

تأثیر نانورس بر مشخصات رئولوژیکی، مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی

میرعلیمحمد میرگذار لنگرودی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشگاه محقق اردبیلی
یعقوب محمدی*
دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

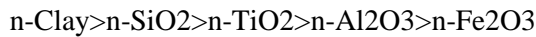
بتن در کلیه ابعاد طولی ماده‌ای ناهمگون به حساب می‌آید و ریزساختار آن در طی دهه‌های متمادی در حال تکامل یافتن است. با استفاده از نانوذرات، تغییر در ریزساختار مصالح سیمانی با هدف کنترل مشخصات روانی و مکانیکی از اولین میکروتانیه ممکن است. این پژوهش با هدف انجام مطالعات جامعی در خصوص بررسی تأثیرات ناشی از افزودن مقادیر مختلف نانورس بر بهبود مشخصات کامپوزیت‌های سیمانی برنامه‌ریزی گردید. از این رو خمیرها و ملات‌های سیمانی با نسبت‌های مختلف جایگزینی (۰٪، ۰.۵٪، ۱٪، ۱.۵٪، ۲٪ و ۳٪ وزن سیمان مصرفی) ساخته شده و تأثیرات افزودن نانورس بر تغییر در دمای هیدراسیون، مشخصات رئولوژیکی (چسبندگی، تعیین آب نرمال و زمان گیرش)، مکانیکی (مقاومت فشاری) و دوام (جذب آب و انقباض ناشی از خشک‌شدگی) مخلوط‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ریزساختار ماتریس سیمانی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از تأثیرات مطلوب افزودن نانوذرات رس بر رفتار کامپوزیت‌های سیمانی مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: نانورس، کامپوزیت سیمانی، مشخصات رئولوژیکی، مقاومت فشاری، SEM.

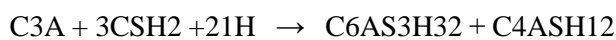
* نویسنده مسئول: yaghoubm@uma.ac.ir

۱- مقدمه

سیلیس و نانورس مونت موریلونیت^۹ که به میزان ۱٪ وزن مصالح سیمانی حاوی نانوذرات مذکور بوده‌اند، تأثیرات مطلوبی بر مشخصات مکانیکی و دوام نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده شده است. به عنوان نمونه مقایسه‌ای در خصوص میزان کاهش نفوذپذیری یون کلراید در بتن‌های حاوی این نانوذرات منجر به نتیجه‌گیری زیر گردید [۱۷]:



شایان ذکر است که بهبود مشخصات حاصل به علت اصلاح در ابعاد نانو به عوامل مختلفی از قبیل نوع نانوذرات و کانی‌های تشکیل دهنده آنها [۱۸]، ابعاد و شکل نانوذرات، واکنش‌زا یا غیرفعال بودن آنها و همچنین راهکار پخش نانوذرات در ماتریس سیمانی وابسته است [۱۹]. مهمترین ترکیباتی که در واکنش‌های سیمانی مشارکت دارند C_3S ، C_2S ، C_3A ، C_4AF و گچ^{۱۴} می‌باشد. در اولین گام از واکنش‌های سیمانی، C_3A با آب واکنش می‌دهد و اترینگایت^{۱۵} با فرمول شیمیایی هگزاکلسیم آلومینات تری سولفات هیدرات و مونوسولفوآلومینات^{۱۶} تولید می‌کند.



طی واکنش دیگری، C_3S و C_2S با آب واکنش می‌دهند و S-H و CH تولید می‌کنند:



C-S-H نقش اصلی را در مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده و در نتیجه بتن ایفا می‌کند. CH علاوه بر اینکه نقش مطلوبی در مشخصات مکانیکی بتن ندارد، سبب کاهش دوام بتن در مقابل محیط‌های مخرب می‌گردد. لذا اتخاذ شیوه‌ای با هدف مصرف هر چه بیشتر آن به منظور دستیابی به افزایش در سطح تولید بلورهای مفید در واکنش‌های سیمانی بتن می‌تواند با ایجاد ناحیه

نانو تکنولوژی به مطالعه مواد با ساختار کوچک در محدوده کمتر از نانومتر تا چند صد نانومتر می‌پردازد. در این محدوده ابعادی، مواد، رفتار ویژه‌ای از خود نشان می‌دهند. نانوذرات از سطح ویژه بسیار بالایی برخوردار می‌باشند و این امر واکنش‌پذیری این مواد را به شدت افزایش می‌دهد. هر نانوذره می‌تواند به صورت یک مرکز جوانه‌زنی^۱ در واکنش هیدراسیون سیمان پرتلند تأثیرگذار باشد. برآیند این حضور سبب بهبود ریزساختار خمیر سیمان به واسطه افزایش سرعت اولیه واکنش هیدراسیون سیمان، افزایش مقدار ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده^۲ حاصل از واکنش‌های پوزولانی، کاهش تخلخل و بهبود مشخصات مکانیکی ساختار ژل به واسطه افزایش در محتوای آلومینا و افزایش طول زنجیره سیلیکاتی می‌گردد [۱]. پیشرفت نانو تکنولوژی به عنوان علمی بین‌رشته‌ای نیازمند انجام هم‌زمان مطالعات تئوریک و تحقیقات آزمایشگاهی است. امروزه کلیه محققین حوزه تکنولوژی بتن در سراسر دنیا بر این باورند که نانو تکنولوژی از پتانسیل لازم جهت ایجاد انقلابی عظیم در دنیای علم تکنولوژی بتن برخوردار می‌باشد. چراکه کلیه پارامترهای اساسی در عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی شامل مشخصات رئولوژیکی، مکانیکی و دوام از نانو ساختار آن سرچشمه می‌گیرد. در سال‌های اخیر، تعداد مطالعات صورت گرفته بر روی نانوذرات رشد فزاینده‌ای داشته است. با اینکه اکثر مطالعات صورت گرفته در محدوده مهندسی عمران، در خصوص بررسی تأثیرات نانو سیلیس^۳ و نانو اکسید تیتانیوم^۴ بر مشخصات کامپوزیت‌های سیمانی اشاره دارد، با این وجود تحقیقات معدودی در خصوص تأثیر افزودن نانوذراتی چون نانو اکسید آلومینیوم^۵، نانو اکسید آهن دو ظرفیتی^۶، نانو اکسید آهن سه ظرفیتی^۷ و نانورس^۸ [۲-۱۶] بر کامپوزیت‌های سیمانی صورت پذیرفته است. طی آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن معمولی حاوی نانوذرات TiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، نانو

9 Montmorillonite

10 2CaO . SiO₂11 3CaO . SiO₂12 3CaO . Al₂O₃13 4CaO . Al₂O₃ . Fe₂O₃14 CaSO₄ . 2H₂O

15 Ettringite

16 Monosulfoaluminate

1 Nucleation Center

2 Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)

3 Nano Silica (nano-SiO₂)4 Nano Titanium Oxide (nano-TiO₂)5 Nano-Al₂O₃6 Nano-Fe₂O₃7 Nano-Fe₃O₄

8 Nano-Clay

انتقال ۱ قوی تری بین خمیر سیمان و سنگدانه ها، در بهبود مشخصات مکانیکی و پایایی بتن موثر باشد. یکی از انواع افزودنی ها که می تواند در این خصوص مفید واقع گردد رس می باشد. رس با CH واکنش می دهد که در نتیجه آن مقادیر بیشتری C-S-H تولید می گردد. این امر منجر به متراکم تر شدن ریزساختار بتن حاصل می گردد. واکنش پوزولانی رس با CH به قرار زیر است [۱۹]:

$$AS_2 + CH \rightarrow C_2ASH_8 + C_3S_2H_8 \text{ (C-S-H)}$$

اساساً سه مکانیزم عمل می تواند سبب بروز بهبود در مشخصات کامپوزیت های سیمانی به علت افزودن نانوذرات رس به ماتریس گردد [۲۰]. نانورس می تواند با توجه به ابعاد بسیار کوچکش، به صورت پرکننده عمل نموده و حفرات خالی ماتریس سیمانی را پر کند. مقادیر بالای SiO₂ موجود در نانورس می تواند منجر به تولید مقادیر بیشتری C-S-H گردد. همچنین تورم نانوذرات رس به علت جذب آب مابین لایه های آن می تواند منجر به انبساط رس و در پی آن بهبود بخشیدن به اثر پرکنندگی در حفرات کاپیلاری ماتریس سیمانی گردد [۲۰].

