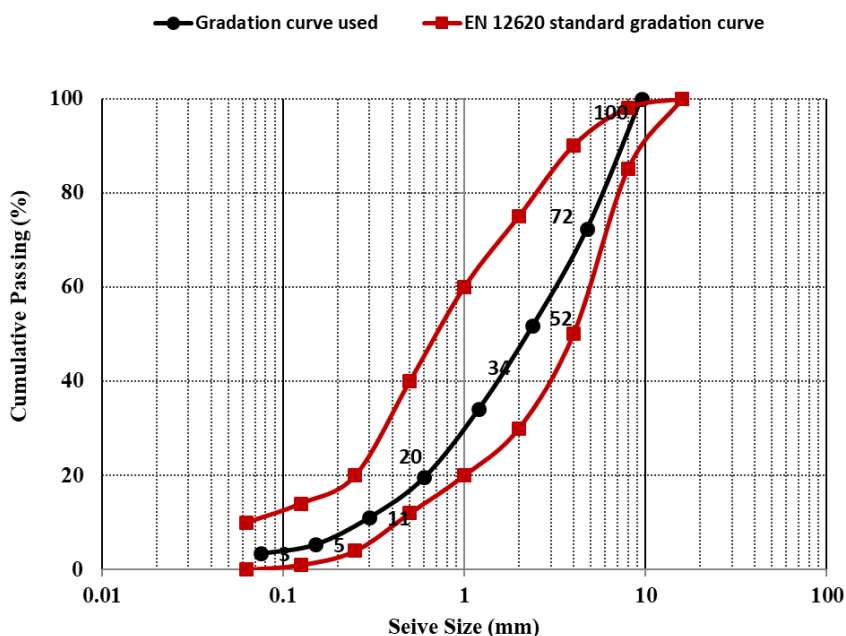
یکی از مهمترین مراحل در مطالعه رفتار مکانیکی شاتکریت و بتن، انتخاب صحیح مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها است. با توجه به این که نوع، درصد و روش ترکیب مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها اثرات قابل توجهی بر رفتار مکانیکی آن‌ها خواهد داشت، رعایت اصول استاندارد جهت تهیه نمونه‌های یکنواخت از ضروریات مطالعات آزمایشگاهی است. در مقاله حاضر تلاش شد تا با رعایت نکات لازم اثر عامل انسانی و شرایط محیط بر نتایج آزمایش‌ها حداقل گردد.

جدول ۱. دانه بندی سنگدانه تهیه شده به همراه محدوده دانه بندی استاندارد موسسه بتن آمریکا (ACI)

Sieve Size	Passing percentage range in ACI 506 standard	Passing percentage used in this study
1/2 in. (12 mm)	100	100
3/8 in. (10 mm)	90-100	100
No.4 (4.75 mm)	70-85	72
No.8 (2.4 mm)	50-70	52
No.16 (1.2 mm)	35-55	34
No.30 (600 μm)	20-35	20
No.50 (300 μm)	8-20	11
No.100 (150 μm)	2-10	5

شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، منحنی دانه بندی انتخاب شده برای تهیه شاتکریت دارای کیفیت مناسبی بوده و در محدوده استاندارد قرار دارد.

منحنی دانه بندی سنگدانه نیز به صورت درصد عبوری تجمعی ترسیم و در شکل ۱ به همراه منحنی های استاندارد ارائه شده توسط کمیسیون استانداردهای اروپا (EN 12620) نشان داده



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه تهیه شده به همراه محدوده استاندارد دانه بندی مطابق با کمیسیون استانداردهای اروپایی

شده که دفن یا سوزانده می شود. این الیاف در طی فرآیند بازیافت تایرهای فرسوده و تولید پودر لاستیک، به عنوان زباله جداسازی می شوند. در ابتدا تایرهای فرسوده وارد کارخانه شده و پس از جداسازی کف و جداره از یکدیگر، این لاستیکها به قطعات مستطیلی شکل (حدود ۱۰×۱۰ سانتی متر) تبدیل شده و در ادامه قطعات مستطیلی شکل وارد

۳-۱-۲. الیاف

جهت تهیه شاتکریت الیافی، در تحقیق حاضر از ضایعات بخش بازیافت کارخانه لاستیک سازی یزد (شرکت فرآور- ایساتیس) موسوم به ضایعات چغلا استفاده شده است. در طی فرآیند بازیافت، روزانه بین ۸ تا ۱۰ تن از این نوع الیاف تولید

گودال مستطیلی شکل ریخته شده و با فشار جک در بسته‌های به ابعاد $20 \times 100 \times 100$ سانتی متری متراکم می‌شوند. این بسته‌ها به محل دفن زباله‌های شهری منتقل شده و دفن یا سوزانده می‌شوند. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی الیاف ضایعاتی ارائه شده است. نتایج خلاصه شده در این جدول متوسط مقادیر محاسبه شده برای تعداد زیادی از الیاف ضایعاتی است که در واحد فنی صنایع لاستیک یزد انجام شده است.



شکل ۲. الیاف مورد استفاده در شاتکریت

مرحله خردایش می‌شوند. در این مرحله قطعات لاستیکی به کمک نوار نقاله به سمت تعدادی غلتک دوار حرکت داده می‌شود. این غلتک‌ها دو به دو در فاصله‌ی عمودی کمی نسبت به هم قرار دارند و در جهت‌های مخالف یکدیگر می‌چرخند. بر روی سطح هر غلتک تعدادی تیغه‌ی بسیار تیز و برنده با آرایش خاصی قرار دارد. قطعات لاستیکی پس از عبور از بین این غلتک‌ها خرد شده و لایه‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها از یکدیگر جدا می‌شود.

فرآیند عبور قطعات لاستیکی از بین غلتک‌ها در چندین مرحله تکرار می‌شود و در هر مرحله فاصله بین غلتک‌ها کمتر شده و شکل تیغه نیز به نحوی تغییر می‌کند که لاستیک‌ها بیشتر خرد شده و الیاف، بهتر از خرده لاستیک‌ها جدا شوند. در هر مرحله پس از عبور لاستیک‌ها از بین غلتک‌ها به کمک فشار مکش هوا که در بالای نوار نقاله اعمال می‌شود، الیاف جدا شده از لاستیک که دارای وزن کمتری هستند، جدا می‌شوند. (شکل ۲).

پس از جداسازی الیاف به منظور بسته‌بندی آن‌ها از یک جک هیدرولیکی استفاده می‌شود. به این منظور الیاف داخل یک

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف مورد استفاده (عباسپور، ۱۳۹۸)

Property	Unit	Values	
		Fiber Range	Most frequency
Diameter	mm	0.035-1.5	0.8
Length	mm	0-7	20-40
Tensile strength	MPa	500-2000	600
Elongation at break	%	18-25	22
Elastic modulus	GPa	2-7.5	2.7
Hot air shrinkage (at 177 °C × 2 min × 143 gr)	%	3-5	4.5
Linear density	*Denier	1890-840	1260
Melting point	°C	250-260	256
Acid resistance	-	Excellent	

* 9 km yarn mass in grams

با نتایج ارائه شده در این جدول گذشت زمان تغییر چشمگیری در این ضایعات ایجاد نمی‌کند. به طور مثال در این بازه‌ی زمانی، حداکثر تفاوت ایجاد شده در الیاف به لحاظ قطر و طول کمتر از ۵/۵٪ است (عباسپور، ۱۳۹۸).

