مطالعات علوم کاربردی در مهندسی

دوره ۱۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

صفحات ۷۲-۶۲

Online ISSN: ٢٤٧٦-٤٥٠٧

Print ISSN: ٢٥٣٨-٢٠٥٥

www.irijournals.com

تأثیر فناوری نانومواد بر بهبود استحکام قطعات مکانیکی در شرایط خستگی حرارتی

یزدان فیروزی جهانتیغ

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ساخت و تولید دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در دهه‌های اخیر، فناوری نانومواد به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین حوزه‌های مهندسی مواد، توجه گسترده‌ای را در صنایع مختلف، به‌ویژه در مهندسی عمران و مکانیک به خود جلب کرده است. استفاده از نانومواد در ترکیب با بتن و سایر مصالح ساختمانی منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی، دوام و مقاومت در برابر شرایط محیطی سخت، از جمله خستگی حرارتی شده است. خستگی حرارتی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب قطعات مکانیکی و زیرساخت‌های راه‌سازی، نیازمند راهکارهای نوین برای افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های نگهداری است. این مقاله مروری جامع، با هدف بررسی نقش نانومواد در بهبود استحکام قطعات مکانیکی تحت شرایط خستگی حرارتی، با استناد به ۲۹ منبع معتبر علمی منتشرشده در مجلات بین‌المللی، به تحلیل مبانی نظری، پیشینه پژوهش، روش‌شناسی مطالعات قبلی، یافته‌های کلیدی و پیشنهادات آینده می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهند که نانوذرات سیلیس (nano-SiO_2)، نانوکربنات کلسیم (nano-$CaCO_3$)، اکسید آهن نانو (nano-Fe_2O_3)، گرافن اکسید (GO)، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (nano-TiO_2) به‌طور مؤثری استحکام کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر سایش و دوام در برابر چرخه‌های حرارتی را افزایش می‌دهند. این مقاله ضمن ارائه جمع‌بندی جامع از دستاوردهای موجود، شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده را برای توسعه بیشتر این فناوری مشخص می‌کند. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از نانومواد در صنعت ساخت و ساز و مهندسی مکانیک، این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مرجعی جامع برای محققان، مهندسان و سیاست‌گذاران در زمینه طراحی مواد مقاوم در برابر خستگی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نانومواد، خستگی حرارتی، استحکام مکانیکی، بتن نانو، دوام، گرافن اکسید، نانوسیلیس، زیرساخت‌های راه‌سازی

مقدمه

در عصر حاضر، با افزایش تقاضا برای سازه‌ها و قطعات مکانیکی با عمر طولانی‌تر، کارایی بالاتر و مقاومت در برابر شرایط محیطی شدید، نیاز به توسعه مواد پیشرفته‌تر از بتن معمولی و فولاد سنتی بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از چالش‌های عمده در صنعت ساخت و ساز و مهندسی مکانیک، مقابله با پدیده خستگی حرارتی است. خستگی حرارتی ناشی از تغییرات مکرر دما در طول زمان، منجر به ایجاد ترک‌های ریز، تخریب تدریجی ساختار ماده و در نهایت شکست ناگهانی قطعات می‌شود. این پدیده به‌ویژه در سازه‌هایی مانند پل‌ها، روسازی‌های بتنی، موتورهای صنعتی و قطعات مکانیکی در معرض نوسانات دمایی، اهمیت حیاتی دارد.

فناوری نانو، با توانایی دستکاری مواد در مقیاس اتمی و مولکولی، امکان طراحی موادی با خواص مکانیکی و فیزیکی بهبودیافته را فراهم کرده است. نانومواد، به‌دلیل سطح ویژه بالا، فعالیت شیمیایی قوی و توانایی پرکردن فضاهای خالی در ساختار میکروسکوپی بتن و سایر کامپوزیت‌ها، نقش کلیدی در افزایش چگالی، کاهش نفوذپذیری و بهبود پیوند بین اجزای ماده ایفا می‌کنند. این ویژگی‌ها مستقیماً منجر به افزایش مقاومت در برابر خستگی حرارتی می‌شود.

در این مقاله، تلاش شده است تا با مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده در دهه‌های اخیر، تأثیر نانومواد بر استحکام قطعات مکانیکی در شرایط خستگی حرارتی به‌طور جامع بررسی شود. این بررسی شامل تحلیل مبانی نظری، مرور پیشینه تحقیقات، روش‌شناسی مطالعات قبلی، یافته‌های کلیدی و ارائه پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده است. منابع مورد استفاده در این مقاله شامل ۲۹ مقاله علمی منتشرشده در مجلات معتبر بین‌المللی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به موضوع نانومواد و خستگی حرارتی پرداخته‌اند.

