[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

بررسی مقاومت مکانیکی بتن غلتکی حاوی نانوکربنات کلسیم در برابر پدیده فرونشست

وحید دانشجو، رضا فرخ‌زاد*؛
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۵/۰۴ پذیرش ۹۶/۰۸/۲۲

چکیده

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در میزان عمر مفید روسازی‌های بتن غلتکی، مقاومت آن‌ها در برابر تنش‌های ناشی از نشست زمین وابسته به زمان است که در این رابطه اعمال تنش ناشی از نشست‌های زمین به علل زمین‌شناختی باعث خرابی شریان‌های حیاتی می‌شود که از جمله می‌توان به ایجاد شکست‌هایی در سطح روسازی راه‌ها می‌شود. در این راستا به بررسی تأثیر فناوری نانو در بتن غلتکی و تحمل تنش‌های ناشی از این گونه نشست‌ها می‌پردازیم. در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از مهندسی نانو، درصدهای مختلف نانو کربنات کلسیم، جای‌گزین سیمان در بتن غلتکی شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بتن غلتکی در سنین مختلف انجام شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش بهینه میزان پودر نانو کربنات کلسیم حرارت اولیه بتن غلتکی و مقاومت مکانیکی نمونه‌ها در سنین بالا به‌علت ریزدانه بودن و خاصیت پرکنندگی و سطح ویژه بالا افزایش چشم‌گیری می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده بهینه از این مواد باعث بهبود برخی خواص بتن غلتکی از جمله مقاومت کششی و فشاری می‌شود که در برابر تنش‌های ناشی از پدیده فرو نشست مقاومت چشم‌گیری از خود نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پودر نانو کربنات کلسیم، مهندسی نانو، بتن غلتکی، مقاومت مکانیکی

*نویسنده مسئول R.farokhzad@qiau.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

مقدمه

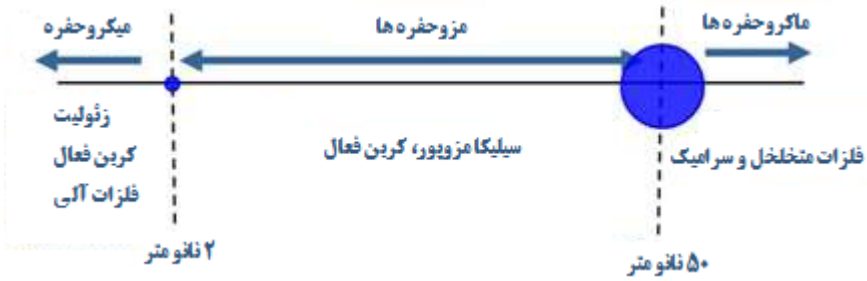
نشست زمین وابسته به زمان پدیده‌ای است که در وسعت یک دشت اتفاق می‌افتد و میزان آن چند سانتی‌متر یا چند میلی‌متر در سال است و گودالی به قطر تقریبی ۳۰ متر ایجاد می‌کند و به‌همین دلیل بسیار خطرناک است. فرونشست‌های ناحیه‌ای، آرام و پیش‌رونده اتفاق می‌افتد و با توجه به این که عوارض آن‌ها بسادگی قابل تشخیص نیست، به مرور تمام زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی را تهدید می‌کند که یکی از این زیر ساخت‌ها راه‌ها هستند. فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به‌پایین سطح زمین است که می‌تواند جابه‌جایی افقی اندکی هم داشته باشد. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر، محدود نیست. مناطق شهری به‌دلیل تراکم جمعیت، ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی به‌طور ویژه آسیب‌پذیرتر هستند و این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها، بزرگراه‌ها و پی ساختمان‌ها آسیب بزند. براساس بررسی‌های کارشناسان پدیده مخرب نشست زمین به‌علل زمین‌شناختی، بیش از ۳۰۰ دشت کشور را تهدید می‌کند. خشک‌سالی‌های سال‌های اخیر آسیب فراوانی به کشورمان وارد کرده است که با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک بروز خشکسالی‌های شدیدتر طی سال‌های آینده و تشدید این پدیده دور از ذهن نیست. بر این اساس و با استفاده از تکنولوژی‌های نوین سعی در کاهش صدمات ناشی از این فرونشست‌ها بر سازه هایی مانند راه‌ها و بزرگراه‌ها شده که در این راستا از فناوری نانو که از جمله فناوری‌های نوینی است که در قرن بیست و یکم مورد توجه جهان قرارگرفته است استفاده شد. لازم به توضیح است اکنون این فناوری به بسیاری از حوزه‌ها از جمله غذا، دارو، تشخیص پزشکی، مواد و نساجی و ساختمان ورود کرده است. در این میان صنعت ساختمان با توجه به نیازهای خود چه از نظر استحکام، مقاومت و دوام و نیز کارایی زیاد، از استفاده کنندگان مهم مواد نانو ساختار به‌شمار می‌رود. روش معمولی برای توسعه بتن با عملکرد بسیار اغلب شامل پارامترهای مختلفی از جمله طرح اختلاط بتن معمولی با انواع مختلف مواد افزودنی است. هدف نهایی از بررسی مواد در مقیاس نانو، یافتن طبقه جدیدی از مصالح ساختمانی با عملکرد زیاد است، که آن‌ها را می‌توان به‌عنوان مصالحی با عملکرد بسیار و چند

منظوره اطلاق کرد. نانوکربنات کلسیم یک پرکننده در مقیاس نانو است که در این پژوهش استفاده شده است. پرکننده‌ها موادی هستند که برای کاهش هزینه‌های طرح استفاده می‌شوند زیرا با استفاده از آن‌ها، هزینهٔ مواد از طریق کم کردن میزان استفاده از ماده‌ی چسباننده گران‌قیمت، کاهش می‌یابد. تأثیر اصلی فناوری نانو روی مواد چسبنده و درزگیر را می‌توان در مواد پرکنندهٔ نانومقیاس مشاهده کرد. پرکننده‌های معمولی برای کاستن قیمت محصول استفاده می‌شوند و اثری روی خصوصیات رئولوژیکال بتن ندارند.

۱. تعریف و مشخصات بتن غلتکی

طبق تعریف بتن غلتکی روسازی راه عبارت است از مخلوط سفت با اسلامپ صفر و نسبتاً خشکی از سنگ‌دانه‌ها (با اندازهٔ حداکثر ۱۹ میلی‌متر)، مواد سیمانی و آب که با دستگاه‌های متداول روسازی آسفالتی (فینیشر) پخش و پس از آن با غلتک ویبره‌ای کوبیده و متراکم می‌شود و سرانجام بعد از سخت شدن در اثر واکنش هیدراتاسیون سیمان به بتن تبدیل می‌شود.

با توجه به این‌که تراکم بتن غلتکی و تخلخل بر مقاومت فشاری و کششی تأثیر زیادی دارد، بر این اساس و طبق دسته‌بندی که به‌وسیلهٔ آیوپاک (IUPAC) انجام شده است، ساختار محیط متخلخل با توجه به میانگین ابعاد حفره‌ها، می‌تواند حاوی حفره‌هایی کوچک‌تر از ۲ نانومتر با نام میکروحفره، حفره‌هایی بین ۲ تا ۵۰ نانومتر با نام مزوحفره و حفره‌هایی بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر با نام ماکروحفره باشد [۱].



شکل ۱. دسته‌بندی آیوپاک بر اساس اندازهٔ حفره [۱]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

حفره‌ها بر اساس شکل و موقعیت نسبت به یک‌دیگر در داخل مواد متخلخل، به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند :

حفره‌های راه به در[1]، حفره‌های کور[2]، حفره‌های بس[3]، حفره‌های متصل به‌هم[4].

