

بررسی آزمایشگاهی نانو سیلیس با ساختار مزوپور بر مقاومت فشاری بتن معمولی

عبدالرحمن فیروزی^۱، مرتضی شریفی^۲، مریم حسینی

۱- دانشجویی دکتری سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

۲- هیئت علمی دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشگاه شهید باهنر شیراز

۳- دبیر آموزش و پرورش استان فارس، کارشناس ارشد شیمی

Amin.firozi@yahoo.com

چکیده

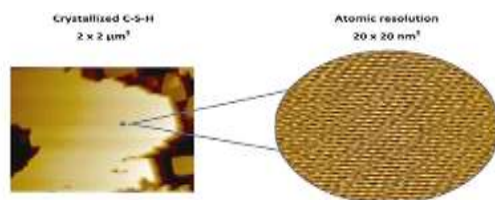
در این دهه اخیر محققان در حال سرمایه گذاری در فناوری نانو برای ایجاد نسل جدید از مواد بتنی برای رسیدن به سازه های بتنی پایدار هستند. عملکرد مصالح پایه سیمانی به شدت به ویژگی های ذرات جامدی در ابعاد نانو مانند ذرات سیلیکات-کلسیم-هیدرات و یا تخلخل های نانومتری در ناحیه انتقالی داخلی بین ذرات سیمان و سنگدانه وابسته می باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی ۶ طرح اختلاط شامل ۴ سری حاوی نانوسیلیس و ۴ سری بتن معمولی که جمعاً ۴۸ آزمون نمونه مکعبی مورد استفاده قرار گرفتند، طرح اول بتن سنگدانه درشت دانه با ۱/۵ و ۴/۵ درصد نانو و طرح دوم بتن سنگدانه ریزدانه با ۱/۵ و ۴/۵ درصد نانو جایگزین سیمان مقاومت فشاری ارزیابی گردید. اثر نانوسیلیس با سیلیکای مزوپور MCM-41 بر مقاومت فشاری بتن معمولی بررسی شده است. نانو ذرات سیلیکای مزوپور دارای مساحت سطحی بیش از ششصد متر مربع بر گرم دارد. براساس تعریف آیوپاک، مواد مزوپور موادی هستند که دارای اندازه حفراتی در گستره ۲ تا ۵۰ نانومتر می باشند. تهیه این ترکیبات در یک فرآیند شیمیایی و با استفاده از روش قالب زنی میسر است. جهت مطالعه ریزساختار ذرات سیلیکای مزوپور از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (TEM) و (SEM) بهره گرفته شده است. نتایج تحقیق حاکی از افزایش مقاومت درشت دانه بادامی و مقاومت درشت دانه نخودی به علت سطح ویژه بسیار بالا نانو ذرات کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: نانو سیلیس، سیلیکای مزوپور، مقاومت فشاری، تخلخل، بتن

۱-مقدمه

بدون شک تکنولوژی بتن از علمی است که در طول چند دهه ی اخیر، با سرعت و به شدت دارای تغییر و تحول بوده است . بتن به عنوان پر مصرف ترین ماده پس از آب و شایع ترین مصالح ساختمانی دنیا شناخته می شود . این ماده دارای دو پارامتر اساسی مقاومت و دوام می باشد. [۱] اخیراً نانو تکنولوژی به طور قابل توجهی علاقه پژوهشگران را به خود جلب کرده است که از پتانسیل های جدید و سودمند ذرات در مقیاس نانو ناشی شده است. با پیشرفت فن آوری نانو، مواد نانو توسعه یافته اند که می توان به مخلوط بتن برای مطالعه خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی افزود. در میان مواد مختلف نانو تولید شده: نانو سیلیس، نانو آلومینا، نانو تیتانیا، نانو زیکنونیا، نانو آهن و غیره می توان نام برد. افزودن نانو و تولید هیدرات سیلیس CH منجر به افزایش امکان

