Journal of Structural and Construction Engineering, 12(06), 2025, pp. 195-239

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

A Review of the Application of Nanomaterials in Mechanical Properties, Water Absorption, and Chloride Penetration of Ultra-High-Performance Concrete

Majid Mirzaee [1]*

1- Assistant Professor, Materials Engineering, Non-Metallic Materials Research Group, Power Research Institute, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent decades, traditional concrete has posed a significant challenge for modernizing the construction industry due to its low tensile strength, poor brittleness, insufficient crack resistance, high water absorption, and chloride penetration. To overcome these issues, ultra-high-performance concrete (UHPC) with superior mechanical properties and durability has been developed, which holds great potential for widespread application in the future of construction engineering. However, UHPC is less environmentally friendly due to its higher cement consumption than traditional concrete. Cement production generates large amounts of carbon dioxide, contributing to the greenhouse effect. Nanomaterials possess microstructural features that range in size from 0.1 to 100 nanometers and exhibit new properties compared to their counterparts, including filling effects, surface activity, and environmental stability. The findings of this review article confirm that using nanomaterials as additives improves the quality of hydration products and reduces the formation of micropores, thereby enhancing the mechanical properties of ultra-high-performance concrete. This review article examines the impact of various nanomaterials used in UHPC for partial cement replacement or as additives on microstructures, mechanical properties, and other characteristics of UHPC. Additionally, the limitations and shortcomings of current research are analyzed and summarized, and development directions for future research on the application of nanomaterials in UHPC are presented.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 October 2024
Revise Date: 22 November 2024
Accept Date: 14 December 2024

Keywords:
Ultra-high-performance concrete
Nanomaterials
microstructure
Mechanical properties
Water absorption
Chloride penetration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2024.482593.3541

*Corresponding author: Majid Mirzaee.
Email address: mjmirzaei@nri.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

مروری بر کاربرد نانومواد در خواص مکانیکی، جذب آب و نفوذ کلراید بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا

مجید میرزایی*[۱]

۱- استادیارگروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده

در دهه‌های اخیر، بتن سنتی چالش بزرگی برای مدرنیزه کردن صنعت ساخت و ساز به دلیل مقاومت کششی پایین، تردی زیاد، مقاومت ناکافی در برابر ترک خوردگی، جذب آب و نفوذ کلراید بالا ایجاد کرده است. برای غلبه بر این مشکلات، بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا با خواص مکانیکی و دوام برتر توسعه یافته است که چشم‌انداز کاربرد وسیعی در آینده مهندسی ساخت و ساز دارد. با این حال، بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا به دلیل مصرف بیشتر سیمان نسبت به بتن سنتی، کمتر دوست‌دار محیط زیست است. تولید سیمان مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند و بنابراین منجر به اثر گلخانه‌ای می‌شود. نانومواد شامل ویژگی‌های میکروساختاری هستند که اندازه آن‌ها از ۰/۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است و خواص جدیدی را نسبت به همتایان خود نشان می‌دهند، از جمله اثر پرکنندگی، فعالیت سطحی و پایداری زیست‌محیطی. یافته‌های این مقاله مروری تأیید می‌کند که استفاده از نانومواد به‌عنوان افزودنی، کیفیت محصولات هیدراسیون را بهبود می‌بخشد و همچنین تشکیل میکرو حفره‌ها را کاهش می‌دهد و خواص مکانیکی بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا را بهبود می بخشد. این مقاله مروری تأثیر نانومواد مختلف استفاده شده در UHPC را برای جایگزینی جزئی سیمان یا به‌عنوان افزودنی بر روی میکروساختارها، خواص مکانیکی و سایر خواص UHPC مرور می‌کند. علاوه بر این، محدودیت‌ها و کاستی‌های تحقیقات فعلی تحلیل و خلاصه شده و جهت‌گیری‌های توسعه برای تحقیقات آینده در زمینه کاربرد نانومواد در UHPC ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا، نانومواد، میکروساختار، خواص مکانیکی، جذب آب، نفوذ کلراید

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2024.482593.3541
۱۴۰۳/۰۷/۲۱	۱۴۰۳/۰۹/۰۲	۱۴۰۳/۰۹/۲۴	۱۴۰۳/۰۹/۲۴	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.482593.3541

*نویسنده مسئول: مجید میرزایی

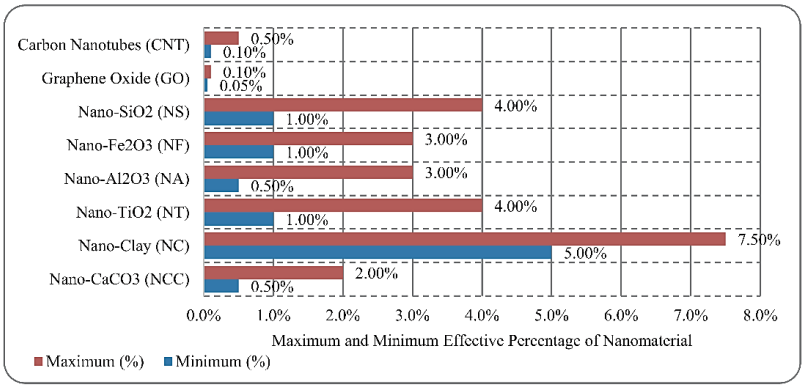
پست الکترونیکی: mjmirzaei@nri.ac.ir

۱- مقدمه

از زمان کشف بتن، این ماده به‌عنوان رایج‌ترین مصالح ساختمانی به‌طور گسترده‌ای در ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و سدها در سرتاسر جهان استفاده شده است. با توسعه سریع در قرن بیست و یکم، مهندسان عمران به‌طور مداوم مواد ساختمانی جدیدی را برای ساخت سازه‌های بلندتر، قوی‌تر، بادوام‌تر و زیباتر به کار می‌برند. با پیروی از این روند، کاستی‌های بتن سنتی مانند مقاومت کششی پایین، تردی ضعیف و دوام ناکافی نمایان شد. برای مقابله با این معضل، دانشمندان الیاف با خواص مکانیکی برتر را به‌عنوان تقویت‌کننده بتن اضافه کردند [۱]. الیاف با مدول الاستیسیته بالا و مقاومت کششی زیاد می‌توانند در بتن استفاده شوند تا پیوند را تقویت کرده و بارها را منتقل کنند و در نتیجه مقاومت کششی و تردی را بهبود بخشند. با این حال، بهبود مواد مبتنی بر سیمان با مخلوط کردن الیاف از طریق واکنش هیدراسیون دشوار است. در دهه ۱۹۷۰، بتن با مقاومت فشاری بیش از ۶۰ مگاپاسکال برای اولین بار به‌دست آمد [۲]. استفاده از بتن تقویت‌شده با الیاف به‌طور قابل توجهی مقاومت خمشی و تردی آن را بهبود بخشید که به آن بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود. در سال ۱۹۹۳، ریچارد[1]، برای اولین بار بتن پودری واکنشی[2] (RPC) را پیشنهاد کرد [۳]. ویژگی‌های اصلی آن عدم وجود دانه‌های درشت برای افزایش یکنواختی ماتریس، استفاده از فشار در طول دوره سخت شدن برای افزایش چگالی و استفاده از الیاف فولادی با اندازه کوچک برای افزایش تردی است، به‌طوری که بتن تهیه شده دارای ویژگی‌های مقاومت بالا و چگالی بالا است. بنابراین، مواد خام استفاده شده در RPC عمدتاً شامل سیمان، خاک سیلیسی، فوق‌روان‌کننده، شن کوارتز، الیاف فولادی و غیره است. در سال ۱۹۹۴، دی لارد[3] و سدران[4] به‌طور رسمی مفهوم بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا[5] (UHPC) را پیشنهاد کردند [۴]. حداکثر مقاومت فشاری UHPC می‌تواند بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال باشد که بسیار بالاتر از بتن معمولی است [۵]. به‌طور مشابه، دوام UHPC نیز بسیار بالاتر است [۶]. برای دستیابی به این هدف، مواد خام UHPC عمدتاً شامل سیمان، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، خاک سیلیسی، آب و دانه‌های ریز و غیره است. به‌نوعی، RPC می‌تواند به‌عنوان یک شکل از UHPC در نظر گرفته شود. علاوه بر این، نسبت آب به سیمان در UHPC نسبتاً کوچک است و معمولاً بین ۰/۱۱ تا ۰/۲۵ کنترل می‌شود که منجر به استفاده زیاد از مواد سیمانی می‌شود و سیمان استفاده شده در UHPC می‌تواند تا ۴۰٪ از کل مواد را تشکیل دهد. در عین حال، مقدار کافی فوق‌روان‌کننده برای افزایش کارایی UHPC مورد نیاز است. به‌دلیل دوز بالای سیمان، حرارت هیدراسیون بیشتری تولید می‌شود که منجر به نرخ انقباض بزرگ‌تری نسبت به بتن معمولی می‌شود [۷]. با افزودن مواد الیافی با خواص مکانیکی عالی به UHPC، می‌توان انقباض و تردی را بهبود بخشید. به‌طور خلاصه، با توجه به عملکرد UHPC، این ماده قطعاً نقش مهمی در ساخت و ساز آینده ایفا خواهد کرد. امروزه، اثر گلخانه‌ای به‌عنوان یک مشکل زیست‌محیطی عمده که جهان با آن مواجه است، چالش‌های جدی برای توسعه پایدار به همراه دارد. یک مطالعه قبلی نشان داده است که حدود ۵٪ از کل انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از تولید سیمان است [۸]. به‌وضوح، مصرف بالاتر سیمان در UHPC نه تنها انتشار کربن را افزایش می‌دهد، بلکه منجر به افزایش هزینه‌ها نیز می‌شود که ممکن است کاربرد و ترویج UHPC را مختل کند. بنابراین، چگونگی کاهش استفاده از سیمان بدون تأثیر بر عملکرد UHPC به یک مسئله داغ تبدیل شده است که باید به‌طور جهانی مورد توجه قرار گیرد. نانومواد، مواد میکروسکوپی نوظهوری هستند که از زمان کشف خود تأثیر زیادی بر توسعه زیست‌شناسی، شیمی و سایر زمینه‌ها گذاشته‌اند. ژو[6] و همکاران تعریف نانومواد را ارائه دادند و اشاره کردند که اندازه نانومواد از ۰/۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است. با این حال، اندازه نانومواد استفاده شده در مواد مبتنی بر سیمان معمولاً فراتر از این محدوده است. هنگام گسترش مقیاس تحقیق از مواد کلان به سطح میکرو، خواص الکتریکی و اثر هسته بلوری سطح ماده به‌طور مداوم تغییر می‌کند تا به یک درجه خاص برسد و سپس خواص جدیدی از جمله اثر میکرو و اثر سطحی را نشان می‌دهد که در سطح کلان برای ماده قابل دسترسی نیست. با استفاده از ویژگی‌های جدید نانومواد، می‌توان فرآیند هیدراسیون سیمان را تنظیم کرد و بدین ترتیب بر خواص مکانیکی و دوام خمیر سخت شده تأثیر گذاشت. نانومواد به‌عنوان جایگزینی برای سیمان در UHPC می‌توانند انتشار CO_2را کاهش دهند، عملکرد UHPC را بهبود بخشند و حتی ویژگی‌های جدیدی به آن اضافه کنند. این مقاله بر روی کاربرد نانومواد

1 Richard
2 Reactive powder concrete
3 Larrard
4 Sedran
5 Ultra-high-performance concrete
6 Zhu

مختلف به‌عنوان اجزای UHPC به‌جای سیمان تمرکز دارد. همچنین امکان‌سنجی و احتمال جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده نانومواد بررسی شده است. از آنجا که انواع مختلفی از نانومواد وجود دارد و مکانیسم‌های آن‌ها کاملاً متفاوت است، این مقاله یک مرور ادبیات به‌روز را بر اساس دسته‌بندی نانومواد، یعنی نانو سیلیکا، نانو $CaCO_3$ ، نانومواد مبتنی بر کربن، نانو TiO_2 و نانو MgO انجام می‌دهد. استفاده از نانومواد به‌عنوان جایگزین جزئی به‌عنوان ماده پرکننده در بتن سیمانی، رئولوژی و میکروساختار را در مقیاس نانو تغییر می‌دهد و به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی را بهبود می‌بخشد. شکل ۱ حداکثر و حداقل مقادیر جایگزینی محصولات مختلف سیمانی با نانومواد را بر اساس خواص کلی آن‌ها نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱: حداکثر و حداقل مقادیر جایگزینی انواع نانومواد [۹].

۲- نانو سیلیکا

نانو سیلیکا یک ماده شیمیایی غیرآلی است و میکروساختار آن به‌صورت ساختار شبه‌ذره‌ای کروی، کلوخه‌ای و شبکه‌ای است. فرمول مولکولی و فرمول ساختاری آن SiO_2 است و در آب حل نمی‌شود. نانو سیلیکا به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات پلاستیک‌ها، رزین‌ها و پوشش‌ها استفاده شده است. نکته کلیدی در تولید UHPC، کاهش تخلخل، بهبود چگالی بسته‌بندی ذرات و بهینه‌سازی ساختار داخلی حفره‌ها است. با این حال، در مواد خام UHPC، کوچک‌ترین اندازه ذرات از مقیاس نانو فراتر می‌رود که این امر منجر به وجود حفره‌های کوچک در مواد خام پس از انباشت می‌شود[۱۰]. با افزودن نانومواد، UHPC به چگالی بیشتری و توزیع اندازه ذرات بهتری دست می‌یابد. نانو سیلیکا به‌صورت پودر سفید آمورف یا ژل سیلیکا ظاهر می‌شود که می‌تواند به‌راحتی در شکاف بین ذرات سیمان پر شود تا چگالی کلی آن افزایش یابد. در واقع، کاربرد نانو سیلیکا در مواد مبتنی بر سیمان به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. نانو سیلیکا می‌تواند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دوام مواد مبتنی بر سیمان را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، زنگ[۷] و همکاران [۱۱] دریافتند که تولید بتن با غوطه‌ور کردن دانه‌های درشت بازیافتی در محلول حاوی نانو سیلیکا می‌تواند میکرو سختی ناحیه انتقال بین‌سطحی بتن را افزایش دهد و بدین ترتیب خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی آن را بهبود بخشد. مطالعه منگ[۸] و همکاران [۱۲] نشان داد که اندازه ذرات تأثیر زیادی بر خواص خمیر سیمان دارد. آن‌ها همچنین اشاره کردند که وقتی اندازه ذرات نانو سیلیکا ریزتر باشد، ساختار ماتریس می‌تواند متراکم‌تر باشد، اما اندازه بزرگ‌تر ذرات نانو سیلیکا موجب بهبود مقاومت ماتریس می‌شود. نانو سیلیکا به‌دلیل تأثیر مثبت آن بر بتن معمولی، در کاربرد در UHPC جذاب است. تأثیر آن عمدتاً در جنبه‌های زیر منعکس می‌شود: (۱) اثر پرکنندگی به اندازه نانو، افزایش چگالی ماتریس و کاهش تخلخل؛ (۲) واکنش پوزولانی، که با هیدروکسید کلسیم (CH) در محصولات هیدراسیون واکنش می‌دهد و منجر به تولید بیشتر ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C–S–H) می‌شود، که به تقویت مقاومت ماتریس سیمان کمک می‌کند؛ (۳) اثر هسته بلوری. ژل C–S–H بر روی سطح نانو سیلیکا رشد می‌کند که نرخ رشد C–S–H در ماتریس را بهبود می‌بخشد و به بهبود مقاومت اولیه کمک می‌کند.

7 Zeng
8 Meng

۲-۱- تأثیر نانو سیلیکا بر عملکرد UHPC

جدول ۱ تأثیر نانو سیلیکا بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی UHPC را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای که توسط یو[9] و همکاران [۱۳] انجام شد، هر دو مقاومت فشاری و مقاومت خمشی UHPC ابتدا روند صعودی نشان دادند و سپس با افزایش نرخ جایگزینی سیمان کاهش یافتند، و افزایش مقاومت خمشی بیشتر مشهود بود. همچنین مشخص شد که قابلیت توزیع نانو سیلیکا دلیل اصلی کاهش مقاومت در مقادیر بالا است. علاوه بر این، محتوای خاک سیلیسی استفاده شده در UHPC نیز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مقاومت دارد. تحقیق لنجام شده به وسیله مندس[10] و همکاران [۱۴] انجام شد نشان داد که محتوای نانو سیلیکا در UHPC ثابت باقی ماند؛ و با افزایش مقادیر خاک سیلیسی از ۱۰ به ۲۰٪ مقاومت حداکثر حدود ۱۵٪ افزایش یافت. شرایط عمل‌آوری بتن نقش حیاتی در بهبود درجه هیدراسیون و مقاومت ایفا می‌کند. تحقیق لی[11] و همکاران [۱۵] نشان داد که خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده پس از مخلوط کردن با نانو سیلیکا تحت شرایط عمل‌آوری مختلف کاملاً متفاوت بودند. در دماهای بالا، نانو سیلیکا، خاک سیلیسی و سایر مواد در سیستم هیدراسیون فعالیت بیشتری دارند و واکنش کافی‌تری منجر به افزایش مقاومت می‌شود. عملکرد خمشی معمولاً به درجه پیوند بین ماتریس سیمان و دانه‌ها بستگی دارد. یانکوویچ[12] و همکاران [۱۶] تأثیر دانه‌های ریز مختلف بر عملکرد UHPC تولید شده با استفاده از نانو سیلیکا به‌عنوان جایگزین سیمان را مطالعه کردند و نشان دادند که وقتی نرخ جایگزینی سیمان ۲.۰٪ بود، ترکیب باریت و شن کوارتز از نظر مقاومت بهتر از استفاده جداگانه بود.

جدول ۱: تأثیر نانو سیلیکا بر خواص مکانیکی UHPC

جایگزینی سیمان (٪)	شرایط عمل‌آوری	عمل‌آوری (سن/روز)	بهبود مقاومت فشاری (٪)	بهبود مقاومت خمشی (٪)
۵-۰	عمل‌آوری در آب	۲۸	۱۵/۷	۳۴/۶
۱۰-۰	۲۴ساعت در ۲۲ درجه سانتی‌گراد + ۱۸ ساعت در ۹۰ درجه سانتی‌گراد + عمل‌آوری استاندارد	۲۸	۱۰/۹	-
۲-۰	۲ روز در ۹۰ درجه سانتی‌گراد + ۲۶ روز عمل‌آوری استاندارد	۲۸	۳/۴۲	۳۴/۲
۴	عمل‌آوری در آب	۲۸	۱۰/۰	۲۳/۳
۴-۰	عمل‌آوری در آب	۲۸	۸/۰	-

۲-۲- قابلیت توزیع نانو ذرات سیلیکا

به‌دلیل تفاوت در شرایط سخت شدن، نسبت آب به سیمان، اندازه نانو سیلیکا و روش مخلوط کردن، تأثیر تقویت مقاومت متفاوت است. از نظر کارایی جایگزینی سیمان در UHPC، نسبت جایگزینی فعلی هنوز بسیار پایین است و آگلومره شدن به بزرگ‌ترین مانع برای افزایش مقدار جایگزینی تبدیل شده است. نانو سیلیکا دارای جذب سطحی قوی و انرژی سطحی بالاست که می‌تواند به‌راحتی با هم جذب شود و سطح خاص و انرژی سطحی را کاهش دهد. زمانی که نانو سیلیکا شروع به آگلومره شدن می‌کند، به‌دلیل اندازه نسبتاً کوچک تجمع ذرات، هنوز اثر پرکنندگی دارد و آب آزاد را در حفره‌ها آزاد می‌کند. با افزایش قطر آگلومراسیون ذرات، اثر پرکنندگی نانو سیلیکا کاهش

9 Yu
10 Mendes
11 Li
12 Jankovic

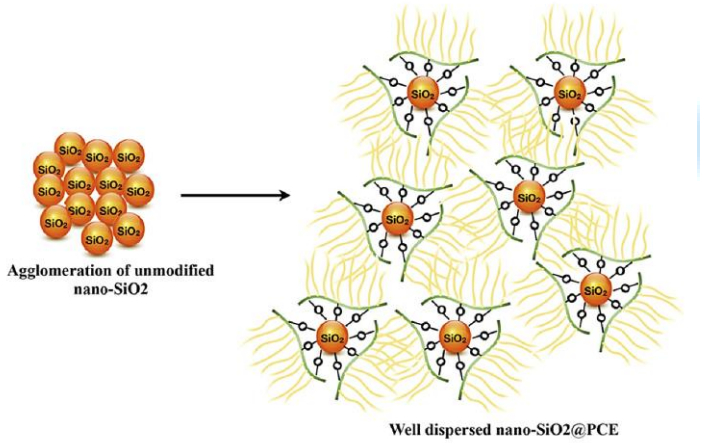
می‌یابد و منجر به کاهش سیالیت می‌شود. بنابراین، کاهش آگلومراسیون نانو سیلیکا به یک روش مؤثر برای گسترش نرخ جایگزینی آن تبدیل می‌شود. در حال حاضر، دو روش اصلی وجود دارد.

۲-۲-۱- توزیه نانو ذرات با روش اولتراسونیک:ا

صل این روش تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی صوتی است که حباب‌های ریزی در محیط مایع ایجاد می‌کند و انرژی ترکیدن حباب‌ها باعث پخش نانومواد می‌شود.

۲-۲-۲- اصلاح سطح

با پیوند زدن گروه‌های عملکردی دیگر به سطح نانو سیلیکا، پیوندهای شیمیایی پایداری با گروه‌های هیدروکربنی روی سطح نانو سیلیکا تشکیل می‌شود تا ساختار هسته پوسته‌ای ایجاد شود. فنگ[۱۳] و همکاران [۱۷] دریافتند که کوپلیمر فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات با پیوند Si–OH روی سطح نانو سیلیکا باعث می‌شود نانو سیلیکا در همزن مکانیکی و محلول قلیایی توزیع خوبی داشته باشد (شکل ۲). همچنین مشخص شد که وقتی نسبت هسته پوسته کمتر از ۱۸ باشد، با کوتاه کردن دوره القا و افزایش حداکثر جریان حرارتی، نرخ هیدراسیون می‌تواند به‌طور قابل توجهی تسریع شود و تعداد حفره‌های مویین کاهش یابد. پس از پخش یکنواخت، نانو سیلیکا در فرآیند هیدراسیون شرکت می‌کند که همچنین بر میکروساختار تأثیر می‌گذارد.



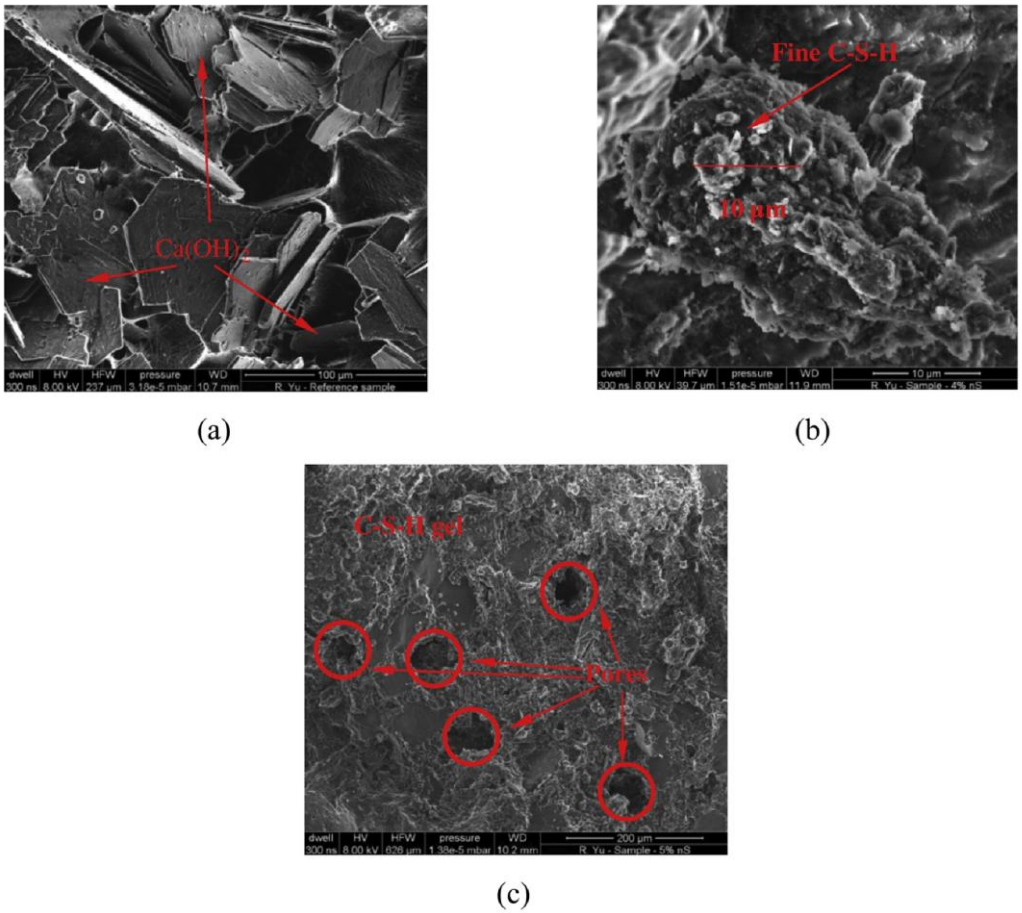
شکل ۲: نمودار شماتیک نانو سیلیکا اصلاح شده توسط فوق‌پلاستیک‌کننده پلی‌کربوکسیلات [۱۷].