در شکل ۲ به‌صورت شماتیک این حفره‌ها نشان داده شده‌اند [۲].



شکل ۲. نوع تخلخل‌ها بر اساس شکل و موقعیت [۲]

ساختار بتن را می‌توان به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم کرد. ساختار شیمیایی بتن، در واقع واکنش‌های شیمیایی (هیدراسیون) است که بین سیمان و آب انجام می‌شود. ساختار فیزیکی یا ریز ساختار بتن شامل منافذ موجود در بتن است. بتن دارای منافذ گوناگون در اندازه‌های مختلف است. به‌طورکلی، خمیر سیمان هیدراته شده شامل سه سیستم جامد، منافذ و محلول داخل منافذ است. سیستم‌های جامد و محلول در منافذ مربوط به ساختار شیمیایی و سیستم منافذ محدود به ساختار فیزیکی بتن است. سیستم جامد در واقع محصولات هیدراسیون است که شامل خمیر هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، هیدروکسید کلسیم و فازهای آلومینات و فریت است. در کنار فازهای جامد ذکر شده، انواع منافذ به اندازهٔ ۱ نانومتر تا ۱میکرومتر در خمیر سیمان موجود است. کوچک‌ترین منافذ بین لایه‌های ساختار C-S-H به‌نام منافذ خمیر سیمان قرار دارد (اندازهٔ بسیار کوچک و حدوداً ۰/۵ تا ۲/۵ نانومتر). منافذ بزرگ‌تر خمیر سیمان هیدراته به منافذ مویینه (اندازهٔ نسبتاً بزرگ حدود ۱۰نانومتر تا ۱میکرومتر) موسوم هستند. منافذ مویینه‌ای که بزرگ‌تر از ۵۰ نانو متر هستند

1. passing pores
2. dead end pores
3. closed pores
4. inter–connected pores

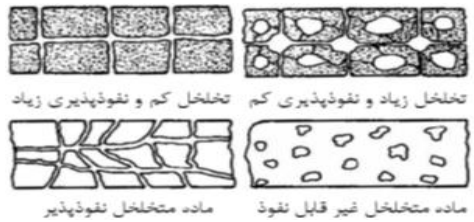
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

منافذ بزرگ است و بر مقاومت و نفوذپذیری اثر منفی می‌گذارند و منافذ کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر منافذ ریز است و بیش‌تر با خزش و جمع شدگی (ناشی از خشک شدن) در ارتباط هستند. آب موجود در منافذ بزرگ آب آزاد است و نقش مهمی در دوام بتن دارد. در ضمن منافذ بزرگ‌تر از منافذ مویینه هم وجود دارد که در اثر تراکم ناقص بتن ایجاد می‌شود. ویژگی‌های مهندسی بتن نظیر مقاومت، دوام، جمع‌شدگی و نفوذپذیری مستقیماً از تعداد، نوع، اندازه و توزیع منافذ در خمیر سیمان متأثر است. برای مثال مقاومت و خاصیت ارتجاعی بتن به حجم کل منافذ و نفوذپذیری به توزیع و اندازه و اتصال منافذ بستگی دارد. به‌طور خلاصه، منافذ را می‌توان به سه گروه منافذ خمیر سیمان (منافذ ریز) منافذ مویینه و منافذ هوا (بزرگ) تقسیم‌بندی کرد. انواع میزان تخلخل و میزان نفوذپذیری در شکل ۳ مشخص شده است .



شکل ۳. انواع منافذ و تخلخل بتن در ارتباط با نفوذپذیری [۳]

با توجه به موارد مطرح شده مذکور، در سالیان اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در خصوص تأثیرات نانوکربنات کلسیم بر خصوصیات انواع بتن انجام گرفته است است که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

۲. مروری بر سوابق تحقیق:

استیو سوپیت و همکاران به بررسی نتایج تجربی بر اساس تأثیر نانوکربنات کلسیم در افزایش مقاومت خمیر سیمان و بتن حاوی خاکستر بادی پرداخته‌اند. در این پژوهش نانوکربنات کلسیم به میزان‌های مختلف ۱ تا ٤ ٪ سیمان جای‌گزین شده و مقاومت فشاری بررسی و ارزیابی شده است و نتایج به‌صورت نمودارهایی که با استفاده از عکس‌برداری اشعهٔ ایکس انجام شده بر نمونه‌های ۳ ، ۷ و ۲۸ روزه به‌دست آمده است که در آن‌ها نانو

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

کربنات کلسیم میزان کمی کارایی (اسلامپ) در هر دو نمونه خاکستر بادی و نمونه عادی را کاهش داده و بهبود نسبی مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه را نسبت به نمونهٔ شاهد گزارش کردند [٤].

هم‌چنین در تحقیق دیگری از فیض شیخ و استیو سوپیت، به بررسی اثرات نانو ذرات $CaCo_3$ در مقاومت فشاری و خصوصیات دوام بتن حاوی ٤٠٪ و ٦٠٪ خاکستر بادی به‌عنوان جای‌گزین جزئی از سیمان پرداخته شده است. آزمایش در دو مرحله انجام شده است که در مرحلهٔ اول اثرات مختلف میزان نانو $CaCo_3$ بین ۱ تا ٤ ٪ در مقاومت فشاری بتن در بازهٔ زمانی مشخص بررسی شده است. میزان مطلوب نانو $CaCo_3$ نمایان‌گر بیش‌ترین مقاومت فشاری که انتخاب شده است که شامل بتن‌های حاوی خاکستر بادی است. به‌منظور بررسی مقاومت فشاری درسنین کم و سنین بالا بررسی می‌شوند. مرحلهٔ دوم به بررسی اثر مطلوب نانو $CaCo_3$ طراحی شده پرداخته می‌شود (به‌عنوام مثال ۱٪). نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که اضافه کردن نانو ذرات $CaCo_3$ نه‌تنها منجر به ساختار بسیار متراکم‌تر در ماتریس خاکستر بادی می‌شود بلکه باعث تغییر هیدراتاسیون شده و بهبود مقاومت فشاری اولیه را منجر خواهد شد و استحکام و دوام بتن را افزایش می‌دهد [۵].

تاجیرو ساتو و همکاران به‌بررسی اثر اضافه کردن $nano\text{-}CaCo_3$ در تسریع فرآیند هیدراتاسیون که با ترکیب سیمان پرتلند معمولی با حجم زیادی از مواد سیمانی از جمله خاکستر بادی و سرباره انجام شده است پرداخته‌اند. هدایت گرماسنجی نشان داده است که شتاب هیدراتاسیون اولیه سیمان پرتلند معمولی به‌طور چشم‌گیری با افزودن $nano\text{-}CaCo_3$ و مقادیر بیش‌تر آن افزایش یافته است. نتایج تجزیه و تحلیل حرارتی نشان می‌دهد که مقدار کمی از $nano\text{-}CaCo_3$ اضافه شده برای فرآیند هیدراتاسیون مصرف می‌شود ولی واکنش $nano\text{-}CaCo_3$ به‌وسیلهٔ X-Ray تشخیص داده نشد. خواص مهندسی از جمله سختی و مدول الاستیسیته در مراحل اولیه از هیدراتاسیون با افزودن $nano\text{-}CaCo_3$ بهبود چشم‌گیری یافته است. به‌نظر می‌رسد که نانو ذرات $CaCo_3$ به‌عنوان ذره و C-S-H به‌عنوان هسته باعث افزایش مقاومت فشاری شده است [٦].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

