

## بررسی تاثیر افزودنی نانوذرات سیلیس در افزایش مقاومت فشاری بتن سبک گازی

سید محمد موسوی<sup>۱</sup>، محمدرضا اکبرپور<sup>۱\*</sup>، بابک علی نژاد<sup>۲</sup>، غلامرضا مهدوی نیا<sup>۳</sup>، مهدی ماجدی اصل<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۲/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۳/۲۶

### چکیده

در این تحقیق، کامپوزیت بر پایه بتن سبک گازی با استفاده از مخلوط دوغابی متشکل از سیمان، ماسه، آهک و پودر آلومینیوم در آب با افزودن نانوذرات سیلیس با توزیع یکنواخت (به مقدار ۱ و ۲ درصد وزنی) ساخته شده و تاثیر افزودن نانوذرات سیلیس بر ریزساختار و مقاومت فشاری کامپوزیت بتنی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که افزودن ذرات نانوسیلیس به میزان ۱ و ۲ درصد وزنی به ترتیب باعث افزایش ۲۰ و ۲۷٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن سبک گازی، همچنین توزیع همگن تخلخل‌های آنها می‌شود. این افزایش به کنترل مقدار  $Ca(OH)_2$ ، یکپارچگی و همگنی تخلخل‌ها در ریزساختار و افزایش روند تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در اثر افزودن نانوذرات سیلیس نسبت داده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بتن سبک گازی، نانوذرات سیلیس، کامپوزیت، مقاومت فشاری.

### ۱- مقدمه

می‌شود. بتن سبک گازی ماده‌ای هماهنگ و سازگار با طبیعت است که تنها با مواد سنگی و سیمان تولید می‌گردد. سبک‌سازی در این نوع بتن بر مبنای ایجاد حباب‌های گازی استوار است. برای ایجاد گاز در این بتن از پودر آلومینیوم استفاده می‌شود [۳]. بخش عمده هزینه‌های اولیه تولید بتن سبک مربوط به ماده سیمان است که در همه انواع بتن کاربرد دارد. از این رو کم کردن سیمان در طرح اختلاط و جایگزینی آن با دیگر مواد به نحوی که مقاومت فشاری بتن را کاهش ندهد بسیار حائز اهمیت است. واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده در مخلوط سیمانی از زمان مخلوط کردن مواد مصرفی و تشکیل

امروزه با گسترش صنعت ساخت و ساز و میل به مرتفع‌سازی در ساختمان‌ها، کم کردن بار مرده ساختمان از اولویت‌های مهندسان است که این امر با استفاده از مصالح جدید و سبک محقق می‌شود [۱،۲]. یکی از این مصالح سبک، که به کم کردن وزن ساختمان و مقابله در مقابل زلزله کمک می‌کند بتن سبک است. بر اساس تعریف موسسه ACI بتن سبک عبارتست از بتنی که وزن مخصوص آن بطور محسوسی کمتر از وزن مخصوص بتن معمولی است و با سنگدانه‌های طبیعی یا شکسته ساخته

\* عهده‌دار مکاتبات: محمدرضا اکبرپور

نشانی: مراغه، دانشگاه مراغه، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۴۱-۳۷۲۷۳۰۶۸، دورنگار: ۰۴۱-۳۷۲۷۶۰۶۰، پست الکترونیکی: [mreza.akbarpour@gmail.com](mailto:mreza.akbarpour@gmail.com)