به منظور بررسی تغییرات حاصل در ضایعات کارخانه با گذشت زمان دو نمونه از ضایعات به فاصله ۶ ماه تهیه شده و به لحاظ طول الیاف و قطر، به صورت چشمی تفکیک شده است. نتایج این تفکیک در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق

جدول ۳. نتایج تفکیک چشمی الیاف بازیافتی مورد استفاده برای دو نمونه به فاصله زمانی ۶ ماه (عباسپور، ۱۳۹۸)

Property	Sample 1	Sample 2
0-20	31.1	29.9
20-40	43.6	47.7
40<	25.3	22.4
0.035-0.5	12.4	13.4
0.5-0.8	50.1	46.6
0.8<	9.5	7.3
Crumb rubber with fibers sticking together	26	31.4
Rubber powder	2	1.3

تهیه شدند. در این مطالعه مقادیر اجزا طرح اختلاط در تهیه همه نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد و فقط درصد الیاف متغیر بوده است تا تاثیر الیاف بر خصوصیات مکانیکی شاتکریت ارزیابی شود. درصد ترکیب سنگدانه، سیمان و آب به ترتیب برابر ۷۵، ۱۶/۵ و ۸/۵ درصد وزنی شاتکریت در نظر گرفته شدند که نسبت آب به سیمان آن نیز برابر ۰/۵۱ انتخاب شد. به منظور بررسی اثر الیاف بازیافتی از تایر فرسوده بر رفتار مکانیکی شاتکریت، نمونه‌های مختلفی برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) و نیز آزمایش مقاومت خمشی تهیه شد. در ادامه به شرایط تهیه نمونه برای هر یک از این آزمایش توضیح داده شده است.

به منظور تهیه نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، از قالب‌های استوانه‌ای فلزی به قطر ۱۰۰ و طول ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزیلی)، مطابق با استاندارد JSRM، قالب‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر تهیه شد (Ulusay and Hudson 1978). همچنین برای تهیه نمونه‌های آزمایش مقاومت خمشی، قالب‌های مکعبی فلزی به ابعاد ۱۶۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر استفاده شد. بعد از آماده‌سازی

۳-۱-۳. سیمان و آب

سیمان پرتلند مرسوم‌ترین سیمان مورد استفاده در تهیه شاتکریت است. انواع مختلف سیمان پرتلند متناسب با شرایط محیط و مطالعه عوامل شیمیایی انتخاب می‌شود. در تهیه نمونه‌های مورد نیاز از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شد. آب مصرفی در شاتکریت باید همانند استانداردهای آب مصرفی در بتن معمولی، تمیز و صاف و عاری از مواد مضر برای بتن و فولاد باشد. به طور کلی آبی که قابل شرب بوده و مزه و بو ندارد، جهت استفاده در شاتکریت مناسب است. به منظور رعایت موارد مذکور، جهت تهیه نمونه‌ها از آب آشامیدنی شهر اراک استفاده شده است.

۳-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

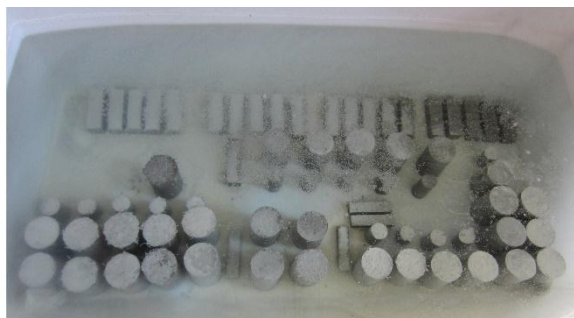
تهیه نمونه‌ها به عنوان یک مرحله مهم در تحقیقات آزمایشگاهی تلقی می‌شود؛ بنابراین با اعمال شرایط یکسان در ساخت نمونه‌ها و تهیه نمونه‌های همگن، نتایج دقیق‌تری از مقایسه داده‌های آزمایش‌ها به دست خواهد آمد. با توجه به هدف اصلی تحقیق حاضر مبنی بر مطالعه تاثیر الیاف بازیافتی بر رفتار مکانیکی شاتکریت، نمونه‌های با درصد‌های مختلف الیاف شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد و نیز نمونه بدون الیاف

حفظ درصد رطوبت مخلوط، الیاف مورد نظر قبل از افزودن به داخل میکسر، توسط آب مرطوب شد. مشابه با تهیه نمونه‌های بدون الیاف، نمونه‌های با ۰/۵ درصد الیاف نیز در داخل قالب‌های موجود ریخته شد. سپس با استفاده از میز لرزان نمونه‌ها حباب‌گیری شدند. به همین روش در چند مرحله الیاف به مخلوط تهیه شده اضافه شد و نمونه‌های با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف قالب‌ریزی شدند. پس از اتمام عملیات قالب‌ریزی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب در داخل قالب‌ها نگهداری شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت و دستیابی به گیرش اولیه، نمونه‌ها از قالب خارج شدند. دقت در هنگام خارج کردن نمونه‌ها، سبب افزایش کیفیت نمونه‌ها شده که در هنگام انجام آزمایش‌ها نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد. در ادامه جهت عمل‌آوری نمونه‌های مذکور، همه آن‌ها به مدت ۲۸ روز در آب قرار گرفتند. بعد از گذشت ۲۸ روز نمونه‌ها از آب خارج شده و در دمای اتاق خشک شدند. در نهایت نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های طراحی شده، آماده شدند. در شکل ۳، (الف) نمونه‌های مستغرق در آب و (ب) نمونه‌های با سن ۲۸ روز نشان داده شده است.

قالب‌های مورد نیاز، جهت تهیه نمونه‌ها ابتدا مصالح سنگدانه درشت، سنگدانه ریز و سیمان متناسب با نسبت‌های تعیین شده در میکسر بتن گیربکسی ریخته و کاملاً مخلوط شدند. سپس آب به تدریج اضافه شد و در نهایت مخلوطی همگن از مصالح به دست آمد. پس از دستیابی به مخلوط همگن از مصالح سنگدانه، سیمان و آب، در ابتدا نمونه‌های بدون الیاف (نمونه شاهد) قالب‌ریزی شدند. این قالب‌ریزی به طور هم‌زمان برای نمونه‌های مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت خمشی انجام شد. به این صورت که برای تهیه هر نمونه، مخلوط حاصل در سه مرحله در داخل قالب ریخته شد؛ به طوری که در هر مرحله بعد از ریختن مخلوط، با میله‌زنی توسط یک میله به قطر ۱۶ و طول ۶۰۰ میلی‌متر، نمونه‌ها متراکم شدند. به منظور خروج حباب‌های هوا از داخل مخلوط، پس از قالب‌ریزی نمونه‌ها، با استفاده از میز لرزان عملیات تراکم و حباب‌گیری نمونه‌ها به مدت ۲۰ ثانیه انجام پذیرفت. پس از ساخت نمونه‌های بدون الیاف، به مخلوط باقی‌مانده به میزان ۰/۵ درصد وزنی الیاف به داخل میکسر اضافه شد و به کمک دستگاه، الیاف به طور کامل با ملات مخلوط شد. جهت



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) مستغرق نمودن نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز، (ب) نمونه‌ها خارج شده در سن ۲۸ روز

درصد الیاف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ انجام شد. در ادامه شرایط انجام این آزمایش‌ها به طور خلاصه بیان شده است.

۳-۳. انجام آزمایش‌ها

به منظور مطالعه اثر افزودن الیاف بازیافتی از تایر فرسوده بر خواص مکانیکی شاتکریت، سه آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) و آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های بدون الیاف و با

۳-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

به منظور بررسی اثر الیاف بر مقاومت فشاری شاتکریت، نمونه‌های آماده شده تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفتند. به طور کلی منحنی رفتار نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، به سه قسمت رفتار قبل از نقطه اوج (Peak)، نقطه اوج و رفتار بعد از اوج تقسیم می‌شود. از آنجایی که در تحقیق حاضر، رفتار بعد از نقطه اوج نمونه‌ها جهت ارزیابی ظرفیت جذب انرژی شاتکریت مورد نیاز است؛ بنابراین انجام آزمایش مقاومت فشاری برای این نمونه‌ها، مستلزم استفاده از دستگاهی است که قابلیت نمایش رفتار بعد از شکست نمونه‌ها یا اصطلاحاً پست-پیک (Post-Peak) را داشته باشد. در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط دستگاه UTM واقع در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. به منظور دستیابی به رفتار بعد از اوج نمونه‌ها، تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط کرنش کنترل و با نرخ ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام شدند. با توجه به این نرخ بارگذاری مدت زمان آزمایش هر نمونه حدود ۲۰ دقیقه به طول انجامید. در شکل ۴-الف) نمایی از این دستگاه در حال انجام آزمایش نشان داده شده است.