جسیکا کامیلتی و همکاران به‌بررسی اثر نانوکربنات کلسیم اضافه شده به بتن UHPC و خصوصیات اولیه بتن UHPC در شرایط شبیه‌سازی شده سرد و نرمال می‌پردازند. در این تحقیق میزان نانو $CaCo_3$ اضافه شده به‌میزان ۰ و ۲,۵ و ۵ و ۱۰ و ۱۵ ٪ از حجم سیمان جای‌گزین شده است. مخلوط‌های مشابه با کلرید و بدون کلرید و هم‌چنین شتاب هیدراتاسیون مواد افزودنی برای مقایسه آزمایش شدند. نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل زیاد $CaCo_3$ برای سرعت بخشیدن به تنظیم و روند سخت شدن بتن UHPC با افزایش نقاط تماس و افزایش مؤثر نسبت آب به سیمان ارتباط مستقیم دارد. نانو $CaCo_3$ باعث به‌وجود آمدن مزایایی در بتن می‌شود که باعث توسعهٔ سازه‌ها و نیاز کم‌تر آن‌ها به تعمیر، از طریق کاهش خطرخوردگی آرماتورها و کاهش نفوذ یون کلرید باعث نگه‌داری راحت‌تر می‌شود و هم‌چنین مزایای زیست محیطی بیش‌تری از طریق کاهش عامل سیمان در بتن UHPC می‌شود. اضافه کردن نانو $CaCo_3$ باعث بهبود روانی مخلوط بتن UHPC و کارایی بهتر نسبت به سایر مواد افزودنی می‌شود [۷].

در تحقیق دیگری جسیکا کامیلتی و همکاران، به بررسی و مقایسهٔ تأثیرات مقدار میکرو کربنات کلسیم با نانوکربنات کلسیم در سنین کم بتن UHPC در شرایط سرد (۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد) و عادی (۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد) پرداخته است که میزان میکرو کربنات کلسیم اضافه شده به مخلوط به نسبت‌های ۰ ، ۲,۵ ، ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ ٪ و میزان نانوکربنات کلسیم به‌میزان ۰ ، ۲,۵ و ۵ ٪ است و هر دو جای‌گزین حجمی از سیمان مصرفی در بتن شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میکروکربنات کلسیم عمدتاً به‌عنوان پر کننده‌ای بی‌اثر عمل می‌کند و به‌صورت ساختاری متراکم باعث افزایش نسبت آب به سیمان می‌شود در صورتی که نانوکربنات کلسیم باعث افزایش شتاب هیدراتاسیون می‌شود و هم‌چنین به‌عنوان ماده‌ای پرکننده مؤثر عمل می‌کند. با ترکیب مخلوط میکروکربنات کلسیم با نانوکربنات کلسیم می‌توان تا ۲۰ ٪ میزان مصرفی سیمان در بتن UHPC را کاهش داد که این بسیار با محیط زیست سازگار است و خواص مهندسی بتن را افزایش می‌دهد [۸].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

برنامه آزمایشگاهی

۱. مواد و مصالح مصرفی

تحقیق عملی مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده بر نمونه‌های ساخته شده با بتن و هم‌چنین مقایسه نتایج با زمینه‌های تحقیقاتی پیشین و به‌دست آوردن حالات بهینه. در این پژوهش میزان استفاده از نانوکربنات کلسیم به‌میزان ۰ ، ۱ ، ۲ ، ۳ و ٤ درصد است و جای‌گزین حجمی از سیمان مصرفی در بتن شده‌اند.

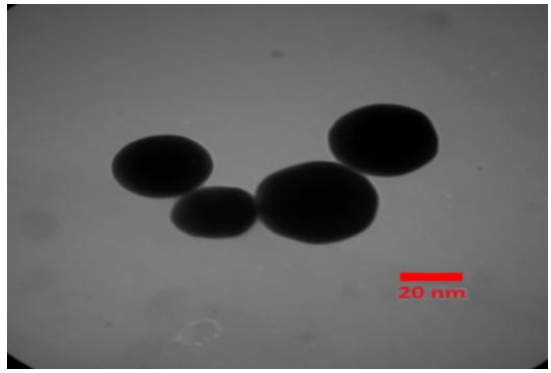
در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده است که مقادیر تجزیهٔ شیمیایی در جدول ۱ قابل مشاهده است. ماسهٔ مصرفی از نوع رودخانه‌ای و شکسته است. هم‌چنین مصالح درشت‌دانه از نوع شکسته با اندازهٔ حداکثر ۱۹ میلی‌متر است که مشخصات مصالح در جدول ۲ قابل ملاحظه است. هم‌چنین محدوده‌ها با منحنی دانه‌بندی تقسیم شده‌اند که در شکل ۸ نمایش داده شده است.

محدودهٔ دانه‌بندی مصالح طرح اختلاط مطابق با آئین‌نامه ACI325-10R انتخاب شده است [۹].

کربنات کلسیم ($CaCo_3$) ماده‌ای فیلری است که از دیرباز در دنیا مصرف می‌شود. مخصوصاً در کاغذ و پلاستیک‌ها معمول است. در گذشته کربنات کلسیم از منابع طبیعی (سنگ گچ) استخراج و با تکنیک‌های آسیاب فرآیند می‌شد . به‌همین دلیل مادهٔ حاصل کربنات کلسیم زمینی (طبیعی) نامیده می‌شد . معادل سنتزی یا مصنوعی این ماده کربنات کلسیم رسوبی است که اندازهٔ ذرات آن ظریف‌تر است و توزیع ابعادی کوچک‌تری دارند. این ذرات در چسب‌ها و مواد درزگیر استفاده می‌شوند تا خواص رئولوژیکی را تنظیم کرده و استحکام مکانیکی و دوام را افزایش دهند.

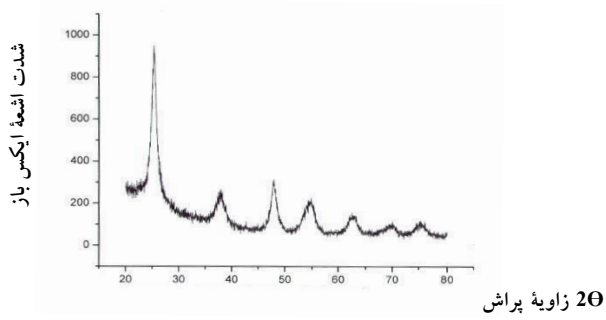
پودر نانوکربنات کلسیم ($CaCo_3$) دارای درجهٔ ذوب ۸۲۵ سانتی‌گراد و میانگین اندازهٔ ذرات مابین ۱۵-٤۰ نانومتر است.

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از پودر نانوکربنات کلسیم استفاده شده در طرح در شکل ٤ قابل مشاهده است، چنان‌که در تصویر مشخص است ذرات بین ۱۵ تا ٤۰ نانو متر هستند.



شکل٤. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از پودر نانوکربنات کلسیم

نمودار پراش اشعه ایکس از نانوکربنات کلسیم استفاده شده در طرح نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



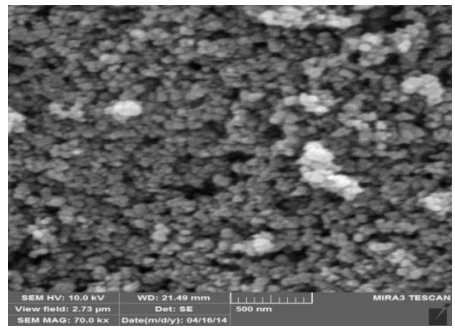
شکل ۵. پراش XRD نمونه نانو مواد کربنات کلسیم

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوکربنات کلسیم استفاده شده در طرح در شکل ٦ مشاهده می‌شود.