واکنش باهیدروکسید کلسیم CH به منظور افزایش مقاومت بیشتر در ساختار سیمان و تولید هیدرات سیلیس کلسیم CSH همچنین باعث پرکردن منافذ در اثر استفاده از نانو سیلیس در بتن می شود. [۴] در بتن معمولی بخشی از هیدروکسید کلسیم تولید شده ناشی از هیدراسیون سیمان به مرور زمان شسته شده به صورت رسوب از بتن خارج می گردد و اثر آن به صورت منافذ میکرو ساختاری باقی میماند، از طرفی دیگر در نمونه های حاوی نانو سیلیس که این هیدروکسید کلسیم با نانو سیلیس واکنش داده و ژل کلسیم سیلیکات هیدراته تولید می کند که موجب کاهش میزان رسوب و شسته شدن آن از بتن می گردد. [۱۰] بتن ماده ای با ساختار نانو، چند فازی و با اجزا مختلف است. این ساختار شامل فازهای نامنظم کریستالی از ابعاد میکرومتر تا نانومتر می باشد. [۱۳] فاز غیر بلوری و نانوساختار کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-H-S) باعث ایجاد چسبندگی می شود که اجزا بتن را به هم می چسباند. [۱۴]



شکل ساختار نانو مقیاس از کریستال [C-H-S]

بتن در مقیاس نانو شامل ملکول ها، سطوح (دانه ها و فیبرها) و پیوندهای شیمیایی است. مشخصاتی که این مقیاس را توصیف می کنند شامل: ساختارهای ملکولی، گروه های عمل گر سطحی (surface functional groups)، طول پیوندها، مقاومت (انرژی) و دانسیته می باشد. ساختار غیر بلوری و فازهای کریستالی و محدوده های میان فازی، در این مقیاس به وجود می آیند. مشخصات و فرایندها در مقیاس نانو، تعامل بین ذرات و فازها در مقیاس میکرو و اثرات بارهای اعمالی و کلا محیط پیرامون در مقیاس ماکرو، را تعریف می کند. به عبارت دیگر تمامی مشخصات مهندسی در یک توده بتن به فرایندهایی مربوط است که در نانو مقیاس اتفاق می افتد. [۱۳]

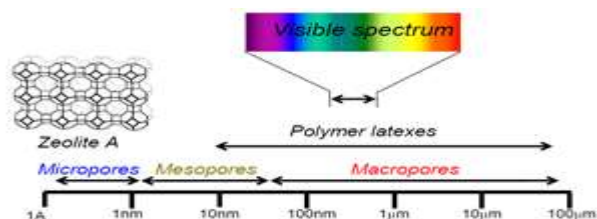
در این تحقیق سعی شده است که از مواد نانو با ساختار متخلخل با مساحت سطح بالغ بر ۲۰ برابر به همتای غیر متخلخل خود دارند استفاده شود..

تخلخل به صورت حفره هایی شامل سوراخ، کانال و شکاف که نسبت عمق به عرض بیشتری دارند، تعریف می شود. نحوه دسترسی به تخلخل می تواند به صورت حفرات بسته (a, b, c, d, e, f) به صورت حفرات باز، b, f و به صورت بن بست و یا e به صورت سرتاسر باز (ممتد) باشد. همچنین یک جسم متخلخل می تواند دارای تخلخلی به صورت (a) استوانه ای باز (b) سیلندری بسته (c) به شکل ظرف جوهر، (d) قیف و (e) به صورت پستی و بلندی باشد، که در شکل ۱ مکنترله می شود.



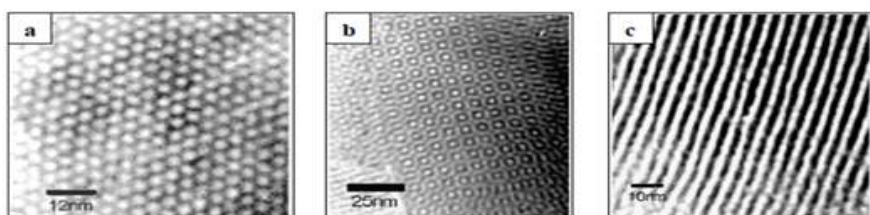
شکل ۱- انواع تخلخل [۵]

بر اساس تعریف آیوپاک، مواد متخلخل به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. با این تعریف هر ماده متخلخلی را می‌توان به آسانی طبقه‌بندی کرد [۵]. در این تقسیم‌بندی مواد دارای قطر حفرات کمتر از ۲ نانومتر به عنوان مواد میکروپور، مواد دارای حفرات ۲ تا ۵۰ نانومتر مواد مزوپور و مواد دارای قطر حفرات بالاتر از ۵۰ نانومتر در محدوده مواد ماکروپور قرار می‌گیرند (شکل ۲).