مُرسی ۲ و همکاران [۴] در مطالعه ای، مقاومت فشاری و کششی ملات های اصلاح شده با نانورس را در سن ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با نانورس با درصدهای ۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ وزن سیمان صورت پذیرفته و نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰٫۵ در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن نانورس به ساختار سیمان، افزایش در مقاومت فشاری و کششی ملات های حاصل را به همراه داشته است. میزان این افزایش در مقاومت فشاری و کششی برای استفاده از نانورس به میزان ۸٪ وزن مصالح سیمانی به کار رفته در ملات به ترتیب معادل ۷٪ و ۴۹٪ گزارش شده است. در مطالعه ای دیگر مُرسی و همکاران [۹] ملات های حاوی نانورس را که در آنها جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با نانوذرات رس با درصد های ۰٪ و ۶٪ صورت گرفته بود مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان از ۱۸٪ افزایش در مقاومت فشاری داشته است. مُرسی و

آگلان [۳] [۱۰] خمیر سیمان حاوی نانورس را مورد مطالعه قرار دادند که در آن ذرات نانورس با درصد های ۰٪، ۲٪ و ۴٪ وزنی به ماتریس اضافه شده اند. آنان اظهار داشتند که افزودن نانورس سبب بهبود مقاومت کششی غیر مستقیم خمیر سیمان گردیده است که بر این اساس، افزودن نانورس به میزان ۲٪ وزنی منجر به بیشترین میزان افزایش مقاومت (معادل ۲۵٪ نسبت به خمیر سیمان کنترل) در سن ۲۸ روز گردید. علی ۴ و همکاران [۱۱] در مطالعه ای، پتانسیل نانورس در بهبود خواص ملات های حاوی پودر شیشه ضایعاتی را مورد بررسی قرار دادند که در آن مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و انرژی شکست ملات های حاوی درصد های مختلف پودر شیشه بازیافتی ۵ شامل ۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ وزن مصالح سیمانی که با نانوذرات رس اصلاح گردیده بود مورد مطالعه قرار گرفت. جایگزینی نانوذرات رس با مصالح سیمانی به میزان ۲٫۵٪ وزنی در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن نانورس، سبب افزایش در میزان مقاومت فشاری و خمشی و انرژی شکست گردیده است. یگانه ۶ و همکاران [۷] برای بهبود مشخصات تقلیل یافته ملات به واسطه افزودن پودر پلی استایرن فوق فشرده ۷ از نانورس به میزان ۵٪ وزن سیمان استفاده نمودند که در نتیجه آن افزایش در مقاومت فشاری و مدول فشرده گی به میزان ۲۱٫۵٪ و ۴٫۵۷٪ حاصل گردید. گزارشی مبنی بر استفاده از نانورس بر ماتریس سیمانی توسط چانگ ۸ و همکاران [۶] ارائه شد که در آن تاثیر مثبت افزودن نانورس در افزایش مقاومت فشاری معادل ۱۳٫۲۴٪ ارزیابی گردید. در این مطالعه نسبت آب به سیمان ثابت و معادل ۰٫۵۵ در نظر گرفته شده و از سیمان تیپ I استفاده گردید. همچنین مقادیر ۰٫۲٪، ۰٫۴٪، ۰٫۶٪ و ۰٫۸٪ وزن مصالح سیمانی نانورس از نوع مونتموریلونیت با ساختار شیمیایی حاوی ۷۲٫۴ درصد SiO₂ و ۱۷ درصد Al₂O₃ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج گویای این مطلب است که استفاده از نانورس به میزان ۰٫۶٪ وزنی سبب ایجاد بیشترین افزایش در مقاومت فشاری گردیده است. برایتسون ۹ و همکاران [۱۲] تاثیر نانورس را بر مقاومت مکانیکی بتن و ملات های سیمانی حاوی این

انتقال ۱ قوی تری بین خمیر سیمان و سنگدانه ها، در بهبود مشخصات مکانیکی و پایایی بتن موثر باشد. یکی از انواع افزودنی ها که می تواند در این خصوص مفید واقع گردد رس می باشد. رس با CH واکنش می دهد که در نتیجه آن مقادیر بیشتری C-S-H تولید می گردد. این امر منجر به متراکم تر شدن ریزساختار بتن حاصل می گردد. واکنش پوزولانی رس با CH به قرار زیر است [۱۹]:



اساساً سه مکانیزم عمل می تواند سبب بروز بهبود در مشخصات کامپوزیت های سیمانی به علت افزودن نانوذرات رس به ماتریس گردد [۲۰]. نانورس می تواند با توجه به ابعاد بسیار کوچکش، به صورت پرکننده عمل نموده و حفرات خالی ماتریس سیمانی را پر کند. مقادیر بالای SiO₂ موجود در نانورس می تواند منجر به تولید مقادیر بیشتری C-S-H گردد. همچنین تورم نانوذرات رس به علت جذب آب مابین لایه های آن می تواند منجر به انبساط رس و در پی آن بهبود بخشیدن به اثر پرکنندگی در حفرات کاپیلاری ماتریس سیمانی گردد [۲۰].

مُرسی ۲ و همکاران [۴] در مطالعه ای، مقاومت فشاری و کششی ملات های اصلاح شده با نانورس را در سن ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با نانورس با درصدهای ۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ وزن سیمان صورت پذیرفته و نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰٫۵ در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن نانورس به ساختار سیمان، افزایش در مقاومت فشاری و کششی ملات های حاصل را به همراه داشته است. میزان این افزایش در مقاومت فشاری و کششی برای استفاده از نانورس به میزان ۸٪ وزن مصالح سیمانی به کار رفته در ملات به ترتیب معادل ۷٪ و ۴۹٪ گزارش شده است. در مطالعه ای دیگر مُرسی و همکاران [۹] ملات های حاوی نانورس را که در آنها جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با نانوذرات رس با درصد های ۰٪ و ۶٪ صورت گرفته بود مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان از ۱۸٪ افزایش در مقاومت فشاری داشته است. مُرسی و

- 6 Yeganeh
- 7 High Impact Polystyrene
- 8 Chang
- 9 Brightson

- 1 Interfacial Transition Zone (ITZ)
- 2 Morsy
- 3 Aglan
- 4 Aly
- 5 Waste Glass Powder

نمونه های حاوی ۲۰٪ و ۵۰٪ پودر شیشه ضایعاتی محدود می کند. تاثیر نانورس در کاهش گسترش واکنش های قلیایی-سیلیسی را می توان به کاهش در مقدار CH و در نتیجه جلوگیری از تولید ژل متورم کننده ۷ نسبت داد [۱۴]. علی و همکاران [۱۵] با اندازه گیری انرژی شکست، مقاومت خمشی و مقاومت ضربه ای انواع مختلفی از ملات، بعد از ۵۰ سیکل تر و خشک شدن به بررسی دوام نمونه های حاوی نانورس پرداختند. ملات کنترل حاوی ۱٪ حجمی الیاف کتان بوده و بخشی از محتوای سیمانی با ۲۰٪ وزنی پودر شیشه ضایعاتی ۸ و ۲٫۵٪ وزنی نانورس جایگزین شده است. نتایج بیانگر آن است که افزودن پودر شیشه ضایعاتی و نانورس به ماتریس سیمانی سبب ۴٫۴٪، ۱۱۰٪ و ۲۰۴٫۷٪ افزایش در میزان انرژی شکست، مقاومت خمشی و مقاومت ضربه ای پس از وقوع سیکل های تر و خشک شدن می گردد. برایسون و همکاران [۱۲] تاثیر نانورس بر درجه نفوذپذیری بتن و ملات های سیمانی حاوی نانورس به میزان ۰٫۵٪، ۱٪ و ۱٫۵٪ وزن مصالح سیمانی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده گردید که افزودن نانورس به ساختار بتن و ملات سبب کاهش در میزان نفوذ پذیری می گردد.

