



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Evaluation of the use of Micro Recycled Steel Fibers in Shotcrete used to Stabilize Surface and Underground Excavations

Mohammadhossein Ahmadian Khameneh¹, Hassan Afshin^{2*}, Mehrdad Emami Tabrizi³, Yasser Alilou⁴, Gholamreza Qudsi Sharif⁵

1- Master Student of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2*- Associate Professor of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor of geotechnic Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

4- Head of Civil Engineering and Architecture Working Group, Scientific, Research and Technology Organization of Alborz Province Technology, Karaj, Iran

5- Instructor of the Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 21 March 2024; Revised: 25 April 2024; Accepted: 13 May 2024; Published: 21 May 2024

Abstract

Shotcrete is extensively used as a concrete reinforcement in underground spaces, for Retrofitting, slope stability, and construction of shell structures. In this research, the performance of recycled micro steel fibers on the compressive and flexural behavior of shotcrete was investigated in two strength categories: normal and high performance. Based on the results, in normal shotcrete, due to the relatively low cement content and lower adhesion, the use of fibers resulted in a 15% decrease in compressive strength. However, due to the higher air pressure in normal dry shotcrete, better performance was achieved with the use of fibers. The use of admixtures in high-performance shotcrete mix designs, in addition to improving rheological properties, increased the average compressive strength by 50%. With the use of fibers, ductile behavior was observed in the plastic deformation range and the load-bearing capacity was continued by the fibers. A constant volume percentage of steel fibers (1%) indicated that the observed differences in energy absorption of the investigated mix designs are related to the concrete matrix. With the use of steel fibers, the minimum required energy absorption at a central displacement of 5 mm in circular panel specimens was met, resulting in an average increase of 58% and 19% in energy absorption in the wet and dry methods, respectively. However, the minimum required energy absorption at a central displacement of 40 mm was not met.

Keywords: Shotcrete, tunnel, absorbing energy, Micro fibers, accelerator, dry spray, wet spray, Toughness

Cite this article as: Ahmadian khameneh, M., Afshin, H., Emami Tabrizi, M., Alilou, Y. and Qudsi Sharif, G. (2024). Evaluation of the use of micro recycled steel fibers in shotcrete used to stabilize surface and underground excavations. Civil and Project, 6(3), 51-75. doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.453407.1273>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی کاربرد الیاف فولادی بازیافتی میکرو در شاتکریت مورد استفاده جهت پایدار سازی حفاری‌های سطحی و زیر زمینی

محمد حسین احمدیان خامنه^۱، حسن افشین^{*۲}، مهرداد امامی تبریزی^۳، یاسر علیلو^۴، غلامرضا قدسی شریف^۵

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
- *۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
- ۴- مسئول کارگروه مهندسی عمران و معماری، سازمان علمی، پژوهشی و فناوری استان البرز
- ۵- مربی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۰۲ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۶ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ خرداد ۱۴۰۳

چکیده

شاتکریت به عنوان یک تقویت‌کننده بتنی در فضاهای زیرزمینی، مقاوم سازی، حفاظت شیب و ساخت سازه‌های پوسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق عملکرد الیاف فولادی بازیافتی میکرو بر روی رفتار فشاری و خمشی شاتکریت، در دو رده مقاومتی معمولی و با عملکرد بالا مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج در شاتکریت معمولی با توجه به کم بودن نسبی خمیر و چسبندگی کمتر، استفاده از الیاف موجب کاهش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری شد. ولی با توجه به فشار هوای بیشتر در شاتکریت خشک معمولی عملکرد بهتری با استفاده از الیاف حاصل شد. به کارگیری مواد افزودنی در طرح اختلاط‌های شاتکریت با عملکرد بالا، علاوه بر بهبود خواص رئولوژیکی، موجب افزایش متوسط ۵۰ درصدی مقاومت فشاری گردید. با استفاده از الیاف در محدوده تغییرشکل پلاستیک رفتار شکل پذیر مشاهده و ظرفیت باربری توسط الیاف ادامه یافت. درصد حجمی ثابت الیاف فولادی (یک درصد) نشان داد، تفاوت‌های مشاهده شده در جذب انرژی طرح اختلاط‌های مورد بررسی مربوط به ماتریس بتنی می‌باشد. با استفاده از الیاف فولادی، حداقل جذب انرژی مورد نیاز در تغییر مکان مرکزی ۵ میلی‌متر در نمونه های پانل دایره‌ای برآورده شد و به ترتیب متوسط افزایش ۵۸ و ۱۹ درصدی جذب انرژی در دو روش تر و خشک حاصل شد. ولی حداقل جذب انرژی مورد نیاز در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی‌متر برآورده نگردید.