۳-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

ضعیف‌ترین رفتار بتن و شاتکریت در کشش ظاهر می‌شود؛ به طوری که مقاومت کششی آن‌ها در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است (مستوفی‌نژاد، ۱۳۹۵). در واقع دلیل اصلی این تفاوت چشمگیر، به علت وجود ریزترک‌های فراوان در نمونه بتن و شاتکریت، حتی قبل از شروع آزمایش است. عملکرد این ریزترک‌ها در فشار و کشش کاملاً متفاوت است؛ به گونه‌ای که در هنگام اعمال فشار، ریزترک‌ها در ابتدا بسته شده و اختلالی در باربری فشاری ایجاد نمی‌کنند، اما در هنگام اعمال کشش، ریزترک‌ها مانع از انتقال تنش کششی شده و منجر به گسیختگی زودرس آن نمونه تحت تنش کششی می‌شوند (کیوانی، ۱۳۸۰). به این منظور، در چند سال اخیر تحقیقات گسترده‌ای جهت بهبود مقاومت کششی بتن و

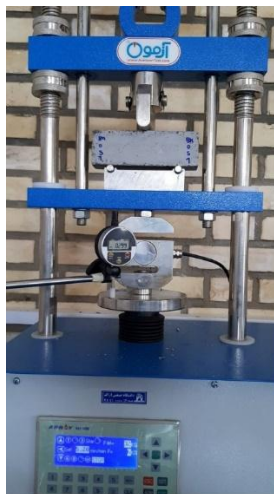
شاتکریت انجام شده است. یکی از اهداف اصلی استفاده از الیاف در شاتکریت، افزایش مقاومت کششی آن است. به طور کلی برای تعیین مقاومت کششی بتن و شاتکریت در آزمایشگاه، از دو روش مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. به علت مشکل بودن اعمال نیروی کششی مستقیم به نمونه‌ها، استفاده از روش کشش مستقیم محدود است. در واقع جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها، غالباً از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، به منظور مطالعه اثر الیاف استفاده شده بر رفتار مکانیکی شاتکریت در کشش، از آزمایش برزیلی مطابق با روش پیشنهادی ISRM استفاده شد (Ulusay and Hudson, 1978). به منظور انجام آزمایش برزیلی با دقت بالا، از دو فک بارگذاری فولادی آزمایش برزیلی به همراه دستگاه بارگذاری آزمایش مقاومت خمشی دیجیتال (Digital Flexural & Tension Cement Mortar Machine) استفاده شد. به این صورت که با جایگذاری نمونه دیسکی در دو فک بارگذاری، نمونه برای انجام آزمایش حاضر گردید. طبق روش پیشنهادی ISRM بار باید به صورت پیوسته و با آهنگ یکنواخت بر نمونه وارد شود، به گونه‌ای که در ضعیف‌ترین نمونه‌ها شکست حدوداً بین ۱۵ تا ۳۰ ثانیه رخ دهد. در این راستا، به منظور دستیابی به نکته مزبور، بارگذاری به صورت کرنش کنترل و با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفت. در این آزمایش بار اعمالی و تغییر شکل قطری نمونه‌ها ثبت گردید. در شکل ۴-ب) نمونه تحت بار توسط دستگاه مذکور نشان داده شده است.

۳-۳. آزمایش مقاومت خمشی

مقاومت خمشی، در حقیقت مقاومت کششی ناشی از خمش است که با آزمایش خمش تیر کوچک از ماده مورد نظر انجام می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به منظور بررسی مقاومت خمشی شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی از تایر فرسوده، نمونه‌های مکعبی با ابعاد $160 \times 50 \times 50$ میلی‌متر تهیه گردید. نمونه‌های تهیه شده به کمک دستگاه تعیین مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. نرخ بارگذاری

مزبور نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز نمایی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است.

در تمامی آزمایش‌ها برابر 0.2 میلی‌متر بر دقیقه بوده و بار اعمالی به همراه تغییر شکل نمونه‌ها ثبت شده است. در شکل ۴- (پ) نحوه انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای توسط دستگاه



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۴. نمایی از دستگاه‌ها مورد استفاده در انجام (الف) آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، (ب) آزمایش برزیلی و (پ) آزمایش خمش سه نقطه‌ای



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۵. نمایی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش (الف) مقاومت فشاری تک محوره، (ب) برزیلی، (پ) خمش سه نقطه‌ای

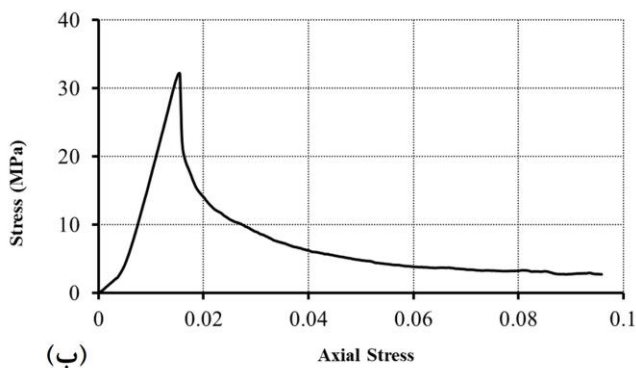
۴. ارائه نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش برزیلی و آزمایش خمش ارائه شده است. نتایج شامل آزمایش بر روی نمونه‌های تهیه شده با درصد‌های مختلف الیاف و نمونه بدون الیاف می‌باشد.

۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

رفتار تنش-کرنش آزمایش مقاومت فشاری تک محوره شاتکریت بدون الیاف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نمونه بعد از رسیدن به مقاومت نهایی $41/2$ مگاپاسکال به صورت ناگهانی شکسته است. به عبارتی دیگر، نمونه شاتکریت به علت رفتار شکننده بعد از مقاومت نهایی، ظرفیت باربری خود را کاملاً از

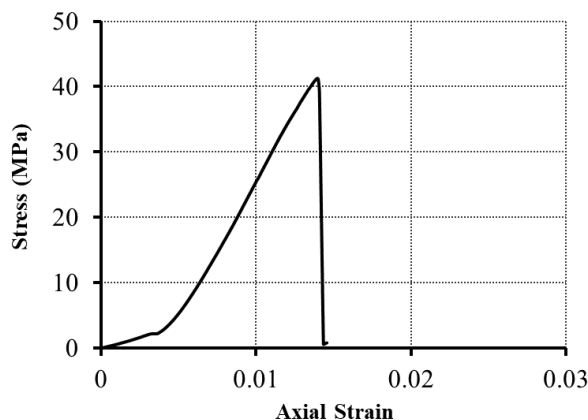
بعد از شکست اولیه شاتکریت، الیاف‌های موجود در بافت آن وارد عمل شده و نمونه همچنان دارای ظرفیت باربری می‌باشد. این امر به این معنی است که الیاف اضافه شده تا حدودی از رفتار شکنندگی شاتکریت کاسته است. نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی با ۱ درصد الیاف در شکل ۷- (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نمونه شاتکریت بعد از مقاومت ۳۲/۱ مگاپاسکال دچار شکست شده و بعد از شکست مقاومت آن با افت ناگهانی به حدود ۲۰/۴ مگاپاسکال رسیده است. به عبارتی دیگر، وجود ۱ درصد الیاف در بافت شاتکریت، سبب ایجاد ظرفیت باربری قابل توجهی در مرحله بعد از شکست آن شده است. نکته مهم دیگر در مورد رفتار بعد از شکست شاتکریت با این نوع الیاف، امکان تحمل تغییر شکل‌های بیشتر با کاهش تدریجی ظرفیت باربری آن است. به طوری که شاتکریت حتی بعد از ۲۰ میلی‌متر تغییر شکل، توان تحمل تنشی در حدود ۳ مگاپاسکال را دارد.



