



Semnan University



Research Article

Investigation of the Mechanical and Microstructural Properties of Manhole Covers Produced by Using Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Containing Fibers and Nanosilica

Sadegh Ghavami ^{a*}, Hossein Karimi ^{b,c}^a Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, I. R. Iran.^b Technical Manager in Radis Company, Tehran, I. R. Iran.^c PhD Graduate, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-05-17

Revised: 2026-05-30

Accepted: 2026-07-02

Keywords:

Concrete manhole cover,

Ultra-high-performance concrete (UHPC),

Nanosilica,

Fibers.

ABSTRACT

In recent years, Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) has gained considerable attention as a suitable material for producing precast components such as manhole covers, owing to its very high mechanical strength, excellent durability, and enhanced post-cracking behavior. In this study, the effects of different types of fibers and nanosilica on the microstructure and mechanical performance of UHPC-based concrete manhole covers are investigated. First, the performance of three types of fibers—steel, glass, and polypropylene—each at a volume fraction of 1%, was evaluated in UHPC to determine the most suitable fiber for concrete manhole cover applications. Compressive strength, load-bearing capacity, and freeze–thaw resistance tests were conducted on the specimens in accordance with the Iranian National Standard. Results showed that incorporation of fibers improved the compressive strength and load-bearing capacity of the covers, with steel fibers exhibiting the greatest enhancement, increasing the compressive strength by 19% to about 180 MPa and increasing load capacity from 6 tons to 12.5 tons. In the next stage, 1% nanosilica was added to the mixture containing steel fibers. The presence of nanosilica increased the compressive strength to about 200 MPa and the load-bearing capacity to 14 tons. Specimens containing steel fibers and nanosilica exhibited a lower reduction in strength after freeze–thaw cycling. Microstructural analyses using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) revealed that nanosilica, through nucleation effects, pozzolanic reactions, and filler action, reduced porosity, increased matrix density, and improved the interfacial transition zone (ITZ) between fibers and matrix. The findings indicate that combined use of steel fibers and nanosilica in UHPC enhances mechanical properties and durability, providing a sustainable and economically viable solution for concrete manhole covers from a life-cycle perspective.

* Corresponding author.

E-mail address: ghavamijamal@sut.ac.ir

How to cite this article: Ghavami, S., and Karimi, H. (2026). Investigation of the mechanical and microstructural properties of manhole covers produced by using ultra-high-performance concrete (UHPC) containing fibers and nanosilica. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), 117-134.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41251.1765>

© 2025 The Author(s), Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری درپوش‌های بتنی تولیدشده با بتن فوق‌توانمند حاوی الیاف و نانوسیلیس

صادق قوامی جمال^{۱*}، حسین کریمی^{۲،۳}

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

^۲ مدیر فنی شرکت راد یاوران سروش (رادیس)، تهران، ایران.

^۳ دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن فوق‌توانمند (UHPC) به دلیل مقاومت مکانیکی بسیار بالا، دوام مناسب و قابلیت بهبود رفتار پس از ترک به عنوان گزینه‌ای مناسب برای تولید قطعات پیش‌ساخته نظیر درپوش‌های منهول، مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، تأثیر انواع مختلف الیاف و نانوسیلیس بر ریزساختار و عملکرد مکانیکی درپوش‌های بتنی تولیدشده با بتن فوق‌توانمند بررسی شده است. در گام نخست، عملکرد سه نوع الیاف شامل الیاف فولادی، شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن با مقدار یک درصد حجمی در UHPC ارزیابی شد تا الیاف مناسب برای کاربرد در درپوش‌های بتنی تعیین گردد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، تعیین ظرفیت باربری و تعیین مقاومت در برابر یخ‌زدگی-ذوب براساس استاندارد ملی ایران روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف موجب بهبود مقاومت فشاری و ظرفیت باربری درپوش‌ها می‌شود و در میان آن‌ها الیاف فولادی بیشترین تأثیر را دارد؛ به طوری که مقاومت فشاری با ۱۹ درصد افزایش به ۱۸۰ مگاپاسکال و ظرفیت باربری از ۶ به ۱۲.۵ تن رسید. در مرحله بعد، ۱ درصد نانوسیلیس به مخلوط حاوی الیاف فولادی اضافه شد. حضور نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۲۰۰ مگاپاسکال و افزایش ظرفیت باربری درپوش به ۱۴ تن گردید. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و نانوسیلیس، کاهش مقاومت کمتری پس از چرخه یخ‌زدگی-ذوب داشتند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که نانوسیلیس از طریق اثر هسته‌زایی، واکنش پوزولانی و نقش پُرکنندگی، موجب کاهش تخلخل، افزایش تراکم ماتریس سیمانی و بهبود ناحیه انتقال میان سطحی الیاف و ماتریس می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده همزمان از الیاف فولادی و نانوسیلیس در بتن فوق‌توانمند، ضمن بهبود عملکرد مکانیکی و دوام، راهکاری پایدار و اقتصادی از دیدگاه هزینه چرخه عمر برای تولید درپوش‌های بتنی محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی:

درپوش بتنی منهول،
بتن فوق‌توانمند،
نانوسیلیس،
الیاف.

پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghavamijamal@sut.ac.ir

استناد به این مقاله: قوامی جمال، صادق. و کریمی، حسین. (۱۴۰۵). بررسی خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری درپوش‌های بتنی تولیدشده با بتن فوق‌توانمند حاوی الیاف و نانوسیلیس. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۱۱۷-۱۳۴.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41251.1765>

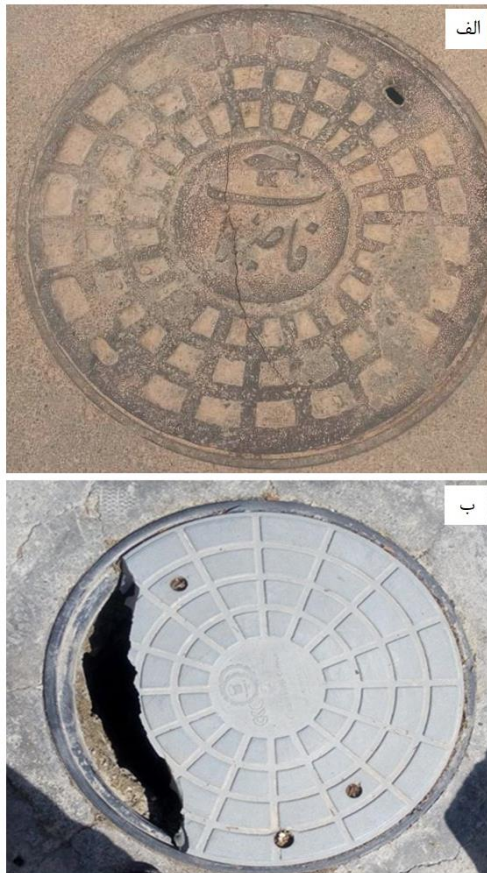
© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

درپوش‌های منهول به عنوان اجزای کلیدی شبکه‌های حمل‌ونقل و فاضلاب، معمولاً از چدن، کامپوزیت یا بتن ساخته می‌شوند؛ با این حال، هر یک از این مصالح محدودیت‌های قابل‌توجهی دارند. درپوش‌های چدن خاکستری بسیار سنگین بوده، رفتار تُرد و مقاومت ضربه‌ای پایین دارند و در محیط‌های خورنده مستعد خوردگی هستند (شکل ۱). استفاده از انواع خاص چدن به منظور افزایش ظرفیت باربری و جلوگیری از خوردگی، منجر به افزایش هزینه محصول می‌شود. در سال‌های اخیر، در بسیاری از کشورها پدیده سرقت درپوش‌های منهول رخ داده و موجب باقی ماندن حفره‌های بزرگ و باز در معابر شده است (الحجار و الحاتو، ۲۰۰۹؛ بارُس و همکاران، ۲۰۲۴). این امر باعث خسارت به اموال عمومی، به خطر افتادن جان انسان‌ها، ایجاد نازیبایی در شهر و آلودگی محیط‌زیست ناشی از انتشار بوی نامطبوع فاضلاب در صورت نبود درپوش می‌شود. یکی از راهکارهای مناسب، جایگزینی درپوش‌های منهول چدنی با درپوش‌های کامپوزیتی است که معمولاً از مواد مصنوعی با رزین‌های آلی به عنوان زمینه ساخته می‌شوند (لو و همکاران، ۲۰۱۸). این نوع درپوش‌ها دارای ساختاری نسبتاً سبک و باریک هستند و از آنجا که مواد کامپوزیتی قابل بازیافت نیستند، بنابراین این نوع درپوش‌ها کمتر مورد سرقت قرار می‌گیرند. عیب اصلی درپوش‌های کامپوزیتی این است که به دلیل حساسیت به پرتوهای فرابنفش و عوامل جوی، پس از چند سال دچار تُردی، تغییر رنگ و کاهش مقاومت می‌شوند (شکل ۱) (مزقانی، ۲۰۱۲؛ سیریوک و پنومادو، ۲۰۱۴). از سوی دیگر، درپوش‌های بتنی معمولی نیز به دلیل وزن زیاد، ظرفیت باربری محدود و دوام محیطی کم، پاسخگوی نیازهای بارگذاری و شرایط بهره‌برداری مدرن نیستند (نصری و

همکاران، ۲۰۱۶). این چالش‌ها ضرورت توسعه مصالح نوین با دوام بالا، رفتار مکانیکی مناسب و قابلیت اطمینان بیشتر را برای تولید درپوش‌های منهول برجسته می‌سازد.