کلمات کلیدی: شاتکریت، تونل، جذب انرژی، الیاف میکرو، آبی‌گیر، خشک پاش، ترپاش، چقرمگی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول : hafshin@sut.ac.ir

۱- مقدمه

بر اساس استاندارد، شاتکریت به بتنی گفته می‌شود که با کمک هوا و سرعت بالا به سطح کار پاشیده می‌شود [۱]. شاتکریت در زمینه‌های مختلفی همچون ساخت تونل، مرمت و مقاوم سازی انواع سازه‌ها، تثبیت شیب کاربرد دارد [۲]. شاتکریت به دو روش پاششی تر و خشک قابل اجرا است. در فرآیند اختلاط خشک، مواد خشک از طریق یک شلنگ و با کمک جریان هوا و با سرعت بالا پمپ و در سر نازل آب برای ایجاد یک مخلوط بتنی وارد می‌شود. فرآیند شاتکریت مرطوب شامل پمپاژ بتن از پیش مخلوط شده از طریق یک شلنگ است که با اضافه شدن هوای فشرده در سر نازل پاشش انجام می‌گیرد [۳]. انتخاب روش پاشش به عوامل مختلفی از جمله محل پروژه، مهارت افراد، هزینه، مقاومت و دوام مورد نیاز و وسعت کار وابسته است [۴]. شایان ذکر است در شاتکریت تر، تولید گرد و خاک و پسرریز کمتر است و بر این اساس برای پروژه‌ها، گزینه‌ای مناسب‌تر است. با این وجود هر دو فرآیند به طور گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این امروزه در زمینه چاپ سه بعدی بتن، شاتکریت نسبت به سایر روش‌های موجود، از جمله اکستروژن مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۵-۷]. امروزه با توجه به اینکه در حفاری فضاهای زیرزمینی، شاتکریت الیافی روش رایج حفظ پایداری دیواره‌ها و سقف می باشد و از طرفی در این پوشش‌ها، الیاف تنها مسلح کننده‌ی موجود است. لذا عملکرد رضایت بخش الیاف برای تداوم شکل‌پذیری شاتکریت ضروری است. بنابراین عملکرد مناسب شاتکریت الیافی تحت تغییر شکل‌های زمین از اهمیت بالایی برخوردار است. بطور معمول، عملکرد پوشش شاتکریت بر اساس آزمایش نمونه‌های تیری طبق EN14651 و ASTM C 1906 و بر اساس جذب انرژی پانل طبق EN14488 و ASTM C 1550 ارزیابی می‌شود [۸-۱۱]. بر اساس مطالعات و اندازه‌گیری انجام شده توسط محققین، رابطه‌ای بر اساس درجه حرکت مورد انتظار زمین و حداقل جذب انرژی مورد نیاز، ارائه شده است [۱۲-۱۴]. با توجه به متداول بودن انجام آزمایش بر روی پانل‌های گرد در استرالیا و آمریکای شمالی و نتایج دقیق آن، در این تحقیق نیز برای سنجش عملکرد الیاف فولادی بازیافتی میکرو این آزمون انجام می‌گیرد. حداقل جذب انرژی ۳۶۰-۴۰۰ ژول، در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی‌متر در تست پانل ASTM C1550 معمولاً برای پشتیبانی موقت و دائمی تونل‌ها در اکثر شرایط زمین مناسب در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که انتظار تغییر شکل‌های حین سرویس، جزئی باشد، جذب انرژی در انحراف مرکزی ۵ میلی‌متر، مناسب‌ترین معیار عملکردی است. برای تونل‌های اخیراً اجرا شده در استرالیا جذب انرژی در محدوده ۶۰ تا ۱۰۰ ژول در تغییر مکان مرکزی ۵ میلی‌متر، برای پانل‌های ASTM C1550 مناسب در نظر گرفته شده است [۱۵].

guler و همکاران با بررسی اثرات الیاف فولادی ماکرو، فورتا و پلی‌آمید نشان دادند، برای افزایش مقاومت و چقرمگی بتن، بکارگیری الیاف فولادی مناسب است، بطوریکه پیشرفت سریع و کنترل نشده ترک‌ها را با ایجاد اثر پل زدن کاهش و با ایجاد محصورکنندگی جانبی، تغییر شکل عرضی را نیز کاهش می‌دهد [۱۶]. Yan و همکاران با بررسی تجربی خواص مکانیکی بتن پاششی سیلیسی تقویت شده با الیاف فولادی نشان دادند که مقاومت کششی، خمشی و برشی بتن پاششی نسبت به طرح پایه بهبود یافته و به ترتیب ۷۷، ۷۳ و ۹۸ درصد افزایش می‌یابد [۱۷]. Park به تعیین نسبت اختلاط بهینه بتن پاششی با عملکرد بالا با استفاده از خاکستر بادی پرداخت. نتایج حاصله نشان داد که با استفاده از خاکستر بادی مقاومت فشاری در تمام سنین افزایش می‌یابد. همچنین علاوه بر استحکام طولانی مدت، آسیب‌پذیری زیست محیطی و هزینه‌های اجرایی کاهش می‌یابد [۱۸]. Shakhawat و همکاران با بررسی اثرات انواع آنی‌گیرهای آلومیناتی، معدنی سیمانی و غیر قلیایی بر چقرمگی خمشی بتن پاششی تقویت شده با الیاف نشان دادند، با توجه به اثر مخرب تمامی آنی‌گیرهای مورد بررسی بر روی عملکرد طولانی مدت، آنی‌گیر غیر قلیایی با توجه به عملکرد نسبتاً بهتر در طولانی مدت و حفظ سلامتی کارگران مناسب‌تر است [۱۹]. Kulekci با مقایسه نتایج بتن پاششی مسلح شده الیافی، در نمونه‌های کارگاهی اجرا شده در فضاهای زیرزمینی و نمونه‌های آزمایشگاهی، صحت نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی را نشان داد [۲۰]. Armelin و همکاران با بررسی تاثیر الیاف فولادی بر مشخصات ظاهری و مکانیکی بتن پاششی تهیه شده با الیاف فولادی نشان دادند، عامل اصلی افزایش مقاومت فشاری به فرآیند پاشش مربوط بوده و الیاف نقش چندانی در این افزایش ندارد [۲۱]. بر اساس مطالعات Lu و همکاران با کاهش اندازه

