

بررسی اثر نسبت‌های پایین مقدار نانوذرات جایگزین شده به سیمان کاهش یافته در بتن‌های پرمقاومت (بررسی ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری)

هادی بهادری

استادیار دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

پیام حسینی

مسئول پژوهش و تحقیقات انستیتو بتن و مصالح پیشرفته، مرکز تحقیقات فناوری‌های پیشرفته طلوع، دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

ابراهیم اسلامی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و مکانیک مهندسی، دانشگاه کلمبیا

سیاوش وحیدی

کارشناس انستیتو بتن و مصالح پیشرفته، مرکز تحقیقات فناوری‌های پیشرفته طلوع، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله به بررسی جایگزینی سیمان با نانوذرات سیلیس می‌پردازیم. این جایگزینی به نسبت ۱ به ۱ نمی‌باشد. چراکه تاکنون جایگزینی سیمان با هر ماده پوزولانی یا پودری به مقداری بود که سیمان کاسته شده است. بر همین اساس، در این پژوهش نانوذرات سیلیس در حد مقادیر کم (۳-۰٪) به مخلوط بتن اضافه گردیدند، اما کاهش سیمان با درصد بالاتر و ثابتی صورت پذیرفت (۱۰٪ کاهش مقدار سیمان). این موضوع به چند دلیل صورت پذیرفت. اول آنکه نانوذرات به سبب سطح ویژه بالایشان به راحتی در کل مخلوط پخش نمی‌شوند و ممکن است در بعضی از نواحی انتقالی داخلی کلوخه‌های کم مقاومتی را ایجاد نمایند. لذا به کارگیری درصدها یا مقادیر بالای نانوذرات در راستای بهبود ویژگی‌های مقاومتی و دوامی بتن‌های حاصله به سرانجام نخواهد رسید. دومین علت که علت اصلی این پژوهش نیز می‌باشد بدین صورت است که هدف بررسی اثر جایگزینی مقادیر کم نانوذرات با مقادیر به نسبت بالاتر سیمان می‌باشد. چراکه به علت قیمت بالای نانوذرات سیلیس، به کارگیری مقادیر بالای این ماده حتی با وجود امکانات مناسب پخش این ذرات مقرون به صرفه نخواهد بود. از طرفی کاهش سیمان نیز در حد معقول جایگزینی‌های معمولی و متعارف صورت پذیرفته باشد و بدین گونه توانایی نانوذرات سیلیس به خوبی آشکار می‌گردد. چراکه سیمان ماده اصلی چسبندگی در بتن و مصالح پایه سیمانی می‌باشد و کمبود آن طبیعتاً با کاهش مقاومت بتن‌های ثانویه نسبت به طرح مبنا همراه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: نسبت نانوذرات به سیمان کاهش یافته، بتن‌های پرمقاومت، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، ریزساختار

۱- مقدمه

با توجه به توسعه کارهای ساختمانی بتنی در سراسر جهان و کمبود سیمان در اکثر کشورها و در نتیجه گام برداشتن در جهت تولید یا واردات بیشتر سیمان که باعث خروج ارز، صرف هزینه و انرژی زیاد و کاهش منابع طبیعی می‌شود، تحقیقات زیادی برای یافتن مصالحی که جایگزین این ماده شوند و از طرفی بتوانند در کنار سیمان خواص بتن را بهبود بخشند، صورت پذیرفته است. در نتیجه این تحقیقات انواع پوزولان‌ها مانند خاکستر بادی، سرباره، میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و غیره که دارای اثرات بهبوددهنده می‌باشند، به دست آمده‌اند [۱-۱۲]. اما نکته قابل توجه در تمامی این تحقیقات جایگزینی این مواد با همان مقدار کاهش عیار سیمان می‌باشد.

۲- مصالح و روند اختلاط:

فناوری نانو هم‌گرچه زمان اندکی است که در عرصه صنعت بتن وارد گردیده لیکن مقالات و تحقیقات بسیاری دلالت بر اثر بخش بودن نانو مواد و نانو پودرها بر ریزساختار و کلان ساختار بتن، دارند [۱۳-۲۲]. به کارگیری نانو مواد در بسیاری از رشته‌ها سبب طراحی و ساخت مصالح جدیدی با عملکردهای نوین گردیده است [۲۲]. زمانی که ذرات بسیار ریز در ساختار مصالح پایه سیمانی به کار می‌روند، مصالحی با عملکردهای متفاوت نسبت به مصالح متداول به دست می‌آیند (۲۳). عملکرد مصالح پایه سیمانی بشدت به ویژگی‌های ذرات جامدی در ابعاد نانو مانند ذرات کلسیم-سیکات-هیدرات و یا تخلخل‌های نانومتری در ناحیه انتقالی داخلی بین ذرات سیمان و سنگدانه وابسته می‌باشد [۲۲]. از جمله ویژگی‌های مصالح پایه سیمانی که از نانو ذرات و نانو حفرات تأثیر می‌پذیرند می‌توان به مقاومت، دوام، جمع‌شدگی و چسبندگی به فولاد اشاره کرد [۲۴]. لذا با توجه به وجود حفرات زیاد با ابعاد گوناگون از میکرومتر تا نانومتر در ناحیه انتقالی داخلی، فضای زیادی جهت بهبود کامپوزیت‌های سیمانی با کاربرد نانو مواد در ساختار مصالح پایه سیمانی وجود دارد [۲۵].