مسیر را برای کارکرد مناسب‌تر حسگرها و پایش سطح تنش وارد شده به بتن هموارتر می‌کند [۷]. در سالیان اخیر استفاده از نانوذرات سیلیکا در صنایع مربوط به بتن و محصولات سیمانی رشد چشمگیری داشته است، چرا که این نوع ماده نسبت به نمونه‌های قدیمی خود (فوم سیلیکا) از کارایی بیشتری برخوردار است. به دنبال پژوهش‌های متعددی که در سرتاسر دنیا در این رابطه انجام شده است، متخصصان متعددی اذعان داشته‌اند که افزودن نانوذرات سیلیکا، سبب ارتقاء فرآیند هیدراسیون بتن شده و مقاومت سه روزه بتن را افزایش می‌دهد [۸]. تاثیر افزودن نانوذرات سیلیکا بر استحکام قطعات سیمانی و بتن معمولی در چندین تحقیق دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات سیلیس به دلیل اندازه نانوذرات و سطح ویژه زیاد بعنوان عوامل هسته‌زا عمل کرده و باعث تسریع فرآیندهای هیدراسیون، تشکیل C-S-H شده و استحکام مکانیکی و عمر این مواد را افزایش می‌دهد [۹-۱۱]. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد بتن سبک و روش‌های افزایش مقاومت فشاری آن با استفاده از تقویت‌کننده‌های فیبری و افزودنی‌های حاوی سیلیکا صورت گرفته است [۱۲، ۱۳]. اما تحقیقات در مورد امکان افزایش مقاومت فشاری بتن سبک گازی با استفاده از نانوذرات محدود است. در این تحقیق تاثیر افزودن نانوذرات سیلیس به این نوع بتن بر مقاومت فشاری آن مورد بررسی قرار گرفته است، مقاومت فشاری از مشخصه‌هایی است که هر مقدار افزایش یابد می‌تواند این نوع بتن را کارآمدتر و کاربردی‌تر کند.

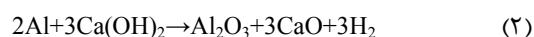
## ۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع A با حداکثر اندازه ذرات ۱۰ میکرون، ماسه سیلیسی خشک با حداقل ۸۰٪ سیلیس دارای اندازه ۰/۱۵ میلی‌متر و عبوری از مش ۱۰۰، آهک پخته شده در دمای °C ۸۰۰، پودر آلومینیوم با اندازه ذرات کمتر از ۲۰ میکرون، فوق روان‌کننده از نوع زودگیر و قهوه‌ای رنگ محصول شرکت فابریک به نام Fabcrete 100 بر پایه نفتالین، سورفکتانت سولفونات لاریل سدیم و آب آشامیدنی برای ساخت بتن استفاده

دوغاب تا تکمیل فرآیند و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بصورت زیر است [۳]. واکنش آهک زنده با آب و تشکیل آهک هیدراته (هیدرو اکسید کلسیم):



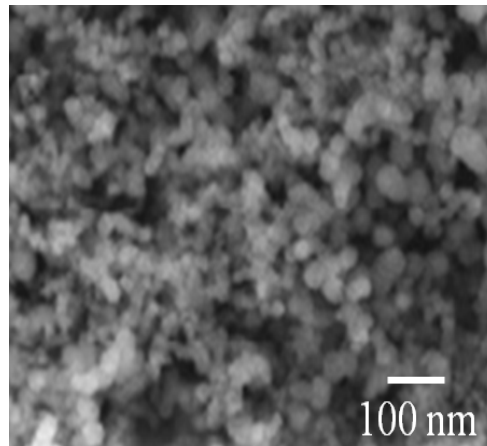
واکنش آهک هیدراته با پودر آلومینیوم و تشکیل گاز هیدروژن و بوجود آمدن تخلخل در بتن:



در نهایت هیدراته شدن سیلیکات کلسیم (واکنش پوزولانی) در بتن و تشکیل فاز C-S-H ( $m\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. مقدار آهک باید به گونه‌ای انتخاب و به دوغاب سیمانی اضافه شود که باعث مصرف کامل آهک در واکنش‌های پوزولانی خمیر سیمان گردد و از طرفی با بیشتر کردن مقدار پودر آلومینیوم میزان حضور بیشتر هیدرو اکسید کلسیم کاهش و به دلیل تشکیل  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (به عنوان هسته‌گذار و شرکت‌کننده در فعالیت پوزولانی) مقاومت فشاری بتن سبک افزایش می‌یابد.

