

## ارزیابی مقاومت کششی شاتکریت تقویت شده با الیاف حاصل از تایرهای بازیافتی (مطالعه موردی: تونل باغان - مریوان، استان کردستان)

بهزاد خوش<sup>۱</sup> و هادی عطاپور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: h.atapour@arakut.ac.ir\*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۵

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۰

### چکیده

امروزه شاتکریت به عنوان یکی از اجزا سیستم‌های نگهداری، به طور گسترده در انواع سازه‌های سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، در چند سال اخیر تحقیقات گسترده‌ای به منظور بهبود کیفیت و ارتقاء مشخصات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری شاتکریت انجام شده است. بررسی اثر افزودن الیاف‌های مختلف به شاتکریت جزو مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه توسعه شاتکریت به شمار می‌رود. در تحقیق حاضر، اثر افزودن الیاف بازیافتی از تایرهای فرسوده بر مقاومت کششی شاتکریت با اجرای میدانی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، عملیات شاتکریت حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف بازیافتی به همراه پنل بدون الیاف در محل پروژه تونل باغان-مریوان اجرا شد. پس از تهیه نمونه‌های مورد نیاز، آزمایش مقاومت کششی برزلی بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که الیاف بازیافتی سبب افزایش قابل توجهی در ظرفیت جذب انرژی شاتکریت و حذف رفتار شکننده آن می‌شود. از مزایای دیگر الیاف بازیافتی می‌توان به کاهش فروریز، پمپاژ راحت، وزن کم الیاف و همچنین مقاومت بالای الیاف در محیط‌های اسیدی و مرطوب اشاره کرد. همچنین با توجه به بازیافتی بودن این الیاف، به‌کارگیری آن در شاتکریت علاوه بر کاهش مشکلات زیست‌محیطی کشور، سبب کاهش چشمگیر در هزینه پروژه‌ها خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** شاتکریت الیافی، مقاومت کششی، الیاف بازیافتی از تایر فرسوده، تغییر شکل‌پذیری، جذب انرژی

### ۱- پیشگفتار

ماده‌ای محبوب و پرکاربرد در تونل‌سازی است که علاوه بر سرعت بالا در اجرا، یک سیستم نگهداری نوین با صرفه اقتصادی بالا محسوب می‌شود (مافِت و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع، انعطاف‌پذیری شاتکریت آن را به جایگزینی کارآمد برای بتن معمولی در نگهداری سنگ، لاینینگ تونل و ترمیم بتن تبدیل کرده است و سبب شده که پاشش شاتکریت بر روی سطوح ناهموار امکان‌پذیر شود (اشلومپف و هوفلر، ۲۰۰۶). چنین نتایجی سبب شده است تا در صنایع معدنی آمریکای شمالی و استرالیا، سالانه بالغ بر ۷۰۰ هزار متر مکعب شاتکریت مورد استفاده قرار گیرد (رِسپین و بروکس، ۲۰۰۱؛ پرنارد، ۲۰۰۹).

شاتکریت از گذشته تاکنون دست‌خوش تغییرات فراوانی قرار گرفته است؛ به طوری که محققین هر ساله دستاوردهای قابل توجهی در حوزه تجهیزات، مواد افزودنی و همچنین نحوه اجرای شاتکریت ارائه می‌کنند. از جمله مهم‌ترین این دستاوردها در دهه‌های اخیر می‌توان به

شاتکریت به عنوان نوعی بتن، بیش از ۷۰ سال است که در انواع فعالیت‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. بتن با استفاده از یک شیلنگ و توسط هوای فشرده منتقل شده و با سرعت زیاد و از طریق نازل بر روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شود. شاتکریت در مقایسه با بتن معمولی از مقاومت اولیه بالاتر و زمان گیرش کمتری برخوردار است. به همین دلیل، امروزه در سراسر جهان، شاتکریت به عنوان یکی از برجسته‌ترین روش‌های ساخت و ساز به شمار می‌رود که به طور گسترده‌ای در فعالیت‌های مهندسی عمران و معدن به‌کار گرفته می‌شود. تونل‌ها، مغارها، گودبرداری‌ها، پل‌ها و سطوح شیبدار از جمله مهم‌ترین مناطق به‌کارگیری شاتکریت به شمار می‌روند (گالان و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ آرمنگاود و همکاران، ۲۰۱۸؛ تروخیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ نابری و همکاران، ۲۰۲۰). لازم به ذکر است که شاتکریت

مکانیکی و جذب انرژی شاتکریت می‌شوند و هر یک متناسب با ویژگی‌های محیط و طرح اختلاط مربوطه، تاثیر متفاوتی می‌گذارند. به این صورت که الیاف پلی‌پروپیلن در میزان فروریز، کارایی چشمگیری در مقایسه با توری فلزی و الیاف فولادی دارند؛ به گونه‌ای که قابلیت جایگزینی با آن‌ها را دارد. ساو و همکاران (۲۰۱۳) تاثیر الیاف فولادی بر مشخصات شاتکریت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به بهبود رفتار مکانیکی شاتکریت اشاره کرد؛ به طوری که شاتکریت بعد از شکست نیز از خود مقاومت نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توجه به جهت‌گیری و تعداد الیاف و همچنین میزان فشار محصور در شاتکریت، بر رفتار بعد از شکست و جذب انرژی شاتکریت اثرگذار است. جی‌یون و همکاران (۲۰۱۶) اثر افزودن الیاف پلی‌آمید در شاتکریت را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش مقاومت خمشی و چقرمگی شاتکریت است و همچنین سبب کاهش چشمگیر در میزان فروریز آن شده است. دوام بالای این نوع شاتکریت الیافی در محیط‌های اسیدی نیز از دیگر نتایج مهم این تحقیق است. یانگ و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد الیاف آمورف در شاتکریت برای کاربرد در تونل‌ها را بررسی و با الیاف فولادی مقایسه کرده‌اند. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که تسلیح شاتکریت با الیاف آمورف در مقایسه با الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت خمشی و جذب انرژی شاتکریت می‌شود، اما در مقابل سبب کاهش مقاومت فشاری، چقرمگی و مقاومت ثانویه شاتکریت می‌گردد. از نتایج دیگر به‌کارگیری الیاف آمورف در شاتکریت می‌توان به فروریز بیشتر الیاف آمورف در قیاس با الیاف فولادی و همچنین صرفه اقتصادی پایین آن اشاره کرد. در واقع نتایج حاصل حاکی از نامناسب بودن این نوع الیاف جهت به‌کارگیری در فضاهای زیرزمینی از جمله تونل‌ها است. لیانگ و همکاران (۲۰۱۹) خواص مکانیکی شاتکریت تر مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن را در معادن مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از نتایج به‌کارگیری الیاف پلی‌پروپیلن در شاتکریت تر می‌توان به کنترل ترک‌خوردگی پس از شکست، پیوستگی و نیز توزیع یکنواخت‌تر تنش اشاره نمود. به این صورت که استفاده از این الیاف در مقایسه با توری فلزی، سبب بهبود راندمان ساخت و همچنین کاهش قابل توجهی در میزان فروریز می‌گردد؛ به گونه‌ای که جهت

استفاده از توری فلزی در تقویت شاتکریت اشاره کرد. وجود رفتار شکننده و ضعف در تنش‌های کششی و خمشی از جمله مهم‌ترین معایب شاتکریت محسوب می‌شوند که بهره‌گیری از یک عامل تسلیح‌کننده با مقاومت کششی بالا می‌تواند سبب کاهش یا حذف این معایب شود. در سال‌های اخیر، هزینه بالا و همچنین وقت‌گیر بودن نصب توری‌های فلزی در محل مورد نظر سبب شده است تا مهندسان طراح به دنبال جایگزینی برای شاتکریت مسلح شده با توری فلزی باشند. به همین دلیل، جهت تسهیل در روند استفاده از شاتکریت و جایگزین کردن توری فلزی تحقیقات گسترده‌ای توسط محققان انجام پذیرفته است. یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در این زمینه، افزودن الیاف به شاتکریت بوده است. دلایل مختلفی برای استفاده از الیاف در شاتکریت وجود دارد. از دلایل اصلی به‌کارگیری الیاف در شاتکریت، بهبود خواص تغییر شکل‌پذیری، افزایش قابلیت جذب انرژی و کنترل ترک‌خوردگی است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و کارگاهی نشان می‌دهد که به‌کارگیری الیاف در شاتکریت سبب بهبود مشخصات مقاومتی و شکل‌پذیری شاتکریت می‌شود. شایان ذکر است که به علت سهولت اجرا و همچنین هزینه کمتر، شاتکریت الیافی به مرور به عنوان جایگزینی برای توری‌های فلزی مورد توجه بسیار قرار گرفته است (برنارد و توماس، ۲۰۲۰). در ادامه، ابتدا نتایج مطالعات مختلف در زمینه شاتکریت الیافی ارائه شده و سپس اثر افزودن الیاف بازافتی از تایر فرسوده بر مقاومت کششی شاتکریت ارائه شده است. امروزه در دنیا انواع مختلفی از الیاف با ویژگی‌های مختلف، جهت تسلیح شاتکریت ارائه شده است. در حال حاضر، الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، شیشه‌ای، پلی‌آمید و غیره از جمله پرکاربردترین الیاف‌ها در تسلیح شاتکریت به‌شمار می‌روند. الیاف‌های مزبور، علاوه بر تفاوت در خواص مقاومتی، در ابعاد و اشکال ظاهری منحصر به فردی ارائه شده‌اند که هر کدام تاثیر خاص خود را بر شاتکریت دارند. از این رو، شناخت و به‌کارگیری صحیح الیاف‌ها در هر شرایطی، کارایی شاتکریت را افزایش می‌دهد (اکبرزاده، ۱۳۹۸).

