

Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement

Sajjad Mirzamohammadi¹, Masoud Soltani Mohammadi^{2*} 

1. Ph.D., Department of structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of structural Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

The construction industry is particularly cost-sensitive, thus new materials should be justified, and their economic advantages should be satisfactory. Over the last 50 years, using fiber-reinforced cement base materials has significantly increased. Among them, a particularly malleable category includes engineered cementitious composites (ECC), strain hardening cementitious composites (SHCC), and ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC). These high-performance fiber reinforced cementitious based materials (HPFRCC) show considerable strain hardening capacity. Meanwhile, it is crucial to consider how these new materials (HPFRCC) will affect the environment. Indeed, the quantity of cement or cementitious materials used in their manufacturing may sometimes approach 1000 kg/m³. Substituting supplemental materials with cementitious properties for clinker is one of the greatest ways to reduce carbon dioxide emissions from HPFRCC manufacture (supplementary cementitious materials). Clays-containing kaolinite is one of the acceptable auxiliary ingredients for cement with good accessibility. These clays are among the substances that are widely distributed over the globe. When heated to 700-850°C, clays with at least 40% kaolinite produce metakaolin and become significantly pozzolanic. The simultaneous addition of calcined clay, and limestone to replace with part of the clinker in the mixed design results in LC3 or cement consisting of calcined clay and limestone, which reduces carbon emissions by roughly 30% turns into dioxide (CO₂). The optimal substitution ratio of OPC by LC3 is 50% clinker, 30% calcined clay (MK), 15% limestone powder, and 5% gypsum. Therefore, the optimal OPC substitution ratio by LC3 is 45% (55% OPC, 30% calcined clay, and 15% limestone powder) with kaolin content of around 40-50% in the clay. This study developed a sprayable HPFRCC using local materials such as limestone calcined clay cement (LC3) and ordinary polypropylene (PP) fiber to increase the durability of structures (as a material for repairing) without harming the environment. The developed composite's sprayability and mechanical performance were investigated through a flow table, compressive strength, uniaxial tension, and three-point flexural tests. Moreover, the material sustainability index (MSI) was used to evaluate the performance of the mixes in terms of consumed energy and carbon emissions. Finally, using LC3 and ordinary polypropylene fibers, it was possible to achieve sprayable HPFRCC with a tensile strain capacity of 3.5%. Furthermore, this composite exhibits low carbon production, low cost, and high ductility, promoting its use in infrastructure repairs. The compressive strength of cast specimens was 11% higher than that of the sprayed specimens. The reason for this was their apparent density difference and porosity (i.e. the compressive strength of the cast specimens was higher due to their lower porosity). The bending and tensile strengths of the cast specimens were, respectively, 14% and 22% lower than those of the sprayed specimens due to pneumatic compaction during the spraying process; the distribution of fibers in the sprayed specimens was more uniform, resulting in greater bending and tensile strengths. However, the flexural deformation and tensile strain capacity of the sprayed and cast specimens were almost equal. Moreover, A superplasticizer/binder (LC3 mass) ratio of 2.5% must be chosen for spraying HPFRCC containing calcined clay.

Review History

Received: May 11, 2025

Revised: Aug 8, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Mechanical properties

HPFRCC

Sprayable


LC3 cement

PP fiber

* Corresponding Author Email: msoltani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-8696-8247



بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند پاششی حاوی رس‌های کلسینه شده

سجاد میرزامحمدی^۱، مسعود سلطانی محمدی^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی، مهندسی عمران و محیط‌زیست، تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استاد، مهندسی عمران و محیط‌زیست، تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) پاششی در کاربردهای عملی به عنوان یک مصالح ترمیمی امیدوارکننده شناخته می‌شوند. با این حال، مقدار مصرف بالای سیمان در طرح مخلوط HPFRCC که منجر به تولید زیاد گاز کربن‌دی‌اکسید و ترک‌خوردگی انقباضی بالقوه می‌شود، نیاز به تغییراتی دارد. در این تحقیق، یک HPFRCC پاششی با استفاده از مصالح محلی مانند سیمان‌های سه جزئی (LC3) و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی (PP) به منظور افزایش دوام سازه‌ها و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه یافته است. قابلیت پاشش و عملکرد مکانیکی این کامپوزیت با آزمایش‌های جریان اسلامپ (Flow table test)، مقاومت فشاری، کشش تک‌محوری و خمش سه‌نقطه‌ای بررسی شد. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد طرح مخلوط‌های ساخته شده، شاخص عملکرد مواد (MSI) از نقطه‌نظر انرژی مصرف شده و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید بکار گرفته شد. مقایسه با نمونه متداول کامپوزیت‌های سیمانی الیافی (M45-ECC) نشان داد که طرح توسعه داده شده در این تحقیق (A-2.5) به ترتیب حدود ۲۱ درصد انرژی مصرف شده و ۲۰ درصد انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید کمتر تولید می‌کند که بیانگر برتری آشکار زیست‌محیطی این طرح نسبت به نمونه‌های رایج است. در نهایت دستیابی به HPFRCC پاششی با ظرفیت کرنش کششی ۳/۵ درصد در صورت استفاده از رس‌های کلسینه شده و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی میسر شد.

کلمات کلیدی

خواص مکانیکی
کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند
پاشش
سیمان LC3
الیاف پلی‌پروپیلن

۱- مقدمه

گفت که این فناوری حتی هنگام تسلیح با الیاف فولادی، شبه ترد باقی می‌ماند [3-4].

به طور کلی مواد پایه سیمانی می‌تواند شامل بتن (خمیر سیمان حاوی سنگ‌دانه درشت و ریز)، ملات (خمیر سیمان حاوی سنگ‌دانه ریز) و یا خمیر سیمان (فاقد سنگ‌دانه) باشد. حضور الیاف در بتن، ملات و یا خمیرهای سیمانی باعث تبدیل شدن آن‌ها به یک کامپوزیت یا ماده مرکب خواهد شد که از دو فاز تشکیل شده‌اند. یک فاز آن‌ها الیاف، و فاز دیگر آن‌ها سایر مواد تشکیل‌دهنده خواهد بود (ترکیب آب، سیمان هیدرولیکی و

بتن به دلیل عملکرد مکانیکی خوب، هزینه پایین، طول عمر و دسترسی وسیع، یکی از پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در ساخت‌وساز است. با این حال، به دلیل ترد بودن، بتن از ترک‌خوردگی آسیب دیده و به دنبال آن ایمنی و دوام سازه‌ها کاهش می‌یابد [1-2]. فناوری بتن پاششی برای تعمیرات زیرساختی توجه زیادی را به خود جلب کرده و مزایای آن عبارتند از: عدم نیاز به قالب، هزینه مقرون به صرفه، تغییرات کمتر در عملکرد مکانیکی و کارایی بالا در ساخت‌وساز می‌باشند. با این حال باید

* رایانامه نویسنده مسئول: msoltani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0001-8696-8247

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



سنگدانه) که به آن ماتریس می‌گویند [5-6].

مواد پایه سیمانی الیافی برحسب رفتار در برابر بارهای کششی به دو نوع مواد پایه سیمانی الیافی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و مواد پایه سیمانی با رفتار نرم‌شوندگی تقسیم‌بندی می‌شوند. در چند دهه اخیر مواد پایه سیمانی الیافی توانمند بر مبنای اصول میکرومکانیک توسعه یافته‌اند. این مواد رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و ترک‌خوردگی چندگانه قابل توجهی از خود نشان داده و بتن‌های الیافی توانمند (HPFRC)^۱، کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)^۲ را شامل می‌شوند [7-9].

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند یک بتن شکل‌پذیر مسلح الیافی بوده که برای حداقل ۳٪ ظرفیت کرنش کششی طراحی شده است [10]. امروزه HPFRCC پاششی با روانی کنترل شده توسط کاهنده آب، عامل اصلاح شده لزجت و سیمان آلومینات کلسیم (CSA)^۳ توسعه یافته است. سازه‌های تعمیر یا مرمت شده با HPFRCC پاششی شامل کانال‌های انتقال آب، پوشش تونل‌ها، دیوارهای بنایی، سدها و مجاری آب می‌باشد [11-13]. با این وجود، دوز بالای سیمان در ترکیب HPFRCC سبب افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی در مورد انتشار CO₂ می‌شود، زیرا ۵ الی ۸ درصد کل انتشار CO₂ با منشا انسانی مربوط به تولید سیمان است [14-16]. علاوه بر این، حجم بالای سیمان در HPFRCC منجر به ایجاد انقباضی چشم‌گیر تا ۱۵۰۰ με در مدت ۲۸ روز و افزایش بالقوه خطر ترک‌خوردگی می‌شود [17-19]. آثار زیست‌محیطی ناشی از افزایش مصرف سیمان و انتشار CO₂ در تحقیقات متعددی گزارش شده است [20-22]. بنابراین، HPFRCC پاششی به کار برده شده در این تحقیق می‌تواند سبب بهبود بیشتر هم از لحاظ زیست‌محیطی و کاهش انقباض شود.