افزودن مواد نانومقیاس به بتن می‌تواند ویژگی‌های عملکردی آن را ارتقاء دهد. تحقیقات لی [۴] نشان داد که نانوسیلیس می‌تواند به نحو چشمگیری بر مقاومت فشاری بتنی که دارای ذرات خاکستر بادی با حجم زیاد است، در روزه‌های اولیه آن بیفزاید. همچنین او نشان داد که نانوسیلیس می‌تواند توزیع اندازه حفره‌ها و خلل و فرج را در بتن توسط پر کردن فضای خالی بین ذرات درشت خاکستر بادی و ذرات سیمان در مقیاس نانو بهبود بخشد. همچنین، بیگلی و گرین وود [۵] نشان دادند که دوغابی از نانوسیلیس آمورف سبب افزایش مقاومت بتن‌های خودمترکم در برابر جدا شدن سنگدانه‌ها می‌شود. علاوه بر این، گزارش شده که افزودن مقادیر ناچیزی از نانولوله‌های کربنی (حدود ۱ درصد وزنی) می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن شود [۶]. مطالعات نشان داده که استفاده از نانوذرات هماتیت ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) علاوه بر افزایش مقاومت بتن، با تغییر مقاومت الکتریکی توده بتن،

شد. افزودنی نانوذرات دارای اندازه ذرات ۵-۱۵ nm بوده که شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این نانوذرات را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تاثیر افزودن نانوذرات سیلیس (۱ و ۲ درصد وزنی) بر مقاومت فشاری بتن سبک گازی ۱، ۷ و ۲۸ روزه.

سه نمونه شاهد بدون ذرات نانوسیلیس (OPC)، سه نمونه کامپوزیت بتنی با ۱ درصدوزنی نانوسیلیس (NS1) و سه نمونه کامپوزیت بتنی با ۲ درصد وزنی نانوسیلیس (NS2) تهیه گردید.

جهت ساخت نمونه شاهد بدون ذرات نانوسیلیس (OPC)، وزن خشک کلیه مواد مورد نیاز را برای این طرح اختلاط آماده کرده و سیمان، ماسه، آهک و پودر آلومینیوم درون همزن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. درون قالب‌ها کاملاً با مواد عایق پوشانده و جهت قالب ریزی مخلوط سیمانی آماده شدند. پس از اضافه کردن ۵۰٪ آب به مخلوط، به مدت ۵ دقیقه با همزن مخلوط شدند. سپس به ترتیب روان کننده حل شده با ۱۰٪ آب و پس از آن باقی‌مانده آب به مخلوط اضافه و به مدت ۵ دقیقه دوغاب سیمانی با همزن مخلوط گردید.

قالب‌ریزی برای ۳ نمونه مکعبی به ابعاد  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  انجام گرفت، بطوریکه کل دوغاب دو سوم حجم قالب را پر کند. سپس قالب در محفظه با دمای  $50^\circ \text{C}$  به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد تا واکنش‌ها با سرعت بیشتری صورت گیرد. در این مرحله واکنش‌های شیمیایی شروع شده و بتن شروع به افزایش حجم و انبساط کرد. مقادیر آهک و آب به گونه‌ای تنظیم شدند که مخلوط فقط ۳۰٪ افزایش حجم

پیدا کرده تا جرم مخصوص خشک بین  $1/1-1/2 \text{ g/mm}^3$  که محدوده استاندارد بتن سبک گازی است، قرار گیرد. بعد از انبساط بتن و پر شدن یک سوم باقی‌مانده قالب، به مدت ۲ ساعت قالب در دمای محیط قرار گرفت تا سیمان به خود بگیرد.