شکل ۱. الف) درپوش منهول از جنس چدن خاکستری و ب) درپوش منهول کامپوزیتی

در سال‌های اخیر، بهبود عملکرد بتن با هدف افزایش دوام و مقاومت، مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. برای دستیابی به این هدف، انواع مختلفی از بتن توسعه یافته‌اند که یکی از آن‌ها بتن فوق‌توانمند^۱ (UHPC) است که می‌تواند در راستای ارتقای عملکرد مکانیکی قطعات پیش‌ساخته بتنی، به‌ویژه درپوش منهول‌ها و اجزای در معرض بارگذاری موضعی مورد استفاده قرار گیرد (نگیا و همکاران، ۲۰۲۱). بتن

فوق توانمند به عنوان نسل پیشرفته‌ای از بتن‌های سیمانی، با بهره‌گیری از طرح اختلاط بهینه و استفاده از مواد پوزولانی فعال، قادر به دستیابی به مقاومت‌های فشاری بسیار بالا و بهبود قابل توجه در مقاومت کششی و دوام می‌باشد (یو و بانتیا، ۲۰۱۶). از آنجا که رفتار ترد بتن یکی از محدودیت‌های اصلی آن محسوب می‌شود، مسلح‌سازی این نوع بتن با الیاف گسسته به عنوان رویکردی مؤثر در افزایش شکل‌پذیری، مقاومت کششی پس از ترک و ظرفیت جذب انرژی مطرح شده است. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن الیاف می‌تواند ظرفیت جذب انرژی و چقرمگی بتن را به‌طور چشمگیری افزایش دهد (نعمان و راینهارت، ۲۰۰۶). با انجام آزمایش‌های خمشی توسط کانگ و همکاران (۲۰۱۰) مشخص شد که مقاومت خمشی بتن فوق‌توانمند با افزایش نسبت حجمی الیاف فولادی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. کیم و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که ترکیب الیاف بلند و کوتاه می‌تواند چقرمگی خمشی UHPC را به‌طور چشمگیری افزایش دهد؛ به‌طوری که با ثابت نگه داشتن مقدار الیاف بلند، افزایش مقدار الیاف کوتاه موجب افزایش مقاومت خمشی معادل، ظرفیت تغییرشکل و چقرمگی خمشی می‌شود. به‌طور کلی، الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت کششی و در نتیجه افزایش مقاومت برشی، کاهش مقدار آرماتور مورد نیاز، کنترل عرض ترک‌ها و ایجاد رفتار غیرترد در بتن فوق‌توانمند می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۱۷؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهشی دیگر، تأثیر الیاف شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن فوق‌توانمند به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مقایسه گردید (هی و همکاران، ۲۰۲۱). الیاف شیشه اثر تقویت‌کنندگی بیشتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن داشت؛ به‌طوری که مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به‌ترتیب حدود ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد بیشتر بود.

با توسعه روزافزون فناوری نانو، تأثیر نانوذرات بر خواص بتن به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. انواع مختلفی از مواد مبتنی بر نانو برای بهبود خواص مکانیکی، دوام و متراکم‌سازی ریزساختار UHPC به کار گرفته می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۱۵؛ نورحصری و همکاران، ۲۰۱۹). نانومواد در مقایسه با سایر مواد پایه سیمانی دارای سطح ویژه بسیار بالایی هستند و علاوه بر آن، اثر هسته‌زایی دارند که موجب بهبود مؤثر فرآیند هیدراسیون سیمان می‌شود (مصطفی و همکاران، ۲۰۲۰). یو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که افزودن مقدار مناسب نانوسیلیس، تخلخل بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن را کاهش داده و موجب بهبود خواص مکانیکی آن، به‌ویژه مقاومت خمشی، می‌گردد. بر اساس مطالعات اوه و همکاران (۲۰۲۱)، با افزودن نانوسیلیس به‌صورت پوشش سطحی روی الیاف فولادی، افزایش چسبندگی و تنش برشی اصطکاکی منجر به بهبود عملکرد کششی UHPC می‌شود. در پژوهشی دیگر، افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف شیشه در نتیجه جایگزینی بخشی از سیمان با نانوسیلیس گزارش شده است (کومار و چایتانیا، ۲۰۲۲). نتایج مطالعات آزمایشگاهی زید و همکاران (۲۰۲۳) مناسب بودن و کارایی استفاده از پودر پوسته تخم مرغ و نانوسیلیس به عنوان جایگزین جزئی سیمان پرتلند در بهبود خصوصیات مهندسی بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف را تأیید کرده است. اگرچه افزودن نانوسیلیس موجب بهبود واکنش پوزولانی و پر شدن ریزحفرات می‌شود، اما چالش‌هایی نظیر افزایش سطح ویژه و در نتیجه افزایش ویسکوزیته و نیاز به فوق‌روان‌کننده بیشتر را به همراه دارد (آشوکان و همکاران، ۲۰۲۳). تجمع و کلوخه شدن ذرات نانو در مقادیر زیاد می‌تواند به‌جای بهبود، نقاط ضعیف در ماتریس ایجاد کند (کارنیرو و همکاران، ۲۰۲۲؛ قوامی و ناصری، ۲۰۲۵).

جدول ۱. رده‌بندی درپوش‌های منهول برای جاده‌ها و بزرگراه‌های شهری براساس استاندارد ملی ایران

رده	حداکثر نیرو	کاربرد
A15	۱۵ kN	نواحی که فقط برای پیاده‌ها و دوچرخه‌سوارها استفاده می‌شود.
B125	۱۲۵ kN	نواحی پیاده‌رو و نظایر آن یا نواحی پارک خودرو
C250	۲۵۰ kN	برای درپوش‌های آبیگر نصب‌شده در حاشیه جداول خیابان‌ها
D400	۴۰۰ kN	قسمت ماشین‌رو خیابان‌ها، شانه‌های آسفالتی و نواحی پارک خودرو
E600	۶۰۰ kN	نواحی تحمل‌کننده وسایل نقلیه سنگین مانند لنگرگاه‌ها و فرودگاه‌ها
F900	۹۰۰ kN	نواحی که به طور ویژه تحمل‌کننده وسایل نقلیه سنگین هستند مانند فرودگاه‌ها

۲. مصالح و آزمایش‌ها

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیپ ۵۲۵-۱ مطابق با استاندارد ASTM C150 است که از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی که از آنالیز طیف نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس^۶ (XRF) به دست آمده در جدول ۲ ارائه گردیده است. برای سیمان مصرفی، سطح مخصوص ۲۹۵ متر مربع بر کیلوگرم و وزن مخصوص ۳/۱۲ بود. ماسه کوارتزی دارای متوسط ذرات ۰/۲۵ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۵، جذب آب ۲/۵۹ درصد و مدول نرمی ۳/۱۷ است. میکروسیلیس از شرکت صنایع فروآلیاژ ایران تهیه شد که خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۲ دانه‌بندی مصالح مصرفی را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن‌های مسلح به الیاف^۱ (FRC) و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه^۲ (GFRP) برای درپوش‌های منهول به دلیل وزن کمتر نسبت به چدن مطرح شده است (بارز و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، درپوش‌های GFRP با چالش‌هایی همچون تخریب در برابر اشعه فرابنفش و دشواری بازیافت روبه‌رو هستند و درپوش‌های FRC معمولی نیز برای رسیدن به ظرفیت باربری بالا، نیاز به ضخامت زیاد دارند. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد بهبود خصوصیات مهندسی UHPC توسط بسیاری از محققین بررسی شده است؛ اما مطالعات در زمینه ویژگی‌های UHPC با کاربری خاص به عنوان مصالح درپوش منهول بسیار محدود است. در این تحقیق، به منظور رسیدن به مصالحی با دوام زیاد و رفتار مکانیکی مناسب برای تولید درپوش‌های منهول، ابتدا عملکرد سه نوع الیاف شامل الیاف فولادی^۳ (SF)، الیاف شیشه^۴ (GF) و الیاف پلی‌پروپیلن^۵ (PP) در باربری درپوش بتنی تولید شده با بتن فوق‌توانمند ارزیابی می‌شود. مطابق با استاندارد ملی ایران (شماره ۱-۱۴۹۷۶) درپوش‌های منهول بر اساس الزامات ظرفیت باربری مورد نیاز، که به محل نصب آن‌ها بستگی دارد، به شش گروه طبقه‌بندی می‌شوند که در جدول ۱ نشان داده شده است. رده باربری درپوش‌های تولیدی در این تحقیق و عملکرد آن‌ها با رده‌های عملکردی استاندارد (نظیر A15 یا B125) مطابقت دارد. پس از تعیین الیاف مناسب، در گام بعدی با افزودن نانوسیلیس، مکانیزم ریزساختاری اندرکنش بین مصالح در ماتریس ایجاد شده با انجام آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ (SEM) و پراش پرتوی ایکس^۷ (XRD) بر نمونه‌ها بررسی می‌گردد.