طبق تحقیقات مؤسسه بکس و ویلیامز در بارهٔ پروژهٔ پایش فناوری‌نانو[1] در چارچوب برنامهٔ هفتم توسعهٔ علم و فناوری اتحادیه اروپا که هدف اولیهٔ این پروژه حمایت از تصمیم‌گیران اروپایی، از طریق ارائه اطلاعات و تجزیه و تحلیل‌های مربوط به توسعه‌های علم و فناوری نانو است که "گزارش شمارهٔ ۲۱ این مؤسسه در بارهٔ فیلرها"[2] که از جمله آن‌ها می‌توان به پودر نانوکربنات کلسیم اشاره کرد به نتایج زیر رسیده‌اند.

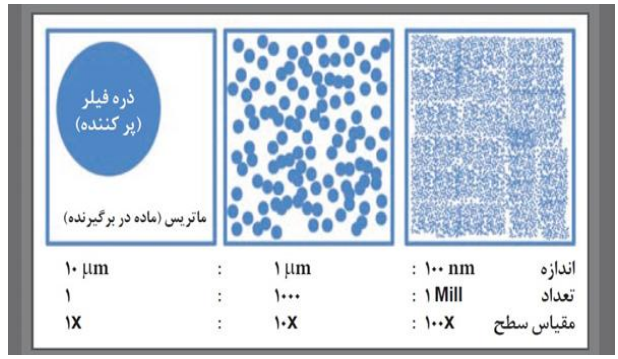
1. Observatory NANO
2. Observatory Nano Briefing No.21

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]



شکل ٦. تصویر FE-SEM از نمونهٔ نانوکربنات کلسیم با ولتاژ ۱۰ کیلوولت و بزرگ‌نمایی ۷۰ برابر

اندازهٔ ذرهٔ پرکننده، سطح تماس بین مادهٔ فیلر و ماتریس را تعیین می‌کند. از آن‌جاکه نانوذرات تمایل دارند به یک‌دیگر کلوخه شوند یا در حالت‌های کلوخه ایجاد شوند، مساحت سطح حاصل تا حد زیادی به‌میزان جدایی و پراکندگی آن‌ها ارتباط دارد. نانوفیلرهای کاملاً جدا شده و توزیع شده بیش‌ترین تأثیر را در خواص فیزیکی دارند. در کسری از حجم ثابت نانوفیلر، وقتی که از ۱۰ میکرومتر به ۱۰۰ نانو متر افزایش می‌یابد، سطح تماس ۱۰۰ برابر می‌شود که در شکل ۷ نشان داده شده است. بنابراین خصوصیات استفاده از نانوفیلرها در صنعت ساخت و ساز غیرقابل اغماض است [۱۰].



شکل۷. اندازه‌های مختلف ذرات فیلر در کسر حجمی یک‌سان [۱۰]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲

مشخصات	نتایج تحلیل	محدوده نتایج	خواص شیمیایی
	۲۰/۷	۲۰-۲۳	سیلیسیم دی‌اکسید (Sio_2%)
	۵/۳۸	۵-۵/۵	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3%)
	۳/۷۲	۳/۵-٤/۳	اکسید آهن (Fe_2O_3%)
	۶۳/۹	۶۳-۶۶	اکسید کلسیم (Cao%)
ماکزیمم 5	۳/۰۱	<۳/۲	اکسید منیزیم (Mgo%)
Max. 3.5 C_3A> 8% - Max. 3 C_3A< 8%	۲/۲	<۲/۸	گوگرد تری اکسید (So_3%)
	۰/۶۵	<۱	سدیم اکسید (Na_2O%)
	۰/۵۵	<۱	پتاسیم اکسید (K_2O%)
ماکزیمم0.75	۰/۳۵	<۰/۷	نامحلول باقیمانده (Ins.%)
ماکزیمم 3	۱/۱	<۲/۵	از بین رفته در طی فرایند(Loi%)

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی مصرفی در طرح اختلاط بتن- مصالح نمونه‌برداری شده

مشخصات نمونه	شمارهٔ نمونه	ضریب نرمی ماسه (ASTM C136)	هم‌ارز ماسه‌ای (ASTM D2419) (درصد)	تطویل و تورق (BS 812)		وزن مخصوص و جذب آب (ASTM – C127,128)				چگالی ظاهری (ASTM – C29)	
				تطویل (درصد)	تورق (درصد)	ظاهری	حقیقی	اشباع با سطح خشک (درصد)	جذب آب (درصد)	متراکم kg/m^3	غیرمتراکم kg/m^3
شن	۱	–	–	۱۰	۳۱	۲/۷۳٤	۲/۵۶۳	۲/٦۲٦	۲/٤	۱٦٤۳	۱٤۵٦
ماسه طبیعی	۲	۳/۵۷	۸۳	–	–	۲/۷۳٦	۲/۵٤۱	۲/٦۱۲	۲/۸	۱۸۸۱	۱۵٦۳
ماسه شکسته	۳	۳/۹۹	۷۲	–	–	۲/۷۷٤	۲/٦۳۳	۲/٦۸٤	۱/۹	۱۸٤٤	۱٦۳۳

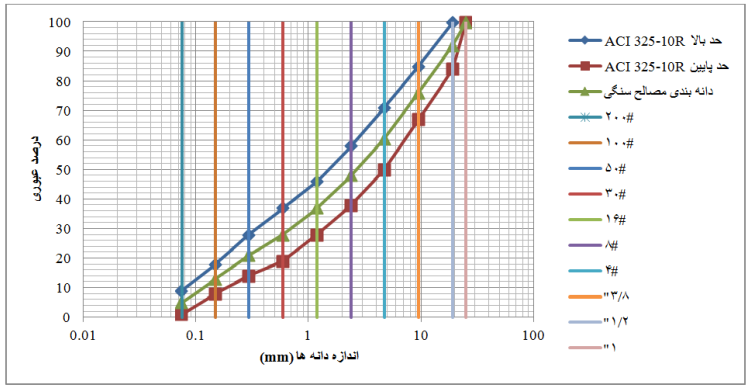
۲. طرح اختلاط استفاده شده

با توجه به مشخصات بتن غلتکی، پنج طرح اختلاط با نسبت‌های مختلف مصالح سنگی، نسبت‌های اختلاط مندرج در جدول ۳، در تهیه بتن، استفاده شده‌اند. بر همین اساس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

مخلوط‌های آزمایشی با توجه به مقادیر وزنی مواد متشکله بتن که با توجه به محاسبات طرح به‌دست آمده‌اند، تهیه و به‌منظور انجام آزمایش‌های لازم، نمونه‌گیری از مخلوط بتن تازه به تعداد کافی انجام شد.

نمونه‌ها به‌وسیلهٔ میز لرزه و در قالب‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ تهیه شد که بر اساس استاندارد ساخت نمونه‌های بتن غلتکی در قالب‌های استوانه‌ای ۳۰ × ۱۵ سانتی‌متری با استفاده از میز لرزه طبق استاندارد ASTM C1176 انجام شد [۱۱].