مونتموریلونیت رایج ترین نوع رس برای ساخت نانوکامپوزیت ها می باشد و از کریستال های صفحه ای میکروسکوپییک ساخته شده است. محتوای آب آن متغیر بوده و هنگامی که آب توسط کریستال ها جذب می گردد، چندین برابر نسبت به حجم اولیه خود متورم می گردند. این مشخصات کانی مونتموریلونیت را به یک کانی بسیار سودمند تبدیل می نماید. لذا این مقاله به ارائه نتایج حاصل از انجام آزمایشات گسترده ای در خصوص تاثیر افزودن نانوذرات رس بر مشخصات خمیر سیمان و ملات سیمانی می پردازد. بدین منظور مخلوط هایی با نسبت های جایگزینی مختلف اعم از ۰٪، ۰٫۵٪، ۱٪، ۱٫۵٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۸٪ وزن سیمان با نانوذرات مونت موریلونیت ساخته شد و تغییرات دمای هیدراسیون، زمان گیرش اولیه و نهایی، مشخصات رئولوژیکی، مکانیکی و دوام مخلوط های مذکور مورد مطالعه قرار می گیرد.

نانوذره به میزان ۰٫۵٪، ۱٪ و ۱٫۵٪ وزن مصالح سیمانی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده گردید که افزودن نانورس به ساختار بتن و ملات سبب بهبود مشخصات مکانیکی در کلیه سنین می گردد. فرزادینیا و همکاران [۲۰] در مطالعه ای تاثیرات استفاده از نانورس به میزان ۰٫۱٪، ۰٫۲٪ و ۰٫۳٪ حجم مصالح سیمانی را بر مقاومت فشاری ملات مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که حضور نانورس در اختلاط سبب افزایش مقاومت فشاری شده که این افزایش با افزایش در میزان نانورس مصرفی تا ۳٪ (که مورد مطالعه بوده است) افزایش می یابد. مقاومت فشاری ملاتهای حاوی ۰٫۳٪ وزن مصالح سیمانی نانورس به میزان ۲۴٪ افزایش یافته است. هی ۲ و شی ۳ [۱۳] نفوذپذیری ملات های سیمانی اصلاح شده با ۱٪ نانورس را مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که افزودن نانورس به ساختار سیمان سبب کاهش ضریب نفوذ یون کلراید ۴ می گردد. چانگ و همکاران [۶] ضریب نفوذ پذیری ۵ خمیر سیمان را در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز مورد بررسی قرار دادند که در آن خمیر سیمان با درصد های متفاوتی از نانورس مونتموریلونیت اصلاح گردیده است. اختلاط های مورد مطالعه در چهار دسته شامل درصد های مختلفی از نانورس اعم از ۰٫۲٪، ۰٫۴٪، ۰٫۶٪ و ۰٫۸٪ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله با یکدیگر و با نتایج حاصله از انجام آزمایشات بر نمونه شاهد مقایسه گردید. همچنین نسبت آب به سیمان ثابت و معادل با ۰٫۵۵ در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده گردیده است که افزودن نانورس مونتموریلونیت به میزان ۰٫۴٪ وزنی به خمیر سیمان، بیشترین میزان کاهش در ضریب نفوذپذیری را در تمامی سنین به همراه داشته که میزان این کاهش در سن ۵۶ روزگی به ۴۹٫۹۵٪ رسیده است. علی و همکاران [۱۱] گسترش واکنش های قلیایی-سیلیسی ۶ در ملات های حاوی ۲۰٪ و ۵۰٪ وزنی پودر شیشه ضایعاتی را در دو حالت با و بدون نانورس مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه مشاهده گردید که افزودن نانورس به میزان ۲٫۵٪ وزنی، گسترش واکنش های قلیایی-سیلیسی را در حدود ۴۶٫۵۶٪ و ۴۵٫۵۸٪ به ترتیب در

5 Permeability Coefficient
6 Alkali- Silica Reaction
7 Swelling gel
8 Waste Glass

1 Farzadnia
2 He
3 Shi
4 Diffusion Coefficient on Chloride ion Penetration

یک کاردک نمونه حاصل به صورت دستی هم زده شد و پس از آن مجدداً به مدت دو دقیقه با سرعت ۱۴۵ دور در دقیقه مخلوط گردید. در ادامه مجدداً عملیات هم زدن دستی بر روی مخلوط انجام شد و در نهایت مخلوط به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۲۸۵ دور در دقیقه هم زده شد. در شیوه دوم، در ابتدا نانوذرات رس با استفاده از یک همزن دور بالا (۱۰۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۲ دقیقه با آب اختلاط هم زده شدند. سپس مخلوط معلق آب- نانورس به سیمان اختلاط اضافه گردید و عملیات ساخت خمیر سیمان مشابه با شیوه اول پس از اضافه شدن آب به ترکیب ادامه یافت. از دو روش ذکر شده در ساخت ملات های مورد مطالعه نیز استفاده گردید. با این تغییر که در شیوه اول، ماسه اختلاط درست پس از مخلوط شدن سیمان و نانوذرات و قبل از اضافه شدن آب به مخلوط اضافه گردید. همچنین در شیوه دوم قبل از اضافه شدن مخلوط معلق آب و نانوذره به سیمان، ماسه و سیمان به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۱۴۵ دور در دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با هر یک از این دو شیوه پس از نگهداری به مدت ۲۸ روز در محیط آب آهک اشباع اندازه گیری گردید. شواهد حاکی از آن بود که استفاده از شیوه اول در ساخت خمیر و ملات سیمانی منجر به دستیابی به مقاومت فشاری بالاتری می گردد. لذا به نظر می رسد فرآیند پخش نانوذرات در ماتریس سیمانی با استفاده از این روش با کیفیت بهتری صورت می پذیرد. نسبت آب به مواد چسباننده در کلیه اختلاط های خمیر و ملات سیمانی ثابت و برابر با ۰٫۴۳ در نظر گرفته شد. همچنین برای جلوگیری از تداخل احتمالی عملکرد نانوذرات رس و فوق روان کننده، در هیچ یک از طرح اختلاط ها از فوق روان کننده استفاده نگردید. جزئیات طرح اختلاط های مورد مطالعه در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

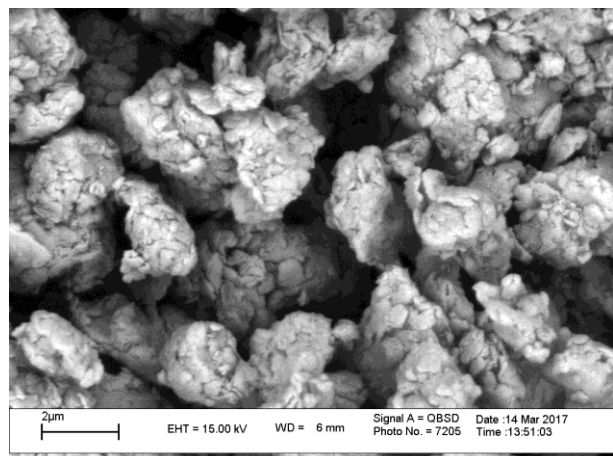
به منظور انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه های خمیر و ملات از قالب های با ابعاد ۵cm×۵cm×۵cm استفاده گردید. کلیه نمونه ها پس از گذشت ۲۴ ساعت، از قالب در آمده و تا زمان آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C 511 در آب آهک اشباع نگهداری شدند [۲۴]. همچنین جهت انجام آزمایش انقباض ناشی از خشک شدن شکی نمونه های ملات، قالب های با ابعاد ۷cm×۷cm×۲۸ مورد استفاده قرار گرفت.