چنگیز و تورانی (۲۰۰۴) شاتکریت مسلح شده با توری فولادی و همچنین الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن را بررسی و مقایسه کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به‌کارگیری تمامی موارد مذکور، سبب بهبود خواص

## ۲- مواد و روش‌ها

به منظور بررسی رفتار کششی شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی، شاتکریت مورد نظر در محل پروژه تونل باغان- مریوان آماده شد. مصالح آماده شده به کمک دستگاه و به روش خشک اجرا شد. در بخش حاضر، جزئیات مصالح مورد استفاده، روش تهیه و اجرای شاتکریت، آماده‌سازی نمونه و آزمایش‌های انجام شده جهت ارزیابی مقاومت کششی آن ارائه شده است.

**سنگدانه:** سنگدانه به عنوان یکی از مهمترین مصالح شاتکریت، باربری اصلی آن را بر عهده دارد؛ به نحوی که انتقال بار از طریق سنگدانه کنترل و در سطح شاتکریت پخش می‌شود. از طرفی، در شاتکریت خشک، سنگدانه از تاثیرگذارترین مصالح در میزان فروریز شاتکریت است. به همین دلیل، عدم رعایت محدوده مجاز دانه‌بندی در شاتکریت موجب افزایش چشمگیر هزینه‌ها خواهد شد. سنگدانه مورد استفاده باید شرایط لازم جهت دستیابی به شاتکریت مستحکم، نفوذناپذیر و متراکم را داشته باشد و همچنین انتقال شاتکریت در دستگاه را دچار اختلال نکند. جهت تهیه نمونه‌های شاتکریت مورد نیاز، سنگدانه‌های موجود در کارگاه پروژه‌ی تونل باغان- مریوان مورد ارزیابی قرار گرفت. سنگدانه‌ها موجود شامل یک سنگدانه مصنوعی حاصل از سنگ‌شکن و یک سنگدانه طبیعی رودخانه‌ای است. لازم به ذکر است که هر یک از این سنگدانه‌ها دارای مزایا و معایبی هستند؛ به طوری که سنگدانه‌های حاصل از سنگ‌شکن به علت گوشه‌داری و سطوح زبر نسبت به سنگدانه‌های طبیعی گرد شده، دارای چسبندگی بهتری با سیمان می‌باشند. از طرفی حرکت سنگدانه طبیعی در لوله‌های انتقال شاتکریت در قیاس با سنگدانه‌های حاصل از سنگ‌شکن راحت‌تر و روان‌تر انجام می‌شود (لک‌پور، ۱۳۷۸). جهت انتخاب سنگدانه مناسب برای تهیه شاتکریت مورد نیاز در تحقیق حاضر، از دستورالعمل‌های EN-12620 (۲۰۰۲) و ACI-506R (۱۹۹۰) استفاده شده است. در شکل ۱ شماره الک‌های مورد استفاده به همراه نمونه‌ای از سنگدانه دانه‌بندی شده نشان داده شده است. نتایج دانه‌بندی نشان داد که ابعاد سنگدانه‌ها در محدوده ۰/۰۷۵ تا ۸ میلی‌متر بوده و بنابراین در محدوده مجاز استانداردهای مذکور است. علت انتخاب این محدوده

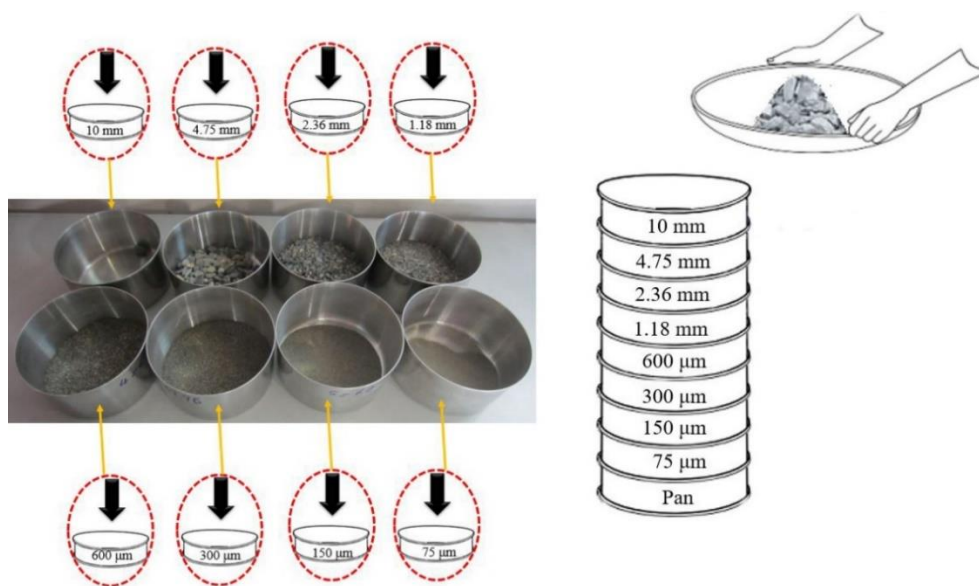
دستیابی به مقاومت مورد نیاز، استفاده از این الیاف برخلاف توری فلزی، ۴۰ الی ۵۰ درصد در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌کند.

با وجود پیشرفت‌های زیادی که در زمینه شاتکریت الیافی صورت گرفته است، به‌کارگیری الیاف‌های جدید در شاتکریت همچنان مورد توجه ویژه در فعالیت‌های مهندسی است. در پژوهش حاضر نیز الیاف حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده مورد توجه قرار گرفته است. هر ساله در سراسر دنیا بیش از یک میلیارد حلقه تایر فرسوده تولید شده که تنها ۳۳ درصد از آن‌ها به طور کامل بازیافت می‌گردد و مابقی آن با روش‌های مختلفی از جمله دفن کردن و یا سوزاندن به محیط زیست تحمیل می‌شوند. سهم ایران نیز مصرف سالانه ۷ میلیون حلقه تایر بوده که تقریباً معادل ۲۰۰ هزار تن است (صمدیان، ۱۳۸۵). در چند سال اخیر، جهت کاهش مشکلات زیست‌محیطی، بازیافت این حجم از تایرهای فرسوده ضرورت یافته است. از جمله مهمترین مشکلات بازیافت تایرهای فرسوده، تولید حجم قابل توجهی الیاف بازیافتی است که در شرایط فعلی کاربرد خاصی ندارند و نیازمند جمع‌آوری و نگهداری تحت شرایط مناسب است. در ایران این الیاف بازیافتی در حجم بالایی سوزانده و در برخی موارد نیز دفن می‌گردند که این روند خود سبب آلودگی زیست‌محیطی چشمگیری در خاک، هوا و آب می‌شود. تا به حال چندین مطالعه به منظور استفاده مجدد از این الیاف در مهندسی عمران صورت گرفته است (نرانی و همکاران، ۲۰۲۰الف، ۲۰۲۰ب؛ زارع و همکاران، ۲۰۲۰؛ عباسپور و همکاران، ۲۰۲۰الف، ۲۰۲۰ب).