شکل ۸ محدودهٔ دانه‌بندی بتن غلتکی بر اساس استاندارد ACI325-10R

جدول ۳ . طرح اختلاط بتن غلتکی، نمونه استوانه‌ای ۳۰× ۱۵ سانتی‌متر

عنوان	شن kg	ماسه شکسته kg	ماسه طبیعی kg	سیمان تیپ ۲ kg	فوق روان کننده Conplast SP432 MS	آب کارگاه (جذب آب مصالح سنگی+ آب اختلاط)
نسبت اول	۵۳۱	۶۰۰	۸۳۶	۲۷۵	۶/۹ کیلوگرم (۲/۵ درصد وزن سیمان مصرفی)	۱۴۷
نسبت دوم	۵۳۱	۶۳۶	۸۰۰	۲۸۸	۶/۶ کیلوگرم (۲/۳ درصد وزن سیمان مصرفی)	۱۴۲
نسبت سوم	۵۳۱	۵۵۱	۸۸۵	۳۰۰	۶ کیلوگرم (۲ درصد وزن سیمان مصرفی)	۱۳۷
نسبت چهارم	۵۳۱	۵۰۰	۹۳۶	۳۱۲	۵/۶ کیلوگرم (۱/۸ درصد وزن سیمان مصرفی)	۱۳۳
نسبت پنجم	۵۳۱	۷۰۰	۷۳۶	۳۲۵	۳/۲۵ کیلوگرم (۱ درصد وزن سیمان مصرفی)	۱۳۶

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

در شکل ۹ نمایی از میز لرزه و ملحقاتش نمایش داده شده است.



شکل ۹. میز لرزه به‌همراه ملحقات

هم‌چنین به‌منظور انتخاب طرح بهینه، برای ۵ مورد طرح اختلاط با عیار سیمانی متفاوت، استاندارد ASTM C1170 که آزمایش اندازه‌گیری کارایی مخلوط بتن غلتکی روسازی به‌روش وی بی اصلاح شده است، بلافاصله بعد از ساخت مخلوط و برای ثبت زمان وی بی اولیه انجام گرفت. سپس ۱۰ الی ۱۵ دقیقه یک بار آزمایش وی بی برای مخلوط بتن غلتکی تازه با عیارهای مختلف انجام شد تا سیر افزایش زمان وی بی که به‌معنای کاهش کارپذیری بتن است بررسی شد که نتایج در جدول ٤ مشاهده می‌شود [۱۲].

جدول ٤. مقادیر زمان وی- بی در حالت بدون نانو مواد در مدت زمان ٤٠ دقیقه

عنوان	زمان وی بی Vebe Time اولیه -Sec.	زمان وی بی Vebe Time بعد از ۱۰ دقیقه	زمان وی بی Vebe Time بعد از ۱۵ دقیقه	زمان وی بی Vebe Time بعد از ۲۰ دقیقه	زمان وی بی Vebe Time بعد از ۳۰ دقیقه	زمان وی بی Vebe Time بعد از ٤٠ دقیقه	نسبت آب به سیمان	حجم واحد وزن تازه بتن kg/cm^3
طرح اول	۲۰	۲٤	۲۸	۳۵	٤٠	٤۵	۰/۳٦	۲٤٤۱
طرح دوم	۲۳	۲٦	۳۰	۳۷	۳۹	٤۷	۰/۳۳	۲٤۳۰
طرح سوم	۲۹	۳۲	۳۷	٤۲	٤۹	۵۲	۰/۳۰	۲٤۲۰
طرح چهارم	۳۵	۳۹	٤٤	٤۹	۵٤	٦۰	۰/۲۸	۲٤۰۳
طرح پنجم	٤۲	٤٦	۵۰	۵۷	٦۸	۷۵	۰/۲۷	۲۳۹٤

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

با افزایش عیار سیمان شیب منحنی وی بی افزایش می‌یابد که به‌معنای افزایش سرعت و کاهش کارایی با گذشت زمان در عیارهای بیش‌تر است . با افزایش عیار سیمان از ۲۷۵ به ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب شاهد افزایش در زمان وی بی هستیم. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت در عیارهای کم در مخلوط بتن غلتکی تازه، کارایی با سرعت کم‌تری کاهش می‌یابد. زمان وی بی بتن غلتکی روسازی باید بین ۳۰ تا ٤۰ ثانیه باشد تا کارایی مطلوب را داشته باشد. با توجه به جدول ٤ مشاهده می‌شود که مخلوط با عیار ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در ۲۰ دقیقه ابتدایی بعد از ساخت در این بازه زمانی قرار دارد و سپس از این بازه خارج می‌شوند. با توجه به نتایج زمان وی بی، برای بررسی تأثیر افزودن نانوکربنات کلسیم به بتن، برای تعیین کارایی بتن غلتکی روسازی عیار ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کارپذیری بهتری نسبت به مخلوط های دیگر داشت به‌صورتی که مدت زمان بیش‌تری (در حدود ۲۰ دقیقه) در بازهٔ ۳۰ تا ٤۰ ثانیه قرار داشت. بر این اساس بتن با عیار ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری متناسب با این طرح است.

۳. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای

تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن در سنین مختلف طبق استاندارد ASTM C39/C39M [۱۳] انجام شده، روش آزمایش به این شرح است که آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های تحت عمل‌آوری مرطوب باید در اولین فرصت ممکن، پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از مخزن رطوبت انجام شوند و هم‌چنین نمونه‌ها باید در فاصلهٔ زمانی بین بیرون آمدن از مخزن رطوبت تا انجام آزمایش به‌روش مناسبی مرطوب نگه داشته شوند. نمونه‌ها باید در شرایط مرطوب آزمایش شوند. این آزمایش به‌وسیلهٔ جک بتن شکن برقی ۳۰۰۰ کیلونیوتنی دیجیتالی ساخت شرکت ELE انگلستان انجام شده است که محدودهٔ سرعت بارگذاری طبق استاندارد ASTM C39 بین ۰/۰۵± ۰/۲۵ مگاپاسکال در ثانیه است. مقاومت فشاری نمونه با تقسیم حداکثر نیروی وارده طی آزمایش به سطح مقطع آن محاسبه می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

۵. تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای

تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتن در سنین مختلف طبق استاندارد ASTM C496 انجام می‌شود که آزمایش شامل نیرویی قطری فشاری در راستای طولی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی با سرعتی است که شکست در آن رخ می‌دهد. این بارگذاری منجر به ایجاد تنش‌های کششی در صفحه اعمال بار و ایجاد تنش‌های فشاری نسبتاً بالایی در نزدیکی بار اعمال شده می‌شود. با این وجود شکست کششی سریع‌تر از شکست فشاری رخ می‌دهد، زیرا سطوح اعمال بار در یک وضعیت فشار سه‌محوری هستند. برای هر نمونه استوانه‌ای باید دو نوار تکیه‌گاهی کاملاً صاف از جنس تخته چندلا با ضخامت اسمی ۳/۲ میلی‌متر و عرض تقریبی ۲۵ میلی‌متر و طولی برابر یا کمی بیش‌تر از طول نمونه آماده شود. نوارهای تکیه‌گاهی باید بین نمونه و بلوک تکیه‌گاهی فوقانی یا تحتانی جک بتن شکن، یا بین نمونه و صفحه قرار گیرند. این نوارها نباید بیش از یک بار استفاده شوند [۱۴].