در سال‌های اخیر، سیمان LC3^۴ به منظور کاهش آثار زیست‌محیطی تولید سیمان، توسعه یافته است. سیمان LC3 شامل ۵۰٪ کلینکر، ۳۰٪ رس کلسینه شده، ۱۵٪ سنگ آهک و ۵٪ گچ است که انتشار CO₂ را در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی (OPC) حدود ۲۰-۳۵ درصد کاهش می‌دهد. LC3 در توسعه HPFRCC کم‌کربن (با میزان کربن پایین) با شکل‌پذیری کششی بسیار بالا،

پایداری زیادی از خود نشان داده اما در کاربردهای پاششی HPFRCC بسیار مورد استفاده قرار نگرفته است. با توجه به روانی تغییر یافته ماتریس (خمیر) LC3 انتظار می‌رود که این ترکیب روی قابلیت پمپاژ و پاشش LC3-HPFRCC اثر بگذارد. بدین منظور نیاز به پژوهش در مورد ویژگی روانی HPFRCC مبتنی بر LC3 برای کاربری‌های پاششی وجود دارد [23-24].

HPFRCC معمولاً شامل ۲٪ حجمی از الیاف مصنوعی پلیمری است. الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA)^۵، الیاف پلی‌اتیلن (PE)^۶ و الیاف پلی‌پروپیلن بادوام (HTPP)^۷ پرکاربردترین انواع الیاف هستند [25-26]. برخلاف معیبهی همچون مقاومت و سختی پایین، الیاف PP به‌عنوان الیافی ارزان‌تر نسبت به الیاف PVE یا PE در طراحی HPFRCC برای مقاصد تعمیر و بهسازی به کار می‌روند [27-28]. به دلیل قطر کوچکتر (۱۲ میکرومتر)، تعداد الیاف PP حدود ۱۰/۶ برابر الیاف PVA (قطر ۳۹ میکرومتر) برای یک دوز معین و همان طول الیاف است. مقدار زیاد الیاف PP سبب می‌شود تا پمپاژ و پاشش HPFRCC سخت‌تر شود [29]. روانی ترکیب همچنین روی پخش الیاف PP و عملکرد مکانیکی PP-HPFRCC سفت شده اثر می‌گذارد [30].

ژو و همکاران [24] به بررسی و توسعه یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند بادوام و به صرفه از نظر هزینه پرداختند. سیمان پرتلند معمولی (OPC) و الیاف PVA که معمولاً در HPFRCC مورد استفاده بودند به ترتیب با سیمان LC3 و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) جایگزین شدند. مقاومت فشاری، رابطه تنش - کرنش کششی و رفتار خود - ترمیمی در سه نسبت آب به سیمان (۰/۱۶، ۰/۲ و ۰/۳) مطالعه شدند. HPFRCC جدید یک ظرفیت کرنش کششی بزرگتر از ۰/۶٪ و یک پهنای ترک کمتر از ۸۲ میکرومتر نشان داد. در مقایسه با HPFRCC معمولی ساخته شده از OPC و الیاف PVA، هزینه مواد، انرژی مصرف شده و تولید گاز کربن‌دی‌اکسید LC3-PP-HPFRCC به ترتیب به اندازه ۶۱٪، ۴۵٪ و ۴۸٪ کاهش یافت. ویژگی‌های مکانیکی بهتر و دوام‌پذیری بالاتر همراه با آثار محیطی کم و هزینه پایین تولید مواد باعث شد تا LC3-PP-HPFRCC ماده‌ای ماندگار برای کاربردهای ساختاری و غیرساختاری باشد. در تحقیقی دیگر ژو و همکاران [14] یک

¹ High Performance Fiber Reinforced Concrete

² High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

³ Calcium sulfoaluminate

⁴ Limestone Calcined Clay Cement

⁵ Polyvinyl alcohol Fiber

⁶ Polyethylene Fiber

⁷ High Tenacity Polypropylene Fiber

ج) مرحله پاشش: کیفیت پاشش (اسپری کردن) با عوامل زیادی همچون الگوی پیستوله، مهارت اپراتور نازل، جهت پاشش، فشار هوا و چسبندگی مصالح بررسی می‌شود. چسبندگی مصالح یکی از مهم‌ترین عوامل برای بررسی قابلیت پودرسازی (Atomization) نازلی است که HPFRCC با آن پاشیده شده است. حداقل روانی مورد نیاز برای پودرسازی به صورت (D_{min}^{spray}) در شکل (۱) نشان داده می‌شود.

د) مرحله لایه‌گذاری (منظور ایجاد لایه‌ای از HPFRCC پاششی است، یا مرحله تعمیر): یک ویژگی رئولوژیکی دو مرحله‌ای برای HPFRCC پاششی طراحی شد. در مرحله اول (قبل از پاشش)، روانی بالا برای اختلاط، پمپاژ و هماهنگی زمان کار مورد نیاز، مطلوب است. در مرحله دوم (بعد از پاشش)، جریان‌پذیری HPFRCC تازه باید به سرعت کاهش پیدا کند تا اجازه لایه‌گذاری با ضخامت کافی از مصالح تعمیر روی بستر را بدهد. زمان سکون، بازه‌ای از زمان است که بلافاصله پس از اختلاط و قبل از پاشش تعریف می‌شود. بنابر ویژگی رئولوژیکی دو مرحله‌ای ذکر شده در بالا و به منظور دستیابی به کیفیت پودرسازی و توانایی لایه‌گذاری مناسب، زمان سکون بهینه مورد نیاز است. حداکثر روانی مجاز برای ضخامت مورد نیاز لایه‌گذاری به صورت D_{max}^{spray} تعریف شده است.

ژو و همکاران [14] دریافتند که عدد ۲/۵، حداکثر روانی مجاز (D_{max}^{spray}) برای الزام لایه‌گذاری HPFRCC پاششی است. اگرچه روانی (>2.5) ممکن است ضخامت کافی را با افزایش چسبندگی مصالح همچون عامل پیوند یا زبری سطح تامین کند، اما توصیه می‌شود که مقدار جریان‌پذیری برابر با ۲/۵ را به طور محافظه‌کارانه به عنوان مقدار حداکثری برای لایه‌گذاری مصالح پاشیده شده در نظر گرفت. در سمت دیگر، روانی شدیداً کم نیز ممکن است مانعی در برابر پاشش HPFRCC باشد. با میزانی کمتر از جریان‌پذیری بحرانی حداقل، HPFRCC پاشیده شده نمی‌تواند به کیفیت پودرسازی مناسبی دست پیدا کند. فشار هوای بیشتر نیز پودرسازی مصالح را آسان‌تر می‌کند. با این وجود، فشار اضافی سبب جدا شدن الیاف PP از مخلوط می‌شود. در PP-HPFRCC پاششی، وقتی فشار هوا بیشتر از 500 kPa باشد، الیاف PP از مخلوط جدا می‌شوند.