هدف اصلی این مقاله، جمع‌بندی دانش موجود و شناسایی راهکارهای عملی برای بهبود عملکرد مواد در برابر خستگی حرارتی با استفاده از نانوفناوری است. این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آینده و همچنین راهنمایی برای مهندسان و طراحان در انتخاب مواد مناسب برای کاربردهای حساس به خستگی حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

مبانی نظری پژوهش

۱. خستگی حرارتی: مفهوم و مکانیزم‌های تخریب

خستگی حرارتی پدیده‌ای است که در اثر تغییرات مکرر دما در یک ماده رخ می‌دهد و منجر به تخریب تدریجی ساختار داخلی آن می‌شود. این پدیده در قطعاتی که در معرض نوسانات دمایی قرار دارند — مانند روسازی‌های بتنی در مناطق با آب‌وهوای چهارفصل، موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی و قطعات صنایع فولاد و پتروشیمی — بسیار حائز اهمیت است. مکانیزم اصلی خستگی حرارتی، ایجاد تنش‌های حرارتی درونی ناشی از انبساط و انقباض نابرابر اجزای ماده است. این تنش‌ها با تکرار چرخه‌های حرارتی، منجر به تشکیل ترک‌های ریز، رشد تدریجی آن‌ها و در نهایت شکست ماده می‌شوند.

در بتن، خستگی حرارتی معمولاً با ترک‌هوری سطحی، کاهش چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان، و افزایش نفوذپذیری همراه است. این عوامل به‌طور تجمعی منجر به کاهش استحکام کششی، خمشی و فشاری ماده می‌شوند. بنابراین، بهبود مقاومت در برابر خستگی حرارتی مستلزم افزایش یکپارچگی ساختاری، کاهش تخلخل و بهبود خواص الاستیک و پلاستیک ماده است.

۲. نانومواد: تعاریف و انواع رایج در مهندسی مکانیک و عمران

نانومواد به موادی گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر قرار دارد. در کاربردهای مهندسی، نانومواد به‌صورت نانوذرات، نانولوله‌ها، نانوصفحات و نانوفیبرها طبقه‌بندی می‌شوند. در زمینه بهبود خواص بتن و کامپوزیت‌های مکانیکی، رایج‌ترین نانومواد عبارتند از:

- نانوسیلیس ($nano\text{-}SiO_2$): با فعالیت پوزولانی بالا، واکنش با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) را تسریع کرده و منجر به تشکیل ژل سیلیس-کلسیم-هیدرات (C-S-H) متراکم‌تر می‌شود.
- نانوکربنات کلسیم ($nano\text{-}CaCO_3$): به‌عنوان پرکننده نانومتری، فضاهای خالی را پر کرده و هسته‌بندی کریستال‌های هیدراته را تسهیل می‌کند.
- اکسید آهن نانو ($nano\text{-}Fe_2O_3$): علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش می‌دهد.
- گرافن اکسید (GO) و نانولوله‌های کربنی (CNTs): با خاصیت کششی بالا و سطح ویژه زیاد، به‌عنوان تقویت‌کننده‌های فیبری در ماتریس بتن عمل می‌کنند.
- نانوتیتانیوم دی‌اکسید ($nano\text{-}TiO_2$): علاوه بر خاصیت خودتمیزشوندگی، باعث بهبود مقاومت در برابر تابش UV و افزایش دوام شیمیایی می‌شود.

۳. مکانیزم عملکرد نانومواد در بهبود مقاومت به خستگی حرارتی

نانومواد از طریق سه مکانیزم اصلی بر بهبود مقاومت به خستگی حرارتی تأثیر می‌گذارند:

الف) پرکردن فضاهای خالی و افزایش چگالی میکروساختاری: نانوذرات به‌دلیل اندازه بسیار کوچک خود، قادر به نفوذ به منافذ و حفره‌های میکرونی در ساختار بتن هستند. این عمل منجر به کاهش تخلخل و افزایش چگالی ماتریس می‌شود که در نتیجه، راه‌های انتقال تنش و انبساط حرارتی را محدود می‌کند(Li et al., 2007; Zhang, 2011) .

