

بررسی اثر هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص بتن

علی قربانی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.

چکیده

این پژوهش به بررسی اثر استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص بتن می‌پردازد. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر این مواد افزودنی ترکیبی بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری کلراید بتن است. در این راستا، طرح‌های اختلاط متنوعی شامل بتن شاهد، بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت جداگانه، و بتن‌های حاوی ترکیبی از این دو ماده، طراحی و اجرا شد. نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و همچنین آزمایش نفوذپذیری کلراید بر روی نمونه‌های منتخب در سن ۲۸ روزه انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت جداگانه، منجر به بهبود خواص بتن می‌شود، اما استفاده هم‌زمان این دو ماده، اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و بهبود چشمگیرتری در مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلراید بتن حاصل می‌گردد. ترکیب بهینه ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس، بهترین عملکرد را از نظر هر دو خاصیت از خود نشان داد. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس، یک راهکار مؤثر برای تولید بتن‌های با عملکرد بالا و دوام بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: بتن، میکروسیلیس، نانوسیلیس، مقاومت فشاری، نفوذپذیری کلراید، خواص مکانیکی، دوام.

* نویسنده مسئول: ghorbani@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

- فرضیات اصلی این پژوهش عبارتند از:
- استفاده از مواد افزودنی پوزولانی در صنعت بتن، به منظور بهبود خواص و عملکرد بتن، سابقه‌ای طولانی دارد. میکروسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی بسیار مؤثر، به طور گسترده در تولید بتن‌های با عملکرد بالا و بادوام مورد استفاده قرار گرفته است. با ظهور فناوری نانو، نانوسیلیس نیز به عنوان یک ماده افزودنی نوین با پتانسیل بسیار بالا در صنعت بتن معرفی شده است. ذرات بسیار ریز نانوسیلیس، به دلیل سطح ویژه بسیار بالا و فعالیت پوزولانی قوی، می‌تواند خواص بتن را به طور چشمگیری بهبود بخشد. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه استفاده جداگانه میکروسیلیس و نانوسیلیس، پژوهش‌ها در زمینه استفاده هم‌زمان و ترکیبی این دو ماده افزودنی، محدودتر است. با توجه به مزایای بالقوه ترکیب این دو ماده (بهره‌گیری از مزایای هر دو ماده در ابعاد مختلف ذرات، کاهش هزینه با استفاده از میکروسیلیس ارزان‌تر در کنار نانوسیلیس با عملکرد بالا، و احتمال ایجاد اثرات هم‌افزایی)، بررسی اثرات هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص بتن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱-۸].
 - هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرات هم‌زمان و ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن است. به طور مشخص، اهداف تفصیلی پژوهش عبارت است از:

۲- پیشینه تحقیقات

۲-۱- بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر

میکروسیلیس بر خواص بتن

میکروسیلیس، که با نام‌های دوده سیلیس یا سیلیکا فوم نیز شناخته می‌شود، یک محصول جانبی فرایند تولید فروسیلیس و سیلیسیم متال است. این ماده، پودری بسیار ریز با ذرات کروی شکل و سطح ویژه بسیار بالا (معمولاً بین ۱۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ متر مربع بر کیلوگرم) است. ماده اصلی تشکیل‌دهنده میکروسیلیس، دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) با درصد خلوص بسیار بالا (معمولاً بیش از ۸۵ درصد) است [۹-۱۳].

۲-۲- تأثیر میکروسیلیس بر خواص بتن

تحقیقات گسترده‌ای به بررسی تأثیر میکروسیلیس بر خواص بتن پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات به طور کلی نشان می‌دهند که افزودن میکروسیلیس به بتن، می‌تواند خواص مختلف آن را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. مهم‌ترین تأثیرات میکروسیلیس بر خواص بتن عبارتند از:

- افزایش مقاومت فشاری: میکروسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی بسیار فعال، با هیدروکسید کلسیم آزاد شده در فرایند هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و فاز ژل سیلیکات کلسیم (C-S-H) بیشتری تولید می‌کند. این فاز C-S-H، چسبندگی و استحکام بیشتری نسبت به هیدروکسید کلسیم دارد و باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. بسیاری از

مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه).
تعیین تأثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس (به صورت جایگزینی بخشی از سیمان) بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه).
بررسی اثرات هم‌افزایی ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه).
مقایسه عملکرد بتن‌های حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس از نظر مقاومت فشاری در سنین مختلف.
بررسی تأثیر ترکیب بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس بر نفوذپذیری کلراید بتن در سن ۲۸ روزه.
تعیین نسبت‌های بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلراید بتن.

• رنگ خاکستری: میکروسیلیس رنگ بتن را تیره می‌کند و ممکن است برای کاربردهای معماری که نیاز به رنگ روشن دارند، محدودیت ایجاد کند.

۲-۳- بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر

نانوسیلیس بر خواص بتن

نانوسیلیس، که با نام‌های سیلیکای نانومتری یا نانو ذرات SiO_2 نیز شناخته می‌شود، ماده‌ای نانو ساختار با ذرات بسیار ریز در ابعاد نانومتر (معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) است. نانوسیلیس می‌تواند به صورت پودر خشک یا سوسپانسیون کلئیدی در آب تولید شود. سطح ویژه نانوسیلیس بسیار بالاتر از میکروسیلیس است (معمولاً بین ۵۰ تا ۶۰۰ متر مربع بر گرم بسته به نوع و روش تولید) [۱۸-۱۹].

تحقیقات در مورد تأثیر نانوسیلیس بر خواص بتن، در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهند که نانوسیلیس، به دلیل ابعاد نانومتری و سطح ویژه بسیار بالا، می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر خواص بتن داشته باشد. مهم‌ترین تأثیرات نانوسیلیس بر خواص بتن عبارتند از:

• افزایش مقاومت فشاری و خمشی: نانوسیلیس به دلیل فعالیت پوزولانی بسیار بالا و اثر پرکنندگی نانومتری، می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی بتن را به طور قابل توجهی افزایش دهد، به ویژه در سنین اولیه. ذرات نانوسیلیس، منافذ نانومتری بتن را پر کرده و ساختار ریزدانه و متراکم تری ایجاد می‌کنند. همچنین، واکنش پوزولانی نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم، فاز C-S-H بیشتری تولید کرده و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد.