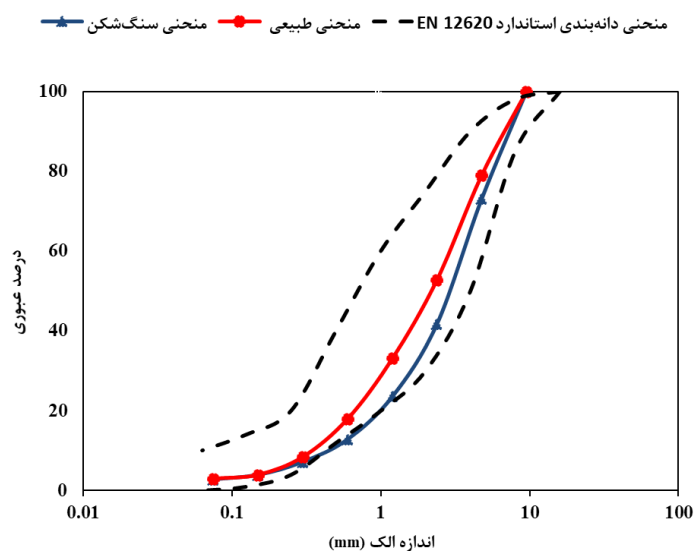
اخیراً، به منظور بررسی اثر افزودن الیاف بازیافتی بر رفتار مکانیکی شاتکریت، مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً گسترده‌ای انجام شد. نتایج این مطالعات، نشان‌دهنده قابلیت استفاده از این نوع الیاف جهت تسلیح شاتکریت بوده است (خوش، ۱۳۹۸؛ خوش و همکاران، ۱۳۹۸الف، ۱۳۹۸ب، خوش و همکاران، ۱۳۹۹الف، ۱۳۹۹ب). نقطه ضعف مطالعات مزبور، آماده‌سازی آزمایشگاهی نمونه‌های شاتکریت بوده است. در ادامه به منظور تکمیل مطالعات آزمایشگاهی، با اجرای شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی از تایر فرسوده در محل پروژه تونل باغان- مریوان، به مطالعه مشخصات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری آن پرداخته شده است.

استاندارد موسسه بتن آمریکا نشان داده شده است. مطابق با این استاندارد، منحنی دانه‌بندی سنگدانه طبیعی با دقت بیشتری در محدوده مجاز این استاندارد واقع شده است. با در نظر گرفتن منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها در هر دو استاندارد اشاره شده، در نهایت برای مطالعه حاضر سنگدانه طبیعی با چگالی ۲۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب جهت تهیه شاتکریت الیافی مورد استفاده قرار گرفت. شایان ذکر است که به منظور تعیین چگالی سنگدانه از استاندارد ASTM-C128 (۱۹۹۷) استفاده شد.

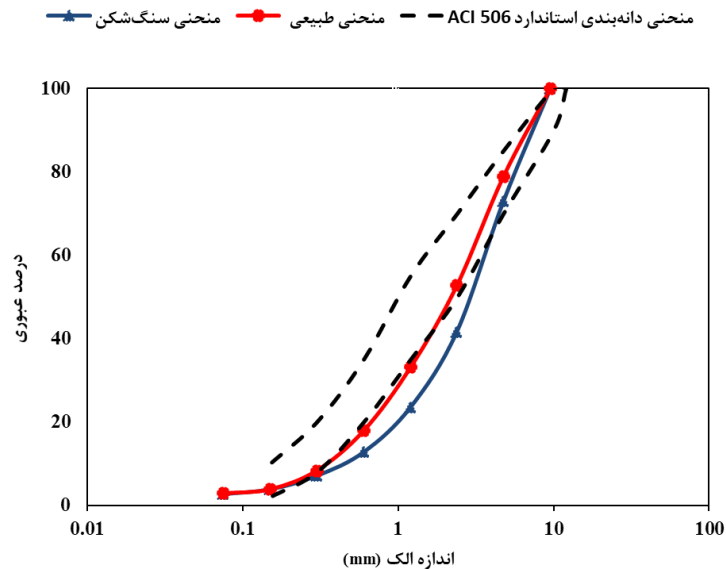
توسط استاندارد، محدودیت در تجهیزات پمپ و همچنین کاهش فروریز مصالح در حین اجرا عنوان شده است. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی هر دو نوع سنگدانه به همراه منحنی‌های استاندارد کمیسیون استانداردهای اروپایی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، هر دو سنگدانه در محدوده استاندارد قرار دارند و از لحاظ ابعادی مورد تایید هستند. در شکل ۳ نیز منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها به صورت درصد عبوری تجمعی ترسیم و به همراه منحنی‌های استاندارد ارائه شده توسط



شکل ۱. الک‌های مورد استفاده به همراه یک نمونه از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های موجود به همراه محدوده استاندارد دانه‌بندی مطابق با کمیسیون استانداردهای اروپایی



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های موجود به همراه محدوده استاندارد دانه‌بندی مطابق با موسسه بتن آمریکا

شکل ریخته شده و با فشار جک در بسته‌های به ابعاد  $100 \times 100 \times 20$  سانتی‌متری متراکم می‌شوند. این بسته‌ها به محل دفن زباله‌های شهری منتقل شده و دفن یا سوزانده می‌شوند. لازم به ذکر است که تنها در این کارخانه بازیافت تایر در کشور، روزانه بین ۸ تا ۱۰ تن از این الیاف بازیافتی حاصل می‌شود که دفن یا سوزانده می‌شود. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی الیاف بازیافتی 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.

#### ۲-۱- روش تهیه نمونه‌ها

روش آماده‌سازی نمونه‌ها، شرایط محیطی و نحوه اجرای عملیات شاتکریت مستلزم پیروی از دستورالعمل‌های مربوطه است. به این منظور، در ابتدا جهت ارزیابی شاتکریت خشک مسلح شده با الیاف بازیافتی، طرح‌های اختلاط مختلفی با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف و نیز نمونه شاهد 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 خواص مقاومتی شاتکریت مورد بررسی قرار گیرد.

برای هر مترمکعب، مقادیر اجزا طرح اختلاط مطابق با استاندارد تهیه شد. مقادیر سنگدانه، سیمان و آب به ترتیب برابر ۷۵، ۱۷ و ۸ درصد وزنی کل مصالح می‌باشند. همچنین مطابق با دستورالعمل ACI-506R (۱۹۹۰)

سیمان: سیمان پرتلند به عنوان مرسوم‌ترین نوع سیمان در تهیه شاتکریت به شمار می‌رود که با توجه به عوامل شیمیایی و شرایط محیطی مختلف از جمله وجود محیط‌های سولفاته و همچنین رطوبت، نوع سیمان پرتلند باید انتخاب شود. در تحقیق حاضر از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شد.

آب: جهت انجام عمل هیدراسیون مصالح سیمانی، لازم است که آب مورد استفاده، تمامی ویژگی‌های آب آشامیدنی را داشته باشد. در تحقیق حاضر از آب قابل شرب شهر مریوان استفاده شده است که از چاه تهیه شده و تمیز و صاف و عاری از مواد مضر برای بتن و فولاد می‌باشد. به منظور فراهم آوردن جریان یکنواخت آب در عملیات اجرای شاتکریت خشک، از تراک میکسر استفاده شد؛ به طوری که آب مورد نیاز برای تهیه همه پنل‌ها با فشار یکسان و یکنواخت به کمک پمپ تراک میکسر تامین شد.

الیاف: الیاف مورد استفاده در تحقیق حاضر، الیاف حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده در بخش بازیافت کارخانه لاستیک‌سازی یزد می‌باشد. در شکل ۴ فرآیند بازیافت تایرهای فرسوده و همچنین نحوه جداسازی ضایعات آن نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با ورود تایرهای فرسوده به کارخانه بازیافت، عملیات جداسازی اجزا مختلف لاستیک آغاز می‌شود. پس از جداسازی الیاف حاصل از بازیافت تایرهای فرسوده، به منظور بسته‌بندی آن‌ها از یک جک هیدرولیکی استفاده می‌شود. در این راستا، الیاف داخل یک گودال مستطیلی

سانتی‌متر بود. شایان ذکر است، پنل‌های به‌کار گرفته شده از جنس فلزی (چدنی) می‌باشند. به‌کارگیری پنل با جنس فلزی در قیاس با جنس چوبی از جذب آب شاتکریت در پنل جلوگیری می‌کند. در واقع، طبق دستورالعمل EFNARC (۱۹۹۹)، این امر افزایش دقت در مقایسه نتایج را محقق می‌سازد. به منظور تسهیل در خارج کردن نمونه‌ها از پنل و جلوگیری از آسیب به نمونه‌ها، قبل از پاشش شاتکریت سطوح داخلی پنل‌ها روغن‌کاری شده است. در شکل ۶ نمایی از پنل‌های مورد استفاده و نحوه روغن‌کاری آن‌ها نشان داده شده است.

نسبت آب به سیمان آن نیز برابر ۰/۴۷ است. به منظور اجرای عملیات شاتکریت خشک، در ابتدا دستگاه‌های مورد نیاز و مصالح مصرفی در محل مورد نظر آماده گردید. دستگاه‌های مورد استفاده برای اجرای عملیات شاتکریت شامل دستگاه شاتکریت خشک مدل T260، کمپرسور باد با قدرت ۱۶ بار، تراک میکسر با حجم ۶ متر مکعب و غیره بوده است (شکل ۵).