از طرفی رفتار منحصراً بفرود نانو سیلیس در ماتریس بتن این ماده را به عنوان یک سوپروپوزولان مطرح کرده است [۱۶-۲۳، ۲۶]. چراکه ذرات دی اکسید سیلیسیوم به عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین جزء تأثیرگذار در واکنش پوزولانی مطرح می‌باشد [۲۷].

با توجه به مباحث بیان شده در بالا، در این تحقیق که بخشی از

یک پروژه ملی می‌باشد، نمونه‌های بتنی با جایگزینی ۱۰٪ سیمان نسبت به عیار طرح مینا (۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن) و افزودن ۱، ۲ و ۳٪ نانوسیلیس به جای سیمان طراحی و ساخته شدند. در نتیجه طرح‌هایی با نسبت‌های مختلف نانوسیلیس به سیمان کاهش یافته (۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳) مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه تست‌های مقاومت فشاری و کششی برزیلی به عنوان نمایندگان ویژگی‌های مکانیکی بتن و بررسی ریزساختار ناحیه انتقالی داخلی بین خمیر و سنگدانه انجام و نتایج آنها بررسی گردید.

مواد سیمانی مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان پرتلند و نانوذرات سیلیس می‌باشد. سیمان تیپ I با نام تجاری I-425 در کارخانه سیمان تهران در ایران ساخته شده و منطبق بر استاندارد ۳۸۹ ایران می‌باشد. همچنین نانوسیلیس مورد استفاده از کشور هند تهیه گردیده است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان در جدول ۱ و نانو سیلیس در جدول ۲ آورده شده است. نانوسیلیس کلئیدی مورد استفاده دارای ۳۰٪ وزنی مقدار خشک ذرات نانوسیلیس می‌باشد. فوق‌روان کننده کاهنده آب از نوع نفتالین سولفونات بوده که توسط شرکت کیمیا نشان تاک ایران ساخته شده و دارای ۳۳٪ ذرات جامد و وزن مخصوص ۱/۱۵ gr/cm³ می‌باشد. به دلیل سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات سیلیس، این ذرات مقداری از آب موجود در بتن را جذب سطحی کرده و باعث کاهش کارایی مخلوط‌های بتن می‌شود [۲۶، ۲۷، ۲۰، ۱۷، ۱۴]. در نتیجه جزء فوق‌روان کننده برای کاربرد ریزتر کردن مخلوط‌ها به کار رفته و علت استفاده از جزء کاهنده آب، پخش و توزیع یکنواخت ذرات نانوسیلیس در مخلوط بتن بوده است چراکه ذرات نانوسیلیس به دلیل انرژی سطحی بسیار زیاد، تمایل زیادی به کلوخه و دانه شدن دارند [۲۰].

ریزدانه از ماسه طبیعی رودخانه با بیشترین اندازه دانه ۴/۷۶ میلی‌متر و درشتدانه آهکی مورد استفاده شکسته شده و با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. نیز مدول نرمی ریزدانه ۳/۱ و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ریزدانه طبق استاندارد ASTM C128-01 برابر ۲/۶۴ gr/cm³ و وزن مخصوص اشباع با سطح

خشک درشتدانه طبق استاندارد ASTM C127-01 برابر و به دست آوردن خواص مشابه کاهش داد. نسبت آب به مواد چسبنده (سیمانی) نیز ۰/۳۳ و ثابت در تمامی طرح‌ها در نظر گرفته شد تا از تأثیر تغییرات این نسبت در نتایج به دست آمده از آزمایشات جلوگیری به عمل آید و از طرفی این نسبت آب به مواد سیمانی پایین در جهت دستیابی به بتن پرمقاومت طراحی شد. همچنین نسبت مقدار فوق‌روان‌کننده کاهنده آب به مواد سیمانی هر طرح اختلاط ثابت و برابر ۱٪ در نظر گرفته شد که برای جلوگیری از تأثیر تغییرات فوق‌روان‌کننده کاهنده آب بر اسلامپ این نسبت ثابت طراحی شده است و نیز نسبت بهینه درشتدانه به ریزدانه که بر اساس طرح‌های آزمایشی به دست آمده تا پیوستگی دانه‌بندی در جهت دستیابی به بتن پرمقاومت رعایت گردد، برابر ۱۱/۹ لحاظ شد.