ب) بهبود پیوند بین فازها و افزایش یکپارچگی ساختاری: نانومواد با ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، از جداشدن فازها در اثر تنش‌های حرارتی جلوگیری می‌کنند. به‌ویژه نانوسیلیس با واکنش پوزولانی، شبکه C-S-H متراکم‌تری ایجاد می‌کند که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را افزایش می‌دهد (Mohammed & Adamu, 2018; Adamu et al., 2018).

ج) جلوگیری از رشد ترک‌ها و القای خودترمیمی: برخی نانومواد مانند نانوسیلیس و نانوکلسیم اکسید (Evangelia & Maria, 2021) قادر به القای مکانیزم‌های خودترمیمی در بتن هستند. در این فرآیند، با نفوذ آب به ترک‌ها، واکنش‌های ثانویه منجر به تشکیل مواد هیدراته جدید و بستن ترک‌ها می‌شود. این ویژگی به‌طور خاص در شرایط خستگی حرارتی که ترک‌ها به‌صورت دوره‌ای باز و بسته می‌شوند، بسیار مؤثر است.

۴. ارتباط خواص مکانیکی با مقاومت به خستگی حرارتی

مقاومت به خستگی حرارتی مستقیماً با خواص مکانیکی ماده مرتبط است. استحکام کششی بالا، مدول الاستیسیته مناسب، چقرمگی و مقاومت خمشی، همگی در کاهش حساسیت ماده به ترک‌خوردگی ناشی از تنش‌های حرارتی مؤثرند. نانومواد با بهبود این خواص — به‌ویژه افزایش استحکام کششی و خمشی — به‌طور غیرمستقیم مقاومت به خستگی حرارتی را نیز افزایش می‌دهند(Li et al., 2007; Adamu et al., 2020) .

مروری بر پیشینه پژوهش

در این بخش، پژوهش‌های کلیدی که به بررسی تأثیر نانومواد بر خواص مکانیکی و دوام بتن و کامپوزیت‌های مکانیکی در شرایط خستگی حرارتی پرداخته‌اند، به‌طور طبقه‌بندی‌شده مرور می‌شوند.

۱. نانوسیلیس ($nano\text{-}SiO_2$) و تأثیر آن بر خستگی حرارتی

نانوسیلیس یکی از پرکاربردترین نانومواد در مهندسی بتن است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزودن نانوسیلیس به بتن منجر به بهبود قابل توجه مقاومت فشاری، کششی و خمشی می‌شود. Li و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای بر روی بتن حاوی نانوذرات برای کاربرد در روسازی، نشان دادند که نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، عمر خستگی خمشی را تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهند. آن‌ها دلیل این بهبود را افزایش چگالی میکروساختار و کاهش تخلخل دانستند.

Mohammedو Adamu (2018) در بررسی بتن غلتکی حاوی لاستیک خردشده و نانوسیلیس، مشاهده کردند که نانوسیلیس نه‌تنها استحکام فشاری و خمشی را بهبود می‌بخشد، بلکه مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی-آب‌شدن — که شبیه به خستگی حرارتی است — را نیز افزایش می‌دهد. آن‌ها دریافتند که نانوسیلیس با جبران ضعف ناشی از لاستیک خردشده، عملکرد کلی بتن را در شرایط سخت بهبود می‌بخشد.

Adamuو همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای مشابه، به بررسی خستگی خمشی بتن غلتکی حاوی لاستیک و نانوسیلیس پرداختند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوسیلیس، تعداد چرخه‌های تحمل‌شده قبل از شکست را نسبت به نمونه شاهد تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهند. این بهبود ناشی از ایجاد شبکه C-S-H متراکم‌تر و کاهش تخلخل بود.

Evangeliaو Maria (2021) به بررسی نقش نانوسیلیس و نانوکلسیم اکسید در خودترمیمی خودبه‌خودی بتن پرداختند. آن‌ها دریافتند که نانوسیلیس با افزایش فعالیت پوزولانی، به تشکیل ژل C-S-H در محل ترک‌ها کمک می‌کند و این امر در شرایط خستگی حرارتی که ترک‌ها به‌طور دوره‌ای باز و بسته می‌شوند، بسیار مؤثر است.

۲. گرافن اکسید (GO) و نانولوله‌های کربنی(CNTs)

گرافن اکسید به‌عنوان یک نانوصفحه کربنی با استحکام کششی بالا، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

Choو Nam (2022) در مطالعه‌ای، از گرافن اکسید نانوفلیک (GONF) همراه با الیاف فولادی در بتن روسازی استفاده کردند. نتایج نشان داد که GONF با ایجاد پیوندهای عرضی در ماتریس بتن، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و مقاومت خمشی و خستگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که نمونه‌های حاوی GONF در برابر تغییرات دمایی مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهند.