جهت اجرای نمونه‌های شاتکریت مورد نیاز، از پنل‌های دوزنقه‌ای شکل (منشور) استفاده شد؛ به طوری که هر پنل دارای دو سطح با ابعاد ۳۰×۳۰ و ۴۲×۴۲ و ارتفاع ۲۰



شکل ۴. فرآیند تولید و جداسازی ضایعات حاصل از تایرهای فرسوده

جدول ۱. مشخصات مکانیکی الیاف به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر (عباسپور، ۱۳۹۸)

مقدار		واحد	مشخصه
الیاف با بیشترین فراوانی	مجموعه الیاف		
۰/۸	۰/۰۳۵ - ۱/۵	میلی‌متر	قطر
۲۰ - ۴۰	۰ - ۷۰	میلی‌متر	طول
۶۰۰	۵۰۰ - ۲۰۰۰	MPa	مقاومت کششی
۲۲	۱۸ - ۲۵	%	ازدیاد طول در حالت گسیختگی
۲/۷	۲ - ۷/۵	GPa	مدول الاستیسیته
۴/۵	۳ - ۵	%	جمع‌شدگی در دمای ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد برای وزنه ۱۴۳ گرم در زمان ۲ دقیقه
۱۲۶۰	۱۸۹۰ - ۸۴۰	*Denier	دانسیته خطی نخ
۲۵۶	۲۵۰ - ۲۶۰	درجه سانتی‌گراد	نقطه ذوب
عالی	-	-	مقاومت در برابر اسیدها

\*جرم ۹ کیلو متر نخ بر حسب گرم





شکل ۵. نمایی از آماده‌سازی (الف) مصالح مصرفی و (ب) دستگاه‌های مورد استفاده برای اجرای شاتکریت



شکل ۶. آماده‌سازی پنل‌ها جهت تهیه نمونه‌ها

انجام شد. با افزودن  $0/5$ ،  $1$  و  $1/5$  درصد الیاف نمودار به مصالح خشک، طرح اختلاط‌های شاتکریت الیافی حاصل شده است. پس از ایجاد مخلوط همگن و افزودن آن به قیف شاتکریت، عملیات اجرای شاتکریت انجام شد. در شکل ۷ به ترتیب نمایی از عملیات پاشش شاتکریت الیافی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به منظور تهیه نمونه‌های مورد نیاز، برای هر درصد الیاف، دو پنل اجرا شد. مطابق دستورالعمل EFNARC (۱۹۹۹)، پس از اتمام عملیات اجرایی شاتکریت، باید پنل‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $25 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد بدون حرکت گذاشت. با استفاده از گونی نمودار شرایط مناسب و مرطوب برای گیرش اولیه مصالح ایجاد شد (شکل ۸).

بعد از آماده‌سازی دستگاه‌ها و پنل‌های مورد نیاز، مصالح خشک شامل سنگدانه و سیمان متناسب با وزن‌های محاسبه شده ترکیب شدند و یک مخلوط همگن از مصالح برای هر طرح اختلاط ایجاد شد. پس از آماده‌سازی مصالح، پاشش شاتکریت بر روی پنل‌های شاهد انجام شد. پاشش شاتکریت از فاصله ۱ الی  $1/5$  متری با رعایت ضوابط حرکت دورانی مطابق با دستورالعمل ACI-506R (۱۹۹۰) اجرا گردید. در مطالعه حاضر سعی شده است تا حتی الامکان تمامی شرایط آماده‌سازی و طرح اختلاط مصالح و همچنین عملیات اجرای شاتکریت برای پنل‌ها یکسان باشند. در ادامه عملیات مشابهی جهت پاشش شاتکریت با درصد الیاف  $0/5$ ،  $1$  و  $1/5$  با رعایت پاشش یکسان و منظم



(۲)



(۱)



(۴)



(۳)

شکل ۷. نمایی از مراحل آماده‌سازی و پاشش شاتکریت الیافی



شکل ۸. ایجاد شرایط مرطوب با گونی نمدار بر روی پنل‌ها پس از پاشش شاتکریت

شکل ۹ نمایی از نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و همچنین نمونه‌ها نشان داده شده است.

### ۲-۳- روش انجام آزمایش

جهت ارزیابی رفتار مکانیکی شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده در کشش، آزمایش مقاومت کششی برزیلی انجام گرفت. این آزمایش بر روی نمونه‌های تسلیح نشده و تسلیح شده با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف انجام شده است. در تحقیق حاضر، جهت بررسی مقاومت کششی شاتکریت مسلح به الیاف بازیافتی، از آزمایش برزیلی مطابق با روش‌های استاندارد پیشنهادی از جمله ASTM-C496 (۲۰۰۸) و هاندروس (۱۹۵۹)

در ادامه بعد از گذشت ۲۴ ساعت و دستیابی به گیرش اولیه، پنل‌ها از قالب خارج شدند. در ادامه پنل‌های خارج شده از قالب به منظور عمل‌آوری مناسب در وان موجود در اتاق مخصوص عمل‌آوری شدند. پس از گذشت ۲۸ روز و اتمام عمل‌آوری، پنل‌ها از آب خارج شده و آماده مغزه‌گیری شدند. پس از انجام عملیات مغزه‌گیری، نمونه‌های هر پنل به صورت مجزا بسته‌بندی شده و به آزمایشگاه مکانیک سنگ ارسال شدند. جهت رعایت اصول مطالعات آزمایشگاهی، آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با روش پیشنهادی ISRM (۲۰۰۷) انجام پذیرفت. شایان ذکر است که برای هر طرح اختلاط، چهار نمونه در آزمایش برزیلی و دو نمونه برای مشخصات فیزیکی استفاده شده است. در



نمایی از نحوه انجام آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های شاکریت الیافی نشان داده شده است. علاوه بر مقاومت کششی، مطابق استاندارد پیشنهاد شده توسط ASTM-C642 (۲۰۱۳)، خواص فیزیکی نمونه‌های شاکریت تهیه شده، تعیین شد.

استفاده شده است. براساس پیشنهادات موجود، بارگذاری بر نمونه‌ها باید به صورت پیوسته و با آهنگ یکنواخت انجام شود؛ به طوری که مدت زمان لازم برای انجام هر آزمایش برزیلی بایستی بین ۱۵ الی ۳۰ ثانیه باشد. جهت حصول شرایط فوق‌الذکر، آزمایش برزیلی به صورت کرنش کنترل و با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. در شکل ۱۰



شکل ۹. عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها



شکل ۱۰. نحوه انجام آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های شاکریت الیافی

۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف به همراه نمونه تسلیح نشده است. در ادامه نتایج این آزمایش‌ها ارائه شده است. به کمک دستگاه نشان داده شده در شکل ۱۰، برای هر نمونه مقدار نیرو و جابجایی به صورت خودکار ثبت شده است. در تحقیق حاضر، مطابق استانداردها و روش‌های

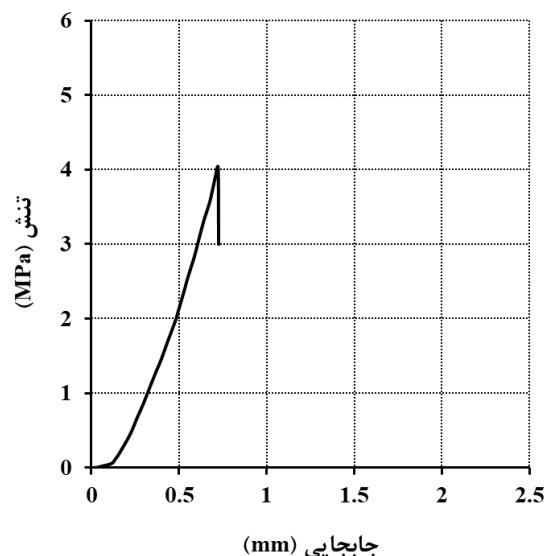
### ۳- ارائه نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های برزیلی به همراه خواص فیزیکی بر روی نمونه‌های شاکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی ارائه شده است. نتایج شامل آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های تهیه شده از شاکریت الیافی با

گرفته شده است. مطابق روابط مذکور، مقاومت کششی برزیلی در واقع همان تنش مماسی ثبت شده در لحظه شکست است. نمودار تنش در مقابل جابجایی برای شاتکریت بدون الیاف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مقاومت کششی نمونه حدود ۴/۰۳ مگاپاسکال است. مطابق این شکل، با رسیدن تنش به مقاومت حداکثر نمونه، با یک شکست ناگهانی به صورت قائم (قطری) از مرکز نمونه، مقاومت آن به سرعت کاهش یافته و نمونه با نشان دادن یک رفتار کاملاً شکننده دچار شکست شده است. جابجایی ثبت شده در لحظه شکست برابر ۰/۷۲ میلی‌متر است. علت وقوع شکست ناگهانی و رفتار ترد شاتکریت، ضعف در تنش کششی مواد سیمانی است که سبب می‌شود ظرفیت جذب انرژی شاتکریت بسیار کم باشد. لازم به ذکر است که در موضوع نگهداری فضاهای زیرزمینی، رفتار شکننده شاتکریت به عنوان یک نقطه ضعف مهم مطرح است.