جزئیات نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های بتنی در جدول ۳ آورده شده است. در طرح اختلاط مینا فقط از سیمان پرتلند با عیار 500 kg/m^3 استفاده شده است، در حالی که در سایر طرح‌ها نانوسیلیس جایگزین بخشی از سیمان شده است. طرح مینا با علامت ۱ مشخص شده است. در هر سری به ترتیب ۱٪، ۲٪ و ۳٪ مقدار وزنی از عیار اولیه سیمان در طرح مینا، نانوسیلیس جایگزین سیمان شده است. البته لازم به توضیح است که مقادیر افزودن نانوذرات سیلیس نسبت به عیار سیمان طرح مینا محاسبه شده‌اند، زیرا هدف از این تحقیق جایگزینی نانوسیلیس به منظور کاهش مصرف سیمان است، لذا باید بررسی شود که چه مقدار از عیار یک طرح اختلاط مشخص را می‌توان با افزودن نانو سیلیس

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند تیپ I-425

| اجزاء | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | K ₂ O+Na ₂ O | L.O.I | سطح ویژه بلین (m ² /g) |
|--------------|------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|-----------------|------------------------------------|-------|--------------------------------------|
| مقدار (٪) | ۲۱/۴ | ۶ | ۳/۴ | ۶۴ | ۱/۸ | ۱/۴ | ۱ | ۳ | ۳۱۱۰ |

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات سیلیس

| چگالی ظاهری (gr/cm ³) | pH | مقدار SiO ₂ (٪) | میانگین اندازه ذرات (nm) | سطح مخصوص (m ² /gr) |
|--------------------------------------|----|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| ۰/۲ | ۱۰ | > ۹۹/۹ | ۱۰ | ۲۵۰۰ |

جدول ۳- طرح اختلاط نمونه‌ها (بر حسب کیلوگرم در ۱ مترمکعب بتن)

| شماره مخلوط | نسبت آب به مواد سیمانی | توضیحات | آب | سیمان | شن | ماسه | فوق‌روان کننده | نانوسیلیس |
|----------------|---------------------------|--|--------|-------|------|------|-------------------|-----------|
| ۱ | ۰/۳۳ | طرح مینا (نسبت ۰) | ۱۶۵ | ۵۰۰ | ۹۸۲ | ۸۰۶ | ۵ | - |
| ۲ | ۰/۳۳ | ۱۰٪ کاهش سیمان و افزایش ۱٪ نانو سیلیس (نسبت ۰/۱) | ۱۵۰/۱۵ | ۴۵۰ | ۱۰۰۷ | ۸۲۷ | ۴/۵۵ | ۵ |
| ۳ | ۰/۳۳ | ۱۰٪ کاهش سیمان و افزایش ۲٪ نانو سیلیس (نسبت ۰/۲) | ۱۵۱/۸ | ۴۵۰ | ۹۸۵ | ۸۰۸ | ۴/۶ | ۱۰ |
| ۴ | ۰/۳۳ | ۱۰٪ کاهش سیمان و افزایش ۳٪ نانو سیلیس (نسبت ۰/۳) | ۱۵۳/۴۵ | ۴۵۰ | ۹۶۲ | ۷۹۰ | ۴/۶۵ | ۱۵ |

برای هر طرح اختلاط نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر جهت انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر جهت انجام تست جذب آب و نمونه استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر نیز جهت انجام تست مقاومت کششی دو نیم شدن ساخته شد.

جهت ساخت بتن حاوی ذرات نانو، ابتدا فوق‌روان‌کننده کاهنده آب با آب در مخلوط‌کن ملات، مخلوط شد و سپس ذرات نانوسیلیس به آنها اضافه شده و با سرعت بالا به مدت ۵ دقیقه به هم زده شد. سیمان، ماسه و درشتدانه نیز در سرعت پایین برای مدت ۲ دقیقه در مخلوط‌کن دوار مخلوط شدند و سپس مخلوط آب، فوق‌روان‌کننده کاهنده آب و نانو ذرات به آرامی به آنها اضافه شدند و در سرعت پایین برای مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شده تا مخلوط به کارپذیری خوبی برسد.

همچنین جهت ساخت بتن مخلوط مینا، ابتدا فوق‌روان‌کننده کاهنده آب در آب حل شد. پس از آن سیمان، ماسه و درشتدانه به صورت یکنواخت در مخلوط‌کن دوار، مخلوط شدند و سپس مخلوط آب و فوق‌روان‌کننده کاهنده آب به آرامی به آنها اضافه شد و برای چند دقیقه تمامی مصالح با هم مخلوط شدند. سرانجام بتن تازه در قالب‌های ذکر شده در بالا ریخته شد. بعد از بتن‌ریزی، یک لرزاننده خارجی برای تسهیل در امر تراکم و کاهش مقدار حباب‌های هوای موجود در بتن به کار رفت. بعد از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها از قالب خارج گردید.

سپس نمونه‌ها را به اتاق عمل‌آوری (با رطوبت نسبی ۹۵٪ و دمای ۲۰±۳) انتقال داده و برای ۷، ۲۸ و روز عمل‌آوری شدند. از هر طرح اختلاط دو قالب برای تست مقاومت فشاری، دو قالب جهت تست جذب آب ۲۸ روزه و دو قالب نیز برای تست

مقاومت کششی نمونه‌برداری شد و نتایج حاصله به صورت میانگین نتیجه دو نمونه در نظر گرفته شدند. جهت انجام تست‌های مقاومت فشاری و کششی از ماشین تست مصالح ۲۰۰ تنی استفاده شد. تست مقاومت فشاری در روزهای ۳، ۷ و ۲۸، تست جذب آب، تست مقاومت کششی برزلی و تست SEM بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه آزمایش شدند. تست مقاومت فشاری برای نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر طبق استاندارد BS 1881: 1993 part 17 انجام شد. همچنین در تست مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C496-04 آزمایش شدند. در این آزمایش مقاومت کششی از طریق اعمال نیروی فشاری فزاینده قطری بر روی یک استوانه ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر که بر روی پهلو قرار گرفته تا لحظه گسیختگی و با استفاده از حداکثر نیرو و ابعاد نمونه محاسبه می‌شود. اما در اینجا از نمونه‌های کوچکتر بهره گرفته شد. لذا نتایج به دست آمده مقادیر بالاتری را نسبت به حالت معمولی نشان می‌دهد.