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش برای شاتکریت با (الف) ۰/۵ درصد الیاف (ب) ۱ درصد الیاف

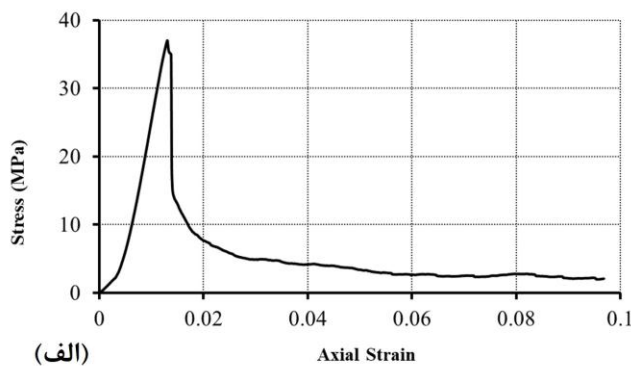
مگاپاسکال تنش را دارد. این تغییر رفتار شاتکریت در فعالیت‌های مهندسی، به خصوص در مباحث نگهداری فضاهای زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. به طوری که نمونه‌ها اولاً به طور ناگهانی دچار شکست نشده‌اند و ثانیاً قابلیت جذب انرژی آن‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

دست داده و مقاومت آن به صفر رسیده است. این نوع رفتار شاتکریت در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی از جمله تونل‌سازی و حفر فضاهای زیرزمینی مطلوب نیست.

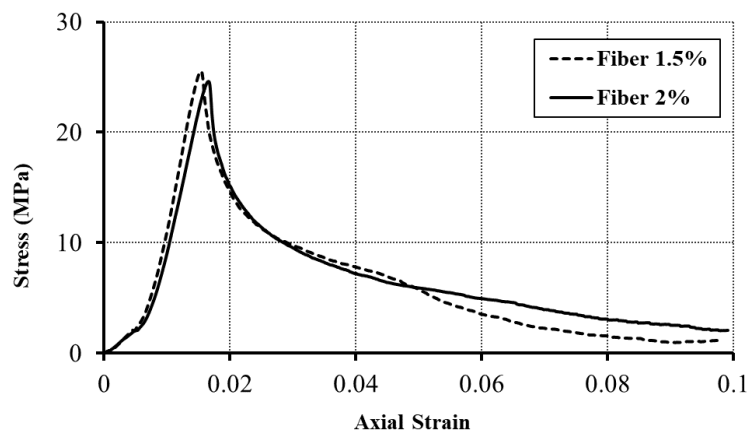


شکل ۶. نمودار تنش-کرنش برای شاتکریت بدون الیاف

منحنی تنش-کرنش نمونه با ۰/۵ درصد الیاف نشان داد که با افزودن مقداری از الیاف مورد نظر، رفتار مکانیکی شاتکریت تغییر می‌نماید (شکل ۷- (الف)). به گونه‌ای که بعد از رسیدن نمونه به مقاومت نهایی ۳۷ مگاپاسکال، مقاومت نمونه به طور ناگهانی تا ۱۴ مگاپاسکال کاهش یافته است. به عبارتی دیگر،



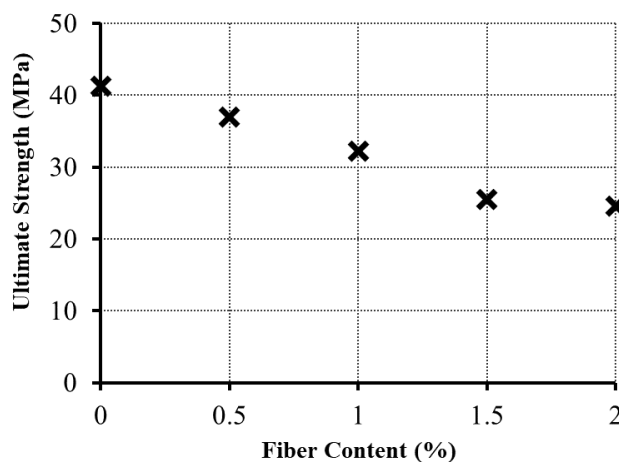
در شکل ۸، نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های شاتکریت با ۱/۵ و ۲ درصد الیاف نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش مقدار الیاف به ۱/۵ و ۲ درصد، بعد از شکست اولیه، مقاومت نمونه به طور ناگهانی افت نمی‌کند. به طوری که با افزایش تغییر شکل، مقاومت به تدریج شروع به کاهش می‌کند. به گونه‌ای که بعد از حدود ۱۰ میلی‌متر تغییر شکل، شاتکریت همچنان توان تحمل ۶



شکل ۸. نمودار تنش- کرنش برای شاتکریت با ۱/۵ و ۲ درصد الیاف

مگاپاسکال کاهش یافته است. از نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها قابل مشاهده است که رفتار بعد از پیک نمونه‌های با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف تفاوت قابل توجهی با هم ندارند. به عبارتی دیگر، بعد از ۱ درصد الیاف، با افزایش مقدار الیاف تغییرات زیادی در قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود. از طرفی مقاومت فشاری آن‌ها کاهش می‌یابد.

نمودار تغییرات مقاومت نهایی شاتکریت با افزایش درصد الیاف در شکل ۹ نشان داده شده است. هر چند کاهش رفتار شکنندگی شاتکریت با افزایش مقدار الیاف از اثرات مثبت الیاف است، اما همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار الیاف از مقدار مقاومت نهایی شاتکریت کاسته شده است. به طوری که مقاومت نمونه‌ها از ۴۲/۲ به ۲۴/۶



شکل ۹. اثر الیاف بر مقاومت نهایی نمونه‌ها

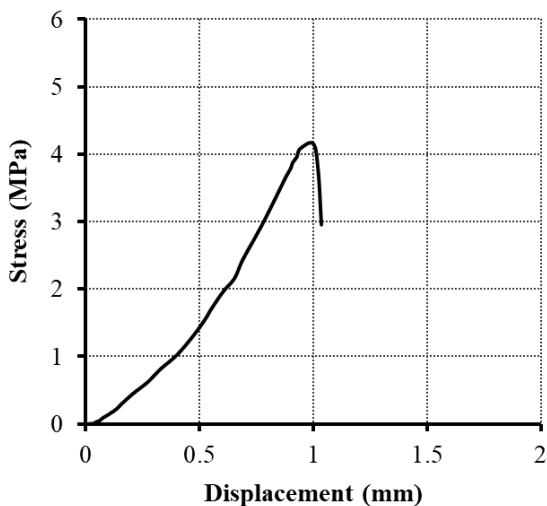
محاسبه تنش مماسی و تنش شعاعی در امتداد محور بارگذاری از روابط ۱ و ۲ استفاده شد:

۴-۲. آزمایش برزیلی

راه‌حل کامل تنش در امتداد قطر بارگذاری برای حالتی که بار در امتداد یک قوس محدود اعمال می‌شود، به وسیله هاندرو ارائه شده است (Hondros, 1959). در مطالعه حاضر، برای

$$\sigma_{\theta} = + \frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{[1-(r/R)^2] \sin 2\alpha}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1+(r/R)^2}{1-(r/R)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_r = - \frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{[1-(r/R)^2] \sin 2\alpha}{1-2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} + \tan^{-1} \left[\frac{1+(r/R)^2}{1-(r/R)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (2)$$