پیشنهادی بیان شده برای آزمایش مقاومت کششی برزیلی، از رابطه هاندور جهت محاسبه مقاومت کششی شاتکریت الیافی استفاده شده است. در واقع، راه‌حل کامل تنش در امتداد قطر برای حالتی که در راستای یک قوس محدود وارد می‌شود، توسط هاندور به دست آمده است (هاندروس، ۱۹۵۹). مطابق این روش، از روابط (۱) و (۲) به منظور تعیین تنش مماسی و شعاعی در امتداد محور بارگذاری استفاده شده است. در این روابط  $P$  بار در لحظه شکست بر حسب نیوتن،  $R$  شعاع نمونه بر حسب میلی‌متر،  $t$  ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر،  $r$  فاصله از مرکز نمونه بر حسب میلی‌متر و  $2\alpha$  زاویه بار اعمالی به نمونه است. مطابق تئوری و براساس معیار گریفیث، نقطه شروع ترک مرکز نمونه خواهد بود؛ به نحوی که در مرکز نمونه، شرایط لازم برای گسیختگی کششی در تنش برابر با مقاومت نمونه فراهم می‌شود. در ادامه تنش‌های اصلی در این نقطه مطابق روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که در تمامی روابط ارائه شده، تنش کششی مثبت در نظر

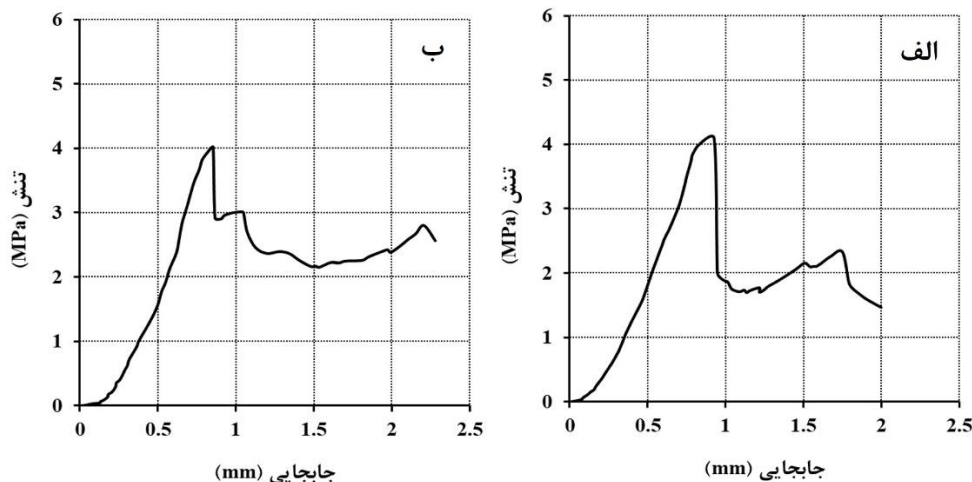
$\sigma_{\theta} = + \frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{[1 - (r/R)^2] \sin 2\alpha}{1 - 2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} - \tan^{-1} \left[ \frac{1 + (r/R)^2}{1 - (r/R)^2} \tan \alpha \right] \right\}$	رابطه ۱
$\sigma_r = - \frac{P}{\pi R t \alpha} \left\{ \frac{[1 - (r/R)^2] \sin 2\alpha}{1 - 2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} + \tan^{-1} \left[ \frac{1 + (r/R)^2}{1 - (r/R)^2} \tan \alpha \right] \right\}$	رابطه ۲
$\sigma_{\theta} = + \frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right\} \approx + \frac{P}{\pi R t}$	رابطه ۳
$\sigma_r = - \frac{P}{\pi R t} \left\{ \frac{\sin 2\alpha}{\alpha} + 1 \right\} \approx - \frac{3P}{\pi R t}$	رابطه ۴



شکل ۱۱. نمودار تنش-جابجایی برای شاتکریت بدون الیاف

است؛ به طوری که با ادامه بارگذاری و رسیدن جابجایی به مقدار  $1/75$  میلی‌متر، مقاومت ثانویه آن به مقدار  $2/33$  مگاپاسکال رسیده است. در مطالعات حسینی و همکاران (۱۳۹۹) در زمینه به‌کارگیری الیاف در مصالح سیمانی، نتایج مشابهی در زمینه بهبود مقاومت کششی آن گزارش شده است. نمودار مربوط به نمونه حاوی ۱ درصد الیاف در شکل ب ارائه شده است. مطابق با این شکل با افزایش جابجایی نمونه تا  $0/86$  میلی‌متر تنش به مقدار  $4/01$  مگاپاسکال رسیده است. بعد از ایجاد ترک در نمونه، مقاومت آن به مقدار  $2/91$  مگاپاسکال کاهش یافته است. این امر حاکی از اثر مثبت و موثر الیاف در رفتار مکانیکی شاتکریت است. در واقع، بعد از رخداد ترک اولیه در نمونه، الیاف باز یافتی موجود در بافت شاتکریت وارد عمل شده و مانع گسترش ترک و گسیختگی کامل نمونه شده است. در نهایت با ادامه بارگذاری و افزایش جابجایی نمونه تا حدود  $2/22$  میلی‌متر، ترک گسترش و مقاومت نمونه کاهش یافته است.

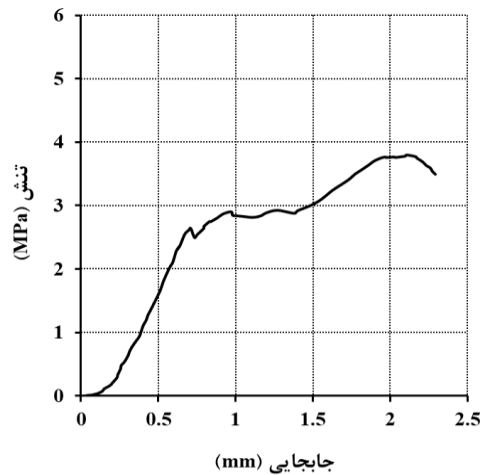
نمودار تنش-جابجایی برای شاتکریت با  $0/5$  درصد الیاف در شکل الف نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزودن  $0/5$  درصد الیاف باز یافتی به شاتکریت، مقاومت کششی آن از  $4/03$  مگاپاسکال به  $4/1$  مگاپاسکال افزایش یافته است. با رسیدن تنش به این مقاومت، نمونه دچار ترک شده و ظرفیت باربری آن کاهش یافته است. مقدار جابجایی این نمونه در مقاومت حداکثر، برابر  $0/93$  میلی‌متر است که نسبت به نمونه بدون الیاف مقداری افزایش یافته است. لازم به ذکر است که پس از رسیدن نمونه به مقاومت حداکثر و رخداد ترک در آن، مقاومت نمونه افت کرده اما بر خلاف نمونه بدون الیاف، ظرفیت باربری این نمونه به طور کامل از دست نرفته است؛ به نحوی که نمونه مقاومت ثانویه حدود  $2$  مگاپاسکال نشان می‌دهد. این رفتار نشان‌دهنده تاثیر مثبت افزودن الیاف بر روی خواص مکانیکی شاتکریت است. در واقع، وجود این الیاف در بافت شاتکریت، علاوه بر افزایش مقاومت کششی شاتکریت، سبب حذف رفتار شکننده بعد از شکست شده



شکل ۱۲. الف) نمودار تنش-جابجایی برای شاتکریت با  $0/5$  درصد الیاف و شکل ب) نمودار تنش-جابجایی برای شاتکریت با  $1$  درصد الیاف

را تحمل کند و رفتاری کاملاً سخت‌شونده نشان داده است؛ به نحوی که این نمونه توانسته است در جابجایی حدود  $2/1$  میلی‌متری بیش از  $3/8$  مگاپاسکال تنش را تحمل کند. با توجه به نتایج حاصل، افزایش مقدار الیاف در شاتکریت به بیش از ۱ درصد، باعث کاهش مقاومت کششی و افزایش چقرمگی آن شده است. به عبارت دیگر،  $1/5$  درصد الیاف در شاتکریت ضمن کاهش مقاومت کششی، سبب شده است که خاصیت انعطاف‌پذیری و در نهایت قابلیت جذب انرژی نمونه‌های شاتکریت به مقدار قابل توجهی افزایش یابد.