Fonsekaو همکاران (۲۰۲۳) تأثیر گرافن اکسید بر مقاومت سایشی و استحکام بتن را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که گرافن اکسید با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در ماتریس بتن، از انتشار ترک‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه، عمر خستگی ماده را افزایش می‌دهد. این ویژگی در شرایط خستگی حرارتی که ترک‌ها به‌صورت دوره‌ای تحت تنش قرار می‌گیرند، بسیار حیاتی است.

Luو همکاران (۲۰۱۶) نانولوله‌های کربنی چندیواره (MWCNTs) را در بتن فوق‌العاده با مقاومت بالا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که MWCNTs با ایجاد پل‌های میکروسکوپی بین ذرات، از رشد ترک‌ها جلوگیری کرده و چقرمگی ماده را افزایش می‌دهند. این امر مستقیماً منجر به بهبود مقاومت در برابر خستگی حرارتی می‌شود.

۳. نانوکربنات کلسیم ($nano\text{-}CaCO_3$) و نانواکسیدهای فلزی

HasaniNasab و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر نانوکربنات کلسیم بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن غلتکی روسازی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانوکربنات کلسیم با عمل به‌عنوان هسته‌بندی برای کریستال‌های هیدراته، منجر به تشکیل ساختاری یکنواخت‌تر و متراکم‌تر می‌شود. این امر مقاومت در برابر نفوذ آب و یون‌های مخرب را افزایش داده و در نتیجه، دوام در برابر چرخه‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد.

Kumar و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر نانواکسید آهن بر بتن با حجم بالای خاکستر بادی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که نانواکسید آهن علاوه بر افزایش استحکام فشاری، مقاومت در برابر سایش و جذب آب را کاهش می‌دهد. این ویژگی‌ها در شرایط خستگی حرارتی که نفوذ آب و یخ‌زدگی نقش کلیدی دارند، بسیار مفید هستند.

Shaikh و Supit (2014) نانوکربنات کلسیم را در بتن با حجم بالای خاکستر بادی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که نانوکربنات کلسیم با بهبود هیدراتاسیون و کاهش تخلخل، دوام شیمیایی و مکانیکی بتن را در برابر محیط‌های خورنده و نوسانات دمایی افزایش می‌دهد.

۴. نانوتیتانیوم دی‌اکسید (nano-TiO_2) و سایر نانومواد

Ma و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر نانوتیتانیوم دی‌اکسید بر چقرمگی و دوام مواد سیمانی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانوتیتانیوم دی‌اکسید با ایجاد پیوندهای قوی‌تر در ماتریس سیمانی، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه، مقاومت در برابر خستگی را افزایش می‌دهد. این نانوماده همچنین با جذب اشعه UV ، از تخریب نوری ماده جلوگیری می‌کند که در شرایط خستگی حرارتی همراه با تابش خورشیدی، بسیار مؤثر است.

Tu و همکاران (۲۰۲۴) از نانومواد برای اصلاح بتن کف کربنی حاصل از ضایعات زغال سنگ استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که نانومواد با بهبود ساختار متخلخل، خواص مکانیکی و الکترومغناطیسی بتن را بهبود می‌بخشند. اگرچه این مطالعه مستقیماً به خستگی حرارتی نپرداخت، اما بهبود ساختار متخلخل می‌تواند به‌طور غیرمستقیم در افزایش مقاومت به خستگی حرارتی مؤثر باشد.

۵. نانومواد ترکیبی و الیاف نانویی

Liu و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر نانوالیاف معدنی بر خواص فیزیکی بتن سیمانی راه‌سازی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانوالیاف با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در ماتریس بتن، از انتشار ترک‌ها جلوگیری کرده و استحکام کششی و خمشی را افزایش می‌دهند. این ویژگی در شرایط خستگی حرارتی که ترک‌ها به‌صورت دوره‌ای تحت تنش قرار می‌گیرند، بسیار حیاتی است.

Salemi و Behfarnia (2013) تأثیر نانوذرات بر دوام بتن الیافی روسازی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که ترکیب نانوذرات با الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت در برابر ضربه و خستگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این ترکیب می‌تواند در شرایط خستگی حرارتی که تنش‌های مکانیکی و حرارتی همزمان وجود دارند، بسیار مؤثر باشد.

Wang و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر نانوالیاف کربنی بر دوام بتن را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانوالیاف کربنی با ایجاد پیوندهای عرضی در ماتریس بتن، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و در نتیجه، عمر خستگی ماده را افزایش می‌دهند.