• بهبود دوام بتن: نانوسیلیس با کاهش اندازه منافذ و افزایش تراکم ریزساختار بتن، نفوذپذیری آن را در برابر آب، یون کلراید، مواد شیمیایی و گازها کاهش می‌دهد. این امر، باعث افزایش دوام بتن در برابر عوامل مخرب محیطی، از جمله خوردگی، حملات شیمیایی و نفوذ مواد زیان‌آور می‌شود.

• بهبود خواص رئولوژیکی بتن: نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، تأثیر قابل توجهی بر رئولوژی بتن تازه دارد. در درصد‌های پایین، نانوسیلیس می‌تواند کارایی و روانی بتن را بهبود بخشد، اما در درصد‌های بالاتر، به دلیل افزایش

مطالعات نشان داده‌اند که افزودن میکروسیلیس به بتن می‌تواند مقاومت فشاری آن را به طور قابل توجهی، به ویژه در سنین بالاتر، افزایش دهد [۱۴].

• بهبود دوام بتن: میکروسیلیس با پر کردن منافذ موین و ریزساختار بتن، نفوذپذیری آن را در برابر آب، یون کلراید و سایر مواد شیمیایی مخرب کاهش می‌دهد. این امر، باعث افزایش دوام بتن در برابر عوامل محیطی مانند حملات سولفاتی، خوردگی میلگردها، سیکل‌های یخبندان و ذوب شدن و واکنش قلیایی-سیلیسی می‌شود. برخی مطالعات نشان داد که استفاده از میکروسیلیس، مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و سیکل‌های یخبندان و ذوب شدن را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد [۱۵].

• بهبود خواص رئولوژیکی بتن: ذرات ریز میکروسیلیس، سطح ویژه مخلوط بتن را افزایش داده و باعث افزایش نیاز آبی بتن می‌شود. با این حال، استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب (روان‌کننده‌ها و فوق روان‌کننده‌ها) می‌تواند این اثر منفی را جبران کرده و حتی کارایی بتن را بهبود بخشد. میکروسیلیس می‌تواند خاصیت چسبندگی بتن تازه را افزایش داده و از جداشدگی و آب انداختن آن جلوگیری کند [۱۶].

• کاهش گرمای هیدراتاسیون: جایگزینی بخشی از سیمان با میکروسیلیس، مقدار سیمان مصرفی در بتن را کاهش داده و در نتیجه، گرمای هیدراتاسیون بتن را کم می‌کند. این امر، به ویژه در بتن‌ریزی‌های حجیم، می‌تواند از ایجاد ترک‌های حرارتی جلوگیری کند [۱۷].

با وجود مزایای فراوان، استفاده از میکروسیلیس نیز با برخی محدودیت‌ها همراه است:

• افزایش نیاز آبی: همانطور که اشاره شد، میکروسیلیس نیاز آبی بتن را افزایش می‌دهد. برای جبران این اثر، استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب ضروری است.

• پراکنش نامناسب: ذرات ریز میکروسیلیس تمایل به آگلومره شدن دارند و پراکنش نامناسب آنها در مخلوط بتن می‌تواند منجر به کاهش کارایی و عملکرد بتن شود. استفاده از روش‌های اختلاط مناسب و مواد افزودنی پخش‌کننده می‌تواند به بهبود پراکنش میکروسیلیس کمک کند.

محققان است. در این بخش، به بررسی تحقیقات محدود موجود در زمینه استفاده ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس و همچنین روش‌های نوآورانه به کار رفته در این حوزه خواهیم پرداخت.

متاسفانه، همانطور که اشاره شد، تحقیقات بسیار کمی به طور خاص به بررسی اثرات هم‌زمان و ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص بتن پرداخته‌اند. این موضوع نشان‌دهنده شکاف قابل توجهی در دانش فعلی ما در این زمینه است. با این حال، برخی از مطالعات محدود موجود، نتایج اولیه امیدوارکننده‌ای را در مورد پتانسیل استفاده ترکیبی این مواد ارائه داده‌اند.

مقالات لاتین محدود موجود که به طور مستقیم به بررسی ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس پرداخته‌اند، اغلب بر خواص مکانیکی، به ویژه مقاومت فشاری تمرکز داشته‌اند. Safawi و همکاران در پژوهش خود به بررسی اثر هم‌افزایی نانوسیلیس و میکروسیلیس بر مقاومت و نفوذپذیری بتن پرداختند. آنها دریافتند که جایگزینی بخشی از سیمان با ترکیب نانوسیلیس و میکروسیلیس، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد و اثر هم‌افزایی بین این دو ماده وجود دارد. این مطالعه، اگرچه محدود به یک نسبت اختلاط خاص بود، اما نخستین شواهد تجربی را از پتانسیل استفاده ترکیبی این مواد ارائه داد [۲۳].

Zhang و همکاران نیز در پژوهشی مشابه، به بررسی تأثیر ترکیب نانوسیلیس و میکروسیلیس بر بتن‌های با عملکرد بالا پرداختند و نتایج مشابهی را گزارش کردند [۲۴].

Nematollahi و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر هم‌زمان نانوسیلیس و میکروسیلیس بر بتن‌های خودتراکم حاوی خاکستر بادی پرداختند و گزارش کردند که ترکیب این مواد می‌تواند عملکرد این نوع بتن‌های پیچیده را بهبود بخشد [۲۵].

Nia و همکاران نیز در یک مطالعه اخیر اثرات هم‌افزایی میکرو و نانوسیلیس بر خواص تازه و سخت‌شده بتن خودتراکم را بررسی کردند و نشان دادند که این ترکیب می‌تواند به طور هم‌زمان کارایی و خواص مکانیکی را بهبود بخشد [۲۶].