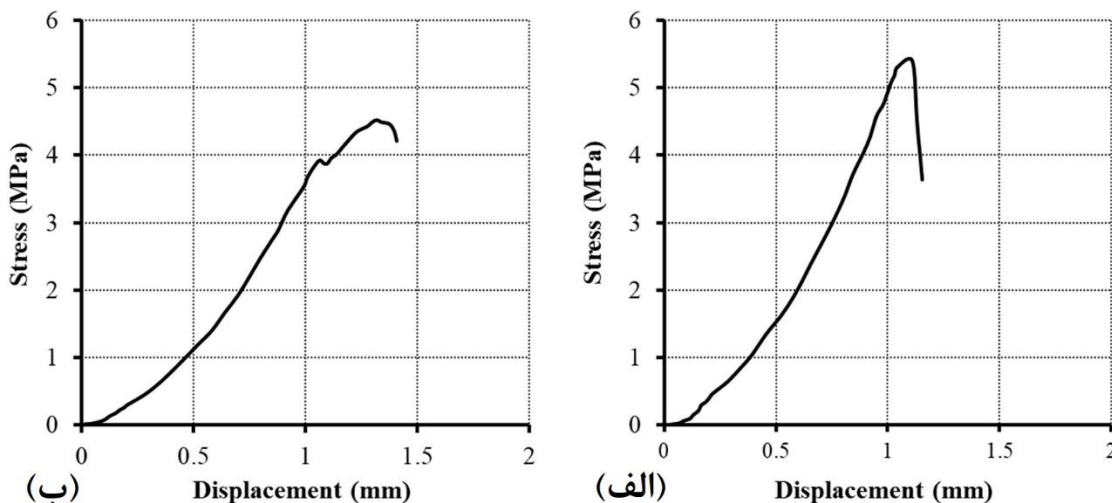
نمودار تنش مماسی- تغییر شکل قطری برای شاتکریت با ۰/۵ درصد الیاف در شکل ۱۱-الف) نشان داده شده است. با اضافه شدن ۰/۵ درصد الیاف به شاتکریت، مقاومت آن از ۴/۱۵ مگاپاسکال به ۵/۳۹ مگاپاسکال افزایش یافته است. بعد از رسیدن تنش به این مقاومت، نمونه دچار شکست شده و نمونه مقاومت خود را از دست داده است. با افزایش مقدار الیاف از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، آزمایش دیگری انجام شد. نمودار مربوط به این نمونه در شکل ۱۱-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بعد از رسیدن تنش به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال، اُفت کمی در تنش رخ داده ولی در ادامه نمونه مجدد مقاومت کرده و تا تنش ۴/۵۱ مگاپاسکال را تحمل کرده است. در این آزمایش وقتی تنش به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال رسید، ترک ریزی در داخل نمونه ایجاد شد. با ایجاد این ترک، اُفت کوچکی در تنش رخ داد. سپس الیاف موجود در شاتکریت وارد عمل شده و مانع گسترش ترک و گسیختگی کامل نمونه شده است. در نهایت با افزایش تنش تا سطح ۴/۵۱ مگاپاسکال، الیاف‌های موجود دچار آسیب شده و با گسترش ترک، نمونه مقاومت خود را از دست داده است.

که P بار اعمالی، R شعاع دیسک، t ضخامت دیسک، 2α فاصله زاویه‌ای که در آن بار به نمونه اعمال می‌شود (معمولاً کمتر از ۱۵ درجه) و r فاصله از مرکز دیسک است. در این روابط، تنش کششی مثبت در نظر گرفته شده است. از نظر تئوری، مطابق با معیار گریفیث، نقطه شروع ترک مرکز دیسک خواهد بود. در مرکز نمونه شرایط برای گسیختگی کششی در تنشی برابر با مقاومت نمونه مهیا می‌شود. تنش‌های اصلی در این نقطه طبق روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه است.

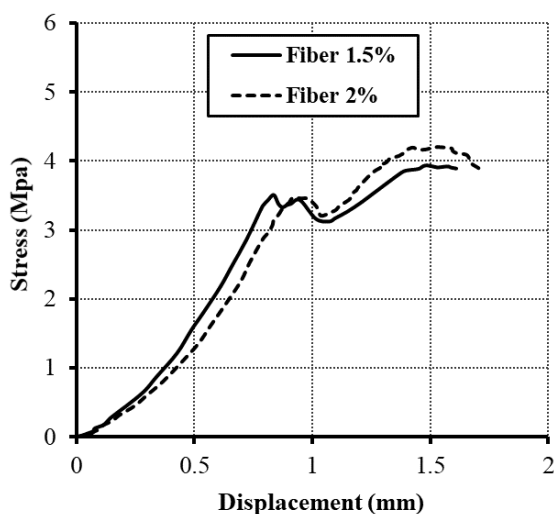
$$\sigma_{\theta} = + \frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right\} \approx + \frac{P}{\pi R t} \quad (3)$$

$$\sigma_r = - \frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right\} \approx - \frac{3P}{\pi R t} \quad (4)$$

همان‌طور که در رابطه بالا نشان داده شده است، تنش مماسی در لحظه شکست همان مقاومت کششی برزیلی است. با ۱۵ درجه تماس قوسی، خطای ناشی از تقریب فوق برای تنش مماسی برابر با ۲ درصد خواهد بود. در دستگاه استاندارد ISRM دو فک بارگذاری به گونه‌ای طراحی می‌شوند که نمونه‌های دیسکی شکل در لحظه شکست در یک قوس محدود ۵ تا ۱۰ درجه با فک‌های دستگاه در تماس باشد (Ulusay and Hudson, 1978). مقدار این زاویه تماس وابسته به تغییر شکل‌پذیری نسبی نمونه و فک دستگاه است (Markides and Kourkoulis, 2012). نمودار تنش مماسی در مقابل تغییر شکل قطری نمونه شاتکریت بدون الیاف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مقاومت کششی نمونه برابر با ۴/۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. بعد از رسیدن تنش مماسی به مقاومت نمونه، با یک شکست قائم قطری از میانه نمونه، مقاومت آن به سرعت افت کرده و نمونه به دو قطعه مجزا تقسیم می‌شود. مقدار تغییر شکل ثبت شده در لحظه شکست برابر با ۱/۰۱ میلی‌متر است.



شکل ۱۱. نمودار تنش مماسی - تغییر شکل قطری برای شاتکریت با (الف) ۰/۵ و (ب) ۱ درصد الیاف



شکل ۱۲. نمودار تنش مماسی - تغییر شکل قطری برای

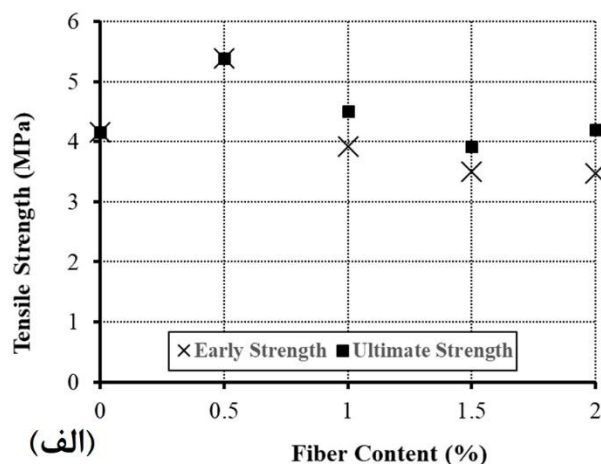
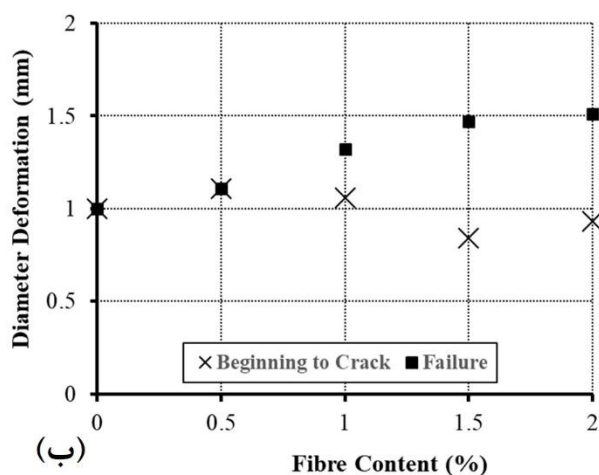
شاتکریت با ۱/۵ و ۲ درصد الیاف