۲-۳- تأثیرات نانو سیلیکا بر میکروساختار UHPC

تأثیر نانومواد بر محصولات هیدراسیون در نهایت می‌تواند از طریق آرایش و توزیع محصولات هیدراسیون، چگالی حفره‌ها و وجود ترک‌ها در ماتریس منعکس شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، زمانی که نانو سیلیکا وجود نداشت، میکروساختار بلور CH نامنظم بود و فضای حفره وسیعی داشت [۱۸]. با افزودن نانوذرات سیلیکا، CH با نانو سیلیکا واکنش داده و ژل C–S–H را تشکیل می‌دهد که منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت می‌شود. زمانی که مقدار مخلوط نانو سیلیکا به‌طور مداوم افزایش می‌یابد، سیالیت دوغاب کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود حذف هوا دشوار شود و در نتیجه ضعف‌هایی در ژل C–S–H ایجاد می‌شود که منجر به کاهش مقاومت می‌شود. واکنش پوزولانی همچنین می‌تواند به‌طور مؤثری پیوند بین دانه‌های ریز و ماتریس را تقویت کند و بدین ترتیب مقاومت کلی را بهبود بخشد. بهینه‌سازی ساختار حفره UHPC با مقدار نامناسب نانو سیلیکا همچنین دوام UHPC را بهبود می‌بخشد. مطالعات

13 Feng

غفاری و همکاران [۱۹] نشان داد که وقتی نسبت جایگزینی سیمان با نانو سیلیکا ۳.۰٪ باشد، مقاومت در برابر خوردگی UHPC به میزان ۴۱٪ افزایش می‌یابد. گزارش دیگری از گارسیا کلاوو[۱۴] و همکاران [۲۰] نشان داد که عامل‌دار کردن ذرات نانو سیلیکا با آمین‌ها نیز ساختار حفره را بهینه‌سازی کرده و بدین ترتیب عملکرد خودترمیمی و مقاومت در برابر خوردگی را بهبود می‌بخشد.



شکل ۳: تصاویر SEM از محتوای مختلف نانو سیلیکا جایگزین سیمان در UHPC (الف) ۰.۰٪، (ب) ۴.۰٪، و (ج) ۵.۰٪ [۱۸].

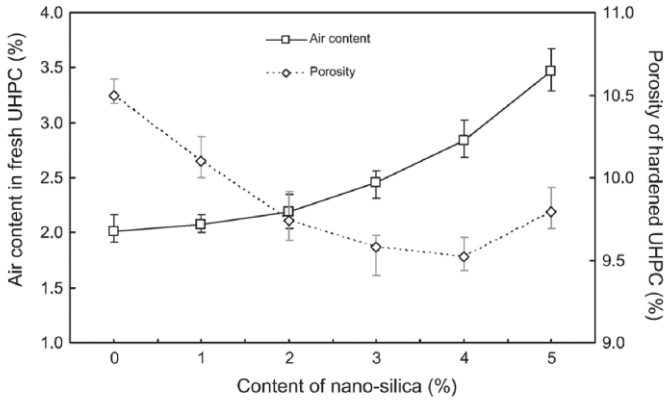
۲-۴- تأثیرات نانو سیلیکا بر کارایی، تخلخل و محتوای هوا در UHPC

افزودن نانو سیلیکا همچنین تأثیر زیادی بر عملکرد کاری UHPC دارد. دو مکانیزم اصلی برای این تأثیر وجود دارد. یکی اثر مفید افزایش سیالیت به‌دلیل اثر پرکنندگی آن است (ذرات کوچکتر می‌توانند در حفره‌های بین ذرات بزرگتر پر شوند). دیگری به‌دلیل سطح ویژه بزرگ آن در زیر ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در تهیه UHPC است، که جایگزینی نانو سیلیکا به‌جای سیمان نیز منجر به کاهش عملکرد کاری UHPC می‌شود. این تمایل به کاهش سیالیت همچنین مستقل از اندازه نانو سیلیکا است. صرف‌نظر از اینکه اندازه نانو سیلیکا ۱۵ یا ۲۰ نانومتر باشد، روند کاهش سیالیت تغییر نمی‌کند. می‌توان مشاهده کرد که وقتی نانو سیلیکا به UHPC اضافه می‌شود، اثر جذب سطح ویژه بزرگ بر اثر پرکنندگی غلبه می‌کند و در نتیجه تنش تسلیم و ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد که منجر به کاهش سیالیت بتن می‌شود [۲۱]. برای حل این مشکل، تنظیم مقدار فوق‌روان‌کننده و تغییر استراتژی مخلوط کردن گزینه‌های جایگزین هستند. از نظر محتوای هوای داخلی و تخلخل، افزودن نانو سیلیکا ساختار داخلی UHPCرا بهینه‌سازی کرده و بر تخلخل تأثیر می‌گذارد. تغییر در محتوای هوا همچنین به سیالیت مربوط می‌شود. با افزایش نانو سیلیکا، سیالیت کاهش می‌یابد و ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد؛ بنابراین، هوا در بتن در فرآیند

14 García Calvo

مخلوط کردن به‌سختی تخلیه می‌شود و در نتیجه محتوای هوا در بتن افزایش می‌یابد. در عین حال، به‌دلیل اثر هسته‌زایی نانو سیلیکا، آب بیشتری جذب می‌شود که منجر به کاهش سیالیت می‌شود. این دو عملکرد بر کارایی نهایی سیستم تأثیر می‌گذارد. یو و همکاران [۱۸] تأثیر استفاده از خاکستر پایین بازیافتی به‌عنوان جایگزین شن و نانو سیلیکا به‌جای سیمان برای تولید UHPC بر عملکرد کاری آن را تحلیل کردند. مشخص شد که با افزایش نرخ جایگزینی سیمان، افتی تدریجی در روانی مشاهده می‌شود. این روند کاهشی با کاهش دوز سیمان تغییر نمی‌کند. در مطالعه دیگری [۱۳]، زمانی که مقدار سیمان در تهیه UHPC زیر ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب کنترل می‌شود، جایگزینی نانو سیلیکا به‌جای سیمان نیز منجر به کاهش عملکرد کاری UHPC می‌شود. این تمایل به کاهش سیالیت همچنین مستقل از اندازه نانو سیلیکا است. صرف‌نظر از اینکه اندازه نانو سیلیکا ۱۵ یا ۲۰ نانومتر باشد، روند کاهش سیالیت تغییر نمی‌کند. می‌توان مشاهده کرد که وقتی نانو سیلیکا به UHPC اضافه می‌شود، اثر جذب سطح ویژه بزرگ بر اثر پرکنندگی غلبه می‌کند و در نتیجه تنش تسلیم و ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد که منجر به کاهش سیالیت بتن می‌شود. برای حل این مشکل، تنظیم مقدار فوق‌پلاستیک‌کننده و تغییر استراتژی مخلوط کردن گزینه‌های جایگزین هستند.

از نظر محتوای هوای داخلی و تخلخل، افزودن نانو سیلیکا ساختار داخلی UHPC را بهینه‌سازی کرده و بر تخلخل تأثیر می‌گذارد. تغییر در محتوای هوا همچنین به سیالیت مربوط می‌شود. با افزایش نانو سیلیکا، سیالیت کاهش می‌یابد و ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد؛ بنابراین، هوا در بتن در فرآیند مخلوط کردن به‌سختی تخلیه می‌شود و در نتیجه محتوای هوا در بتن افزایش می‌یابد. در عین حال، به‌دلیل اثر هسته‌زایی نانو سیلیکا و واکنش پوزولانی، که درجه هیدراسیون ذرات سیمان را عمیق‌تر می‌کند، محصولات هیدراسیون بیشتری در حفره‌های اطراف ذرات پر می‌شود که منجر به کاهش تخلخل می‌شود. زمانی که افزایش محصولات هیدراسیون کمتر از حجم حفره باشد، تخلخل ممکن است افزایش یابد (شکل ۴). از منظر حفره‌ها با قطرهای مختلف، افزودن نانو سیلیکا به‌طور قابل توجهی حفره‌های کوچک با قطرهای بین ۰/۳ تا ۴۰ نانومتر را کاهش می‌دهد [۲۲]. این مطالعات پتانسیل نانو سیلیکا را به‌عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان در UHPCتأیید کرده‌اند. مکانیزم هیدراسیون نانو سیلیکا با مشاهده میکروساختار به‌دست آمده است. این مطالعات پیامدهای مهمی برای توضیح تغییرات عملکرد کلان در UHPC دارند. با این حال، هنوز برخی جنبه‌ها وجود دارد که نیاز به تقویت دارند: (۱) مقدار بهینه جایگزینی نانو سیلیکا هنوز تعیین نشده است و نیاز به مطالعات گسترده‌تری برای تعیین آن وجود دارد؛ (۲) اگرچه مکانیزم عملکرد نانو سیلیکا در UHPC تا حدی مورد مطالعه قرار گرفته است، تحقیقات فعلی به اندازه کافی جامع نیست؛ و (۳) تأثیر اصلاح‌کننده بر فعالیت و پایداری نانو سیلیکا باید کاهش یابد.



شکل ۴: محتوای هوا و تخلخل UHPC با مقادیر مختلف نانو سیلیکا [۱۳].

۳- نانو $CaCO_3$

نانو $CaCO_3$ عمدتاً از کلسیت طبیعی، مرمر و سنگ آهک به‌دست می‌آید و به‌دلیل هزینه پایین خود محبوب است. عملکرد آن به‌طور قابل توجهی نسبت به کربنات کلسیم معمولی بهبود یافته است، که به‌طور گسترده‌ای در صنایع پلاستیک و لاستیک استفاده

می‌شود. در مطالعات اولیه، افزودن پودر آهک معمولی به سیمان قلیایی به‌جای خاکستر بادی می‌توانست فرآیند هیدراسیون را تسریع کرده و مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از سخت شدن را بهبود بخشد. علاوه بر این، افزودن سنگ آهک می‌تواند تبدیل اترینگیت (AFt) به کلسیم سولفوآلومینات گوگرد (AFm) را مهار کند و دارای ظرفیت شیمیایی خوبی برای یون‌های کلراید باشد و بدین ترتیب دوام نفوذپذیری کلراید را بهبود بخشد.

۳-۱- تأثیر نانو $CaCO_3$ بر خواص بتن معمولی

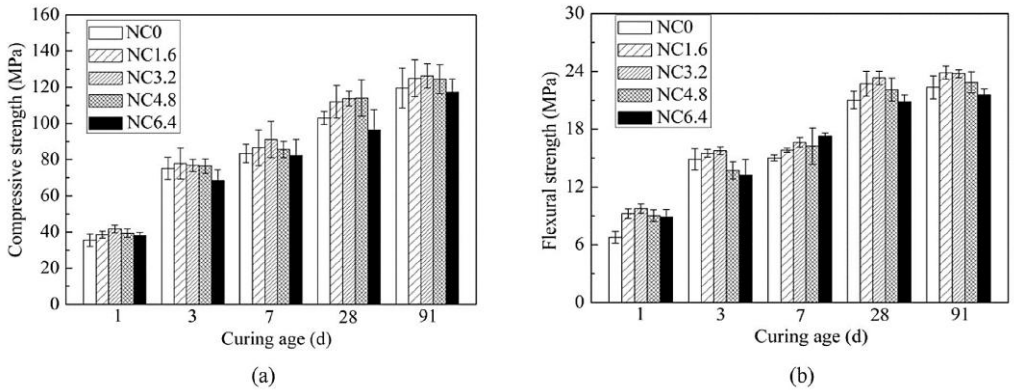
با پیشرفت فناوری نانو، ظهور نانو $CaCO_3$ می‌تواند به‌طور مؤثری فشارهای زیست‌محیطی کنونی را کاهش دهد. بسیاری از افراد شروع به استفاده از نانو $CaCO_3$ در بتن معمولی کرده‌اند. یانگ و همکاران [۲۳] دریافتند که مقاومت فشاری، نفوذناپذیری و مقاومت در برابر کربن‌زدایی بتن مخلوط شده با نانو $CaCO_3$ پس از قالب‌گیری به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است که علت ان این است که نانو $CaCO_3$در فرآیند هیدراسیون سیمان شرکت کرده و با تری‌کلسیم آلومینات واکنش داده و کلسیم کربن آلومینات هیدراته تولید می‌کند. در مطالعه لی و همکاران [۲۴] نشان داده شد که با کاهش تخلخل، نسبت ماکروتخلخل و تسریع هیدراسیون، خواص ضدکلر و ضد کربن‌زدایی بتن اتوکلاو شده با نانو $CaCO_3$ بهبود می‌یابد. نانو $CaCO_3$ همچنین می‌تواند با CH واکنش داده و کربنات کلسیم پایه‌ای تشکیل دهد که به تقویت مقاومت پیوندی ناحیه انتقال کمک می‌کند و اثر هسته‌زایی آن به‌طور مؤثری تشکیل ژل C–S–H را ترویج می‌کند. مشاهده می‌شود که افزودن نانو $CaCO_3$ به بتن معمولی با ترویج محصولات هیدراسیون، شاخص‌های عملکرد را بهبود می‌بخشد.

۳-۲- تأثیر نانو $CaCO_3$ بر عملکرد UHPC

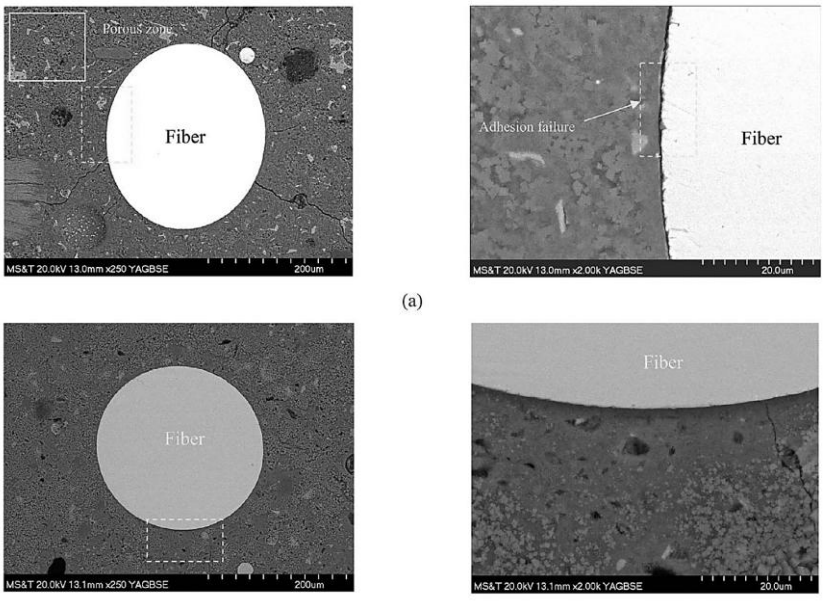
در تحقیقاتی که به کاربرد نانو $CaCO_3$ در UHPC پرداخته شده است، مشخص شده که تأثیر آن بر عملکرد بتن از نظر کارایی هنوز مورد بحث است. وو[15] و همکاران [۲۵] نتایج افزودن نانو $CaCO_3$ به بتن فوق‌العاده با مقاومت بالا را مطالعه کردند و دریافتند که سیالیت از ۲۲۰ به ۱۶۰ میلی‌متر کاهش یافته است. با این حال، کامیلتی[16] و همکاران [۲۶] دریافتند که وقتی درصد وزنی $CaCO_3$ کمتر از ۵٪ باشد، شاخص سیالیت به‌طور معکوس افزایش می‌یابد و اثر تنظیم و سخت شدن اولیه بتن را تقویت می‌کند. تفاوت در سیالیت ممکن است به پرکنندگی و جذب آب تحت اندازه‌های مختلف ذرات مربوط باشد. افزودن نانو $CaCO_3$ همچنین تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی UHPCداشت. زمانی که وزن نانو $CaCO_3$ بین ۱.۶ تا ۴.۸٪ باشد، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به‌ترتیب حدود ۱۳-۲۰٪ و ۱۵-۳۰٪ افزایش می‌یابد (شکل ۵). علاوه بر این، در روز اول، مقاومت خمشی UHPC پس از افزودن نانو $CaCO_3$ به‌طور قابل توجهی بهبود یافت، اما مقاومت خمشی در روز سوم کمتر از گروه مرجع بود. مقاومت‌های بعدی نشان داد که مقاومت خمشی UHPC می‌تواند زمانی که نسبت وزنی نانو $CaCO_3$ به سیمان کمتر از ۴.۸٪ باشد، افزایش یابد. از منظر مقاومت بلندمدت، مقاومت فشاری و خمشی UHPC حداکثر زمانی به‌دست می‌آید که وزن نانو $CaCO_3$ جایگزین سیمان به‌ترتیب ۳/۲ و ۱/۶٪ باشد. این به این دلیل است که نانو $CaCO_3$ با تری‌کلسیم آلومینات واکنش داده و کلسیم کربن آلومینات تولید کرده و حفره‌ها را پر می‌کند. زمانی که مقدار نانو $CaCO_3$ بیش از حد باشد، توزیع ذرات دشوار می‌شود و مقاومت کاهش می‌یابد. مطالعه‌ای که توسط هوانگ[17] و همکاران [۲۷] انجام شد نشان داد که نانو $CaCO_3$ با پخش ذرات کلینکر، نرخ آزادسازی حرارت را در ابتدای هیدراسیون افزایش می‌دهد که همچنین منجر به انبساط میکرو UHPC در ابتدای کار و افزایش جمع‌شدگی خود به خود می‌شود. استفاده از نانو $CaCO_3$ و مواد الیافی به‌طور همزمان، کلسیم کربن آلومینات را می‌تواند بر روی سطح الیاف رسوب دهد تا زبری آن را بهبود بخشد و بدین ترتیب پیوند بین ماده الیافی و ماتریس را تقویت کرده و استحکام آن را افزایش دهد و انقباض خود به خود را کاهش دهد (شکل ۶). علاوه بر این، تحقیقی که توسط کامیلتی و همکاران [۲۸] انجام شد نشان داد که نانو $CaCO_3$تأثیر بیشتری بر هیدراسیون میکرو کربنات کلسیم دارد. هر دو نانو $CaCO_3$ و نانو سیلیکا می‌توانند از طریق اثر هسته‌زایی رشد ژل C–S–Hرا ترویج کنند، اما آن‌ها با محصولات هیدراسیون متفاوتی واکنش نشان می‌دهند. علاوه بر این، مشکلات زیر هنوز در مطالعه نانو $CaCO_3$ در UHPC وجود دارد: (۱) مکانیزم نانو $CaCO_3$ در UHPC هنوز مشخص نیست و تحقیقات مرتبط هنوز در حالت فرضی قرار

15 Wu
16 Camiletti
17 Huang

دارد. بنابراین، می‌توان از فناوری نانو سختی برای توصیف خواص مکانیکی و ساختار میکرو و نانومواد استفاده کرد. (۲) بهینه‌سازی داخلی نانو $CaCO_3$ بر UHPC قطعاً بر دوام آن تأثیر خواهد گذاشت؛ بنابراین، لازم است که مطالعه جامعی بر روی تغییرات دوام انجام شود.



شکل ۵: تأثیر محتوای نانو $CaCO_3$ بر مقاومت بتن فوق‌العاده با مقاومت بالا: (الف) مقاومت فشاری و (ب) مقاومت خمشی [۲۵].



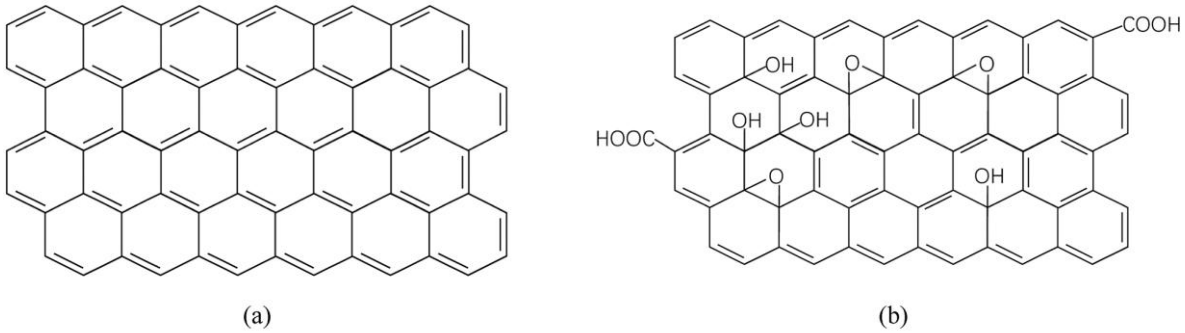
شکل ۶: تأثیر محتوای مختلف نانو $CaCO_3$ به‌عنوان جایگزین سیمان بر الیاف و ماتریس در UHPC (الف) ۰.۰٪ و (ب) ۳.۲ [۲۹].

۴-نانومواد مبتنی بر کربن

برخلاف نانو سیلیکا، نانومواد مبتنی بر کربن تمایل به داشتن خواص مکانیکی عالی دارند. در عین حال، نانومواد مبتنی بر کربن دارای ویژگی‌های زیادی هستند، مانند خواص مکانیکی فوق‌العاده، فعالیت سطحی، خواص الکتریکی و غیره، که به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی، زیست‌شناسی، سرامیک، مصالح ساختمانی و غیره استفاده شده‌اند. در حال حاضر، نانومواد مبتنی بر کربن که در UHPCبه‌کار می‌روند عمدتاً شامل نانولوله‌های کربنی(CNTs) ، الیاف نانوکربن (CNFs) و اکسید گرافن (GO) هستند. کاربرد این نانومواد مبتنی بر کربن تأثیر قابل توجهی بر مقاومت، دوام، استحکام و هدایت الکتریکی UHPC دارد.

۴-۱- اکسید گرافن

گرافن برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط محققان نووسلُف و گیم از دانشگاه منچستر در انگلستان از طریق روش لایه‌برداری تک‌لایه به‌دست آمد [۳۰]. ظهور گرافن نظریه سنتی قبلی را که مواد دو بعدی نمی‌توانند به‌طور پایدار وجود داشته باشند، شکسته است. این یک نوع ماده کربنی با ساختار بلوری لانه زنبوری دو بعدی است که از اتم‌های کربن تک‌لایه SP^2 تشکیل شده است. ساختار ایده‌آل گرافن یک شبکه شش‌ضلعی صفحه‌ای است که هر اتم کربن به سه اتم کربن مجاور خود با یک پیوند کووالان قوی متصل است. این ساختار منحصر به فرد همچنین خواص مکانیکی عالی را نشان می‌دهد، با مدول الاستیسیته ۱۰۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۱۳۰ گیگاپاسکال. با این حال، گرافن فعالیت کمتری دارد و در آب حل نمی‌شود، که این امر استفاده مستقیم از آن در مواد پایه سیمانی را دشوار می‌سازد. اکسید گرافن (GO) محصول اکسیداسیون قوی گرافن و یکی از مشتقات مهم گرافن است. روش‌های تولید GO به شرح زیر است: روش استودمایر، روش هومرز و روش برودی. اصل این است که پس از اکسیداسیون، گرافن به بسیاری از گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن مانند گروه هیدروکربنی و گروه کربوکسیل در ساختار صفحه‌ای دو بعدی خود متصل می‌شود (شکل ۷) [۳۱]. این گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن که آب دوست هستند، نه تنها به GO توزیع بهتری می‌دهند، بلکه به GO این امکان را می‌دهند که به‌طور عمیق در فرآیند واکنش شیمیایی شرکت کند، که این نیز دلیل رونق کاربرد GO در مواد پایه سیمانی در سال‌های اخیر است.