نمودار تنش-جابجایی مربوط به نمونه شاتکریت حاوی  $1/5$  درصد الیاف در شکل نشان داده شده است. مطابق این شکل، در جابجایی حدود  $0/71$  میلی‌متر، تنش به حدود  $2/64$  مگاپاسکال افزایش یافته است، در این لحظه نمونه دچار ریزترک اولیه شده است. با ایجاد ترک مذکور، مقاومت نمونه اندکی افت کرده اما به دلیل وجود مقدار قابل توجهی الیاف باز یافتی در بافت شاتکریت، ترک نتوانسته است در سراسر نمونه گسترش بیابد. در حقیقت، نمونه همچنان ساختار و یکپارچگی خود را حفظ کرده است و در ادامه بارگذاری نیز توانسته است بارهای بیشتری



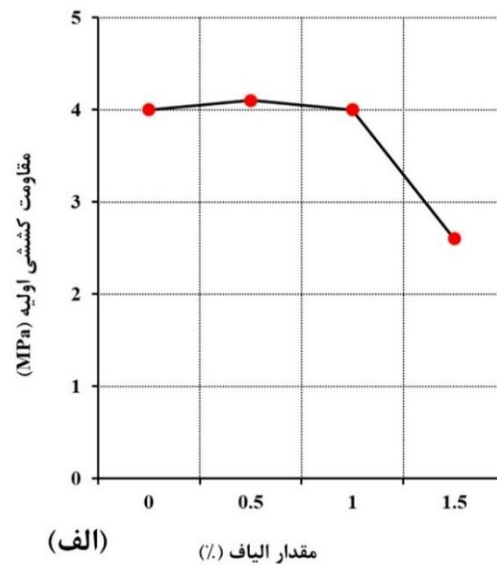
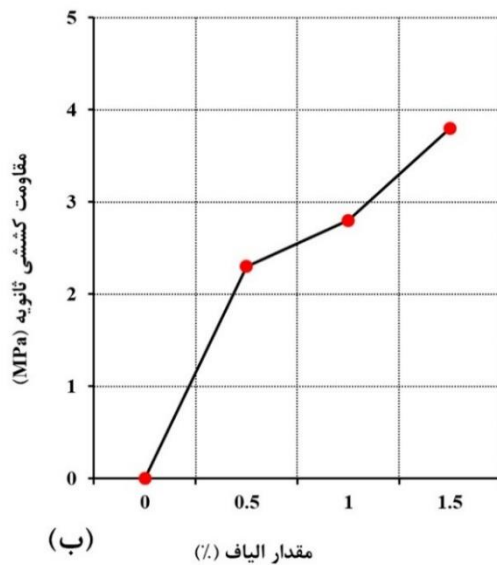
شکل ۱۳. نمودار تنش-جابجایی برای شاتکریت با ۱/۵ درصد الیاف

مقدار مقاومت کششی ثانویه در مقابل درصد الیاف مورد استفاده در نمونه‌ها نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای نمونه بدون الیاف فقط مقاومت کششی اولیه وجود دارد و بعد از رخداد اولین ترک، نمونه مقاومت خود را به صورت ناگهانی و به طور کامل از دست داده و مقاومت ثانویه ندارد. نکته حائز اهمیت در این نمودار، مقاومت کششی ثانویه مربوط به نمونه‌های مسلح شده با الیاف بازیافتی است. بعد از ایجاد ترک مقاومت نمونه کاهش یافته اما در ادامه با افزایش جابجایی، الیاف‌ها وارد عمل شده و سبب ایجاد مقاومت ثانویه در شاتکریت شده‌اند. به طوری که با افزودن ۰/۵ درصد الیاف، نمونه توانسته است بیش از ۲ مگاپاسکال مقاومت از خود نشان دهد. همان‌طور که در شکل مذکور نشان داده شده است، با افزایش درصد الیاف مقاومت ثانویه نمونه‌ها تا حدود ۴ مگاپاسکال نیز رسیده است. در شکل الف نمودار مقدار جابجایی نمونه‌ها در لحظه شروع ترک خوردگی (مقاومت کششی اولیه) و وارد عمل شدن الیاف‌ها (مقاومت کششی ثانویه) نشان داده شده است. مطابق با این شکل، با افزودن الیاف در شاتکریت و افزایش درصد آن تا ۱/۵ درصد، مقدار جابجایی نمونه‌ها در لحظه شروع ترک خوردگی تغییرات قابل توجهی نشان نمی‌دهد؛ اما جابجایی نمونه در مقاومت ثانویه، با افزایش درصد الیاف روندی صعودی دارد. به عبارت دیگر، افزایش درصد الیاف بازیافتی در شاتکریت، ضمن افزایش مقدار مقاومت ثانویه شاتکریت، سبب افزایش تغییر شکل‌پذیری نمونه بعد از شروع ترک خوردگی می‌شود. افزایش تغییر شکل‌پذیری می‌تواند سبب افزایش ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها شود. در شکل ۱۵. الف) نمودار مقدار تغییر شکل

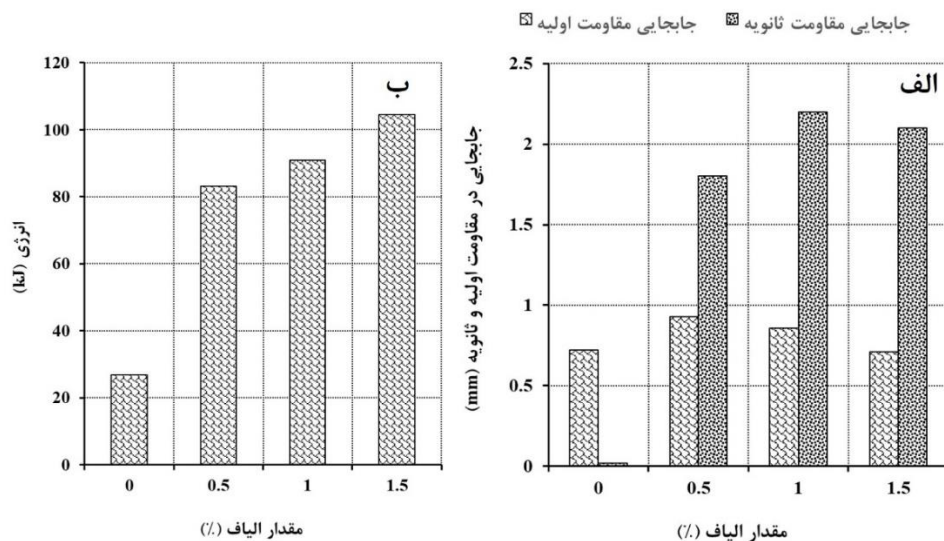
همان‌طور که در نمودارهای فوق مشاهده شد، با افزایش درصد الیاف در شاتکریت، علاوه بر یک مقاومت کششی اولیه یک مقاومت ثانویه نیز نشان می‌دهند که در ادامه به بررسی هر یک از این مقاومت‌ها پرداخته شده است. مقاومت کششی اولیه نمونه‌ها، بیان‌کننده مرحله شروع ترک خوردگی است که در لحظه ایجاد نخستین ترک در نمونه حاصل می‌شود و تا مرحله شروع ترک خوردگی، الیاف‌ها چندان تحت نیرو و کشش قرار نمی‌گیرند؛ اما مقاومت کششی ثانویه نمونه‌ها، مربوط به مرحله وارد عمل شدن الیاف و تحت کشش قرار گرفتن آن‌ها است. به طوری که در نهایت با پاره شدن یا بیرون کشیده شدن الیاف و گسترش سراسری ترک، نمونه مقاومت خود را به طور کامل از دست می‌دهد. در شکل ۱۲-الف) مقاومت کششی اولیه برای نمونه‌های شاتکریت الیافی به همراه نمونه‌های بدون الیاف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزودن الیاف به نمونه‌ها تا ۱ درصد، مقاومت کششی در لحظه ترک خوردن تغییرات چندانی نداشته است. این امر به اختلاف رفتار مکانیکی شاتکریت (به عنوان یک ماده شکننده) و الیاف بازیافتی مربوط می‌باشد. الیاف برای ورود به فرآیند مقاومت نیازمند مقداری تغییر شکل است. بنابراین تا لحظه ترک خوردن شاتکریت وارد عمل نشده و تاثیر ملموسی در مقاومت آن ندارد. در ادامه و با افزایش درصد الیاف تا ۱/۵ درصد، مقاومت کششی اولیه شاتکریت کاهش یافته است. کاهش مقاومت ناشی از حضور درصد قابل توجهی از الیاف انعطاف‌پذیر در بافت شاتکریت می‌باشد که سبب سهولت فرآیند ترک خوردن اولیه نمونه می‌شود. در شکل ۱۲-ب)

شایان ذکر است که در بررسی اثر الیاف‌های فولادی، فورتا و همچنین پلی‌آمید در شاتکریت توسط گولر و همکاران (۲۰۲۱)، نتایج مشابهی در مورد افزایش ظرفیت جذب انرژی و همچنین مقاومت کششی شاتکریت مسلح شده با الیاف گزارش شده است. مطالعات دیگری نیز جهت ارزیابی عملکرد رفتار مکانیکی مواد سیمانی، خصوصاً در زمینه مقاومت کششی بتن و شاتکریت انجام شده است که نتایج مشابهی اعم از افزایش و بهبود عملکرد کششی این مواد سیمانی عنوان شده است (کوی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بابایی و همکاران، ۲۰۱۹).