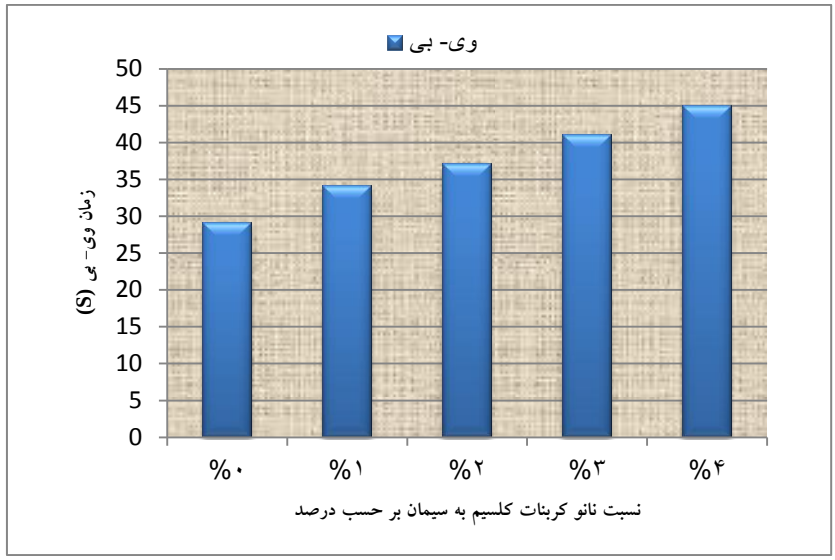


شکل ۱۰. گیرهٔ مناسب برای نمونه ۱۵۰ در ۳۰۰ میلی‌متری

نتایج آزمایش و تحلیل آن‌ها

۱. زمان وی-بی

نتایج آزمایش زمان وی-بی در حالت با مواد نانو روی بتن تازه بررسی شد که نتایج در شکل ۱۱ قابل مشاهده است که نشان‌دهندهٔ افزایش زمان وی-بی با افزایش درصد نانو کربنات کلسیم است.



شکل ۱۱. نمودار مقادیر زمان وی- بی در حالت با نانو مواد

۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری (با نانو مواد)

مهم‌ترین جزء تشکیل‌دهندهٔ بتن اکسیدکلسیم (آهک) است که بخش زیادی از سیمان را تشکیل می‌دهد. در اثر واکنش اکسیدکلسیم با آب هیدروکسیدکلسیم $Ca(OH)_2$ تشکیل می‌شود که به این فرآیند هیدراتاسیون گفته می‌شود. پس از آغاز واکنش هیدراسیون ذرات سیلیس موجود در بتن با $Ca(OH)_2$ قابل انحلال وارد واکنش شده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می‌کند. این ژل متخلخل است، ساختاری لایه‌ای در مقیاس نانو دارد و مهم‌ترین عامل ایجاد مقاومت در بتن است. نانوذرات به‌دلیل سطح مؤثر و واکنش‌پذیری بالا می‌توانند با کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم در ناحیه‌ای که خمیر سیمان سنگ‌دانه‌ها را در بر گرفته واکنش داده و باعث جلوگیری از توسعهٔ کریستال‌های $Ca(OH)_2$ و در مقابل افزایش ژل سیلیکات‌کلسیم هیدراته شوند، بنابراین این ذرات با انجام واکنش‌های شیمیایی هیدروکسیدکلسیم آزاد شده موجود در بتن را مصرف می‌کنند و از خاصیت قلیایی آن می‌کاهند. با کاهش مقدار بلورهای هیدروکسید، اتصال خمیر و سنگ‌دانه در بتن بهبود یافته و مقاومت

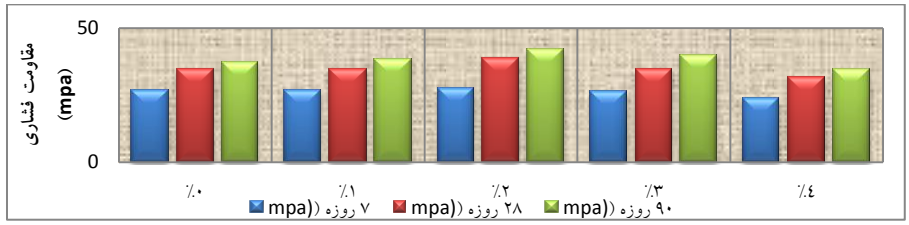
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

بتن افزایش می‌یابد. هم‌چنین نانو ذرات به‌دلیل ابعاد ریز، راحت‌تر حفره‌ها و فضاهای خالی بتن غلتکی را پر می‌کنند و باعث چسبندگی بهتر خمیر سیمان و سنگ‌دانه می‌شوند [۱۵].

با توجه به جدول ۵ و هم‌چنین رسم نمودار مقایسه‌ای بین داده‌های مذکور در سنین مختلف به این نتیجه می‌رسیم که از لحاظ مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه میزان ۲ درصد نانوکربنات‌کلسیم در افزایش مقاومت فشاری در سنین بالا نقش مؤثری داشته به‌طوری‌که در سن ۲۸ روز افزایش ۱۲ درصدی را نسبت به نمونه شاهد و در سن ۹۰ روز افزایش ۱۵ درصدی را نسبت به نمونهٔ شاهد تجربه می‌شود. با این وجود با بررسی شکل ۱۲ این نتیجه‌گیری نیز قابل استنتاج است که افزایش بیش از این مقدار باعث کاهش مقاومت فشاری و در نتیجه باعث تاثیرات منفی روی خواص رئولوژیکی بتن غلتکی می‌شود که این خود زنگ هشداری در زمینه مقدار استفاده از نانو مواد را به صدا در می‌آورد .

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری (حاوی نانو مواد)

نام طرح	نسبت نانو کربنات کلسیم به سیمان (٪)	مقاومت فشاری mpa		
		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
طرح اول	۰	۲۶/۶۲	۳۴/۵۶	۳۷
طرح دوم	۱	۲۶/۸۲	۳۴/۷۶	۳۸/۳۹
طرح سوم	۲	۲۷/۶	۳۸/۷۳	۴۲/۱۱
طرح چهارم	۳	۲۶/۲۳	۳۴/۵۱	۴۰
طرح پنجم	۴	۲۳/۷۸	۳۱/۶۲	۳۴/۷۶



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی درصدهای مختلف $nano\text{-}CaCo_3$ در سنین مختلف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

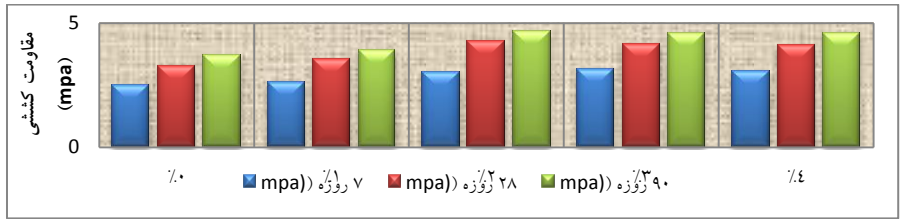
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

۳ . نتایج آزمایش مقاومت کششی (برزیلین)

با توجه به جدول ٦ و هم‌چنین رسم نمودار مقایسه‌ای بین داده‌های مذکور در شکل ۱۳ در سنین مختلف به این نتیجه می‌رسیم که از لحاظ مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه میزان ۲ درصد نانوکربنات‌کلسیم در افزایش مقاومت کششی در سنین مختلف نقش مؤثری داشته به‌طوری‌که در سن ۷ روز افزایش ۲۵ درصدی را نسبت به نمونهٔ شاهد و در سن ۲۸ روز افزایش ۳۰ درصدی را نسبت به نمونهٔ شاهد و در سن ۹۰ روز افزایش ۳۰ درصدی را نسبت به نمونهٔ شاهد تجربه می‌کنیم. با این وجود این نتیجه‌گیری نیز قابل استنتاج است که افزایش بیش از این مقدار تا حدی باعث کاهش مقاومت کششی شده و نمودار به‌صورت ثابت در می‌آید. استفاده بیش از این اندازه از نانو ماده تأثیر چندانی بر مقاومت کششی و خواص رئولوژیکی بتن غلتکی نخواهد داشت و با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری درصد های بیش‌ترین این مواد توصیه نمی‌شود.