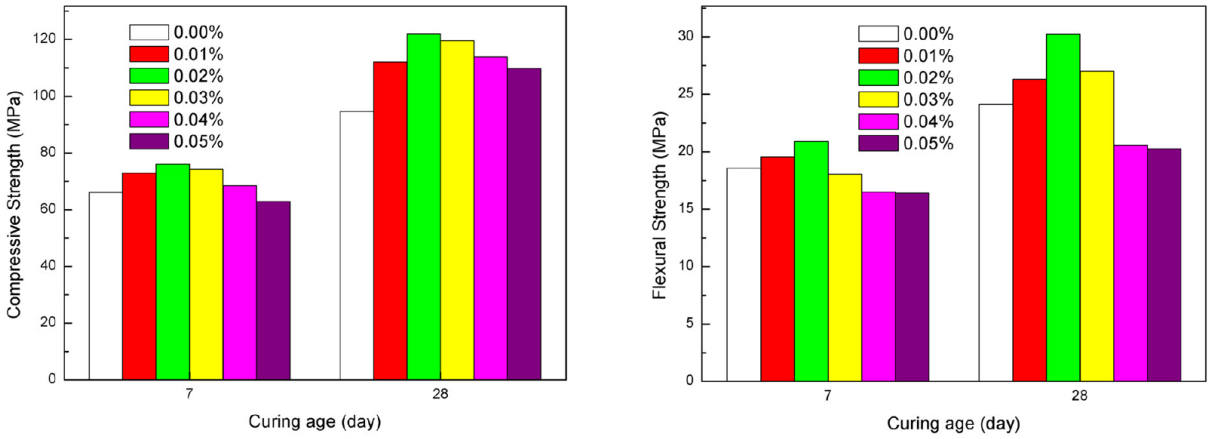
شکل ۷: ساختار (الف) گرافن و (ب) اکسید گرافن [۳۱].

۴-۱-۱- تأثیرات GO بر عملکرد بتن معمولی

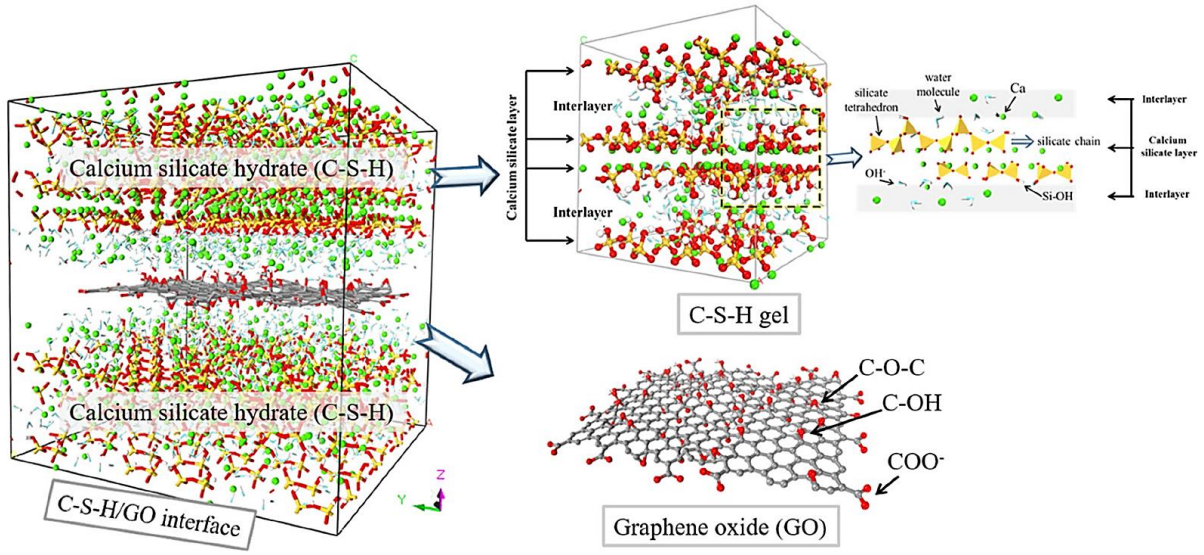
در دستاوردهای علمی اخیر، بسیاری از محققان تحقیقات گسترده‌ای در مورد کاربرد GO در ملات‌های معمولی، بتن، بتن بازیافتی، ملات خاکستر بادی و غیره انجام داده‌اند. این مطالعات تأثیر منفی GO بر عملکرد کاری مواد پایه سیمانی را تأیید کردند. در عین حال، این مطالعات همچنین اشاره کردند که GO هیدراسیون سیمان را ترویج می‌کند، اثر الگو و القایی بر تشکیل محصولات هیدراسیون دارد و جهت‌گیری بلورهای CH را کاهش می‌دهد، که باعث می‌شود مواد پایه سیمانی مخلوط شده با GO متراکم‌تر شوند. علاوه بر این، اثر هسته‌زایی GO همچنین تولید محصولات هیدراسیون را تسریع می‌کند. اثر ترکیبی این عوامل به‌طور کلی خواص مکانیکی و دوام مواد پایه سیمانی را بهبود می‌بخشد. سطح GO دارای تعداد زیادی گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن است که به‌راحتی با Ca^{2+} رسوب‌کرده از هیدراسیون سیمان واکنش نشان می‌دهند و باعث تشکیل آگلومراسیون می‌شوند [۳۲]. با این حال، فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات می‌تواند این پدیده را با افزایش اثرات دوگانه دافعه الکترونیکی و موانع فضایی در سیستم بهبود بخشد. در این میان، دافعه الکترونیکی به دافعه متقابل بین مولکول‌های فوق‌روان کننده بار منفی و مولکول‌های GO با بار منفی اشاره دارد، در حالی که مقاومت فضایی به افزودن فوق‌پلاستیک‌کننده اشاره دارد که نرخ هیدراسیون سیستم را کاهش می‌دهد و نرخ تولید یون کلسیم را کاهش می‌دهد، به‌طوری که اثر پیوندی مسدود می‌شود [۳۳].

۴-۱-۲- تأثیرات GO بر عملکرد UHPC

اصلاح مواد الیافی برای تقویت UHPC عمدتاً به خواص مکانیکی خود آن بستگی دارد، اما مکانیزم عملکرد GO کاملاً متفاوت است. از نظر مقاومت، مطالعه‌ای که به وسیله وو و همکاران انجام شد نشان داد که هم مقاومت فشاری و هم مقاومت خمشی الگوی مشابهی از افزایش اولیه و سپس کاهش را با افزایش محتوای GO نشان می‌دهند. مقاومت خمشی و مقاومت فشاری در ۲۸ روز حداکثر زمانی به‌دست آمد که میزان GO برابر ۰/۰۲ ٪ بود، که به‌ترتیب ۲۸.۷ و ۲۵.۳٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافت (شکل ۸). وان و ژانگ [۳۴] از روش مدل‌سازی دینامیک مولکولی برای تحلیل هیدراسیون GO در UHPC استفاده کردند. در مقایسه باOPC ، لایه ژل C–S–H در UHPC حاوی یون‌های کلسیم و هیدروکسید بیشتری بود. یون‌های کلسیم با گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن GO ترکیب شده و مولکول‌های آب پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های عملکردی GO و ژل C–S–H تشکیل می‌دهند (شکل ۹). این دو عمل پیوند بین C–S–H و GO را تقویت کرده و انعطاف‌پذیری و مقاومت کششی ساختار را بهبود می‌بخشند. در حال حاضر، کاربرد GO در UHPC هنوز در مرحله اولیه است و مکانیزم عملکرد آن به‌طور مقدماتی درک شده است. با این حال، مکانیزم عملکرد آن پیچیده است و نیاز به تحقیقات بیشتری در آینده دارد. علاوه بر این، واکنش خاکستر آتشفشانی در UHPC وجود دارد و بنابراین تأثیر GO بر هیدراسیون چندقطبی باید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۸: تأثیر محتوای مختلف کاربرد GO بر UHPC (الف) مقاومت فشاری و (ب) مقاومت خمشی [۳۵].



شکل ۹: مدل تأثیر GO بر ژل C–S–H [۳۴]

۴-۲- نانولوله‌های کربنی (CNTs)

نانولوله‌های کربنی (CNTs) مواد نانوکربنی یک‌بعدی هستند که در سال ۱۹۹۱ کشف شدند و ساختار آن‌ها را می‌توان به‌عنوان یک گرافن که به دور خود پیچیده شده است، با داخلی توخالی و درپوشی شبیه به سیلندر در هر دو انتها در نظر گرفت. نانولوله‌های کربنی از نظر قطر در مقیاس نانو هستند اما طول آن‌ها می‌تواند به میکرون برسد. بر اساس تفاوت در تعداد لایه‌ها، نانولوله‌های کربنی می‌توانند به نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و چندجداره تقسیم شوند. خواص مکانیکی آن‌ها مشابه گرافن است و همچنین دارای خواص الکتریکی عالی هستند. با توجه به خواص عالی آن، می‌توان از آن‌ها در مواد پایه سیمانی برای تولید بتن هوشمند با خواص قوی‌تر و حساسیت به فشار استفاده کرد [۳۶]. اصل این کار به‌صورت یکنواخت پخش کردن نانومواد با هدایت الکتریکی خوب در ماتریس سیمان است. زمانی که ساختار تحت تنش قرار می‌گیرد، حفره‌ها فشرده می‌شوند و تعداد نقاط تماس نانومواد در ماتریس سیمان به‌طور متناسب افزایش می‌یابد و یک شبکه هادی متصل تشکیل می‌شود و مقاومت ساختار سیمانی مربوطه نیز تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییر می‌تواند برای ارزیابی وضعیت، مانند سلامت و دوام، ساختار استفاده شود.

۴-۲-۱- روش‌های توزیع نانولوله‌های کربنی

برخلاف GO ، نانولوله‌های کربنی تقریباً هیچ گروه عملکردی حاوی اکسیژن بر روی سطوح خود ندارند که این امر توزیع آن‌ها در مواد پایه سیمانی را دشوار می‌سازد. در مطالعات قبلی، کاربرد توزیع با روش اولتراسونیک، اصلاح سطح (معرفی گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بر روی نانولوله‌های کربنی از طریق اصلاح کووالانس) و روش ترکیبی به‌عنوان روش‌های مؤثر اثبات شده‌اند. با این حال، آسانی آگلومراسیون دوباره پس از توزیع اولتراسونیک و احتمال آسیب به ساختار ناشی از اصلاح سطح نیز از عوامل مهمی هستند که بر کاربرد تأثیر می‌گذارند. به‌عنوان مثال، هو و همکاران [۳۷] اشاره کردند که اسید هیومیک پایداری نانولوله‌های کربنی پخش‌شده در محیط قلیایی را افزایش می‌دهد. زمانی که وزن مخلوط اسید هیومیک و نانولوله‌های کربنی به ۵.۰٪ وزن سیمان رسید، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی خمیر سیمان سخت شده به‌ترتیب ۳۱ و ۴۸٪ افزایش یافت. با این حال، احتمال آسیب اصلاح سطح به ساختار و آسانی تجمع دوباره پس از پخش‌سازی اولتراسونیک نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

۴-۲-۲- تأثیرات نانولوله‌های کربنی (CNTs) بر عملکرد UHPC

یو و همکاران [۳۸] نانولوله‌های کربنی را به UHPC با نسبت آب به سیمان ۰/۲ اضافه کردند و نتایج آزمایش سیالیت نشان داد که وقتی محتوای CNTs از ۰/۱ به ۰/۳٪ افزایش یافت، سیالیت در مقایسه با گروه کنترل تقریباً تغییر نکرد. وقتی محتوا به ۰/۵٪ رسید، سیالیت به‌دلیل دشواری در توزیع کاهش یافت. افزودن CNTs مقاومت فشاری UHPC را کاهش داد، که ممکن است به‌دلیل ساختار متراکم UHPC باشد و زمانی که CNTs اضافه شدند، نقاط عیب بیشتری در داخل آن ایجاد شد. با این حال، هدایت الکتریکی UHPCبا افزودن CNTs بهبود یافت و UHPC پس از فشرده‌سازی به حالت هادی و حساس به فشار تبدیل شد، که این امر زمانی که محتوای CNTsاز ۰.۳٪ به‌صورت حجمی فراتر رفت، بیشتر مشهود بود. لی و همکاران [۳۹] نانولوله‌های کربنی را به‌طور هم‌زمان با الیاف فولادی با اشکال و نسبت‌های مختلف به UHPC اضافه کردند و دریافتند که CNTs تقریباً تأثیری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیک نداشتند، اما هدایت الکتریکی را افزایش دادند که برای مطالعه پاسخ تنش و زمان UHPC و ایجاد مدل مفید بود. یو و همکاران [۴۰] الیاف فولادی میکرو و نانولوله‌های کربنی چندجداره را به UHPC با دوز ۰/۵ و ۲٪ به‌صورت حجمی اضافه کردند و دریافتند که استفاده ترکیبی از الیاف فولادی و CNTs به‌طور قابل توجهی خواص کششی، از جمله مقاومت و انعطاف‌پذیری پس از اوج را بهبود می‌بخشد و همچنین حساسیت به تنش و آسیب را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد. این مطالعات تأیید کردند که CNTs هدایت الکتریکی UHPC را افزایش می‌دهند، اما تأثیرات محتوای CNTs ، جهت‌گیری و محتوای آب حفره‌ای بر هدایت الکتریکی UHPCهنوز کمبود دارد.

۴-۳- الیاف نانوکربن (CNFs)

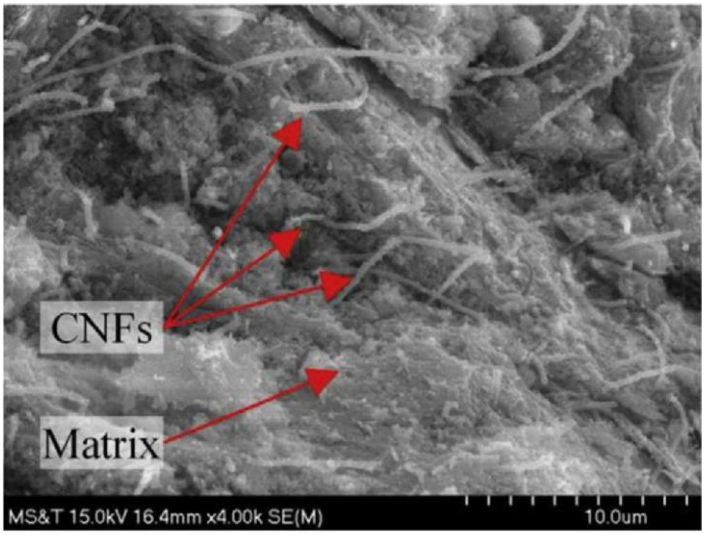
الیاف نانوکربن (CNFs) مواد کربنی جدیدی هستند که بین گرافن و کربن ۶۰ قرار دارند. مقاومت کششی آن‌ها ۲/۷ GPa، مدول الاستیسیته ۴۰۰ GPa و قطر آن‌ها بین ۰/۵ تا ۱۰۰ نانومتر است. CNFs بسته به نحوه انباشته شدن گرافن، می‌توانند به نوع صفحه‌ای، نوع استخوان‌ماهی و نوع لوله‌ای تقسیم شوند. علاوه بر خواص مکانیکی عالی، CNFs دارای هدایت الکتریکی بالایی هستند و مطالعات زیادی در مورد خازن‌ها و سازگاری زیستی انجام شده است. مشابه نانولوله‌های کربنی، توزیع CNFs تحت تأثیر انرژی سطحی، نسبت طول به قطر بالا و نیروی وان‌درووالس قرار دارد که باعث می‌شود آن‌ها در هم تنیده شده و توزیع آن‌ها در مواد پایه سیمانی دشوار شود. توزیع در مواد پایه سیمانی همچنین می‌تواند با استفاده از عملیات اولتراسونیک و اصلاح سطح بهبود یابد. در صورت پخش یکنواخت، CNFs می‌توانند به‌طور قابل توجهی استحکام و چقرمگی مواد پایه سیمانی را از طریق ویژگی‌های ساختاری خود افزایش دهند.

۴-۳-۱- تأثیر CNFs بر انقباض UHPC

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، UHPC با نسبت آب به سیمان پایین و محتوای سیمان بالا طراحی شده است. کاربرد CNFs گزینه جدیدی برای حل مشکل انقباض خود به خود ارائه می‌دهد. افزایش انقباض خود به خود می‌تواند منجر به ترک‌های درون ماتریس شود. علاوه بر این، انقباض خود به خود برای مدت طولانی حتی در بازه زمانی ۶۰ تا ۹۰ روز ادامه خواهد داشت [۴۱]. ماده الیافی روشی مؤثری برای بهبود انقباض خود به خود است، اما مواد بیشتری مانند الیاف فولادی به‌طور سنتی استفاده می‌شوند. مقاومت کششی و مدول الاستیسیته CNFs هر دو از الیاف فولادی بیشتر است و دارای ویژگی‌های جدید نانومواد هستند که برای بهبود عملکرد بتن بسیار مهم است.

۴-۳-۲- تأثیر CNFs بر خواص مکانیکی و میکروساختار UHPC

هم CNFs و هم CNTs نانومواد مبتنی بر کربن هستند، CNFs دارای قطر بزرگ‌تر و سطح بیشتری هستند که پیوند بین CNFs و سیمان را محکم کرده و خواص مکانیکی UHPC را بهبود می‌بخشد [۴۲]. افزودن CNFs به UHPC تأثیر کمی بر سیالیت آن دارد، که همچنین باعث می‌شود محتوای هوای مخلوط آن کمتر و میکروساختار آن متراکم‌تر شود. در عین حال، به‌دلیل خواص مکانیکی قوی خود، مقاومت اولیه UHPC بهبود می‌یابد. تحقیقی که توسط منگ و همکاران [۴۳] انجام شد نشان داد که CNFs به‌دلیل ویژگی‌های الیافی خود که میکروترک‌ها را پل می‌زنند، به‌طور قابل توجهی مقاومت کششی و خمشی را افزایش می‌دهند (شکل ۱۰). همچنین نشان داده شد که CNFs تأثیر کمی بر مقاومت فشاری و چگالی کلی دارد. می‌توان مشاهده کرد که CNFs می‌توانند انقباض خود به خود را کاهش دهند و نقش مشابهی با الیاف فولادی ایفا کنند. به‌دلیل اثر اندازه نانو، مکانیزم عملکرد آن هنوز متنوع‌تر است و چشم‌اندازهای کاربردی آن وسیع است. با این حال، هنوز مشکلات زیادی وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. پخش CNFs هنوز مانع بزرگی برای کاربرد آن در UHPC است. در عین حال، سازگاری CNFs در UHPC نیز باید مورد توجه قرار گیرد، زیرا تعداد زیادی از مواد اولیه در UHPC وجود دارد و گاهی اوقات افزودنی‌ها نیز اضافه می‌شوند.



شکل ۱۰: یک تصویر SEM از CNFs پراکنده در UHPC [۴۳]

۵- نانو TiO_2

نانو TiO_2 با ثبات خوب، هزینه پایین و از همه مهم‌تر، خاصیت فوتوکاتالیستی مشخص می‌شود. اثرات فوتوکاتالیستی می‌توانند واکنش‌های اکسیداسیون-کاهش و واکنش‌های تجزیه نیتروژن اکسیدها در جو را ایجاد کنند و مواد غیر مضر برای محیط زیست تولید کنند [۴۴]. بتن به‌دلیل ساختار متخلخل ناهمگن، مقدار زیاد ماده و قرارگیری مکرر در معرض هوا، حامل ایده‌آلی برای نانو TiO_2است. علاوه بر این، نانو TiO_2 همچنین خواص مکانیکی مواد پایه سیمانی و نفوذناپذیری را با بهینه‌سازی توزیع و اندازه حفره‌ها در خمیر سیمان بهبود می‌بخشد.

۵-۱- عوامل مؤثر بر کارایی فوتوکاتالیستی نانو TiO_2

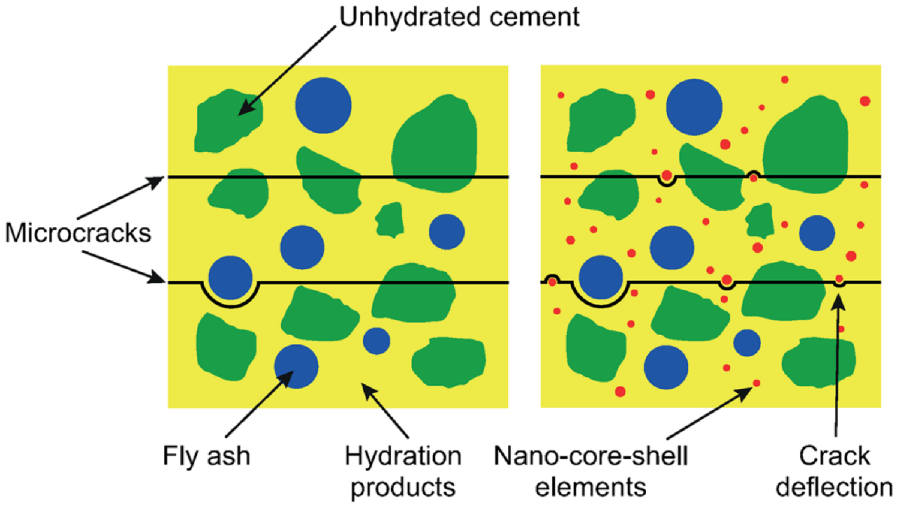
کارایی فوتوکاتالیستی نانو TiO_2 تحت تأثیر عوامل زیادی قرار دارد، مانند اندازه ذرات ، شدت نور و تغییر دما. علاوه بر این، کاربرد نانو TiO_2 در مواد پایه سیمانی با مشکل جدا شدن آسان از بتن مواجه است [۴۵]. بنابراین، استحکام پیوند بین نانو TiO_2 و UHPC به یک عامل مهم در تأثیرگذاری بر پایداری فوتوکاتالیستی تبدیل می‌شود. مشابه سایر نانومواد، نانو TiO_2 به‌راحتی تجمع می‌یابد و بنابراین می‌توان با استفاده از درمان اولتراسونیک و اصلاح سطح به آن کمک کرد.

۵-۲- تأثیر نانو TiO_2 بر عملکرد UHPC

مطالعات سو[18] و همکاران [۴۶] نشان داد که وقتی نانو TiO_2 و الیاف فولادی به UHPC اضافه می‌شوند، نانو TiO_2 تأثیر چندانی بر خواص مکانیکی UHPC ندارد. همچنین نشان داده شد که وقتی نانو TiO_2 به‌تنهایی بر UHPC تأثیر می‌گذارد، نه تنها جهت‌گیری CH را کاهش می‌دهد، بلکه اندازه CH را نیز محدود می‌کند که این امر به رشد مقاومت در مراحل بعدی کمک می‌کند. گزارشی از لی و همکاران [۴۷] نشان داد که وقتی محتوای نانو TiO_2 به ۲/۳۲٪ وزن سیمان رسید، هم مقاومت فشاری و هم مقاومت خمشی در ۲۸ روز به‌ترتیب ۱۸/۰۵ و ۴۷/۰۷٪ افزایش یافت. علاوه بر این، افزودن نانو TiO_2 می‌تواند مقاومت الکتریکی را کاهش داده و به‌دلیل اثر هسته‌کریستالی، مقاومت اولیه را افزایش دهد. در مطالعه دیگری که توسط گو[19] و همکاران [48] انجام شد، مشخص شد که خواص مکانیکی UHPC زمانی به حداکثر می‌رسد که محتوای نانو TiO_2 برابر ۱ درصد وزن سیمان باشد. علاوه بر این، نانو TiO_2ساختار حفره‌ها را از طریق اثر پرکنندگی و اثر هسته‌زایی بهبود بخشید و منجر به افزایش چگالی محصولات هیدراسیون شد. علاوه بر این، زمانی که ترک‌ها

18 Su
19 Gu

در ناحیه کششی ایجاد می‌شوند، وجود نانو TiO_2 می‌تواند مسیر ترک را گسترش داده و انرژی بیشتری را جذب کند و بدین ترتیب انتشار ترک‌ها را به تأخیر بیندازد (شکل ۱۱). علاوه بر این، این اثرات نرخ انقباض خشک UHPC را کاهش داده و مقاومت در برابر نفوذ کلراید، مقاومت در برابر یخزدگی و مقاومت در برابر کربن‌زدایی UHPC را بهبود می‌بخشند. تحقیقات کنونی در مورد کاربرد نانو TiO_2 در UHPC بر خواص مکانیکی و دوام متمرکز است، اما تحقیقات کمی در مورد مکانیزم کمی و عوامل مؤثر بر کارایی فوتوکاتالیستی پس از افزودن آن وجود دارد..



شکل ۱۱: تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر توسعه ترک [۴۸]

۶- نانو MgO

نانو MgO که دارای سختی، خلوص و نقطه ذوب بالاست، به‌طور گسترده‌ای در الکترونیک، سرامیک و غیره استفاده می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این ماده می‌تواند به‌طور مؤثری تشکیل محصولات هیدراسیون را از طریق اثر هسته‌زایی و اثر پرکنندگی خود ترویج کند. پان[20] و همکاران [۴۹] دریافتند که وقتی نسبت وزن جایگزینی سیمان با نانو MgO به ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸٪ تنظیم شد، مقاومت فشاری اولیه ملات سیمان با عملکرد بالا کاهش یافت، در حالی که مقاومت فشاری در ۲۸ روز افزایش یافت. دلیل اصلی این پدیده این بود که با تغییر زمان عمل‌آوری، نرخ واکنش MgO افزایش یافت. علاوه بر این، محصول هیدراسیون، هیدروکسید منیزیم، با پیشرفت واکنش افزایش یافت و حفره‌های بین ذرات سیمان را پر کرد. همچنین، نانو MgO آب آزاد واکنش هیدراسیون را جذب کرده و بر فرآیند واکنش هیدراسیون سیمان تأثیر گذاشت. گزارشی دیگر از لی و همکاران [۵۰] نشان داد که MgO تشکیل هیدروتالکیت را ترویج می‌کند که به فشرده‌سازی ساختار کمک نمی‌کند، اما مقاومت سایشی آن را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با سایر مواد، مطالعات نسبتاً کمی در مورد نانو MgO در UHPC وجود دارد که نیاز به تحقیقات جامع‌تری در مورد سیالیت، خواص مکانیکی و دوام آن دارد.