همان‌طور که در بالا نشان داده شد، با افزایش مقدار الیاف در شاتکریت، نمونه‌ها از خود دو مقاومت کششی نشان می‌دهند. مقاومت اولیه که مربوط به شروع ترک‌خوردگی است و مقاومت نهایی که مربوط به مرحله پاره شدن الیاف‌ها و گسترش سراسری ترک در نمونه است. در شکل ۱۳-الف)، مقاومت کششی اولیه و نهایی نمونه‌ها برای درصد‌های مختلف الیاف نشان داده شده است. همچنین مقدار تغییر شکل قطری نمونه‌ها در لحظه شروع ترک (مقاومت کششی اولیه) و

نمودار تغییرات تنش مماسی - تغییر شکل مربوط به نمونه‌های با ۱/۵ و ۲ درصد الیاف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۲ درصد الیاف با رسیدن تنش به حدود ۳/۵ و ۳/۴۷ مگاپاسکال دچار ترک کوچک اولیه شده‌اند. با ایجاد این ترک مقاومت نمونه کمی افت کرده اما به علت وجود الیاف در بافت شاتکریت، ترک نتوانسته است به طور سراسری گسترش یابد و نمونه همچنان ساختار و یکپارچگی خود را حفظ کرده و در ادامه با مقاومت الیاف‌ها در مقابل گسیختگی توانسته است بارهای بیشتری را تحمل کند. به طوری که نمونه‌ها با الیاف ۱/۵ و ۲ درصد به ترتیب تا تنش‌های ثانویه ۳/۹۲ و ۴/۲ مگاپاسکال را تحمل کرده‌اند. به عبارتی دیگر، هر چند با افزایش الیاف مقداری از تنش ایجاد ترک اولیه نمونه‌ها کاسته شده است، اما بعد از شروع ترک اولیه و با وارد عمل شدن الیاف‌ها، نمونه‌های شاتکریت نتوانسته‌اند با حفظ توان باربری، تنش‌های بیشتری را تحمل کرده و تغییر شکل‌های بیشتری را از خود نشان دهند. به عبارتی دیگر، وجود این نوع الیاف نتوانسته است، خاصیت تغییر شکل‌پذیری و در نتیجه جذب انرژی نمونه‌های شاتکریت را افزایش دهد.

با اضافه نمودن الیاف و افزایش آن تا ۲ درصد، مقدار تغییر شکل قطری نمونه در لحظه شروع ترک اولیه تغییرات چندانی نداشته است؛ اما تغییر شکل قطری برای لحظه گسیختگی نمونه با افزایش درصد الیاف افزایش یافته است. به عبارتی دیگر، اضافه کردن الیاف مورد نظر تا ۲ درصد، در عین حال که تاثیر کمی بر مقاومت کششی دارد، سبب انعطاف پذیری بیشتر شاتکریت شده و امکان جذب انرژی و مقاومت بیشتر در مقابل تغییر شکل توده سنگ را مهیا می کند.

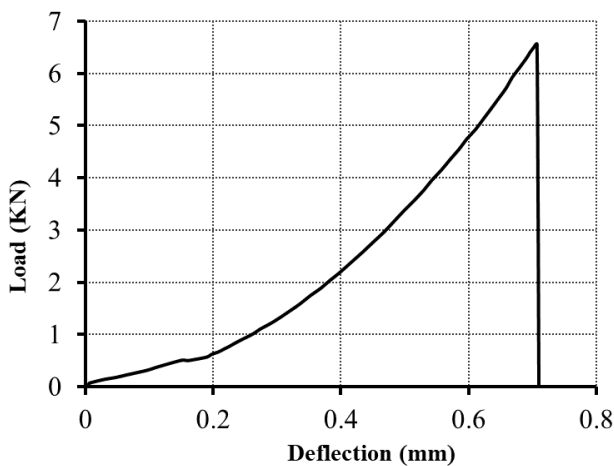
گسترش ترک (مقاومت کششی نهایی) در شکل ۱۳-ب) نشان داده شده است. مطابق این شکل، با اضافه کردن الیاف به مقدار ۰/۵ درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و سپس با افزایش درصد الیاف تا ۲ درصد، مقاومت کششی مربوط به ترک اولیه کمی نسبت به نمونه بدون الیاف کاهش یافته است. نکته قابل توجه این است که مقاومت کششی نهایی با افزایش درصد الیاف تا ۲ درصد، تغییر چندانی نسبت به شاتکریت بدون الیاف نداشته است. شکل ۱۳-ب) نیز نشان می دهد که



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت و تغییر شکل پذیری نمونه ها با افزایش درصد الیاف

۴-۳. آزمایش خمش

نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش خمش برای نمونه بدون الیاف در شکل ۱۴ ترسیم شده است. طبق این نمودار، بعد از رسیدن نیرو به مقدار ۶۵۵۶/۲ نیوتن، نمونه به طور ناگهانی شکسته و مقاومت خود را کاملاً از دست داده است. این نمودار نشان دهنده رفتار شکننده نمونه بدون الیاف در بارگذاری خمشی می باشد.