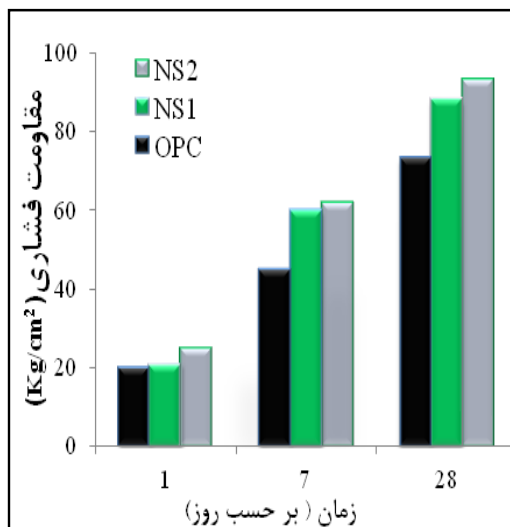
پس از گذشت ۲ ساعت از قالب ریزی، محصولات از قالب‌های عایق‌کاری شده جدا و درون سیستم اتوکلاو (در فشاری معادل ۲ بار و دمایی در حدود  $130^\circ \text{C}$ ) به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند.

نمونه‌های خارج شده از سیستم اتوکلاو، بلافاصله در محفظه در بسته به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شدند تا بخار درون نمونه‌ها باعث عمل آوری و سرعت بخشی به تشکیل کریستال‌های نهایی بتن (C-H-S) شود. سپس نمونه در درون محفظه پر آب با دمای ثابت  $25^\circ \text{C}$  جهت کسب مقاومت بالا و نگهداری مرطوب قرار گرفتند.

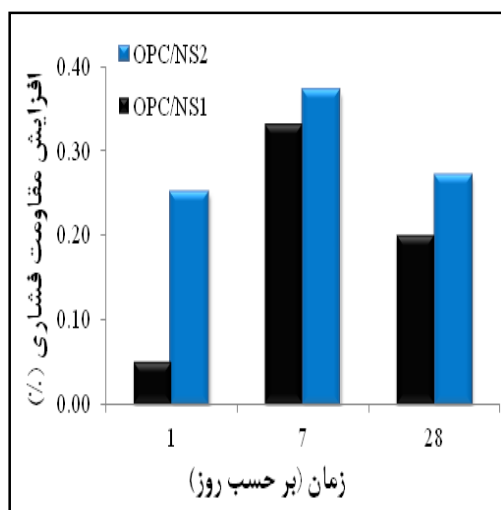
کار ساخت نمونه کامپوزیت بتنی با ۱ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (NS1) و نمونه کامپوزیت بتنی با ۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (NS2)، همانند عملیات انجام شده برای نمونه شاهد تکرار گردید. جهت توزیع یکنواخت نانوذرات در داخل بتن سبک گازی، ذرات نانوسیلیس قبل از اضافه کردن به مخلوط با استفاده از سورفکتانت و اعمال انرژی فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه با فرکانس ۶۰ هرتز همراه با ۵۰٪ آب آشامیدنی مورد نیاز جهت ساخت نمونه کاملاً یکنواخت در آب پخش شدند. متوسط مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط دستگاه سنجش مقاومت فشاری به ترتیب پس از ۱، ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. اعمال نیرو توسط دستگاه به صورت عمودی بوده و توسط جک پایینی صورت گرفته است.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج مقاومت فشاری متوسط ۱، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کامپوزیت بتنی OPC، NS1 و NS2 در جدول ۱ آمده است. با توجه به داده‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نهایی (۲۸ روزه) نمونه OPC،  $73 \text{ kg/cm}^2$ ، مقاومت فشاری نهایی (۲۸ روزه) نمونه NS1،  $88 \text{ kg/cm}^2$ ، مقاومت فشاری نهایی (۲۸ روزه) نمونه NS2،  $93 \text{ kg/cm}^2$  است. بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها بیانگر این مطلب



شکل ۲: تاثیر افزودن نانوذرات سیلیس (۱ و ۲ درصد وزنی) بر مقاومت فشاری بتن سبک گازی ۱، ۷ و ۲۸ روزه.



شکل ۳: مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های NS1 و NS2 نسبت به نمونه مرجع بدون نانوذرات سیلیس (OPC) پس از ۱، ۷ و ۲۸ روز.