۷- تأثیر UHPC اصلاح‌شده با نانومواد بر توسعه پایدار

در فرآیند تولید سیمان، انواع مختلفی از گازهای سمی و مضر مانند دی‌اکسید کربن، نیتروژن اکسیدها و اکسیدهای گوگرد آزاد می‌شود. دی‌اکسید کربن همچنین علت اصلی اثر گلخانه‌ای است. بنابراین، توسعه پایدار صنعت تولید سیمان در سال‌های اخیر به یک نقطه داغ تحقیقاتی جدید تبدیل شده است. شِن[21] و همکاران [۵۱] اشاره کردند که تولید پاک‌تر، بازیافت و جایگزینی سیمان راه‌های مؤثری برای حل مشکلات کنونی هستند. دو مورد اول عمدتاً به بهبود فناوری فرآیند در فرآیند تولید، استفاده کامل از انواع زباله‌ها، بهبود کارایی استفاده از منابع و انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره دارد. جایگزینی سیمان عمدتاً به استفاده از انواع زباله‌های صنعتی یا مواد

20 Pan
21 Shen

جدید دوستدار محیط زیست برای کاهش استفاده از سیمان اشاره دارد. نانومواد در سال‌های اخیر به‌عنوان یک جایگزین قابل اعتماد برای جایگزینی سیمان در نظر گرفته شده‌اند. انواع مختلفی از نانومواد با اصول تولید متنوع وجود دارد. روش‌های تولید موجود نانومواد به انتشار کربن کم‌تری کمک می‌کنند. به‌عنوان مثال، روش‌های تولید نانو سیلیکا شامل روش فاز جامد (تولید شده بر اساس روش فیزیکی)، روش فاز مایع (روش رسوب شیمیایی و روش ژل محلول) و روش فاز گاز (روش رسوب بخار شیمیایی) است. در طول فرآیند تولید، هیچ دی‌اکسید کربنی در محصولات شیمیایی تولید نمی‌شود. بر اساس ارزیابی پنگ و همکاران [۵۲]، تولید یک کیلوگرم سیمان، ۰/۶۸۹ کیلوگرم انتشار دی‌اکسید کربن را آزاد می‌کند. جدول ۲ جایگزینی سیمان با نانومواد را برای تولید UHPC با استفاده از انواع مختلف سیمان ارائه می‌دهد. بر اساس نسبت مخلوط و نتیجه‌گیری پنگ و همکاران [۵۲]، کاهش انتشار کربن به ازای هر متر مکعب UHPC محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که تحت نرخ جایگزینی پایین سیمان کنونی، کاهش انتشار کربن به ازای هر متر مکعب بتن به حداکثر ۲۳/۷۷ کیلوگرم می‌رسد. کاهش انتشار کربن به ازای هر متر مکعب می‌تواند به ۴.۰٪ برسد. بنابراین، تولید UHPC با استفاده از نانومواد به جای سیمان از اهمیت زیادی برای کاهش اثر گلخانه‌ای برخوردار است.

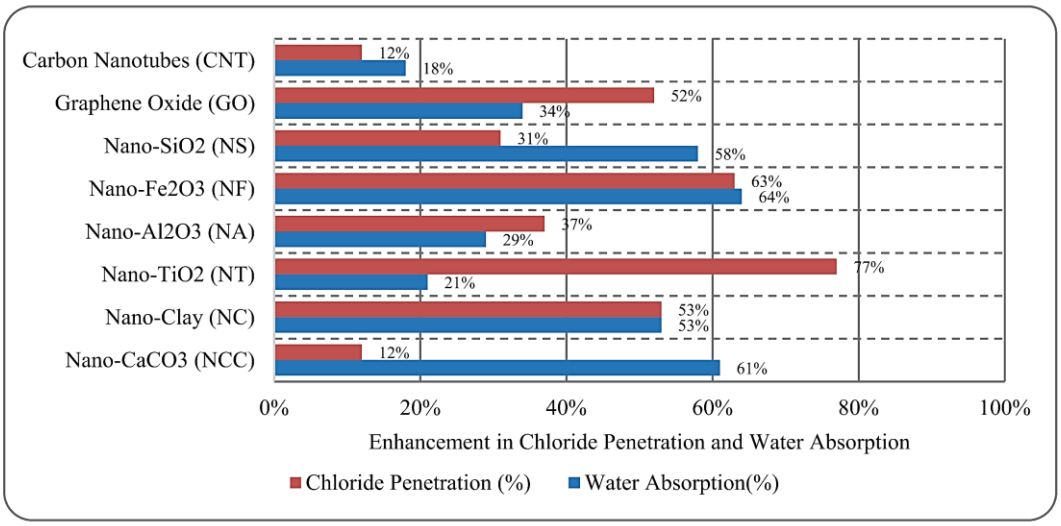
جدول ۲: جایگزینی نانومواد برای کاهش انتشار کربن[۱۳,۲۲,۲۵,۲۹,۳۵,۵۰]

نانوماده	مقدار سیمان (کیلوگرم/متر مکعب)	جایگزینی سیمان (٪)	جایگزینی سیمان به ازای حجم (کیلوگرم/متر مکعب)	کاهش در انتشار کربن به ازای حجم (کیلوگرم/متر مکعب)
نانوسیلیکا	۹۵۰/۰	۳/۰	۲۸/۵	۱۹/۶۴
نانو کلسیم کربنات	۸۶۳/۲	۳/۲	۳۴/۵	۲۳/۷۷
اکسید گرافن	۴۵۳/۸	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۶۲
نانو اکسید منیزیم	۸۰۰/۰	۲/۰	۱۶/۰	۱۱/۰۲

۸-جذب آب و نفوذ کلراید در بتن اصلاح‌شده با نانوذرات

۸-۱- جذب آب بتن نانو

شکل ۱۲ بهبودهای نفوذ کلراید و جذب آب را به‌طور خاص با گنجاندن نانومواد مختلف نشان می‌دهد. نانو SiO_2 ثابت کرده است که در کاهش جذب آب بتن بسیار مؤثر است. افزودن ۲٪ از نانو SiO_2 این میزان را به ۵۸٪ کاهش داد و با ۳ ٪ ، ۳۶/۸۴٪ کاهش یافت [۵۳]. این بهبود به‌گفته جلال و همکاران به‌دلیل اثر شتاب‌دهنده‌ای است که نانو SiO_2 به واکنش هیدراسیون اولیه می‌دهد که منجر به متراکم شدن ماتریس می‌شود. نویسندگان همچنین فرض می‌کنند که هیدروکسید کلسیم تشکیل‌شده نیز در اندازه کوچکتری است. این هیدروکسید کلسیم حتی سریع‌تر در واکنش هیدراسیون ثانویه مصرف می‌شود که منجر به بهبود بیشتر ساختار حفره‌ها می‌شود.



شکل ۱۲. بهبود در نفوذ کلراید و جذب آب [۹].

تسارداکا و استفانیدو[۲۲] [۵۴] مشاهده کردند که استفاده از نانو Al_2O_3 به‌طور جزئی در طول آزمایش‌های طولانی‌مدت ۳۶۵ روزه، تخلخل باز را افزایش داده است. با این حال، در همان مدت، جذب آب نمونه‌های خمیر سیمان ۶۰٪ افزایش یافت. در مورد خمیر مبتنی بر آهک، عملکرد به‌طور قابل توجهی بالاتر از آزمایش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت بود. از سوی دیگر، اکسید گرافن (GO) در میزان ۰/۸ درصد وزنی، جذب آب را هم از طریق سطح و هم از طریق افزایش مویین تا ۴۶٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۹۰ روز کاهش می‌دهد. از تحلیل میکروساختاری مشخص شد که برای مخلوط‌هایی با GO، نسبت Ca/Si به ۰/۲ کاهش یافته است که نشان‌دهنده تشکیل سریع بلورهای CSH است که با یکدیگر در هم تنیده شده و احتمال وجود ذرات سیمان غیر هیدراته را کاهش می‌دهد. نانولوله‌های کربنی در میزان ۰/۰۸ درصد وزنی (CNTs) جذب آب مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ را ۳۵/۸٪ بهبود بخشید [۵۵]. نویسندگان همچنین اشاره کردند که قابلیت CNTs در کاهش این پارامتر به نسبت آب به سیمان بستگی دارد. در همان مطالعه نشان داده شد که عملکرد در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به اوج خود می‌رسد و با افزایش یا کاهش نسبت آب به سیمان کاهش می‌یابد. استفاده از نانو خاک رس منجر به کاهش جذب آب ترکیبات سیمانی شد، همان‌طور که توسط لانگاروودی[۲۳] و همکاران [۵۶] مشاهده شد. زمانی که نانو خاک رس به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به وزن در مخلوط‌های بتنی استفاده شد جذب آب اولیه به‌ترتیب ۶۰/۴، ۴۰/۶ و ۶۵/۶٪ کاهش یافت، در حالی که جذب آب نهایی به‌ترتیب ۲۰/۲، ۱۱/۰ و ۵۳/۲٪ کاهش یافت [۵۶]. لانگاروودی و همکاران [۵۶] همچنین استفاده از خاکستر بادی ، خاکستر پوسته برنج و سرباره گرانوله کوره بلند را همراه با نانو خاک رس ارزیابی کردند و دریافتند که نانو خاک رس بهترین عملکرد را با خاکستر پوسته برنج در تولید بتنی با جذب آب کمتر دارد. نانو $CaCO_3$ میکروساختار را متراکم کرده و چگالی بتن را با تصفیه حفره‌ها افزایش می‌دهد. خطبه‌سرا و همکاران [۵۷] کاهش ۶۵–۷۰٪ در جذب آب با استفاده از ۳٪ نانو $CaCO_3$ را گزارش کردند. هرگونه افزایش بیشتر در مقدار نانو $CaCO_3$ در مخلوط منجر به افزایش شدید ظرفیت جذب آب شد. همچنین مشاهده شد که نانو $CaCO_3$ در کاهش جذب آب مخلوط‌ها نسبت به نانو SnO_2 و نانو ZrO_2 بهترین عملکرد را دارد. این افزایش قابل توجه در عملکرد به‌دلیل توانایی نانو $CaCO_3$ در تغییر واکنش هیدراسیون بود که در آن ترکیبات سیمانی تشکیل‌شده دارای اندازه بلور کوچکتری بودند.

خوش اخلاق و همکاران [۵۸] نشان دادند که جذب آب بتن با نانوذرات اکسید آهن (به میزان ۴٪ وزنی) در مقایسه با بتن مرجع به میزان ۷۳/۷۷٪ کاهش یافته است. از داده‌های تخلخل سنجی مشخص شد که حجم کل حفره ، تخلخل و قطر متوسط حفره برای همان درصد جایگزینی نانوذرات اکسید آهن کمترین مقدار را داشت. به‌طور مشابه، خوش اخلاق و همکاران [۵۸] کاهش ۶۴٪ در عمق نفوذ آب برای بتن را با ۵ درصد نانوذرات اکسید آهن را گزارش کردند. همچنین مشاهده شد که عملکرد مخلوط‌های مبتنی بر نانوذرات اکسید آهن

22 Tsardaka and Stefanidou
23 Langaroudi

در مقایسه با مخلوط‌های نانو Al_2O_3 و نانو TiO_2 در همان نسبت استفاده بهترین بود. استفاده از بیش از ۴٪ نانو TiO_2 عملکرد بتن را در مقایسه با سایر نانومواد کاهش می‌دهد. به‌گفته جلال و همکاران [۵۹]، جذب آب برای بتن کنترل و بتن با ۴٪ نانو TiO_2 در ۱۶۸ ساعت قرارگیری به‌ترتیب ۵/۱۲ و ۴/۲۲٪ بود. با این حال، ظرفیت جذب آب مخلوط‌ها با ۱۵٪ خاکستر بادی کمتر از مخلوط‌ها با ۴٪ نانو TiO_2 بود.

۸-۲- نفوذ کلراید در بتن حاوی ذرات نانو

نانو SiO_2 ساختار حفره‌ها را تصفیه کرده و در نتیجه، هدایت یون کلراید در بتن را کاهش می‌دهد. افزودن ۰.۳ ٪ نانو سیلیکا ضریب‌های مهاجرت و نفوذ کلراید را به‌ترتیب ۲۸/۷٪ و ۳۱٪ کاهش داد [۶۰]. به‌گفته نویسندگان، دلیل این کاهش این است که نانو SiO_2قادر است به‌طور جزئی کانال‌های انتقال را مسدود کند. آن‌ها همچنین اشاره کردند که هرگونه افزایش بیشتر در محتوای نانو SiO_2 منجر به آگلومراسیون می‌شود و هیچ بهبود بیشتری در مقاومت در برابر عبور یون‌های کلراید مشاهده نمی‌شود. افزودن ۰.۵٪ نانو Al_2O_3 مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را بهبود بخشید، در حالی که مقادیر بالای ۱٪ منجر به آگلومراسیون و کاهش مقاومت در برابر کلراید می‌شود، همان‌طور که در مورد نانو SiO_2 مشاهده شد. هرگونه افزایش بیشتر در نانو Al_2O_3 منجر به کاهش مقاومت در مقایسه با مخلوط با ۰/۵٪ نانو Al_2O_3 شد. در ۳٪ جایگزینی، مقاومت الکتریکی هنوز بالاتر از نمونه شاهد بود. زمانی که نانو SiO_2 و نانو Al_2O_3 با هم ترکیب شدند، نتایج مشابهی به‌دست آمد، همان‌طور که نویسندگان همان مطالعه اشاره کردند. افزودن ۰/۰۳ درصد وزنی GO به‌طور قابل توجهی عمق نفوذ کلراید را به‌ترتیب ۵۱/۷۳٪ و ۴۰/۴۷٪ پس از ۱۴ و ۲۸ روز غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم کاهش داد [۶۰]. آن‌ها همچنین الگوی مشابهی را در اندازه‌گیری مقاومت در برابر نفوذ کلراید مشاهده کردند. همان‌طور که در مورد نانو SiO_2 ، تجمع در مورد GO نیز مشاهده شد زمانی که جایگزینی به بیش از ۰/۰۳٪ وزن سیمان افزایش یافت. کاریکو[۲۴] و همکاران [۶۱] اشاره کردند که افزودن ۰/۰۵–۰/۱٪ نانولوله‌های کربنی ضریب نفوذ کلراید را ۱۲٪ کاهش می‌دهد. این کاهش مستقل از نوع CNTs استفاده شده بود. با این حال، از بین تمام انواع CNTs آزمایش شده، CNTهای خالص (pristine) مؤثرترین نوع در کاهش نفوذ بودند. نویسندگان همچنین تأثیر تغییر نسبت آب به سیمان (w/c) را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که هرچه نسبت آب به سیمان کمتر باشد، تأثیرCNT ها در کاهش نفوذ یون‌های کلراید بیشتر است. استفاده از نانو خاک‌رس منجر به کاهش نفوذ کلراید شد، همان‌طور که توسط لانگارووودی[۲۵] و همکاران و فن[۲۶] و ژانگ[۲۷] [۶۲] مشاهده شد. فن و ژانگ اشاره کردند که نفوذ کلراید به‌ترتیب ۲۷، ۲۹، ۵۳، ۳۱ و ۲۳٪ در محتوای نانو خاک‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹٪ کاهش یافته است. در حالی که لانگارووودی و همکاران [56] بهترین عملکرد را زمانی که ۳٪ نانو خاک رس استفاده شد، مشاهده کردند. نویسندگان این را به افزایش پیچیدگی ماتریس سیمان به‌دلیل واکنش پوزولان ثانویه نسبت دادند که در آن هیدروکسید کلسیم مصرف شده و منجر به کاهش یون‌های هیدروکسید در محلول حفره‌ها می‌شود. در کار تحقیقاتی شیخ[۲۸] و سوپیت[۲۹] [۶۳]، نفوذپذیری کلراید بتن حاوی ۱٪ نانو $CaCO_3$ در ۲۸ و ۹۰ روز به‌ترتیب ۱۱/۸ و ۷/۷٪ کاهش یافت. تأثیر ۱٪ نانو $CaCO_3$ با افزودن خاکستر بادی در ماتریس کاهش یافت. نویسندگان همچنین عملکرد نانو $CaCO_3$ را با نانو SiO_2 مقایسه کردند و نتیجه‌گیری کردند که نانو SiO_2 در کاهش نفوذپذیری کلراید در ترکیبات سیمانی مؤثرتر است. همان‌طور که توسط چینتا کونتا[۳۰] و همکاران [۶۴] مشاهده شد، نفوذ سریع کلراید در بتن ترکیبی حاوی خاکستر بادی، سیلیس فوم و نانو TiO_2 به میزان ۸۸٪ در مقایسه با بتن مرجع کاهش یافت. در جدول ۳ خلاصه‌ای از جدیدترین کارهای صورت گرفته در کاربرد نانومواد در خواص مکانیکی، جذب آب و نفوذ کلراید بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا ارایه شده است.

جدول ۳. خلاصه‌ای از جدیدترین کارهای صورت گرفته در کاربرد نانومواد در خواص مکانیکی، جذب آب و نفوذ کلراید بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده بالا

24 Carrico
25 Langaroudi
26 Fan
27 Zhang
28 Shaikh
29 Supit
30 Chinthakunta

خلاصه چکیده	یافته های اصلی	روش شناسی	خلاصه بحث	چالش و محدودیت	مرجع
مقاله به بررسی کاربرد ومواد در بتن فوق‌العاده عملکرد بالا می‌پردازد و أثیرات آن‌ها بر خواص انیکی، جذب آب و نفوذ راید را مورد بررسی قرار می‌دهد.	۱-نانومواد بر چگالی بسته‌بندی و خواص تازه بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا UHPC) تأثیر می‌گذارند. ۲-نانومواد بر کینتیک هیدراسیون و خواص مکانیکی UHPC تأثیر دارند، از جمله مقاومت، پیوند بین‌سطحی و خواص نانو مکانیکی. ۳-نانومواد بر خواص مرتبط با دوام UHPCتأثیر می‌گذارند، مانند تخلخل، نفوذپذیری، مقاومت در برابر تخریب و انقباض.	۱-شناسایی و خلاصه‌سازی انواع مختلف نانومواد که در حال حاضر در بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) استفاده می‌شوند و تحلیل خواص هندسی و فیزیکی آن‌ها. ۲- تحلیل تأثیرات نانومواد بر چگالی بسته‌بندی، خواص تازه، کینتیک هیدراسیون و خواص مکانیکی (مانند مقاومت فشاری، پاسخ‌های کششی و خمشی، و خواص نانو مکانیکی)UHPC . ۳-ترکیب یافته‌های موجود در مقالات برای ارائه توصیه‌هایی در مورد دوزهای بهینه نانومواد به منظور بهبود مقاومت UHPC.	این مقاله به بررسی استفاده از نانومواد در بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)می‌پردازد و تأثیرات آن‌ها بر خواصUHPC ، از جمله خواص تازه، هیدراسیون، عملکرد مکانیکی و دوام را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین به توسعه UHPC عملکردی مبتنی بر نانومواد نیز اشاره می‌کند.	۱- دوزهای بهینه نانومواد برای افزایش مقاومت بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) به‌طور قطعی مشخص نشده و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. ۲-این مرور لزوماً یک تحلیل جامع از تمام خواص مرتبط با دوام UHPC تقویت‌شده با نانومواد ارائه نمی‌دهد. ۳- همچنین، این مرور به کاربردهای نوظهور نانومواد در UHPCمی‌پردازد، که ممکن است به این معنا باشد که خواص مکانیکی و دوام اصلی به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.	[۶۵]
ومواد قادرند خواص جذب آب و نفوذ کلراید را در ن‌های مبتنی بر سیمان بهبود دهند.	۱- استفاده از نانومواد در بتن‌های مبتنی بر سیمان یک رویکرد امیدوارکننده برای بهبود عملکرد و خواص این ماده به شمار می‌آید. ۲- ادغام نانومواد می‌تواند کیفیت محصولات هیدراسیون را افزایش دهد و تشکیل میکروپورها در بتن را کاهش دهد. ۳- این مقاله تأیید می‌کند که استفاده از نانومواد در بتن‌های مبتنی بر سیمان امکان‌پذیر است و خواص لازم برای مصالح ساختمانی را داراست.	–	استفاده از نانومواد مختلف در بتن سیمانی امکان‌پذیر بوده و می‌تواند خواص بتن را بهبود دهد.	–	[۶۶]
نانومواد مانند SiO_2، Fe_2O_3و TiO_2 ،Al_2O رند خواص مکانیکی، جذب آب و نفوذ کلراید بتن وق‌العاده با عملکرد بالا UHPC)را بهبود دهند.	۱- گنجاندن نانوذرات می‌تواند به دلیل بهبود نرخ‌های هیدراسیون، روانی و زمان‌های گیرش بتن را کاهش دهد. ۲- کامپوزیت‌های بتن اصلاح‌شده با نانوذرات بهبودهای قابل توجهی در عملکرد مقاومت و توسعه میکروساختار نشان می‌دهند. ۳- نانو سیلیکا به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند مقاومت اولیه بتن را بهبود بخشد، تخلخل را کاهش دهد و مقاومت در	–	این مقاله یک مرور انتقادی بر استفاده از نانوذرات در کامپوزیت‌های بتن ارائه می‌دهد و به این نتیجه می‌رسد که نانوذرات می‌توانند خواص بتن، از جمله مقاومت، دوام و هیدراسیون را بهبود دهند، در حالی که نانو سیلیکا به‌عنوان یک افزودنی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.	–	[۶۷]

			برابر خوردگی را افزایش دهد، با دوز بهینه ۱-۶٪.		
			-معرفی دانه‌های درشت تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) دارد.		
ن مقاله به بررسی تأثیر زودن دانه‌های درشت به ی فوق‌العاده با عملکرد بالا UHPC)می‌پردازد و تأثیر ن را بر خواص مکانیکی، ام و کاربردها مورد بررسی قرار می‌دهد.		-بررسی تأثیر گنجاندن دانه‌های درشت در بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)بر:	-یک محتوای بهینه از دانه‌های درشت برای حداکثر کردن خواص فشاری UHPC وجود دارد.	معرفی دانه‌های درشت تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) دارد. این تأثیرات شامل یک محتوای بهینه برای خواص فشاری، تأثیرات منفی بر خواص کششی و خمشی، و تأثیرات مثبت بر مدول الاستیسیته است، همچنین دوام برتر و عملکرد در دماهای بالا را نیز به همراه دارد.	-انقباض خودبه‌خودی بالا -هزینه بالا -افزایش ناکافی مدول الاستیسیته نسبت به بتن با مقاومت نرمال	[۶۸]
		-کارایی و خواص مکانیکی (فشاری، کششی، خمشی، مدول الاستیسیته)	-افزودن دانه‌های درشت تأثیرات منفی بر خواص کششی و خمشی UHPCدارد، که احتمالاً به دلیل کاهش کارایی الیاف است.			
		-محتوای بهینه دانه‌های درشت برای خواص فشاری	-افزودن دانه‌های درشت تأثیر مثبتی بر مدول الاستیسیته UHPCدارد، به دلیل سختی بالای دانه‌های درشت.			
		-تأثیرات دانه‌های درشت بر خواص کششی و خمشی (منفی) و مدول الاستیسیته (مثبت				
		-مرور مطالعات قبلی که از روش‌های شیمیایی، فیزیکی و حرارتی برای بهبود خواص بتن با دانه‌های بازیافتی (RAC) استفاده کرده‌اند.	-استفاده از دانه‌های بازیافتی در بتن می‌تواند تأثیر منفی بر خواص مکانیکی و دوام بتن داشته باشد.			
ن مقاله به بررسی استفاده نانومواد برای بهبود خواص کانیکی، جذب آب و نفوذ کلراید در بتن با دانه‌های بازیافتی می‌پردازد.		-ارزیابی استفاده از نانومواد) نانو - SiO_2، نانو $CaCO_3$-، نانو TiO_2-، نانوClay-، نانو Al_2O_3- و نانو-کربن (برای بهبود خواص مکانیکی و دوام RAC.	-استفاده از نانومواد در بتن با دانه‌های بازیافتی (RAC) می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و دوام کمک کند، زیرا میکروپورها را کاهش داده و یک میکروساختار متراکم‌تر تولید می‌کند.	مقاله مروری به‌دنبال ارائه یک خلاصه جامع از تأثیرات انواع مختلف نانومواد بر خواص مکانیکی و دوام بتن با دانه‌های بازیافتی (RAC) و همچنین ویژگی‌های میکروساختاری RACاصلاح‌شده با نانو است.	-	[۶۹]
		-ارزیابی تأثیرات RAC اصلاح‌شده با نانو بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی.	-مقاله مروری بر ارائه یک ارزیابی جامع از عملکرد RAC اصلاح‌شده با نانو تحت شرایط مختلف و تأثیرات انواع مختلف نانومواد بر خواص مکانیکی و دوام RAC تمرکز دارد.			
		-بررسی ویژگی‌های دوام RAC اصلاح‌شده با نانو، از جمله جذب آب، نفوذ کلراید، مواجهه با آتش، مقاومت در برابر سایش و اسید.				
ن مقاله به بررسی تأثیر ولوله‌های کربنی بر خواص بتن، از جمله خواص کانیکی، دوام و قابلیت‌های خودحسگری می‌پردازد.		-	-نانولوله‌های کربنی (CNTs) می‌توانند خواص -نانولوله‌های کربنی (CNTs) می‌توانند خواص مکانیکی بتن را با پل زدن ترک‌ها، پر کردن منافذ و ترویج هیدراسیون سیمان بهبود	به‌طور خلاصه، مقاله مرور نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی (CNTs)به بتن می‌تواند کارایی را کاهش دهد، اما خواص مکانیکی، دوام و عملکرد در دماهای بالا را بهبود بخشد و همچنین به بتن این امکان را می‌دهد که قابلیت‌های خودحسگری	-	[۷۰]

