

بررسی تاثیر ابعاد مواد پوزولانی (سیلیس آمورف) در دو مقیاس میکرو و نانو متر بر روی خواص مکانیکی خمیر سیمان

مصطفی خانزادی

استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

محمود حبیبیان

استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران

محسن تدین

استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

مجتبی مغربی

کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت ساخت دانشگاه علم و صنعت ایران

Mojtabamaghrebi@civileng.iust.ac.ir

چکیده: امروزه استفاده از سیمان پرتلند در مصرف ساختمانی، روند رو به رشدی را طی می کند و از جمله عواملی که باعث محبوبیت این ماده شده است مقاومت خوب و قیمت ارزان آن می باشد. از همین رو بالابردن خواص مکانیکی سیمان پرتلند در عین توجه به مسائل دوامی همواره جزو اولویت های پژوهشی در مباحث تکنولوژی بتن بوده است. در این تحقیق تاثیر اضافه کردن سیلیس آمورف در دو مقیاس میکرومتری و نانومتری مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور مقیاس ملات سیمان انتخاب گردید. در این نوشتار نتایج مقاومت خمشی و فشاری بدست آمده مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به نتایج مشخص شد که نمونه شاهد حاوی سیمان پرتلند بدون هرگونه افزودنی (OPC) همانطور که انتظار می رفت با گذشت زمان با رشد خواص مکانیکی همراه بود ولی در مقایسه با نمونه های حاوی میکروسیلیس و نانو سیلیس عملکرد پایین تری از خود نشان داد. تا اینکه در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه شاهد (OPC) با نمونه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس حدود ۷۰٪ کمتر می باشد. در مورد نمونه های حاوی میکرو و نانو سیلیس مشخص گردید که در سن ۳ روزه تاثیرات میکرو و نانو سیلیس مشابه بوده ولی در سن ۲۸ روز شاهد بودیم که نمونه های حاوی نانوسیلیس دارای مقاومت های بالاتری بوده اند به طور مثال نمونه های حاوی ۷.۵٪ نانوسیلیس نسبت نمونه های همان مقدار میکروسیلیس بیش از ۵۰٪ عملکرد بهتری داشته است. ولی از آن زمان و در سن ۹۰ روز نمونه های حاوی میکرو سیلیس عملکرد بهتری داشتند. و عملاً نمونه های حاوی نانوسیلیس رشد مقاومت چشمگیری نداشته اند و در عوض نمونه های حاوی میکروسیلیس و ترکیب میکرو و نانوسیلیس به روند رشد مقاومت خود ادامه دادند و در نهایت این نمونه های حاوی میکروسیلیس بوده اند که نتایج بهتری را کسب کردند. به طور مثال مقاومت فشاری نمونه حاوی ۷.۵٪ نانوسیلیس در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز خود رشدی کمتر از ۵٪ را نشان می دادند ولی نمونه حاوی همان مقدار میکروسیلیس در بازه فوق رشدی تقریباً ۲ برابر شده است و عملاً در طی زمان رشدی نسبتاً خطی داشته است. در نهایت این نمونه حاوی میکروسیلیس است که با حفظ روند کسب مقاومت خود در نهایت نسبت به نمونه مشابه حاوی نانوسیلیس حدوداً ۴۰٪ عملکرد بهتری داشته است.

واژه های کلیدی: نانوسیلیس، مقاومت ویژه الکتریکی، میکروسیلیس، پوزولان، ملات سیمان

۱- مقدمه :

ویژه الکتریکی و آنالیز پراکنش اشعه ایکس (XRD) و مطالعات ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی SEM، مد نظر قرار گرفت، تا در بر گیرنده مطالعات بر روی خواص مکانیکی خواص شیمیایی و دوام سیمان باشد. که در این نوشتار فقط ۲ آزمایش مربوط به خواص مکانیکی ملات سیمان یعنی مقاومت خمشی و مقاومت فشاری مورد مطالعه قرار می گیرد.

به علت جدید بودن استفاده از نانوتکنولوژی در تکنولوژی بتن، تحقیقات صورت گرفته در این زمینه محدود می شود به چند سال اخیر که در زیر به تعدادی از مهمترین آنها اشاره خواهد شد می شود. Zhen hua و همکاران [۲] تاثیرات نانو آلومینیوم را بر روی سیمان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که خواص فیزیکی سیمان افزایش یافته است که به طور مثال مقاومت فشاری ۷ روزه سیمان حاوی ۷٪ نانو آلومینیوم، ۳۰٪ افزایش داشته و مدول الاستیسیته ۲۸ روزه سیمان حاوی ۵٪ نانو آلومینیوم، ۱۴۳٪ افزایش یافته است. Tao Ji [۳] بررسی ساختار بتن حاوی نانوسیلیس و همچنین نفوذپذیری آن را مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد که ساختار بتن حاوی نانو سیلیس یکنواخت تر و فشرده تر می باشد و همچنین نفوذپذیری بتن حاوی نانو سیلیس به طور چشمگیری کاهش یافته است.