6- Scanning Electron Microscope
7- X-ray Diffraction
8- X-ray Fluorescence

1- Fibre-Reinforced Concrete
2- Glass Fibre-Reinforced Polymer
3- Steel Fibre
4- Glass Fiber
5- Polypropylene Fiber

حسین و همکاران، ۲۰۲۰؛ لئو و همکاران، ۲۰۲۴) و به منظور مقایسه بهتر عملکرد الیاف‌ها، مقدار افزودن الیاف‌ها به نمونه‌ها یکسان و یک درصد حجمی در نظر گرفته شد.



شکل ۳. الیاف‌های مصرفی در ساخت نمونه‌ها

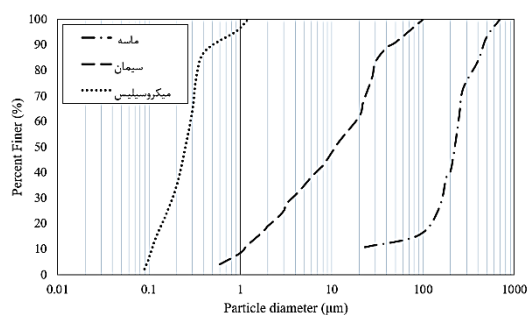
جدول ۴. مشخصات الیاف‌ها

PP	GF	SF	خصوصیات
۱۲	۳۰	۳۵	طول (mm)
۰/۰۲	۰/۰۱۵	۰/۹	قطر (mm)
۵۰۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰	مقاومت کششی (MPa)
۵	۷۰	۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۹۱۰	۲۶۰۰	۷۸۵۰	دانسیته (kg/m ³)

پودر نانوسیلیس ساخت شرکت ایونیک آلمان با خلوص بیش از ۹۹/۸ درصد، اندازه متوسط ۱۲ نانومتر و سطح مخصوص 250 ± 200 متر مربع بر گرم است که با

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

اجزا	مقدار برحسب درصد
SiO ₂	۲۰/۵
Al ₂ O ₃	۴/۹۱
Fe ₂ O ₃	۳/۲۲
CaO	۶۳/۴
MgO	۲/۱۸
SO ₃	۲/۰۵
K ₂ O	۰/۴۹
Na ₂ O	۰/۴۴
Other	۰/۶۱
Loss on ignition	۲/۲



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس

مقدار	خصوصیات
خاکستری	رنگ
کمتر از ۱ میکرومتر	قطر ذرات
۲/۲	وزن مخصوص
۱۵-۳۰	سطح مخصوص (m ² /g)
۹۰-۹۵	SiO ₂ (%)
۰/۸-۳	کربن (درصد)
۱/۵-۲/۵	Loss on ignition (%)

تصویر و مشخصات سه نوع الیاف فولادی، شیشه و پلی پروپیلن به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۴ ارائه شده است. براساس مطالعات پیشین (کیم و همکاران، ۲۰۱۱؛

جایگزینی ۱ درصد از سیمان به مخلوط اضافه شد (لی و همکاران، ۲۰۱۵؛ وو و همکاران، ۲۰۲۱). در ساخت مخلوط‌ها از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات (با مقدار مواد جامد 40 ± 1 درصد، $pH 7 \pm 1$ و وزن مخصوص $1220/05$ در دمای $20/4$ درجه سلسیوس) استفاده گردید. این ماده دارای ساختار کربوکسیلاتی بدون زنجیره‌های جانبی بلند است و از طریق مکانیزم دفع الکترواستاتیک عمل می‌کند. در این سیستم، گروه‌های کربوکسیلیک دارای بار منفی روی زنجیره پلیمری به سطح ذرات متصل شده و با ایجاد بار منفی مشابه در اطراف ذرات، سبب افزایش دافعه الکترواستاتیک میان آن‌ها می‌شوند. در نتیجه، از تجمع ذرات جلوگیری شده و پراکندگی یکنواخت‌تری در محیط آبی و در نهایت در خمیر سیمان ایجاد می‌شود. جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. طرح اختلاط نمونه‌ها برحسب کیلوگرم بر متر مکعب

نمونه	C	C-SF	C-GF	C-PP	C-SF-N
سیمان	۸۵۰	۸۵۰	۸۵۰	۸۵۰	۸۴۱/۵
آب	۱۶۳	۱۶۳	۱۶۳	۱۶۳	۱۶۳
ماسه کوارتزی	۸۷۰	۸۷۰	۸۷۰	۸۷۰	۸۷۰
میکروسیلیس	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
فوق روان کننده	۸/۵	۸/۵	۸/۵	۸/۵	۸/۵
الیاف	۰	۷۸/۵ (SF)	۲۶ (GF)	۹/۱ (PP)	۷۸/۵ (SF)
نانوسیلیس	۰	۰	۰	۰	۸/۵

برای تهیه مخلوط‌ها، از یک میکسر مکانیکی با سرعت قابل تنظیم استفاده شد. ابتدا ماسه کوارتزی و سیمان به مدت ۴ دقیقه در سرعت ۴۰ دور بر دقیقه به‌صورت خشک مخلوط شدند. سپس نیمی از آب اختلاط اضافه شد و مخلوط‌کردن به مدت ۲ دقیقه با

سرعت ۶۰ دور بر دقیقه ادامه یافت. در مرحله بعد، باقی‌مانده آب به همراه فوق‌روان‌کننده اضافه شد و فرآیند اختلاط به مدت ۲ دقیقه دیگر با همان سرعت ادامه یافت. سپس الیاف‌ها به میکسر افزوده شد و مخلوط به مدت ۲ دقیقه در سرعت ۸۰ دور بر دقیقه هم زده شد؛ در حالی که برای مخلوط فاقد الیاف، مرحله سوم به مدت ۴ دقیقه ادامه یافت. برای مخلوط حاوی نانوسیلیس، پس از اختلاط خشک ماسه و سیمان، دوغاب نانوسیلیس (محلولی که از طریق اختلاط نانوسیلیس با نیمی از آب اختلاط در یک مخلوط‌کن دوار تهیه شد) به مخلوط‌کن افزوده شد و مخلوط حدود ۲ دقیقه مخلوط گردید و بقیه مراحل آن طور که شرح داده شد ادامه یافت. مدت زمان کل اختلاط برای تمام مخلوط‌ها ۱۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد و پس از آن تا زمان تکمیل عملیات قالب‌ریزی، میکسر در سرعت ۴۰ دور بر دقیقه به کار خود ادامه داد. نمونه‌ها در قالب‌های فلزی استاندارد ریخته شدند و پس از قالب‌ریزی، به مدت ۲۴ ساعت در پوشش پلاستیکی نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و در حوضچه حاوی آب‌آهک (با دمای 21 ± 2 درجه سلسیوس) به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش مطابق استاندارد ۳۲۰۶ ایران بر نمونه‌های مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر انجام شد. بارگذاری با نرخ ثابت $0/6$ مگاپاسکال بر ثانیه اعمال گردید. برای کاهش اثر قیود انتهایی و اصطکاک بین صفحات بارگذاری و نمونه، کرنش محوری در ناحیه میانی نمونه اندازه‌گیری شد. دو حسگر تغییرمکان خطی^۱ (LVDT) روی سطح نمونه نصب شد و کرنش از نسبت تغییرمکان ثبت‌شده به طول مبنا محاسبه گردید. برای افزایش دقت نتایج، از سه نمونه برای هر طرح اختلاط استفاده شد و میانگین مقادیر به‌عنوان مقاومت فشاری گزارش گردید.

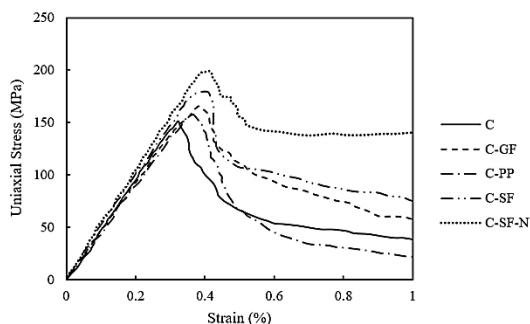
1- Linear Variable Differential Transformer

فازی تشکیل شده در ماتریس‌ها، الگوهای XRD با استفاده از تابش $\text{Cu-K}\alpha$ با ولتاژ ورودی ۴۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی آمپر در محدوده 2θ از ۵ تا ۶۵ درجه به دست آمد.