			بخشند.	برای نظارت بر سازه را داشته باشد.	
			-افزودن CNTs معمولاً کارایی بتن را کاهش می‌دهد، اما نانولوله‌های کربنی مایع پیش‌پخش‌شده می‌توانند به افزایش سیالیت کمک کنند.		
			-نوع و عملکرد نانولوله‌های کربنی (مانند گروهOH ، نیکل‌دار کردن، COOH) می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر خواص مکانیکی و ضربه‌ای بتن داشته باشند.		
			-افزودن نانوذرات (NPs) به‌طور قابل توجهی عملکرد تازه، مکانیکی و دوام ملات‌های خودتراکم (SCMs)را بهبود می‌بخشد.	-مرور سیستماتیک ادبیات موجود درباره تأثیرات نانوذرات (NPs) بر خواص ملات‌های خودتراکم(SCM) .	
			-میکروساختار SCMs به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد، زیرا NPsدارای مساحت سطح ویژه بالاتری هستند و با ترکیبات نامطلوب در خمیر سیمان واکنش می‌دهند تا ژل C-S-H بیشتری تولید کنند.	-بررسی تأثیرات نانوذرات مختلف بر خواص تازه، مکانیکی و دوام مختلف SCM، از جمله جریان افت، زمان جریان، مقاومت فشاری و خمشی، جذب آب، نفوذ کلراید و مقاومت الکتریکی.	افزودن نانوذرات به ملات‌های خودتراکم به‌طور قابل توجهی عملکرد تازه، مکانیکی و دوام آن‌ها را بهبود می‌بخشد و همچنین میکروساختار را بهبود می‌دهد، زیرا نانوذرات دارای مساحت سطح ویژه بالاتری هستند و با اجزای خمیر سیمان واکنش می‌دهند.	[۷۱]
			-این مطالعه مدل‌های پیش‌بینی مختلفی از جمله مدل‌های غیرخطی، و شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای برآورد مقاومت فشاری SCMs حاوی NPs توسعه داد.	-توسعه مدل‌های پیش‌بینی، از جمله رگرسیون غیرخطی، رگرسیون چندلجستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای برآورد مقاومت فشاری SCMsحاویNPs .		
			-افزودن نانو خاک رس به بتن‌های با عملکرد بالا، مقاومت فشاری و خمشی را افزایش می‌دهد و همچنین ویژگی‌های دوامی مانند مقاومت در برابر دماهای بالا و حمله سولفات را بهبود می‌بخشد، در حالی که به‌طور همزمان تخلخل، نفوذپذیری و جذب آب را کاهش می‌دهد.	شناسایی انواع مختلف نانو خاک رس، از جمله کائولینیت، بنتونیت، مونتموریلونیت، هالویسیت و هکتوریت.	این مقاله خلاصه می‌کند که استفاده از نانو خاک به عنوان جایگزین یا افزودنی سیمان می‌تواند استحکام، میکروساختار، هیدراسیون و عملکرد دوام بتن‌های معمولی و بتن‌های با عملکرد بالا را بهبود بخشد. با این حال، ویژگی هیدروفیلیک نانو خاک ممکن است نیاز به توجه داشته باشد و بهبود در خواص مکانیکی و میکروساختاری همچنین می‌تواند نفوذپذیری آب بتن را کاهش دهد.	-نانو خاک می‌تواند ویژگی‌های جداسازی و خونریزی بتن را کاهش دهد که ممکن است به طور منفی بر کارایی و خواص جریان تأثیر بگذارد.
			-بهبود خواص بتن به نقش‌های نانو خاک رس به‌عنوان تقویت‌کننده‌های نانو، پرکننده‌های نانو، نقاط هسته‌زایی و پوزولان‌های واکنشی مربوط می‌شود که هیدراسیون را	-تولید نانو خاک رس از طریق درمان حرارتی کائولینیت برای تبدیل آن به متاکائولین و سپس آسیاب مکانیکی برای به‌دست آوردن ذرات با اندازه نانو.		[۷۲]
				-مقایسه مساحت سطح ذرات خاک رس میکرو و نانو، که نشان‌دهنده افزایش ۲ تا ۸ برابری در مساحت سطح برای ذرات با اندازه نانو است.		

ن مقاله به بررسی استفاده انوذرات برای بهبود خواص تازه، مکانیکی و دوام ملات‌های خودتراکم می‌پردازد.

ودن نانو خاک رس خواص کانیکی و دوام بتن‌های مولی و بتن‌های با عملکرد بالا را بهبود می‌بخشد

ن مقاله یک مرور جامع بر ی بتن فوق‌العاده با عملکرد (UHPC) ارائه می‌دهد که شامل مواد، خواص انیکی و دوام، و ملاحظات طراحی آن می‌باشد.		ترویج می‌دهند و ویژگی‌های مواد را افزایش می‌دهند. –نانو خاک رس کارایی بتن را کاهش می‌دهد، اما این مشکل می‌تواند با تنظیم محتوای نانو خاک رس برای اطمینان از کارایی کافی کاهش یابد - UHPC باید فقط از دانه‌های ریز استفاده کند و از دانه‌های درشت خودداری کند تا از تضعیف ناحیه انتقال بین‌سطحی (ITZ) جلوگیری شود. - UHPC معمولاً به دلیل وجود الیاف که اصطکاک داخلی را افزایش می‌دهند، کارایی کمتری نسبت به بتن معمولی دارد. –نسبت بهینه آب به چسباننده برای UHPC کمتر از ۰.۲۰ است تا بهترین خواص مکانیکی به دست آید. –افزودن ۲.۰٪ الیاف فولادی به صورت حجمی، به ویژه الیاف نوع قلاب، عملکرد مکانیکی و دوام UHPCرا به حداکثر می‌رساند. - UHPC دارای خواص دوام عالی از جمله جذب آب کم، تخلخل، کربناته شدن و مقاومت در برابر یخزدگی/ذوب شدن است که آن را برای محیط‌های خشن مناسب می‌سازد.	–استفاده از فقط دانه‌های ریز (مانند شن طبیعی، شن سیلیس، خرده شیشه بازیافتی، شن کوارتز) بدون هیچ دانه درشتی –گنجاندن الیاف، معمولاً الیاف فولادی به میزان ۲٪ به صورت حجمی، برای بهبود عملکرد مکانیکی و دوام –نسبت آب به چسباننده بسیار پایین، کمتر از ۰.۲۰، برای دستیابی به بهترین ویژگی‌های مکانیکی –ارزیابی عملکرد مکانیکی (استحکام فشاری و خمشی) و دوام (جذب آب، نفوذپذیری، مقاومت در برابر یخزدگی و ذوب شدن	عملکرد کلی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) به درصدهای بهینه هر ماده بستگی دارد. بنابراین، توصیه می‌شود که برای بهینه‌سازی مواد UHPCاز ابزارهای آماری استفاده شود و همچنین تحقیقات بیشتری در مورد جنبه‌های دوام UHPC انجام شود.	–نیاز به تحقیقات بیشتر با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی آماری برای تعیین نسبت‌های بهینه موادUHPC –مطالعات محدود در مورد جنبه‌های دوامUHPC –عملکرد ضعیف UHPC در محیط‌های با دمای بالا	[۷۳]
ن مقاله تأثیرات گنجاندن مواد، به ویژه نانوSiO_2 ، خواص تازه، مکانیکی و میکروساختاری مپوزیت‌های فعال شده با یایی را مورد بررسی قرار می‌دهد.	–	–نانو SiO2 رایج‌ترین نانو ماده مورد استفاده در مطالعات بررسی شده بود. –اکثریت مطالعات (۵۵٪) بر روی خمیرهای AAC نانو اصلاح شده تمرکز داشتند، که پس از آن ملات‌ها (۲۹٪) و بتن‌ها (۱۶٪) قرار داشتند. –افزایش محتوای نانو ماده در AACها باعث کاهش قوام و زمان	–گنجاندن نانو مواد، به ویژه نانوSiO_2 ، در کامپوزیت‌های فعال شده با قلیایی (AAC)یا ژئوپلیمرها –ارزیابی خواص تازه، مکانیکی و میکروساختاریAAC ها یا ژئوپلیمرهای نانو اصلاح شده –مقایسه انواع مختلف کامپوزیت‌های نانو اصلاح شده، از جمله خمیر، ملات و بتن	گنجاندن نانو مواد در کامپوزیت‌های فعال شده با قلیایی، با انتخاب دقیق نوع، مقدار و روش مخلوط کردن، می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و میکروساختاری را بهبود بخشد و به توسعه مواد ساختمانی پایدارتر کمک کند.	–	[۷۴]

	گیرش کامپوزیت‌ها شد، که احتمالاً به دلیل اندازه ذرات کوچک، سطح ویژه بالا، پیوندهای اشباع نشده و واکنش‌پذیری بالای نانو مواد است.	–بررسی تأثیرات تغییر محتوای نانو ماده بر خواصی مانند قوام و زمان گیرش			
ن مقاله تأثیر نانوTiO_2 ، ، نانو خاک رس نو $CaCO_3$ را بر خواص ن سیمانی/ژئوپلیمر مورد بررسی قرار می‌دهد.	–نانو مواد، مانند نانوTiO_2 ، نانو Fe_2O_3، نانو خاک رس/متاکائولین و نانو$CaCO_3$ ، می‌توانند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و دوام بتن سیمانی/ژئوپلیمر را بهبود بخشند. –این مطالعه تأثیرات نانو مواد مختلف را بر تقویت ماتریس‌های سیمانی بررسی کرده است.	–	این مرور امکان‌پذیری استفاده از نانو مواد در بتن سیمانی/ژئوپلیمر را تأیید کرده و بینش‌هایی را برای ترویج کاربرد عملی نانو مواد در صنعت ساخت و ساز ارائه می‌دهد	–	[۹]
ن مقاله وضعیت کنونی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده بتن فوق‌العاده با ملکرد بالا (UHPC) را رد بررسی قرار می‌دهد، که ل خواص مکانیکی، دوام و پایداری آن است.	–یافته‌ها امکان‌پذیری استفاده از نانو مواد در بتن سیمانی را برای تولید خواص مورد نیاز برای مواد ساختمانی تأیید می‌کند. - UHPC دارای مقاومت فشاری بالا (بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال)، مقاومت کششی بالا (بیش از ۲۰ مگاپاسکال) و رفتار سخت‌شدگی و نرم‌شدگی کششی قابل توجهی است. –با وجود خواص مکانیکی و دوام برجسته‌اش، UHPCبا چالش‌های مختلفی مواجه است، از جمله جنبه‌های طراحی، فناوری تولید برای عناصر با حجم/دهانه بزرگ و ویژگی‌های دوام بلندمدت ناشناخته. –کمبود تجربه صنعتی و انتقال دانش به حرفه‌ای‌های بتن، چالش کلیدی دیگری در پذیرش گسترده UHPCبه شمار می‌آید.	–	این مرور امکان‌پذیری استفاده از نانو مواد در بتن سیمانی/ژئوپلیمر را تأیید کرده و بینش‌هایی را برای ترویج کاربرد عملی نانو مواد در صنعت ساخت و ساز ارائه می‌دهد	–جنبه‌های طراحی مانند خواص مواد –فناوری تولید برای عناصر با حجم بالا و/یا دهانه بلند که دارای کارایی پایین، پوسته‌ریزی بالا و تنش‌های انقباضی زیاد هستند –ویژگی‌های دوام ناشناخته پس از بروز ترک‌های بلندمدت در بتن –کمبود تجربه صنعتی و چالش‌ها در گسترش تمرین‌های عملی به حرفه‌ای‌های صنعت بتن	[۷۵]
ن مقاله تأثیرات گنجاندن لیاف شیشه‌ای در بتن را رد بررسی قرار می‌دهد، که ل بهبود در مقاومت، دوام و میکروساختار است، اما یت جریان کاهش می‌یابد.	–الیاف شیشه‌ای به دلیل مساحت سطح بالاتر خود تأثیر منفی بر قابلیت جریان بتن دارند و باعث افزایش مقاومت در برابر جریان می‌شوند. –الیاف شیشه‌ای به طور قابل توجهی ظرفیت کششی و خمشی بتن را بهبود بخشیدند، اما بهبود	–خواص بتن شامل قابلیت جریان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته –جنبه‌های دوام بتن شامل نفوذ یون کلراید، جذب آب، سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت در برابر اسید –تحلیل میکروساختاری پیوند الیاف-	الیاف شیشه‌ای تأثیرات مثبت و منفی بر خواص بتن دارند و دوز بهینه آن تحت تأثیر نسبت آب به چسبنده قرار می‌گیرد.	–نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد عملکرد بتن تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای در محیط‌های سخت –کمبود اطلاعات در مورد خواص خزش و انقباض خشک بتن تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای –نیاز به بررسی ویژگی‌های	[۷۶]

	قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان ندادند.	سیمان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی		حرارتی کامپوزیت‌های مبتنی بر شیشه
	-دوز بهینه الیاف شیشه‌ای تحت تأثیر نسبت آب به چسبنده قرار دارد، به طوری که نسبت‌های بالاتر منجر به افزایش اندازه و تعداد منافذ می‌شود که به طور منفی بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد.			-نیاز به تحقیقات بیشتر با استفاده از مواد پوزولانی برای بهبود ظرفیت فشاری بتن تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای، زیرا برخی مطالعات بهبودهای محدودی در مقاومت فشاری را نشان داده‌اند
	-حضور نانو مواد واکنش ژئوپلیمریزاسیون را تقویت کرده و منجر به ایجاد یک ماتریس متراکم‌تر می‌شود.	افزودن نانو مواد به کامپوزیت‌های ژئوپلیمر واکنش ژئوپلیمریزاسیون را تقویت کرده و منجر به ایجاد یک ماتریس متراکم‌تر و بهبود دوام کامپوزیت‌های ژئوپلیمر می‌شود. این بررسی همچنین بینش‌های اضافی، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده مرتبط با استفاده از نانو مواد در کامپوزیت‌های ژئوپلیمر را شناسایی می‌کند.		
ن مقاله به بررسی استفاده انو مواد برای بهبود خواص کامپوزیت‌های ژئوپلیمر پردازد، اما بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا را شامل نمی‌شود.	-افزودن نانو مواد دوام کامپوزیت‌های ژئوپلیمر را با جلوگیری از تشکیل میکروپورهای متصل به هم بهبود می‌بخشد.	-	-	[۷۷]
	-گنجاندن نانو مواد به طور مستقیم با تولید کامپوزیت‌های ژئوپلیمر با عملکرد بالا مرتبط است که می‌توانند به راحتی توسط صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرند.			
	-بتن الیافی فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC) مزایای قابل توجهی نسبت به سایر انواع بتن دارد.			
ن مقاله یک مرور جامع از حولات، اصول و مواد اولیه بتن الیافی فوق‌العاده با ملکرد بالا را ارائه می‌دهد.	-بخش کنونی این مرور بر تحولات، اصول و مواد اولیه UHPFRC تمرکز دارد.	این مقاله مروری چهار بخشی به منظور بررسی جامع پیشرفت‌ها، اصول، مواد خام، هیدراسیون، میکروساختار، خواص تازه و سخت‌شده، دوام، هزینه، کاربردها و چالش‌های بتن الیافی فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC) تهیه شده است تا دانش بنیادی را ارتقا دهد و تحقیقات و کاربردهای بیشتری از بتن با عملکرد بالا (UHPC) را ترویج کند.	-	[۷۸]
	-بخش‌های بعدی این مرور به هیدراسیون و میکروساختار، خواص تازه و سخت شده، و همچنین دوام، هزینه، کاربردها و چالش‌های UHPFRCمی‌پردازد.			
ن مقاله به بررسی وضعیت نی، محدودیت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده ستفاده از بتن فوق‌العاده با ملکرد بالا در مهندسی پل می‌پردازد.	-بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)دارای خواص مکانیکی و دوام برتری نسبت به بتن معمولی است که آن را به ماده‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای مهندسی پل تبدیل می‌کند.	خلاصه بحث این است که در حالی که بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)پتانسیل قابل توجهی برای استفاده در مهندسی پل دارد، پذیرش گسترده آن به دلیل هزینه‌های بالا، عدم وجود استانداردهای طراحی، پیچیدگی در	-	-هزینه بالای مخلوط‌های اختصاصی UHPC و نیاز به توسعه مخلوط‌های غیر اختصاصی و مقرون به صرفه -تأثیر زیست‌محیطی بالا به دلیل محتوای بالای سیمان و نیاز

			- UHPC به طور فزاینده‌ای در اجزای مختلف مهندسی پل مانند پایه‌ها، ستون‌ها، دک‌ها و تیرها مورد استفاده قرار گرفته و مطالعات موردی موفقی در سطح جهانی گزارش شده است. -با این حال، پذیرش گسترده UHPCدر مهندسی پل به دلیل هزینه‌های بالا، عدم وجود کدهای طراحی استاندارد و چالش‌های مربوط به تولید و پایداری محدود است -بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)دارای مقاومت فشاری بالاتر از ۱۵۰ مگاپاسکال، داکتیلیته بالا و دوام عالی است.	تولید و نیاز به فرمولاسیون‌های پایدارتر و مقرون به صرفه‌تر محدود است.	به مخلوط‌های پایدارترUHPC -عدم وجود کدهای طراحی استاندارد، روش‌های آزمایش و راهنماهای نگهداری برای UHPC -مصرف انرژی و هزینه‌های بالای موادUHPC
ن مقاله به بررسی خواص ه و سخت‌شده بتن الیافی وق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC)می‌پردازد.	[۷۹]	-	-	-در بیست سال گذشته، پیشرفت‌های قابل توجهی در تحقیق و کاربرد بتن الیافی فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC) به وقوع پیوسته است. -این مطالعه به بررسی خواص تازه و سخت‌شده UHPFRC می‌پردازد.	-	-
ن مرور به بررسی خواص م، ارزیابی هزینه، کاربردها و چالش‌های بتن الیافی وق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC)می‌پردازد.	[۸۰]	-	-	-بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)مزایای قابل توجهی نسبت به بتن معمولی دارد، از جمله بهبود دوام، اما استفاده از آن به دلیل هزینه‌های بالا و عدم وجود کدهای طراحی محدود است. -این مرور به بررسی خواص دوام، ارزیابی هزینه، کاربردها و چالش‌های UHPCمی‌پردازد. -هدف این مرور ارتقای دانش بنیادی UHPC و ترویج تحقیقات و کاربردهای بیشتر است.	-کدهای طراحی محدود برای UHPC -هزینه بالای UHPC که استفاده از آن را غیرقابل تحمل می‌کند -نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد ویژگی‌های دوام برای توسعه الزامات و روش‌های آزمایش -نیاز به تحقیقات و توسعه بیشتر برای ارتقای دانش بنیادی و ترویج کاربردهای وسیع‌ترUHPC
ن مقاله به بررسی استفاده الیاف مختلف برای تقویت خواص مکانیکی بتن وق‌العاده با عملکرد بالا	[۸۱]	-	-	-الیاف برای تقویت خواص مکانیکی، به ویژه مقاومت کششی و خمشی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)ضروری هستند.	-	-

(UHPC)می‌پردازد.		-این مرور تأثیرات انواع مختلف الیاف، اشکال و ترکیب آن‌ها را بر میکروساختار، حالت شکست، خواص مکانیکی، انقباض خودبخودی و دوام UHPCبررسی می‌کند. -این مرور همچنین روندهای تحقیقاتی آینده برای استفاده از الیاف در UHPC را مورد بحث قرار می‌دهد.			
این مقاله به بررسی حلیل‌های میکروساختاری ی فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)حاوی مواد یمانی مختلف می‌پردازد و اهمیت آن‌ها برای درک خواص مکانیکی تأکید می‌کند.		-بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC)دارای یک ناحیه انتقال کوچک بین خمیر سیمان و دانه‌ها است که نشان‌دهنده پیوند قوی و ساختار داخلی بسیار متراکم آن است. -تحلیل‌های میکروساختاری برای تعیین طراحی مخلوط بهینه و روش‌های عمل‌آوری UHPC به منظور دستیابی به بهترین خواص مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردارند.	-پراش اشعه ایکس(XRD) -میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) -پوروزیمتری نفوذ جیوه(MIP) -طیف‌سنجی اشعه ایکس با انرژی پراکنده(EDS) -تحلیل حرارتی این تکنیک‌ها برای بررسی میکروساختار بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) حاوی مواد سیمانی مختلف به عنوان جایگزین‌های جزئی سیمان، از جمله خاک سیلیس، زئولیت، سرباره‌های کوره بلند آسیاب شده، سرباره لیتیم، متاکائولین، پودر سنگ آهک و خاکستر پوسته برنج استفاده شدند. محققان همچنین هدف داشتند تا از تحلیل‌های میکروساختاری برای تعیین طراحی‌های مخلوط بهینه و روش‌های عمل‌آوری استفاده کنند.	خلاصه کلیدی بحث این است که تحلیل‌های میکروساختاری بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) می‌توانند برای درک طراحی مخلوط بهینه و شرایط عمل‌آوری به منظور دستیابی به بهترین خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، UHPCدارای یک میکروساختار بسیار متراکم و با پیوند خوب است که ناحیه انتقال کوچکی بین خمیر سیمان و دانه‌ها دارد.	[۸۲]
ن مقاله به بررسی تأثیرات افزودن نانومواد به پوزیت‌های بتن ژئوپلیمری ی‌پردازد که می‌تواند به ود خواص مکانیکی، دوام و کروساختاری آن‌ها کمک کند.		-افزودن نانوذرات (NPs) به کامپوزیت‌های ژئوپلیمری می‌تواند به بهبود قابل توجهی در خواص کلیدی مانند مقاومت، دوام و میکروساختار منجر شود. -مقاله مرور تأثیرات NPs بر خواص مختلف مهم کامپوزیت‌های ژئوپلیمری، از جمله ویژگی‌های تازه، فیزیکی، مکانیکی، دوام و میکروساختاری را بررسی کرده است. -مقاله مرور تحلیل دقیقی از	-یک مرور سیستماتیک از ادبیات انجام شد که بیش از ۲۸۰ مقاله منتشر شده در مورد کامپوزیت‌های ژئوپلیمری اصلاح شده با نانوذرات (NPs) مختلف را تحلیل کرد. -یک پایگاه داده گسترده از ویژگی‌ها و خصوصیات اصلی این کامپوزیت‌های ژئوپلیمری ایجاد شد. -مکانیزم‌های تأثیر انواع مختلف NPs بر خواص کامپوزیت‌های ژئوپلیمری، از جمله ویژگی‌های تازه، مکانیکی، دوام و	افزودن نانوذرات به کامپوزیت‌های ژئوپلیمری نشان داده است که به طور قابل توجهی خواص تازه، مکانیکی، دوام و میکروساختاری آن‌ها را بهبود می‌بخشد و آینده‌ای امیدوارکننده برای توسعه کامپوزیت‌های ژئوپلیمری با عملکرد بالا در صنعت ساخت و ساز فراهم می‌کند.	-موانع فعلی در استفاده از نانومواد در کامپوزیت‌های ژئوپلیمری -معایب بالقوه استفاده از نانومواد در کامپوزیت‌های ژئوپلیمری، با وجود مزایای آن‌ها	[۸۳]