شکل ۲- دسته بندی مواد متخلخل توسط آیوپاک [۵]

مواد مزوپور موادی هستند که دارای اندازه حفراتی در گستره ۲ تا ۵۰ نانومتر می‌باشند. مواد مزوپور منظم دارای حفرات منظم و آرایش یافته در یک نظام کریستالی هستند که دارای توزیع حفرات نزدیک به هم می‌باشند. تهیه این ترکیبات با استفاده از روش قالب‌زنی میسر است. سنتز موفقیت آمیز مواد مزوپور اولین بار توسط بک و همکارانش در سال ۱۹۹۲ با عنوان خانواده M41S گزارش شد. این خانواده شامل سه نوع ساختار بوده که هر یک دارای کانال‌های بسیار منظم و با توزیع اندازه حفرات نزدیک به هم می‌باشند [۶]. روش تهیه سیلیکای مزوپور در سال ۱۹۷۰ ثبت اختراع شده است. پس از آن در سال ۱۹۹۷ مورد توجه بسزایی قرار گرفت. نانوذرات سیلیکای مزوپور به صورت مستقل در سال ۱۹۹۰ توسط محققان ژاپنی با نام MSNS سنتز شد و بعد از آن توسط شرکت موبایل تهیه و به عنوان مواد کریستالی موبایل یا MCM نام‌گذاری شد. پس از این کشف ساختارهای مزوپور دیگری مانند MCM-48، SBA-15 و MCM-50 معرفی شد. شکل ۳ مورفولوژی حفرات این سه نوع ترکیب را نشان می‌دهد. شکل ۳ (a) MCM-41 را نشان می‌دهد که دارای کانال‌های منظم هگزاگونال می‌باشد. شکل (b) MCM-48 3 را نشان داده و دارای کانال‌های سه بعدی پیچیده می‌باشد. شکل (c) مربوط به MCM-50 می‌باشد که دارای ساختار لایه‌ای است. تهیه این مواد بر تجمع خودآرای سورفکتانت به عنوان عامل مشخص کننده ساختار استوار است که به روش قالب‌زنی کریستال مایع مشهور است و این کریستال مایع می‌تواند دارای ساختار هگزاگونال، مکعبی و لاملار باشد.



شکل ۳- تصویر TEM ساختارهای مختلف سیلیکای مزوپور [۵]

در مقایسه با میکرو سیلیس، نانو سیلیس دارای خلوص بیشتر اکسید سیلیس SiO_2 ، همچنین سطح ویژه بالاتری می‌باشد این دو خصوصیت اصلی باعث به وجود آمدن تفاوت‌های عمده بین این دو ماده می‌شود. [۲]

رمضانیان پور و همکاران (۱۳۸۸) نشان دادند که نفوذپذیری آب در بتن حاوی نانوسیلیس به شکل محسوسی نسبت به بتن معمولی و بتن حاوی میلگرد سیلیس کاهش پیدا می کند [۳].

چینگ و همکاران (۲۰۰۵) **مکنترله** کردند، نانو سیلیس خواص پوزولانی بالاتری نسبت به میکروسیلیس از خودشان می دهد و افزایش مقاومت بالاتری را موجب می شود. یکی از دلایل بهبود مقاومت فشاری را ناشی از فعالیت پوزولانی نانوسیلیس دانسته بر این اساس ذرات نانوسیلیس با درصد خلوص بالای ۹۹ درصد و سطح ویژه زیاد با کریستال های هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون، واکنش داده و تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته مینماید، این واکنش احتمالاً اتصال خمیر سنگدانه را بهبود می بخشد [۷].