۶. مرور جامع و مقایسه‌ای مطالعات

Abdullah و همکاران (۲۰۱۵) در یک مقاله مروری جامع، کاربرد نانومواد در مهندسی روسازی را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نانوسیلیس، گرافن اکسید و نانوالیاف کربنی بیشترین تأثیر را بر بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن دارند. آن‌ها

همچنین اشاره کردند که ترکیب نانومواد با الیاف می‌تواند اثرات سینرژیک ایجاد کند و عملکرد ماده را در شرایط خستگی حرارتی بهبود بخشد.

Zheng و همکاران (۲۰۲۱) در یک مرور جامع، تأثیر نانوسیلیس و الیاف بازالت بر بتن حاوی سنگدانه بازیافتی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که نانوسیلیس با بهبود پیوند بین سنگدانه بازیافتی و خمیر سیمان، دوام و مقاومت در برابر خستگی را افزایش می‌دهد.

Jabbar و همکاران (۲۰۲۱) بتن خودتراکم حاوی نانوخاکستر بادی را در روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که نانوخاکستر بادی با بهبود رئولوژی و کاهش تخلخل، عملکرد مکانیکی و دوام بتن را در برابر شرایط محیطی سخت افزایش می‌دهد.

Ibrahim و همکاران (۲۰۱۸) از نانو خاکستر برنج سیاه در بتن متخلخل روسازی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که نانو خاکستر برنج سیاه با بهبود خواص مکانیکی و نفوذپذیری، عملکرد بتن را در شرایط خستگی حرارتی بهبود می‌بخشد.

Gonzalez و همکاران (۲۰۱۴) مقاومت سایشی و اصطکاک بتن نانو را در روسازی‌های بتنی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که بتن نانو با کاهش تخلخل و افزایش چگالی سطحی، مقاومت سایشی بالاتری دارد که در شرایط خستگی حرارتی همراه با بارهای ترافیکی، بسیار مفید است.

روش‌شناسی پژوهش

در این مقاله مروری، از روش مرور نظام‌مند (Systematic Literature Review) استفاده شده است. این روش شامل مراحل زیر است:

۱. تعیین سؤالات پژوهشی

سؤالات اصلی این پژوهش عبارتند از:

- نانومواد چگونه بر استحکام قطعات مکانیکی در شرایط خستگی حرارتی تأثیر می‌گذارند؟
- کدام نانومواد مؤثرترین عملکرد را در بهبود مقاومت به خستگی حرارتی دارند؟
- مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی بهبود خواص مکانیکی توسط نانومواد چیست؟
- شکاف‌های پژوهشی موجود در این حوزه کدامند؟

۲. استراتژی جستجو و انتخاب منابع

منابع مورد استفاده در این مقاله از پایگاه‌های علمی معتبر مانند ScienceDirect, Springer, Taylor & Francis, IOP Science و IEEE Xplore انتخاب شده‌اند. کلیدواژه‌های جستجو شامل:

- “Nanomaterials in concrete”
- “Thermal fatigue resistance”
- “Nano-SiO2 in pavement”
- “Graphene oxide and thermal fatigue”
- “Nanotechnology in mechanical components”
- “Durability of nano-modified concrete”

۳. معیارهای انتخاب و حذف مطالعات

معیارهای ورود:

- مقالات منتشرشده در مجلات علمی معتبر(SCI, Scopus)
- مقالاتی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به تأثیر نانومواد بر خستگی حرارتی پرداخته‌اند
- مقالاتی که شامل داده‌های تجربی یا عددی قابل استناد هستند
- مقالات منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۴

معیارهای خروج:

- مقالات بدون داده تجربی
- مقالاتی که تنها به خواص فیزیکی یا زیبایی‌شناختی نانومواد پرداخته‌اند
- مقالاتی که به زبان‌های غیرانگلیسی منتشر شده‌اند

۴. استخراج و تحلیل داده‌ها

داده‌های استخراج‌شده از هر مقاله شامل:

- نوع نانوماده مورد استفاده
- درصد جایگزینی یا افزودنی
- نوع آزمایش (خستگی خمشی، فشاری، حرارتی)
- شرایط آزمایش (دمای چرخه، تعداد چرخه‌ها)
- بهبود خواص مکانیکی (درصد افزایش استحکام، کاهش تخلخل)
- مکانیزم‌های گزارش‌شده برای بهبود عملکرد

۵. تحلیل کیفی و کمی

داده‌ها به‌صورت کیفی (تحلیل مکانیزم‌ها) و کمی (مقایسه درصد بهبود خواص) تحلیل شده‌اند. از نمودارهای مقایسه‌ای برای نمایش عملکرد نانومواد مختلف استفاده شده است.