	تأثیرات انواع مختلف NPs بر خواص کلیدی خمیر ژئوپلیمری، ملات و کامپوزیت‌های بتن ارائه داده است. -بتن ژئوپلیمری دارای مزایای قابل توجهی نسبت به بتن معمولی است، از جمله خواص ترمومکانیکی عالی، دوام و تأثیرات زیست‌محیطی کمتر.	میکروساختاری بررسی شد.			
ن مقاله به بررسی خواص ن ژئوپلیمری فوق‌العاده با ملکرد بالا می‌پردازد، که امل ویژگی‌های مکانیکی، وام و میکروساختاری آن است.	-بتن ژئوپلیمری فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHP-GPC) نوع جدیدی از بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) است که برای ارائه مقاومت فوق‌العاده بالا، سازگاری با محیط زیست و صرفه‌جویی در هزینه توسعه یافته است. -این مرور به پیشرفت‌ها و چشم‌اندازهای اخیر در خصوص خواص فنی و تولیدی UHP-GPC می‌پردازد، از جمله پارامترهای زیست‌محیطی، طراحی مخلوط، خواص تازه، خواص مکانیکی، رفتار دینامیکی، سخت‌شدن با کرنش، خواص دوام، خواص میکروساختاری و رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی برشی و مدول الاستیسیته.	-	این مقاله یک مرور پیشرفته از خواص فنی و تولیدی بتن ژئوپلیمری فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHP-GPC) ارائه می‌دهد، که شامل پارامترهای زیست‌محیطی، طراحی مخلوط، خواص تازه، خواص مکانیکی، رفتار دینامیکی، سخت‌شدن با کرنش، خواص دوام، خواص میکروساختاری و رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی برشی و مدول الاستیسیته است.	-	[۸۴]
ر مرور تأثیر نانو سیلیس را ر هیدراتاسیون، مقاومت، م و خواص میکروساختاری مورد بررسی قرار می‌دهد.	-نانو سیلیس می‌تواند چسبندگی بین چسب بتن و دانه‌ها را تقویت کرده و ماتریس بتن را بهبود و متراکم کند. -حدود ۲-۴٪ نانو سیلیس در بتن مناسب است تا خواص فیزیکی، دوام و مکانیکی را بهبود بخشد و همچنین میکروساختار بتن را متراکم کند. -مقاله مرور به چالش‌های پیش روی صنعت بتن در استفاده تجاری از نانو سیلیس در بتن می‌پردازد.	-	مقاله مرور خلاصه می‌کند که افزودن ۲-۴٪ نانو سیلیس به بتن می‌تواند خواص فیزیکی، دوام و مکانیکی آن را بهبود بخشد و همچنین میکروساختار بتن را متراکم کند. این مقاله همچنین به چالش‌های پیش روی صنعت بتن در استفاده تجاری از نانو سیلیس می‌پردازد و مفاهیم جدیدی را برای ترویج استفاده عملی آن در بخش ساخت و ساز و ایده‌هایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد.	-	[۸۵]
ن مقاله به بررسی استفاده ر بتن الیافی فوق‌العاده با	UHPFRC -ماده‌ای امیدوارکننده برای تقویت سازه‌های بتنی است به	-مروری بر کاربردهای تقویت UHPFRCدر خمش، برش و برش پانچ،	درک ناکافی از رفتار interface بین بتن وUHPFRC ، اثرات	-درک ناکافی از رفتار در interfaceبین بتن و	[۸۶]

لکرد بالا (UHPFRC) ای تقویت سازه‌های بتنی پردازد و بر رفتار سازه‌ای و امل آن با بتن تأکید دارد.		دلیل خواص مکانیکی برتر و نفوذپذیری پایین آن. -با این حال، درک ضعیف از رفتار رابط UHPFRC- بتن، تأثیر عوامل محیطی و کمبود مدل‌ها و کدهای طراحی قابل اعتماد، در حال حاضر مانع از کاربرد گسترده UHPFRC می‌شود.	با تمرکز بر عملکرد برشی سازه‌های ترکیبی UHPFRC- بتن و رفتار رابط UHPFRC-بتن. -رویکردی جامع که هم رفتار سازه‌ای در مقیاس کلان تیرهای ترکیبی UHPFRC-بتن و هم پارامترهای میکرو و مقیاس میانه حاکم بر رفتار رابط بین دو ماده را در نظر می‌گیرد. -تحلیل انتقادی از روش‌های تحلیلی و عددی فعلی که برای پیش‌بینی ظرفیت برشی یا ظرفیت برش پانچ سازه‌های بتن مسلح تقویت‌شده با UHPFRC استفاده می‌شود.	حرارتی و رطوبتی، و همچنین کمبود مدل‌ها و کدهای طراحی قابل اعتماد، مانع از استفاده گسترده از UHPFRCبرای تقویت سازه‌های بتنی می‌شود.	UHPFRC -عدم درک نقش گرادیان‌های حرارتی و رطوبتی و تمرکز تنش در جدایی زودرس -کمبود مدل‌ها و کدهای طراحی قابل اعتماد برای UHPFRC -نادیده گرفتن نقش interfaceبین بتن و UHPFRC -اثرات تکنیک‌های چسباندن، تبادل رطوبت و انقباض متفاوت -نقش بارهای ترکیبی محیطی و مکانیکی	
این مقاله به بررسی شرفت‌های اخیر در تولید بتن فوق‌هیدروفوبیک پردازد تا نفوذپذیری آب و دوام آن را بهبود بخشد.		-اصلاح فوق‌هیدروفوبیک نفوذ آب خارجی را کاهش می‌دهد و در نتیجه دوام بتن را افزایش می‌دهد. -روش‌های مختلف تولید سطح فوق‌هیدروفوبیک یا اصلاح توده‌ای بتن بررسی و مقایسه شدند. -ارزیابی‌های عملکردی بتن فوق‌هیدروفوبیک مورد بررسی قرار گرفت و اولویت‌های تحقیقاتی آینده مشخص شد.	-بررسی و دسته‌بندی استراتژی‌های مختلف برای تولید بتن فوق‌هیدروفوبیک، شامل روش‌های اصلاح سطح و اصلاح توده‌ای -ارزیابی تأثیر اصلاح فوق‌هیدروفوبیک بر خواص مکانیکی بتن -بررسی جامع معیارهای ارزیابی عملکرد دوام معمولاً استفاده شده برای بتن فوق‌هیدروفوبیک، از جمله نفوذناپذیری آب، مقاومت در برابر خوردگی، توانایی ضد یخ، مقاومت در برابر یخزدگی و ذوب، و مقاومت در برابر UV	یافته‌های اصلی و اولویت‌های تحقیقاتی آینده برای بتن فوق‌هیدروفوبیک به طور خلاصه ارائه شد.	-چالش‌های باقی‌مانده در تولید و کاربرد بتن فوق‌هیدروفوبیک با عملکرد بالا -تأثیر اصلاح فوق‌هیدروفوبیک بر خواص مکانیکی بتن -محدودیت این بررسی به تمرکز صرف بر معیارهای ارزیابی عملکرد دوام	[۸۷]
مقاله یک بررسی جامع از برد نانو لوله‌های کربنی به عنوان تقویت‌کننده در مپوزیت‌های سیمانی ارائه دهد تا خواص مکانیکی، م و عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد.		-این بررسی به خواص فوق‌العاده چندمنظوره نانو لوله‌های کربنی (CNTs)و روش‌های مختلف تولید آن‌ها می‌پردازد. -این بررسی به کاربردهای بالقوه کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با نانو لوله‌های کربنی می‌پردازد. -این بررسی روش‌های مختلف پراکنده‌سازی نانو لوله‌های کربنی در ماتریس سیمانی را شامل استفاده از سورفکتانت‌ها و اولتراسونیکیشن، و همچنین تأثیر درمان سطحی نانو لوله‌های کربنی بر قابلیت پراکندگی	این بررسی به تأثیر نانو لوله‌های کربنی بر ثبات ابعادی، دوام و کاربردهای هوشمند کامپوزیت‌های سیمانی می‌پردازد.	-مکانیزم‌هایی که نانو لوله‌های کربنی (CNTs) بر خواص کامپوزیت‌های سیمانی تأثیر می‌گذارند به طور کامل درک نشده است. -در نتایج تجربی ناهماهنگی و تغییرپذیری وجود دارد که به تفاوت‌های پراکندگی، وضعیت‌های چسبندگی و فرآیندهای تولید نسبت داده می‌شود. -نیاز به مدل‌های تحلیلی بهتری برای پیش‌بینی خواص کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده	[۸۸]

	و چسبندگی آن‌ها در ماتریس سیمانی ارائه می‌دهد.			با نانو لوله‌های کربنی احساس می‌شود.
ن مقاله به بررسی کاربرد گیری ماشین و یادگیری عمیق در مدل‌سازی و ش‌بینی خواص مکانیکی بتن می‌پردازد.	–مدل‌های یادگیری ماشین نسبت به روش‌های آماری و تجربی سنتی در پیش‌بینی خواص بتن مزایایی دارند، از جمله دقت بهینه، سرعت عملکرد بالا و صرفه‌جویی در هزینه. –یادگیری عمیق، که زیرمجموعه‌ای از یادگیری ماشین است، به طور فزاینده‌ای برای وظایفی مانند پیش‌بینی خواص بتن محبوب‌تر می‌شود. –این مقاله به بررسی کاربردهای موفق مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن می‌پردازد، از جمله عملکرد، محدودیت‌ها و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده.	–	–	–این بررسی ممکن است تمام تکنیک‌های ممکن یادگیری ماشین و یادگیری عمیق که می‌توانند برای پیش‌بینی خواص بتن به کار روند را پوشش نداده باشد و تحقیقات بیشتری برای شناسایی مناسب‌ترین تکنیک‌ها برای کاربردهای مختلف لازم است. –این بررسی برخی از شکاف‌های دانش فعلی را شناسایی کرده و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه داده است که می‌تواند به عنوان محدودیت‌های وضعیت کنونی این حوزه تفسیر شود. –این بررسی ممکن است مدل‌های ناموفق یا کمتر مؤثر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق را پوشش نداده باشد که می‌تواند به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته شود.	[۸۹]
ن مقاله به بررسی کاربرد اف طبیعی و مصنوعی در بود خواص مکانیکی بتن می‌پردازد.	–استفاده از الیاف طبیعی و مصنوعی در مصالح ساختمانی، به‌ویژه بتن، می‌تواند خواص مکانیکی ماده کامپوزیت را بهبود بخشد. –تقویت با الیاف طبیعی از نظر انرژی و هزینه نسبت به میله‌های تقویت‌کننده سنتی مؤثرتر است، زیرا به مقدار کمتری الیاف نیاز دارد. –عملکرد مکانیکی بتن با افزودن الیاف تا ۱.۰٪ بهبود می‌یابد، اما افزایش بیشتر محتوای الیاف باعث کاهش عملکرد به دلیل کاهش کارایی می‌شود. نویسندگان توصیه می‌کنند که از ۱٪ الیاف برای بهبود ظرفیت کششی بتن استفاده شود.	–	نتیجه اصلی این مقاله این است که افزودن تا ۱٪ الیاف، چه طبیعی و چه مصنوعی، می‌تواند عملکرد مکانیکی بتن را بهبود بخشد. با این حال، افزودن بیش از ۱٪ الیاف باعث کاهش عملکرد به دلیل کاهش کارایی می‌شود. بنابراین، توصیه می‌شود که از ۱٪ الیاف برای بهبود ظرفیت کششی بتن استفاده شود.	–	[۹۰]
ن مقاله به بررسی کاربرد	–این بررسی به طور جامع تأثیر خواص نانو جاذب‌ها، از جمله	–بررسی کاربرد نانو جاذب‌ها در حذف فلزات سنگین از پساب	این مقاله مروری به بررسی پتانسیل‌ها و چالش‌های کاربرد نانو جذب در بهسازی محیط زیست می‌پردازد، که	–مقاومت محدود نانو مواد در جذب برخی یون‌های فلزات	[۹۱]

...ر جاذب‌ها در حذف فلزات ...نگین از پساب می‌پردازد و ...ه کاربرد نانو مواد در بتن ...وق‌العاده با عملکرد بالا.		مساحت سطح، جداسازی و ظرفیت جذب، بر توانایی آن‌ها در حذف فلزات سنگین از پساب را ارزیابی کرده است. -این بررسی عوامل تجربی مختلفی مانند دوز جاذب، pH، غلظت زیرلایه، مدت زمان پاسخ، دما و نیروی الکترواستاتیک را که بر جذب یون‌های فلزی توسط نانو جاذب‌ها تأثیر می‌گذارد، مورد بررسی قرار داده است. -این بررسی سینتیک جذب و مدل‌های ایزوترمال را برای درک مکانیزم‌های حذف فلزات سنگین توسط نانو جاذب‌ها بررسی کرده است.	-تحلیل ویژگی‌های نانو مواد و توانایی آن‌ها در جذب یون‌های فلزات سنگین -ارزیابی عوامل تجربی مؤثر بر جذب فلزات سنگین توسط نانو جاذب‌ها، از جمله دوز جاذب، pH، غلظت زیرلایه، مدت زمان پاسخ، دما و نیروی الکترواستاتیک -بررسی سینتیک جذب و مدل‌های جذب ایزوترمال برای درک مکانیزم‌های جذب فلزات سنگین توسط نانو جاذب‌ها	می‌تواند به مهندسان، شیمیدان‌ها و دانشمندان محیط زیست که در زمینه استفاده از نانو مواد برای تصفیه پساب فعالیت می‌کنند، کمک کند.	سنگین -نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد مکانیزم‌های جذب، از طریق مدل‌های سینتیک و ایزوترمال -چالش‌ها در کاربرد نانو جذب برای بهسازی محیط زیست
...مواد با ترویج تشکیل ژل ...C-S-H و بهبود مقاومت ...ی در برابر تهدیدات مختلف ...حیطی، دوام آن را افزایش می‌دهند.		-افزودن نانو مواد به بتن باعث کاهش تخلخل و بهبود میکروساختار آن با افزایش محتوای ژل سیمان می‌شود. -مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری بتن با اثرات نانو پرکننده، پوزولانی و هسته‌زایی نانوذرات بهبود می‌یابد. -با افزایش مقدار ژل C-S-H تولید شده در واکنش با نانو مواد، مقاومت بتن در برابر حمله‌های خارجی از سوی سولفات‌ها یا اسیدها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و نفوذپذیری و جذب آب آن کاهش می‌یابد.	-مرور ادبیات موجود در مورد استفاده از نانو مواد در بتن -تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای درک میکروساختار بتن نانو اصلاح شده -تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) برای مطالعه محصولات هیدراتاسیون در بتن نانو اصلاح شده -تحلیل حرارتی با استفاده از کالریمتری تفاضلی (DSC) و تحلیل وزنی حرارتی (TGA)برای کمی‌سازی تغییرات در محتوای ژل C-S-H و هیدروکسید کلسیم در بتن نانو اصلاح شده	این مقاله یک مرور جامع از چگونگی بهبود دوام بتن توسط نانو مواد از طریق تقویت تشکیل و خواص ژل کلسیم سیلیکات هیدرات(C-S-H)ارائه می‌دهد، که فاز اصلی چسبندگی در بتن به شمار می‌رود.	-انجام مطالعات بیشتر در مورد دوام و مقاومت نانو بتن در برابر انواع دیگر تهدیدات فراتر از آنچه در این مرور بررسی شده است -بررسی انواع اضافی نانو مواد فراتر از آنچه در این مرور بررسی شده است -تحقیق در مورد تکنیک‌ها و رویکردهای بهتر برای بهبود پراکندگی نانوذرات در بتن	[۹۲]
...این مرور به بررسی این ...ضوع می‌پردازد که چگونه ...تویت بتن با الیاف بازالت ...ی‌تواند خواص مکانیکی و ...دوام آن را بهبود بخشد.		-افزودن الیاف بازالت با قطر تقریبی ۱۰-۲۰ میکرومتر، طول تقریبی ۱۲-۲۰ میلی‌متر و نسبت حجم بهینه تقریباً ۱٪ می‌تواند خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد. -الیاف بازالت می‌توانند به طور قابل توجهی سختی شکست، انرژی شکست و حداکثر انحراف بتن را افزایش دهند و همچنین نفوذناپذیری و مقاومت آن در برابر	-مرور ادبیات تحقیقاتی جاری در مورد بتن تقویت شده با الیاف بازالت (BFRC) -بررسی تأثیرات افزودن الیاف بازالت با ابعاد مشخص (قطر ۱۰-۲۰ میکرومتر، طول ۱۲-۲۰ میلی‌متر) و نسبت‌های حجمی (حدود ۱٪) بر خواص مکانیکی بتن -ارزیابی تأثیرات الیاف بازالت بر عملکرد شکست (سختی، انرژی و حداکثر انحراف)	یافته‌های کلیدی نشان می‌دهد که افزودن بهینه الیاف بازالت با قطر ۱۰-۲۰ میکرومتر، طول ۱۲-۲۰ میلی‌متر و کسری حجمی ۱٪ می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی، چقرمگی شکست و دوام بتن را بهبود بخشد. تحقیقات آینده باید بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن تقویت‌شده با الیاف بازالت در شرایط دمای بالا و پس از آسیب، و همچنین بررسی مکانیزم سخت‌کنندگی الیاف	-این مطالعه فعلی به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن تقویت‌شده با الیاف بازالت (BFRC)در شرایط دمای بالا یا پس از آسیب نپرداخته است. -مکانیزم سخت‌کنندگی الیاف بازالت بر روی بتن به طور کامل درک نشده است و نیاز به تحقیقات بیشتری برای ایجاد پایه نظری برای کاربردهای عملی	[۹۳]

			حمله کلرید و سولفات را بهبود بخشند. -مطالعات آینده باید بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن تقویت شده با الیاف بازالت (BFRC) در شرایط دمای بالا و پس از آسیب تمرکز کنند.	و دوام (نفوذناپذیری، مقاومت در برابر فرسایش کلرید و حمله سولفات) بتن	بازالت بر روی بتن تمرکز کند.	وجود دارد.	
ی مقاله به بررسی تأثیر نانو د بر ویژگی‌های ساختاری تن ژئوپلیمری می‌پردازد.	مواد می‌توانند خواص بتن ند استحکام، نفوذپذیری و قاومت در برابر سایش را بهبود بخشند.		-نانو مواد مانند نانو سیلیکا، نانو آلومینا، نانو لوله‌های کربنی و نانو خاک رس می‌توانند با افزودن در مقادیر کم، به طور قابل توجهی توسعه استحکام بتن ژئوپلیمری را بهبود بخشند. -گنجاندن نانو مواد در ژئوپلیمرها، ثبات ساختاری را بهبود می‌بخشد و دوام ماده را افزایش می‌دهد. -وجود نانو مواد، سرعت ژئوپلیمریزاسیون را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود عملکرد کلی ژئوپلیمر می‌شود. -در دو دهه گذشته، استفاده از مواد سیمانی مکمل (SCMs) و نانو ذرات (مانند SiO_2 ، TiO_2، Fe_2O_3، Al_2O_3وCr_2O_3) به طور قابل توجهی تولید بتن را افزایش داده است. -نانو مواد به دلیل اندازه کوچک و سطح بالای خود، پتانسیل بالایی برای بهبود خواص بتن مانند استحکام فشاری، استحکام کششی، استحکام خمشی، نفوذپذیری آب، مقاومت در برابر سایش و ساختار منافذ دارند. -این مقاله مروری تأثیرات افزودن نانو ذرات اکسیدی مختلف به بتن را خلاصه کرده و نمایه‌های گرافیکی را برای تسهیل مقایسه نتایج ارائه داده است.	-استفاده از روش‌های آسیاب (رویکرد از بالا به پایین) و سنتز شیمیایی (رویکرد از پایین به بالا) برای تولید نانو مواد -روش سل-ژل برای سنتز نانو مواد اکسید فلزی -تکنیک‌های شناسایی مانندSEM ، XRDو FTIR برای تحلیل میکروساختار و ترکیب بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده با نانو مواد -مروری بر استفاده از نانو ذرات مختلف (مانند SiO_2 ، TiO_2، Fe_2O_3، Al_2O_3وCr_2O_3) در بتن در دو دهه گذشته -ارزیابی تأثیرات این نانو مواد بر خواص بتن، از جمله استحکام فشاری، استحکام کششی، استحکام خمشی، نفوذپذیری آب، مقاومت در برابر سایش و ساختار منافذ	این مقاله نتیجه‌گیری می‌کند که افزودن مقادیر کمی از نانو مواد مانند نانو سیلیکا، نانو آلومینا و نانو خاک رس می‌تواند با تسریع فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، کاهش زمان گیرش و ایجاد یک ماتریس فشرده‌تر و یکنواخت‌تر، به طور قابل توجهی عملکرد ساختاری، دوام و میکروساختار بتن ژئوپلیمری را بهبود بخشد. نانو مواد، مانند SiO_2 ، TiO_2، Fe_2O_3، Al_2O_3وCr_2O_3 ، نشان داده‌اند که می‌توانند خواص مختلف بتن را بهبود بخشند، از جمله استحکام فشاری، استحکام کششی، استحکام خمشی، نفوذپذیری آب، مقاومت در برابر سایش	-تأثیرات زیست‌محیطی و مقررات نانو مواد -خطرات بهداشتی و ایمنی کار با نانو مواد که نیاز به روش‌های مناسب برای مدیریت و ایمنی دارد -	[۹۴] [۹۵]
			-این مقاله به بررسی ویژگی‌های	-مروری بر ترکیب و خواص بتن	این مقاله مروری به محققان کمک	-زمینه‌های بهبودی که در	[۹۶]

ن مقاله به بررسی آخرین وضعیت بتن فوق‌العاده با لکرد بالا (UHPC) در برابر انفجار و ضربه‌های لستیک می‌پردازد، اما به ربرد نانو مواد نمی‌پردازد.	دینامیکی UHPC با استفاده از تکنیک میله فشار تقسیم شده هپکینسون (SHPB) پرداخته است، از جمله شکل‌دهنده پالس، عامل افزایش دینامیکی (DIF) و رفتار در تنش‌های بالا. -این مقاله مدل‌های پیش‌بینی بالستیک مختلف، تحلیل عمق نفوذ و تحقیقات مربوط به کاهش تأثیرات با سرعت بالا بر UHPC را بررسی کرده است. -این مقاله یافته‌های حاصل از مطالعات لوله شوک و آزمایش‌های انفجاری در میدان را تحت دیدگاه انفجار خلاصه کرده است. -افزودن واحدهای تقویت‌کننده به طور قابل توجهی خواص مکانیکی و مواد نانوکامپوزیت‌های متخلخل و غیرمتخلخل را بهبود می‌بخشد. -شکل، اندازه، ترکیب و توزیع واحدهای تقویت‌کننده در تعیین خواص نهایی نانوکامپوزیت‌ها حیاتی است. -دما و رطوبت بالا باعث کاهش سختی، فرکانس طبیعی و بار بحرانی کمانش نانوکامپوزیت‌های متخلخل می‌شود. -نانو مواد مختلف می‌توانند خواص مختلف مواد ساختمانی کامپوزیتی را بهبود بخشند. -این مرور بر ارزیابی بهبودهای خواص تازه و مکانیکی مواد کامپوزیتی با افزودن نانو مواد متمرکز شده است. -افزودن نانو مواد در دوزهای کم (۰-۳٪) منجر به حداکثر افت 82 (slump)میلی‌متر، مقاومت فشاری ۷۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۵.۸ مگاپاسکال و مقاومت	فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) با تمرکز بر رفتار الیاف -مروری بر ویژگی‌های دینامیکی UHPCبا استفاده از تکنیک میله فشار تقسیم شده هپکینسون(SHPB) ، از جمله مطالعه شکل‌دهنده پالس، عامل افزایش دینامیکی و رفتار در تنش‌های بالا -مروری بر عملکرد بالستیکUHPC ، از جمله مدل‌های پیش‌بینی، تحلیل عمق نفوذ و تحقیقات مربوط به کاهش تأثیرات با سرعت بالا -مروری بر عملکرد انفجاریUHPC ، از جمله مطالعات لوله شوک و آزمایش‌های انفجاری در میدان -روش‌های پردازش و ساخت نانوکامپوزیت‌های متخلخل، از جمله پردازش پودری، رسوب بخار، روش ژل-سول و تکنیک‌های مختلف قالب‌گیری -رویکردهای مدل‌سازی عددی و محاسباتی، از جمله مدل‌های میکرو مکانیکیHalpin-Tsai ، روش‌های المان محدود و نظریه‌های تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر -مروری سیستماتیک بر حدود ۲۴۰ مقاله منتشر شده در مورد استفاده از نانو مواد در مصالح ساختمانی -تحلیل تأثیرات نانو مواد مختلف بر خواص (تازه، سخت شده و میکروساختار) انواع مصالح ساختمانی، از جمله بتن معمولی، بتن ژئوپلیمر، بلوک‌های سیمانی، ملات ژئوپلیمر و بتن خودمتراکم -تحلیل میکروساختاری مواد کامپوزیتی با استفاده از تکنیک‌هایی مانندSEM ، FTIR،XRD	می‌کند تا زمینه‌های بهبود بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) را شناسایی کرده و مزایای استفاده از UHPCدر سازه‌ها برای کاهش تأثیرات ضربه و انفجار را برجسته کند این مقاله مروری جامع بر ساخت، کاربرد و خواص مکانیکی مواد نانوکامپوزیت چند لایه درجه‌بندی عملکردی ارائه می‌دهد و نتیجه‌گیری می‌کند که افزودن واحدهای تقویت‌کننده به طور قابل توجهی خواص مواد را بهبود می‌بخشد و اینکه شکل، اندازه، ترکیب و توزیع واحدهای تقویت‌کننده در تعیین خواص مکانیکی و مواد نهایی نانوکامپوزیت‌ها حیاتی است. نانو مواد (NMs) آینده صنعت مصالح ساختمانی هستند، زیرا می‌توانند کامپوزیت‌های با عملکرد بالا را قوی‌تر، بادوام‌تر و با خواص میکروساختاری بهتر کنند، به طوری که نانو مواد مختلف خواص متفاوتی از مواد را تقویت می‌کنند.	UHPCشناسایی شده‌اند -محدودیت‌های بالقوه در مقاومت بالستیک و انفجاری فعلی UHPCکه می‌توانند از طریق تکنیک‌هایی مانند پیش‌تنیدگی و استفاده از فوم فلزی بهبود یابند -نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد آزمایش‌های لوله شوک و انفجار در میدان برایUHPC	
ن مقاله به بررسی ساخت، رد و خواص مکانیکی مواد نانوکامپوزیت چند با درجه‌بندی عملکردی پردازد، اما به طور خاص به ن فوق‌العاده با عملکرد بالا نمی‌پردازد.				-	[۹۷]
انو مواد می‌توانند خواص کانیکی، جذب آب و نفوذ رید را در بتن فوق‌العاده با ملکرد بالا بهبود بخشند.				-	[۹۸]