نمونه در لحظه شروع ترک و نیز در مقاومت ثانویه در درصد‌های مختلف الیاف و ب، مساحت زیر نمودار تنش- کرنش به عنوان معیاری از ظرفیت جذب انرژی توسط نمونه‌ها برای درصد‌های مختلف الیاف بازیافتی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش درصد الیاف در نمونه‌ها، ظرفیت جذب انرژی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش قابلیت جذب انرژی در نمونه‌ها، اثر مثبت وجود الیاف در بافت شاتکریت را نشان می‌دهد. این خصلت می‌تواند پتانسیل استفاده از این نوع شاتکریت در فضاهای زیرزمینی را افزایش دهد.



شکل ۱۲. الف) نمودار تغییرات مقاومت کششی اولیه (لحظه ترک خوردن) و ب) مقاومت کششی ثانویه (ناشی از وجود الیاف) با افزایش درصد الیاف بازیافتی

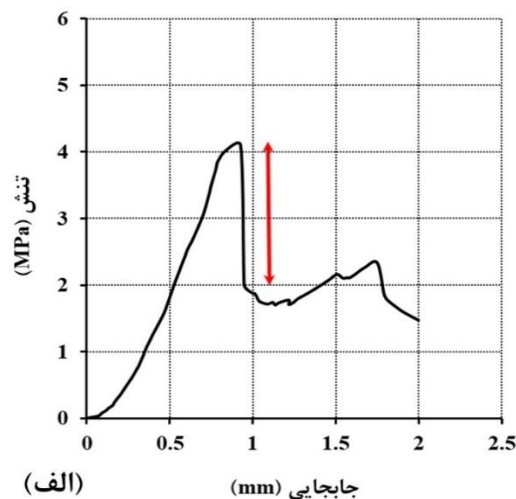
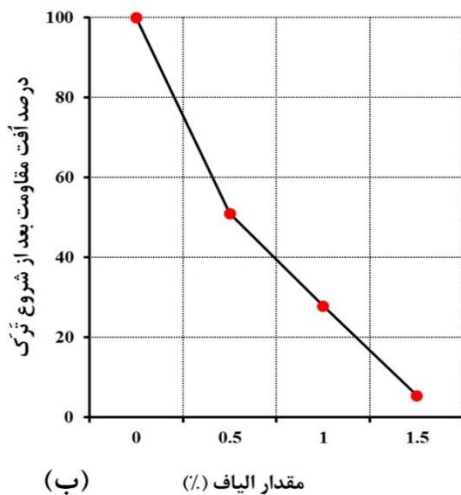


شکل ۱۵. الف) نمودار مقدار تغییر شکل نمونه در لحظه شروع ترک و نیز در مقاومت ثانویه در درصد‌های مختلف الیاف و ب) تغییرات ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌ها در مقابل درصد الیاف



نشان داده شده است. مطابق این شکل، رفتار نمونه‌ها از حالت نرم‌شوندگی کرنش به رفتار سخت‌شوندگی کرنش تبدیل شده است. در جدول ۲، خلاصه نتایج آزمایش برزیلی به همراه خواص فیزیکی نمونه‌های شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی به همراه نمونه‌های بدون الیاف شامل چگالی، تخلخل و جذب آب ارائه شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، با افزایش درصد الیاف، مقادیر چگالی کاهش یافته است. کاهش چگالی به علت کمتر بودن چگالی الیاف مورد استفاده نسبت به سایر مواد جامد شاتکریت است. کاهش چگالی نهایی شاتکریت اثر مثبتی در عملکرد آن به عنوان یک سیستم نگهداری به خصوص در دیواره و سقف فضاهای زیرزمینی خواهد داشت. از طرفی دیگر، افزایش درصد این الیاف در مقادیر بالای شاتکریت سبب افزایش درصد تخلخل و جذب آب نمونه‌ها می‌شود.

اثر مهم دیگری که در نتایج آزمایش‌ها مشاهده شد، میزان آفت سریع مقاومت نمونه‌ها بعد از شروع ترک‌خوردگی است (شکل الف). همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شد، نمونه بدون الیاف بعد از شروع اولین ترک، به طور کامل مقاومت خود را از دست می‌دهد. با افزودن الیاف به شاتکریت، رفتار نمونه عوض شده است؛ به طوری که با افزودن ۰/۵ درصد الیاف به شاتکریت، مقاومت آن در حدود ۵۱ درصد آفت داشته است. همچنین با افزایش الیاف تا ۱ درصد، آفت مقاومت در نمونه حدود ۲۷ درصد بوده است. به عبارتی دیگر به سرعت مقدار آفت مقاومت نمونه بعد از شروع ترک، کاهش یافته است. در نمونه با ۱/۵ درصد الیاف نیز، مقاومت با شروع ترک فقط ۵ درصد آفت داشته است؛ به طوری که مقاومت نمونه با درگیر شدن الیاف‌ها مجدد افزایش یافته است. تغییرات درصد آفت مقاومت نمونه بعد از شروع ترک‌خوردگی در مقابل درصد الیاف در شکل ب



شکل ۱۶. الف) نمای از میزان درصد آفت مقاومت نمونه شاتکریت با ۰/۵ درصد الیاف و ب) درصد آفت مقاومت بعد از شروع ترک در نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف.

جدول ۲. تمامی نتایج مربوط به خواص فیزیکی و مقاومت کششی نمونه‌های شاتکریت

مشخصه	واحد	مقدار الیاف (%)			
		۰	۰/۵	۱	۱/۵
چگالی خشک	kg/m <sup>3</sup>	۲۲۰۳	۲۱۴۹	۲۰۹۴	۱۹۹۹
چگالی اشباع	kg/m <sup>3</sup>	۲۳۵۲	۲۳۰۳	۲۲۶۰	۲۱۹۳
تخلخل	%	۱۴/۹	۱۵/۴	۱۶/۶	۱۹/۴
جذب آب	%	۶/۸	۷/۲	۷/۹	۹/۷
مقاومت کششی اولیه	MPa	۴/۱	۳/۷	۴/۱	۲/۷
مقاومت کششی ثانویه	MPa	۰/۰	۲/۵	۳/۱	۳/۶
جابجایی در مقاومت کششی اولیه	mm	۰/۷۲	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۷۱
جابجایی در مقاومت کششی ثانویه	mm	۰/۰	۱/۸	۲/۲	۲/۱
جذب انرژی	kJ	۲۷	۸۳	۹۱	۱۰۵
آفت مقاومت	%	۱۰۰	۵۴	۲۶	۵

## ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده در شاتکریت خشک به صورت برجا مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور، آزمایش مقاومت کششی برزبلی بر روی نمونه‌های تهیه شده با درصد‌های مختلف الیاف بازیافتی انجام شده است. نتایج نشان داد که مسلح نمودن شاتکریت با الیاف بازیافتی، اثر چشمگیری بر رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری آن دارد؛ به نحوی که نمونه‌های بدون الیاف، دارای رفتار کاملاً شکننده هستند و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بسیار اندکی دارند؛ اما استفاده از الیاف بازیافتی در تسلیح شاتکریت، سبب افزایش تغییر شکل‌پذیری و همچنین جذب انرژی بالا در نمونه‌های با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف شده است. به طوری که در شاتکریت معمولی بعد از ترک خوردن، نمونه به طور کامل مقاومت خود را از دست می‌دهد. با افزودن الیاف بعد از ترک خوردن، نمونه همچنان قادر به تحمل بار بوده و با جلوگیری از گسترش سریع ترک، سبب ایجاد مقاومت ثانویه قابل توجهی در نمونه‌ها می‌شود. از این رو، شاتکریت مسلح به الیاف بازیافتی در برابر گسترش ترک مقاوم است و در نتیجه قابلیت جذب انرژی و انعطاف‌پذیری قابل توجهی دارد. علی‌رغم اثرات مثبت ناشی از افزودن الیاف مذکور بر رفتار شاتکریت، وجود درصد بالای الیاف در بافت شاتکریت (۱/۵ درصد) سبب افت مقاومت اولیه (شروع ترک خوردن) نمونه می‌شود. با در نظر گرفتن این موضوع به همراه اثرات مثبت الیاف بازیافتی، بهترین درصد ترکیب الیاف بازیافتی با شاتکریت بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی ۱ درصد پیشنهاد می‌شود. شایان ذکر است که این مطالعات نیازمند انجام مطالعات تکمیلی جهت تعیین درصد الیاف بهینه نهایی است.