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه کامپوزیت بتنی OPC (بدون ذرات نانوسیلیس) در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. این تصاویر عدم یکپارچگی و پیوستگی در شکل‌گیری خمیر سیمان را به وضوح نشان می‌دهند. ماهیت حباب‌ها در کاهش کشش سطحی به دلیل پیوستن بهم و افزایش حجم خود، باعث کاهش پایداری و مقاومت بتن می‌شود [۱۴].

است که که مقاومت فشاری نهایی نمونه کامپوزیت بتنی دارای نانوذره نسبت به نمونه بدون ذرات نانو به اندازه  $20 \text{ kg/cm}^2$  یا  $27\%$  افزایش یافته است.

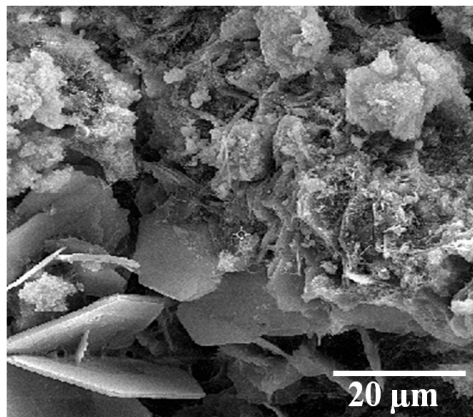
جدول ۱: متوسط مقاومت فشاری (بر حسب  $\text{kg/cm}^2$ ) و ۷، ۱ و ۲۸ روزه نمونه‌ها.

نام نمونه	استحکام ۱ روزه	استحکام ۷ روزه	استحکام ۲۸ روزه
OPC	۲۰	۴۵	۷۳
NS1	۲۰	۶۰	۸۸
NS2	۲۵	۶۲	۹۳

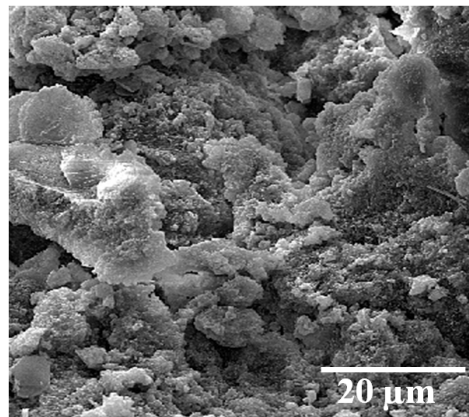
با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری ۱، ۷ و ۲۸ روزه نمونه NS1 نسبت به نمونه OPC (مرجع) به ترتیب ۵، ۳۳ و  $20\%$  افزایش یافته است. مقاومت فشاری ۱، ۷ و ۲۸ روزه نمونه NS2 نسبت به نمونه OPC (مرجع) به ترتیب ۲۵، ۳۷ و  $27\%$  افزایش یافته است. بر اساس تحقیقات انجام یافته روی بتن، سیلیس ترکیب پوزولانی سیمانی مهمی است که می‌تواند با هیدروکسید کلسیم حاصله از هیدراسیون سیمان واکنش نشان داده و منجر به تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شود که فاکتور مهم در استحکام بتن می‌باشد. سرعت واکنش‌های پوزولانی به سطح در دسترس برای واکنش وابسته است. از آنجائیکه نانوسیلیس دارای سطح ویژه زیادی است، باعث وقوع آسان واکنش پوزولانی می‌شود. بنابراین افزودن مقدار کمی از آن به بتن سبک باعث افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود. نتایج افزایش استحکام فشاری در اثر افزودن نانوذرات سیلیس روی بتن سبک گازی، مطابق با نتایج سایر محققان روی بتن معمولی است [۴، ۵].