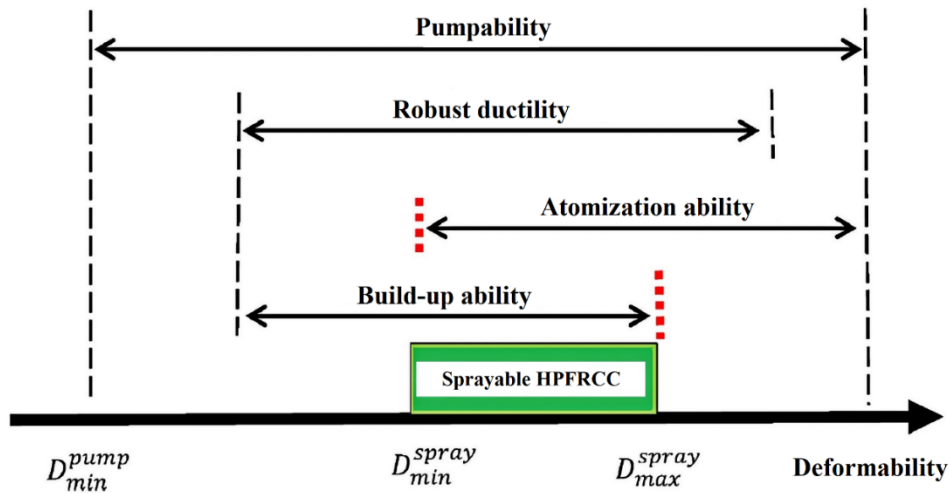
HPFRCC پاششی با استفاده از سیمان LC3، افزودنی سولفا آلومینات کلسیم (CSA) و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به منظور افزایش دوام و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه دادند. قابلیت پاشش و عملکرد مکانیکی این کامپوزیت با آزمایش‌های میز جریان (Flow table test) و کشش تک‌محوری بررسی شد. هنگام پاشش و در مقایسه با نمونه‌های تهیه شده به روش قالب‌گیری، HPFRCC دارای مقاومت فشاری قابل مقایسه با ظرفیت کرنش کششی بالاتر (۷/۵٪) و عرض ترک کاهش یافته‌تر (۳۰ میکرومتر در ۱٪ کرنش کششی) است.

کنترل مواد تشکیل‌دهنده طرح اختلاط در حالت تازه به منظور دستیابی به انواع مختلف HPFRCC ضروری است. در حالی که شاخص‌های مختلفی همچون لزجت (ویسکوزیته) و فشار پمپ برای طراحی بتن پاششی به کار می‌رود، قابلیت جریان‌پذیری (روانی) با آزمایش جریان اسلامپ به عنوان یک شاخص ساده و عملی ارائه شده است. شکل (۱) قاعده طراحی مفهومی HPFRCC پاششی را با استفاده از شاخص جریان‌پذیری مطابق مرجع [14] به تصویر می‌کشد. لزوم کنترل روانی در مراحل مختلف پردازش متفاوت خواهد بود:

الف) مرحله اختلاط: یک لزجت متوسط می‌تواند پخش یکنواخت الیاف را تضمین و منجر به ایجاد یک ویژگی سخت‌شدگی کرنشی پایدار شود. علاوه بر این، جریان‌پذیری (روانی) کم به منظور رسیدن به اثر پایدار سخت‌شدگی کرنشی در PP-HPFRCC ترجیح داده می‌شود.

ب) مرحله پمپاژ: قبل از پاشش، HPFRCC تازه به وسیله یک پمپ از میکسر به نازل منتقل می‌شود. برای پمپاژ از طریق شلنگ با فشار پمپ مناسب، HPFRCC تازه به روانی اولیه بالایی برای این کار نیاز دارد که آن را به عنوان روانی پمپاژ حداقل (D_{min}^{pump}) تعریف می‌کنند (شکل ۱).

از آنجایی که کارایی در بازه زمانی بین پایان اختلاط و آغاز پمپاژ کاهش می‌یابد، جریان‌پذیری پمپاژ حداقل (D_{min}^{pump}) کمتر از مقدار حداقل جریان‌پذیری پایدار (Robust Ductility) است. در سمت دیگر، یک ملات با روانی بالا، حتی مانند آب را می‌توان پمپاژ کرد اما لزجت پایین آن برای پخش الیاف PP کافی نمی‌باشد. از این جهت، بازه شاخص روانی برای پمپاژ بزرگتر از جریان‌پذیری پایدار خواهد بود.



شکل ۱. قاعده طراحی مفهومی ملات‌های الیافی پاششی با استفاده از شاخص جریان‌پذیری (روانی) [14]

Fig. 1. Material deformability principle for designing sprayable HPFRCC [14]

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند معمولی، رس خام و رس کلسینه

شده (MK)

Table 1. Chemical composition of materials used to make HPFRCC

	OPC (%)	RC (%)	MK (%)
CaO	62.3	1.2	1.3
SiO ₂	16.5	73.7	78.8
L.O.I	5.9	6.63	0.46
SO ₃	4.7	0.047	0.074
Fe ₂ O ₃	3.4	0.306	0.324
Al ₂ O ₃	3.4	17.36	18.18
MgO	1.2	0.204	0.23
K ₂ O	1	0.213	0.23
Na ₂ O	0.5	0.057	0.071
MnO	0.4	0.012	0.011
TiO ₂	0.2	0.029	0.037
Sr	0.2	0.025	0.02
P ₂ O ₅	0.08	0.063	0.074
Ba	0.07	0.039	0.026
Cl	0.03	0.011	0.007
Pb	0.03	0.013	-
Zn	0.02	0.004	0.005
Ga	-	0.002	0.002
As	-	0.01	0.007
Rb	-	0.001	-
Cu	0.01	-	0.003
Kaolinite (%)	-	41	-

این تحقیق قصد دارد تا یک HPFRCC پاششی با مزایای همچون شکل‌پذیری بسیار بالا، انقباض و کربن کم، و هزینه پایین تشکیل دهد. سیمان LC3 و ۲ درصد حجمی الیاف PP برای رسیدن به این ویژگی‌ها به کار رفت. بازه جریان‌پذیری (روانی) مناسب به منظور پاشش با آزمایش میز جریان اسلامپ مطابق با ASTM C1437 [31] ارزیابی شد. آزمایش‌های پاشش به منظور تایید قابلیت پاشش و توانایی ایجاد لایه پاششی نیز صورت گرفت. خواص مکانیکی HPFRCC پاششی با پارامترهایی از جمله مقاومت فشاری، عملکرد کششی مستقیم و خمشی مورد بررسی قرار گرفت. در انتها نیز به بررسی تفاوت خواص مکانیکی نمونه‌های پاششی و قالبی (درجا ریخته شده) پرداخته خواهد شد.

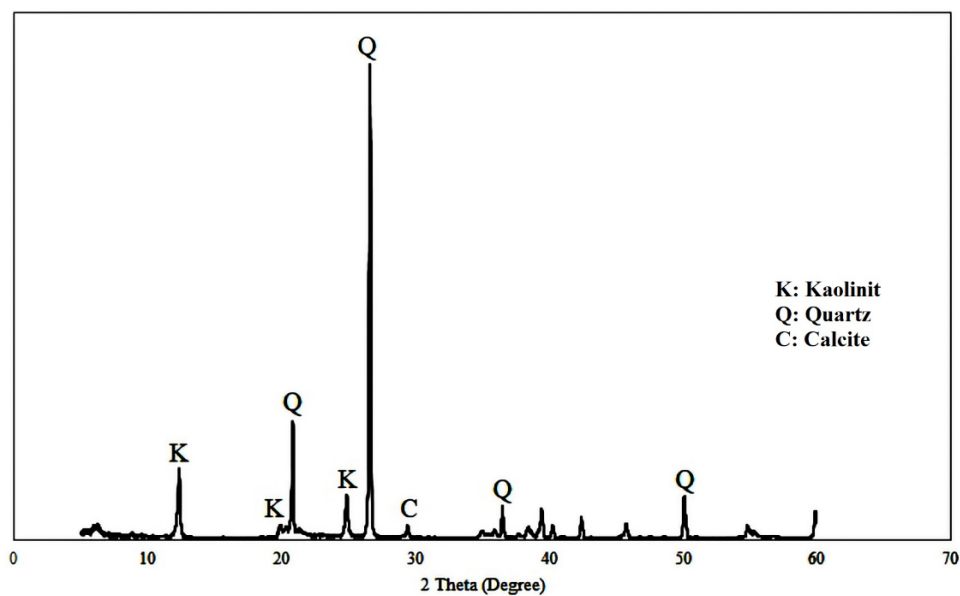
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح آزمایشگاهی