مصالح، سرعت پاشش افزایش یافته و به تبع آن پخش بتن پاشیده روی سطح مورد نظر آسان تر می گردد. علاوه بر این، افزایش ویسکوزیته، گسترش را دشوار، اما در عین حال باعث افزایش چسبندگی و جلوگیری از لغزش بتن پاشیده از سطح مورد نظر می گردد [۲۲]. بر اساس مطالعات Bohac و همکاران، خاکستر بادی، متاکائولن و سرباره کوره آهن گدازی موجب افزایش تنش تسلیم، بهبود چسبندگی و کاهش پس ریز می گردد [۲۳]. بر اساس مطالعات Bernard ویژگی های بعد از ترک الیاف، به خواص ماتریس بتنی وابسته است و تحت تاثیر پیری در ماتریس بتنی و خوردگی در الیاف بسته به نوع الیاف و عرض ترک، در تغییر شکل های بزرگ عملکرد بعد از ترک پایین تری حاصل می گردد [۱۵].

هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد الیاف فولادی بازیافتی میکرو بر روی رفتار فشاری و خمشی شاتکریت الیافی می باشد. در این راستا الیاف فولادی بازیافتی میکرو به دو روش پاشش تر و خشک در دو نوع شاتکریت معمولی و با عملکرد بالا مورد بررسی قرار گرفتند و بدین منظور، آزمون مقاومت فشاری (روی نمونه های مغزه گیری شده) و آزمون جذب انرژی روی پانل های گرد بر روی نمونه های تهیه شده، انجام شد.

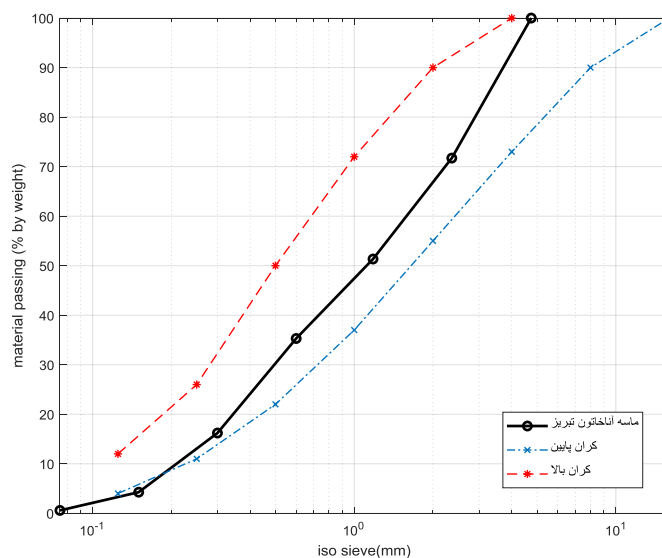
۲- مصالح و روش ها

۲-۱- مصالح سنگی :

در این تحقیق ماسه آناختون تبریز با حداکثر درشت دانه $4/75$ میلی متر با مشخصات فیزیکی جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت. براساس شکل ۲ دانه بندی این ماسه در محدوده توصیه شده توسط استاندارد EFNARC است [۲۴].

جدول ۱: مشخصات سنگدانه های مصرفی

وزن مخصوص اشباع با سطح خشک	درصد جذب آب	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص انبوهی	ارزش ماسه ای	مدول نرمی
گرم بر سانتی متر مکعب	درصد	گرم بر سانتی متر مکعب	گرم بر سانتی متر مکعب	درصد	
۲/۵۹	۰/۸۱	۲/۶۲	۲/۵۷	۹۱	۳/۲۱



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه مصرفی

۲-۲- سیمان، فوق روان کننده، آنی گیر، میکروسیلیس، آب :

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۱ کارخانه سیمان صوفیان بر اساس ASTM C 150 است [۲۵]. فوق روان کننده مورد استفاده (Carboxal HF 5000) از نوع پلی کربوکسیلات اتر تولیدی شرکت البرز شیمی آسیا با pH ۵-۷ و وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب و بر اساس ASTM C 1141 است [۲۶]. به ترتیب در طرح اختلاط های اجرا شده به روش تر و خشک، از آنی گیرهای غیر قلیایی مایع و پودری شرکت البرز شیمی آسیا با چگالی ۲/۱ و ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب، استفاده شد. میکروسیلیس مورد استفاده تولیدی کارخانه صنایع فروآلیاژ ازنا لرستان با سطح ویژه ۱۵ الی ۳۰ متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. همچنین ترکیب شیمیایی آن دارای ۹۰ الی ۹۵ درصد SiO₂ است. آب مورد استفاده در طرح اختلاطها، آب شرب شهر تبریز است.