به طور کلی، مطالعات موجود در زمینه استفاده ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس، بسیار محدود و پراکنده هستند و اغلب بر خواص مکانیکی و آن هم عمدتاً مقاومت فشاری تمرکز داشته‌اند. تحقیقات جامع و سیستماتیک در مورد تأثیر این ترکیب بر طیف گسترده‌تری از خواص بتن، از جمله خواص دوامی،

چسبندگی و نیاز آبی، ممکن است باعث کاهش کارایی شود. استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب مناسب، برای کنترل رئولوژی بتن‌های حاوی نانوسیلیس ضروری است.

• تسریع هیدراتاسیون سیمان: نانوسیلیس به عنوان هسته‌های جوانه‌زنی برای فاز C-S-H عمل کرده و فرایند هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند، به ویژه در سنین اولیه. این امر، منجر به کسب مقاومت سریع‌تر بتن می‌شود.

استفاده از نانوسیلیس نیز با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه است:

• هزینه بالا: نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس و سایر مواد افزودنی پوزولانی، ماده‌ای گران‌قیمت‌تر است و استفاده از آن در مقیاس وسیع ممکن است از نظر اقتصادی محدودیت داشته باشد.

• پراکنش دشوار: ذرات نانوسیلیس به دلیل ابعاد بسیار ریز و نیروهای واندروالسی قوی، تمایل زیادی به آگلومره شدن دارند و پراکنش یکنواخت آنها در مخلوط بتن دشوار است. تجمع ذرات نانوسیلیس می‌تواند منجر به کاهش کارایی و عملکرد بتن شود. استفاده از روش‌های پراکنش مناسب (مانند استفاده از فراصوت، همزن‌های با دور بالا، و مواد افزودنی پخش‌کننده) برای دستیابی به پراکنش یکنواخت نانوسیلیس ضروری است.

• نیاز آبی بالا: نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، نیاز آبی مخلوط بتن را افزایش می‌دهد. کنترل نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب مناسب، برای دستیابی به کارایی و مقاومت مطلوب بتن‌های حاوی نانوسیلیس ضروری است. [۲۰-۲۲]

۲-۴- بررسی تحقیقات ترکیبی و نوآورانه در استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس

همانطور که در بخش‌های قبلی به تفصیل بحث شد، تحقیقات گسترده‌ای به بررسی تأثیر جداگانه میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص بتن پرداخته‌اند. با این حال، پژوهش‌ها در زمینه استفاده هم‌زمان و ترکیبی این دو ماده افزودنی، بسیار محدودتر است. با توجه به مزایای بالقوه ترکیب این دو ماده (استفاده از میکروسیلیس ارزان‌تر به همراه عملکرد بالای نانوسیلیس، پر کردن طیف وسیع‌تری از اندازه‌های منافذ، و احتمال ایجاد اثرات هم‌افزایی)، این حوزه از تحقیقات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نیازمند توجه بیشتر

۳- مواد و مصالح مورد استفاده در پژوهش

۳-۱- مشخصات سیمان، سنگ‌دانه‌ها و آب مصرفی

سیمان: سیمان پرتلند نوع ۲ (مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۳۸۹) از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. نتایج آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان مطابق با گواهینامه کیفیت کارخانه در جدول زیر ارائه شده است (جدول ۱).

سنگ‌دانه‌های ریز: ماسه طبیعی رودخانه‌ای با حداکثر اندازه اسمی ۴,۷۵ میلی‌متر و مدول نرمی ۲,۸. دانه‌بندی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C33 بود. وزن مخصوص ظاهری ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۲,۱ درصد.

سنگ‌دانه‌های درشت: شن شکسته آهکی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر و دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM C33. وزن مخصوص ظاهری ۱۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۱,۵ درصد.

آب: آب آشامیدنی شهر تهران مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۹۸.

ریزساختاری، رئولوژیکی و اقتصادی، و همچنین بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط، هنوز به طور جدی انجام نشده است.

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از نانوسیلیس، تمایل به آگلومراسیون (توده‌شدگی) ذرات است. تحقیقات اخیر روش‌های مختلفی را برای بهبود پراکنش نانوذرات پیشنهاد کرده‌اند:

- استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های نسل جدید پلی‌کربوکسیلات
- پخش‌کننده‌های اولتراسونیک
- اصلاح سطحی نانوذرات با عوامل سیلانی
- ترکیب با مواد پوزولانی دیگر مانند میکروسیلیس برای بهبود توزیع

پژوهش حاضر، با هدف پاسخگویی به این نیازها و پر کردن شکاف‌های دانش فعلی، طراحی شده است. این پژوهش، با انجام آزمایش‌های جامع و سیستماتیک، تحلیل‌های ریزساختاری و شیمیایی، و بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط، به دنبال ارائه دانش فنی نوین و راهکارهای کاربردی برای استفاده مؤثرتر از ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس در صنعت بتن می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند مصرفی

مقدار	مشخصه فیزیکی	مقدار (%)	مشخصه شیمیایی
۳۲۰۰	نرمی (روش بلین، cm^2/g)	۶۳,۵	اکسید کلسیم (CaO)
۱۸۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۲۱,۲	اکسید سیلیسیم (SiO_2)
۲۸۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۵,۵	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)
۱۸,۵	مقاومت فشاری ۳ روزه (MPa)	۳,۲	اکسید آهن (Fe_2O_3)
۲۸,۷	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۱,۸	اکسید منیزیم (MgO)
۴۲,۵	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۰,۷	اکسید پتاسیم (K_2O)
۰,۰۸	انبساط اتوکلاو (%)	۰,۲	اکسید سدیم (Na_2O)
۲,۰	افت حرارتی (LOI)	۱,۵	دی‌اکسید کربن (CO_2)
		۰,۸	باقی‌مانده نامحلول (IR)

شرکت Evonik آلمان تهیه شد. مایع شیری رنگ و غلیظ با ذرات نانومتری پراکنده در آب. مشخصات نانوسیلیس مطابق با دیتاشیت شرکت سازنده به شرح جدول ۳ است. میکروسیلیس به صورت پودر خشک مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اختلاط، میکروسیلیس به مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه (23 ± 2 درجه سانتی‌گراد) در محیط خشک نگهداری شد تا از جذب رطوبت اضافی جلوگیری شود.