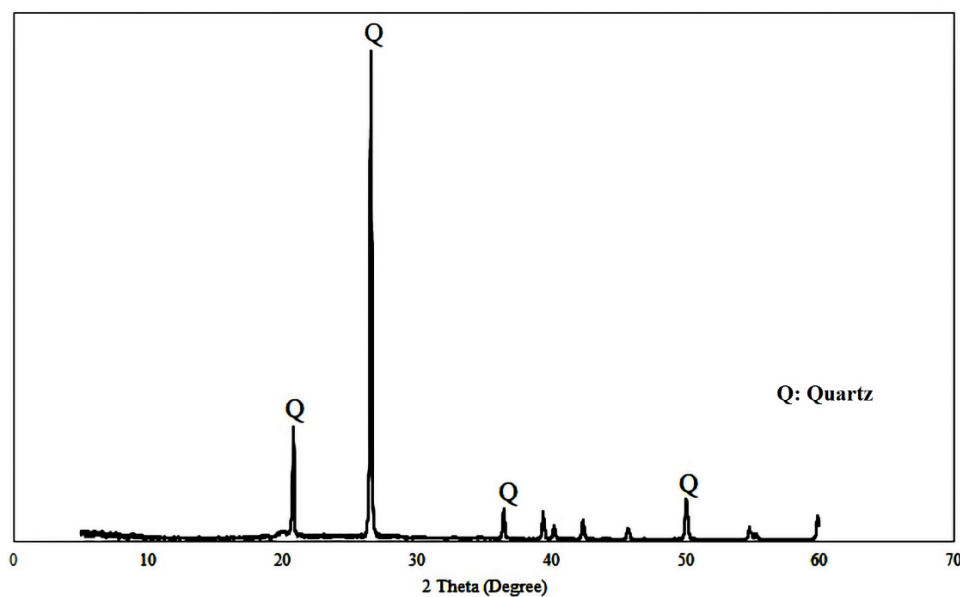
رس خام (RC) استفاده شده در این تحقیق از معدن مرنند- تبریز تهیه شد که دارای درصد بالای کائولینیت (حدود ۴۱٪) و ناخالصی‌های حرارت‌پذیر کم است. با توجه به بررسی‌های اولیه، دمای کلسیناسیون برای این رس ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (مدت ۱ ساعت در کوره الکتریکی بستر ثابت) انتخاب شد و نتایج XRD شکل (۲) نیز نشان داد که تبدیل کامل کائولینیت به فاز آمورف متاکائولن در همین دما حاصل می‌شود. پس دماهای بالاتر می‌تواند فعالیت پوزولانی را محدود کند. جدول (۱) مشخصات شیمیایی

شده (کلسینه شده) استفاده شد. همچنین شکل (۲) نشان دهنده نتایج آزمایش XRD رس خام و کلسینه شده می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فازهای تبلور رس کلسینه شده شامل کوارتز بوده که عملیات حرارت‌دهی، منجر به ناپدید شدن پیک کائولینیت و ظاهر شدن پیک ۲ تا بین زوایای ۲۰ الی ۳۰ درجه شده است که قله‌های کوچک‌تر شکل‌گیری فاز آمورف (پوزولانی) را نشان می‌دهد. پودر سنگ‌آهک، یک محصول جانبی از معدن سنگ‌آهک بوده که به طور گسترده به عنوان ماده افزودنی،

سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱ ساوه (OPC)، رس خام و کلسینه شده (متاکائولن یا MK) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که رس کلسینه شده یک اصطلاح کلی برای انواع رس‌های حرارت دیده است و تنها بخشی از آن‌ها که منشأ کائولینیتی با درصد بالای کائولینیت دارند، با این روش به متاکائولن تبدیل می‌شوند؛ به عبارتی، متاکائولن محصول کلسیناسیون رس کائولینیتی خاص بوده و معادل کل رس‌های کلسینه شده محسوب نمی‌شود. با این حال در این تحقیق از واژه متاکائولن (MK) به جای رس حرارت داده



الف) رس خام



ب) رس کلسینه شده

شکل ۲: پراش اشعه پرتو ایکس

Fig. 2. X-ray diffraction analysis of row clay (RC) and calcined clay (MK): (a) RC; and (b) MK

سنگ‌آهک و ۵ درصد سنگ گچ می‌باشد [20, 23-24]. بدین منظور میزان جایگزینی سیمان معمولی با سیمان LC3 در این تحقیق ۴۵ درصد به شرح ۵۵ درصد سیمان معمولی، ۳۰ درصد متاکائولن و ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک است. به بیان بهتر، به دلیل استفاده مستقیم از سیمان پرتلند (OPC) و عدم استفاده از کلینکر، گچ از طرح اختلاط حذف می‌شود.

در این تحقیق، پودر سنگ‌آهک (LS) به دو صورت استفاده شده است: (۱) به‌عنوان بخشی از ترکیب سیمان LC3 (LC3-LS) و جزئی از فرمولاسیون استاندارد سیمان‌های سه جزئی به شمار می‌رود. (۲) به صورت پرکننده خنثی (Filler-LS) که تنها برای کاهش فضای خالی و بهینه‌سازی روانی مخلوط اضافه شده است. این دو کاربرد در جدول برای جلوگیری از ابهام به‌صورت مجزا ذکر شده‌اند.

در جدول (۲) نسبت آب به مواد جامد (W/S)، نسبت جرمی کل آب به مجموع تمام اجزای جامد (پودری/دانه‌ای) موجود در طرح اختلاط می‌باشد. این اجزا شامل سیمان LC3 (خود شامل سیمان OPC، رس کلسینه شده و پودر سنگ‌آهک درون ترکیب است)، پودر سنگ‌آهک اضافی (Filler-LS) و ماسه سیلیسی می‌باشد. این نسبت با نسبت متداول آب به بایندر متفاوت است.

ترتیب اختلاط مصالح در این تحقیق مطابق مرجع [30] می‌باشد. شکل (۳) ترتیب اختلاط مصالح در این تحقیق را نشان می‌دهد. در انتها با پایان عملیات اختلاط مواد داخل قالب‌های مشخص پاشش (نمونه‌های پاششی) و ریخته (نمونه‌های قالبی) شده به طوری که یک روز بعد از قالب خارج می‌شوند و تحت شرایط عمل‌آوری در آب به مدت ۲۸ روز قرار می‌گیرند.

فیلر، رقیق‌کننده و واکنش‌دهنده شیمیایی در سیمان به کار گرفته می‌شود. پودر سنگ‌آهک مورد استفاده در این تحقیق (LS) تهیه شده از معادن استان قم می‌باشد. لازم به توضیح است که رس کلسینه شده و پودر سنگ‌آهک مصرفی تا ریزی مورد نظر آسیاب شدند به طوری که درصد باقی‌مانده مصالح مصرفی روی الک ۲۹۷ میکرون ۹/۷ و ۱۵/۷ درصد به ترتیب می‌باشد (درصد باقی‌مانده مصالح مصرفی روی الک ۵۳ میکرون ۲۸ و ۴۴ درصد است). همچنین سنگ‌دانه‌های مورد مصرف در این تحقیق (SS) از نوع ریزدانه (ذرات رد شده از الک شماره ۵۰ و باقی‌مانده روی الک ۱۰۰) و ماسه سیلیسی می‌باشد. فوق‌روان‌کننده (HRWRA) مورد استفاده در این تحقیق بر پایه پلی‌کربوکسیلیک است.

طرح مخلوط‌های بررسی شده در جدول (۲) ارائه شده‌اند. تمامی این طرح‌ها دارای الیاف ثابتی از جنس پلی‌پروپیلن می‌باشند. خواص مکانیکی الیاف مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) نشان داده شده است. در تحقیقی که توسط کریم‌پور و مظلوم [32] صورت گرفت ثابت شد درصد و طول بهینه الیاف پلی‌پروپیلن برای دستیابی به خواص مکانیکی قابل قبول به ترتیب ۲ درصد و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین درصد حجمی و طول الیاف به کار برده شده در تمامی طرح مخلوط‌های این تحقیق ثابت و مقدار ۲ درصد و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. در نام‌گذاری طرح مخلوط‌ها حروف A مربوط به نمونه‌های پاششی و B مربوط به نمونه‌های قالبی می‌باشد. همچنین عدد دوم اشاره به نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی دارد.