شکل‌های ۲ و ۳ نشان دهنده اثر تقویت‌کنندگی نسبی ذرات نانوسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌ها است. در واقع وجود نانوذرات سیلیس به عنوان مراکز دارای انرژی بالا باعث اصلاح ریزساختار بتن، مصرف بیشتر  $\text{Ca(OH)}_2$  و کنترل اندازه ذرات هیدروژن و توزیع یکنواخت آنها در مخلوط سیمانی شده است [۱۴].

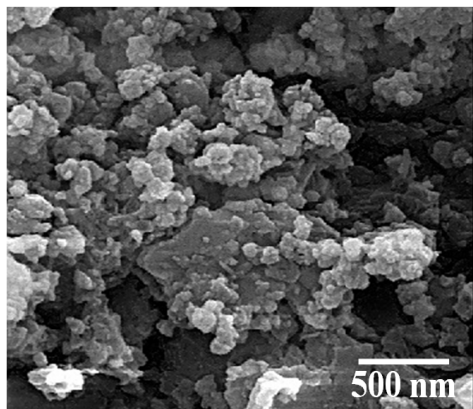
تصویرهای میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های کامپوزیت بتنی OPC، NS1، NS2 در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



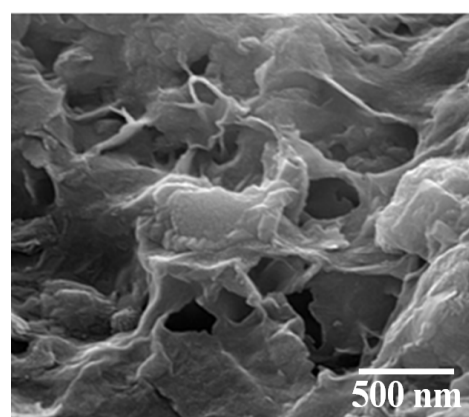
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۱ درصد وزنی و نانوذرات سیلیس (NS1) در بزرگنمایی‌های الف) ۲۰۰۰۰ و ب) ۵۰۰۰۰ (از ناحیه مشخص شده در قسمت الف).

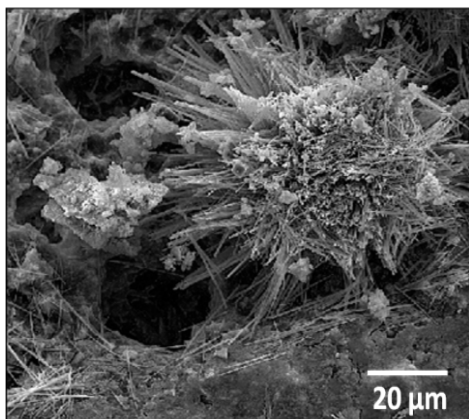
شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه کامپوزیت بتنی OPC (بدون ذرات نانوسیلیس) در بزرگنمایی‌های الف) ۲۰۰۰۰ و ب) ۵۰۰۰۰.

وجود نانوذرات سیلیس در دوغاب سیمانی بعد از شروع شکل‌گیری خمیر سیمان، باعث کنترل حرکت جریان آب اضافی به سمت بالا و در لابلای خمیر سیمان گشته و از ایجاد ناهمگونی بین مصالح سیمانی که همراه با آب حرکت می‌کنند، جلوگیری می‌کند [۱۷].

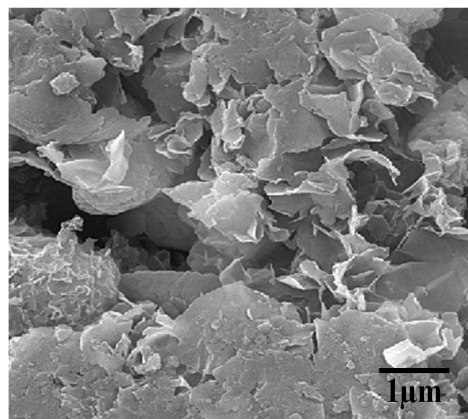
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۲ درصد وزنی ذرات نانوسیلیس (NS2) در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که افزایش دو برابری نانوذرات سیلیس یکپارچگی، پیوستگی و همگنی در شکل‌گیری خمیر سیمان را افزایش داده است و کریستال‌های بزرگ  $\text{Ca(OH)}_2$  قابل مشاهده نیستند [۱۸]. در نتیجه باعث افزایش حجم ژل C-S-H هم در مناطق وسیع و هم در جهات مختلف در ماتریس سیمانی گشته است به گونه‌ای که ساختار به دست آمده بر