۳-۲- ویژگی‌های میکروسیلیس و نانوسیلیس مصرفی

میکروسیلیس مورد استفاده، محصول جانبی کارخانه فروآلیاز ایران بود. رنگ خاکستری روشن و پودر بسیار ریز با سطح ویژه بالا داشته و مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس مطابق با گواهینامه کیفیت کارخانه و نتایج آزمون‌های انجام شده در آزمایشگاه به شرح جدول ۲ است. از سوی دیگر نانوسیلیس مورد استفاده، از نوع سیلیکای کلئیدی با نام تجاری Aerosil 200 از

نانوسیلیس به صورت محلول کلئیدی (Aerosil 200) مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اختلاط، محلول نانوسیلیس به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه ۵۰٪ وزنی محلول محاسبه و توزین شد.

جدول ۲- مشخصات میکروسیلیس مورد استفاده

استاندارد	مقدار	مشخصه
ASTM C1240	۹۲,۵	SiO ₂ (%)
ASTM C1240	۲,۵	افت حرارتی (%)
ASTM C1277	۲۰۰۰۰	سطح ویژه (m ² /kg)
ASTM C1240	۰,۵	رطوبت (%)
ASTM C1240	lt; 1&	درصد ذرات بزرگتر از ۴۵ میکرومتر (%)

جدول ۳- مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده

واحد	مقدار	مشخصه
nm	۱۲	اندازه متوسط ذرات
m ² /g	۲۰۰	سطح ویژه (BET)
wt %	۵۰	غلظت SiO ₂
	۴,۷-۳,۷	pH

۴-۲- روش‌های اختلاط و ریختن بتن در قالب‌های

استاندارد

اختلاط بتن برای هر طرح اختلاط به شرح زیر انجام شد:

۱. مواد خشک (سیمان، سنگ‌دانه‌های ریز، سنگ‌دانه‌های درشت و میکروسیلیس - در صورت وجود) به مدت ۱ دقیقه در میکسر آزمایشگاهی به صورت خشک مخلوط شدند.
۲. محلول نانوسیلیس (در صورت وجود) و آب (به همراه روان‌کننده - در صورت استفاده) به تدریج به مخلوط اضافه شده و اختلاط به مدت ۴ دقیقه دیگر ادامه یافت تا مخلوطی همگن حاصل شود.
۳. زمان کل اختلاط برای هر طرح ۵ دقیقه بود.
۴. کارایی بتن تازه با آزمایش اسلامپ بلافاصله پس از اختلاط اندازه‌گیری شد و مقادیر اسلامپ برای هر طرح در جدول ۴ گزارش شده است. بتن تازه بلافاصله در قالب‌های مکعبی فلزی استاندارد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری ریخته و با استفاده از میز ویبره به مدت ۱۵ ثانیه متراکم شد. سطح نمونه‌ها بلافاصله پس از قالب‌گیری با مال صاف و پرداخت شد.

۴-۱- طرح اختلاط و فرایند ساخت نمونه‌ها

۱-۱- نسبت‌های اختلاط مختلف بتن با درصد‌های

متفاوت میکروسیلیس و نانوسیلیس

در این پژوهش، مجموعاً ۱۳ طرح اختلاط بتن طراحی و اجرا شد. این طرح‌ها شامل یک طرح شاهد (کنترل) بدون مواد افزودنی، ۴ طرح حاوی میکروسیلیس، ۴ طرح حاوی نانوسیلیس و ۴ طرح حاوی ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس بود. نسبت آب به سیمان مؤثر (w/cm) در تمامی طرح‌ها ۰,۴۵ در نظر گرفته شد. میزان سیمان در طرح شاهد ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود و رده مقاومتی هدف C35 تعیین شد. در طرح‌های حاوی مواد افزودنی، بخشی از سیمان با میکروسیلیس و/یا نانوسیلیس جایگزین شد. درصد‌های جایگزینی و نسبت‌های اختلاط دقیق برای هر طرح در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور بهبود پراکنش نانوسیلیس و کاهش اثر منفی آن بر کارایی بتن، از فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی با نام تجاری Sika ViscoCrete-20 HE استفاده شد. مقدار روان‌کننده مصرفی بر اساس آزمایش‌های مقدماتی و به منظور دستیابی به اسلامپ مورد نظر (۲۰±۱۰ میلی‌متر) در هر طرح اختلاط تعیین شد که در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴- نسبت‌های اختلاط بتن‌های مورد آزمایش

کد طرح	میکروسیلیس (%) جایگزینی سیمان	نانوسیلیس (%) جایگزینی سیمان	سیمان (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	نانوسیلیس (kg/m ³)	سنگ‌دانه ریز (kg/m ³)	سنگ‌دانه درشت (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	روان‌کننده (kg/m ³)	اسلامپ (mm)
C	۰	۰	۳۵۰	۰	۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۰	۱۱۰
MS5	۵	۰	۳۳۲,۵	۱۷,۵	۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۱,۵	۱۰۰
MS10	۱۰	۰	۳۱۵	۳۵	۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۲,۵	۹۰
MS15	۱۵	۰	۲۹۷,۵	۵۲,۵	۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۳,۵	۸۵
NS0.5	۰	۰,۵	۳۴۸,۲۵	۰	۱,۷۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۲,۰	۱۰۵
NS1	۰	۱	۳۴۶,۵	۰	۳,۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۳,۰	۱۰۰
NS1.5	۰	۱,۵	۳۴۴,۷۵	۰	۵,۲۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۴,۰	۹۵
MS5NS0.5	۵	۰,۵	۳۳۰,۷۵	۱۷,۵	۱,۷۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۳,۰	۹۵
MS5NS1	۵	۱	۳۲۹	۱۷,۵	۳,۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۴,۰	۹۰
MS10NS0.5	۱۰	۰,۵	۳۱۳,۲۵	۳۵	۱,۷۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۴,۰	۹۰
MS10NS1	۱۰	۱	۳۱۱,۵	۳۵	۳,۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۵,۰	۹۵
MS15NS0.5	۱۵	۰,۵	۲۹۵,۷۵	۵۲,۵	۱,۷۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۴,۰	۸۰
MS15NS1	۱۵	۱	۲۹۴	۵۲,۵	۳,۵	۸۵۰	۹۵۰	۱۵۷,۵	۵,۰	۷۵