در پایان ریزساختار ماتریس های سیمانی مورد مطالعه با نتایج حاصل از انجام آزمایشات در مقیاس ماکرو مورد مقایسه می گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مصرفی

سیمان مصرف شده در این مطالعه از نوع سیمان تپ ۴۲۵-۱، تولید شده در کارخانه سیمان هگمتان می باشد که استاندارد ASTM C 150 [21] را مجاب می سازد. نانورس مورد استفاده از نوع مونت موریلونیت تولید شرکت سیگما-آلدریج با اندازه ذرات در حدود ۱ الی ۲ نانومتر می باشد.



شکل ۱- تصویر SEM از ذرات نانورس با بزرگنمایی 20k

مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و نانورس مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین از ماسه با بزرگترین اندازه ذرات ۰٫۶ mm و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک $2/33 \text{ gr/cm}^3$ با دانه بندی منطبق بر الزامات استاندارد ASTM C 136 استفاده شد [۲۲].

۲-۲- آماده سازی و عمل آوری نمونه ها

به منظور پخش هر چه بهتر نانوذرات رس در ساخت خمیر سیمان، دو شیوه اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت [۲۳]. بدین صورت که در شیوه اول سیمان و نانوذرات رس به مدت ۲ دقیقه و با سرعت ۱۴۵ دور در دقیقه مخلوط شدند. سپس آب اختلاط به ترکیب اضافه گردید و به مدت یک دقیقه و با سرعت ۱۴۵ دور در دقیقه عملیات اختلاط انجام شد. در ادامه با استفاده از

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات / ترکیبات	سیمان پرتلند	نانورس
مشخصات فیزیکی		
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۳,۱۶	۰,۵-۰,۷
سطح ویژه (cm^2/gr)	۳۳۵۰	$(۲۲۰-۲۷۰) \times ۱۰^۴$
آنالیز شیمیایی (W%)		
SiO ₂	۲۰,۹۵	۵۰,۹۵
Al ₂ O ₃	۴,۹۸	۱۹,۶
Fe ₂ O ₃	۴,۰۹	۵,۶۲
CaO	۶۳,۲۱	۱,۹۷
MgO	۱,۳۷	۳,۲۹
SO ₃	۲,۲۷	۰
Na ₂ O	۰,۴۸	۰,۹۸
K ₂ O	۰,۷۸	۰,۸۶
LOI	۱,۶۵	۱۵,۴۵
TiO ₂	۰	۰,۶۲

جدول ۲- طرح اختلاط خمیر سیمان

نام اختصاری	W/B	اجزای اختلاط		
		آب (ml)	سیمان (gr)	نانورس (gr)
Nc- 0%	۰,۴۳	۲۱۵	۵۰۰	۰
Nc- 0.5%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۹۷,۵	۲,۵
Nc- 1%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۹۵	۵
Nc-1.5%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۹۲,۵	۷,۵
Nc- 2%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۹۰	۱۰
Nc- 3%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۸۵	۱۵
Nc- 4%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۸۰	۲۰
Nc- 8%	۰,۴۳	۲۱۵	۴۶۰	۴۰

جدول ۳- طرح اختلاط ملات سیمان

نام اختصاری	W/B	اجزای اختلاط			
		آب (ml)	سیمان (gr)	نانورس (gr)	ماسه (gr)
Nc- 0%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۶۰	۰	۷۸۲
Nc- 0.5%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۵۷,۷	۲,۳	۷۸۲
Nc- 1%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۵۵,۴	۴,۶	۷۸۲
Nc-1.5%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۵۳,۱	۶,۹	۷۸۲
Nc- 2%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۵۰,۸	۹,۲	۷۸۲
Nc- 3%	۰,۴۳	۱۹۸	۴۴۶,۲	۱۳,۸	۷۸۲

۳-۲- روند انجام آزمایشات

زمان گیرش اولیه و نهایی پس از اندازه گیری آب نرمال^۳ بر اساس استاندارد ASTM C 191 و با استفاده از دستگاه ویکات اندازه گیری شد [۲۵]. مشخصات چسبندگی خمیر سیمان با استفاده از آزمایش چسبندگی^۴ مورد مطالعه قرار گرفت. این آزمایش شامل اندازه گیری نیروی لازم جهت جداسازی دو صفحه که حداقل بین آن دو را لایه نازکی از ماده مورد مطالعه پر کرده است و با سرعت مشخص و ثابتی از هم فاصله می گیرند می باشد. دستگاه مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نحوه انجام آزمایش چسبندگی خمیر سیمان

کلیه نمونه ها طی ۳ دقیقه پس از اولین تماس آب با سیمان آماده سازی شده و به مدت ۱ دقیقه قبل از آزمایش در داخل دستگاه و در حالت استراحت قرار می گیرند. مشخصات چسبندگی مواد مختلف با استفاده از بررسی نمودارهای مستخرج از انجام این آزمایش که بیان از تغییرات نیروی چسبندگی بر حسب زمان دارد مورد بررسی قرار می گیرد. این مشخصات به طور مستقیم به بیان کمی خواص رئولوژیکی مصالح مورد بررسی اشاره دارد.

به منظور بررسی ریزساختار کامپوزیت های سیمانی مورد مطالعه از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ مدل مدل LEO 1430VP استفاده گردید.

برای تعیین جریان اسلامپ ملات های مورد مطالعه از یک دستگاه میز جریان مطابق با استاندارد ASTM C 1437 استفاده گردید [۲۶]. بدین منظور ابتدا سطح فوقانی میز روانی تمیز و خشک می گردد. سپس قالب مربوطه در مرکز صفحه قرار گرفته و توسط

اندازه گیری چگالی توده ای نمونه های سخت شده خمیر سیمان با هدف تعیین کیفیت نانوکامپوزیت های مورد مطالعه با استفاده از رابطه ۱ انجام شد:

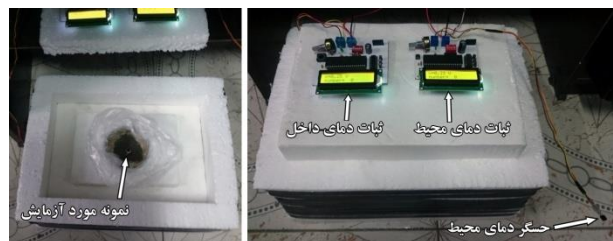
$$\rho = \frac{m_d}{V} \quad (1)$$

که در آن ρ نشان دهنده چگالی (gr/cm^3)، m_d جرم نمونه خشک شده (gr) و V بیانگر حجم نمونه (cm^3) می باشد.

به منظور تعیین میزان جذب آب، ابتدا نمونه مورد آزمایش تحت تاثیر دمای $80 \text{ }^\circ\text{C}$ قرار گرفت. زمانی که وزن نمونه بر اثر از دست دادن رطوبت موجود در آن ثابت گردید، عدد مربوط به وزن با عنوان W_0 ثبت شد. سپس نمونه مورد آزمایش به مدت ۴۸ ساعت در آب با دمای $20 \text{ }^\circ\text{C}$ قرار گرفت. پس از آن رطوبت سطح نمونه با استفاده از یک پارچه مرطوب زدوده شد و وزن آن (W_1) سریعاً اندازه گیری گردید. در نهایت جذب آب نمونه مورد آزمایش با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$W_A = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

نرخ واکنش هیدراسیون خمیر سیمان با استفاده از یک کالریمتر شبه بی در رو^۱ که در شکل ۲ نشان داده شده است مورد مطالعه قرار گرفت. بدین صورت که نمونه در محفظه ای ایزوله قرار گرفته و تغییرات دمایی داخل و خارج کالریمتر توسط یک جفت ثابت داده^۲، طی ۴۸ ساعت ثبت گردید. این آزمایش بر روی نمونه کنترل و نمونه های حاوی درصد های مختلف نانورس انجام شد تا از روی تغییرات ایجاد شده در منحنی های هیدراسیون، تاثیر افزودن نانورس بر واکنش هیدراسیون خمیر سیمان مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.