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۱ درصد وزنی و نانوذرات سیلیس (NS1) در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این تصاویر به دلیل وجود نانوذرات سیلیس، حجم ژل C-S-H تشکیل شده نسبت به نمونه مرجع بیشتر بوده و شاهد رشد این کریستال‌ها در مکان‌های گسترده نمونه بتنی بصورت همگن است که باعث اتصال بهتر خمیر-سنگدانه می‌شود [۱۵].

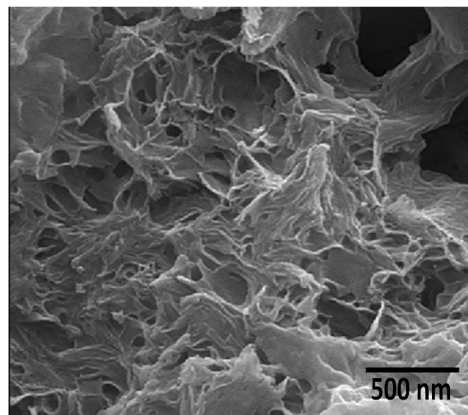
در این تصاویر افزایش حجم ژل C-S-H در ماتریس سیمانی را نشان می‌دهند که به دلیل قرارگیری نانوذرات سیلیس در منافذ خمیر سیمان بوده و باعث جلوگیری از توسعه کریستال‌های  $\text{Ca(OH)}_2$  و در نتیجه کاهش حجم این کریستال‌ها و در نتیجه افزایش حجم ژل C-S-H در ماتریس سیمانی می‌گردد [۱۶].



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (NS2) نشان دهنده تشکیل ژل بنیادین C-S-H در کنار تخلخل‌ها.



(الف)



(ب)

شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (NS2) در بزرگنمایی (الف) ۲۰۰۰۰ و (ب) ۵۰۰۰۰.

ساختار آموخته‌تر بصورت همگن و یکپارچه و تخلخل‌ها در خمیر سیمان کوچکتر دیده می‌شود [۲۰].

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر حضور ذرات نانوسیلیس و تاثیر آن بر مقاومت فشاری نمونه کامپوزیت بتنی سبک‌گازی و عوامل تاثیرگذار بر آن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های میکروسکوپی نشان دادند که در اثر افزودن نانوذرات سیلیس، حجم ژل C-S-H تشکیل شده نسبت به نمونه مرجع بیشتر بوده و رشد این کریستال‌ها در مکان‌های گسترده نمونه بتنی به صورت همگن اتفاق می‌افتد که باعث اتصال بهتر خمیر و سنگدانه می‌شود. همچنین افزودن ذرات نانوسیلیس به بتن سبک‌گازی سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری آن شد بطوریکه مقاومت فشاری نمونه کامپوزیت بتنی سبک‌گازی در حضور ذرات نانوسیلیس بیش از ۲۷٪ افزایش یافت. این افزایش در مقاومت فشاری، به مصرف بیشتر  $\text{Ca(OH)}_2$  و سرعت‌بخشی در واکنش‌های پوزولانی و تشکیل سریع‌تر ژل C-S-H، هسته‌گذاری در سطح نانوسیلیس و ایجاد همگنی در خمیر سیمان که باعث کنترل اندازه تخلخل ناشی از تشکیل هیدروژن می‌شود و افزایش کارپذیری خمیر سیمان به سبب کند روانی فاز مایع در حضور نانوذرات  $\text{SiO}_2$ ، نسبت داده می‌شود.