۲-۳- الیاف :

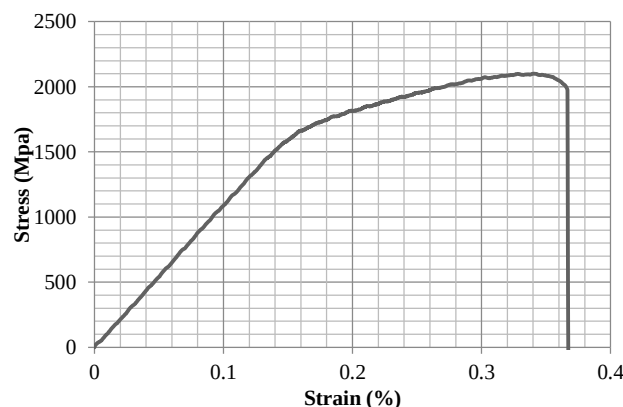
در این تحقیق با هدف بهبود خواص مکانیکی و بهبود نسبی کارایی بتن پاششی با رویکرد زیست محیطی، الیاف فولادی بازیافتی میکرو با طول ۱۰ الی ۳۰ میلی متر، نسبت ظاهری میانگین ۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس آزمایش کشش انجام شده، مقاومت کششی این الیاف ۲۱۰۰ مگاپاسکال بوده و نمودار تنش-کرنش آن در شکل ۳ آورده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۲: الف) میکروسیلیس ب) الیاف فولادی میکرو مورد استفاده



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش الیاف فولادی بازیافتی میکرو

۲-۴- طرح اختلاط:

در این تحقیق برای بررسی اثرات الیاف فولادی میکرو بر روی شاتکریت تر و خشک و همچنین بررسی اثرات بهبود مقاومت فشاری بر روی عملکرد شاتکریت الیافی، طرح اختلاط‌های متعددی به صورت آزمایشگاهی و میدانی به دو روش پاشش تر و خشک، تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. بدین منظور شش طرح به روش تر و سه طرح در روش خشک در رده‌های مقاومتی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۲: طرح اختلاط‌های شاتکریت تر و خشک اجرا شده

نوع پاشش	نام طرح	ماسه (S) (Kg)	سیمان (c) (Kg)	میکروسیلیس (sf) (Kg)	$\frac{w}{c + sf}$	فوق روان کننده (sp) $\frac{sp}{c + sf} \%$	الیاف (f) (Kg)	آنی گیر* (c%)
تر	WS0H0F0A5	۱۵۳۶	۴۸۰	-	۰/۴۸	-	۰	۵
	WS0H0F1A5	۱۴۸۵	۴۶۴	-	۰/۴۵	-	۱	۵
	WS7.63H1.4F0A5	۱۵۶۳	۴۴۲	۳۳/۷۳	۰/۳۵	۱/۴۰	۰	۵
	WS7.7H1.7F1A5	۱۵۲۴	۴۳۰	۳۳/۲۳	۰/۴۱	۱/۶۹	۱	۵
	WS10.3H1.95F1A5	۱۵۳۴	۴۳۴	۴۴/۸۳	۰/۳۷	۱/۹۵	۱	۵
	WS11.1H2F1A5	۱۵۹۰	۴۶۱	۵۱/۲۶	۰/۳۸	۲/۰۰	۱	۵
خشک	DS0H0F0A5	۱۵۳۶	۴۸۰	-	۰/۴۸	-	۰	۵
	DS0H0F1A5	۱۴۸۶	۴۶۴	-	۰/۴۵	-	۱	۵
	DS11.1H2F1A5	۱۵۹۰	۴۶۱	۵۱/۲۶	۰/۳۸	۲/۰۰	۱	۵

*در ردیف‌های ۱ الی ۶ از آنی گیر مایع و در ردیف‌های ۷ الی ۹ از آنی گیر پودری شرکت البرز شیمی آسیا استفاده شده است.

۲-۵. آزمایش چقرمگی خمشی پانل گرد

مطابق استاندارد ASTM C 1550، انرژی جذب شده در محدوده بعد از ترک با استفاده از یک پانل گرد که روی سه محور متقارن، تحت بار مرکزی و پیشروی جابه‌جایی با سرعت ثابت ۴ میلی متر بر دقیقه، تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه پانل‌ها رفتار خمش دو محوره را تحت بار مرکزی تجربه می‌کنند، حالت شکست مربوط به بتن درجا حاصل می‌گردد. همچنین در نمونه‌هایی که حداقل سه ترک ایجاد گردد، آزمایش آن به شرطی که میانگین عرض هر ترک بعد آزمایش و برداشته شدن بار بیش از ۰/۵ میلی‌متر باشد، موفق محسوب می‌شوند. در این آزمون وجود سه تکیه گاه در زیر نمونه باعث می‌گردد، توزیع بار به صورت مشخص و اعوجاج سطحی نمونه باعث تغییر در حداکثر بار قابل تحمل نگردد و حالت شکست سه نیمه شدن در بیشتر

نمونه‌ها مشاهده شود. از طرفی در این آزمون، نمونه‌ها تحت اثر ترکیب تنش‌های پیچشی و غشایی قرار دارند، که معرف رفتار واقع شاتکریت است.