شکل ۲- کالریمتر شبه بی در رو با قابلیت ثبت دمای محیط

⁴ Probe Tack Test

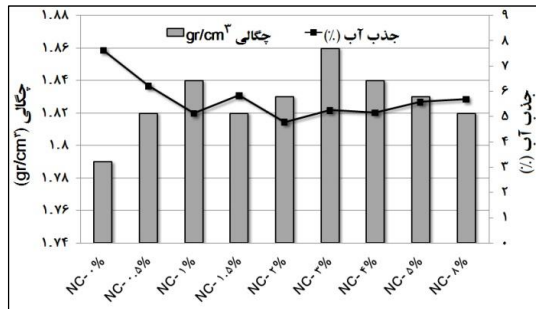
⁵ Scanning Electron Microscope

¹ Semi-adiabatic

² Datalogger

³ Normal Consistency of Cement

مخلوط خمیر سیمان را می توان منجر به وقوع اثرات مطلوبی در بهبود تراکم نانو کامپوزیت حاصل ارزیابی نمود.

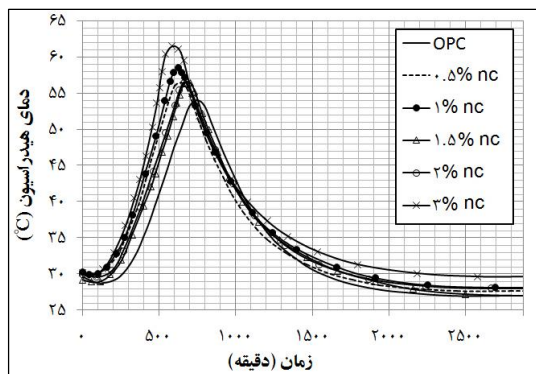


شکل ۴- تغییرات چگالی و جذب آب

۳-۱-۲- سرعت هیدراسیون

گرمای تولید شده بواسطه انجام واکنش هیدراسیون خمیرهای سیمانی با استفاده از کالریمتر شبه بی در رو نشان داده شده در شکل ۲ اندازه گیری و ثبت گردید. کلیه نمونه ها پس از آماده سازی، در قالب دستگاه ریخته شده و پس از تعبیه سنسور دمای از نوع LM35 با دقت $0.5 \square C$ در لوله مسی تعبیه شده در وسط قالب کالریمتر که با هدف انتقال دمای نمونه به سنسور با روغن مناسب پر شده است، درب دستگاه بسته شده و شروع به کار می نماید. در کلیه آزمایشات، تماس آب با مواد سیمانی تا قرارگیری نمونه در دستگاه و شروع انجام آزمایش ۳ دقیقه به طول می انجامد. هر یک از این آزمایشات به تعداد ۵ بار تکرار گردید تا با پایش دمای محیط توسط دیتالاگر ثبت کننده دمای محیط پیرامونی، کمترین میزان اختلاف در تغییرات دمای پیرامون کالریمتر در نتایج ارائه شده نسبت به یکدیگر وجود داشته باشد.

نتایج حاصل از انجام آزمایش کالریمتری روی نمونه های حاوی ۰٪، ۰.۵٪، ۱٪، ۱.۵٪، ۲٪، ۳٪ نانورس در نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- تغییرات دمای هیدراسیون بر حسب زمان

ملات در ۳ لایه با اعمال ۲۰ ضربه برای هر لایه پر می گردد. سپس اضافات ملات از روی سطح فوقانی برداشته شده و سطح صاف می گردد. در حالی که صفحه در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد، قالب برداشته شده و با به کارگیری اهرم موجود، صفحه در مدت ۱۵ ثانیه به تعداد ۲۵ بار بالا رفته و سقوط می کند. با اندازه گیری حداقل ۴ قطر از ملات پهن شده و میانگین گیری و تقسیم عدد حاصل بر قطر تحتانی قالب (۱۰ cm)، میزان جریان بر حسب درصد بیان می گردد. نمونه های آزمایش انقباض ناشی از خشک شدن پس از ریخته شدن در قالب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت ۱۰۰٪ نگهداری شدند. پس از بیرون آوردن از قالب، مطابق با استاندارد ASTM C 157، نمونه ها در یک اتاقک عمل آوری، در شرایط دمایی $23 \pm 2 \square C$ و رطوبت $50 \pm 4\%$ قرار می گیرند [۲۷]. سپس با استفاده از ابزار اندازه گیری با دقت ۱ میکرون تغییرات طول بعد مشخصی از نمونه ها تا سن ۹۰ روز ثبت می گردد.

به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه های خمیر سیمان و ملات، نمونه های با ابعاد $5cm \times 5cm \times 5cm$ با سرعت بارگذاری MPa/s ۰.۳۳ بر اساس استاندارد ASTM C 109 تحت آزمایش قرار گرفت [۲۸]. در پایان میانگین سه آزمایش به عنوان مقاومت فشاری ثبت شده برای هر طرح اختلاط ثبت گردید.

۳-۲- بحث بر روی نتایج آزمایشگاهی

۳-۱-۳- خمیر سیمان

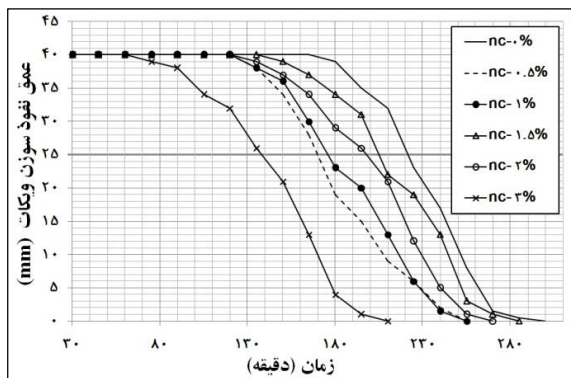
۳-۱-۱-۳- چگالی و جذب آب

مقادیر مربوط به چگالی و جذب آب نمونه های خمیر سیمان در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همانطور که از نتایج بدست آمده بر می آید، نمونه فاقد نانوذرات رس بیشترین میزان جذب آب و کمترین میزان چگالی را از خود نشان داده است. این امر به وضوح به وجود حفرات بیشتری نسبت به نمونه های حاوی نانوذرات در ساختار ماتریس اشاره دارد. بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن ۳٪ نانورس به مخلوط خمیر سیمانی مورد مطالعه سبب افزایش چگالی و کاهش جذب آب به میزان ۳.۹۱٪ و ۳۱.۳۲٪ گردیده است. پس از نمونه حاوی ۳٪ نانورس، بیشترین میزان چگالی در نمونه های حاوی ۱٪ و ۴٪ نانورس مشاهده گردید. همچنین کمترین جذب آب در نمونه حاوی ۲٪ نانورس مشاهده شد. بر اساس یک نتیجه گیری کلی، افزودن نانوذرات رس به

جدول ۴- آب نرمال و زمان گیرش خمیر سیمان

نانورس (درصدوزنی)	0	0.5	1	1.5	2	3
آب نرمال (%)	۳۰	۳۱	۳۲,۵	۳۳	۳۴	۳۴,۵
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	221	170	175	205	197	138
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	303	250	257	283	275	213