یافته‌ها

۱. نانوسیلیس :($nano-SiO_2$) مؤثرترین نانوماده در بهبود خستگی حرارتی

بر اساس تحلیل ۲۹ مطالعه، نانوسیلیس به‌عنوان مؤثرترین نانوماده در بهبود مقاومت به خستگی حرارتی شناخته شد. مطالعات Li et al. (2007)، Adamu et al. (2018) وMohammed & Adamu (2018) نشان دادند که افزودن ۱ تا ۳ درصد نانوسیلیس، عمر خستگی خمشی بتن را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. مکانیزم اصلی، تشکیل ژل C-S-H متراکم‌تر و کاهش تخلخل است.

۲. گرافن اکسید :(GO) تقویت‌کننده فوق‌العاده در برابر رشد ترک

مطالعات Cho & Nam (2022) و Fonseka et al. (2023) نشان دادند که گرافن اکسید با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در ماتریس بتن، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و چقرمگی ماده را افزایش می‌دهد. این ویژگی در شرایط خستگی حرارتی که ترک‌ها به‌طور دوره‌ای تحت تنش قرار می‌گیرند، بسیار حیاتی است.

۳. نانوالیاف کربنی و نانولوله‌ها: بهبود چقرمگی و مقاومت کششی

مطالعات Lu et al. (2016) و Wang et al. (2020) نشان دادند که نانوالیاف کربنی و نانولوله‌های کربنی با ایجاد پل‌های میکروسکوپی بین ذرات، از رشد ترک‌ها جلوگیری کرده و چقرمگی ماده را افزایش می‌دهند. این امر مستقیماً منجر به بهبود مقاومت در برابر خستگی حرارتی می‌شود.

۴. نانوکربنات کلسیم و نانواکسیدهای فلزی: بهبود دوام شیمیایی و فیزیکی

مطالعات HasaniNasab et al. (2018) ، Kumar et al. (2019) و Shaikh & Supit (2014) نشان دادند که نانوکربنات کلسیم و نانواکسید آهن با بهبود هیدراتاسیون و کاهش تخلخل، دوام شیمیایی و مکانیکی بتن را در برابر محیط‌های خورنده و نوسانات دمایی افزایش می‌دهند.

۵. ترکیب نانومواد با الیاف: اثرات سینرژیک

مطالعات Salemi & Behfarnia (2013) و Liu et al. (2018) نشان دادند که ترکیب نانومواد با الیاف (پلی‌پروپیلن، فولادی، بازالت) اثرات سینرژیک ایجاد کرده و عملکرد ماده را در شرایط خستگی حرارتی بهبود می‌بخشد.

۶. نانوتیتانیوم دی‌اکسید: بهبود دوام در برابر تابش و خوردگی

مطالعه Ma et al. (2015) نشان داد که نانوتیتانیوم دی‌اکسید با جذب اشعه UV و ایجاد پیوندهای قوی‌تر در ماتریس سیمانی، از تخریب نوری و گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند.

۷. مقایسه کمی عملکرد نانومواد

۳۰-۵۰	۴۰-۵۰	۳۰-۵۰	۲۰-۴۰	نانوسیلیس
۴۰-۶۰	۵۰-۷۰	۴۰-۶۰	۲۵-۴۵	گرافن اکسید
۲۰-۴۰	۳۰-۵۰	۲۵-۴۵	۱۵-۳۵	نانوالیاف کربنی
۲۰-۳۵	۲۰-۴۰	۱۵-۳۰	۱۰-۲۵	نانوکربنات کلسیم
۱۵-۲۵	۲۰-۳۰	۱۵-۲۵	۱۰-۲۰	نانوتیتانیوم دی‌اکسید

۸. محدودیت‌های مطالعات موجود

- اکثر مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و داده‌های میدانی کمیاب است.
- هزینه بالای نانومواد، مانع از کاربرد گسترده آن‌ها در پروژه‌های بزرگ شده است.
- تأثیر بلندمدت نانومواد بر محیط زیست و سلامت انسان به‌طور کامل بررسی نشده است.
- عدم استانداردسازی در روش‌های آزمایش خستگی حرارتی.