پس از تست‌های مقاومت‌های مکانیکی، از نمونه‌های خرد شده برای تست SEM نمونه‌برداری شد. همانطور که در بخش ۱ نیز بیان شد، تست SEM جهت بررسی ریزساختار ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه‌ها انجام پذیرفت.

۳- نتایج و تحلیل

نتایج تست‌های مقاومت فشاری و کششی برزلی در جدول ۴ بیان گردیده است.

جدول ۴- نتایج تست‌های صورت پذیرفته

| شماره مخلوط | مقاومت فشاری (مگاپاسکال) | | | مقاومت کششی (مگاپاسکال) |
|-------------|--------------------------|------|------|-------------------------|
| | ۳ | ۷ | ۲۸ | ۲۸ |
| ۱ | ۱۹/۸ | ۴۳/۹ | ۷۰/۱ | ۶/۸ |
| ۲ | ۱۹/۲ | ۳۷/۹ | ۶۸/۶ | ۶/۵ |
| ۳ | ۱۵/۷ | ۳۱/۲ | ۶۲/۱ | ۵/۸ |
| ۴ | ۱۰/۲ | ۲۵/۳ | ۵۹/۲ | ۵/۵ |

همانگونه که در نمودارهای ۳-۱ مشخص می‌باشد، مقاومت فشاری تمامی طرح‌های با کاهش سیمان و دارای نانوذرات سیلیس از طرح بدون کاهش سیمان و همچنین بدون نانوذرات سیلیس (طرح مبنا) در سنین مختلف، کمتر می‌باشد. چراکه سیمان که ماده اصلی ایجاد چسبندگی در بتن می‌باشد کاهش یافته است بدون اینکه ماده چسبنده دیگری به بتن اضافه گردد. البته نانوذرات نیز در مقادیر به نسبت کمتری نسبت به سیمان افزوده گردیده‌اند.

اما نکته قابل توجه کاهش مقاومت نمونه‌های بتنی با افزایش درصد جایگزینی نانوذرات سیلیس می‌باشد. از علل این موضوع می‌توان به کاهش مقدار سیمان و افزایش سنگدانه‌ها اشاره نمود. چراکه از یک طرف کاهش سیمان نسبت به طرح مبنا باعث کاهش مقاومت شده و از طرف دیگر کاهش مقدار سیمان به کاهش مقدار آهک آزاد تولید شده در نتیجه واکنش هیدراسیون می‌انجامد که این موضوع از اثر پوزولانی ذرات نانوسیلیس می‌کاهد. همچنین این کاهش مقدار سیمان باعث افزایش مقدار توده سنگدانه در ماتریس بتن گشته و در نتیجه آن حفره‌های بزرگتر در ماتریس بتن ایجاد می‌گردند و لذا از اثر ریزپرکنندگی ذرات نانوسیلیس نیز کاسته خواهد شد و از طرفی ممکن است همان حالت کلوخه شدن نانو ذرات به سبب سطح ویژه بالایشان در مقادیر بیشتر این ذرات رخ دهد. زیرا در صورت ایجاد حفرات بزرگتر در ماتریس بتن مقدار نانوذرات سیلیس برای پر کردن این حفرات کافی نمی‌باشد و از طرفی اگر هم این مقدار کافی باشد؛ در صورت گردهمایی نانوذرات در حفرات بزرگ، مقادیر زیادی از این ذرات در کنار هم جمع خواهند شد و در نتیجه کلوخه شدن این ذرات رخ خواهد داد و همچنان ماتریس ضعیف بتن را حتی با نمایی از متراکم شدن ریزساختار، شاهد می‌باشیم. لذا مقدار بهینه جایگزینی نانوذرات در اصل کمترین مقدار جایگزینی (۱٪) به دست آمده است. به دلیل مقاومت

کشی ضعیف بتن معمولاً لازم نیست بتن نیروهای کششی مستقیم را تحمل نماید. اما کشش به لحاظ ترک خوردگی‌های ناشی از انقباض حاصله از فعل و انفعالات شیمیایی، انقباض خشک شدن یا کاهش درجه حرارت دارای اهمیت است [۲۸]. روش مستقیم آزمایش مقاومت کششی به ندرت انجام می‌شود و این امر به دلیل اعمال تنش‌های ثانویه غیرقابل اجتناب از طرف

از دلایل که طرح بهینه دارای مقاومتی بسیار نزدیک به طرح مبنا می‌باشد، با وجود کاهش قابل توجه سیمان (۲۰٪) و افزودن مقدار اندک نانوسیلیس (۲٪)، می‌توان به مکانیزمی ۴ مرحله‌ای که سبب بهبود ریزساختار و در نتیجه افزایش ویژگی‌های مکانیکی (انواع مقاومت‌ها) و دوام بتن می‌شود، اشاره نمود. در نتیجه این مکانیزم خواهیم داشت [۲۰]:

۱- واکنش پوزولانی [۱۳،۲۶،۳۰]: مقدار زیادی کریستال کلسیم هیدروکسید^۱ در طی واکنش سیمان و آب تولید می‌شود. کریستال $Ca(OH)_2$ کریستالی شش گوشه می‌باشد و در میان ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و ماتریس خمیر سیمان قرار دارد و این امر برای مقاومت‌های بتن مضر می‌باشد. نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای خود بسیار واکنش پذیر است، در نتیجه با $Ca(OH)_2$ به سرعت واکنش داده و ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات^۲ را تولید می‌نماید، پس طی این واکنش پوزولانی اندازه و مقدار کریستال‌های کلسیم هیدروکسید کاهش می‌یابد و ژل متراکم و پرمقاومت C-S-H که حاصل واکنش پوزولانی می‌باشد با پر کردن فضاهای خالی باعث افزایش چگالی ناحیه انتقالی می‌شود و در نتیجه مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.

۲- خاصیت ریز پرکنندگی^۳ [۱۳،۱۹،۲۶]: حدود ۷۰٪ از محصولات هیدراسیون ژل C-S-H می‌باشد. قطر میانگین ذرات ژل C-S-H تقریباً برابر ۱۰ نانومتر می‌باشد [۳۰]. ذرات نانو با خاصیت پرکنندگی خلل و فرج موجود در ژل C-S-H باعث ایجاد یک ماتریس خمیر چسبنده متراکم‌تر می‌شود.

۳- عملکرد به مانند هسته اتم [۲۶،۳۰]: در ساختمان ژل C-S-H،

اما نکته قابل توجه کاهش مقاومت نمونه‌های بتنی با افزایش درصد جایگزینی نانوذرات سیلیس می‌باشد. از علل این موضوع می‌توان به کاهش مقدار سیمان و افزایش سنگدانه‌ها اشاره نمود. چراکه از یک طرف کاهش سیمان نسبت به طرح مبنا باعث کاهش مقاومت شده و از طرف دیگر کاهش مقدار سیمان به کاهش مقدار آهک آزاد تولید شده در نتیجه واکنش هیدراسیون می‌انجامد که این موضوع از اثر پوزولانی ذرات نانوسیلیس می‌کاهد. همچنین این کاهش مقدار سیمان باعث افزایش مقدار توده سنگدانه در ماتریس بتن گشته و در نتیجه آن حفره‌های بزرگتر در ماتریس بتن ایجاد می‌گردند و لذا از اثر ریزپرکنندگی ذرات نانوسیلیس نیز کاسته خواهد شد و از طرفی ممکن است همان حالت کلوخه شدن نانو ذرات به سبب سطح ویژه بالایشان در مقادیر بیشتر این ذرات رخ دهد. زیرا در صورت ایجاد حفرات بزرگتر در ماتریس بتن مقدار نانوذرات سیلیس برای پر کردن این حفرات کافی نمی‌باشد و از طرفی اگر هم این مقدار کافی باشد؛ در صورت گردهمایی نانوذرات در حفرات بزرگ، مقادیر زیادی از این ذرات در کنار هم جمع خواهند شد و در نتیجه کلوخه شدن این ذرات رخ خواهد داد و همچنان ماتریس ضعیف بتن را حتی با نمایی از متراکم شدن ریزساختار، شاهد می‌باشیم. لذا مقدار بهینه جایگزینی نانوذرات در اصل کمترین مقدار جایگزینی (۱٪) به دست آمده است. به دلیل مقاومت

کشی ضعیف بتن معمولاً لازم نیست بتن نیروهای کششی مستقیم را تحمل نماید. اما کشش به لحاظ ترک خوردگی‌های ناشی از انقباض حاصله از فعل و انفعالات شیمیایی، انقباض خشک شدن یا کاهش درجه حرارت دارای اهمیت است [۲۸]. روش مستقیم آزمایش مقاومت کششی به ندرت انجام می‌شود و این امر به دلیل اعمال تنش‌های ثانویه غیرقابل اجتناب از طرف

از دلایل که طرح بهینه دارای مقاومتی بسیار نزدیک به طرح مبنا می‌باشد، با وجود کاهش قابل توجه سیمان (۲۰٪) و افزودن مقدار اندک نانوسیلیس (۲٪)، می‌توان به مکانیزمی ۴ مرحله‌ای که سبب بهبود ریزساختار و در نتیجه افزایش ویژگی‌های مکانیکی (انواع مقاومت‌ها) و دوام بتن می‌شود، اشاره نمود. در نتیجه این مکانیزم خواهیم داشت [۲۰]:

۱- واکنش پوزولانی [۱۳،۲۶،۳۰]: مقدار زیادی کریستال کلسیم هیدروکسید^۱ در طی واکنش سیمان و آب تولید می‌شود. کریستال $Ca(OH)_2$ کریستالی شش گوشه می‌باشد و در میان ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و ماتریس خمیر سیمان قرار دارد و این امر برای مقاومت‌های بتن مضر می‌باشد. نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای خود بسیار واکنش پذیر است، در نتیجه با $Ca(OH)_2$ به سرعت واکنش داده و ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات^۲ را تولید می‌نماید، پس طی این واکنش پوزولانی اندازه و مقدار کریستال‌های کلسیم هیدروکسید کاهش می‌یابد و ژل متراکم و پرمقاومت C-S-H که حاصل واکنش پوزولانی می‌باشد با پر کردن فضاهای خالی باعث افزایش چگالی ناحیه انتقالی می‌شود و در نتیجه مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.