جدول ٦. نتایج آزمایش مقاومت کششی (حاوی نانو مواد)

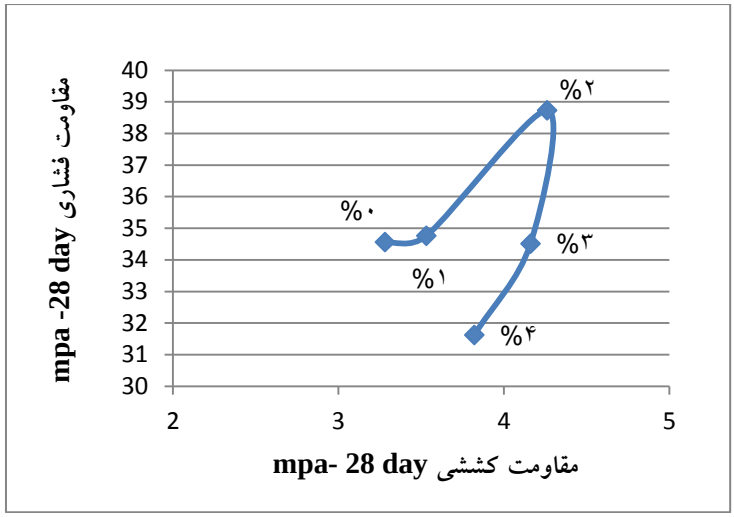
نام طرح	نسبت نانو کربنات کلسیم به سیمان (٪)	مقاومت کششی mpa		
		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
طرح اول	۰	۲/۵	۳/۲۸	۳/٦۷
طرح دوم	۱	۲/۵۹	۳/۵۳	۳/۸۷
طرح سوم	۲	۳	٤/۲٦	٤/٦۵
طرح چهارم	۳	۳/۱۳	٤/۱٦	٤/۵٦
طرح پنجم	٤	۳/۰۸	٦/۱۱	٤/۵٦



شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ای نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی درصدهای مختلف nano-$CaCo_3$ در سنین مختلف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

به‌نظر می‌رسد هیدراتاسیون سریع اولیه، محصولاتی با ساختمان فیزیکی ضعیف‌تر و احتمالاً با تخلخل بیش‌تر تشکیل دهند، به‌طوری‌که همیشه درصدی از منافذ، خالی باقی می‌ماند. به‌عبارت دیگر روند سریع هیدراتاسیون اولیه در دمای زیادتر باعث کند شدن هیدراتاسیون بعدی می‌شود و محصولات هیدراتاسیون در داخل خمیر سیمان به‌طور غیریک‌نواخت توزیع می‌شوند. زیرا روند سریع هیدراتاسیون اولیه زمان کافی برای نفوذ محصولات هیدراتاسیون دورتر از ذرات سیمان و رسوب کردن آن‌ها به‌صورت یک‌نواخت در فضای بین ذرات وجود ندارد، در نتیجه تمرکز زیادی از محصولات هیدراتاسیون در حوالی ذراتی که هیدراته می‌شوند به‌وجود می‌آید و باعث کند شدن هیدراتاسیون بعدی می‌شوند و بر مقاومت دراز مدت بتن اثر نامطلوبی دارند. ذکر این نکته در همین جا مفید است که کسب مقاومت اولیه کم دارای اثر مفیدی بر مقاومت دراز مدت دارد.



شکل ۱۴. نمودار مقاومت فشاری بتن غلتکی در برابر مقاومت کششی در سن ۲۸ روز

با توجه به شکل ۱۴ با افزایش درصدهای نانوکربنات‌کلسیم تا ۲ درصد وزنی سیمان شاهد افزایش در مقاومت فشاری و کششی هستیم به‌نحوی که مقاومت کششی حدود ۸ تا

۱۳ درصد مقاومت فشاری مشاهده می‌شود و با افزایش مقدار نانوکربنات‌کلسیم تا ٤ درصد شاهد کاهش در مقاومت فشاری و کششی هستیم.

نتیجه‌گیری

نانوکربنات‌کلسیم به‌علت ویژگی‌های خاص خود که شامل سطح ویژه بالایش است عملکرد مناسبی در بهبود خواص مکانیکی بتن غلتکی دارد، در صورتی که در اندازهٔ معین و بهینه استفاده می‌شود. در این صورت با اثرگذاری این مواد بر حفرات ریز ساختار بتن غلتکی یا خمیر سیمان هیدراته شده که فضاهای مویینه با اندازهٔ بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر دارد باعث پر شدن فضاهای مذکور می‌شود که به‌وسیلهٔ قسمت جامد خمیر سیمان (محصولات هیدراتاسیون سیمان) پر نمی‌شوند.

با توجه به افزایش مقاومت بتن غلتکی حاوی نانوکربنات کلسیم، تأثیرات مثبت این مواد در مقاومت فشاری اجتناب‌ناپذیر است در صورتی که باعث افزایش دمای بهینه بتن غلتکی نشود و این مقدار در بتن غلتکی حدود ۲٪ است که جای‌گزین مواد سیمانی می‌شود.

بتن غلتکی با عیار ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کارپذیری بهتری نسبت به مخلوط‌های دیگر داشت به‌صورتی که زمان وی–بی مخلوط مدت زمان بیش‌تری (در حدود ۲۰ دقیقه) در بازهٔ ۳۰ تا ٤۰ ثانیه قرار گرفت.

طرح اختلاط حاوی ۲ درصد نانوکربنات‌کلسیم که جای‌گزین سیمان شده است در سنین ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روز بیش‌ترین مقاومت فشاریرا دارد که به‌ترتیب ٤ ، ۱۲ و ۱۵ درصد افزایش مقاومت فشاری را نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد که علت این موضوع ناشی از تراکم مناسب نمونه‌های بتن غلتکی با میز ویبره و در نتیجه کاهش نفوذپذیری بتن و جلوگیری از توسعهٔ کریستال‌های $Ca(OH)_2$ و در مقابل افزایش ژل سیلیکات کلسیم هیدراته به‌دلیل خواص نانوکربنات‌کلسیم است.

طرح اختلاط حاوی ۲ درصد نانوکربنات‌کلسیم که جای‌گزین سیمان شده است، در سنین ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روزه بیش‌ترین مقاومت کششی را دارد که به‌ترتیب ۲۵ ، ۳۰ و ۳۱ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد که مقاومت کششی تابعی از مقاومت فشاری و حدود ۹ تا ۱۳ درصد آن است.

با افزودن نانوکربنات کلسیم تا ۲٪ وزنی سیمان به بتن غلتکی شاهد افزایش مقاومت فشاری و کششی هستیم و پس از آن با افزایش میزان نانوکربنات کلسیم واکنش این مواد با سیمان باعث کاهش دوره هیدراتاسیون C_3S سیمان شده و در واقع در مدت زمان کم‌تری هیدراتاسیون سیمان انجام می‌شوذ و حرارت‌زایی در مدت کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد که منجر به ایجاد ترک‌های خیلی ریز ناشی از انبساط حباب‌های هوا در خمیر سیمان می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق آزمایشگاهی به این نتیجه می‌رسیم که روسازی‌های بتن غلتکی حاوی مقدار بهینه نانوکربنات‌کلسیم مقاوت کششی و فشاری بهتری را نسبت به بتن غلتکی بدون نانو مواد دارد و در نتیجه در برابر نشست‌های ناشی از پدیده فرونشست که به‌صورت تدریجی است، مقاومت بیش‌تری از خود نشان می‌دهد و عمر روسازی افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به این‌که در خصوص افزودن نانومواد (نانوکربنات‌کلسیم) به بتن غلتکی تحقیقات کمی انجام شده است به بررسی دستاوردهای محققانی که قبلاً در این زمینه و موارد مشابه آن انجامداده‌اند می‌پردازیم. در ادامه به مقایسهٔ این دستاوردها با تحقیق پیش رو می‌پردازیم.