شکل ۶- اثر افزودن نانورس بر زمان گیرش اولیه و نهایی

۳-۱-۴- مشخصات چسبندگی

جهت تعیین مشخصات چسبندگی، خمیر سیمان در بین دو صفحه که جهت دارا بودن زبری لازم سطح آنها با سمباده شماره ۱۵۰ پوشیده شده است قرار می‌گیرد. فاصله صفحات مذکور از هم در ابتدای آزمایش ۲ میلی‌متر می‌باشد. کل مجموعه در فک های کششی یک دستگاه کشش یونیورسال تثبیت می‌گردد و پس از شروع آزمایش، صفحات با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه از هم فاصله می‌گیرند و نیروی موجود بین دو صفحه با استفاده از یک لودسل اندازه‌گیری شده و با استفاده از یک ثبت داده، نمودار تغییرات نیروی ناشی از چسبندگی خمیر سیمان به دو صفحه بر حسب زمان به دست می‌آید. قبل از شروع آزمایش، قطر اولیه نمونه خمیر سیمان ۸ سانتی‌متر و معادل با قطر صفحه بالایی می‌باشد. همانطور که در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است، کلیه نمونه های حاوی نانورس از چسبندگی بیشتری نسبت به نمونه خمیر سیمان معمولی برخوردار می‌باشند. بیشترین میزان نیروی چسبندگی بواسطه حضور خمیر بین دو صفحه دستگاه در نمونه های حاوی ۰,۵٪ و ۱٪ مشاهده شده است. همچنین در کلیه نمونه های حاوی نانوذرات،

نتایج حاصل از انجام این آزمایش حاکی از آنست که افزودن نانورس سبب شتاب گرفتن واکنش ها و افزایش دمای بیشینه هیدراسیون سیمان در کلیه نمونه های مورد مطالعه می‌گردد. طی آزمایش انجام شده بر روی نمونه خمیر سیمان معمولی، دمای بیشینه واکنش هیدراسیون معادل $54 \text{ }^{\circ}\text{C}$ به دست آمد. این در حالیست که افزودن ۳٪ نانوذرات رس به خمیر سیمان با افزایشی ۱۳,۸۹ درصدی منجر به افزایش این دما به عددی معادل 61.5 $^{\circ}\text{C}$ گردید. پس از نمونه حاوی ۳٪ نانورس، نمونه حاوی ۱٪ نانورس با بیشینه دمای هیدراسیون معادل $58.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ، افزایش ۸,۳۳ درصدی در بیشینه دمای هیدراسیون نسبت به نمونه فاقد نانوذره را از خود نشان داده است. افزایش در مقدار بیشینه دمای هیدراسیون و پیشی گرفتن روند افزایشی نمودار در نمونه های حاوی نانوذرات نسبت به نمونه خمیر سیمان معمولی نشان از واکنش پذیری بالای نانوذرات و افزایش قابل توجه در تعداد مراکز جوانه زنی با افزودن نانوذرات به مخلوط دارد.

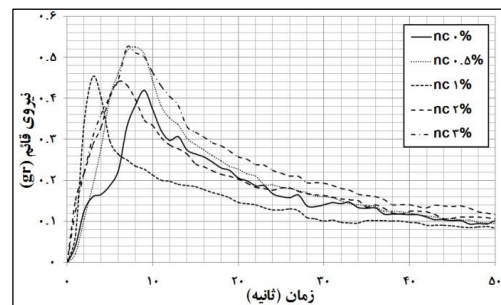
۳-۱-۳- آب نرمال و زمان گیرش

آب نرمال سیمان، درصد آب بر اساس وزن سیمان است که اگر در اختلاط مورد استفاده قرار گیرد منجر به ایجاد غلظتی می‌گردد که به سوزن با قطر 10mm اجازه نفوذ در محدوده 33mm الی 35mm در نمونه موجود در قالب ویکات را می‌دهد. زمان گیرش اولیه را زمان لازم برای سخت شدن خمیر سیمان تا حدی که سوزن ویکات نتواند بیشتر از 25mm در آن نفوذ کند تعریف می‌کنند. همچنین زمان گیرش نهایی نشانگر زمانی است که لازم است سپری شود تا امکان فرو رفتن قابل رویت سوزن با قطر 5mm ویکات در سطح خمیر سیمان میسر نباشد. آب نرمال، زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه های مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین عمق نفوذ سوزن ویکات بر حسب زمان نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده افزودن نانورس بوضوح سبب کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی در کلیه نمونه ها گردیده است. تاثیرات نانورس بر کاهش زمان گیرش توسط دیگر محققین نیز به اثبات رسیده است. این اثرات را می‌توان به نتایج بدست آمده از بررسی تغییرات دمای هیدراسیون خمیرهای سیمان حاوی درصد های مختلف نانورس نسبت داد [۲۹].

همانطور که از نمودار بر می آید، افزودن نانورس در کلیه حالات مورد مطالعه و در کلیه سنین سبب افزایش در میزان مقاومت فشاری خمیر سیمان گردیده است. بیشترین میزان افزایش در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه حاوی ۳٪ نانورس و به میزان ۲۰,۳۸٪ مشاهده گردید. پس از آن نمونه های دارای ۱٪ و ۲٪، بیشترین افزایش در میزان مقاومت فشاری به ترتیب معادل ۱۷,۵٪ و ۱۳,۶۶٪ را از خود نشان دادند. در سنین بالاتر، میزان افزایش در مقاومت فشاری نمونه ها روند مشابهی را دنبال می کند. به گونه ای که میزان این افزایش در سن ۹۰ روز برای نمونه های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانورس به ترتیب معادل ۱۵,۶۶٪، ۱۵,۹۷٪ و ۱۸,۴۵٪ مشاهده گردیده است. شیوه اثر نانوذرات رس بر مقاومت مکانیکی خمیر سیمان به دو شکل پرکنندگی تخلخل موجود در ریزساختار خمیر سیمان سخت شده و همچنین فعالیت پوزولانی با اکسیدهای اصلی سیمان پرتلند تیپ ۱ مانند CaO، SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ می باشد [۳۰]. میزان تاثیر گذاری هر یک از عوامل ذکر شده را می توان با بررسی واکنش هیدراسیون بواسطه کالریمتری و همچنین بررسی ریزساختار بتن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار داد. شکل های ۹ و ۱۰ ریزساختار خمیر سیمان معمولی و خمیر سیمان حاوی ۱٪ و ۳٪ نانورس را به ترتیب در سنین ۳ و ۲۸ روز نشان می دهد. با توجه به تصاویر، تاثیرات حضور نانوذرات رس در تسریع واکنش های پوزولانی و ایجاد ماتریسی متراکم کاملاً مشهود است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، با افزایش در میزان نانورس مصرف شده، از میزان خلل و فرج کاسته شده و ماتریس متراکم تر می گردد. این امر همانطور که پیشتر به آن اشاره گردید می تواند به واسطه تاثیرات ناشی از پرکنندگی نانوذرات، خصوصیات پوزولانی و همچنین تورم نانوذرات رس ناشی گردد.

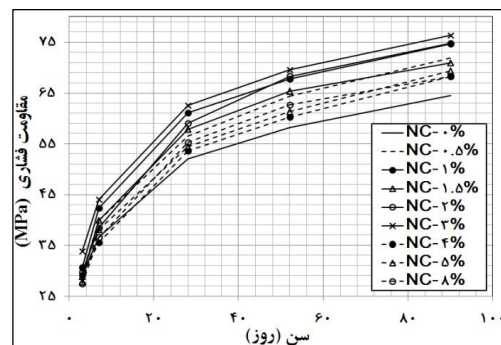
زمان رسیدن به بیشینه نیروی چسبندگی کاهش یافته است که بیشترین میزان این کاهش در نمونه حاوی ۱٪ نانورس مشاهده گردیده است. با توجه به سرعت ثابت دور شدن صفحات از یکدیگر می توان استنباط نمود که نمونه حاوی ۱٪ نانورس نسبت به نمونه خمیر سیمان معمولی از چسبندگی بیشتر و شکل پذیری بسیار کمتری برخوردار است. این امر موضوع سخت شدگی حالت تازه^۱ کامپوزیت های سیمانی حاوی نانورس را که در مطالعات پیشین بدان اشاره شده است تایید می کند [۲۳].