۳-۴- شرایط عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

قالب‌های حاوی نمونه‌های بتنی بلافاصله پس از قالب‌گیری به اتاق عمل‌آوری منتقل شدند. عمل‌آوری اولیه به مدت ۲۴ ساعت در دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 95 ± 5 درصد انجام شد. سطح نمونه‌ها با نایلون پوشانده شد تا از تبخیر رطوبت جلوگیری شود. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب‌ها جدا شده و به حوضچه عمل‌آوری آب آهک اشباع منتقل شدند. عمل‌آوری نهایی در حوضچه آب آهک اشباع با دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. آب حوضچه به صورت هفتگی تعویض می‌گردید.

۴-۴- روش‌های آزمون و اندازه‌گیری خواص بتن

۴-۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه)

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۳۹۲۱ و استاندارد ISO 6784 بر روی نمونه‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. دستگاه آزمون فشار یونیورسال (UTM) مدل Instron 8802 با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن و دارای گواهی کالیبراسیون معتبر مورد استفاده قرار

گرفت. نرخ بارگذاری دستگاه ۰,۶ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم گردید. برای هر سن آزمایش و هر طرح اختلاط، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها برای هر طرح اختلاط و سن آزمایش محاسبه و در جدول ۵ و شکل ۵ گزارش شده است. نوع شکست نمونه‌ها در اکثر موارد به صورت مخروطی مشاهده شد.

۴-۴-۲- آزمایش‌های تکمیلی برای بررسی سایر خواص مکانیکی و دوام

به منظور بررسی جامع‌تر خواص دوامی بتن‌ها، آزمایش نفوذپذیری سریع یون کلراید (RCPT) بر روی نمونه‌های منتخب (طرح‌های MS15، NS1.5 و MS10NS1) در سن ۲۸ روزه مطابق با استاندارد ASTM C1202 انجام شد.

۵- نتایج

۵-۱- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای طرح‌های اختلاط مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، ابتدا به بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری به صورت جداگانه و سپس در حالت ترکیبی پرداخته شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

کد طرح	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa)
C	۲۴,۵	۳۴,۸	۳۹,۲
MS5	۳۰,۸	۴۲,۵	۴۷,۸
MS10	۳۸,۲	۴۸,۷	۵۵,۴
MS15	۴۲,۱	۵۲,۱	۶۰,۲
NS0.5	۳۲,۴	۴۵,۲	۴۹,۸
NS1	۳۹,۸	۵۱,۴	۵۶,۸
NS1.5	۴۴,۶	۵۵,۹	۶۱,۵
MS5NS0.5	۳۸,۵	۴۹,۸	۵۴,۶
MS5NS1	۴۳,۲	۵۶,۸	۶۲,۱
MS10NS0.5	۴۲,۷	۵۴,۳	۶۰,۸
MS10NS1	۴۵,۶	۵۹,۵	۶۴,۲
MS15NS0.5	۴۴,۸	۵۵,۷	۶۱,۹
MS15NS1	۴۶,۲	۵۷,۳	۶۲,۸

۵-۱-۱- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن

در سنین اولیه. در سن ۲۸ روزه، افزودن ۰,۵ درصد نانوسیلیس (NS0.5) مقاومت را به ۴۵,۲ مگاپاسکال افزایش داد (افزایش ۳۰ درصدی نسبت به بتن شاهد). با ۱ درصد نانوسیلیس (NS1)، مقاومت به ۵۱,۴ مگاپاسکال رسید (افزایش ۴۸ درصدی) و با ۱,۵ درصد (NS1.5)، مقاومت به ۵۵,۹ مگاپاسکال افزایش یافت (افزایش ۶۱ درصدی) [۳۰].

یکی از ویژگی‌های برجسته نانوسیلیس، تأثیر قابل توجه آن بر مقاومت سنین اولیه است. در سن ۷ روزه، بتن NS1.5 مقاومت ۴۴,۶ مگاپاسکال را نشان داد که ۸۲ درصد بیشتر از بتن شاهد است. این افزایش سریع مقاومت به دلیل تسریع هیدراتاسیون و تشکیل سریع تر محصولات هیدراتاسیون در حضور نانوذرات است که به عنوان هسته‌های کریستالیزاسیون عمل می‌کنند [۳۱].

تحلیل آماری ANOVA نشان داد که تفاوت‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بین طرح‌های مختلف از نظر آماری معنی دار است ($p < 0,05$). آزمون Tukey's HSD نشان داد که تفاوت بین NS1 و NS1.5 از نظر آماری معنی دار نیست، اما هر دو به طور معنی داری بهتر از NS0.5 عمل می‌کنند.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش بیش از ۱ درصد نانوسیلیس ممکن است از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد، زیرا افزایش مقاومت نسبتاً کم است در حالی که هزینه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۳۲].