پیشنهادات

۱. پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

- انجام مطالعات میدانی در مقیاس واقعی برای ارزیابی عملکرد بلندمدت نانومواد.
- بررسی تأثیر ترکیبات نانومواد (مثلاً نانوسیلیس + گرافن اکسید) بر خستگی حرارتی.
- توسعه روش‌های ارزیابی استاندارد برای خستگی حرارتی در نمونه‌های نانو اصلاح‌شده.
- بررسی تأثیر نانومواد بر خستگی حرارتی در کامپوزیت‌های غیرسیمانی (مانند پلیمرها و فلزات).

۲. پیشنهادات کاربردی برای صنعت

- استفاده از نانومواد در پروژه‌های حساس به خستگی حرارتی مانند پل‌ها، سدها و روسازی‌های فرودگاهی.
- توسعه روش‌های تولید مقرون‌به‌صرفه نانومواد برای کاهش هزینه‌ها.
- آموزش مهندسان و پیمانکاران در زمینه طراحی و اجرای مصالح نانو اصلاح‌شده.

۳. پیشنهادات زیست‌محیطی و ایمنی

- ارزیابی چرخه حیات نانومواد از نظر تأثیرات زیست‌محیطی.
- بررسی سمیت نانوذرات در مراحل تولید، اجرا و دفع.
- توسعه نانومواد سازگار با محیط زیست (مانند نانوذرات حاصل از ضایعات کشاورزی).

نتیجه‌گیری

فناوری نانومواد انقلابی در بهبود خواص مکانیکی و دوام مواد در برابر خستگی حرارتی ایجاد کرده است. با وجود چالش‌های موجود، پتانسیل این فناوری برای افزایش عمر مفید سازه‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری غیرقابل انکار است. با توسعه بیشتر پژوهش‌ها و همکاری بین دانشگاه‌ها، صنعت و دولت، می‌توان شاهد کاربرد گسترده‌تر این فناوری در پروژه‌های زیربنایی و مکانیکی در سراسر جهان بود.

این مقاله مروری با هدف بررسی تأثیر فناوری نانومواد بر بهبود استحکام قطعات مکانیکی در شرایط خستگی حرارتی انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که نانومواد — به‌ویژه نانوسیلیس، گرافن اکسید و نانوالیاف کربنی — به‌طور مؤثری استحکام کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر سایش و دوام در برابر چرخه‌های حرارتی را افزایش می‌دهند. مکانیزم‌های اصلی شامل پرکردن فضاهای خالی، بهبود پیوند بین فازها، جلوگیری از رشد ترک‌ها و القای خودترمیمی است.

نانوسیلیس به‌عنوان مؤثرترین نانوماده شناخته شد که با افزایش عمر خستگی تا ۵۰ درصد، عملکرد بتن را در شرایط خستگی حرارتی بهبود می‌بخشد. گرافن اکسید نیز با ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و چقرمگی ماده را افزایش می‌دهد. ترکیب نانومواد با الیاف نیز اثرات سینرژیک ایجاد کرده و عملکرد ماده را در شرایط خستگی حرارتی بهبود می‌بخشد.

با این حال، محدودیت‌هایی مانند هزینه بالا، عدم استانداردسازی آزمایش‌ها و کمبود داده‌های میدانی، چالش‌های اصلی در کاربرد گسترده این فناوری هستند.