۳- روش اجرا

در این تحقیق با توجه به عدم امکان اجرای شاتکریت خشک در محیط آزمایشگاهی، تهیه نمونه از طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک، در یک پروژه‌ی پایدارسازی گود در شهر تبریز انجام شد. با توجه به اینکه در شرایط میدانی امکان اندازه‌گیری و اختلاط دقیق طرح اختلاط‌های مربوطه میسر نبود. بدین منظور روز قبل، در محیط آزمایشگاه تمامی مصالح به صورت خشک توزین و با نسبت معین مخلوط و برای اجرا به محل مورد نظر منتقل شدند. در محل اجرا طبق شکل ۴-الف مصالح خشک وارد خوراک دهنده دستگاه شاتکریت شد. با اضافه شدن آب تعیین شده در طرح اختلاط‌ها و تنظیم دبی شیر خروجی آب در سر نازل و توسط فشار هوا، پاشش انجام شد. لازم به توضیح است که پاشش در هر طرح اختلاط، به صورت پیوسته و بدون وقفه انجام شد. همچنین مواد افزودنی مایع با درصد وزنی مشخص به تانکر آب اضافه گردید. تمامی طرح اختلاط‌های شاتکریت تر در محیط آزمایشگاه و توسط دستگاه ملات پاش انجام شد. تهیه مخلوط بتن شاتکریت تر طبق روش معمول ساخت بتن الیافی انجام شد. برای اختلاط بهتر، الیاف در مراحل پایانی اختلاط و به صورت تدریجی اضافه شدند. آبی‌گیر مورد استفاده در طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک از نوع پودری بوده و در حین اختلاط خشک با سایر مصالح ترکیب گردید. همچنین در طرح اختلاط‌های شاتکریت تر، از آبی‌گیر مایع استفاده شد که برای جلوگیری از ایجاد گیرش قبل از پاشش مخلوط بتنی، آبی‌گیر مایع در انتهای اختلاط اضافه گردید. در روند این تحقیق عمل آوری پانل‌های تهیه شده طبق شکل ۵-ب، به مدت ۲۸ روز و توسط گونی خیس انجام شد. نمونه‌های لازم جهت آزمون‌های مقاومت فشاری و چقرمگی خمشی به ترتیب براساس استانداردهای ASTM C 1140 و ASTM C 1550 آماده شدند. همچنین تعیین مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های مربوطه بر اساس استاندارد ASTM C 42 بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده از پانل انجام شد [۲۸، ۱۱، ۲۷]. لازم به توضیح است تمامی تست‌های مربوطه، در آزمایشگاه سازه و بتن دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام گردیده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴: الف) دستگاه شاتکریت ب) روش تهیه نمونه‌های شاتکریت ج) مغزه‌گیری نمونه‌ها



(ب)

(الف)

شکل ۵: الف) نمونه مصالح خشک بعد ترکیب ب) عمل آوری پانل های شاتکریت

۴- نتایج

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری :

نتایج مقاومت فشاری طرح اختلاط های مربوطه به شرح جدول ۳ است. بر اساس نتایج به کارگیری یک درصد حجمی الیاف فولادی میکرو در شاتکریت معمولی اجرا شده به دو روش تر و خشک با توجه به نسبت پایین $(\frac{sf+c}{s+f})$ ، موجب کاهش چسبندگی و پخش نامناسب بتن شاتکریت بر روی بستر زیری می گردد و در پی آن پس ریز مشاهده شده افزایش می یابد. با توجه به عدم وجود چسبندگی مناسب و پس ریز زیاد در این نوع شاتکریت، بتن پاشیده شده دارای ساختار توخالی تری بوده و به موجب آن مقاومت فشاری به طور متوسط ۱۵ درصد کاهش یافت. ولی با توجه به سرعت پاشش بیشتر شاتکریت خشک (۱۲-۱۰) بار، تراکم به شکل مناسب تری نسبت به روش تر پاش در شاتکریت معمولی صورت می گیرد و لذا در طرح های یکسان، شاتکریت معمولی و معمولی الیافی در روش خشک پاش، مقاومت های بیشتری حاصل می گردد. در این تحقیق استفاده از مواد افزودنی در شاتکریت موجب بهبود خواص رئولوژیکی و مکانیکی شد. با به کارگیری فوق روان کننده با توجه به کاهش نسبت آب به سیمن و دستیابی به کارایی در مخلوط بتن شاتکریت تر پاش بدون آب انداختگی و از طرفی با توجه به خاصیت پرکنندگی، چسبندگی و جلوگیری از جریان بتن پاششی در پی استفاده از میکروسیلیس در طرح های شاتکریت با عملکرد بالا، بهبود نسبی پس ریز و چسبندگی در این طرح ها مشاهده گردید. علاوه بر این به کارگیری مواد افزودنی در این تحقیق موجب افزایش متوسط ۵۰ درصدی مقاومت فشاری در طرح های شاتکریت الیافی تر پاش گردید. مقایسه طرح های شاتکریت عملکرد بالای یکسان (WS7.63H1.4F0A5) و (WS7.7H1.7F1A5) نشان داد، به کارگیری الیاف فولادی در شاتکریت عملکرد بالا، موجب افزایش ۳ درصدی مقاومت فشاری می گردد. همچنین در روش خشک پاش استفاده از مواد افزودنی با توجه به پرکنندگی ساختار بتن پاشیده شده موجب افزایش ۳۷ درصدی مقاومت فشاری می گردد. بر اساس مقایسه طرح اختلاط های یکسان (WS11.1H2F1A5) و (DS11.1H2F1A5) اجرا شده در دو روش پاشش تر و خشک، در شاتکریت مقاومت بالای تر، ۳۹ درصد مقاومت فشاری بیشتری حاصل شد. همچنین با توجه به تفاوت های ساختاری و اجرایی در شیوه های رایج اجرای شاتکریت می توان گفت در روش تر با توجه به اختلاط و هیدراتاسیون کامل تر، مقاومت های بهتری حاصل می گردد.