۳. بیان و تحلیل نتایج

۱.۳. مقاومت

به منظور مقایسه تغییرات خصوصیات نمونه ناشی از حضور الیاف‌های مختلف و نانوسیلیس، منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نمونه‌ها بر اساس ترکیب مصالح آن‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. روند کلی نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف به افزایش مقاومت فشاری منجر می‌شود. مقاومت فشاری با افزودن یک درصد حجمی الیاف‌های پلی پروپیلن، شیشه و فولادی به ترتیب به میزان ۴/۳، ۹/۶ و ۱۸/۹ درصد افزایش می‌یابد و به ۱۶۵، ۱۸۰ و ۱۸۰ مگاپاسکال می‌رسد. انحراف معیار سه نمونه آزمایش شده برای نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن، شیشه و فولادی به ترتیب ۵/۲۹، ۳/۹۱ و ۶/۲۴ است.



شکل ۵. منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها

افزایش مقاومت فشاری ناشی از کنترل رشد ریز ترک‌ها به دلیل وجود الیاف، پل زنی الیاف در ترک‌های کششی جانبی و افزایش ظرفیت جذب انرژی در مرحله پس از اوج است. عامل دیگر بهبود مقاومت ناشی از وجود الیاف را می‌توان افزایش سختی ماده مرکب دانست. اضافه کردن الیاف باعث ایجاد اثر محصورشدگی

برای تعیین باربری درپوش‌های بتنی، آزمون ظرفیت باربری براساس استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۴۹۷۶ بر درپوش‌ها به قطر ۶۰ سانتی متر و ضخامت ۱۰ سانتی متر انجام شد. بلوک آزمون باید در مرکز هندسی درپوش طوری قرار داده شود که محور عمودی آن بر سطح درپوش عمود باشد. نیروی آزمون با نرخ ۰/۵ تن بر ثانیه تا رسیدن به حداکثر نیروی ارائه شده در جدول ۱ اعمال می‌شود. برای هر طرح اختلاط، سه درپوش تحت بارگذاری قرار گرفت و میانگین مقادیر به عنوان ظرفیت باربری گزارش گردید. شکل ۴ نمونه تحت بارگذاری در دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تعیین ظرفیت باربری درپوش بتنی

جهت بررسی دوام نمونه‌ها، مقاومت آن‌ها در برابر یخ‌بندان و آب‌شدن با نمک‌های یخ‌زدا براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۲۰۱۸۵ به دست آمد. سطح نمونه‌ها با محلول سدیم کلرید ۳ درصد پوشیده شد و در معرض ۲۸ چرخه یخ‌بندان و آب‌شدگی قرار گرفتند.

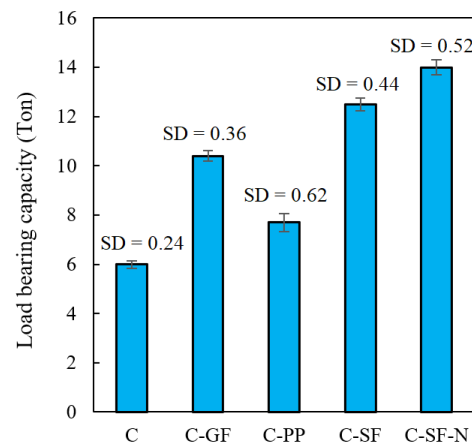
به منظور بررسی مکانیزم تأثیر نانوسیلیس، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی‌های مختلف و پراش پرتوی ایکس (XRD) بر نمونه‌های خرد شده انجام شد. آنالیز SEM در شرکت بنیاد علوم کاربردی رازی با دستگاه مدل TESCAN MIRA3 بر نمونه‌ها انجام شد. جهت بررسی ترکیب

افزایش باربری شده است؛ به طوری که با یک درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن، شیشه و فولادی، باربری از ۶ تُن به ترتیب به ۷/۷، ۱۰/۴ و ۱۲/۵ تُن افزایش می‌یابد. با افزودن نانوسیلیس به UHPC حاوی الیاف فولادی، مقاومت فشاری نمونه مکعبی و ظرفیت باربری درپوش بتنی بهبود یافت (شکل‌های ۵ و ۶). نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری به حدود ۲۰۰ مگاپاسکال شد و باربری درپوش با ۱۲ درصد افزایش (نسبت به نمونه C-SF بدون نانوسیلیس) به ۱۴ تُن رسید. با توجه به دستیابی به بار نهایی ۱۴ تن (معادل حدود ۱۴۰ کیلونیوتن)، درپوش‌های بهینه در رده باربری B125 طبقه‌بندی می‌شوند که برای پارکینگ‌های خودرو و پیاده‌روها مناسب هستند. تأثیر مثبت افزودن نانوسیلیس را می‌توان به عملکرد چندگانه این ذرات در ماتریس سیمانی نسبت داد. ذرات نانوسیلیس به دلیل فعالیت پوزولانی بالا با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و ترکیبات ژل کلسیم سیلیکات هیدرات $^1(C-S-H)$ بیشتری تولید می‌کنند. همچنین، این ذرات با کنترل تبلورهای نامطلوب، بهبود ریزساختار ماتریس، و ایفای نقش به‌عنوان نانوپرکننده موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار می‌شوند. افزون بر این، نانوسیلیس از طریق ایجاد اثر هسته‌زایی، فرآیند هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و در نتیجه به بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن کمک می‌کند. در بخش ۳-۲ جزئیات مکانیزم ریزساختاری حضور نانوسیلیس تشریح شده است.

۲.۳. دوام

از هر طرح اختلاط شامل نمونه شاهد (C)، نمونه حاوی الیاف فولادی (C-SF) و نمونه حاوی الیاف فولادی و نانوسیلیس (C-SF-N)، مقاومت سه نمونه پس از ۲۸ چرخه یخ‌زدگی-ذوب تعیین گردید. میانگین نتایج برای C، C-SF و C-SF-N به ترتیب ۱۱۸، ۱۵۸ و ۱۸۴

در ماتریس خمیر سیمان می‌شود که با کاهش تغییرشکل تحت بار فشاری، سختی محوری بتن را افزایش می‌دهد. از طرفی، الیاف به دلیل مهار ترک و مقاومت کششی بالا مانع ایجاد ترک‌های کششی زودهنگام می‌شود. به همین دلیل، مشاهده می‌شود که کرنش گسیختگی نمونه‌ها با حضور الیاف بیشتر شده است. به طوری که در نمونه حاوی الیاف فولادی نسبت به نمونه شاهد، کرنش گسیختگی از ۰/۳۲ به ۰/۴۱ می‌رسد. دلیل تأثیر بهتر الیاف فولادی نسبت به الیاف‌های دیگر، سختی بالاتر و مدول الاستیسیته بیشتر آن است. علاوه بر این، موج‌دار بودن سطح الیاف فولادی، پیوند مناسب‌تر بین رشته الیاف و ماتریس چسباننده را تضمین می‌کند. سطح ویژه در الیاف‌های پلی‌پروپیلن و شیشه بیشتر از الیاف فولادی است که می‌تواند احتمال کلوخه‌شدن الیاف در ماتریس بتن را بیشتر کند و عملکرد مکانیکی نمونه را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۶. تغییرات ظرفیت باربری درپوش‌های ساخته‌شده با طرح‌های اختلاط مختلف (SD نشان‌دهنده انحراف معیار است).

تأثیر انواع الیاف بر باربری درپوش بتنی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مشابه با نتایج آزمون مقاومت فشاری، الیاف باعث

1- Calcium Silicate Hydrate

هیدراسیون سیمان، به‌ویژه ژل C-S-H، نقش اساسی در ایجاد چسبندگی، پیوستگی و یکپارچگی ماتریس سیمانی ایفا می‌کند. از این‌رو، بررسی سازوکارهای حاکم بر تشکیل و تحول این ساختار در مقیاس نانو، گامی اساسی در جهت بهینه‌سازی خواص بتن و توسعه مصالح ساختمانی پیشرفته محسوب می‌شود (سانچز و سوبولف، ۲۰۱۰).

اندازه کلاسترهای^۱ بلور کلسیم هیدروکسید یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی ویژگی‌های ریزساختاری مصالح پایه سیمانی محسوب می‌شود، زیرا مورفولوژی و توزیع این بلورها می‌تواند بر تخلخل، ناحیه انتقال میان سطحی^۲ (ITZ) و در نهایت عملکرد مکانیکی بتن تأثیرگذار باشد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۰؛ لوتنباخ و همکاران، ۲۰۱۱؛ اسکریونر و همکاران، ۲۰۱۵). وجود مواد پوزولانی و افزودنی‌های نانومقیاس می‌تواند به‌طور مستقیم بر سینتیک هیدراسیون و مورفولوژی بلورهای Ca(OH)_2 اثر بگذارد (تیلور، ۱۹۹۷؛ لوتنباخ و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از نانوذرات سیلیس می‌تواند از طریق تأثیر بر جوانه‌زنی و رشد محصولات هیدراسیون، تغییراتی در اندازه و توزیع بلورهای Ca(OH)_2 ایجاد کند (لند و استفان، ۲۰۱۲؛ چن و همکاران، ۲۰۲۴).