در تحقیقات مختلف ثابت شده است میزان بهینه جایگزینی سیمان معمولی با سیمان LC3 مقدار ۵۰ درصد به شرح ۵۰ درصد کلینکر، ۳۰ درصد رس کلسینه شده (MK)، ۱۵ درصد پودر

جدول ۲. طرح مخلوط‌های مورد بررسی (درصد وزنی)

Table 2. Mix proportions used to make HPFRCC

Mix	OPC	MK	LC3-LS	Filler - LS	SS	Water	HRWRA *	PP fiber vol%	W/S**
A-1.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	1.5	2	0.3
A-2	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2	2	0.3
A-2.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2.5	2	0.3
A-3	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	3	2	0.3
B-2.5	0.55	0.3	0.15	0.5	0.5	0.6	2.5	2	0.3

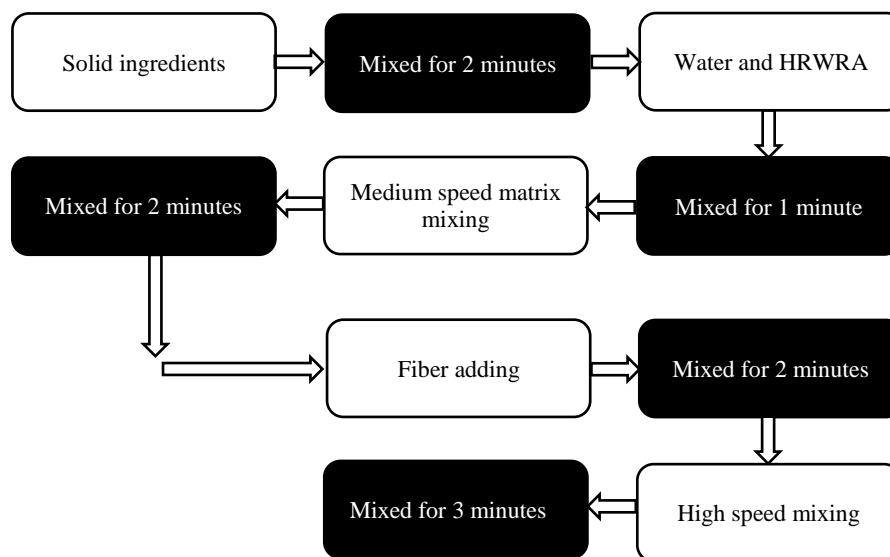
* Superplasticizer-to-binder ratio

** Water-to-solid ingredient ratio (OPC+MK+LC3-LS+Filler-LS+SS)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی پروپیلن

Table 3. Properties of PP fiber

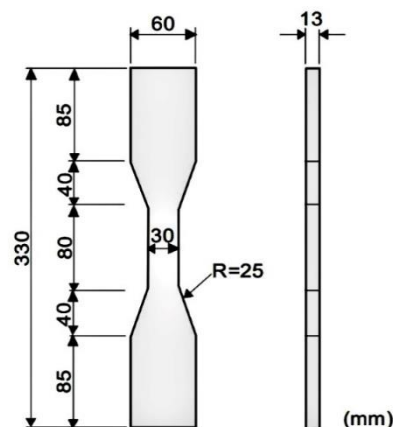
Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Density (Kg/m ³)	Melting point (°C)	(L _f /d _f)
PP	0.035	12	350-400	3.5	910	160	343



شکل ۳. ترتیب اختلاط مصالح

Fig.3. Order of mixing materials

بررسی مقاومت کششی مستقیم نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این شکل از دو LVDT با هدف بدست آوردن جابه‌جایی استفاده شد. به بیان بهتر، روی بخش میانی هر نمونه دمبلی شکل دو عدد LVDT با دقت بسیار بالا نصب شد و طول گیج برابر ۸۰ میلی‌متر انتخاب شد تا جابه‌جایی خالص سنجیده شود. سیگنال‌ها در طول کل بارگذاری ثبت و بر اساس داده‌های جابه‌جایی خالص، منحنی تنش - کرنش رسم شد. لازم به توضیح است نتایج ارائه شده برای کرنش نمونه‌ها، کرنش مهندسی بوده و با این فرض که تغییر طول به طور یکنواخت در طول معینی از تمام نمونه‌ها (طول اولیه یکسان برای تمامی نمونه‌ها) توزیع شده است، بدست آمده است. با این حال در برخی از موارد، به ویژه در شرایطی که ترک‌ها فقط در نواحی خاصی (لوکالیزه شدن) به وجود می‌آید، تقسیم تغییر طول نمونه به طول اولیه یکسان ممکن است نتایج دقیقی را ارائه ندهد و کرنش مهندسی باید بر اساس تغییر طول در نواحی خاص محاسبه شود. پس در مطالعات توجه به این مورد ضروری می‌باشد. همچنین از نمونه‌های منشوری به ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰



شکل ۴. ابعاد نمونه‌های دمبلی شکل

Fig.4. Dog-bone-shaped samples

۲-۲- آزمایش‌های انجام گرفته

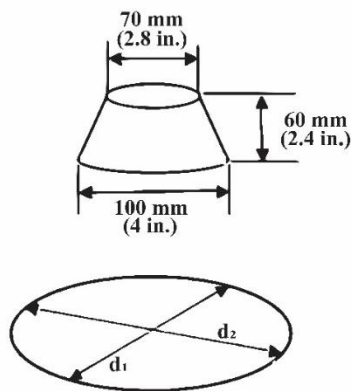
به منظور بررسی خواص مکانیکی طرح مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق از مقاومت فشاری، کششی مستقیم و خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. برای بررسی مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C109/C109M-20a [33] استفاده شد. از نمونه‌های دمبلی شکل مطابق شکل (۴) برای آزمایش کشش مستقیم مطابق با استاندارد



شکل ۶. چیدمان خمش سه نقطه‌ای
Fig.6. Three point bending test setup



شکل ۵. چیدمان کشش مستقیم
Fig.5. Direct tensile test setup



شکل ۷. مخروط اسلامپ مورد استفاده قرار گرفته برای آزمایش روانی
Fig. 7. Schematic diagram of the mini-slump cone used to determine the deformability index

باتوجه به مطالب ارائه شده در جدول (۴)، طرح مخلوط A-2.5 با زمان سکون ۱۰ دقیقه به‌عنوان طرح مخلوط نهایی مناسب برای پاشش انتخاب شد. به بیان بهتر این طرح مخلوط باگذشت زمان ۱۰ دقیقه میزان روانی ۲/۵ (بیشترین روانی مجاز مطابق مراجع قبلی) و باگذشت زمان ۲۰ دقیقه میزان روانی ۲/۲۳ دارد. در ادامه خواص مکانیکی این طرح مخلوط به صورت پاششی و قالبی مورد مقایسه قرار گرفت.

میلی‌متر برای بررسی مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها مطابق با مرجع [28] استفاده شد. شکل (۶) چیدمان آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد که از یک LVDT برای ثبت جابه‌جایی در مرکز نمونه استفاده می‌شود. لازم به توضیح است که برای هر طرح مخلوط ۳ عدد نمونه مکعبی، ۳ عدد نمونه دمبلی شکل و سه عدد نمونه منشوری به منظور انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۳- نتایج

۱-۳- آزمایش جریان اسلامپ

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود یک مخروط اسلامپ کوچک (با قطر $d_0 = 10$ cm) به منظور اندازه‌گیری و سنجش کمی روانی مورد استفاده قرار گرفت. ملات تازه حاصل، برای آزمایش جریان اسلامپ (Flow table test) در بازه‌های ده دقیقه‌ای به کار رفت به طوری که پس از برداشتن مخروط، آزمایش جریان اسلامپ مطابق با ASTM C1437 [31]، انجام شد (۲۵ ضربه در ۱۵ ثانیه). بیشترین قطر افزایش یافته (d_1) و قطر عمود بر d_1 (با علامت d_2) ثبت شده و برای محاسبه شاخص روانی (D) مطابق مرجع [14] مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۴. شاخص روانی طرح مخلوط‌های مورد بررسی

Table 4. Deformability index as a function of time for mixes

Mix	D at start	D at 10 min	D at 20 min
A-1.5	3	1.89	1.4
A-2	3	2.2	2.06
A-2.5	3	2.42	2.23
A-3	3.4	2.8	2.42
B-2.5	3	2.42	2.23

۲-۳- مقاومت فشاری

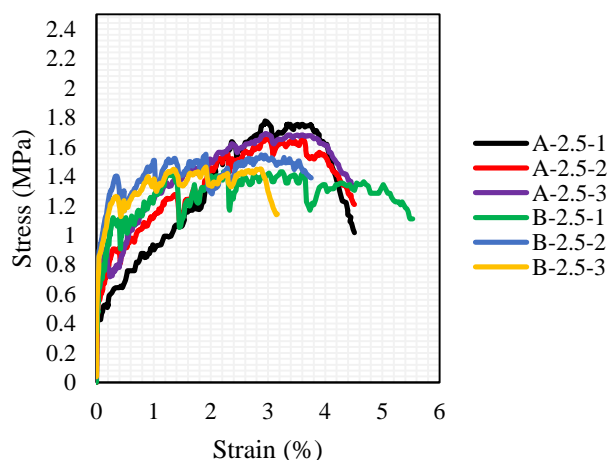
متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های قالبی ۲۰ (مقاومت فشاری نمونه اول ۱۹/۵، نمونه دوم ۲۰/۵ و نمونه سوم ۲۰) و پاششی ۱۸ (مقاومت فشاری نمونه اول ۱۷/۵، نمونه دوم ۱۹ و نمونه سوم ۱۸) مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به این موضوع که طرح مخلوط‌های نوشته شده در این تحقیق با هدف کاربرد آن‌ها در تعمیر، مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد انواع المان‌های سازه‌ای می‌باشد بهبود رفتار کششی مستقیم و خمشی آنها از اهمیت بالاتری نسبت به مقاومت فشاری برخوردار بوده است.