منابع

1. Khot, K.K.; Pol, C. Experimental study on rigid pavement by using nano concrete. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2021, *8*, 4865–4870.
2. Mohammed, B.S.; Adamu, M.; Liew, M.S. Evaluating the effect of crumb rubber and nano SiO2 on the properties of high-volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques. *Case Stud. Constr. Mater.* 2018, *8*, 380–391.
3. Mohammed, B.S.; Adamu, M. Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Constr. Build. Mater.* 2018, *159*, 234–251.
4. Li, H.; Zhang, M.H.; Ou, J.P. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *Int. J. Fatigue* 2007, *29*, 1292–1301.
5. Evangelia, T.; Maria, S. Effect of nano-SiO2 and nano-CaO in autogenous self-healing efficiency. *Mater. Today Proc.* 2021, *37*, 4071–4077.
6. Cho, B.H.; Nam, B.H. Concrete composites reinforced with graphene oxide nanoflake (GONF) and steel fiber for application in rigid pavement. *Case Stud. Constr. Mater.* 2022, *17*, e01346.
7. Abdullah, M.E.; Zamhari, K.A.; Buhari, R.; Kamaruddin, N.M.; Nayan, N.; Hainin, M.R.; Hasan, N.A.; Jaya, R.P.; Yusoff, N.I.M. A review on the exploration of nanomaterials application in pavement engineering. *J. Teknol.* 2015, *73*, 69–76.
8. Wang, D.; Shi, C.; Wu, Z.; Wu, L.; Xiang, S.; Pan, X. Effects of nanomaterials on hardening of cement–silica fume–fly ash-based ultra-high-strength concrete. *Adv. Cem. Res.* 2016, *28*, 555–566.
9. Adamu, M.; Mohammed, B.S.; Shafiq, N.; Liew, M.S. Durability performance of high-volume fly ash roller-compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Int. J. Pavement Eng.* 2020, *21*, 1437–1444.
10. Zheng, Y.; Zhuo, J.; Zhang, P. A review on durability of nano-SiO2 and basalt fiber modified recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021, *304*, 124659.
11. Gonzalez, M.; de Oliveira Lima, A.; Tighe, S.L. Nanoconcrete for rigid pavements: Abrasion response and impact on friction. *Transp. Res. Rec.* 2014, *2441*, 28–37.
12. Fonseka, I.; Mohotti, D.; Wijesooriya, K.; Lee, C.K.; Mendis, P. Influence of graphene oxide on abrasion resistance and strength of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2023, *404*, 133280.
13. Tu, Q.C.; Xia, Q.H.; Bai, Y.H. Preparation of coal gangue foam concrete modified by nanomaterials: Physical properties, pore structure, and electromagnetic properties. *Case Stud. Constr. Mater.* 2024, *21*, e03603.
14. Zhang, M. Strength properties of pavement concrete containing nano-particles. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, Lushan, China, 22–24 April 2011; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2011; pp. 715–718.

15. Adamu, M.; Mohammed, B.S.; Shafiq, N.; Shahir Liew, M. Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller-compacted concrete pavement. *Cogent Eng.* 2018, *5*, 1436027.

16. Zhang, M.H.; Wang, H.G. Strength and drying shrinkage of pavement concrete with nano-particles. *Adv. Mater. Res.* 2013, *662*, 182–185.

17. Ibrahim, M.M.; Ramadhansyah, P.J.; Rosli, H.M.; Ibrahim, M.W. Mechanical performance of porous concrete pavement containing nano black rice husk ash. *Proc. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, *290*, 012050.

18. Kumar, B.; Sinha, S.; Chakravarty, H. Effect of nano iron oxide on strength and durability characteristics of high volume fly ash concrete for pavement construction. *Int. J. Recent Technol. Eng.* 2019, *8*, 4365–4373.

19. Shaikh, F.U.A.; Supit, S.W. Mechanical and durability properties of high-volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO3) nanoparticles. *Constr. Build. Mater.* 2014, *70*, 309–321.

20. Jabbar, D.N.; Hasan, A.M.; Abed, M.K. Self-compaction concrete behavior containing nano fly ash used in rigid pavement. *Proc. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, *779*, 012018.

21. Lu, L.; Ouyang, D.; Xu, W. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Materials* 2016, *9*, 419.

22. Akarsh, P.K.; Shrinidhi, D.; Marathe, S.; Bhat, A.K. Graphene oxide as nano-material in developing sustainable concrete—A brief review. *Mater. Today Proc.* 2022, *60*, 234–246.

23. Salemi, N.; Behfarnia, K. Effect of nano-particles on the durability of fiber-reinforced concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 2013, *48*, 934–941.

24. Li, H.; Zhang, M.H.; Ou, J.P. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear* 2006, *260*, 1262–1266.

25. Wang, T.; Xu, J.; Meng, B.; Peng, G. Experimental study on the effect of carbon nanofiber content on the durability of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, *250*, 118891.

26. Liu, J.; Chen, H.; Guan, B.; Liu, K.; Wen, J.; Sun, Z. Influence of mineral nano-fibers on the physical properties of road cement concrete material. *Constr. Build. Mater.* 2018, *190*, 287–293.

27. HasaniNasab, S.; Jebur, M.H.; Sharafi, H. The effect of nano-CaCO3 on the mechanical properties and permeability of roller compacted concrete pavement (RCCP). *Roads Bridges-Drog. I Mosty* 2018, *17*, 205–214.

28. Abbas, W.A.; Abbasb, M.L. Physico-durability aspects of partial substitution via pelletized fly ash lightweight nano-silica concrete. *Res. Eng. Struct. Mater.* 2023, *9*, 475–491.

29. Ma, B.; Li, H.; Mei, J.; Li, X.; Chen, F. Effects of Nano-TiO2 on the toughness and durability of cement-based material. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015, *2015*, 583106.