Byung-wan و همکارانش (شکل ۳-۱۳) [۴]. خواص ملات سیمان حاوی نانو سیلیس را مورد بررسی قرار دادند. برای همین منظور ملات هایی با ۱۲٪ نانوسیلیس تهیه کردند و نشان دادند که هم مقاومت های کوتاه مدت و هم بلندمدت ملات های سیمان حاوی نانوسیلیس نسبت به میکرو سیلیس بهتر می باشد و از طرفی فرآیند گرمایی سیمان های نانوسیلیس در ۲۴ ساعت اول بین گرمایی سیمان پرتلند و سیمان های میکروسیلیس دار ۴۵ قرار دارد. Hui Li [۵] و همکارانش در تحقیقی تاثیر نانو ذرات را بر روی مقاومت سایشی بتن بررسی کردند. که از نانو تیتانیوم و نانو سیلیس به عنوان مواد مضاف استفاده کردند و نشان دادند که مقاومت سایشی بتن حاوی نانوتیتانیوم نسبت به نانوسیلیس بهتر می باشد. Chang [۶] و همکارانش نشان دادند که با افزودن تنها ۱.۵٪ نانو سیلیس با خلوص ۶۳٪ سیلیس آمورف، واکنش پوزولانی تسریع شده و CH موجود در بتن کاهش می یابد و از طرفی با مطالعه ساختار میکرونی متوجه

هم اکنون از بتن به عنوان یکی از مواد تاثیرگذار توسعه یاد می شود که سیمان هم اصلی ترین جز بتن می باشد.

بتن در عین کارآیی و کاربرد بالایی که دارد به علت ماهیت شیمیایی و فیزیکی اش دارای تهدید های بالقوه ای نیز می باشد. که مهمترین آن مبحث کیفیت دراز مدت آن است.

از طرفی به علت آلودگی بسیار زیاد کارخانجات تولید سیمان، مدتی است که راههای کاهش تولید کلینکر مد نظر قرار گرفته است. که علاوه بر اهداف زیست محیطی، بهبود خواص کوتاه مدت و دراز مدت بتن را نیز دنبال می کند.

در هزاره جدید افق فعلی علم را نانو تکنولوژی ترسیم کرده است، نانو تکنولوژی یک رشته جدید نیست، بلکه رویکردی جدید در تمام رشته ها است. فناوری نانو کاربردهای وسیعی در حوزه های مختلف از جمله صنایع غذایی، دارویی، پزشکی، بیوتکنولوژی، الکترونیک و کامپیوتر و ارتباطات و حمل و نقل و انرژی و محیط زیست و هوا فضا و... دارد. تغییر مقیاس ساخت باعث تغییراتی اساسی در نحوه طراحی سیستم ها خواهد شد، زیرا در مقیاس نانو، نیروهای بین مولکولی و نیروهای دیگر مرتبط وارد محاسبات می شوند. کنترل مواد در مقیاس نانو به معنای ساختن ساختارهای بنیانی در مقیاسی است که در آن اندازه ها خواص اساسی ماد معین می شود (نانو آخرین مقیاس تولید) و بنابراین کنترل خواص مواد حاوی ذرات نانو بهتر امکان پذیر می باشد [۱].

به همین منظور در این تحقیق قصد بر آن است تا با کاربرد نانو موادها خواص سیمان را بهبود بخشید.

۲- هدف تحقیق

هدف این تحقیق، بررسی و ارزیابی تاثیر افزودن نانو ذرات (نانو سیلیس) بر سیمان می باشد. مقیاس مطالعات، ملات سیمان انتخاب گردید و مطالعات در مقیاس بتن به عنوان افق های این طرح مطرح گردید.

آزمایش ها به نحوی انتخاب گردیده اند تا هم خواص مکانیکی و هم شیمیایی سیمان را بتوان مطالعه کرد.

برای همین منظور آزمایش های تعیین حد روانی، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته دینامیکی، مقاومت

پس در طرح اختلاط ۲ پارامتر تغییر خواهد کرد: میزان مواد جایگزین سیمان و فوق روان کننده .