اساس انرژی سطحی بالای این نانوذرات باعث تثبیت مواد سیمانی به صورت معلق شدن در تمام فضای سه بعدی نمونه‌ها و جلوگیری از حرکت صعودی آب و ته‌نشین شدن بقیه مصالح شرکت کننده در خمیر سیمان شده و باعث رشد نقطه به نقطه آن در تمام مناطق خمیر سیمان شده است [۱۶].

تخلخل‌ها همواره تمایل دارند بهم بپیوندند و حجم خود را جهت کاهش انرژی سطحی افزایش دهند. شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (NS2) را نشان می‌دهد. این تصویر به وضوح نشان می‌دهد که ژل بنیادین C-S-H در کنار تخلخل‌ها شکل گرفته و باعث کنترل اندازه و نیز تثبیت مکان آنها شده است. تاثیر هسته‌زایی نانوذرات سیلیس موجب بهبود اندازه منافذ و عدم بزرگ شدن تخلخل ناشی از آزاد شدن هیدروژن می‌شوند [۱۹]. با حضور کم ذرات در بتن

## مراجع

- [11] G. Land, D. Stephan, *Cement and Concrete Composites*, **57**, 2015, 64.
- [12] J. Choi, G. Zi, S. Hino, K. Yamaguchi, S. Kim, *Construction and Building Materials*, **69**, 2014, 381.
- [13] Royce W. Floyd, W. Micah Hale, Jared C. Bymaster, *Construction and Building Materials*, **85**, 2015, 91.
- [14] Q. Ye, Z. Zhang, L. Aheng, R. Chen, *Journal of Wuhan University of Technology*, **21**, 2006, 153.
- [15] A. Sadrmomtazi, A. Balalaci, F. Fasihi, A.K. Haghy, "Investigation of Mechanical and Physical properties of Mortars contoning Silica Fume and Nano-SiO<sub>2</sub>", *3<sup>rd</sup> International Conference on Concrete and Development*, Tehran, Iran, 2009.
- [16] M.N. Haque, H. Al-Khaiat, O. Kayali, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 2004, 307.
- [17] Y.C. Ke, P. Stroeve, "Polymer-layered silicate and silica nanocomposites", Elsevier, Amsterdam, 2005.
- [18] G. Land, D. Stephan, *Journal of Materials Science*, **47**, 2012, 1011.
- [19] P. Mondal, S.P. Shah, L.D. Marks, J.J. Gaitero, *Journal of Transportation Research*, **2141**, 2010, 6.
- [20] M. Pagliaro, "Nano-Age (How nanotechnology change our future)", Wiley, New York, 2010.
- [1] Standard Practice for Selecting proportions for structural lightweight concrete, ACI 211.2-98, 1998.
- [2] M.F. Ashby, P.J. Ferreira, D.I. Schodeck, "Nanomaterials, Nanotechnologies and design", Elsevier, Oxford, 2009.
- [3] B.K. Bardhan Roy, W.F.G. Crozier, "FIP manual of lightweight aggregate concrete", 2<sup>nd</sup> Edition, University of Surrey Press, London, 1983.
- [4] G. Li, *Cement and Concrete Research*, **34**, 2004, 1043.
- [5] C. Bigley, P. Greenwood, *Concrete*, **37**, 2003, 43.
- [6] S. Sasmal, B. Bhuvaneshwari, N.R. Iyer, *Progress in Nanotechnology and Nanomaterials*, **2**, 2013, 117.
- [7] A. Khoshakhlagh, A. Nazari, G.R. Khalaj, *Journal of Materials Science and Technology*, **28**, 2012, 73.
- [8] A. Sadrmomtazi, A. Fasihi, *Advanced Materials Research*, **346**, 2012, 18.
- [9] M. Hasan Biricik, *Materials Research*, **17**, 2014, 570.
- [10] V.V. Potapov, A.V. Tumanov, M.S. Zakurazhnov, A.A. Cerdan, A.N. Kashutin, K.S. Shalaev, *Glass Physics and Chemistry*, **39**, 2013, 425.