در تحقیقی که توسط هوآنگ و همکاران [28] منتشر شد، یک بررسی سیستماتیک از مواد سیمانی الیافی قابل پاشش با شکل‌پذیری بالا از طرح مواد تا کاربردهای عملی آن به منظور مقاوم‌سازی تیرهای بتنی ارائه شد. در این تحقیق یک HPFRCC قابل اسپری با استفاده از مواد پایه سیمانی، آب، ماسه سیلیسی ریزدانه، فوق‌روان‌کننده پلی کربوکسیلات (SP)، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) و الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) تولید شد. مواد پایه سیمانی شامل پرتلند معمولی و خاکستر بادی بودند. آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های پاششی و قالبی به ترتیب ۲۱ و ۱۸ مگاپاسکال می‌باشد. ژو و همکاران [14] یک ماده پایه سیمانی الیافی توانمند با استفاده از سیمان LC3، افزودنی سولفا آلمینات کلسیم (CSA) و الیاف پلی‌پروپیلن (PP) به منظور افزایش دوام و مضر نبودن برای محیط‌زیست توسعه دادند. نمونه‌ها هم به روش قالب‌گیری و هم به روش پاششی تهیه شدند. آن‌ها دریافتند که میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های قالبی و پاششی به ترتیب ۲۲ و ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد.

۳-۳- کشش مستقیم

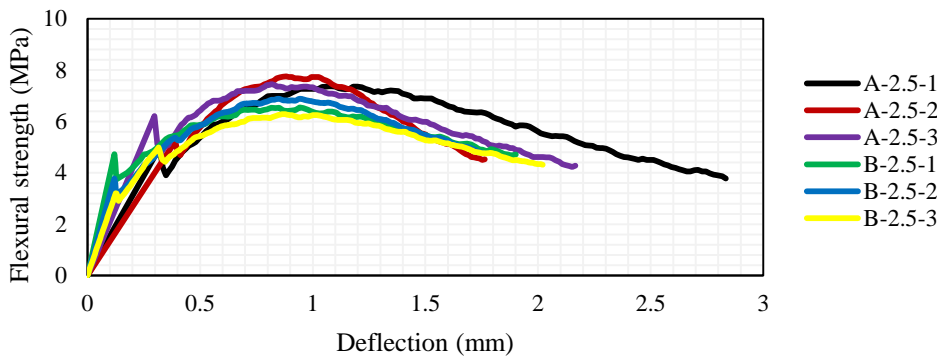
شکل (۸) نمودارهای تنش- کرنش کششی نمونه‌های مورد

بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد (سه نمونه برای روش پاششی و سه نمونه برای روش قالبی). با توجه به این شکل می‌توان دریافت که نمونه‌های پاششی مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های قالبی داشته با این حال ظرفیت کرنش کششی آن‌ها تقریباً برابر است. شکل (۹) چگونگی پاشش طرح مخلوط مورد نظر (A-2.5) را نشان می‌دهد. روش پاشش مورد استفاده در این پژوهش از نوع افقی یا جانبی بوده و جهت‌گیری کلیه قالب‌ها در طول فرآیند پاشش به صورت عمودی می‌باشد، به گونه‌ای که لایه ملات بر سطح داخلی قالب‌ها نشسته است. منظور از پاشش افقی، اعمال ملات با حرکت افشانه به صورت جانبی به سمت دیواره قالب عمودی است. در انتها نیز سطح قالب‌های مورد نظر صاف می‌شود. شایان ذکر است ظرفیت کرنش کششی بالای ثبت شده در شکل (۸)، پیش‌تر در تحقیقات گسترده توسط نویسندگان گزارش شده است [35-37]. در این تحقیقات ۱۸ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. به طوری که طرح اختلاط‌های نوشته شده حالات مختلفی از نوع سیمان، حالات مختلفی از نوع فیلر، مقدار آنها و حالات مختلفی از نسبت آب به مواد جامد را در بر می‌گرفتند. طرح اختلاط بهینه حاصل به دلیل ریزساختار متراکم، پراکندگی یکنواخت الیاف و پیوند مناسب بین الیاف و ماتریس شکل‌پذیری بسیار بالایی از خود نشان داد. طرح اختلاط استفاده شده در مطالعه حاضر همان طرح اختلاط بهینه این تحقیقات می‌باشد.

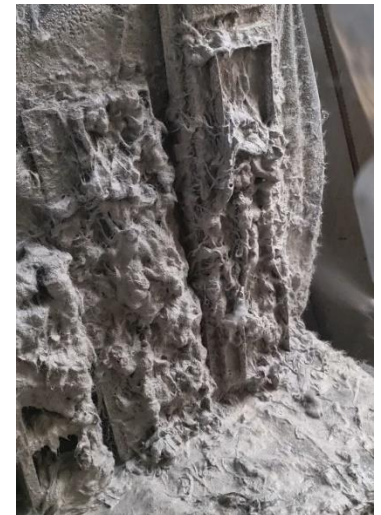


شکل ۸. نمودار تنش - کرنش کششی

Fig. 8. Tensile stress-strain curves of the specimens



شکل ۱۰. نمودار خمش سه نقطه‌ای
Fig. 10. Load-deflection curves of samples



شکل ۹. چگونگی پاشش نمونه‌ها
Fig. 9. The procedure of samples spray

۳-۴- خمش سه نقطه‌ای

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود نمودار خمش سه نقطه‌ای طرح مخلوط‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این شکل نمودار خمشی سه نمونه پاششی A-2.5-1، A-2.5-2 و A-2.5-3 و سه نمونه قالبی (B-2.5-1,2,3) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که نمونه‌های پاششی مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های قالبی داشته با این حال ظرفیت تغییر شکل خمشی آن‌ها تقریباً برابر است. لازم به ذکر است در آزمون خمش سه نقطه‌ای، مقادیر بار ثبت شده توسط دستگاه با استفاده از رابطه مربوطه به مقاومت خمشی تبدیل شدند. بنابراین، عنوان محور عمودی مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال می‌باشد. هوآنگ و همکاران [28] در تحقیقی به بررسی خواص خمشی (از نمونه‌های منشوری به ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر استفاده شد) کامپوزیت‌های سیمانی الیافی حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل پرداختند. آنها در این تحقیق به منظور آزمایش خمش سه نقطه‌ای با سرعت ثابت 0.2 میلی‌متر بر دقیقه از دستگاه 250-kN-INSTRON استفاده کردند. محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها از دهانه تیر مورد آزمایش واقع شده 120 میلی‌متر بوده و از یک جفت LVDT برای اندازه‌گیری تغییر شکل خمشی وسط دهانه تیر استفاده شد. منحنی‌های تنش برحسب تغییر شکل خمشی نمونه‌های اسپری شده و قالبی در روز ۱۴ و ۲۸ بدست آمدند. مشاهده شد که مقاومت و ظرفیت تغییر شکل خمشی نمونه‌های اسپری شده هم در روز ۱۴ و هم ۲۸ بالاتر

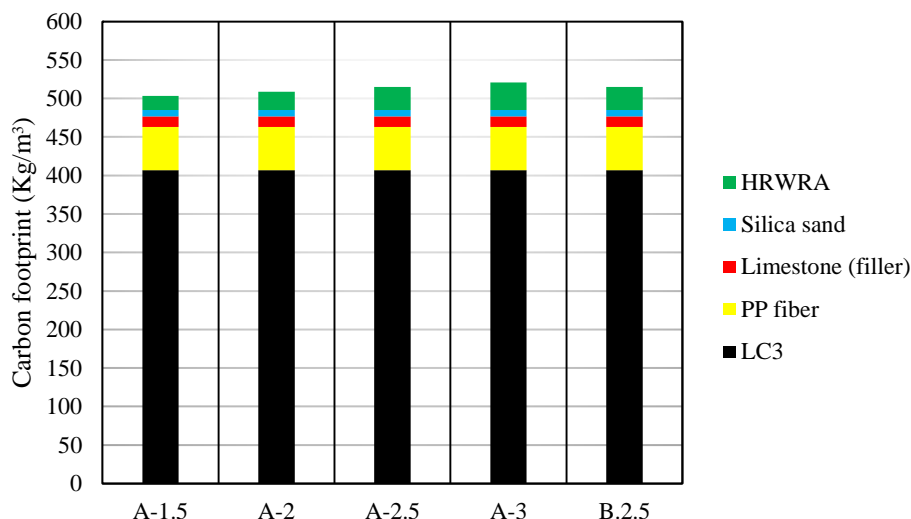
از نمونه‌های قالبی می‌باشد.