در مورد میزان نانو سیلیس و میکروسیلیس و این دو ماده به صورت توامان ، درصدهای ۱۰-۷/۵-۵-۲/۵ نسبت به وزن سیمان اولیه ملاک عمل قرار گرفت . انتخاب این درصد ها پس از مطالعات جامعی که صورت پذیرفت ، قطعی گردید گام های افزایش مواد یکسان و برابر ۲/۵٪ درصد وزن سیمان بود ، زیرا اگر تمامی گامها یکسان انتخاب شوند ، نتیجه گیری و تغییر و درک رفتار مواد بهتر صورت خواهد گرفت ، از سوی دیگر استفاده بیش از حد از مواد پوزولانی در دراز مدت مشکلات دوامی ایجاد خواهد کرد و توصیه می گردد که حداکثر محدوده استفاده از میکروسیلیس در بتن ۱۰-۷٪ انتخاب گردد به همین خاطر حداکثر میزان نانو و میکروسیلیس ۱۰٪ وزن سیمان فرض گردیده است که البته استفاده و مطالعات مقادیر بیشتری از این مواد توجیه اقتصادی نیز نخواهد داشت . جدول ۱ نحوه نامگذاری و درصدهای مورد استفاده مواد اولیه را نشان میدهد.

برای ساخت ملات سیمان معمولی (OPC) ، مطابق استاندارد ملی ۳۹۳ درصدهای اختلاط انتخاب گردید.^[۷] و در طرح های اختلاط بعدی به همان میزان که نانو و یا میکروسیلیس به مخلوط اضافه گردید از وزن سیمان کسر گردید . ملاک تعیین میزان فوق روان کننده در هر طرح روانی ملات آن در نظر گرفته شد . و به این ترتیب که روانی ملات سیمان معمولی مطابق دستورالعمل ASTM C-230 سنجیده شده بود ، مبنای روانی آزمونه ها قرار گرفت و بدین ترتیب که به هر طرح آنقدر فوق روان کننده اضافه می شد تا به میزان روانی ملات نمونه شاهد (OPC) برسد. پس از آن ، ملات ساخته شده قالبگیری گردید و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در اتاق مرطوب ، از قالب خارج و در حوضچه آب نگهداری شد و در سنین مختلف مورد سنجش قرار گرفت . ملات های سیمان که به صورت منشورهای با ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متر در آمده است در سنین ۳ و ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمون بقرار زیر تعیین گردید .

نحوه نامگذاری نمونه ها هم مطابق (جدول ۱) صورت زیر

شدند که منافذ موئینه و خلل و فرج ژل سیمان کاهش یافته و ساختارهای سیمان هم تراکم تر و منظم تر شده اند

۳- برنامه ریزی آزمایشگاهی :

سیلیس آمورف به عنوان یک پوزولان فعال مطرح است ، قصد بر آن است تا تاثیر ریز تر کردن ابعاد آن را تا مقیاس نانومتريک را بر روی خواص مکانیکی ملات سیمان بسنجیم و به همین خاطر ۱۰ آزمون ملات سیمان مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ تهیه گردید ، که حاوی مقادیر متفاوتی نانو سیلیس ، میکروسیلیس و نانو سیلیس و میکروسیلیس به صورت توامان می باشد .

در طرح اختلاط ساخت ملات های سیمان ، وزن سنگدانه و آب و مواد سیمانی در تمامی طرح ها ثابت فرض شد با این تفاوت که در هر طرح و به هر میزان که نانو و یا میکروسیلیس به مخلوط اضافه شد به همان میزان از وزن سیمان کسر گردید . تا همواره وزن مواد سیمانی ثابت باشد و برای به واقعیت نزدیک تر بودن نتایج ، برای تعیین میزان فوق روان کننده در اختلاط ، حد روانی ملات به عنوان معیار انتخاب گردید . بدین ترتیب که میزان روانی بدست آمده از سیمان بدون نانو و میکرو سیلیس به عنوان مرجع انتخاب گردید و متناسب با مواد پوزولانی ، آنقدر فوق روان کننده اضافه گردیده است تا ملات به روانی مورد نظر برسد .

در این تحقیق از سیمان نوع ۴۲۵-۱ ، ماسه استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ ، نانو سیلیس آمورف معلق در آب با خلوص ذرات ۹۹٪ که درشتی ذرات آن در حدود ۵ نانومتر بود استفاده گردید . و میکروسیلیس هم از کارخانه فروآلیاژ ایران (ازنا) تهیه شد . در حالت ایده آل ، بایستی تنها میزان نانو سیلیس و میکروسیلیس و سیمان تغییر نماید . لیکن این امر به علت ریزی بسیار بالا نانو سیلیس نسبت به میکروسیلیس امکان پذیر نبود به دلیل اینکه افزایش میزان نانو و میکروسیلیس و افزایش سطح ویژه مواد در مخلوط ، ملات دچار افت روانی میگردد ، لذا برای یکسان و همگن بخش کردن ذرات در خمیر ، متناسب با میزان میکرو و نانو سیلیس ، از مقادیری فوق روان کننده استفاده گردید .