جدول ۳: نتایج مقاومت فشاری نمونه های مغزه گیری شده

ردیف	طرح اختلاط	وزن مخصوص	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۲۸ روزه
۱	WS0H0F0A5	۲۲۵۰	۲۰۰	۲۴۰
۲	WS0H0F1A5	۲۲۶۲	۱۶۵	۲۰۰
۳	WS7.63H1.4F0A5	۲۲۴۰	۳۱۸	۴۰۰
۴	WS7.7H1.7F1A5	۲۲۹۰	۲۸۶	۳۶۰
۵	WS10.3H1.95F1A5	۲۳۰۵	۳۴۹	۳۹۶
۶	WS11.1H2F1A5	۲۳۹۰	۶۲۵	۶۶۶
۷	DS0H0F0A5	۲۲۶۹	-	۲۸۱
۸	DS0H0F1A5	۲۳۳۰	-	۲۴۰
۹	DS11.1H2F1A5	۲۵۱۰	-	۳۸۲

۴-۲- آزمایش چقرمگی خمشی :

بررسی جذب انرژی در طرح اختلاط‌های اجرا شده، بر اساس استاندارد ASTM C 1550-08 انجام و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. الیاف فولادی نقش موثری بر روی رفتار خمشی طرح اختلاط‌های شاتکریت دارند. با استفاده از الیاف فولادی در محدوده تغییر شکل پلاستیک، رفتار شکل پذیر بوده و بعد از ترک، بار وارده به کمک پل‌های ایجاد شده توسط الیاف تحمل می‌گردد. با توجه به اینکه در این تحقیق در تمامی طرح اختلاط‌های الیافی از یک درصد حجمی ثابت الیاف استفاده شده است. لذا تفاوت‌هایی که در عملکرد خمشی نمونه‌ها مشاهده می‌شود ناشی از تفاوت در ماتریس بتنی است.



(ب)

(الف)

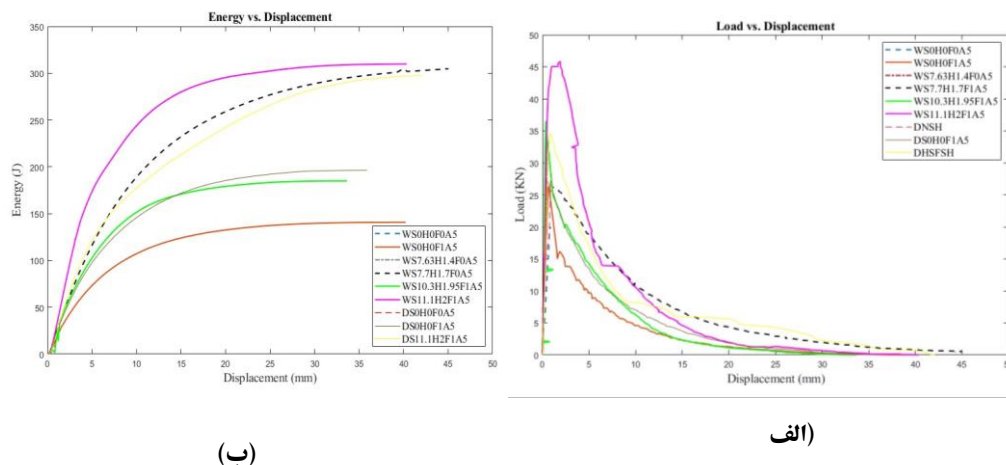
شکل ۶: (الف) تست پانل‌های دایره‌ای (ب) حالت استاندارد شکست نمونه‌های آزمایشی

جدول ۴- نتایج آزمون چقرمگی خمشی

انرژی در تغییر شکل حداکثر	تغییر شکل حداکثر	انرژی در تغییر شکل ۴۰ میلیمتر	تغییر شکل ۵ میلیمتر	بار حداکثر	طرح اختلاط
۹	۰۰/۸۷	-	-	۲۰/۰۰	WS0H0F0A5
۱۴۱	۴۰/۰۰	۱۴۱	۷۳	۲۱/۳۱	WS0H0F1A5
۷	۰۰/۴۷	-	-	۳۲/۹۲	WS7.63H1.4F0A5
۳۰۵	۴۵/۰۳	۳۰۵	۱۱۶	۳۳/۹۹	WS7.7H1.7F1A5
۱۸۵	۳۳/۴۴	-	۱۰۳	۳۶/۵۴	WS10.3H1.95F1A5
۳۱۰	۴۰/۳۶	۳۱۰	۱۷۴	۴۵/۸۴	WS11.1H2F1A5
۱۴	۰۰/۹۱	-	-	۲۸/۱۳	DS0H0F0A5
۱۹۶	۳۵/۸۹	-	۹۸	۲۷/۰۶	DS0H0F1A5
۲۹۸	۴۲/۰۹	۲۹۸	۱۲۱	۳۴/۶۴	DS11.1H2F1A5