۲- خاصیت ریز پرکنندگی^۳ [۱۳،۱۹،۲۶]: حدود ۷۰٪ از محصولات هیدراسیون ژل C-S-H می‌باشد. قطر میانگین ذرات ژل C-S-H تقریباً برابر ۱۰ نانومتر می‌باشد [۳۰]. ذرات نانو با خاصیت پرکنندگی خلل و فرج موجود در ژل C-S-H باعث ایجاد یک ماتریس خمیر چسبنده متراکم‌تر می‌شود.

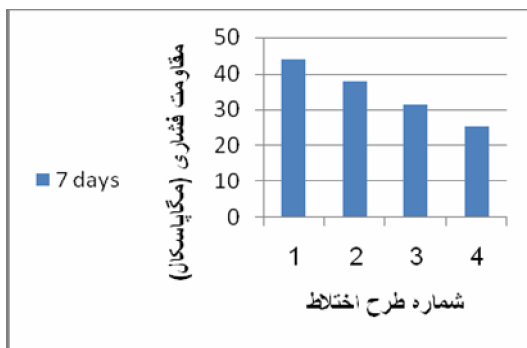
۳- عملکرد به مانند هسته اتم [۲۶،۳۰]: در ساختمان ژل C-S-H،

ذرات نانو سیلیس می‌توانند مانند هسته^۴ عمل کرده و یک پیوند بسیار قوی با ذرات ژل C-S-H ایجاد کنند. بنابراین پایداری محصولات هیدراسیون بهبود می‌یابد و انتظار می‌رود که ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن افزایش یابند.

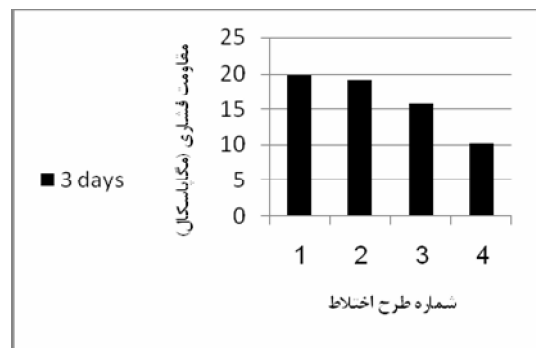
۴- کنترل کریستال سازی [۱۷،۱۳]: در صورتی که مقدار نانوذرات و فواصل بین آنها مناسب باشد، روند کریستال‌سازی کریستال‌ها مانند $Ca(OH)_2$ در ناحیه انتقالی کاهش یافته و در نتیجه ماتریس خمیر سیمان یکنواخت‌تر و متراکم‌تر می‌گردد.

۳-۱- تست SEM

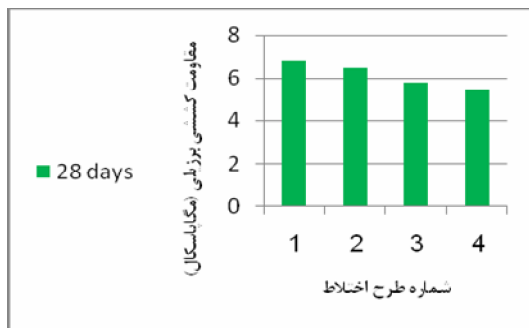
اشکال ۱ تا ۴ به ترتیب نتایج تست بررسی ریزساختار ماتریس بتن طرح‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش نانو ذرات سیلیس در ماتریس بتن، این ماتریس در ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه‌ها شکل متراکم‌تری به خود می‌گیرد که از دلایل آن می‌توان به خاصیت شدید پوزولانی نانوذرات سیلیس و ایجاد ساختار ژل متراکم کلسیم-پوزولانی نانوذرات سیلیس و ایجاد ساختار ژل متراکم کلسیم-



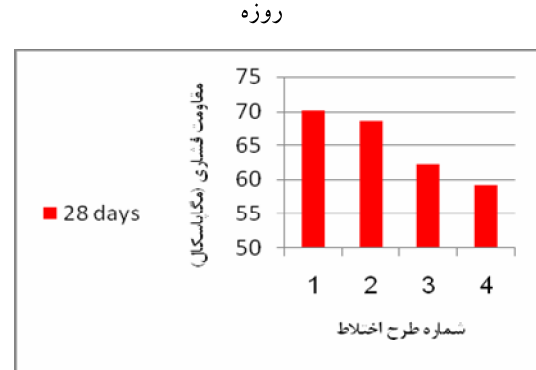
نمودار ۲- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۷ روزه