چنان‌که در قسمت مروری بر سوابق تحقیق اشاره شد در تحقیق تاجیرو ساتو و همکاران به بررسی اثر اضافه کردن $nano\text{-}CaCo_3$ در تسریع فرآیند هیدراتاسیون که با ترکیب سیمان پرتلند معمولی خواص مهندسی از جمله سختی و مدول الاستیسیته در مراحل اولیه از هیدراتاسیون با افزودن $nano\text{-}CaCo_3$ بهبود چشم‌گیری یافته است. به‌نظر می‌رسد که نانوذرات $CaCo_3$ به‌عنوان ذره و C-S-H به‌عنوان هسته باعث افزایش مقاومت فشاری شده است که با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق با افزایش میزان نانوکربنات کلسیم واکنش این مواد با سیمان باعث کاهش دوره هیدراتاسیون C_3S سیمان شده و در واقع در مدت زمان کم‌تری هیدراتاسیون سیمان انجام می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

هم‌چنین جسیکا کامیلتی و همکاران، به بررسی و مقایسه تأثیرات مقدار میکروکربنات کلسیم با نانوکربنات‌کلسیم در سنین پایین بتن UHPC در شرایط سرد (۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد) و عادی (۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد) پرداخته است که میزان میکروکربنات‌کلسیم اضافه شده به مخلوط به نسبت‌های ۰ ، ۲,۵ ، ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ ٪ و میزان نانوکربنات‌کلسیم به میزان ۰ ، ۲,۵ و ۵ ٪ است و هر دو جای‌گزین حجمی از سیمان مصرفی در بتن شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میکروکربنات‌کلسیم عمدتاً به‌عنوان پرکنندهٔ بی‌اثر عمل می‌کند و به‌صورت ساختاری متراکم باعث افزایش نسبت آب به سیمان می‌شود در صورتی که نانوکربنات کلسیم باعث افزایش شتاب هیدراتاسیون می‌شود و هم‌چنین به‌عنوان ماده‌ای پرکننده مؤثر عمل می‌کند. در تحقیق انجام شده روی بتن غلتکی علاوه بر خاصیت پرکنندگی، سطح ویژه بالای نانوکربنات کلسیم باعث واکنش‌پذیری زیاد و افزایش حرارت هیدراتاسیون می‌شود که به این علت میزان نانومواد مصرفی باید به ۲٪ محدود شود.

هم‌چنین در تحقیق دیگری از لیو و همکاران با عنوان تأثیر نانوکربنات کلسیم بر خصوصیات خمیر سیمان با افزودن ۰و۱و۲و ۳ درصد نانوکربنات کلسیم به خمیر سیمان مقدار بهینه نانوکربنات کلسیم از لحاظ مقاومت فشاری ۲٪ و از لحاظ مقاومت خمشی ۱٪ بود که در این خصوص با توجه به نمودارهای مقایسه‌ای مقاومت فشاری و کششی این موضوع مشابهت زیادی با تحقیق پیش رو دارد.

در تحقیق مشابه دیگری حمیدرضا احسانی و همکاران که به بررسی تأثیر نانوکربنات کلسیم بر مقاومت فشاری سنین اولیه بتن پرداخته‌اند و به نتایج جالبی در این زمینه رسیده‌اند که جای‌گزینی ۳٪ ذرات نانوکربنات کلسیم با پوشش کربن در سنین ۳ و ۷ روز باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می‌شود که مشابهت زیادی به نتایج این تحقیق در زمینهٔ بتن غلتکی دارد.

منابع

1. Sing K. S. W., Everett D. H., Haul R. A. W., Moscou L., Pierotti R. A., Rouquerol J., Siemieniewska T., "Reporting Physisorption Data for Gas Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface-

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

Area and Porosity (Recommendations 1984)", Pure and Applied Chemistry, Vol. 57, No. 4 (1985) 603-619.

2. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. S. W., "Adsorption by Powder and Porous Solids", Academic press, Second Edition, (1999) 1-25.

۳. محمدحسین تدین، محمد شکرچی‌زاده، محسن تدین، "پیشنهاد معیار نفوذپذیری بتن در برابر گاز برای ارزیابی دوام بتن"، اولین کنفرانس ملی بتن، (۱۵ مهرماه ۱۳۸۸).

4. Supit W. M. Steve, shaikh U.A. Faiz., "Effect of nano-$CaCo_3$ on compressive strength development of volume fly ash mortar and concretes", journal of advanced concrete technology, Vol. 12 (2014) 178-186

5. Faiz U. A., Shaikh, Steve W. M., Supit, "Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate ($CaCO_3$) nanoparticles", Construction and Building Materials, Vol. 70 (2014) 309-321

6. Sato T., Beaudoin J. J., "Effect of Nano-$CaCO_3$ on Hydration of Cement Containing Supplementary Cementitious Materials", Institute for Research in Construction, Vol. 23 (2011) 33-43.

7. Camiletti J., Ahmed M. S., Moncef M. Soliman, Nehdi L., "Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 65, (2013) 297-307

8. Camiletti J., Soliman A. M., Nehdi M. L., "Effects of nano and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete", Materials and Structures, Vol. 46 (2013) 881-898

9. ACI 325-10R, "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements", Standard by American Concrete Institute, (1995)

10. Observatorynano briefing, No. 21, nanofillers, "Improving performance and reducing cost", 7^{TH} FP, september (2011).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.6.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.45]

11. ASTM C1176-05, "Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table", ASTM International, West Conshohocken, PA (2005).
12. ASTM C1170-06, Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2006).
13. ASTM C39 / C39M-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).
14. ASTM C496 / C496M-04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004).
15. Mukhopadhyay A. K., "Next-Generation Nano-based Concrete Construction Products: A Review., Nanotechnology in Civil Infrastructure. Springer, pp. 207-223, (2011).

١٦. فرخزاد. ر، "بررسی تاثیرات سولفات ها بر مقاومت فشاری انواع بتن های پوزولانی و اندازه گیری میزان نفوذ با آزمون فراصوت در سنین مختلف"، دانشگاه گیلان، دو فصلنامهٔ علمی پژوهشی بتن، دورهٔ ۹، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان (۱۳۹۵).

١٧. امیر باقری، فرهنگ فرخی، مهدی مهدیخانی، رضا فرخزاد، جمشید بغدادی، "ارائهٔ محدودهٔ دانه‌بندی مناسب برای ساخت بتن خودتراکم با استفاده از پارامترهای طبقه‌بندی خاک"، دانشگاه گیلان، دو فصلنامهٔ علمی پژوهشی بتن، دورهٔ ۷، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان (۱۳۹۳).

18. Xiaoyan Liu, Lei Chen, Aihua Liu, Xinrui Wang, Effect of Nano-$CaCO_3$ on Properties of Cement Paste, In Energy Procedia, International Conference on Future Energy, Environment, and Materials,Volume 16, Part B, Pages 991-996, (2012).

١٩. حمیدرضا احسانی، ایوب دهقانی، محمد رحیم لباف‌زاده، "تاثیر نانو کربنات کلسیم بر مقاومت فشاری سنین اولیه بتن"، چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، (۱۳و ١٤ آبان ماه ١٣٩٤) دانشگاه یاسوج.