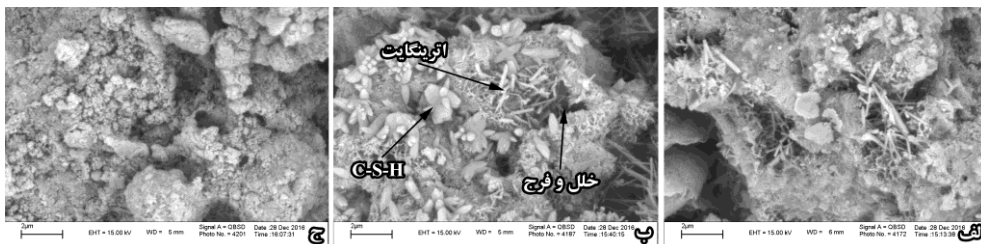
شکل ۷- اثر افزودن نانورس بر چسبندگی خمیر سیمان

۳-۱-۵- مقاومت فشاری

نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه شاهد و نمونه های حاوی درصد های مختلف نانورس از ۰,۵٪ تا ۸٪ در شکل ۸ نشان داده شده است.

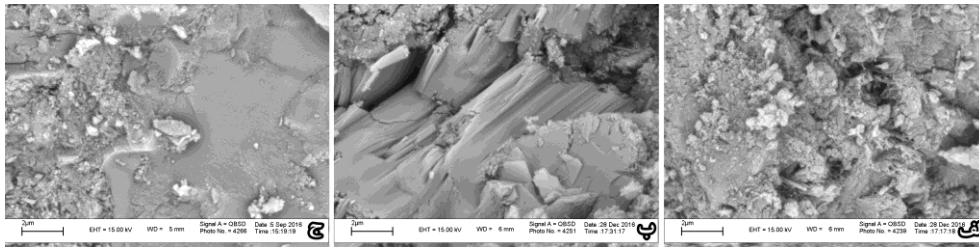


شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری خمیرهای سیمان با زمان



شکل ۹- ریزساختار خمیر سیمان در سن ۳ روز- الف: فاقد نانورس، ب: حاوی ۱٪ نانورس، ج: حاوی ۳٪ نانورس با بزرگنمایی ۲۰kx

¹ Fresh State Stiffness



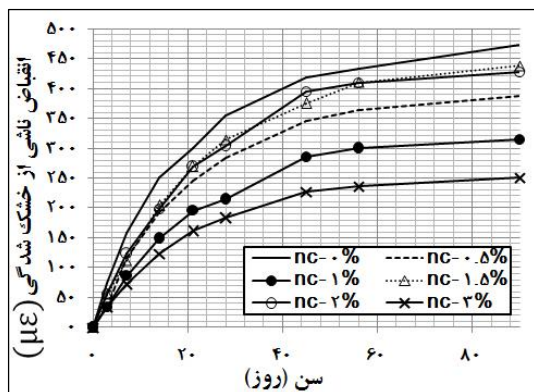
شکل ۱۰- ریزساختار خمیر سیمان در سن ۲۸ روز- الف: فاقد نانورس، ب: حاوی ۱٪ نانورس، ج: حاوی ۳٪ نانورس با بزرگنمایی ۲۰k

۲-۳- ملات سیمانی

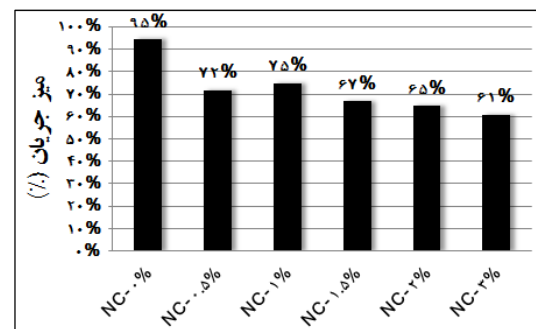
۱-۲-۳- آزمایش میز روانی

فرآیند افت ناشی از خشک شدن به عوامل مختلفی علی الخصوص به نوع ماده افزودنی بستگی دارد. به عنوان نمونه ونگ^۱ و همکاران در مطالعه ای به بررسی تاثیر افزودن دو گونه نانورس بر رفتار بتن های خودتراکم پرداختند. نتایج آزمایشات حاکی از آن بود که نمونه های حاوی نانورس متشکل از منیزیم آلومینوم سیلیکات^۲ و رس کائولینیت^۳ سبب افزایش جزئی در مقدار افت خود به خودی می گردد. حال آنکه افزودن نانورس مرکب از کائولینیت، ایلیت^۴ و کوارتز^۵ کاهش این مشخصه را به همراه خواهد داشت [۳۱].

همانطور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می شود، با افزایش در میزان محتوای نانورس در اختلاط، روانی آن کاهش می یابد. یکی از دلایل وقوع این وضعیت را می توان به سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات رس و نیاز به آب بیشتر جهت تر شدن سطح نانوذرات نسبت داد. همچنین وقوع سخت شدگی حالت تازه که پیشتر به آن اشاره شد نیز می تواند در این امر تاثیرگذار باشد.



شکل ۱۲- افت ناشی از خشک شدن برای نمونه های ملات



شکل ۱۱- نتایج آزمایش میز روانی برای نمونه های ملات

۲-۲-۳- انقباض ناشی از خشک شدن

۳-۲-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ملات های مورد مطالعه در سنین ۳، ۱۴ و ۲۸ روز بدست آمده و نتایج در نمودار شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که از نتایج بدست آمده از آزمایشات خمیرهای سیمان مشاهده گردید، افزودن نانورس سبب افزایش در میزان مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه فاقد نانوذره در کلیه سنین می گردد. به طوری که افزودن نانورس به میزان ۳٪ وزن سیمان به اختلاط

تغییرات میزان افت ناشی از خشک شدن بر حسب زمان تا سن ۹۰ روز در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که بخش قابل توجهی از افت ناشی از انقباض طی ۴۵ روز اول انجام می شود. همچنین با افزودن نانورس به مخلوط ملات، میزان افت ناشی از خشک شدن به طور مشهودی کاهش می یابد. به طوری که میزان افت در سن ۹۰ روز در نمونه حاوی ۳٪ نانورس معادل ۲۵۱ μE یعنی به میزان ۲۲۱ μE کمتر از نمونه فاقد نانوذره مشاهده گردید. با این وجود

⁴ Illite
⁵ Quartz

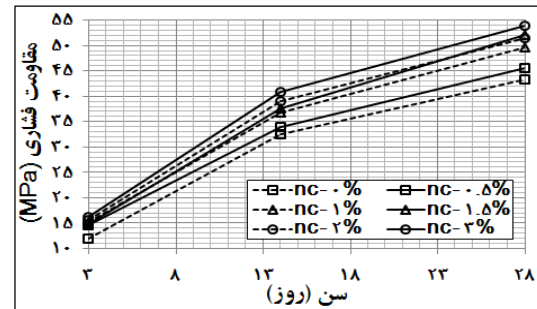
¹ Wang
² Magnesium Aluminum Silicate
³ Kaolinite Clay

با افزودن نانورس به مخلوط ملات، میزان افت ناشی از خشک شدن شکی به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