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزودن نانوسیلیس با تسریع واکنش‌های هیدراسیون و ایفای نقش به‌عنوان مراکز جوانه‌زنی، موجب تغییر محسوس در مورفولوژی و اندازه کلاسترهای Ca(OH)_2 نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس شده است (از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۳ (EDS) برای شناسایی کریستال‌های اصلی در ماتریس استفاده شده است). این تغییرات ریزساختاری معمولاً با افزایش تراکم ماتریس سیمانی

مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با شکل ۵، نرخ کاهش مقاومت پس از چرخه یخ‌زدگی-ذوب به ترتیب ۲۲، ۱۲ و ۸ درصد است. با افزودن الیاف فولادی، نرخ کاهش مقاومت UHPC پس از چرخه یخ‌زدگی-ذوب کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد الیاف فولادی می‌تواند مقاومت یخ‌زدگی-ذوب بتن را بهبود دهد. الیاف فولادی می‌تواند به‌طور مؤثر با بتن پیوند برقرار کرده و اصطکاک با مخلوط را افزایش دهد. هم‌زمان، توزیع تصادفی الیاف فولادی می‌تواند تشکیل ترک‌های به‌هم‌پیوسته را به‌طور مؤثر مهار کند، مسیرهای نفوذ در حفرات بتن را مسدود سازد، ساختار ریزحفره‌های بتن را بهبود بخشد و تنش‌های انبساطی ناشی از یخ‌زدن آب را به تأخیر اندازد. بنابراین، مقاومت یخ‌زدگی-ذوب را افزایش می‌دهد.

نانوسیلیس دارای خواص پوزولانی قوی است و با ایجاد محصولات هیدراسیون سیمان می‌تواند ساختار حفرات بتن فوق‌توانمند را ریزتر کند. همچنین، نانوذرات فضاهای خالی میان ذرات سیمان را پُر کرده و در نتیجه ساختار حفرات موجود در بتن متراکم‌تر می‌شود. بنابراین کاهش تخلخل و قطع پیوستگی شبکه موئینه، منجر به کاهش قابل توجه جذب آب و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. از آنجا که تخریب ناشی از یخ‌زدگی مستقیماً به میزان آب موجود در حفرات وابسته است، کاهش جذب آب نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی-ذوب دارد.

۳.۳. آنالیز ریزساختاری

۱.۳.۳. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

عملکرد مکانیکی بتن به طور مستقیم تحت تأثیر ریزساختار و به‌ویژه نانوساختار خمیر سیمان به‌عنوان فاز زمینه قرار دارد. ساختار نانومقیاس محصولات

3- Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy

1- Clusters

2- Interfacial Transition Zone

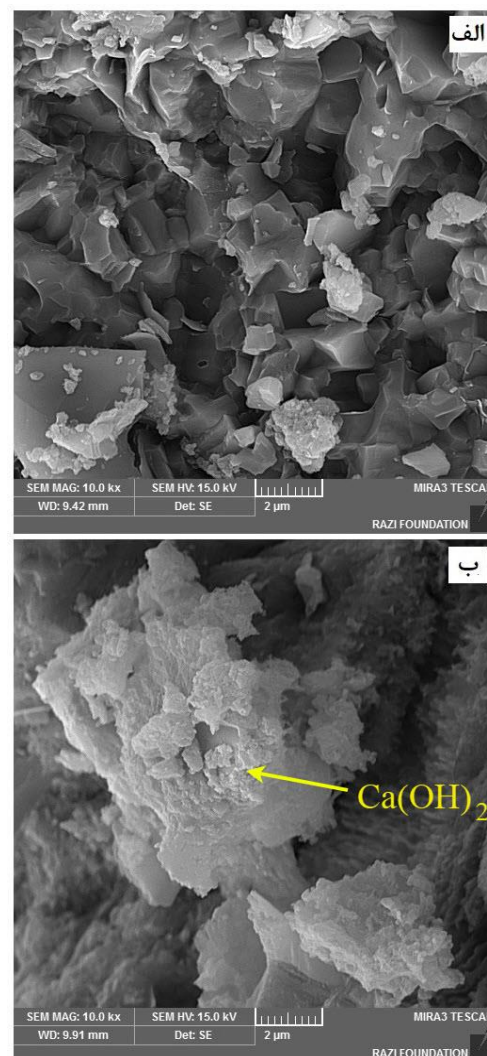
همراه بوده و می‌تواند نشان‌دهنده دستیابی سریع‌تر سیستم به پایداری ریزساختاری در سنین اولیه باشد. لازم به ذکر است که نمونه شاهد در این پژوهش حاوی میکروسیلیس بوده و از کیفیت بالای ریزساختاری برخوردار است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیلیس حتی در حضور میکروسیلیس نیز منجر به بهبود بیشتر ریزساختار می‌شود. افزایش تراکم ریزساختار و اصلاح محصولات هیدراسیون از طریق کاهش تخلخل و بهبود پیوستگی فازهای هیدراته، نهایتاً منجر به ارتقای خواص مکانیکی بتن، به‌ویژه مقاومت فشاری می‌گردد.

چسبندگی الیاف در فاز زمینه سیمانی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در عملکرد مکانیکی بتن‌های الیافی محسوب می‌شود. در واقع انتقال تنش از ماتریس سیمانی به الیاف از طریق ناحیه انتقالی میان سطحی (ITZ) الیاف-ماتریس انجام می‌گیرد و کیفیت این ناحیه تعیین می‌کند که الیاف تا چه حد قادر به مشارکت در تحمل بار و کنترل گسترش ترک‌ها باشند. اگر چسبندگی در این ناحیه ضعیف باشد، الیاف پیش از رسیدن به ظرفیت مقاومتی خود از ماتریس جدا شده و فرآیند بیرون‌کشیدگی رخ می‌دهد. در چنین شرایطی نه تنها اثر تقویتی الیاف کاهش می‌یابد، بلکه به دلیل تمرکز تنش در اطراف حفرات و نواحی ضعیف، امکان تشکیل میکروتکرک‌ها افزایش یافته و در نهایت مقاومت و دوام کامپوزیت کاهش می‌یابد (بنتور و میندس، ۲۰۰۶).

در بتن‌های الیافی، عملکرد سازه‌ای کامپوزیت به سه مکانیزم اصلی در فصل مشترک الیاف و ماتریس وابسته است:

- چسبندگی شیمیایی بین سطح الیاف و محصولات هیدراتاسیون سیمان
- قفل‌شدگی مکانیکی ناشی از زبری سطح الیاف
- اصطکاک بین الیاف و خمیر سیمان در هنگام بیرون‌کشیده شدن الیاف

در مجموع، این سه مکانیزم، تعیین‌کننده مقدار تنش برشی قابل انتقال در فصل مشترک هستند. میزان باربری هر تار از الیاف در ساختار بتن از حاصل ضرب تنش برشی چسبندگی الیاف در فاز زمینه و طول چسبندگی الیاف محاسبه می‌گردد (شکل ۸).



شکل ۷. الف) نمونه فاقد نانوسیلیس و ب) نمونه حاوی نانوسیلیس

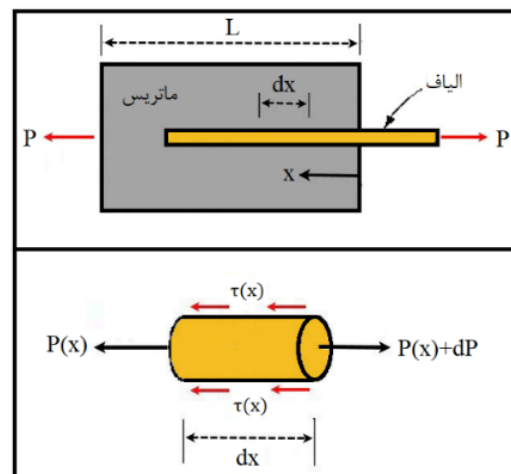
مهم ترین مکانیزم‌هایی که موجب افزایش تنش برشی چسبندگی ناشی از اصلاح ریزساختار ITZ در اثر افزودن نانوسیلیس می‌شود عبارتند از:

- نانوذرات به عنوان مراکز هسته‌زایی برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون عمل کرده و سرعت تشکیل ژل C-S-H را افزایش می‌دهند.
- نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل ثانویه C-S-H تولید می‌کند که موجب افزایش تراکم ریزساختار می‌شود.

- اندازه بسیار کوچک ذرات نانوسیلیس باعث پُر شدن منافذ ریز و کاهش تخلخل در ماتریس سیمانی می‌شود و پیوستگی ساختاری را افزایش می‌دهد.

در شکل ۹، از مقایسه تصاویر SEM بتن‌های فاقد نانوسیلیس و بتن‌های حاوی نانوسیلیس مشخص است که افزودن نانوسیلیس براساس مکانیزم‌های فوق باعث افزایش قابل توجه چسبندگی در فصل مشترک الیاف و ماتریس شده است. از دیدگاه صنعتی، افزایش چسبندگی الیاف در ماتریس سیمانی چند مزیت مهم به همراه دارد که عبارتند از: (۱) افزایش مقاومت خمشی و کششی بتن، (۲) افزایش ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری، (۳) کاهش گسترش ترک‌ها، (۴) افزایش دوام سازه‌ای، (۵) امکان کاهش مصرف الیاف بدون افت عملکرد. در کاربردهای صنعتی نظیر تولید درپوش‌های منهول بتنی، این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد. این قطعات تحت بارگذاری‌های خمشی و ضربه‌ای قرار می‌گیرند و عملکرد مناسب آن‌ها وابسته به انتقال مؤثر تنش بین الیاف و ماتریس است.