لی و همکاران (۲۰۰۴) نیز یکی از دلایل افزایش مقاومت بتن را به تاثیر پرکنندگی ذرات در منافذ خمیر سیمان میدانند. آنها نشان دادند که قرار گیری ذرات نانو باعث جلوگیری از توسعه کریستال های هیدروکسید کلسیم و در نتیجه کاهش حجم کریستال ها در مقابل افزایش حجم ژل کلسیم هیدراته در ماتریس سیمانی می گردد. [۸]

بیگی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیق دیگر با بکار بردن ترکیب نانو سیلیس نشان دادند، خصوصیات مکانیکی تا درصد بهینه ۱،۵ درصد نانوسیلیس و ۳ درصد میکرو سیلیس افزایش یافته پس از آن به آرامی کاهش می یابد این تحقیق همچنین نشان می دهد که اثر پذیری مدول الاستیسیته نسبت به تغییرات درصد نانو سیلیس محسوس تر از تغییرات الیاف پروپیلین است [۱۱]

جی (۲۰۰۵) عمدتین دلیل توسعه مقاومت فشاری بتن با نانو سیلیس را نقش پرکنندگی ذرات نانو در بین منافذ خمیر سیمان میداند و علت آن را اینگونه بیان میکند که ذرات نانو سیلیس به علت ریزدانهگی بالا و چسبندگی سطحی ذرات، در بین ژل کلسیم سیلیکات هیدراته قرار گرفته و ذرات ژل را پر میکنند و این امر موجب یکپارچگی ژل کلسیم هیدراته و افزایش دوام بتن میگردد [۹]

در تحقیقات Qing و همکارانش بر روی اثر افزایش نانو ذرات سیلیکا بر روی خواص خمیر سیمان سخت شده در مقایسه بادوده سیلیس، به بررسی نحوه واکنش این مواد در خمیر سیمان پرداخته شده است آنها نشان دادند که در ذرات نانو سیلیس واکنش پذیری بالاتر در مقایسه با دوده سیلیس دارد. [۱۲]

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق در مجموع ۶ طرح مخلوط بتن ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت نمونه های بتن از سیمان تیپ ۱ در عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب kg/m^2 استفاده گردید. همچنین نانو سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان به میزان ۱/۵ و ۴/۵ درصد استفاده گردید.

برای نیمی از طرح ها از درشت دانه (شن بادامی) با حداکثر قطر ۲۵ میلی متر و ماسه به عنوان ریز دانه و همچنین نیمی دیگر طرح ها از درشت دانه (شن نخودی) با حداکثر قطر ۱۲،۵ میلی متر و ماسه به عنوان ریزدانه استفاده گردید.

همچنین جذب آب درشت دانه بادامی ۰/۲ درصد و درشت دانه نخودی ۰/۵ درصد و جذب آب ماسه طبیعی ۵/۹۳ درصد بدست آمد. برای ساخت نمونه های بتنی نیز از آب شرب در یک نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ استفاده گردید.

برای رسیدن به کارایی مطلوب (اسلامپ ۷۰ تا ۱۰۰ میلی متر) از فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات بنام تجاری SRJ750 استفاده گردید. جداول ۱ و ۲ مشخصات شیمایی و فیزیکی سیمان و مصالح سنگی در نمونه های یتنی ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه فارس

نتایج آزمایش شیمیایی	الزامات استاندارد ASTM C150	نتایج کارخانه
SiO ₂	۲۰	۲۰/۳۸
Al ₂ O ₃	حداکثر ۶	۵/۲۱
Fe ₂ O ₃	حداکثر ۶	۵/۴۹
CaO	-	۶۰/۶۴
MgO ₂	حداکثر ۵	۲/۶۲
Na ₂ O	-	۰/۳۴
K ₂ O	-	۰/۸۶
SO ₃	۳/۵	۲
PQL	-	۰/۸۴
IR	حداکثر ۰/۷۵	۰/۶
LOI	حداکثر ۳	۰/۶۳

جدول ۲: مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در نمونه های بتنی

خصوصیات	درشت دانه بادامی	ریز دانه نخودی
وزن مخصوص	۲/۵۸	۲/۶۰
وزن واحد حجم kg/m ³	۱۶۳۰	۱۵۵۰
مدول نرمی	-	۲/۶۳
حداکثر اندازه	۲۵	۱۲