۵- مراجع

- [1] Rashad, A.M., A synopsis about the effect of nano- Al_2O_3 , nano- Fe_2O_3 , nano- Fe_3O_4 and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer. Materials & Design (۲۰۱۵-۱۹۸۰), ۲۰۱۳. ۵۲: p. ۱۵۷-۱۴۳.
- [2] Heikal, M. and N.S. Ibrahim, Hydration, microstructure and phase composition of composite cements containing nano-clay. Construction and Building Materials, ۲۰۱۶. ۱۱۲: p. ۲۷-۱۹.
- [3] Wang, W.-C., Compressive strength and thermal conductivity of concrete with nanoclay under Various High-Temperatures. Construction and Building Materials, ۲۰۱۷. ۱۴۷: p. ۳۱۱-۳۰۵.
- [4] Morsy, M., S. Alsayed, and M. Aqel, Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructure of ordinary Portland cement mortar. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, ۲۰۱۰. ۱۰(۰۱): p. ۲۳-۲۷.
- [5] Kawashima, S., et al., Modification of cement-based materials with nanoparticles. Cement and Concrete Composites, ۲۰۱۳. ۳۶: p. ۱۵-۸.
- [6] Chang, T.-P., et al., Material properties of portland cement paste with nano-montmorillonite. Journal of Materials Science, ۲۰۰۷. ۴۲(۱۷): p. ۷۴۸۷-۷۴۷۸.
- [7] Yeganeh, J.K., M. Sadighi, and H. Kourki, Recycled HIPS and nanoclay in improvement of cement mortar properties. Malaysian Polymer Journal, ۲۰۰۸. ۳(۲): p. ۳۸-۳۲.
- [8] Patel, K., The use of nanoclay as a constructional material. ۲۰۱۲.
- [9] Morsy, M.S., S.H. Alsayed, and M. Aqel, Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, ۲۰۱۱. ۲۵(۱): p. ۱۴۹-۱۴۵.
- [10] Morsy, M. and H. Aglan, Development and characterization of nanostructured-perlite-cementitious surface compounds. Journal of Materials Science, ۲۰۰۷. ۴۲(۲۴): p. ۱۰۱۸۸-۱۰۱۹۵.
- [11] Aly, M., et al., Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars. Materials Science and Engineering: A, ۲۰۱۱. ۵۲۸(۲۷): p. ۷۹۹۸-۷۹۹۱.

سبب افزایش ۲۴ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز گردیده است. ملات های حاوی نانورس نسبت به ملات کنترل رفتار شکننده تری از خود نشان می دهند. این امر می تواند مربوط به کاهش حفرات در بافت ماتریس سیمانی باشد. همچنین می توان آن را به پیوستگی بیشتر ماتریس سیمانی و سنگدانه ها نسبت داد.



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری ملات های سیمان با زمان

۴- نتیجه گیری

- در این پژوهش، تاثیرات استفاده از نانورس بر مشخصات خمیر و ملات سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس یافته های حاصل از انجام آزمایشات، نتیجه گیری های زیر قابل ارائه است:
- ۱- افزودن نانوذرات رس به خمیر سیمان موجب افزایش تراکم و چگالتر شدن خمیر سیمان می گردد.
 - ۲- افزودن نانورس سبب تسریع و افزایش در شدت واکنش های سیمانی می گردد.
 - ۳- افزودن نانورس به مخلوط خمیر سیمان، میزان آب نرمال را افزایش داده و سبب کاهش زمان گیرش خمیر سیمان می گردد.
 - ۴- خمیرهای سیمان حاوی نانوذرات رس از مشخصات چسبندگی بالاتری نسبت به خمیر سیمان معمولی برخوردار می باشند و در کلیه نمونه های حاوی نانوذرات، زمان رسیدن به بیشینه نیروی چسبندگی کوتاهتر است. به واسطه این ویژگی، به نظر می رسد افزودن نانورس به ماتریس می تواند در کاهش فشار وارده بر قالب بندی در بتن های حاوی این نانوذرات مفید واقع گردد.
 - ۵- افزودن نانورس به اختلاط خمیر و ملات سیمان در کلیه سنین سبب افزایش در میزان مقاومت فشاری می گردد.
 - ۶- با افزایش در میزان محتوای نانورس در اختلاط، روانی آن کاهش می یابد.

- Portland cement. Annual book of ASTM standards, ۲۰۰۲. ۴.
- [22] ASTM, C., ۱۳۶, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of Standards, ۲۰۰۵. ۴.(02).
- [23] Kawashima, S., et al., Study of the mechanisms underlying the fresh-state response of cementitious materials modified with nanoclays. Construction and Building Materials, ۲۰۱۲. ۳۶: p. ۷۵۷-۷۴۹.
- [24] ASTM, C. ۵۱۱. Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. in American Society for Testing and Materials. ۲۰۰۲.
- [25] ASTM, C., ۰۸-۱۹۱. Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, ۲۰۰۸. ۴.
- [26] ASTM, C., ۱۴۳۷. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ۲۰۰۱.
- [27] ASTM, C., ۱۵۷. ۲۰۰۴. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM, C., ۱۰۹/C ۱۰۹M-۰۲. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using ۲-in. or [۵۰-mm] cube specimens), ۲۰۰۲.
- [29] Hou, P.-k., et al., Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar. Cement and Concrete Composites, ۲۰۱۳. ۳۵(۱): p. ۲۲-۱۲.
- [30] Al-Jabri, K. and H. Shoukry, Use of nano-structured waste materials for improving mechanical, physical and structural properties of cement mortar. Construction and Building Materials, ۲۰۱۴. ۷۳: p. ۶۴۴-۶۳۶.
- [31] Wang, K., et al., Self-Consolidating Concrete—Applications for Slip-Form Paving: Phase II. ۲۰۱۱.
- [12] Brightson, P., G. Baskar, and S.B. Gnanappa, Strength and durability analysis of nano clay in concrete. Life Sci. J, ۲۰۱۳. ۱۰: p. ۱۱۷۷-۱۱۷۲.
- [13] He, X. and X. Shi, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, ۲۰۰۸(۲۰۷۰): p. ۲۱-۱۳.
- [14] Sabir, B.B., S. Wild, and J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and Concrete Composites, ۲۰۰۱. ۲۳(۶): p. ۴۵۴-۴۴۱.
- [15] Aly, M., et al., Effect of nano-clay and waste glass powder on the properties of flax fibre reinforced mortar. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, ۲۰۱۱. ۶(۱۰): p. ۲۸-۱۹.
- [16] Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and Building Materials, ۲۰۱۱. ۲۵(۲): p. ۵۹۰-۵۸۲.
- [17] Fan, Y., et al., Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials. Cement and Concrete Composites, ۲۰۱۴. ۴۵: p. ۱۲۴-۱۱۷.
- [18] Oltulu, M. and R. Şahin, Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. Materials Science and Engineering: A, ۲۰۱۱. ۵۲۸(۲۲-۲۳): p. ۷۰۱۹-۷۰۱۲.
- [19] Dham, M., Nanomodification of cement matrix for enhanced ductility and fracture properties in concrete. Vol. ۶۹. ۲۰۰۷.
- [20] Farzadnia, N., et al., Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars. Cement and Concrete Research, ۲۰۱۳p. ۴۸. ۹۷. ۱۰۴.
- [21] ASTM, C., ۱۵۰, Standard specification for

The effects of nanoclay on rheological, mechanical and durability properties of cement composites

Mir Alimohammad Mirgozar Langaroudi

Phd Candidate, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Yaghoub Mohammadi*

Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

Concrete is heterogeneous at all length scales and its microstructure evolves continuously over decades. Through the use of nanoparticles, it is possible to alter the microstructure of cementitious materials from within the first microsecond. This study is aimed to carry out a comprehensive investigation on the effects caused by the addition of nanoclays on properties of cement based composites. Therefore, a replacement of cement by with different percentages of montmorillonite nanoclay (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% and 3% by weight of cement) in cement pastes and mortars was planned and The effects of adding nanoclay on hydration process, rheological properties (adhesive properties, water demand and setting time), mechanical properties (compressive strength) and durability properties (water absorption and drying shrinkage) of mixes were investigated. As well, The cement matrix microstructure was examined using scanning electron microscopy. The results indicates that the addition of nanoclays causes positive effects on cement composites properties.

Keywords: Nanoclay, Cement Composites, Rheological Rproperties, Compressive Strength, SEM.

* Corresponding Author: yaghoubm@uma.ac.ir