ن مقاله به بررسی تأثیرات ع مختلف الیاف بر خواص کانیکی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا می‌پردازد.	در این مقاله، ویژگی‌های کانیکی، مقاومت در برابر فرسایش و ساختار کروسکوپیک بتن پلیمری ی العاده با عملکرد بالا مورد سی قرار گرفته است، اما به ربرد مواد نانو اشاره نشده است.	-بتواند به نیازهای مشخصات ایده‌آل بتن فوق‌بلندترکیبی با عملکرد فوق‌بلندترکیبی (UHPC) پاسخ دهد.بتن پلیمری با عملکرد فوق‌بلندتر (UHPGC) در مورد عملکرد مکانیکی می‌تواند مشخصات ایده‌آل بتن فوق‌بلندترکیبی را پاسخ دهد. - ساختار میکرو UHPGC نسبت به UHPC چگالی کمتر و فضای بزرگتری دارد که انتقال یون بیشتری را امکان پذیر می‌کند. - برای حداکثر کردن عملکرد مکانیکی کلیدیUHPGC ،	-مرور سیستماتیک ادبیات موجود در مورد بتن پلیمری فوق الاستیک عالی (UHPGC)انجام شد. - مروری بر ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی UHPGC انجام شد که شامل مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی می‌شود. - مروری بر تحقیقاتی که از تکنیک‌های تحلیلی مانند FTIR، EDS، SEMو اندازه‌گیری تراوایی جیوه برای ارزیابی ویژگی‌های ساختاری میکرو UHPGC استفاده می‌کنند. - مروری بر تحقیقاتی که ویژگی‌های مقاومت در برابر خوردگی UHPGCرا ارزیابی می‌کنند، از جمله نفوذ سریع یون کلر، مقاومت الکتریکی و	نتیجه‌ی کلیدی این مرور این است که بتن پلیمری فوق العاده با عملکرد بالا (UHPGC) در مورد ویژگی‌های مکانیکی می‌تواند به مشخصات بتن پلیمری فوق العاده با عملکرد بالا (UHPC)پاسخ دهد، اما چگالی ساختار میکروسکوپی آن کمتر و حفرات بزرگتری دارد. به علاوه، ترکیب بهترین درصد خاکستر سیلیس و ترکیب فعال‌کننده برای عملکرد UHPGC در دماهای بالا نیز تعیین شده است.	-این بررسی به مقایسه جامع عملکرد مکانیکی، دوام و ساختار میکرو UHPGC و UHPC نپرداخته است. -این بررسی بررسی عملکرد مکانیکی و ساختار میکرو UHPGCدر دماهای بالا را مورد تحقیق قرار نداده است.	[۱۰۰]
		خمشی ۷.۲۵ مگاپاسکال در بتن معمولی شد. -تحقیق تجربی روش اصلی مورد استفاده برای بررسی تأثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) است که عملکرد کششی با استفاده از آزمایش‌های کشش یک‌محوری ارزیابی می‌شود. -الیاف می‌توانند مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و سایر خواص مکانیکی UHPC را تقویت کنند، اما همچنین می‌توانند جریان‌پذیری UHPC تازه را تضعیف کنند، بنابراین باید تأثیرات مثبت و منفی در نظر گرفته شود و تکنیک‌هایی برای حفظ جریان‌پذیری در هنگام استفاده از حجم‌های بالای الیاف توسعه یابد. -پارامترهای مختلف الیاف فولادی، مانند نسبت حجم، اندازه، شکل، جهت‌گیری، توزیع، مقاومت چسبندگی و مقاومت کششی، بر خواص مکانیکی UHPC تأثیر می‌گذارند و تأثیرات ترکیبی این پارامترها نیاز به بررسی بیشتری دارد.	-تحقیقات آزمایشی، روش اصلی برای بررسی تأثیر فیبرها بر خواص مکانیکی بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPC) می‌باشد. آزمون‌های کشش یک‌محوره برای ارزیابی عملکرد کششی UHPC به کار می‌روند و شاخص‌های کلیدی شامل مقاومت کششی، مقاومت در برابر ترک اولیه و تنش کششی حداکثر هستند. این تحقیق به بررسی تأثیر فیبرها بر خواص مکانیکی مختلفUHPC ، از جمله مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته می‌پردازد و همچنین تأثیر منفی آن‌ها بر قابلیت جریان بتن تازه UHPCرا مورد تحلیل قرار می‌دهد.	نکات کلیدی مورد بحث در این مقاله شامل: (۱) تحقیقات آزمایشی به عنوان روش اصلی برای بررسی تأثیر فیبر بر عملکرد مکانیکی بتن فوق العاده با کارایی بالا (UHPC) مورد بحث قرار گرفته است؛ (۲) فیبرها نقش مهمی در تقویت عملکرد مکانیکی UHPC ایفا می‌کنند، اما همچنین می‌توانند انعطاف پذیری آن را کاهش دهند که نیازمند رفع مشکل است؛ (۳) تأثیرات جداگانه پارامترهای فیبر بر عملکرد UHPC به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است، اما تأثیرات ترکیبی آنها نیازمند بررسی بیشتری است؛ (۴) فیبرهای ترکیبی ممکن است مزایای بیشتری برای UHPC داشته باشند، اما نیازمند تحقیقات عمیق‌تری است.	-حفظ جریان در هنگام استفاده از بتن فوق العاده با عملکرد بالا و حجم فیبر بالا (UHPC) چالش مهمی است. تحقیقات در مورد تأثیرات ترکیبی پارامترهای مختلف فیبر (مانند نسبت حجمی، اندازه، شکل، جهت، توزیع، قدرت چسبندگی، قدرت کشش و غیره) هنوز محدود است. علاوه بر این، تحلیل نظری و پیش‌بینی کمی مخلوط فیبر نیز دارای پیچیدگی‌های قابل توجهی است.	[۹۹]

			محتوای بهترین سیلیس فلای آن ۳۰٪ (برای مقاومت فشار و کشش) و ۲۰٪ (برای مدول الاستیک) است. - در دماهای بالاتر از ۶۰۰°C، ترکیب استفاده از پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات بهترین گزینه برای بهبود عملکرد UHPGCاست.	نفوذ سریع یون کلر.
ن مرور بررسی می‌کند که ونه نانوسیلیکا (نانوسیلیکا) و اکسید گرافن (گرافن کسید) می‌توانند عملکرد کانیکی، مقاومت در برابر رسایش و پایداری ابعادی با مواد خرد شده بازیافتی را بهبود بخشند.	این مقاله به طور جامع به بررسی نحوه بهبود عملکرد و ویژگی‌های بتن مخلوط با مواد معدنی بازیافتی (RAC)توسط نانوسیلیکا (nanosilica)و گرافن اکسید (graphene oxide)پرداخته است، مکانیسم این بهبود ناشی از اثرات گوناگونی مانند هسته‌زایی، پرکنندگی، اثرات خاکسترهای آتشفشانی و اثرات پلزنی است.	–افزودن مواد نانومتری معمولاً باعث کاهش قابلیت پردازش بتن بازیافتی (RAC) می شود، اما فرایند هیدراتاسیون سیمان را تسریع می دهد و عملکرد مکانیکی و مقاومت RAC را بهبود می بخشد. - اثر اصلاحات نانومتری بسیار به نوع، مقدار و روش اصلاح استفاده شده وابسته است. - مکانیسم اصلاحات نانومتری در RAC شامل هسته‌زایی، پرکردن، افزایش اثر خاکسترهای آتشفشانی و اثر پل است، همچنین تقویت منطقه ترانزیشن رابط (ITZs) است.	-	تأثیر نانو مواد بر بتن بازیافتی (RAC)به نوع خاص، دوز و روش‌های اصلاحی که استفاده می‌شود، بستگی زیادی دارد، که نشان می‌دهد برای درک کامل این تأثیرات به تحقیقات بیشتری نیاز است. - هنوز مشخص نیست که نانو مواد چگونه خواص بتن بازیافتی را بهبود می‌بخشند، از جمله مکانیزم‌های هسته‌زایی، پر کردن، پوزولانی و پل‌زنی، و این موضوع نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد. - همچنین، قابلیت اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از نانو مواد در بتن بازیافتی نیز حوزه‌ای است که نیاز به تحقیقات و ارزیابی‌های بیشتری دارد.	[۱۰۱]
ن مقاله به بررسی کاربرد نو مواد در جذب و حذف لاینده‌های آلی پایدار از حیط‌های آبی می‌پردازد.	نکات کلیدی خلاصه شده از بحث/نتیجه‌گیری این است که نانو مواد می‌توانند به طور مؤثر بیش از ۷۰٪ از آلاینده‌های آلی پایدار (POPs)را از آب از طریق مکانیزم‌های مختلف جذب کنند و می‌توانند تا ۱۰ چرخه مورد استفاده مجدد قرار گیرند در حالی که کارایی حذف بیش از ۹۰٪ را حفظ می‌کنند. با این حال، چالش‌هایی در زمینه سمیت اکولوژیکی جاذب و دفع ایمن وجود دارد که نیاز به توجه دارند.	–نانو جاذب‌ها می‌توانند بیش از ۷۰٪ کارایی در حذف اکثر آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) از محلول‌های آبی داشته باشند. - مکانیزم‌های اصلی جذب شامل تعاملات الکترواستاتیک، تعاملات هیدروفوبیک و پیوند هیدروژنی هستند. - نانو جاذب‌ها می‌توانند در حدود ۳ چرخه، بیش از ۹۰٪ کارایی جذب برای آلاینده‌های آلی پایدار را حفظ کنند و تا ۱۰ بار قابل استفاده مجدد باشند.	-	–سمیت اکولوژیکی نانو جاذب‌ها و ضرورت دفع ایمن جاذب‌های استفاده شده. - قابلیت استفاده مجدد نانو جاذب‌ها محدود است و حداکثر تا ۱۰ چرخه قابل استفاده هستند قبل از اینکه عملکرد آن‌ها کاهش یابد.	[۱۰۲]
ن مقاله به بررسی کاربرد انو مواد در بهبود خواص کانیکی، جذب آب و نفوذ کلرید در بتن ژئوپلیمری	این مقاله مروری، چالش‌ها و مسائل فنی کلیدی مرتبط با استفاده از نانو مواد برای اصلاح بتن ژئوپلیمری را خلاصه می‌کند، از جمله پراکندگی،	–تحقیق در زمینه استفاده از نانو مواد برای بهبود عملکرد بتن ژئوپلیمری یک حوزه فعال و در حال	–مرور ادبیات در زمینه روش‌های پراکندگی نانو مواد در بتن ژئوپلیمری. - مرور تکنیک‌های شناسایی که برای	–مشکلات ناشی از تولید غیر ماهرانه که منجر به ترک‌خوردگی و ویژگی‌های مکانیکی ضعیف در	[۱۰۳]

فوق‌العاده با عملکرد بالا می‌پردازد.	مطالعه است. - مطالعات قبلی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات می‌تواند ویژگی‌های بتن ژئوپلیمری را بهبود بخشد و آن را برای کاربردهای مهندسی عملی مناسب‌تر کند. - این مقاله مروری، نمای کلی جامعی از تحقیقات فعلی در مورد بتن ژئوپلیمری اصلاح شده با نانوذرات ارائه می‌دهد و جنبه‌های کلیدی مانند پراکندگی نانوذرات، تکنیک‌های شناسایی و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی را بررسی می‌کند.	مطالعه بتن ژئوپلیمری اصلاح شده با نانو مواد استفاده می‌شوند. - مرور مکانیزم‌های رابط بین نانوذرات و ماتریس بتن ژئوپلیمری. - مرور تأثیر نانو مواد بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری.	شناسایی، مکانیزم‌های رابط و خواص مکانیکی، همچنین محدودیت‌ها و پتانسیل‌های آینده این حوزه تحقیقاتی را بررسی می‌کند.	GPCمی‌شود. - کاهش قابلیت استفاده از سازه‌های GPC. – چالش‌ها در زمینه پراکندگی و شناسایی نانو مواد در GPC. – دشواری‌ها در درک مکانیزم‌های رابط بین نانوذرات و GPC. – محدودیت‌ها و مشکلات عمومی مرتبط با این حوزه تحقیقاتی.	
مقاله تأثیرات افزودن نانو SiO_2به ژئوپلیمرهای بتنی بر خاکستر پرواز را بررسی می‌کند، از جمله بهبود خواص مکانیکی، میکروساختار و دوام.	–نانو SiO_2 به دلیل ویژگی‌های آمورف، سطح ویژه بالا و سطح فعال خود می‌تواند فرآیند ژئوپلیمری شدن ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز را تسریع کند. - مقاومت فشاری ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز با افزودن نانو SiO_2تا یک مقدار بهینه افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد. - افزودن مقدار مناسبی از نانو SiO_2می‌تواند میکروساختار ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز را فشرده‌تر کند، با ذرات واکنش‌نشده کمتر، که منجر به افزایش استحکام، چگالی بالاتر و تخلخل کمتر می‌شود.	–ویژگی‌ها و خصوصیات نانو SiO_2 به عنوان یک ماده. - تأثیرات نانو SiO_2 بر مقاومت فشاری، میکروساختار، خواص سخت‌شدگی، مقاومت چسبندگی برشی، دوام و کاربردهای عملی ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پروازی - تأثیرات نانو SiO_2 بر رئولوژی، خواص مکانیکی و دوام مواد پایه سیمان.	این مقاله تأثیرات افزودن نانو SiO_2 به ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر پرواز را بررسی می‌کند، از جمله بهبود در فرآیند ژئوپلیمری شدن، مقاومت فشاری، میکروساختار، مقاومت کششی، زمان گیرش، مقاومت چسبندگی برشی و دوام، در محدوده‌های خاص دوز بهینه.	–تحقیقات در زمینه ژئوپلیمرهای تقویت‌شده با نانو SiO_2هنوز در مراحل اولیه است و مطالعات کمی بر روی کاربردهای مهندسی عملی آن متمرکز شده‌اند. - این مقاله بر روی خواص مکانیکی ایستا کامپوزیت‌های ژئوپلیمری تمرکز دارد، اما به خواص دینامیکی یا خواص پس از قرارگیری در دماهای بالا که برای ایمنی سازه‌های بتنی مهم هستند، نمی‌پردازد. - برای پیشبرد توسعه و کاربرد ژئوپلیمرهای تقویت‌شده با نانو SiO_2، نیاز به تحقیقات بیشتری در زمینه خواص دینامیکی و خواص پس از قرارگیری در دماهای بالا وجود دارد.	[۱۰۴]
افزودن نانو مواد به سبانندههای فعال‌شده با لیایی، خواص مکانیکی و م آن‌ها را بهبود می‌بخشد.	–افزودن نانو مواد مانند نانو سیلیکا، نانو آلومینا، نانو TiO_2 و نانو لوله‌های کربنی به چسبانندههای فعال‌شده با قلیایی، فرآیند ژئوپلیمری شدن را تقویت کرده، میکروساختار را متراکم کرده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. - اثرات خاص شامل: نانو سیلیکا تا ۳٪ که نرخ ژئوپلیمری شدن را	–مرور جامع بر روی ادبیات منتشر شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ در مورد تأثیرات افزودن نانو مواد زیر به چسبانندههای فعال‌شده با قلیایی: - نانو سیلیکا - نانو آلومینا - نانو دی‌اکسید تیتانیوم - نانو لوله‌های کربنی - نتایج کلیدی از ادبیات را در مورد اینکه چگونه افزودن این نانو مواد بر فرآیند ژئوپلیمری شدن، میکروساختار و خواص مکانیکی چسبانندههای فعال‌شده با قلیایی تأثیر گذاشته است، خلاصه کرده	این مقاله مروری تأثیرات افزودن نانو مواد مختلف، از جمله نانو سیلیکا، نانو آلومینا، نانو دی‌اکسید تیتانیوم و نانو لوله‌های کربنی به چسبانندههای فعال‌شده با قلیایی را خلاصه می‌کند و نشان می‌دهد که این نانو مواد فرآیند ژئوپلیمری شدن، میکروساختار، خواص مکانیکی و دوام را تقویت می‌کنند، در حالی که همچنین به مسائل بهداشتی بالقوه و صرفه‌جویی	-	[۱۰۵]

			افزایش می‌دهد، نانو آلومینا در ۲٪ که تخلخل را کاهش می‌دهد، و نانو TiO_2 تا ۵٪ و نانو لوله‌های کربنی تا ۰.۱٪ که با فراهم کردن سایت‌های هسته‌زایی اضافی، ژئوپلیمری شدن را تقویت می‌کنند. - همچنین مشخص شد که افزودن نانو مواد به طور قابل توجهی دوام چسباننده‌های فعال‌شده با قلیایی را در برابر شرایط شیمیایی شدید افزایش می‌دهد.	است.	در هزینه‌ها می‌پردازد.	
افزودن نانو مواد به بتن وپلیمری می‌تواند به طور ی توجهی خواص مکانیکی، کروساختاری و دوام آن را بهبود بخشد.			-افزودن نانو مواد به بتن ژئوپلیمری به طور قابل توجهی خواص مکانیکی، میکروساختاری و دوام آن را بهبود می‌بخشد. - بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده با نانو مواد می‌تواند ویژگی‌های با استحکام بالا یا عملکرد بالا را به دست آورد. - بتن ژئوپلیمری هنگام اصلاح با انواع مختلف نانو مواد، بهبودهایی در خواص مهندسی و کارایی نشان می‌دهد.	-جستجوی جامع ادبیات و مرور بیش از ۱۹۰ مقاله تحقیقاتی و مروری در مورد بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده با نانو مواد مختلف انجام شد. - داده‌های این مطالعات تحلیل شد تا یک پایگاه داده از خواص کلیدی بتن ژئوپلیمری با انواع و دوزهای مختلف نانو مواد توسعه یابد. - تأثیر معرفی انواع و دوزهای مختلف نانو مواد بر رفتار و خواص بتن ژئوپلیمری ارزیابی شد.	خلاصه اصلی مباحث این است که اضافه کردن مواد نانو به بتن پلیمری می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد مکانیکی، ساختار میکرو و مقاومت آن را بهبود بخشد. این پیشرفت باعث می‌شود که صنعت ساختمان بتواند بهتر از قدرت انبوه بتن پلیمری استفاده کند و در عین حال، چالش‌ها و نقاط خالی در تحقیقات آینده نیز مشخص شود.	-چکیده به طور صریح محدودیت‌های مطالعه را ذکر نکرده است، اما به چالش‌ها و خالی‌های تحقیقاتی که در آینده باید حل شوند اشاره کرده است. -تحقیق فعلی بیشتر بر ترکیب مزایای مواد نانو در بتن پلیمری تمرکز دارد، اما در مورد محدودیت‌ها یا نقاط ضعف احتمالی این روش بحثی صورت نگرفته است. -چکیده نشان می‌دهد که تحقیق حال حاضر بر پتانسیل تقویت بتن پلیمری با مواد نانو تمرکز دارد، اما به هیچ محدودیت یا چالشی که ممکن است موانعی برای پیاده‌سازی موفق این تکنولوژی در صنعت ساختمان ایجاد کند، اشاره نکرده است.	[۱۰۶]
ر این بررسی ادبی، روش ی استفاده از مواد مختلف ی کاهش هزینه های بالای ی فوق العاده با عملکرد بالا د مطالعه قرار گرفته است، چنین حفظ عملکرد برتر آن.			-استفاده از مواد جایگزین مانند زغال سنگ، شن آهن، پودر شیشه، خاک برنج و پودر آهک سنگی، می تواند با جایگزینی جزئی یا کامل مواد گران قیمت (مانند سیمان، خاک سیلیس، پودر کوارتز و شن و ماسه کوارتز)، هزینه تولید بتن فوق العاده با کارایی بالا را کاهش دهد. -این مرور کلی تاثیر صرفه جویی کلی هزینه (دلار بر متر مکعب) و صرفه جویی استاندارد شده هزینه بر	-مروری بر ادبیات موجود، بررسی استفاده از انواع مواد (مانند خاک زغال سنگ، آهک کوره بلند، پودر شیشه، خاک برنج، پودر آهک، مواد خرد شده طبیعی و خرد شده خشن) به عنوان جزئی یا کامل جایگزین‌های مواد typic (سیمان، خاک سیلیس، پودر کوارتز، شن و سیلیس، آبزن) در بتن فوق العاده عملکرد (UHPC)برای کاهش هزینه کل UHPC. -محاسبه هزینه کل (دلار/متر مکعب) و	این مقاله مروری خلاصه شده است که چگونه از مواد مختلف (مانند زغال سنگ، شن شیشه، ماسه کوره، پوسته برنج و پودر سنگ آهک) برای کاهش هزینه بتن فوق العاده با عملکرد بالا استفاده کرد، از طریق جایگزینی جزئی یا کامل سیمان، خاک رس، پودر کوارتز و ماسه کوارتز، و تاثیر این مواد بر عملکرد بتن فوق العاده با عملکرد بالا را بررسی کرد.	-خلاصه به هیچ محدودیتی در مورد تحقیق اشاره نکرده است. -خلاصه نشان می دهد که نیازهای تحقیقات آینده شناسایی شده اند، این می تواند به عنوان محدودیت های ضمنی کار فعلی در نظر گرفته شود. -هزینه بالای بتن فوق العاده با عملکرد بالا به عنوان مانع اصلی برای استفاده گسترده آن ذکر	[۱۰۷]