بر اساس شکل ۷-الف با اصلاح طرح اختلاط‌های شاتکریت الیافی تر و خشک، عملکرد خمشی شاتکریت با استفاده از الیاف فولادی میکرو بهبود می‌یابد و علاوه بر افزایش بار حداکثر، در رفتگی الیاف تحت تغییرشکل‌های بعد از ترک، کاهش می‌یابد. نیاز به جذب انرژی و شکل پذیری در بتن شاتکریت با توجه به موارد کاربرد آن ضروری است. ایجاد این خواص در شاتکریت با استفاده از شبکه مش بندی و الیاف صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه اجرای مش بندی زمان بر و احتمال ایجاد خطرات جانی و مالی را دارد، امروزه استفاده از الیاف گسترش یافته است. در این تحقیق با هدف برآورد سطح جذب انرژی حداقل و همچنین کاهش اثرات نامطلوب الیاف بر خواص رئولوژیکی شاتکریت، الیاف فولادی میکرو بر روی شاتکریت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۷-ب مربوط به انرژی جذب شده در تغییر مکان قابل تحمل نمونه های بتن پاشیده شده است. بر این اساس جذب انرژی در تغییر مکان مرکزی ۵ میلی متری که معرف سطح سرویس دهی می‌باشد نشان داد، شاتکریت غیر مسلح توانایی ظرفیت باربری تا تغییر مکان مرکزی ۵ میلی متری را ندارد. با استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو در طرح اختلاط‌های بتن پاششی تر و خشک حداقل جذب انرژی مورد نیاز ۶۰ الی ۱۰۰ ژول برآورده شد [۱۵]. با اصلاحات صورت گرفته در طرح اختلاط شاتکریت، در دو روش پاشش تر و خشک، با توجه به جفت و بست بهتر الیاف با ماتریس بتنی، در رفتگی الیاف دشوارتر بوده و در نتیجه علاوه بر بهبود مقاومت فشاری، در این تحقیق جذب انرژی در جابه‌جایی ۵ میلی متری به ترتیب در شاتکریت تر و خشک تا ۵۸ و ۱۹ درصد افزایش یافت.

بیشترین جذب انرژی در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی متر برابر ۳۱۰ ژول و در طرح اختلاط WS11.1H2F1A5 حاصل گردید که نسبت به طرح اختلاط الیافی اولیه WS0H0F1A5، ۵۴ درصد انرژی جذب شده در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی متر، افزایش یافته است. بر اساس نتایج جذب انرژی در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلیمتر مربوط به سطح عملکرد نهایی، استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو در طرح اختلاط‌های بررسی شده، حداقل سطح انرژی مورد نیاز ۳۶۰ الی ۴۰۰ ژول، برآورده نمی‌گردد [۱۵]. لذا برای دستیابی به حداقل سطح انرژی مورد نظر نیاز است، درصد حجمی بالاتر از این الیاف استفاده گردد. ولی در این صورت با توجه به عدم کارپذیری این مخلوط عملیات پاشش به سهولت ممکن نخواهد بود و در صورت نیاز به جذب انرژی در سطح عملکرد نهایی پیشنهاد می‌شود بر روی ماتریس بتنی کار گردد.



شکل ۷: الف) نمودار نیرو-تغییر مکان (ب) نمودار انرژی-تغییر مکان طرح های شاتکریت تر و خشک اجرا شده

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصله در روند این تحقیق، الیاف فولادی بازیافتی میکرو دارای تاثیرات مناسب بر روی خواص مکانیکی شاتکریت است و اثرات مخرب آن بر روی رفتار مخلوط تازه شاتکریت محدود است. با توجه به پسریز زیاد و چسبندگی پایین در شاتکریت رده معمولی تر و خشک و کاهش متوسط ۱۵ درصدی مقاومت فشاری، بهتر است با توجه به افزایش ۵۰ درصدی مقاومت فشاری در شاتکریت با رده عملکردی بالا، استفاده از الیاف همراه با سایر مواد افزودنی باشد. با توجه به فشار هوای

بیشتر در روش خشک، با به کارگیری الیاف در شاتکریت رده معمولی به روش خشک، نتایج بهتری حاصل شد. افزایش ۳۹ درصدی مقاومت فشاری در شاتکریت با عملکرد بالا در روش اجرای تر نسبت به روش خشک، نشانگر عملکرد بهتر آن است. همچنین افزایش ۳ درصدی مقاومت فشاری در صورت استفاده از الیاف در طرح اختلاطهای (WS7.63H1.4F0A5) و (WS7.7H1.7F1A5) نشان دهنده عملکرد بهتر الیاف در شاتکریت مقاومت بالا است. در تمامی طرح اختلاطهای بتن پاششی الیافی از یک درصد حجمی ثابت الیاف فولادی بازایافتی میکرو استفاده شده است بنابراین تفاوت‌های ایجاد شده در جذب انرژی این طرح‌ها، مربوط به ماتریس بتنی است.