۳-۵- شاخص عملکرد مواد (MSI)

به منظور ارزیابی عملکرد طرح مخلوط‌های ساخته شده، شاخص عملکرد مواد (MSI)^۱ از نقطه نظر انرژی مصرف شده و تولید کربن بکار گرفته شد. انرژی مصرف شده همان انرژی کل مورد نیاز برای ساخت ماده و تولید کربن نشان دهنده مقدار کل گازهای گلخانه‌ای (در اینجا CO_2) مرتبط با تولید مواد از جمله استخراج، پردازش، احتراق سوخت، حمل‌ونقل و غیره می‌باشد. داده‌های MSI برای مولفه‌های طرح مخلوط‌ها در جدول (۵) لیست شده و این مقادیر میانگین تخمین زده شده از مقالات و مراجع مختلف هستند به بیان بهتر، ضرایب انرژی مصرف شده و میزان تولید کربن برای هر جزء سازنده طرح اختلاط، از مقادیر میانگین گزارش شده در منابع معتبر استخراج شده است [24]. لازم به توضیح است داده‌های MSI مورد بحث در این تحقیق، بر روی تحلیل عملکرد در سطح مواد طرح مخلوط‌ها تمرکز کرده و برای یک ارزیابی عملکرد دقیق‌تر می‌توان مدل ارزیابی چرخه عمر (LCA)^۲ را بکار برد. شکل (۱۱ و ۱۲) میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف انرژی به ازای هر مترمکعب از طرح مخلوط‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید هر طرح اختلاط با استفاده از رابطه

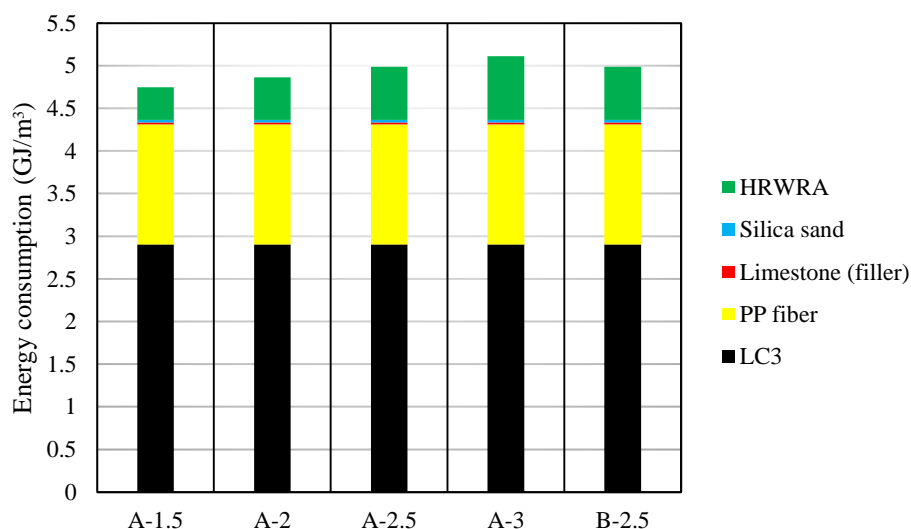
¹ Material Sustainability Index

² Life Cycle Assessment



شکل ۱۱. میزان تولید گاز کربن دی‌اکسید به ازای هر مترمکعب

Fig. 11. Carbon dioxide footprint of mix designs



شکل ۱۲. میزان مصرف انرژی به ازای هر مترمکعب

Fig. 12. Energy consumption of mix designs

میزان مصرف انرژی هر طرح اختلاط با استفاده از رابطه $\sum_{i=1}^n (m_i \times f_i^E)$ محاسبه شد. در این رابطه، m_i جرم جز نام از هر طرح اختلاط (تن بر مترمکعب) و f_i^E ضریب انرژی مصرف شده آن مطابق داده‌های جدول (۵) (گیگاژول بر تن) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی میزان تولید گاز کربن دی‌اکسید و مصرف انرژی افزایش می‌یابد. در نهایت امکان ساخت یک ماده پایه سیمانی الیافی توانمند، سازگار با محیط‌زیست و پاششی میسر شد. جدول (۶) تفاوت کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند پاششی

جدول ۵. شاخص عملکرد مواد [24]

Table 5. Embodied energy and carbon dioxide emissions of mix ingredients [24]

MSI	LC3	PP	SS	LS	HRWRA	Water
Energy (GJ/ton)	4	77.24	0.067	0.08	35	0
CO ₂ (Kg/ton)	560	3100	23.3	37.1	1667	0

از هر طرح اختلاط (تن بر مترمکعب) و $f_i^{CO_2}$ ضریب انتشار آن مطابق داده‌های جدول (۵) (کیلوگرم بر تن) می‌باشد. همچنین

ماتریس می‌توان اثر منفی هواگیری در هنگام فرآیند پاشش را کاهش داد.

۲- مقاومت فشاری نمونه‌های قالبی (درجا ریخته شده) نسبت به نمونه‌های اسپری شده به میزان ۱۱ درصد بالاتر می‌باشد. علت این امر تفاوت در چگالی ظاهری و به دنبال آن میزان تخلخل آن‌ها می‌باشد. به بیان بهتر به دلیل تخلخل کمتر نمونه‌های قالبی میزان مقاومت فشاری آن‌ها بیشتر است.

۳- مقاومت خمشی و کششی نمونه‌های قالبی (درجا ریخته شده) نسبت به نمونه‌های اسپری شده به میزان ۱۴ و ۲۲ درصد به ترتیب کمتر می‌باشند. با این حال ظرفیت تغییر شکل خمشی و ظرفیت کرنش کششی آن‌ها تقریباً برابر است. این را می‌توان با این حقیقت توضیح داد که به دلیل تراکم پنوماتیکی در هنگام فرآیند اسپری کردن، توزیع (پخش) الیاف در نمونه‌های پاششی یکنواخت‌تر بوده و سبب مقاومت خمشی و کششی بیشتر می‌شود.

۴- می‌توان دریافت که آزمایش میز جریان یک روش ساده و عملی برای طراحی HPFRCC پاششی می‌باشد. شاخص روانی حداکثر برابر با ۲/۵ به منظور ضخامت لایه‌گذاری بدون چکیدن و شاخص روانی حداقل ۱/۸ برای کیفیت پودرسازی مناسب HPFRCC در نازل سفارش می‌شود. بدین منظور توصیه می‌شود نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند حاوی رس کلسینه شده مقدار ۲/۵ درصد برای پاشش انتخاب شود. در این نسبت مقدار روانی بعد از گذشت ۱۰ دقیقه (زمان سکون) به عدد ۲/۵ می‌رسد.

جدول ۶. تفاوت کامپوزیت سیمانی الیافی پاششی با کامپوزیت الیافی توانمند M45-ECC

Table 6. Comprehensive properties of A-2.5 and M45-ECC

	A-2.5	M45-ECC
Compressive strength	18 MPa	40 MPa
Peak stress	1.8 MPa	4 MPa
Strain capacity at the peak stress	3.5	3
CO ₂ emission	515 Kg/m ³	650 Kg/m ³
Energy consumption	4.9 GJ/m ³	6.2 GJ/m ³
Cost ratio	1	1.68