آزمونه را بین فکهای دستگاه جهت انتقال بار به سطوح آزمونه قرار داده. صفحه پایینی متحرک و فک بالایی ثابت بودند. این صفحات به نحوی ساخته شده اند که امکان حرکت آرام در جهت عمودی را بدون اصطکاک امکان پذیر می کند.

بعد از تعیین مقاومت خمشی هر یک از ۲ تکه آزمونه جداگانه مورد آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند بدین ترتیب که هر یک از نیمه های منشور را به نحوی در داخل دستگاه قرار داده شدند که فکهای بارگذاری در جهت عرضی بیش از ± 0.5 میلی متر از لبه آزمونه فاصله نداشته باشد و فاصله آن در جهت طولی از انتهای منشور در حدود ۱۰ میلی متر باشد.

بار را به آرامی و با سرعت 20 ± 2400 نیوتن بر ثانیه بر روی نمونه اعمال شد، تا تمام نیروی مورد نیاز برای شکستن وارد گردد. و با استفاده از رابطه زیر مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال محاسبه می گردد. [۸]

$$R_C = \frac{F_C}{1600} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در اینجا :

R_C : مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال

F_C : بیشینه بار در هنگام شکست بر حسب نیوتن

۱۶۰۰: سطح فک بارگذاری یا سطح صفحات کمکی (۴۰×۴۰)

میلی (متر) بر حسب میلی متر مربع

۵- نتایج

نتایج مقاومت فشاری و خمشی ملات های سیمان ساخته شده در جدول ۳ و نمودارهای ۱ و ۲ آمده است.

۶- تفسیر نتایج :

۶-۱- تحلیل نتایج مقاومت خمشی :

در سن ۳ روزه مقاومت خمشی نمونه های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس نسبت به نمونه شاهد (OPC) مقادیر بالاتری را نشان می دهد که چون در این بازه زمانی هنوز فعالیت پوزولانی تکمیل نشده است احتمالاً این افزایش مقاومت می تواند ناشی از

تعیین گردید. نسبتهای استفاده شده از مواد در هر یک از طرح های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

۴- نحوه انجام آزمایش ها

۴-۱- تعیین مقاومت خمشی ملات سیمان

مقاومت خمشی را می توان با یک دستگاه مخصوص این آزمون یا وسیله مناسبی که در دستگاه مقاومت فشاری به کار می رود اندازه گیری نمود. برای این منظور از دستگاهی که در شکل ۱ آورده شده است استفاده گردید. مشابه شکل (۱) استفاده گردید [۸].

منشور آزمونه را داخل دستگاه قرار داده می شود. سپس بار را به صورت عمودی با سرعت 10 ± 50 نیوتن بر ثانیه توسط غلطک بالایی به وجه مخالف منشور وارد می شود تا زمانی که نمونه شکسته شود. سپس دو نیمه منشور را تا زمان انجام آزمون مقاومت فشاری در پارچه مرطوب نگاه داشته می شود.

مقاومت خمشی R_f را از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{b^3} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در اینجا :

R_f : مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

b : ابعاد مقطع مربعی منشور بر حسب میلی متر

F_f : بار اعمال شده بر روی منشور در زمان شکست بر حسب نیوتن

L : فاصله مرکز تا مرکز غلطکهای تکیه گاه یا دهانه بارگذاری

بر حسب میلی متر

۴-۲- تعیین مقاومت فشاری

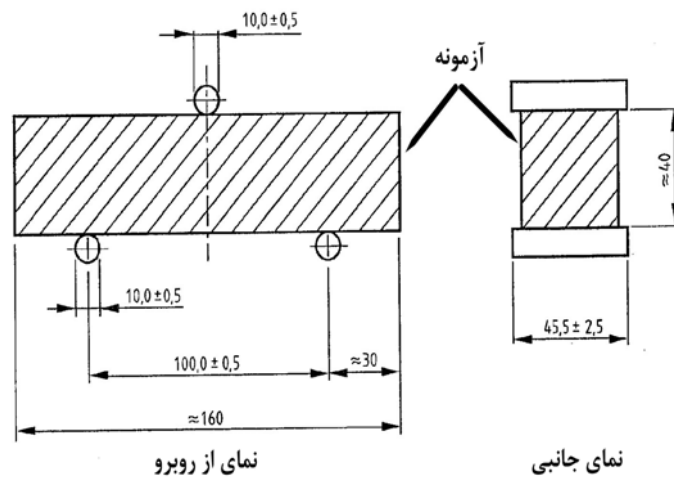
دستگاه آزمون باید ظرفیت مناسبی برای آزمون داشته باشد. برای این منظور از جک هیدرولیکی ۲۰ تن استفاده گردید. محور عمودی سمبه یا پیستون با محور عمودی دستگاه منطبق بوده و در زمان بارگذاری جهت حرکت سمبه یا پیستون در طول محور عمودی دستگاه قرار میگرفت، تا برآیند نیروها درست از مرکز نمونه عبور کند. سطح استوانه پایینی دستگاه نسبت به محور آن عمود بوده و در حین بارگذاری نیز عمود باقی می ماند.