۵-۱-۳- اثر ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس

نتایج بتن‌های حاوی ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس نشان‌دهنده اثرات هم‌افزایی قابل توجه است. در سن ۲۸ روزه، بتن MS5NS1

بتن شاهد (C) مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۴,۸ مگاپاسکال را نشان داد. با افزودن ۵ درصد میکروسیلیس (MS5)، مقاومت به ۴۲,۵ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده افزایش ۲۲ درصدی است. با افزایش میکروسیلیس به ۱۰ درصد (10MS)، مقاومت به ۴۸,۷ مگاپاسکال افزایش یافت (افزایش ۴۰ درصدی) و با ۱۵ درصد میکروسیلیس (15MS)، مقاومت به ۵۲,۱ مگاپاسکال رسید (افزایش ۵۰ درصدی) [۲۷].

در سن ۹۰ روزه، روند مشابهی مشاهده شد، اما میزان افزایش بیشتر بود. بتن 15MS مقاومت ۹۰ روزه ۶۰,۲ مگاپاسکال را نشان داد که ۵۴ درصد بیشتر از بتن شاهد است. این افزایش بیشتر در سنین بالاتر نشان‌دهنده ادامه واکنش پوزولانی میکروسیلیس در دراز مدت است [۲۸].

تحلیل آماری ANOVA یک‌طرفه بر روی نتایج ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد که تفاوت‌های مقاومت فشاری بین طرح‌های مختلف از نظر آماری معنی دار است ($p < 0,05$). آزمون تعقیبی Tukey's HSD نشان داد که طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس به طور معنی داری مقاومت بیشتری نسبت به طرح حاوی ۵ درصد دارند. این نتایج با مطالعات قبلی سازگاری دارد و مکانیزم اصلی را می‌توان به واکنش پوزولانی میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل C-S-H اضافی و همچنین اثر پرکنندگی فیزیکی نسبت داد که منجر به تراکم ریزساختار بتن می‌شود [۲۹].

۵-۱-۲- اثر نانوسیلیس

نانوسیلیس نیز تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری نشان داد، به ویژه

۵-۱-۵- نسبت‌های بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری

بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، می‌توان نسبت‌های بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری بتن را به شرح زیر تعیین نمود:

- استفاده از میکروسیلیس به تنهایی: در محدوده درصد‌های مورد بررسی (۰٪ تا ۱۵٪)، افزایش درصد میکروسیلیس منجر به افزایش مداوم مقاومت فشاری شده است. با این حال، روند افزایش مقاومت با افزایش درصد میکروسیلیس کندتر شده و افزایش مقاومت بین MS10 و MS15 کمتر چشمگیر است. به نظر می‌رسد درصد بهینه میکروسیلیس در محدوده ۱۰٪ تا ۱۵٪ برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری باشد.
- استفاده از نانوسیلیس به تنهایی: مشابه میکروسیلیس، افزایش درصد نانوسیلیس نیز منجر به افزایش مداوم مقاومت فشاری شده است. با این حال، افزایش مقاومت با افزایش درصد نانوسیلیس نیز کندتر شده و افزایش مقاومت بین NS1 و NS1.5 کمتر چشمگیر است. به نظر می‌رسد درصد بهینه نانوسیلیس در محدوده ۱٪ تا ۱٫۵٪ برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری باشد. با توجه به هزینه بالاتر نانوسیلیس، استفاده از درصد بالاتر از ۱٪ ممکن است از نظر اقتصادی توجیه پذیر نباشد.

- استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس: ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس، به ویژه ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس (MS10NS1)، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت فشاری از خود نشان داده است. این ترکیب، بالاترین مقاومت فشاری را در بین تمامی طرح‌ها ارائه داده و اثر هم‌افزایی این دو ماده را به وضوح به نمایش گذاشته است. به نظر می‌رسد نسبت بهینه ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس، در محدوده ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس باشد. این ترکیب، ضمن دستیابی به مقاومت فشاری بالا، می‌تواند از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه‌تر از استفاده از نانوسیلیس به تنهایی با درصد بالا باشد.

۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش نفوذپذیری کلراید (RCPT)

نتایج آزمایش نفوذپذیری سریع یون کلراید (RCPT) در سن ۲۸ روزه برای طرح‌های منتخب (C، MS15، NS1.5 و MS10NS1)

(حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس) مقاومت ۵۶٫۸ مگاپاسکال را نشان داد، در حالی که بتن MS5 تنها ۴۲٫۵ مگاپاسکال و بتن NS1 مقاومت ۵۱٫۴ مگاپاسکال داشت. این مقاومت حتی از مجموع ریاضی افزایش‌های جداگانه بیشتر است که نشان‌دهنده یک اثر هم‌افزایی واقعی است [۳۳].

بهترین عملکرد در بتن MS10NS1 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس) مشاهده شد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۹٫۵ مگاپاسکال را نشان داد. این مقاومت ۷۱ درصد بیشتر از بتن شاهد و حتی ۱۴ درصد بیشتر از بتن MS15 (حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس به تنهایی) است [۳۴].

نکته قابل توجه این است که بتن MS10NS1 با مجموع ۱۱ درصد مواد افزودنی (۱۰ درصد میکروسیلیس + ۱ درصد نانوسیلیس) عملکرد بهتری نسبت به بتن MS15 (با ۱۵ درصد میکروسیلیس) نشان داد. این امر نشان می‌دهد که ترکیب مناسب میکروسیلیس و نانوسیلیس می‌تواند کارآمدتر از استفاده از میکروسیلیس به تنهایی باشد، حتی با مقدار کمتر مواد افزودنی کل [۳۵].

تحلیل آماری ANOVA و آزمون Tukey's HSD تأیید کرد که بتن MS10NS1 به طور معنی‌داری مقاومت بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها دارد ($p < 0,05$).