## ۵- تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر با حمایت‌های ارزشمند مجموعه مهندسی شرکت ساختمانی پاوان و همچنین مجموعه مهندسی شرکت مهندسی مشاور راه‌یاب ملل در پروژه تونل باغان-میریوان انجام شده است. بدین وسیله از حمایت‌های بی‌دریغ تمامی دست‌اندرکاران این دو مجموعه مهندسی خالصانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

- اکبرزاده، ن (۱۳۹۸) بتن‌های الیافی ۱، انجمن سیمان پرتلند. حسینی، م.، لطیفی، ش.، حاتمی، م (۱۳۹۹) اثر چرخه‌های حرارتی روی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن الیافی و مقایسه آن با بتن بدون الیاف. مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، ص ۸۵-۹۹.
- خوش، ب (۱۳۹۸) مطالعه آزمایشگاهی رفتار مکانیکی شاتکریت مسلح با الیاف بازیافتی از تایر فرسوده. پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی اراک.
- خوش، ب.، عطاپور، ه.، عباسپور، م (۱۳۹۸الف) مطالعه آزمایشگاهی مقاومت کششی شاتکریت مسلح شده با الیاف بازیافتی از تایر فرسوده. چهارمین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران.
- خوش، ب.، عطاپور، ه.، عباسپور، م (۱۳۹۸ب) مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن مسلح شده با الیاف بازیافتی از تایر فرسوده. بیست و دومین کنفرانس ملی سالیانه بتن و زلزله مرکز تحقیقات بتن (متب).
- خوش، ب.، عطاپور، ه.، عباسپور، م (۱۳۹۹الف) بررسی اثر افزودن الیاف بازیافتی از تایر فرسوده بر رفتار خمشی شاتکریت. هفتمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- خوش، ب.، عطاپور، ه.، عباسپور، م (۱۳۹۹ب) اثر الیاف بازیافتی از تایر فرسوده بر مشخصات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری شاتکریت. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، شماره ۴، دوره ۱۳، ص ۷۵-۹۳.
- 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 برجهنگی خاک‌های دانه‌ای، پایان‌نامه دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- لک‌پور، م (۱۳۷۸) بتن‌پاشیده، وزارت نیرو - کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.
- Abbaspour, M., Aflaki, E., and Moghadas Nejad, F (2019) Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement, *Journal of Cleaner Production*, 207: 1059-1071.
- Abbaspour, M., Narani, S. S., Aflaki, E., and Nejad, F. M (2020a) Behavior of a Subgrade Soil Reinforced by Waste Tire Textile Fibers under Static and Cyclic Loading, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32: 04020208.
- Abbaspour, M., Narani, S. S., Aflaki, E., Moghadas Nejad, F., and Mir Mohammad Hosseini, S. M (2020b) Strength and swelling properties of a waste tire textile fiber-reinforced expansive soil *Geosynthetics International*, 27: 476-489.

- Jeon, J. K., Kim, W., Kim, G. Y., and Jeon, C. K (2016) Polyamide fiber reinforced shotcrete for tunnel application. *Journal of Materials*, 9: 163.
- Liang, Y., Cheng, Y., Fu, H., Li, X., Li, B., and Chen, Y (2019) Research into the mechanical properties of wet-sprayed polypropylene fibre-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1–15.
- Moffat, R., Jadue, C., Beltran, J.F., and Herrera, R. (2017) Experimental evaluation of geosynthetics as reinforcement for shotcrete. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, 45: 161–168.
- Narani, S. S., Abbaspour, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., Aflaki, E., and Moghadas Nejad, F (2020a) Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. *Journal of Cleaner Production*, 247: 119151.
- Narani, S. S., Abbaspour, M., Mir Mohammad Hosseini, S. M., and Moghadas Nejad, F. (2020b) Long-term dynamic behavior of a sandy subgrade reinforced by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs), *Journal of Transportation Geotechnics*, 24: 100375.
- Nobre, J., Bravo, M., de Brito, J., and Duarte, G (2020) Durability performance of dry-mix shotcrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 29: 101135.
- Saw, H., Villaescusa, E., Windsor, C. R., and Thompson, A. G (2013) Laboratory testing of steel fibre reinforced shotcrete. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57: 167–171.
- Schlumpf, J., and Höfler, J (2006) Shotcrete in Tunnel construction, Reinhardt+ Reichenacker GmbH, Riederich, 10–43.
- Trujillo, P. B., Jolin, M., Massicotte, B., and Bissonnette, B (2018) Bond strength of reinforcing bars encased with shotcrete. *Journal of Construction and Building Materials*, 169: 678–688.
- Wang, J., Niu, D., and He, H (2019) Frost durability and stress-strain relationship of lining shotcrete in cold environment. *Journal of Construction and Building Materials*, 198: 58–69.
- Yang, J. M., Kim, J. K., and Yoo, D. Y (2017) Performance of shotcrete containing amorphous fibers for tunnel applications. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, 64: 85–94.
- Zare, P., Sheikhi Narani, S., Abbaspour, M., Fahimifar, A., Mir Mohammad Hosseini, S. M., and Zare, P (2020) Experimental investigation of non-stabilized and cement-stabilized rammed earth reinforcement by Waste Tire Textile Fibers (WTTFs). *Journal of Construction and Building Materials*, 260: 120432.
- ACI-506 (1990) ACI 506R-90 - Guide to Shotcrete, American Concrete Institute.
- Armengaud, J., Cyr, M., Casaux-Ginestet, G., and Husson, B (2018) Durability of dry-mix shotcrete using supplementary cementitious materials. *Journal of Construction and Building Materials*, 190: 1–12.
- ASTM-C128 (1997) Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, Annu. B. ASTM Standard.
- ASTM-C469 (2011) Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM Standard.
- ASTM-C642 (2013) Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM Standard.
- Babaie, R., Abolfazli, M., & Fahimifar, A (2019) Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 28: 119-134.
- Bernard, E. S (2009) Fiber-reinforced shotcrete in the Australian underground mining industry, in *Shotcrete*. Springer, 8–13.
- Bernard, E. S., and Thomas, A. H (2020) Fibre reinforced sprayed concrete for ground support, *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, 99: 103302.
- Cengiz, O., and Turanli, L (2004) Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Journal of Cement and Concrete Research*, 34: 1357–1364.
- Cui, S., Liu, P., Cui, E., Su, J., & Huang, B. (2018) Experimental study on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high geothermal tunnels. *Journal of Construction and Building Materials*, 173: 124-135.
- EFNARC (1999) Guidelines for European Specification for Sprayed Concrete.
- EN-12620 (2002) Aggregates for concrete, British Standard Institute.
- Galan, I., Baldermann, A., Kusterle, W., Dietzel, M., and Mittermayr, F (2019) Durability of shotcrete for underground support—Review and update. *Journal of Construction and Building Materials*, 202: 465–493.
- Guler, S., Öker, B., & Akbulut, Z. F (2021) Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete. *Journal of Structures*, 31: 781-791.
- 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 journal of applied science*, 10: 243–268.
- ISRM (2007) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15: 99–103.

## Evaluation of the tensile strength of waste tire textile fibers reinforced shotcrete (case study of Baghan-Marivan tunnel, Kurdistan Province)

B. Khosh<sup>1</sup> and H. Atapour<sup>\*2</sup>

1- M. Sc., student. Dept., of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assist. Prof., Dept., of Geomechanics Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

\*h.atapour@arakut.ac.ir

Received: 2022.4.30 Accepted: 2022.8.6

### Abstract

Today, shotcrete as a support system is widely applied in various surface and underground structures. Hence, in recent years, numerous studies have been conducted to improve the quality of shotcrete including the strength and ductility. Investigating the impact of adding different fibers to shotcrete is one of the most important research done in the field of shotcrete development. In the present research, the effect of using waste tire textile fibers on the tensile strength of shotcrete has been investigated by field implementation. For this purpose, the operation of shotcreting containing 0.5, 1, and 1.5% of waste tire textile fibers along with fiber-free panels was performed at the Baghan-Marivan tunnel project site. After preparing the required samples, the Brazilian tensile strength test was performed. The results demonstrated that waste tire textile fiber causes a significant increase in the energy absorption capacity of shotcrete and eliminate its brittle behavior. Other advantages of waste tire textile fibers include reduction of rebound, easy pumping, low weight, as well as high durability of fibers in acidic and wet environments. Furthermore, since this fiber is recycled, its utilizing in shotcrete industry, in addition to reducing the environmental problems, will lead to a significant reduction in the cost of the project.

**Keywords:** Fiber reinforced shotcrete, Tensile strength, Waste tire textile fibers, Ductility, Energy absorption.