جدول ۱- نحوه نامگذاری نمونه ها

OPC	سیمان پرتلند معمولی (نمونه شاهد و مینا مقایسه)
MS (1-4)	میکرو سیلیس با درصدهای (۰.۲.۵ - ۰.۷.۵ - ۱.۰٪)
L-NS (1-4)	نانوسیلیس سوسپانسیون با درصدهای (۰.۲.۵ - ۰.۷.۵ - ۱.۰٪)
LNS+MS (1-4)	ترکیب نانو سیلیس جامد + میکروسیلیس با درصدهای (۰.۲.۵ - ۰.۷.۵ - ۱.۰٪) که سهم هر یک از مواد در هر ترکیب ۵۰٪ و به طور مساوی می باشد

جدول ۲ - نسبت های هر یک از مواد در طرح اختلاط

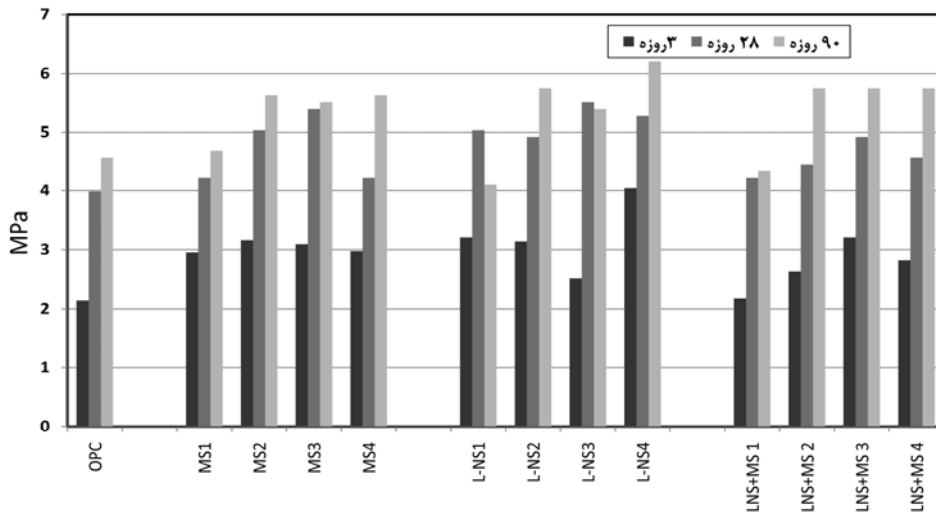
ردیف	نام آزمونه	میزان آب	وزن ماسه	سیمان	درصد وزنی میکروسیلیس به سیمان	درصد وزنی نانو سیلیس	میکروسیلیس	نانوسیلیس سوسپانسیون	درصد فوق روان کننده	میزان روانی بر روی میز لرزان				
										CC	g'	g'	به سیمان	g'
۱	OPC	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۵۰۰	۰.۰٪				۰.۰۰٪	۱۳.۷	۱۳.۶	۱۳.۳	۱۴	۱۳.۶۵
۲	MS1	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۳۸.۸	۲.۵٪		۱۱.۳		۰.۲۰٪	۱۵.۲	۱۵.۵	۱۵.۵	۱۵.۲	۱۵.۳۵
۳	MS2	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۲۷.۵	۵.۰٪		۲۲.۵		۰.۲۲٪	۱۴.۵	۱۴.۵	۱۴.۲	۱۴.۵	۱۴.۴۳
۴	MS3	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۱۶.۳	۷.۵٪		۳۳.۸		۰.۲۴٪	۱۴.۲	۱۴.۳	۱۴.۲	۱۴.۳	۱۴.۴
۵	MS4	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۰۵.۰	۱۰.۰٪		۴۵.۰		۰.۲۷٪	۱۵	۱۵	۱۴.۵	۱۴.۵	۱۴.۷۵
۶	L-NS1	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۳۸.۸	۲.۵٪		۱۱.۳		۰.۰۰٪	۱۴	۱۳.۷	۱۳.۷	۱۳.۷	۱۳.۷۸
۷	L-NS2	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۲۷.۵	۵.۰٪		۲۲.۵		۰.۱۸٪	۱۵.۳	۱۴.۶	۱۵.۱	۱۵	۱۵
۸	L-NS3	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۱۶.۳	۷.۵٪		۳۳.۸		۰.۱۸٪	۱۳.۶	۱۳.۴	۱۳.۳	۱۳.۷	۱۳.۵
۹	L-NS4	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۰۵.۰	۱۰.۰٪		۴۵.۰		۰.۲۷٪	۱۴	۱۳.۶	۱۳.۵	۱۳.۵	۱۳.۶۵
۱۰	LNS+MC 1	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۳۸.۸	۱.۳٪	۱.۳٪	۵.۶	۵.۶	۰.۱۳٪	۱۴.۶	۱۴	۱۴.۴	۱۴.۲	۱۴.۳
۱۱	LNS+MC 2	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۲۷.۵	۲.۵٪	۲.۵٪	۱۱.۳	۱۱.۳	۰.۲۷٪	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵.۲	۱۵.۰۵
۱۲	LNS+MC 3	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۱۸.۵	۳.۵٪	۳.۵٪	۱۵.۸	۱۵.۸	۰.۳۶٪	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
۱۳	LNS+MC 4	۲۲۵	۱۳۵۰	۴۰۵.۰	۵.۰٪	۵.۰٪	۲۲.۵	۲۲.۵	۰.۴۴٪	۱۴	۱۴	۱۴.۵	۱۴.۲	۱۴.۱۸