با به کارگیری این الیاف، در سطح عملکرد سرویس دهی (در تغییر مکان مرکزی ۵ میلیمتر)، حداقل جذب انرژی مورد نیاز در تمامی طرح‌های الیافی تامین شد. اما علیرغم افزایش چشم‌گیر جذب انرژی در سطح عملکرد نهایی (تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی‌متر) در طرح اختلاط‌های نهایی، حداقل جذب انرژی مورد نیاز برآورد نگردید.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از تمامی کسانی که در اجرای این پژوهش ما را یاری کرده‌اند، بخصوص کارشناس محترم آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز، جناب آقای مهندس میثم مولایی و مدیرعامل شرکت طرح و ساخت یادمان بنا جناب آقای مهندس مهدی فتحی که در این راه زحمات زیادی را متحمل گشته‌اند قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Cengiz, O. and L. Turanli, *Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test*. Cement and concrete research, 2004.
- [2] Kuesel, T.R., E.H. King, and J.O. Bickel, *Tunnel Engineering Handbook*. 2012: Springer US
- [3] G. Bernardo, A. Guida, I. Mecca, Advancements in shotcrete technology, WIT Trans. Built Environ. 153 (2015) 591–602
- [4] 506R-90, A., *Guide to shotcrete in Reported by ACI committee 506*.
- [5] B. Lu, Y. Qian, M. Li, Y. Weng, K.F. Leong, M.J. Tan, S. Qian, Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent, Constr. Build. Mater. 211 (2019).
- [6] I. Dressler, N. Freund, D. Lowke, The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing, Materials 13 (2) (2020) 374.
- [7] F. Heidarneshad, Q. Zhang, Shotcrete based 3D concrete printing: State of art, challenges, and opportunities, Constr. Build. Mater. 323 (2022) 126545.
- [8] EN14651, 2007. Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). European Standards. fib, 2012. Model Code 2010, Final Draft, Bulletin 65. Fédération Internationale du Béton, Lausanne.
- [9] ASTM International, Standard C-1609/C-1609 M, 2012. Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-point Loading). ASTM, West Conshohocken, PA.
- [10] EN14488, 2006. Testing Sprayed Concrete. British Standards Institute, London.
- [11] ASTM International, 2012. Standard C-1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). ASTM, West Conshohocken.
- [12] Barton, N., Grimstad, E., 2004. The Q-system following thirty years of development and application in tunnelling projects. Rock Engineering - Theory and Practice, Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004. Salzburg, Austria, pp. 15–18.
- [13] Bernard, E.S., 2013. Safe support with fibre reinforced shotcrete. Tunnell. J. September, 44–47.
- [14] Papworth, F., 2002. Design guidelines for the use of fibre reinforced shotcrete in ground support. Shotcrete, American Shotcrete Association, Spring 2002, 16–21.

- [15] Bernard, E.S., *Changes in long-term performance of fibre reinforced shotcrete due to corrosion and embrittlement*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020. 98: p. 103335.
- [16] Guler, S., B. Öker, and Z.F. Akbulut. *Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete*. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [17] Yan, X., et al., *Experimental study on basic mechanical properties of steel fiber-reinforced siliceous wet shotcrete*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. 2018.
- [18] Park, C.-W., H.-G. Lee, and T.-S. Kang, *Evaluation of durability characteristics of high performance shotcrete using fly ash*. Journal of the Korea Concrete Institute, 2010. 22(3): p. 305-311.
- [19] Hossain, M.S., et al., *Long-term effect of accelerator content on flexural toughness of steel fiber reinforced shotcrete for tunnel construction*. Case Studies in Construction Materials, 2021. 15: p. e00706.
- [20] Külekçi, G., *Comparison of field and laboratory result of fiber reinforced shotcrete application*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2021. 65(2): p. 463-473.
- [21] Armelin, H.S. and P. Helene, *Physical and mechanical properties of steel-fiber reinforced dry-mix shotcrete*. Materials Journal, 1995. 92(3): p. 258-267.
- [22] G. Liu, W. Cheng, L. Chen, Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete, Constr. Build. Mater. 243 (1) (2020) 118180.
- [23] M. Bohac, D. Kubatova, M.K. Kotlanova, I. Khongova, A. Zezulova, T. Stanek, The role of SCM's on rheology of sprayed mortar, in: In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1039, IOP Publishing, 2021 012001.
- [24] EFNARC Sprayed Concrete Technical Committee (ed Austin, S A), European specification for sprayed concrete, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures Aldershot, UK, (ISBN 0 9522483 1 X), September 1996.
- [25] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [26] ASTM C 1141/C1141M-15, Standard Specification for Admixtures for Shotcrete.
- [27] ASTM C1140-11, Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels
ASTM International, West Conshohocken, PA (2011), 10.1520/C1140_C1140M-11R19
- [28] ASTM C 42 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.