۵-۱-۴- تفسیر مکانیزم‌های اثرگذاری

اثرات هم‌افزایی مشاهده‌شده را می‌توان به چندین مکانیزم نسبت داد:

- پرکنندگی چندمقیاسی: میکروسیلیس فضاهای بین دانه‌های سیمان (در مقیاس میکرومتری) را پر می‌کند، در حالی که نانوسیلیس منافذ کوچکتر (در مقیاس نانومتری) را پر می‌کند، منجر به ریزساختار بسیار متراکم
- تسریع واکنش پوزولانی: نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا سریع‌تر واکنش می‌دهد و محصولات C-S-H اولیه تشکیل می‌شود که محیط مناسبی برای واکنش میکروسیلیس فراهم می‌کند
- بهبود منطقه انتقال: هر دو ماده منطقه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان را تقویت می‌کنند، اما در مقیاس‌های مختلف
- افزایش تراکم C-S-H: تشکیل ژل C-S-H با تراکم بالاتر و ساختار بهینه‌تر

در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میکروسیلیس و نانو سیلیس به صورت جداگانه و ترکیبی، منجر به کاهش قابل توجه نفوذپذیری کلراید بتن شده است.

جدول ۶- نتایج آزمایش نفوذپذیری سریع یون کلراید (RCPT) در سن ۲۸ روزه (میانگین \pm انحراف معیار)

کد طرح	شار کل گذرنده (Coulombs)	رده نفوذپذیری کلراید (ASTM C1202)
C	200 ± 3580	متوسط
MS15	150 ± 1850	پایین
NS1.5	100 ± 1420	بسیار پایین
MS10NS1	80 ± 1150	بسیار پایین

بتن شاهد (C) مقدار RCPT برابر 3580 کولن را نشان داد که طبق طبقه‌بندی ASTM 1202C در رده «متوسط» قرار می‌گیرد. افزودن ۱۵ درصد میکروسیلیس (SM15) این مقدار را به 1850 کولن کاهش داد (کاهش ۴۸ درصدی) که در رده «پایین» قرار می‌گیرد [۳۶].

استفاده از ۱٫۵ درصد نانو سیلیس (NS1.5) عملکرد بهتری نشان داد و مقدار RCPT را به 1420 کولن رساند (کاهش ۶۰ درصدی نسبت به بتن شاهد). اما بهترین نتیجه در بتن SM10NS1 (حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانو سیلیس) مشاهده شد که مقدار RCPT تنها 1150 کولن بود (کاهش ۶۸ درصدی) [۳۷].

این مقدار در رده «بسیار پایین» قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده مقاومت عالی در برابر نفوذ کلراید است. تحلیل آماری ANOVA نشان داد که تفاوت‌های RCPT بین طرح‌های مختلف از نظر آماری بسیار معنی‌دار است ($p < 0,05$). آزمون Tukey's HSD تأیید کرد که بتن MS10NS1 به‌طور معنی‌داری نفوذپذیری کمتری

نسبت به MS15 و NS1.5 دارد، که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی واقعی است. کاهش نفوذپذیری کلراید را می‌توان به تراکم بسیار بالای ریزساختار بتن نسبت داد. ترکیب میکروسیلیس و نانو سیلیس شبکه منافذ را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و پیوستگی منافذ را قطع می‌کند، که مانع از نفوذ آسان یون‌های کلراید می‌شود [۳۸].

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر هم‌زمان میکروسیلیس و نانو سیلیس بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری کلراید بتن پرداخته است. نتایج

آزمایش‌های انجام شده نشان داد که:

- استفاده از میکروسیلیس و نانو سیلیس به صورت جداگانه، منجر به افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلراید بتن در تمامی سنین شده است.
- نانو سیلیس، به ویژه در سنین اولیه، عملکرد بهتری نسبت به میکروسیلیس در بهبود مقاومت فشاری بتن از خود نشان داده است.
- استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و نانو سیلیس، اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و بهبود بیشتری در مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلراید بتن نسبت به استفاده جداگانه از هر یک از آنها حاصل نموده است.
- ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانو سیلیس (MS10NS1)، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلراید در بین تمامی طرح‌های اختلاط ارائه داده است.
- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان میکروسیلیس و نانو سیلیس، راهکار مؤثری برای تولید بتن‌های با عملکرد بالا و دوام بیشتر می‌باشد. ترکیب بهینه این دو ماده، به ویژه ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانو سیلیس، می‌تواند بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری و دوام بتن ایجاد نماید. این یافته‌ها، پتانسیل بالای استفاده ترکیبی میکروسیلیس و نانو سیلیس در صنعت بتن را تأیید کرده و راه را برای کاربرد گسترده‌تر این مواد در پروژه‌های ساختمانی، به ویژه در سازه‌هایی که نیاز به مقاومت و دوام بالا دارند، هموار می‌سازد.

۷- مراجع

- [1] Nia, A. R., et al. (2024). Synergistic effects of nano and micro silica on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. ScienceDirect, Article 2214509524005941.
- [2] Bharat, B. V., & Reddy, P. N. (2024). Performance enhancement in concrete using nano-silica and fly ash. Journal of Applied Engineering Sciences, 14(2), 195-204.
- [3] Safawi, N. A., Hassan, N. A., Razak, H. A., & Sulaiman, H. (2017). Synergistic effect of hybrid nano silica and micro silica on strength and permeability of concrete. Construction and Building Materials, 154, 1155-1165.