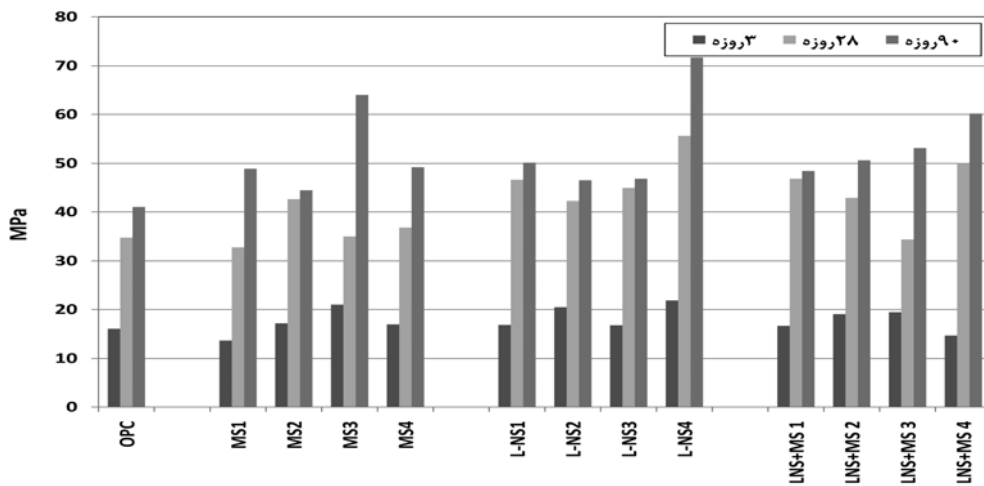
شکل ۱- ترتیب بارگذاری برای تعیین مقاومت خمشی (کلیه اعداد به میلیمتر می باشد)