استفاده از نانوذرات سیلیکا در مواد پایه سیمانی به دلیل بهبود آرایش فازهای هیدراتاسیون و کاهش فضاهای خالی در ساختار ماتریس موجب افزایش قابل توجه تراکم



شکل ۸. نمای شماتیک یک رشته الیاف و نحوه توزیع

تنش‌های برشی

یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش تنش برشی چسبندگی در ناحیه ITZ استفاده از نانوذرات سیلیس در ترکیب بتن است. نانوسیلیس به دلیل اندازه ذرات بسیار ریز و سطح ویژه بسیار بالا، تأثیر قابل توجهی بر فرآیند هیدراتاسیون و ریزساختار خمیر سیمان و افزایش احتمال واکنش سطحی در الیاف‌های مصرفی را دارد.

مهم ترین مکانیزم‌هایی که موجب افزایش تنش برشی چسبندگی ناشی از اصلاح ریزساختار ITZ در اثر افزودن نانوسیلیس می‌شود عبارتند از:

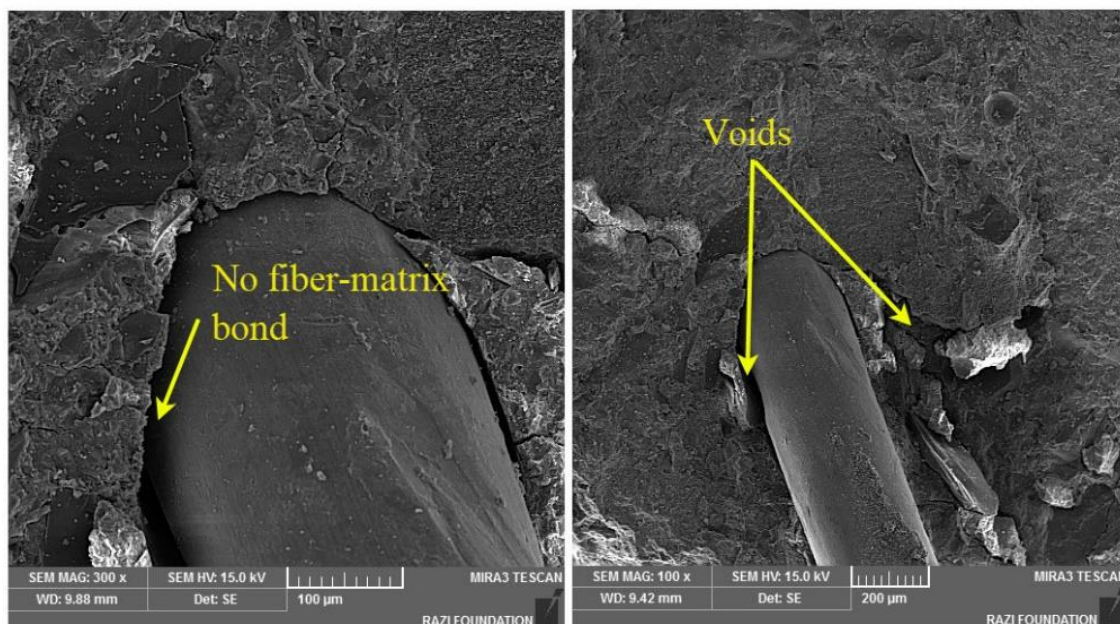
- نانوذرات به عنوان مراکز هسته‌زایی برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون عمل کرده و سرعت تشکیل ژل C-S-H را افزایش می‌دهند.
- نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل ثانویه C-S-H تولید می‌کند که موجب افزایش تراکم ریزساختار می‌شود.

- اندازه بسیار کوچک ذرات نانوسیلیس باعث پُر شدن منافذ ریز و کاهش تخلخل در ماتریس سیمانی می‌شود و پیوستگی ساختاری را افزایش می‌دهد.

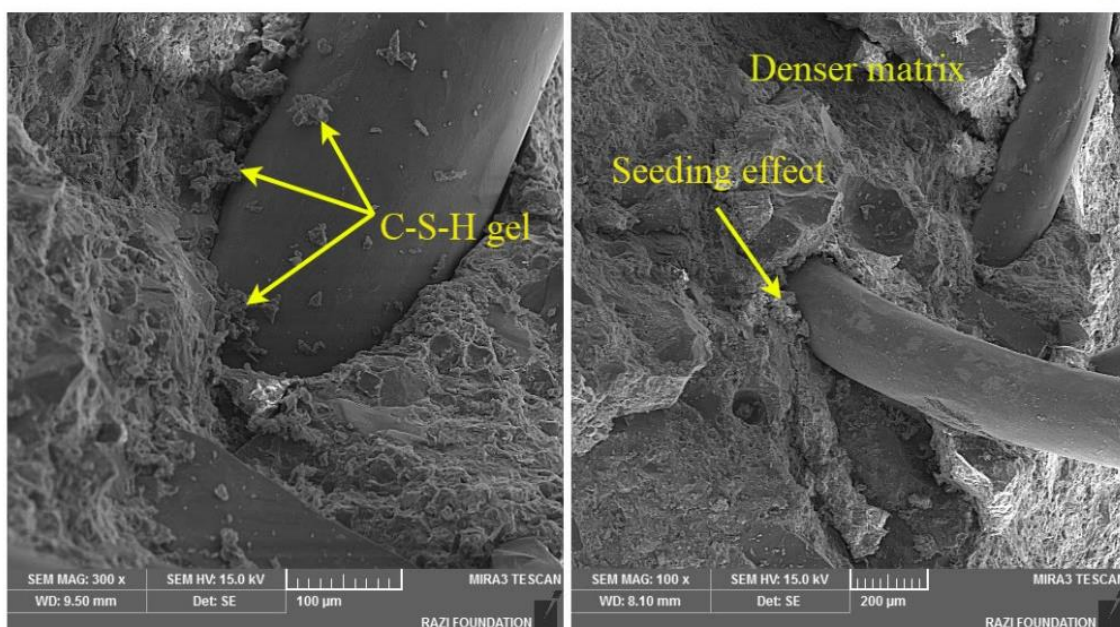
داده‌اند که کاهش تخلخل و اصلاح ساختار منافذ در حضور نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری در بتن می‌شود (لی، ۲۰۰۴؛ چن و همکاران، ۲۰۲۴).

ریزساختار خمیر سیمان و بتن می‌شود که به طور مستقیم با افزایش مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذپذیری آب و یون‌ها، و بهبود دوام بتن مرتبط است. مطالعات نشان

الف

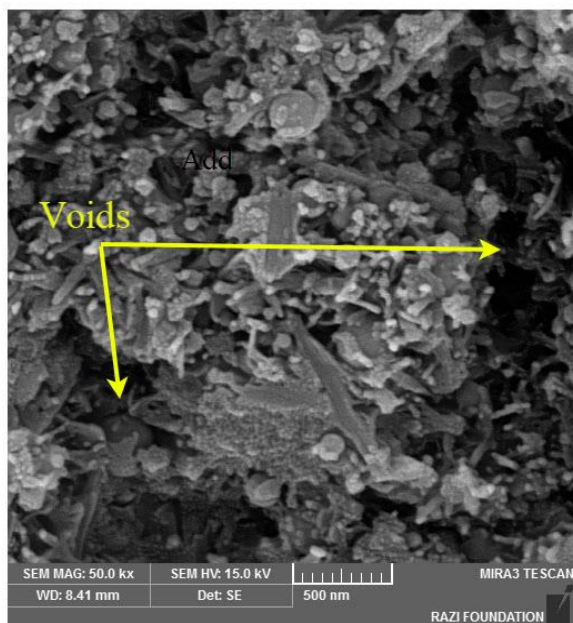


ب

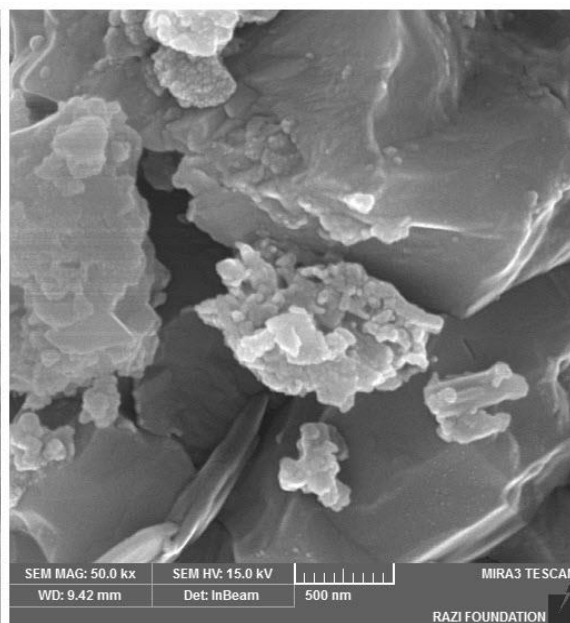


شکل ۹. اندرکنش بین الیاف و ماتریس در: الف) بتن بدون نانوذرات سیلیس و ب) بتن حاوی نانوذرات سیلیس در بزرگنمایی