جدول ۴: نسبت های طرح اختلاط نمونه های کنترل و نانو

نام طرح	شن بادامی (kg)	شن نخودی (kg)	ماسه (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	نانوسیلیس (kg)	فوق روان کننده (kg)	نسبت سیمان	آب
نمونه کنترل C ₁	۶۳۰	-	۱۲۰۰	۳۵۰	۱۴۰	-	۲,۱۰	۰,۴	
نمونه کنترل C ₂	-	۶۳۰	۱۲۰۰	۳۵۰	۱۴۰	-	۲,۱۰	۰,۴	
نمونه نانو N ₁ 1.5	۶۳۰	-	۱۲۰۰	۳۵۰	۱۴۰	۵,۲۵۰	۲,۱۰	۰,۴	
نمونه نانو N ₂ 4.5	-	۶۳۰	۱۲۰۰	۳۵۰	۱۴۰	۱۵,۷۵۰	۲,۱۰	۰,۴	
نمونه نانو N ₃ 1.5	-	۶۳۰	۱۲۰۰	۳۵۰	۱۴۰	۵/۲۵	۲/۱۰	۰/۴	
نمونه نانو N ₄ 4.5	۶۳۰	-	۱۳۰۰	۳۵۰	۱۴۰	۱۵/۷۵	۲/۱۰	۰/۴	

۵- ساخت آماده سازی و نگهداری نمونه ها

برای ساخت مخلوط، ابتدا مصالح مصرفی بطور دقیق توزین می گردد. آنگاه شن و ماسه توزین شده، داخل مخلوط کن الکتریکی کچ شونده، ریخته شده و سپس مقداری از آب توزین شده به اندازه ای که برای رسیدن دانه ها به حالت SSD (اشباع با سطح خشک) لازم است به آن اضافه می شود و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می گردد. سپس ترکیب نانوسیلیس با سیمان به مخلوط اضافه می گردد و دودقیقه عملیات اختلاط انجام می شود. در مرحله آخر مقدار آب باقیمانده که فوق روان کننده نیز به مقدار کافی در آن ریخته شده، اضافه می گردد و عمل اختلاط برای مدت دو دقیقه دیگر ادامه پیدا می کند. بلافاصله بعد از پایان یافتن اختلاط، آزمایش های اسلامپ بر روی مخلوط انجام می گیرد. سپس نمونه ها قالب گیری شده و پس از متراکم شدن در حدود ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده، پس از باز شدن قالبها، بلافاصله در شرایط عمل آوری، در محیط آب و آهک اشباع قرار می گیرند. دمای میانگین محیط آزمایشگاه در این مدت حدود ۲۲ الی ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است. نسبت آب به سیمان به لحاظ استفاده از فوق روان کننده $W/C=0.4$ بکار گرفته شده است.

۶- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش های مقاومت فشاری بر روی نمونه های ۱۰*۱۰*۱۰ سانتیمتری در سنین ۷ و ۲۸ روز مانند اشکال ۴ و ۵ زیر روی طرح های کنترل و نانو سلیس انجام پذیرفت. این آزمایش براساس استاندارد ASTM C39 انجام شد. همچنین جدول ۵ نسبت مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با ابعاد غیر استاندارد به مقاومت فشاری نمونه های استاندارد نشان می دهد

جدول ۵: نمونه مکعبی

اندازه نمونه	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
نسبت مقاومت	۱,۱۰	۱,۰۰	۰,۹۷	۰,۹۴	۰,۹



شکل ۴ نمونه گیری کنترل و نانو از بتن تازه



شکل ۵ نمونه ۷ روزه نانو

۷-ارائه نتایج

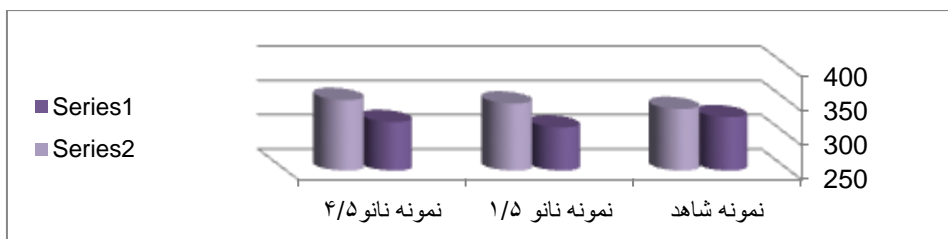
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه های کنترل و نانوسیلیس مزوپور پرداخته می شود. جداول ۶ و ۷ مقاومت فشاری های نمونه طرح شن بادامی و طرح ریزدانه نخودی در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می دهد.