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه بر حسب مگاپاسکال

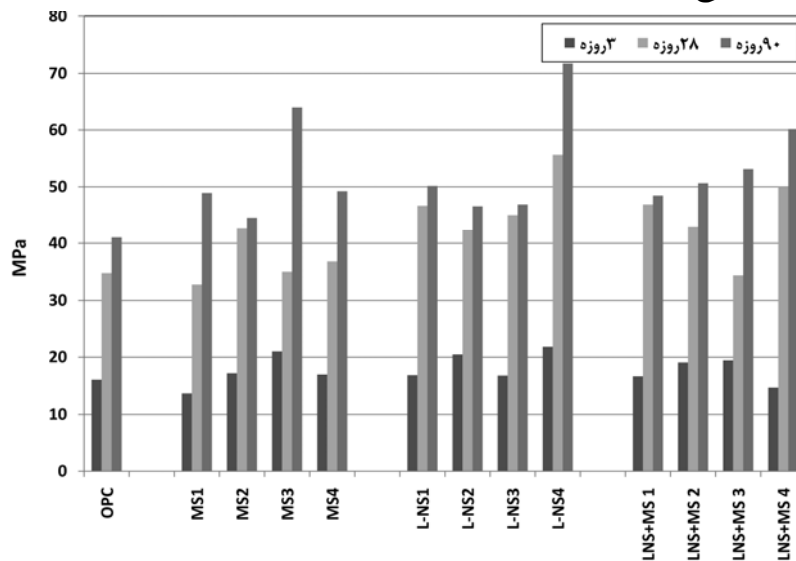
مقاومت فشاری بر حسب Mpa			مقاومت خمشی بر حسب Mpa			نام آزمونه
روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۳	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۳	
۴۱.۰۲	۳۴.۷۷	۱۶.۰۶	۴.۵۷	۳.۹۸	۲.۱۳	OPC
۴۸.۹۱	۳۲.۷۷	۱۳.۶۷	۴.۶۹	۴.۲۲	۲.۹۵	MS1
۴۴.۵۳	۴۲.۷	۱۷.۱۹	۵.۶۲	۵.۰۴	۳.۱۶	MS2
۶۴.۰۶	۳۵	۲۱	۵.۵۱	۵.۳۹	۳.۰۹	MS3
۴۹.۲۲	۳۶.۸	۱۶.۹۷	۵.۶۲	۴.۲۲	۲.۹۸	MS4
۵۰.۱۶	۴۶.۶۶	۱۶.۸۴	۴.۱	۵.۰۴	۳.۲۱	L-NS1
۴۶.۵۶	۴۲.۳۴	۲۰.۴۷	۵.۷۴	۴.۹۲	۳.۱۴	L-NS2
۴۶.۸۸	۴۵	۱۶.۷۸	۵.۳۹	۵.۵۱	۲.۵۱	L-NS3
۷۱.۷۲	۵۵.۶۳	۲۱.۸	۶.۲۱	۵.۲۷	۴.۰۴	L-NS4
۴۸.۴۴	۴۶.۸۸	۱۶.۶۶	۴.۳۳	۴.۲۲	۲.۱۷	LNS+MS 1
۵۰.۶۳	۴۲.۹۷	۱۹.۰۶	۵.۷۴	۴.۴۵	۲.۶۲	LNS+MS 2
۵۳.۱۳	۳۴.۳۸	۱۹.۴۴	۵.۷۴	۴.۹۲	۳.۲۱	LNS+MS 3
۶۰.۱۶	۵۰	۱۴.۶۹	۵.۷۴	۴.۵۷	۲.۸۱	LNS+MS 4



نمودار ۱- نتایج مقاومت خمشی ملات سیمان در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه بر حسب مگاپاسکال



نمودار ۲- نتایج مقاومت فشاری ملات سیمان در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه بر حسب مگاپاسکال



نمودار ۲- نتایج مقاومت فشاری ملات سیمان در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روزه

تصاویر SEM این طور حدس زد که به علت ریزی بالاتر نانو ذرات و رشد تصاعدی سطح ویژه این مواد، امکان ورود این مواد به واکنش های پوزولانی بیشتر می باشد در نتیجه سرعت واکنش پوزولانی در مقایسه با شرایط مشابه برای میکروسیلیس به مراتب بالاتر می باشد در این شرایط این امکان وجود دارد که رشد سریع بلورهای C-S-H باعث ایجاد میکروترک هایی در ژل سیمان گردد که خود به مثابه نقطه ضعفی برای ژل سیمان محسوب میگردد [9].

از طرفی دیگر با توجه به (نمودار ۲) در مقایسه بین نمونه های حاوی نانو ذرات و میکروسیلیس شاهد هستیم اگر تا بازه ۲۸ روزه رشد مقاومت فشاری به میزان a باشد در بازه بین ۹۰-۲۸ روزه رشد مقاومت نمونه های حاوی میکروسیلیس متناسب با زمان سپری شده به میزان $2a$ می باشد. اما در نمونه های حاوی نانو ذرات شاهد رشد ناچیزی در مقاومت فشاری هستیم که از این مقایسه می توان این نکته را برداشت کرد که نمونه های حاوی میکروسیلیس در طی زمان به مرور و با سرعت ثابت شاهد واکنش پوزولانی میکروسیلیس هستیم که منتج به تراکم ژل و افزایش مقاومت آن می شود. ولی در نمونه های حاوی نانو ذرات عملکرد متفاوت است بدین ترتیب که نانو ذرات به سرعت وارد واکنش های پوزولانی شده و تا سن ۲۸ روزه بخش اعظم واکنش های پوزولانی با سرعت انجام میشود.

۷- نتیجه گیری:

ازمایشات انجام گرفته در این تحقیقات نشان می دهد که افزودن میکروسیلیس و نیز نانو سیلیس در فرآوری ملات سیمان می تواند تاثیرات چشم گیری در افزایش و یا کاهش مقاومت های فشاری و خمشی را به همراه داشته باشد. در سن ۳ روزه بدلیل عدم تشکیل فعالیت های پوزولانی و تنها به دلیل پر شدن فضاهای ژل سیمان و ایجاد تراکم مقاومت خمشی و همینطور مقاومت فشاری افزایش یافته اند. در سن ۲۸ روزه در نمونه های حاوی نانو سیلیس شاهد افزایش مقاومت های فشاری و خمشی بوده ایم و در سن ۹۰ روزه نمونه های حاوی میکروسیلیس رفتارهای مقاومتی بهتری نسبت به نانو سیلیس را از خود نشان داده اند.