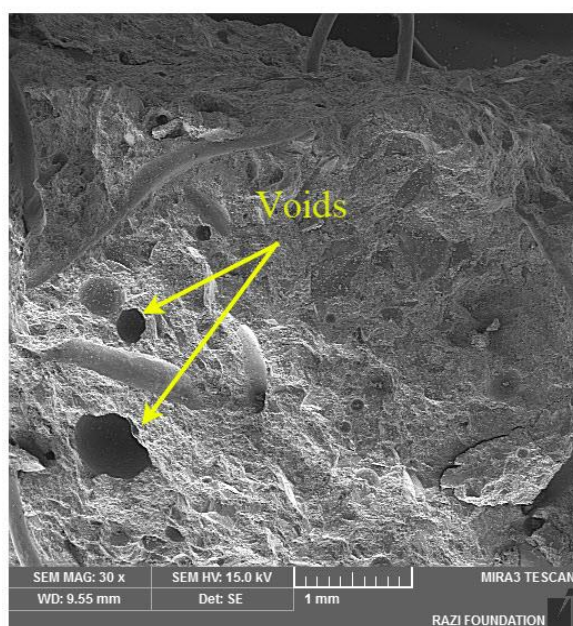
۱۰۰ و ۳۰۰



نمونه بدون نانوسیلیس (بزرگنمایی ۵۰۰۰۰)



نمونه حاوی نانوذرات سیلیس (بزرگنمایی ۵۰۰۰۰)



نمونه بدون نانوسیلیس (بزرگنمایی ۳۰)



نمونه حاوی نانوذرات سیلیس (بزرگنمایی ۳۰)

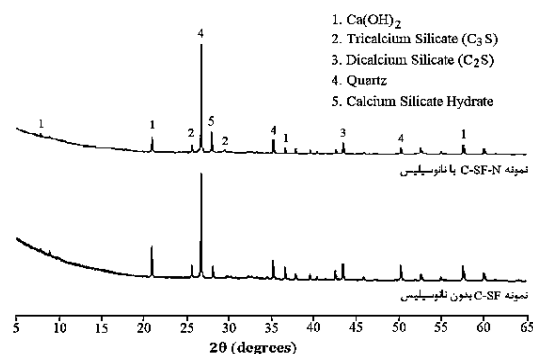
شکل ۱۰. تصاویر SEM از نمونه‌های بدون نانوذرات سیلیس و نمونه‌های حاوی ذرات نانوسیلیس در بزرگنمایی‌های مختلف

که در نمونه‌های فاقد نانوسیلیس ساختار متخلخل‌تری دیده می‌شود. حضور نانوسیلیس موجب شده است که ساختار بتن از حالت متخلخل به سمت ساختاری متراکم‌تر و یکنواخت‌تر حرکت کند.

در شکل ۱۰، تصاویر ریزساختاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نمونه‌های بدون نانوسیلیس نشان داده شده است. در تصاویر مربوط به نمونه‌های اصلاح‌شده با نانوسیلیس، کاهش قابل توجه حفرات و افزایش پیوستگی فازهای هیدراتاسیون مشاهده می‌شود، در حالی

۲.۳.۳. نتایج آنالیز XRD

شکل ۱۱، الگوهای XRD نمونه‌های با و بدون ذرات نانوسیلیس را پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پس از افزودن نانوسیلیس، فاز بلوری بدون تغییر باقی مانده و فازهای جدیدی ایجاد نشده است. این یافته با نتایج لیو و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد. با افزودن نانوسیلیس، قله‌های Ca(OH)_2 ، تری کلسیم سیلیکات (C_3S) و دی کلسیم سیلیکات (C_2S) کاهش یافتند. کاهش قله‌های کلسیم هیدروکسید بیانگر فعالیت پوزولانی و کاهش قله‌های C_3S و C_2S نشان‌دهنده تسریع هیدراسیون سیمان است. صفحات شبکه‌ای کوارتز به دلیل وجود ماسه کوارتزی و میکروسیلیس در هر دو نمونه مشاهده می‌شود. از آنجا که نانوسیلیس درجه هیدراسیون را افزایش می‌دهد و منجر به تشکیل بیشتر ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدرات می‌گردد، قله C-S-H در نمونه حاوی نانوسیلیس افزایش دارد.



شکل ۱۱. الگوهای XRD نمونه فاقد نانوسیلیس (C-) و حاوی نانوسیلیس (SF) و (C-SF-N)

۴. ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی

یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد بتن فوق‌توانمند، هزینه بالای استفاده از الیاف فولادی و نانوسیلیس و

ملاحظات زیست‌محیطی است. الیاف فولادی مورد استفاده در طراحی UHPC، حدود ۳۰ درصد از هزینه مصالح و ۴۰ درصد از انتشار کربن را شامل می‌شود (عمران و همکاران، ۲۰۲۳). قوامی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که استفاده از نانوسیلیس بسته به مقدار مصرف می‌تواند موجب افزایش تصاعدی هزینه‌ها و تأثیرات منفی زیست‌محیطی شود. اگرچه هزینه اولیه تولید UHPC بررسی‌شده در این تحقیق به دلیل استفاده از مقادیر بالای سیمان، مواد نانو و الیاف فولادی در مقایسه با بتن‌های معمولی بیشتر است، اما مزایای بلندمدت آن، این هزینه را توجیه می‌کند. استفاده از UHPC امکان طراحی مقاطع ظریف‌تر و کاهش ضخامت قطعات را فراهم می‌سازد که منجر به مصرف کمتر مصالح در کل سازه و صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل‌ونقل و سهولت در عملیات نصب و بازرسی می‌گردد. این کاهش حجم مصالح، مصرف انرژی و انتشار CO_2 را کاهش می‌دهد. همچنین، برخلاف درپوش‌های چدنی، این درپوش‌ها فاقد ارزش بازیافتی هستند و معضل سرقت این قطعات برطرف خواهد شد. لذا با نگاه به هزینه چرخه عمر^۱، استفاده از ترکیب بهینه الیاف فولادی و نانوسیلیس در تولید این قطعات، با افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های نگهداری، راهکاری پایدار و اقتصادی ارزیابی می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با هدف توسعه مصالحی با دوام بالا و رفتار مکانیکی مناسب برای تولید درپوش‌های منهول، عملکرد سه نوع الیاف (فولادی، شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن) در بتن فوق‌توانمند بررسی شد و سپس اثر افزودن نانوسیلیس بر ریزساختار و ظرفیت باربری مخلوط مورد ارزیابی قرار گرفت.

1- Life-Cycle Cost

عملکرد دوام بتن فوق توانمند را به طور چشمگیری ارتقا می دهد. کاهش نرخ افت مقاومت پس از چرخه یخ زدگی-ذوب از ۲۲ درصد در نمونه شاهد به ۸ درصد در نمونه حاوی الیاف فولادی و نانوسیلیس، دستیابی به سطح بالای دوام را تأیید می کند.

بر اساس نتایج این تحقیق، ترکیب بتن فوق توانمند مسلح شده با یک درصد حجمی الیاف فولادی و یک درصد جایگزینی نانوسیلیس، استفاده از این ترکیب می تواند ضمن افزایش ظرفیت باربری و دوام، گزینه ای مناسب برای جایگزینی درپوش های چدنی و کامپوزیتی در زیرساخت های شهری در رده باربری مورد نظر باشد.

با وجود افزایش هزینه اولیه و برخی ملاحظات زیست محیطی ناشی از مصرف الیاف فولادی و نانوسیلیس، استفاده از ترکیب بهینه این مواد در بتن فوق-توانمند، با فراهم کردن امکان کاهش ابعاد مقطع، کاهش مصرف مصالح، کاهش هزینه های حمل و نقل، نصب و نگهداری و نیز افزایش طول عمر بهره برداری، از دیدگاه هزینه چرخه عمر راهکاری پایدار و اقتصادی محسوب می شود.

۶. تقدیر و قدردانی

از شرکت راد یاوران فروش (رادیس) به سبب فراهم آوردن امکانات، تجهیزات و حمایت های فنی در اجرای آزمایش های این تحقیق تشکر و قدردانی می گردد.

۷. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

۸. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

افزودن یک درصد حجمی الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری UHPC گردید. میزان افزایش برای الیاف پلی پروپیلن، شیشه و فولادی به ترتیب حدود ۴.۳، ۶.۹ و ۱۸.۹ درصد بود. نتایج آزمون باربری نشان داد که استفاده از الیاف باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری درپوش می شود، به طوری که ظرفیت باربری از ۶ تن در نمونه شاهد به ۷.۷، ۱۰.۴ و ۱۲.۵ تن به ترتیب برای الیاف شیشه ای، پلی پروپیلن و فولادی افزایش یافت. عملکرد برتر الیاف فولادی ناشی از مدول الاستیسیته بالاتر، سختی بیشتر و قفل شدگی مکانیکی مناسب تر در ماتریس سیمانی است.