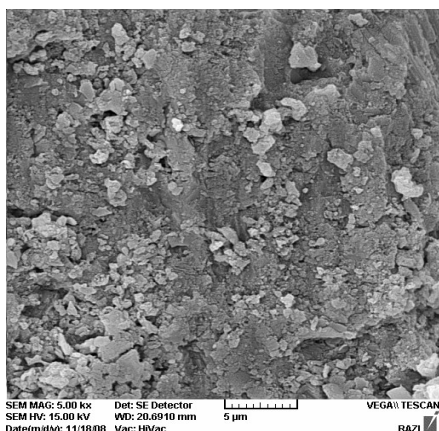
نمودار ۱- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۳ روزه



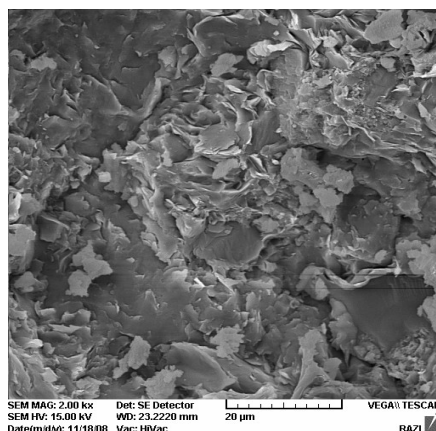
نمودار ۴- مقاومت کششی برزیلی طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روزه



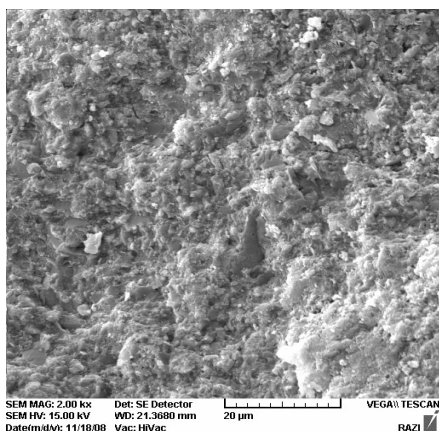
نمودار ۳- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۲۷ روزه



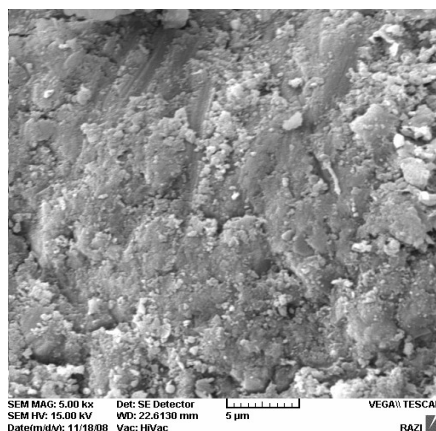
شکل ۲- ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه در طرح ۲



شکل ۱- ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه در طرح ۱



شکل ۴- ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه در طرح ۴



شکل ۳- ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه در طرح ۳

۴- نتیجه گیری

واکنش هیدراسیون و با توجه به اینکه عملکرد پوزولانی نانوذرات با مصرف آهک آزاد آغاز می‌گردد، لذا افزایش نانوذرات و کاهش مقدار آهک آزاد به نوعی توازن را برهم زده است. لذا طرح دارای کمترین مقدار نانوذرات سیلیس دارای بیشترین مقدار مقاومت می‌باشد. در ضمن، با توجه به اینکه مقاومت‌های گوناگون به نوعی به روند مقاومت فشاری مرتبط می‌باشند که البته در این پژوهش نیز این مورد قابل مشاهده است، لذا علل رفتار بتن تحت تست مقاومت کششی برزلی نیز به همان دلایل مربوط به مقاومت فشاری باز می‌گردد. در نهایت، در تست SEM با وجود اینکه ساختاری متراکم‌تر را شاهد می‌باشیم اما مقاومت بیشتر بتن حاصله را شاهد نمی‌باشیم که این موضوع

با توجه به نتایج این تحقیق، کاهش مقدار سیمان تأثیر اساسی و بارزی بر مقاومت‌های مکانیکی بتن می‌گذارد. از طرفی به کارگیری نانوذرات سیلیس البته در حد مقادیر کم نیز نتوانسته این روند کاهش مقاومت را بهبود بخشد و مقاومت در طرح بهینه دارای نانوذرات سیلیس تا حدی نزدیک به مقاومت طرح مینا گردیده است. از طرفی با افزایش مقدار نانوذرات شاهد کاهش مقاومت‌های فشاری و خمشی می‌باشیم. این موضوع به سبب به وجود آمدن ماتریسی متفاوت با ماتریس بتن‌های متعارف می‌باشد. کاهش مقدار سیمان موجب افزایش مقدار سنگدانه‌ها شده و در نتیجه کمی به خلل و فرج درشت‌تر می‌افزاید. همچنین کاهش مقدار سیمان یعنی کاهش آهک آزاد تولیدی توسط

of high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, 26, 347-357, 2004.

[8].Li. G., Zhao. X., "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag," *Cement and Concrete Composites*, 25, 293-299, 2003.

[9].Memon, N.A., Sumadi, A.R., Ramli, M., "Performance of high workability slag-cement mortar for ferrocement," *Building and Environment*, 42, 2710-2717, 2007.

[10].Yajun, J., Cahyadi, J.H., "Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes," *Cement and Concrete Research*, 33, 1543-1548, 2003.