		اساس مقاومت (دلار بر متر مکعب بر مگاپاسکال) در استفاده از این مواد جایگزین را ارزیابی می کند. –این مرور همچنین تأثیر مواد جایگزین بر قابلیت پردازش، عملکرد مکانیکی، انقباض و مقاومت بتن فوق العاده را بررسی می کند.	هزینه استاندارد شده بر اساس استحکام (دلار/MPa/متر مکعب) بتن فوق العاده عملکرد در صورت استفاده از این مواد جایگزین. –بررسی تاثیر این مواد جایگزین بر قابلیت پردازش و خصوصیات مکانیکی (مانند مقاومت فشاری) بتن فوق العاده عملکرد.	شده است، این می تواند به عنوان یک محدودیت برای فناوری فعلی بتن فوق العاده با عملکرد بالا در نظر گرفته شود.	
مقاله بررسی کرد استفاده فیبرهای طبیعی در بتن یمانی، شامل تأثیر آنها بر کرد مکانیکی، جذب آب و نفوذ یون کلر.		–فیبرهای طبیعی (NFs) می توانند عملکرد مکانیکی بتن سیمان را افزایش دهند، به ویژه مقاومت در برابر کشش و مقاومت در برابر خمش. –جذب بالای آب و ویژگی‌های هیدروفیل NFs ممکن است باعث کاهش اتصال فیبر به ماتریس بتن شوند و بر عملکرد کلی بتن تأثیر بگذارند. –استفاده از NFs برای تولید پارچه یا استخراج نانوکریستال سلولز یا نانوفیبر ممکن است یک روش موثر برای افزایش عملکرد NFs در بتن سیمان باشد.	در این مقاله، به کاربرد فیبرهای طبیعی (NFs) در بتن سیمانی پرداخته شده است و تأکید شده است که این فیبرها در بهبود عملکرد مکانیکی نقش مهمی دارند، همچنین چالش‌هایی که از جمله جذب بالای آب و خواص آب‌دوستی آنها می‌آید، نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، راه حل‌هایی ارائه شده است که از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی برای حل این مشکلات استفاده می‌شود.	–جذب بالای آب و رفتار آبدوستی فیبرهای طبیعی (NFs)باعث کاهش چسبندگی با ماتریس بتن شده و در نتیجه کاهش عملکرد کلی می‌شود. –ویژگی‌های پرمتخلخی و رابط ضعیف فیبرهای طبیعی باعث افزایش نفوذپذیری مواد بتن و کاهش مقاومت در برابر فرسایش می‌شود.	[۱۰۸]
		–مقاومت بلند مدت خمیر پلیمری بهتر از بتن عادی پرتلند سیمان (OPC)است، مقاومت آن تحت تأثیر محتوای کلسیم است.	–مروری بر اداء مکانیکی و ویژگی‌های مقاومتی مخلوط‌های پلیمری سیمانی (GPC)حاوی انواع مواد افزودنی و فیبرها در ادبیات موجود دارد.		–توصیه می‌شود که استفاده از فیبرهای طبیعی برای تولید پارچه یا استخراج نانوکریستال سلولز یا نانوفیبر سلولز ممکن است یک روش تقویت موثر باشد، که نشان دهنده محدودیت‌های فعلی در استفاده از فیبرهای طبیعی است.
مقاله بررسی ویژگی‌های ام بلند مدت بتن پلیمری تقویت شده با فیبرهای یط زیستی را مورد بررسی داده است، شامل عملکرد مکانیکی و دوام آن در حیط‌های فرسایشی است.		–نمونه‌های بتن پلیمری براساس خاکستر زغال سنگ/شن و ماسه در معرض سولفات منیزیم ($MgSO_4$)برای ۱۲۰ روز بدون تغییر اندازه قابل توجهی بودند، در حالی که بتن OPC سنتی نشان دهنده ۰.۱۸۴٪ انبساط بود. –عمق نفوذ یون کلر در ملات زغال سنگ تحریکی (۱۲ میلیمتر) بیشتر از نمونه‌های بتن با جایگزینی ۲۵٪ خاکستر زغال سنگ (۱۰ میلیمتر)	–مقایسه عملکرد بلندمدت و مکانیسم مقاومتی GPC و سیمان پرتلند عادی (OPC)، با تمرکز بر تأثیر محتوای کلسیم. –ارزیابی تغییر ابعاد نمونه‌های GPC و OPCبر اساس ذغال سنگ/شیشه معدنی ۱۲۰ روز پس از تعریض به محلول سولفات منیزیم.($MgSO_4$)	خلاصه‌ی کلیدی بحث این است که مصالح بتنی پلیمری معدنی در مقایسه با بتن معمولی پرتلند، در طولانی مدت دوام بیشتری دارند و مکانیزم دوام آن‌ها تحت تأثیر قابل توجهی از محتوای کلسیم قرار می‌گیرد.	–در محیط‌های فرسایشی مانند فاضلاب، آب فاضلاب و سازه‌های دریایی، تحقیقات در مورد مقاومت پایداری بتن پلیمری تقویت شده با فیبر محدود است. –نیاز به بررسی عمق نفوذ یون کلر به عنوان شاخصی برای مقاومت پایداری فرمولاسیون‌های مختلف بتن پلیمری می‌باشد. –درک اهمیت واکنش‌های شیمیایی، مانند خرابی پیوند C–S–Hو تشکیل گچ، که این واکنش‌ها می‌توانند مقاومت پایداری بتن پلیمری در معرض	[۱۰۹]

است.	اسید تحت تاثیر قرار دهند. -این مقاله چالش‌های مقاومت پایداری را شناسایی کرده و پیشنهادات برای تحقیقات بیشتر را مطرح کرده است.

۹- چشم‌اندازها

از منظر حفاظت از محیط زیست، تولید UHPC با استفاده از نانومواد برای جایگزینی جزئی سیمان دارای چشم‌انداز وسیعی است اما به دلیل روش تولید و هزینه محدود است. برای ترویج بهتر توسعه پایدار UHPC دوستدار محیط زیست، می‌توان به نکات زیر توجه کرد:

(۱) علاوه بر نانومواد ذکر شده در مقاله، نانومواد دیگری مانند نانو اکسید آلومینیوم و نانوذرات خاک رس نیز باید به‌جای سیمان برای تولید UHPCمورد مطالعه قرار گیرند. علاوه بر این، تأثیر مخلوط ترکیبی انواع نانومواد بر عملکرد UHPC نیز ارزش مطالعه دارد.

(۲) دوام، به‌عنوان یک شاخص مهم که بر عمر مفید و هزینه نگهداری سازه‌ها تأثیر می‌گذارد، نقش مهمی در ایمنی و دوام سازه‌ها ایفا می‌کند. برخی از شاخص‌های دوام نانومواد مخلوط شده با UHPC هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند، مانند مقاومت در برابر آتش، مقاومت در برابر کربن‌زدایی و مدول الاستیسیته دینامیکی. این موارد نیز برای ایمنی و دوام سازه مهم هستند.

(۳) اثر هسته‌زایی یکی از نقش‌های مهمی است که نانومواد در UHPC ایفا می‌کنند، اما مکانیزم اثر هسته‌زایی به‌طور عمیق مورد مطالعه قرار نگرفته و می‌تواند با استفاده از روش المان محدود بیشتر بررسی شود. در عین حال، عملکرد نانومواد به اندازه ذرات آن‌ها بستگی دارد و تأثیر اندازه‌های مختلف نانومواد در UHPC هنوز ناشناخته است.

علاوه بر این، هنوز چالش‌هایی در کاربرد نانومواد در UHPC وجود دارد:

(۱) نسبت نانومواد جایگزین سیمان برای تولید UHPC هنوز پایین است که عمدتاً به پخش نانومواد مربوط می‌شود. در حال حاضر، اصلاح‌کننده‌ها به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند، اما تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر سازگاری نانومواد باید مورد توجه قرار گیرد. برای حفظ سیالیت و فعالیت نانومواد تحت دوز بالا، تحقیقات بیشتری در مورد پخش نانومواد باید انجام شود.

(۲) در حال حاضر، پس از یک دوره طولانی توسعه، هزینه مواد سیمانی نسبت به نانومواد به‌دلیل تولید انبوه نسبتاً پایین است. بنابراین، کاهش هزینه تولید نانومواد یک مشکل بزرگ است که باید در آینده حل شود.

به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین مصالح ساختمانی در آینده، UHPC اهمیت زیادی در بهبود عملکرد سازه دارد. تحقیقات موجود نشان داده‌اند که خواص مکانیکی و دوام UHPC با استفاده از نانومواد به‌جای سیمان بهبود یافته است. با این حال، نرخ جایگزینی در حال حاضر پایین است. با پیشرفت تحقیقات در مورد مکانیزم‌های نانومواد، هزینه کمتر، عملکرد بهتر و UHPC دوستدار محیط زیست بیشتری در آینده قطعاً توسعه خواهد یافت که می‌تواند پیشرفت‌های نانومواد و صنعت مصالح ساختمانی را نیز ترویج کند.

۱۰- نتیجه گیری

تأثیرات نانو سیلیکا، نانو $CaCO_3$، نانومواد مبتنی بر کربن، نانو TiO_2و نانو MgO بر خواص UHPC مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده می‌شود که تولید UHPC با نانومواد به جای سیمان دارای چشم‌اندازهای وسیعی است. تأثیر این مواد بر UHPC به شرح زیر خلاصه می‌شود:

(۱) هنگامی که این نانومواد به UHPC اضافه شدند، نرخ جذب آب با سطح خاص بزرگ و اثر پرکنندگی به عوامل کلیدی تأثیرگذار بر سیالیت UHPC تبدیل شد.

(۲) CNTs و CNFs عمدتاً عملکرد UHPC را از طریق خواص مکانیکی خود بهبود بخشیدند. سایر نانومواد ساختار حفره‌ها را از طریق اثر هسته‌زایی، اثر پرکنندگی و واکنش با محصولات هیدراسیون بهبود دادند. این اثرات نقش مثبتی در بهبود چقرمگی، نفوذناپذیری و مقاومت خمشی UHPC ایفا کرده‌اند.

(۳) از نظر واکنش با محصولات هیدراسیون، ژل C–S–H از واکنش نانو سیلیس با CH تشکیل شد و کلسیم کربن آلومینات پایدار از واکنش نانو $CaCO_3$ با C_3A تشکیل شد. GO تأثیر مثبتی بر تقویت ژل C–S–H دارد. نانو MgO تشکیل هیدروتالکیت را ترویج می‌کند و تأثیر منفی بر ساختار دارد.

(۴) از منظر بهبود عملکرد، GO امیدوارکننده‌ترین نانوماده است. در مقایسه با سایر مواد، مقدار مخلوط GO به ۱۰۰ برابر کمتر از سایر مواد کاهش یافته است، اما تأثیر بهبود مقاومت نیز برجسته است. علاوه بر این، GO دارای گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن است و اثر توزیع بهتری دارد، اما هزینه بالای آن نیز بر ترویج آن در مقیاس بزرگ تأثیر می‌گذارد.

(۵) افزودن ۲٪ نانو سیلیکا جذب آب را ۵۸٪ کاهش داد، ۰/۰۸درصد وزنی نانولوله‌های کربنی جذب آب را ۳۵/۸٪ کاهش داد. ۰/۸ درصد وزنی اکسید گرافن جذب آب را ۴۶٪ کاهش داد. استفاده از ۳٪ نانو $CaCO_3$ جذب آب را ۶۵–۷۰٪ کاهش داد. نانو Fe_2O_3 در ۴٪ کاهش ۷۳.۷۷٪ را ایجاد کرد. نانو آلومینا تأثیر منفی بر جذب آب بتن داشت.

(۶) نانو سیلیکا در ۰/۳ درصد وزنی نفوذ کلراید را ۲۸/۷٪ کاهش داد، در حالی که ۰/۰۳ درصد وزنی اکسید گرافن (GO) عمق نفوذ کلراید را ۵۱/۷۳٪ کاهش داد. نانولوله‌های کربنی (۰/۰۵–۰/۱٪) ضریب نفوذ کلراید را ۱۲٪ کاهش دادند. نانو Fe_2O_3 (۲ درصد وزنی) نفوذپذیری سریع کلراید را ۴۴٪ کاهش داد، در حالی که کاهش ۸۸٪ با نانو TiO_2 مشاهده شد.

مراجع:

1. Iqbal, S. *et al.* (2019) Enhanced mechanical properties of fiber reinforced concrete using closed steel fibers. *Materials and Structures* 52, 56
2. Wu, Z. (1998) Green high performance concrete—The development trend of concrete. *China Concrete and Cement Products* 1, 3-6
3. Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995) Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research* 25, 1501-1511
4. De Larrard, F. and Sedran, T. (1994) Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and concrete research* 24, 997-1009
5. Li, S. *et al.* (2020) Effects of steel slag powder and expansive agent on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC): based on a case study. *Materials* 13, 683
6. Wang, D. *et al.* (2015) A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials* 96, 368-377
7. Yalçınkaya, Ç. and Yazıcı, H. (2017) Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials* 144, 252-259
8. Shi, J. *et al.* (2012) Emissions of carbon dioxide from cement industry and its reduction strategy in China. *Acta Sci. Circum* 32, 2028-2033
9. Abdalla, J.A. *et al.* (2022) Influence of nano-TiO2, nano-Fe2O3, nanoclay and nano-CaCO3 on the properties of cement/geopolymer concrete. *Cleaner Materials* 4, 100061
10. Chen, B. *et al.* (2014) Review of research on ultra-high performance concrete. *J. Archit. Civ. Eng* 31, 1-24
11. Zeng, W. *et al.* (2020) Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites* 106, 103476
12. Meng, T. *et al.* (2020) Effect of different particle sizes of nano-SiO2 on the properties and microstructure of cement paste. *Nanotechnology Reviews* 9, 833-842
13. Yu, R., Spiesz, P. and Brouwers, H. (2014) Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials* 65, 140-150

14. Mendes, T., Repette, W. and Reis, P. (2017) Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete. *Cerâmica* 63, 387-394
15. Li, W. *et al.* (2015) Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. *Construction and Building Materials* 95, 366-374
16. Janković, K. *et al.* (2016) The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials* 126, 147-156
17. Feng, P. *et al.* (2020) The significance of dispersion of nano-SiO2 on early age hydration of cement pastes. *Materials & Design* 186, 108320
18. Yu, R. *et al.* (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). *Construction and Building Materials* 60, 98-110
19. Ghafari, E. *et al.* (2015) Influence of nano-silica addition on durability of UHPC. *Construction and Building Materials* 94, 181-188
20. Calvo, J.G. *et al.* (2017) Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. *Construction and Building Materials* 138, 306-315
21. Berra, M. *et al.* (2012) Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials* 35, 666-675
22. Ghafari, E. *et al.* (2014) The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials & Design* 59, 1-9
23. Jing, Y. (2019) Study on the performance of nano CaCO 3 modified cement concrete. *New Building Materials/Xinxing Jianzhu Cailiao* 46,
24. Li, G. *et al.* (2020) Enhancing carbonation and chloride resistance of autoclaved concrete by incorporating nano-CaCO3. *Nanotechnology Reviews* 9, 998-1008
25. Wu, Z. *et al.* (2016) Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cement and Concrete Composites* 70, 24-34
26. Camiletti, J., Soliman, A.M. and Nehdi, M.L. (2013) Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research* 65, 297-307
27. Huang, Z. and Zu, T. (2013) Influence of nano-CaCO3 on ultra high performance concrete. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society* 32, 1103-1109
28. Camiletti, J., Soliman, A. and Nehdi, M. (2013) Effects of nano-and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Materials and structures* 46, 881-898
29. Wu, Z., Shi, C. and Khayat, K.H. (2018) Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO3 particles. *Cement and Concrete Composites* 86, 255-265
30. Novoselov, K.S. *et al.* (2004) Electric field effect in atomically thin carbon films. *science* 306, 666-669
31. Shamsaei, E. *et al.* (2018) Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review. *Construction and Building Materials* 183, 642-660
32. Liu, C. *et al.* (2020) Review on the research progress of cement-based and geopolymer materials modified by graphene and graphene oxide. *Nanotechnology Reviews* 9, 155-169
33. Yuan, X. *et al.* (2017) Mechanical properties and microcosmic mechanism of cement mortar modified by graphene oxide. *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci Ed)* 36, 36-42
34. Wan, H. and Zhang, Y. (2020) Interfacial bonding between graphene oxide and calcium silicate hydrate gel of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures* 53, 34
35. Wu, Y.-Y. *et al.* (2020) Effect of graphene oxide nanosheets on physical properties of ultra-high-performance concrete with high volume supplementary cementitious materials. *Materials* 13, 1929
36. Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Mahmoodi, M.J. and Safi, M. (2019) Effect of adding carbon nanotubes on the thermal conductivity of steel fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering* 174, 106972
37. Hu, T. *et al.* (2019) Humic acid assisted stabilization of dispersed single-walled carbon nanotubes in cementitious composites. *Nanotechnology Reviews* 8, 513-522
38. You, I. *et al.* (2017) Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes. *Sensors* 17, 2481

39. Lee, S.H., Kim, S. and Yoo, D.-Y. (2018) Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building materials* 185, 530-544
40. Yoo, D.-Y., Kim, S. and Lee, S.H. (2018) Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension. *Sensors and Actuators A: Physical* 276, 125-136
41. Jiang, C. *et al.* (2014) Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures. *Construction and Building materials* 61, 260-269
42. Ahmed Sbia, L. *et al.* (2014) Enhancement of ultrahigh performance concrete material properties with carbon nanofiber. *Advances in civil engineering* 2014, 854729
43. Meng, W. and Khayat, K.H. (2016) Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. *Composites Part B: Engineering* 107, 113-122
44. Liu, X. *et al.* (2015) Photocatalysis, microstructure, and surface characterization of TiO2-loaded wooden-activated carbon fibers. *Polymer Composites* 36, 62-68
45. Liang, C. *et al.* (2019) Research progress on the nano-TiO2 cement-based photocatalytic materials. *Mater Rep* 33, 267-272
46. Su, Y. *et al.* (2017) Development of novel ultra-high performance concrete: From material to structure. *Construction and Building Materials* 135, 517-528
47. Li, Z. *et al.* (2017) Effect of nano-titanium dioxide on mechanical and electrical properties and microstructure of reactive powder concrete. *Materials Research Express* 4, 095008
48. Chunping, G. *et al.* (2018) The effect of nano TiO2 on the durability of ultra-high-performance concrete with and without a flexural load. *Ceram-Silikáty* 62, 374-381
49. Polat, R., Demirboğa, R. and Karagöl, F. (2017) The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar. *Construction and Building Materials* 156, 208-218
50. Li, S. and Gao, X. (2018) Effect of nano Al2O3 and MgO on abrasion resistance and mechanism of ultra-high performance concrete. *Surface Technology* 47, 123-130
51. Shen, W. *et al.* (2017) Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 618-628
52. Peng, J.X. *et al.* (2013) Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. *Advanced materials research* 610, 2120-2128
53. Jalal, M. *et al.* (2012) Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume. *Journal of American science* 8, 278-284
54. Tsardaka, E.-C. and Stefanidou, M. (2021) Testing nano-silica and nano-alumina additions for enhancing the durability of cement and lime pastes. *Materials Today: Proceedings* 37, 4082-4090
55. Gao, Y. *et al.* (2021) Roles of carbon nanotubes in reinforcing the interfacial transition zone and impermeability of concrete under different water-to-cement ratios. *Construction and Building Materials* 272, 121664
56. Langaroudi, M.A.M. and Mohammadi, Y. (2018) Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and building materials* 191, 619-634
57. Khotbehsara, M.M. *et al.* (2018) Effect of SnO2, ZrO2, and CaCO3 nanoparticles on water transport and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash: Experimental observations and ANFIS predictions. *Construction and Building Materials* 158, 823-834
58. Khoshakhlagh, A., Nazari, A. and Khalaj, G. (2012) Effects of Fe2O3 nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. *Journal of Materials Science & Technology* 28, 73-82
59. Jalal, M., Ramezanianpour, A.A. and Pool, M.K. (2013). RETRACTED: Split tensile strength of binary blended self compacting concrete containing low volume fly ash and TiO2 nanoparticles. Elsevier
60. Du, H., Du, S. and Liu, X. (2014) Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials* 73, 705-712

61. Carriço, A. *et al.* (2018) Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 164, 121-133
62. Fan, Y. *et al.* (2014) Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites* 45, 117-124
63. Shaikh, F.U.A. and Supit, S.W. (2015) Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles. *Construction and building materials* 99, 208-225
64. *Chinthakunta, R. et al. (2021) Performance evaluation of self-compacting concrete containing fly ash, silica fume and nano titanium oxide. Materials Today: Proceedings 43, 2348-2354*
65. *Yoo, D.-Y. et al. (2022) Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC)–A review. Cement and Concrete Composites 134, 104730*
66. *Abdalla, J.A. et al. (2022) Influence of nanomaterials on the water absorption and chloride penetration of cement-based concrete. Materials Today: Proceedings 65, 2066-2069*
67. *Huseien, G.F. (2023) A review on concrete composites modified with nanoparticles. Journal of Composites Science 7, 67*
68. *Yu, Z. et al. (2022). RETRACTED: Mechanical properties, durability and application of ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate (UHPC-CA): A review. Elsevier*
69. *Allujami, H.M. et al. (2022) Nanomaterials in recycled aggregates concrete applications: Mechanical properties and durability. A review. Cogent Engineering 9, 2122885*
70. *Zhang, P. et al. (2023) Influence of carbon nanotube on properties of concrete: A review. Construction and Building Materials 369, 130388*
71. *Faraj, R.H. et al. (2022) Performance of Self-Compacting mortars modified with Nanoparticles: A systematic review and modeling. Cleaner Materials 4, 100086*
72. *Mansi, A. et al. (2022). The impact of nano clay on normal and high-performance concrete characteristics: a review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*
73. *Ullah, R. et al. (2022) Ultra-high-performance concrete (UHPC): A state-of-the-art review. Materials 15, 4131*
74. *Zhang, C. et al. (2023) Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production 384, 135390*
75. *Amran, M. et al. (2022) Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. Construction and Building Materials 352, 129029*
76. *Ahmad, J. et al. (2022) Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis. Materials 15, 5111*
77. *Raj, R.S. et al. (2023) Nanomaterials in geopolymer composites: A review. Developments in the Built Environment 13, 100114*
78. *Akeed, M.H. et al. (2022) Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part I: Developments, principles, raw materials. Case Studies in Construction Materials 17, e01290*
79. *Abdal, S. et al. (2023) Application of ultra-high-performance concrete in bridge engineering: Current status, limitations, challenges, and future prospects. Buildings 13, 185*
80. *Akeed, M.H. et al. (2022) Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges. Case Studies in Construction Materials 17, e01271*
81. *Gong, J. et al. (2022) Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. Composites Part B: Engineering 241, 109995*
82. *Bahmani, H. and Mostofinejad, D. (2022) Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC)–a review study. Journal of Building Engineering 50, 104118*
83. *Ahmed, H.U. et al. (2022) The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. Journal of Building Engineering 49, 104062*
84. *Qaidi, S.M. et al. (2022) Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review. Construction and Building Materials 346, 128495*
85. *Althoey, F. et al. (2023) Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review. Case Studies in Construction Materials 18, e01997*

86. *Huang, Y. et al. (2022) Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review. Construction and Building Materials 336, 127398*
87. *Wu, Y. et al. (2022) A review on recent advances in the fabrication and evaluation of superhydrophobic concrete. Composites Part B: Engineering 237, 109867*
88. *Ramezani, M. et al. (2022) Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review. Construction and Building Materials 315, 125100*
89. *Moein, M.M. et al. (2023) Predictive models for concrete properties using machine learning and deep learning approaches: A review. Journal of Building Engineering 63, 105444*
90. *Ahmad, J. and Zhou, Z. (2022) Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: a review. Construction and Building Materials 333, 127353*
91. *Rajendran, S. et al. (2022) A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review. Chemosphere 303, 135146*
92. *FY, A.-s. et al. (2023) An Elucidative Review of the Nanomaterial Effect on the Durability and Calcium-Silicate-Hydrate (CSH) Gel Development of Concrete. All Open Access,*
93. *Zheng, Y. et al. (2022) A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials 359, 129360*
94. *Shilar, F.A. et al. (2022) Review on the relationship between nano modifications of geopolymer concrete and their structural characteristics. Polymers 14, 1421*
95. *Goel, G. et al. (2022) The use of nanomaterials in concrete: A review. Materials Today: Proceedings 69, 365-371*
96. *Das, N. and Nanthagopalan, P. (2022) State-of-the-art review on ultra high performance concrete-Ballistic and blast perspective. Cement and concrete composites 127, 104383*
97. *Barbaros, I. et al. (2022) State-of-the-art review of fabrication, application, and mechanical properties of functionally graded porous nanocomposite materials. Nanotechnology Reviews 11, 321-371*
98. *Shilar, F.A. et al. (2022) Advancement of nano-based construction materials-A review. Construction and Building Materials 359, 129535*
99. *Yang, J. et al. (2022) Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) 9, 363-387*
100. *Bahmani, H. and Mostofinejad, D. (2023) A review of engineering properties of ultra-high-performance geopolymer concrete. Developments in the Built Environment 14, 100126*
101. *Zhan, P. et al. (2022) A review of recycled aggregate concrete modified by nanosilica and graphene oxide: Materials, performances and mechanism. Journal of Cleaner Production 375, 134116*
102. *Ighalo, J.O. et al. (2022) Adsorption of persistent organic pollutants (POPs) from the aqueous environment by nano-adsorbents: A review. Environmental research 212, 113123*
103. *Kishore, K. et al. (2023) Technological challenges in nanoparticle-modified geopolymer concrete: A comprehensive review on nanomaterial dispersion, characterization techniques and its mechanical properties. Case Studies in Construction Materials, e02265*
104. *Han, Q. et al. (2022) Comprehensive review of the properties of fly ash-based geopolymer with additive of nano-SiO2. Nanotechnology Reviews 11, 1478-1498*
105. *Matalkah, F. et al. (2022) Effects of nanomaterials on mechanical properties, durability characteristics and microstructural features of alkali-activated binders: A comprehensive review. Construction and Building Materials 336, 127545*
106. *Zaid, O. et al. (2024) Sustainability evaluation, engineering properties and challenges relevant to geopolymer concrete modified with different nanomaterials: A systematic review. Ain Shams Engineering Journal 15, 102373*
107. *Shah, H.A. et al. (2022) Use of materials to lower the cost of ultra-high-performance concrete–A review. Construction and Building Materials 327, 127045*
108. *Hamada, H.M. et al. (2023) Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. Materials Today Communications 35, 105833*
109. *Li, W. et al. (2022) Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. Case Studies in Construction Materials 16, -00894*