شکل ۱۴. نمودار نیرو-جابجایی برای شاتکریت بدون الیاف

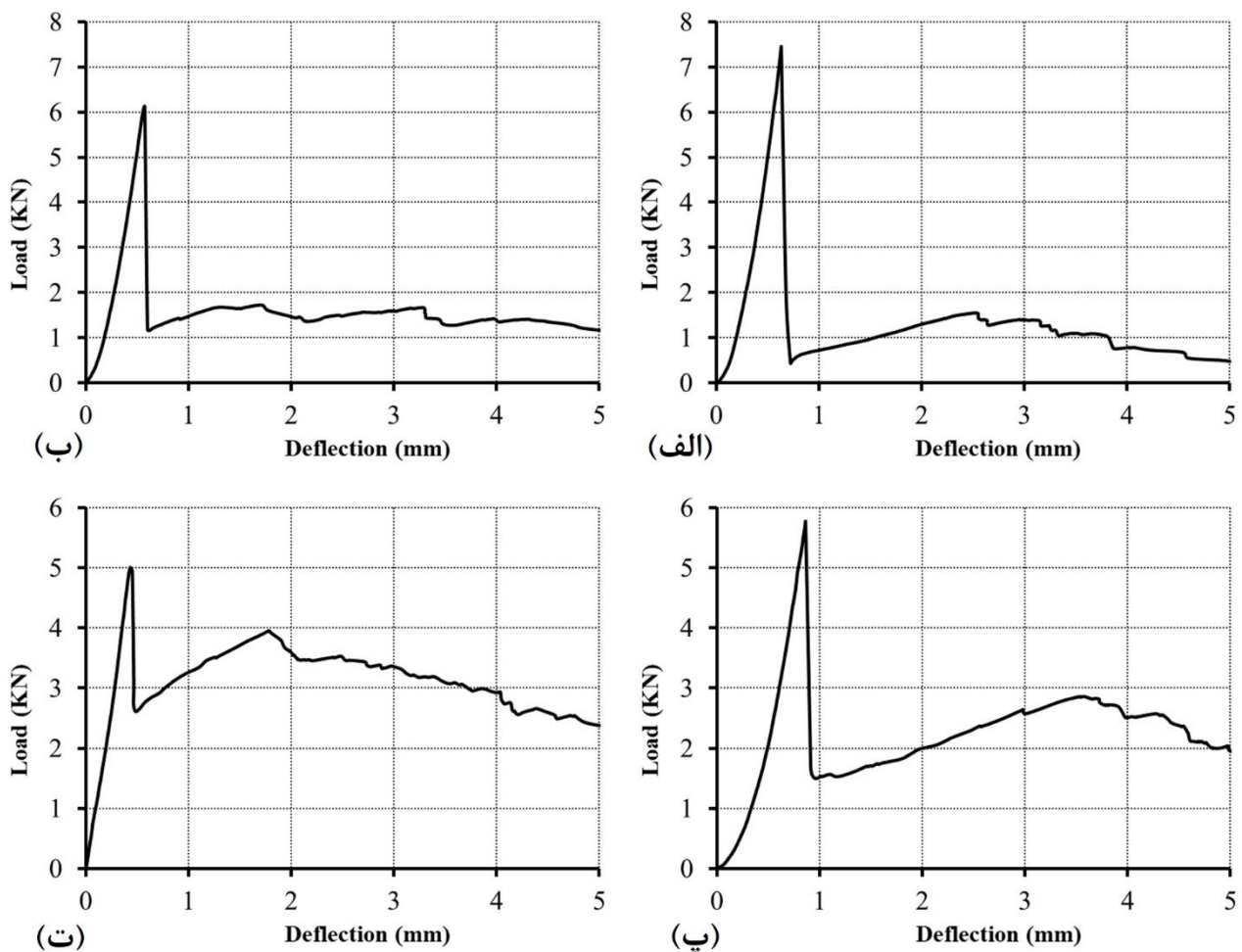
در شکل ۱۵-الف) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه با ۰/۵ درصد الیاف نشان داده شده است. بر طبق این نمودار، نمونه

بعد از تحمل نیرو تا مقدار $7438/2$ نیوتن دچار شکست شده است. افزودن الیاف به مقدار $0/5$ درصد سبب افزایش مقاومت پیک نمونه به مقدار 882 نیوتن شده است. همچنین بعد از شکست، نمونه به طور کامل مقاومت خود را از دست نداده و قابلیت تحمل $431/2$ نیوتن نیرو را داشته است. با ادامه آزمایش و درگیر شدن بیشتر الیافها در فرآیند مقاومت نمونه، مقاومت آن شروع به افزایش کرده، به گونه‌ای که بعد از حدود $2/5$ میلی‌متر جابجایی، مقاومت نمونه به $1548/4$ نیوتن افزایش یافته است. از طرفی، نمونه تا جابجایی 5 میلی‌متر، همچنان توانایی تحمل بار را داشته است. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه با 1 درصد الیاف در شکل ۱۵- (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مقاومت حداکثر نمونه در این حالت برابر با 6125 نیوتن بوده است. بعد از مقاومت حداکثر، نمونه دچار شکست شده و مقاومت آن به مقدار $1166/2$ کاهش یافته است. با ادامه بارگذاری نمونه، مقاومت آن به مقدار $1724/8$ نیوتن افزایش یافته است. با مقایسه این نمودار با نمودار نمونه با $0/5$ درصد الیاف، مشخص است که با افزایش مقدار الیاف به 1 درصد، مقاومت پیک کاهش یافته اما مقاومت نمونه بعد از پیک افزایش یافته است. به عبارتی دیگر، با افزایش مقدار الیاف، قابلیت باربری نمونه بعد از مقاومت حداکثر افزایش یافته است. به گونه‌ای که نمونه بعد از جابجایی 5 میلی‌متر همچنان توان تحمل بار را دارد.

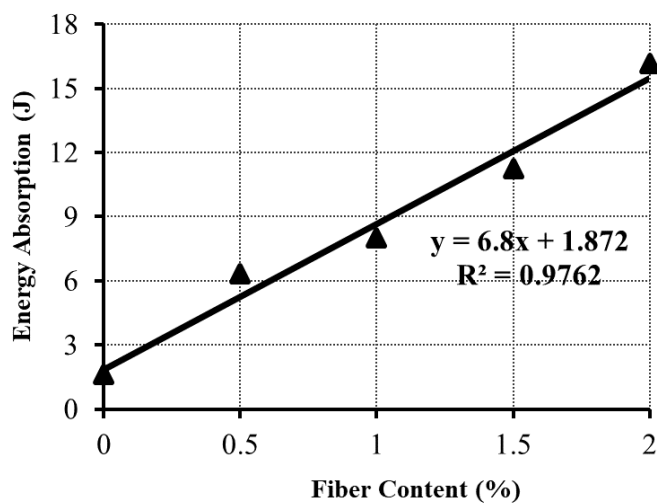
نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه با $1/5$ درصد الیاف در شکل ۱۵- (پ) نشان داده شده است. نتایج آزمایش نمونه با $1/5$ درصد الیاف نشان داد که با این درصد الیاف نمونه در

نیروی $5772/2$ نیوتن دچار شکست شده است. بعد از شکست مقاومت آن به مقدار $1499/4$ نیوتن رسیده و با ادامه بارگذاری مقاومت آن تا $2861/6$ نیوتن افزایش یافته است. این امر تاثیر مثبت حضور الیاف را در تغییر رفتار نمونه از حالت شکننده به شکل‌پذیر را نشان می‌دهد. به طوری که با $1/5$ درصد الیاف، بعد از جابجایی حدود 5 میلی‌متر، نمونه همچنان توان تحمل 1950 نیوتن بار را دارد. نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه با 2 درصد الیاف در شکل ۱۵- (ت) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در این حالت نمونه تا مقدار 4998 نیوتن، نیرو را تحمل کرده و سپس دچار شکست شده است. بعد از شکست مقاومت آن به مقدار $2606/8$ افت کرده و در ادامه آزمایش، مقاومت آن تا $3949/4$ نیوتن افزایش یافته است. بعد از جابجایی 5 میلی‌متر، مقاومت نمونه حدود $2322/6$ نیوتن ثبت شده است. این مقدار توانایی تحمل نیرو، ناشی از مقاومت کششی الیاف موجود در بافت نمونه است. نکته قابل‌ذکر این است که نمونه‌ها حتی بعد از 5 میلی‌متر جابجایی همچنان پیوستگی خود را حفظ کرده و دچار گسیختگی کامل نمی‌شوند.

مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی معرف قابلیت جذب انرژی توسط نمونه است. مقدار جذب انرژی نمونه‌ها بعد از 5 میلی‌متر جابجایی محاسبه و در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بر طبق این نمودار، با افزایش مقدار الیاف در نمونه‌ها، مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه افزایش یافته است. رابطه بین مقدار انرژی جذب شده با درصد الیاف تقریباً خطی بوده، به طوری که با افزایش یک درصدی الیاف، قابلیت جذب انرژی در نمونه به مقدار $6/8$ ژول افزایش یافته است.