[11].Nair, D.G., Fraaij, A., Klaassen, A.A.k., Kentgens, A.P.M., "A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ash," *Cement and Concrete Research*, 38, 861-869, 2008.

[12].Chung, D.D.L., "Review: Improving cement-based materials by using silica fume," *Journal of Materials science*, 37, 673-682, 2002.

[13].Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J., Ou, J., "Microstructure of cement mortar with nano-particles," *Composites: Part B*, 35, 185-189, 2005.

[14].Li, G., "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂," *Cement and Concrete Research*, 34, 1043-1049, 2004.

[15].Shih, J.Y., Chang, T.P., Hsiao, T.C., "Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite," *Materials Science and Engineering A*, 424, 266-274, 2006.

[16].Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., Park, J.B., "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles," *Construction and Building Materials*, 21, 1351-1355, 2007.

[17].Li, H., Zhang, M.H., Ou, J.P., "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement," *Wear*, 260, 1262-1266, 2006.

[18].Li, H., Zhang, M.H., Ou, J.P., "Flexural performance containing nano-particles for pavement," *International Journal of Fatigue*, 29, 1292-1301, 2007.

[19].Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C., "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Construction and Building Materials*, 21, 539-545, 2007.

[20].Khaloo, A.R., Hosseini, P., Booshehrian, A., "Effect of nano-SiO₂ particles on the mechanical properties of ferrocement mortars," Accepted for technical session on Nanotechnology of Concrete:

The Next Big Thing is Small at the ACI Fall

صحت و اعتبار این تست را منوط می‌کند به انجام سایر تست‌های پیشرفته که متأسفانه در کشور موجود نمی‌باشند.

۵- قدردانی

این مقاله از نتایج پروژه به شماره ۸۵۰۰۴-۴ DAM که توسط وزارت محترم نیرو و شرکت مدیریت منابع آب ایران حمایت مالی گردیده، تهیه شده است. لذا نویسندگان این مقاله از وزارت محترم نیرو در قبال حمایت مالی از انجام این پژوهش و نیز دانشگاه ارومیه به سبب حمایت‌های مادی و معنوی خود، تقدیر و قدردانی می‌نمایند.

۶- پانویس

۱. Ca(OH)₂

۲. C-S-H

۳. Micro-Filling

۴. Nucleus

۷- منابع

[1].Kazberuk, M.K., Lelusz, M., "Strength development of concrete with fly ash addition," *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. XIII, No.2, 115-122, 2007.

[2].Hale, M.W., Seamus, F.F., Bush Jr, T.D., Russell, B.W., "Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures," *Construction and Building Materials*, 22, 1990-2000, 2008.

[3].Shannag, M.J., "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume," *Cement and Concrete Composites*, 22, 399-406, 2000.

[4].Khatib. J.M., Hibbert. J.J., "Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin," *Construction and Building Materials*, 19, 460-472, 2005.

[5].Penpolcharoen. M., "Utilization of secondary lead slag as construction material," *Cement and Concrete Research*, 35, 1050-1055, 2005.

[6].Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R., "Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete," *Cement and Concrete Research*, 31, 2005, 1809-1813.

[7].Mazloom. M., Ramezani-pour. A.A., Brooks. J.J., "Effect of silica fume on mechanical properties

- national congress, global construction, ultimate concrete opportunities, Dundee, UK, 5-7 July, 2005.
- [25].Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., Wang, M., "Investigation on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite," *Materials Letters*, 60, 356-359, 2006.
- [26].Ji, T., "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂," *Cement and Concrete Research*, 35, 1943-1947, 2005.
- [27] خالو، علیرضا. و حسینی، پیام، «بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و ریزساختار ملات سیمان حاوی انواع پوزولان و نانوذرات»، فصلنامه انجمن بتن ایران، شماره ۳۰، صفحات ۲۲-۱۳۸۷، ۱۷.
- [28].Waddell. J.J. and Dobrowolski. J.A, *Concrete Construction Handbook*, 3rd Edition. McGraw-Hill, 2002.
- [29].Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., *Microstructure, properties and materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, p. 659, 2006.
- [30].Ye, Q., "Study and Development of Nano-Composite Cement-Based Material," *Gypsum and Cement for Building*, 11, 4-6, 2001.
- Convention, November 8-12, 2009, New Orleans, LA; sponsored by ACI Committee 236, Material Science of Concrete, and ACI Subcommittee 236D, Nanotechnology of Concrete 2009.
- [21].خالو، علیرضا، حسینی، پیام، بوشهریان، عباس، «توسعه ساخت المان‌های کم‌ضخامت سازه‌ای با بهره‌گیری از نانو ذرات SiO₂»، ارسال شده به اولین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، پاییز ۱۳۸۸.
- [22].Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Hotza, D., Repette, W.L., "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars," *Construction and Building Materials*, Article in press, 2009.
- [23].حسینی، پیام. و اسلامی، ابراهیم، «بهبود عملکرد سازه‌های بتنی با مصالح پیشرفته با رویکر نانو، نشریه فضای نانو»، سال چهارم، شماره ۱۷، صفحات ۹-۳، بهار ۱۳۸۷.
- [24].Colleparidi, S., Borsoi, A., Ogoumah Olagot, J.J., Troli, R., Colleparidi, M., Cursio, A.Q., "Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC", In proceeding of the 6th inter-