- Materials Today Proceedings, 51, 2614-2619.
- [18] Quercia, G., Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2012). Water retention and workability of cement mortars with modified nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1057-1063.
- [19] Shi, C., Lothenbach, B., & De Schutter, G. (2012). Hydration and microstructure of nano-SiO₂ blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(7), 967-977.
- [20] Ghafari, E., Ghahari, S., Wang, K., Khayat, K. H., & Nkinamubanzi, P. C. (2014). Influence of silica nanoparticles on rheological and mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 49, 70-77.
- [21] Khan, M. I., Amin, M. N., & Khan, K. (2024). Nano-silica in concrete: A review on rheology, durability, and strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 425-448.
- [22] Shekarchi, M., Kazemi, S., & Khademi, F. (2021). Freeze-thaw durability of nano-silica modified concrete. *Cold Regions Science and Technology*, 183, Article 103221.
- [23] Safawi, N. A., Hassan, N. A., Razak, H. A., & Sulaiman, H. (2017). Synergistic effect of hybrid nano silica and micro silica on strength and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 154, 1155-1165.
- [24] Zhang, M. H., Li, H., & Zhang, Z. H. (2016). Properties of high-performance concrete with hybrid mineral admixtures of nano-silica and silica fume. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, Article 6893284.
- [25] Nematollahi, M., Sanjayan, J. G., & Nazari, A. (2020). Synergistic effect of nano-silica and micro-silica on properties of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 238, Article 117768.
- [26] Nia, A. R., et al. (2024). Synergistic effects of nano and micro silica on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Article 2214509524005941.
- [27] Amin, M. N., Abuodha, S. O., & Onyango, M. O. (2024). Enhancing the mechanical and durability properties of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag using micro-silica. *Construction and Building Materials*, 410, Article 133845.
- [28] Bentz, D. P., Ferraris, C. F., & Hansen, W. (2011). *Microstructure and Performance of Concrete*. McGraw-Hill Education.
- [29] Thomas, R. J., Ramachandran, S., & Malhotra, V. M. (2020). *Sustainable Concrete: State-of-the-Art Report*. CANMET/ACI.
- [4] Ibrahim, N. A., & Al-Tersawy, S. (2017). The hybrid effect of micro and nano silica on the mechanical properties of concrete. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(5), 3541-3548.
- [5] Zhang, M. H., Li, H., & Zhang, Z. H. (2016). Properties of high-performance concrete with hybrid mineral admixtures of nano-silica and silica fume. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, Article 6893284.
- [6] Tran, Q. M., et al. (2022). The effects of nano-SiO₂ and silica fume on the properties of concrete. *Archives of Civil Engineering*, 68(1), 293-307.
- [7] ACI Committee 234. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (ACI 234R-06)*. American Concrete Institute.
- [8] Yu, L., et al. (2022). Mechanical properties and durability of self-compacting concrete containing micro-silica. *Materials Today Proceedings*, 51, 2614-2619.
- [9] Ghafari, E., Ghahari, S., Wang, K., Khayat, K. H., & Nkinamubanzi, P. C. (2014). Influence of silica nanoparticles on rheological and mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 49, 70-77.
- [10] Khan, M. I., Amin, M. N., & Khan, K. (2024). Nano-silica in concrete: A review on rheology, durability, and strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 425-448.
- [11] Nematollahi, M., Sanjayan, J. G., & Nazari, A. (2020). Synergistic effect of nano-silica and micro-silica on properties of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 238, Article 117768.
- [12] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- [13] ASTM C1240-21. (2021). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. ASTM International.
- [14] De Belie, N., Gruyaert, E., & Henkens, M. (2024). *Silica Fume for High Performance Concrete: State-of-the-Art Report*. RILEM TC 279-WMR.
- [15] ACI Committee 234. (2006). *Guide for Use of Silica Fume in Concrete (ACI 234R-06)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [16] Yu, L., Zhang, Y., & Li, C. (2022). Mechanical properties and durability of self-compacting concrete containing micro-silica. *Materials Today Proceedings*, 51, 2614-2619.
- [17] Zhang, Y., Zhang, Z., & Li, C. (2022). Mechanical properties and durability of self-compacting concrete containing micro-silica.

- [30] Morsy, M. S. E., Alsayed, S. H., & Aqel, M. (2019). Performance of nano-silica modified low-calcium silicate cement concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 737-747.
- [31] Land, G., & Stephan, D. (2007). Influence of nano-silica on cement hydration. *Journal of Materials Science*, 42(8), 2957-2965.
- [32] Senff, L., Labrincha, G. T., & Hotza, D. (2010). Effect of nano-silica on hydration products of cement pastes. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(9), 2645-2649.
- [33] Kumar, R., & Sharma, A. (2020). Nano and micro silica for sustainable concrete: A review. *Materials Today Proceedings*, 27, 2714-2718.
- [34] Kumar, R., Poonia, M. P., & Sharma, A. (2023). Nano-silica in cement and concrete: A review on applications and challenges. *Materials Today Proceedings*, 72, 1258-1265.
- [35] Liu, Z., Chen, B., & Wang, J. (2024). Performance enhancement of waste glass concrete using nano-silica. *Journal of Cleaner Production*, 435, Article 140421.
- [36] ASTM C1202-19. (2019). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International.
- [37] Saraswathy, V., & Song, H. W. (2017). Corrosion performance of nano-silica modified concrete. *Materials and Corrosion*, 68(11), 1185-1193.
- [38] Beigi, M. H., Masoudi, S. S., & Ranjbar, M. M. (2013). Durability of nano-silica modified concrete in hot and humid environment. *Construction and Building Materials*, 48, 982-989.

Investigating the Synergistic Effect of Microsilica and Nanosilica on Concrete Properties

A. Ghorbani *

Associate Professor, Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran..

Abstract

This research investigates the effect of the simultaneous use of microsilica and nanosilica on concrete properties. The primary objective is to evaluate the impact of these combined admixtures on the compressive strength and chloride permeability of concrete. To this end, various mix designs were developed and implemented, including a control concrete, concretes containing different percentages of microsilica and nanosilica separately, and concretes incorporating a combination of both materials. Concrete samples were subjected to compressive strength testing at 7, 28, and 90 days, and chloride permeability tests were also conducted on selected samples at 28 days. The results indicated that the individual use of microsilica and nanosilica leads to improved concrete properties. However, the simultaneous application of these two materials creates synergistic effects, resulting in more significant enhancements in compressive strength and a reduction in chloride permeability of concrete. The optimal combination of 10% microsilica and 1% nanosilica demonstrated the best performance in terms of both properties. This study demonstrates that the simultaneous use of microsilica and nanosilica is an effective approach for producing high-performance and more durable concrete.

Keywords: Concrete, Microsilica, Nanosilica, Compressive Strength, Chloride Permeability, Mechanical Properties, Durability.

* Corresponding Author: ghorbani@pnu.ac.ir