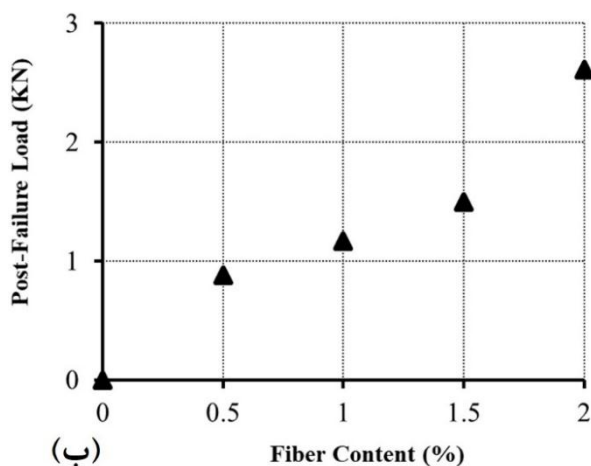


شکل ۱۵. نمودار نیرو-جابجایی برای شاتکریت با (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (پ) ۱/۵ و (ت) ۲ درصد الیاف

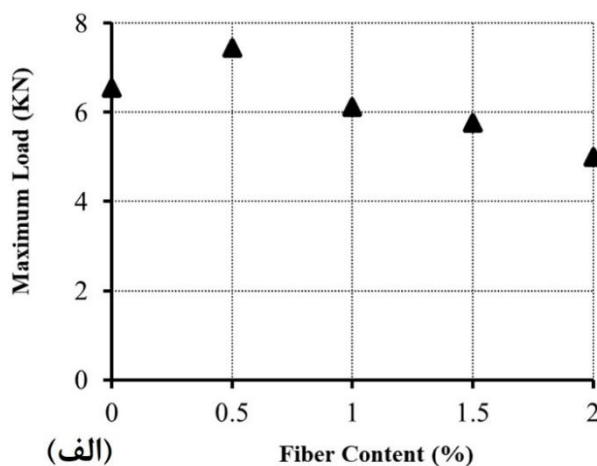


شکل ۱۶. تغییرات قابلیت جذب انرژی شاتکریت با افزایش درصد الیاف مورد استفاده

تغییرات نیرویی که نمونه بعد از شکست می‌تواند تحمل کند، ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش مقدار الیاف، ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها بعد از شکست افزایش یافته است.



در شکل ۱۷-الف) تغییرات نیروی حداکثر نمونه‌ها در مقابل درصد الیاف ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش الیاف به مقدار ۰/۵ درصد، نیروی حداکثر نمونه افزایش یافته اما در درصدهای بالاتر، افزایش الیاف سبب کاهش این نیرو شده است. در شکل ۱۷-ب) نیز نمودار



شکل ۱۷. الف) تغییرات نیروی حداکثر قابل تحمل نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف و ب) نیروی بعد از شکست نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف

۵. نتیجه‌گیری

ترک خوردگی و در نتیجه میزان جذب انرژی را افزایش داده است. با دستیابی به شاکریتی شکل‌پذیر و با قابلیت جذب انرژی بالا، بسیاری از مشکلات سیستم‌های نگهداری در فضاهای زیرزمینی را می‌توان بهبود بخشید. شایان ذکر است که هر چند با افزایش درصد الیاف مورد استفاده انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب انرژی شاکریت به صورت خطی افزایش می‌یابد، اما استفاده از درصدهای بالای الیاف نیز دارای محدودیت است. زیرا درصدهای بالای الیاف تاثیر منفی بر مقاومت فشاری شاکریت دارد. با در نظر گرفتن مجموع نتایج آزمایش‌ها، شاکریت با ۱/۵ درصد الیاف بازیافتی، به عنوان درصد بهینه پیشنهاد می‌شود. از مزایای دیگر الیاف بازیافتی می‌توان به کاهش هزینه‌ها، کاهش مسائل زیست‌محیطی، مقاومت بالای الیاف در محیط‌های مرطوب و اسیدی، پمپاژ راحت‌تر شاکریت الیافی و کاهش فروریز اشاره نمود.

در تحقیق حاضر، اثر استفاده از الیاف بازیافتی از تیر فرسوده بر خواص مکانیکی شاکریت از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، آزمایش‌های مختلفی بر روی نمونه‌های آماده شده با درصدهای مختلف الیاف بازیافتی انجام شد. نتایج نشان داد که الیاف مورد استفاده تاثیر قابل توجهی بر مشخصات مکانیکی شاکریت دارد. به طوری که نمونه‌های بدون الیاف، دارای رفتار ترد و شکننده بوده و از نظر مقدار جذب انرژی دارای کیفیت مناسبی نمی‌باشد. به‌کارگیری الیاف بازیافتی سبب رفتار شکل‌پذیر شاکریت به همراه قابلیت جذب انرژی بالا در نمونه‌های با درصد الیاف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ شده است. در نمونه‌های شاکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی، گیرداری مناسبی بین شاکریت و الیاف ایجاد شده که موجب افزایش توان خمشی و کششی آن شده است. به طوری که الیاف با جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها و همچنین جلوگیری از به هم پیوستن آن‌ها، مقاومت شاکریت در برابر

منابع

- اسماعیلی، م.، قهاری، ع.، ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر رفتار بتن تراورس، مهندسی عمران مدرس، ۱۲ (۳): ۹۱-۱۰۱.
- افضلی نینز، ا.، صفاییان، ر.، پرنیدیان، ا.، زابلی، گ.، ۱۳۹۷. بررسی مقاومت سایشی و طاقت خمشی شاتکریت حاوی الیاف پلیمری، پنجمین همایش و نمایشگاه سد و تونل ایران.
- الهی، ا.، ۱۳۹۳. کنترل زمین و نگهداری در معادن، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی واحد مازندران.
- اورعی، ک.، ۱۳۸۷. نگهداری در معادن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- رویانفر، ع.، ۱۳۸۹. شاتکریت تر و کاربرد آن در تونل سازی، شرکت بین المللی پیمانکاری استرلتوس (سهامی خاص)، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.
- صمدیان، م.، ۱۳۸۵. گزارش بازیافت لاستیک، وزارت صنایع و معادن، معاونت امور تولید.
- عباسپور، م.، ۱۳۹۸. تاثیر استفاده از ضایعات کارخانه بازیافت لاستیک بر مدول برجهندگی خاک های دانه ای، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- فهیمی فر، ا.، مهرزاد سلاکجانی، ب.، دوستانی، ع.، محمدی قلعه عزیز، ع.، ۱۳۹۰. تاثیر الیاف فولادی در بهبود خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری شاتکریت، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- کیوانی، ع.، ۱۳۸۰. اصول و تکنولوژی بتن، انتشارات رودکی.
- مدنی، ح.، ۱۳۹۳. طراحی و اجرای سیستم نگهداری. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مستوفی نژاد، د.، ۱۳۹۵. تکنولوژی و طرح اختلاط بتن. انتشارات ارکان دانش.
- هادوی، م.، رهبر، ع.، ۱۳۹۸. کاربرد بتن پاشیده در نگهداری سنگ، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء، قرب نوح (ع).
- ACI Committee 506. 1990. ACI 506R-90 - Guide to Shotcrete, American Concrete Institute.
- Bhawani, S., and Rajnish., K.G., 2006. Tunneling in Weak Rocks, El-Sever, London.
- Brown, W.D., 2005. Standard Practice For Shotcrete Engineering And Design, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- Cengiz, O., Turanli L., 2003. Comparative Evaluation of Steel Mesh, Steel Fibre and High Fibre Reinforced Shotcrete in Panel Test, Cement and Concrete 12: 1701-7.
- EN 12620, 2002. Aggregates for Concrete, British Standard Institute.
- Hoek, E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 2000. Support of Underground Excavations in Hard Rock. CRC Press.
- Hondros, G., 1959. The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete, Australian J. Appl. Sci. 10 (3): 243-68.
- Kuesel, T.R., King, E.H., Bickel, J.O., 2012. Tunnel Engineering Handbook. Springer Science & Business Media.
- Markides, Ch.F., and Kourkoulis, S.K., 2012. The Stress Field in a Standardized Brazilian Disc: The Influence of the Loading Type Acting on the Actual Contact Length." Rock Mechanics and Rock Engineering 45 (2): 145-58.
- Thomas, A., 2008. Sprayed Concrete Lined Tunnels. CRC Press.
- Ulusay, R., Hudson, J.A., 1978. ISRM Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 15: 99-103.