توسعه داده شده به کمک مصالح محلی در این تحقیق (A-2.5) با کامپوزیت الیافی توانمند M45-ECC را نشان می‌دهد. کامپوزیت الیافی M45-ECC یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین مواد پایه سیمانی الیافی توانمند بوده که معمولاً با سیمان پرتلند معمولی (۵۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب)، خاکستر بادی (۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، ماسه سیلیسی (۴۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب)، آب (۲۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب) و افزودن فوق‌روان‌کننده ساخته می‌شود. الیاف به کار برده شده در کامپوزیت M45-ECC الیاف PVA (۲ درصد حجمی) می‌باشد. نتایج نشان داد که این طرح با بهره‌گیری از سیمان LC3 و الیاف PP، در مقایسه با M45-ECC، حدود ۲۱ درصد انرژی مصرف شده و ۲۰ درصد انتشار گاز کربن دی‌اکسید کمتر دارد. این بهبود چشمگیر ناشی از کاهش میزان کلینکر مصرفی، جایگزینی الیاف کم‌انرژی و استفاده از منابع محلی است که موجب ارتقای همزمان پایداری و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند پاششی (HPFRCC) با استفاده از منابع محلی شامل سیمان LC3 و الیاف پلی‌پروپیلن معمولی توسعه داده شد تا ضمن کاهش آثار زیست‌محیطی، عملکرد مکانیکی مناسبی نیز ارائه دهد. بررسی‌های اسلامپ نشان داد که طرح A-2.5 با شاخص روانی اولیه ۳ و افت کنترل شده در ۲۰ دقیقه، بهترین توازن بین قابلیت پاشش و لایه‌گذاری را دارد. در کنار دیگر ویژگی‌های این کامپوزیت، می‌توان به تولید کم، هزینه پایین و شکل‌پذیری بسیار بالا اشاره کرد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای تعمیرات و بهسازی زیرساخت‌ها تبدیل می‌کند. بنابراین، طرح A-2.5 را می‌توان به عنوان یک گزینه برتر در ترکیب خواص مکانیکی، مزایای زیست‌محیطی و صرفه اقتصادی معرفی کرد. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- فرآیند پاشش روی میزان هوای مخلوط (ماتریس) و خواص مکانیکی HPFRCC پاشیده شده اثر می‌گذارد. معمولاً با به حداقل رساندن حفرات هوا یا بیرون کردن هوای اضافی از

(آزمایشگاه سازه و زلزله) قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

در انجام این پژوهش سهم نویسندگان یکسان است.

منابع مالی

این پژوهش بدون استفاده از منبع و حمایت مالی صورت پذیرفته است.

۵- میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف انرژی نمونه‌های پاششی نسبت به نمونه‌های قالبی بیشتر می‌باشد. دلیل این موضوع میزان مصرف فوق‌روان‌کننده زیاد برای رسیدن به لزجت مناسب در نمونه‌های پاششی است. به عنوان نمونه در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند حاوی رس کلسینه شده می‌توان نمونه‌های قالبی با میزان نسبت ۱/۵ درصد فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی ساخت این درحالی است که حداقل میزان نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی برای ساخت نمونه‌های پاششی ۲/۵ درصد می‌باشد.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های دانشگاه تربیت مدرس

References

- [1] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2019. Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers. *Advances in Materials Research*, 8(2), pp.137-154. <http://dx.doi.org/10.12989/amr.2019.8.2.137>.
- [2] Dopko, M., Najimi, M., Shafei, B. and et al., 2018. Flexural performance evaluation of fiber-reinforced concrete incorporating multiple macro-synthetic fibers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672, pp.1–12.
- [3] Yazıcı, S., Inan, G. and Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, pp.1250–1253.
- [4] Thomas, J. and Ramaswamy, A., 2007. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, pp.385–392.
- [5] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2021. Fracture of fiber-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 73(14), pp.701-713. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00401>.
- [6] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. and et al., 2015. A review on basalt fiber and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, pp.74–94.
- [7] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S., 2021. Computing the fracture energy of fiber reinforced cementitious composites using response surface methodology. *Advances in Computational Design*, 6(3), pp.225-239. <http://dx.doi.org/10.12989/acd.2021.6.3.225>.
- [8] Yang, E. and Li, V.C., 2010. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. *Construction and Building Materials*, 24, pp.130–9. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.014>.
- [9] Yu, K., Yu, J., Dai, J. and et al., 2018. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. *Construction and Building Materials*, 158, pp.217–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>.
- [10] Mirzamohammadi, S. and Mazloom, M., 2021. Monitoring the required energy for the crack propagation of fiber-reinforced cementitious composite. *Structural Monitoring and Maintenance*, 8(3), pp.279-294. <https://doi.org/10.12989/smm.2021.8.3.279>.
- [11] Zhu, H.B., Yan, M.Z., Wang, P.M. and et al., 2015. Mechanical performance of concrete combined with a novel high strength organic fiber. *Construction and Building Materials*, 78, pp. 289-294.
- [12] Khaliq, W. and Kodur, V., 2011. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41.
- [13] Ding, Y., Azevedo, C., Aguiar, J.B. and et al., 2012. Study on residual behavior and flexural toughness of fiber cocktail reinforced self-compacting high-performance concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, 26, pp.21-31.
- [14] Zhu, He., Yu, K. and Li, V.C., 2021. Sprayable engineered cementitious composites (ECC) using calcined clay limestone cement (LC3) and PP fiber. *Cement and Concrete Composites*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103868>.
- [15] Longhi, M.A., Rodríguez, E.D., Walkley, B. and et al., 2020. Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation. *Composites Part B: Engineering*, 182, 107671.
- [16] Panda, B., Ruan, S., Unluer, C. and et al., 2020. Investigation of the properties of alkali-activated slag

- mixes involving the use of nanoclay and nucleation seeds for 3D printing. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107826.
- [17] Muzenda, T.R., Hou, P., Kawashima, S. and et al., 2020. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. *Cement and Concrete Composites*, 103516.
- [18] Gbozee, M., Zheng, K., He, F. and et al., 2018. The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes. *Applied Clay Science*, 158, pp.186-194.
- [19] Dhandapani, Y. and Santhanam, M., 2017. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. *Cement and Concrete Composites*, 84, pp.36-47.
- [20] Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M. and et al., 2018. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, pp.136-151.
- [21] Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. and et al., 2012. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), pp.1579-1589.
- [22] Shi, Z., Geiker, M.R., De Weerd, K. and et al., 2017. Role of calcium on chloride binding in hydrated Portland cement–metakaolin– limestone blends. *Cement and Concrete Research*, 95, pp.205-216.
- [23] Zhang, D., Jaworska, B., Zhu, H. and et al., 2020. Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Composites*, 114.
- [24] Zhu, H., Zhang, D., Wang, T. and et al., 2020. Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers. *Construction and Building Materials*, 259.
- [25] Li, Y., Li, W., Deng, D. and et al., 2018. Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement matrices. *Cement and Concrete Composites*, 88, pp.139–149.
- [26] Q. Du, J. Wei, and Lv J., 2017. Effects of High Temperature on Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composites. *International Journal of Civil Engineering*. <http://doi.org/10.1007/s40999-017-0245-0>.
- [27] Al-Qadi, A.N. and Al-Zaidyeen, S.M., 2014. Effect of fiber content and specimen shape on residual strength of polypropylene fiber self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Journal of King Saud University*, 26(1), pp.33-39.
- [28] Huang, B.T., Li, O.H., Xu, S.L. and et al., 2019. Strengthening of reinforced concrete structure using sprayable fiber reinforced cementitious composites with high ductility. *Composite Structures*, 220, pp.940-952.
- [29] Feng, J., Yang, F. and Qian, S.h., 2021. Improving the bond between polypropylene fiber and cement matrix by nano calcium carbonate modification. *Construction and Building Materials*, 269.
- [30] Felekoglu, B., Felekoglu, K.T., Ranade, R. and et al., 2014. Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. *Composites Part B: Engineering*, 60, pp.359-370.
- [31] ASTM C1437-15, 2015. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [32] Karimpour, H. and Mazloom, M., 2022. Pseudo-strain hardening and mechanical properties of green cementitious composites containing polypropylene fibers. *Structural Engineering and Mechanics*, 8(2), pp.575-589.
- [33] ASTM C109/C109M-20a, 2020. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [34] JSCE (Japan Society of Civil Engineers), 2008. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks, pp.1–16. Tokyo.
- [35] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Development of a green high-performance fiber-reinforced cementitious composite using local ingredients. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(4). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16362>.
- [36] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Impacts of interfacial bonding between concrete substrate and cast/sprayed HPRCC on flexural behaviour. *Magazine of Concrete Research*, 76(16), pp.933-945. <https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00249>.
- [37] Mirzamohammadi, S. and Soltani, M., 2024. Mechanical behavior of HPRCC using limestone calcined clay cement (LC3) and oxygen plasma treated PP fibers. *Structural Engineering and Mechanics*, 89(4), pp.349-362. <https://doi.org/10.12989/2024.89.4.349>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mirzamohammadi, S. and Soltani Mohammadi, M. 2026. Investigating the mechanical properties of sprayable fiber reinforced cementitious composites containing limestone calcined clay cement. *Modares Civil Engineering journal*, 26(2), pp.95-109.