افزودن یک درصد نانوسیلیس به مخلوط حاوی الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۲۰۰ مگاپاسکال و افزایش ظرفیت باربری درپوش تا ۱۴ تن (۱۲ درصد افزایش نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس) گردید که نشان دهنده نقش مؤثر نانوسیلیس در بهبود عملکرد مکانیکی UHPC است. تصاویر SEM نشان داد که حضور نانوسیلیس موجب کاهش محسوس تخلخل، افزایش تراکم ماتریس سیمانی و اصلاح مورفولوژی بلورهای $Ca(OH)_2$ شده است. همچنین، کیفیت ناحیه انتقال میان سطحی الیاف-ماتریس در حضور نانوسیلیس بهبود یافته و چسبندگی بین الیاف و خمیر سیمان افزایش می یابد که این امر نقش مهمی در افزایش مقاومت ایفا می کند. الگوهای XRD نشان داد که افزودن نانوسیلیس فاز بلوری جدیدی ایجاد نکرده است، اما کاهش شدت قله های $Ca(OH)_2$ ، C_3S و C_2S بیانگر فعالیت پوزولانی نانوسیلیس و تسریع فرآیند هیدراسیون سیمان است. افزایش تشکیل ژل C-S-H و متراکم تر شدن ساختار، عامل اصلی بهبود خواص مکانیکی ارزیابی شد.

تلفیق الیاف فولادی و نانوسیلیس، با ایجاد یک اثر هم افزایی میان بهبودهای مکانیکی و ریزساختاری،

۹. مراجع

- Amran, M., Murali, G., Makul, N., Tang, W., & Eid Alluqmani, A. (2023). "Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): Cost, carbon emission, and structural ductility". *Constr. Build. Mater.*, 398, 132477.
- Ashokan, A., Rajendran, S., & Dhairiyasamy, R. (2023). "A comprehensive study on enhancing of the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete through nano-silica integration". *Sci. Reports*, 13(1): 20092.
- Barros, J. A. O., Soltanzadeh, F., de Sousa, C., & Vera, M. O. (2024). "Development of sustainable and innovative manhole covers in fibre-reinforced concrete and GFRP Grating". *Appl. Sci.*, 14(16): 6903.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). "Fibre reinforced cementitious composites". CRC Press.
- Carneiro, L. D. R. S., Houmard, M., Rocha, V. V., & Ludvig, P. (2022). "The effect of nanosilica incorporation on the properties of cement-based materials with and without other supplementary admixtures—a literature review". *The Open Constr. Build. Technol. J.*, 16(1).
- Chen, J., Ng, P., Xu, L., & Kwan, A. (2024). "Use of nano-silica sol in concrete: Performance and influence mechanisms". *Constr. Build. Mater.*, 411: 134582.
- El Haggag, S., & El Hatow, L. (2009). "Reinforcement of thermoplastic rejects in the production of manhole covers". *J. Clean. Prod.*, 17(4): 440-446.
- Ghavami, S., & Naseri, H. (2025). "Prediction of compressive strength in fine-grained soils stabilized with a combination of various stabilization agents and nano-SiO₂ using machine learning algorithms". *Math. Comput. Appl.*, 30(6): 137.
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., & Moghadas Nejad, F. (2021). "The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer". *Constr. Build. Mater.*, 285: 122918.
- He, J., Chen, W., Zhang, B., Yu, J., & Liu, H. (2021). "The mechanical properties and damage evolution of UHPC reinforced with glass fibers and high-performance polypropylene fibers". *Mater.*, 14(9): 2455.
- Hosseini, P., Booshehrian, A., Delkash, M., Ghavami, S., & Zanjani, M. M. K. (2010). "Improvement interfacial transition zone of green concrete by utilization of nano-SiO₂ particles". *Proc. of 3rd International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation*, Beijing, China.
- Huang, H., Gao, X., Li, L., & Wang, H. (2018). "Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC". *Constr. Build. Mater.*, 188: 709-721.
- Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M. S., & Raza, S. S. (2020). "Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)". *Case Stud. Constr. Mater.*, 13: e00429.
- Kang, S., Lee, Y., Park, Y., & Kim, J. (2010). "Tensile fracture properties of an ultrahigh performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with steel fiber". *Compos. Struct.*, 92(1): 61-71.
- Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2011). "Comparative flexural behavior of hybrid ultrahigh performance fiber reinforced concrete with different macro fibers". *Constr. Build. Mater.*, 25(11): 4144-4155.
- Kumar, P. P., & Chaitanya, B. K. (2022). "Performance evaluation of glass fiber reinforced high-performance concrete with silica fume and nano-silica". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 982: 012018.
- Land, G., & Stephan, D. (2012). "The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement". *J. Mater. Sci.*, 47: 1011-1017.
- Li, G. (2004). "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂". *Cement Concrete Res.*, 34(6): 1043-1049.
- Li, W., Huang, Z., Cao, F., Sun, Z., & Shah, S. P. (2015). "Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix". *Constr. Build. Mater.*, 95: 366-374.
- Liu, B., Lu, X., Meng, H., Pan, G., & Li, D. (2023). "Dispersion of in-situ controllably grown nano-SiO₂ in alkaline environment for improving cement paste". *Constr. Build. Mater.*, 369: 130460.
- Liu, C. Y., Wang, H. Q., Liu, X. F., Niu, M. X., & Wu, J. F. (2024). "Experimental study and numerical simulation of the effect of different fiber types on the basic mechanical properties of shotcrete". *Sci. Reports*, 14: 26573.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. (2011). "Supplementary cementitious materials". *Cement Concrete Res.*, 41(12): 1244-1256.

- Luo, Z., Dong, K., Guo, M., Liu, K., Lian, Z., Jing, Q., Wei, W., & Zhang, B. (2018). "Composite manhole covers prepared with recycled printed circuit boards as a reinforcing filler". *Polym. Compos.*, 39(12): 4532-4541.
- Mezghani, K. (2012). "Long term environmental effects on physical properties of vinylester composite pipes". *Polym. Test.*, 31(1): 76-82.
- Mostafa, S. A., Faried, A. S., Farghali, A. A., EL-Deeb, M. M., Tawfik, T. A., Majer, S., & Abd Elrahman, M. (2020). "Influence of nanoparticles from waste materials on mechanical properties, durability and microstructure of UHPC". *Mater.*, 13(20): 4530.
- Naaman, A. E., & Reinhardt, H. W. (2006). "Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response". *Mater. Struct.*, 39: 547-555.
- Nasri, M., Aghabayk, K., & Ahmadpoor, T. (2016). "Manhole covers, problems and solutions". *Road*, 24(87): 81-92.
- Nghia, H. T., Thang, N. C., Tuan, N. V., Hung, C. V., Yang, K. H., & Dong, P. S. (2021). "Experimental study to produce manhole cover using ultra-high performance concrete". *Int. J. GEOMATE*, 21(85): 91-98.
- Norhasri, M. M., Hamidah, M., & Fadzil, A. M. (2019). "Inclusion of nano metaclayed as additive in ultra high performance concrete (UHPC)". *Constr. Build. Mater.*, 201: 590-598.
- Oh, T., You, I., Banthia, N., & Yoo, D. (2021). "Deposition of nanosilica particles on fiber surface for improving interfacial bond and tensile performances of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete". *Compos. Part B: Eng.*, 221: 109030.
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). "Nanotechnology in concrete – A review". *Constr. Build. Mater.*, 24(11): 2060-2071.
- Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. (2015). "Advances in understanding hydration of Portland cement". *Cement Concrete Res.*, 78: 38-56.
- Siriruk, A., & Penumadu, D. (2014). "Hygrothermal effects on polymeric composite materials and sandwich structures". In: Hetnarski, R. B. (Eds.) *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer, Dordrecht.
- Taylor, H. F. W. (1997). "Cement chemistry". 2nd Edition, Thomas Telford.
- Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wang, D. (2017). "Static and dynamic compressive properties of ultrahigh performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements". *Cement Concrete Compos.*, 79: 148-157.
- Wu, Z., Khayat, K. H., Shi, C., Tutikian, B. F., & Chen, Q. (2021). "Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃". *Cement Concrete Compos.*, 119: 103992.
- Yoo, D., & Banthia, N. (2016). "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review". *Cement Concrete Compos.*, 73: 267-280.
- Yu, R., Tang, P., Spiesz, P., & Brouwers, H. (2014). "A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA)". *Constr. Build. Mater.*, 60: 98-110.
- Zaid, O., Zamir Hashmi, S. R., El Ouni, M. H., Martínez-García, R., De Prado-Gil, J., & Yousef, S. E. A. (2023). "Experimental and analytical study of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete modified with egg shell powder and nano-silica". *J. Mater. Res. Technol.*, 24: 7162-7188.
- Zhang, D., Jiang, J., Weng, Y., Wang, D., Wu, X., & Fan, S. (2023). "Pull-out behaviour of steel fibres embedded in ultra-high-performance concrete after exposure to high temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 408: 133630.