خاصیت مکانیکی این ذرات باشد که همانند یک فیلر عمل کرده و با پر کردن فضاهای ژل سیمان باعث تراکم بیشتر آن نسبت به نمونه شاهد (OPC) گردد.

به همین خاطر است که مقاومت خمشی نمونه های حاوی نانو سیلیس و میکروسیلیس در سن ۳ روزه تقریباً یکسان است. (نمودار ۱)

در سن ۲۸ روزه مقاومت خمشی نمونه های حاوی مقادیر پایین میکروسیلیس و نانو سیلیس تقریباً یکسان است، ولی در نمونه های حاوی بیش از ۲.۵٪ مواد پوزولانی شاهد افزایش مقاومت خمشی هستیم.

میکرو سیلیس و نانو سیلیس در این قسمت عملکردی تقریباً مشابه داشتند. به این ترتیب که با افزایش میزان این مواد مقاومت خمشی متناظرشان نیز افزایش یافته است. (نمودار ۱)

در سن ۹۰ روزه مقاومت خمشی تمامی نمونه های حاوی میکرو سیلیس و نانو سیلیس نسبت به نمونه شاهد (OPC) رشد بیشتری داشتند. که این می تواند ناشی از شرکت این مواد در فعالیت پوزولانی و تقویت ژل سیمان و ناحیه انتقال باشد. (نمودار ۱)

۲-۶- تحلیل نتایج مقاومت فشاری:

اگر در سن ۳ روزه، مقاومت فشاری و خمشی نمونه های تهیه شده را با هم مقایسه کنیم به وضوح دیده می شود که مقاومت فشاری و خمشی رفتاری کاملاً مشابه دارند.

در سن ۲۸ روزه شاهد آن هستیم که مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانو ذرات در مقایسه با نمونه های حاوی میکروسیلیس مقادیر بالاتری را کسب کرده اند، که در بین نمونه های حاوی نانو ذرات، نانو سیلیس محلول (معلق) نسبت به نانو سیلیس جامد عملکرد بهتری داشته است، که علت آن می تواند ناشی از پراکنده تر شدن ذرات و بالاتر رفتن احتمال شرکت این مواد در فعالیتهای پوزولانی باشد، که منتج به تشکیل ژل سیمانی متراکم و همگن تر می شود. اما در سن ۹۰ روزه رفتار کاملاً معکوس می باشد، به طوریکه نمونه های حاوی میکرو سیلیس در مقایسه با نمونه های حاوی نانو ذرات رفتار بهتری از خود نشان داده اند، این رفتار را می توان با توجه به نتایج آزمایش پالس و همچنین

۸- مراجع

Composite Materials” Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 791 , 2004 Materials Research Society

7. Yamato , T. , Soeda, M. and Emoto , Y. “ Chemical Resistance of Concrete Containing condensed Silica Fume “ 3rd CANMET/ACI International Conference on Fly Ash , Silica Fume ,Slag and Natural Pozzolans in Concrete , Tron - dheim,V.M.Molhotra.ed.1989,ACI Proceed-- ings SP-114, pp 897-913.

8. ISIRI393-2nd-Revision,“Cement-Determination of flexural and compressive strengths-Test method” , Institute of Standards and Industrial Research of Iran

۹. مجتبی مغربی - "بررسی تاثیر نانو ذرات (نانوسیلیس) بر روی خمیر سیمان و مقایسه آن با خمیر سیمان های حاوی میکروسیلیس" - پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت ساخت دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران - شهریور ۱۳۸۶

۱. پایگاه اطلاع رسانی ستاد نانو دفتر همکاری های فناوری

ریاست جمهوری ، www.Nano.ir

2. Zhenhua,L, Huafeng ,W. Shan, H.Yang.L, Miao.W, “Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite” Materials Letters, Vol 60 -2006 , pp 356-359

3. Tao Ji ,“ Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂” , Cement and Concrete Research , Vol 35 , 2005, pp 1943 – 1947

4. Byung-Wan,J, Chang-Hyun.K, Ghi-ho.T, Jong-Bin.p , “Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles” Construction and Building Materials , Article in Press

5. Hui.L,Mao-hua.Z,Jin-ping.O,“Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement ” Wear , Vol : 260-2006, pp 1262-1266

6. Ping-Kun.C, Wei-Ming.Houb,Chao-Lung.H, “A Study on the Microstructure of the Nano Concrete