جدول ۶: نمونه های طرح شن بادامی ۱/۵ و ۴/۵ درصد نانو

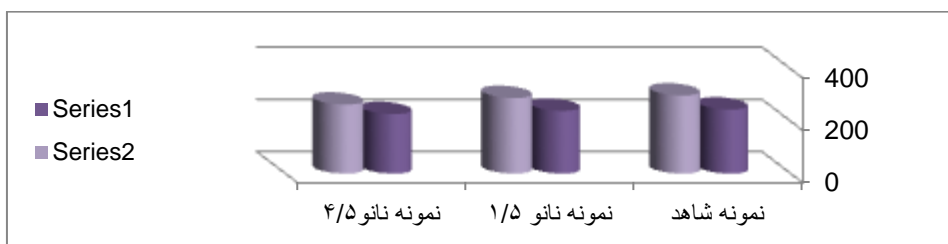
نمونه نانو ۴/۵	نمونه نانو ۱/۵	نمونه کنترل	طرح
۳۲۱	۳۱۳	۳۲۸	۷ روز
۳۵۳	۳۴۸	۳۴۰	۲۸ روز

جدول ۷: نمونه های طرح شن نخودی ۱/۵ و ۴/۵ درصد نانو

طرح	نمونه کنترل	نمونه نانو ۱/۵	نمونه نانو ۴/۵
۷ روز	۲۴۵	۲۴۰	۲۲۸
۲۸ روز	۲۹۸/۷	۲۸۹	۲۶۴



نمودار ۲: مقاومت فشاری طرح درشت دانه



نمودار ۳: مقاومت فشاری طرح ریزدانه

۸- تجزیه و تحلیل نتایج

با توجه به آزمایش مقاومت فشاری با ۱/۵ و ۴/۵ درصد مواد نانوسیلیس افزوده به سیمان با طرح شن بادامی (درشت دانه) افزایش ۳ تا ۴ درصدی بدست آمده است. همچنین با ۱/۵ و ۴/۵ درصد مواد نانوسیلیس افزوده به سیمان با طرح شن نخودی (ریزدانه) کاهش ۶ تا ۱۰ درصدی مقاومت بدست می آید. نمودارهای ۲ و ۳ به ترتیب روند افزایش نمونه نانو درشت دانه و کاهش نمونه ریزدانه را نشان می دهد. این افزایش مقاومت به علت واکنش شدید پوزلانی نانوسیلیس بوده و کاهش مقاومت به علت ویژه بسیار بالای نانوذرات است که وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه) بیشتر شود می تواند با یک واکنش فیزیکی به هم چسبیده و کلوخه های ناپایدار را ایجاد کند که می توان در این بررسی آزمایشگاهی ۱/۵ درصد نانوسیلیس را درصد بهینه داشت. مقدار بهینه میکروسیلیس با سطح ویژه ۲۰ متر مربع بر گرم در مواردی که دوام بتن مورد نظر باشد ۷ تا ۸ درصد وزن مواد سیمانی و در مواردی که افزایش مقاومت بتن مورد نظر باشد حدود ۱۰ درصد وزن مواد سیمانی است، در صورتیکه مقدار بهینه نانوسیلیس با سطح ویژه بسیار بالا در مواردی که مقاومت بتن مورد نظر باشد ۱/۵ تا ۳ درصد وزن مواد سیمانی، در این تحقیق آزمایشگاهی بدست آمد، این نشان دهنده صرفه جویی اقتصادی در مصرف مواد پوزلانی و سیمان می باشد.

۹- نتیجه گیری

- ۱- در سنین اولیه بتن مقاومت فشاری نمونه نانو در هر دو طرح درشت دانه و ریز دانه نسبت به کنترل کاهش داریم.
- ۲- افزایش ۴ درصدی و کاهش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری به ترتیب طرح های درشت دانه (بادامی) و ریزدانه (نخودی) نانو نسبت به نمونه کنترل در این تحقیق بدست آمد.
- ۳- با توجه به نتایج مقاومت فشاری دو طرح ریزدانه (نخودی) و درشت دانه (بادامی) با درصد کمی از نانو سیلیس بهبود می یابد و با توجه با این امر می توان در جهت صرفه جویی اقتصادی مقدار سیمان مصرفی در بتن معمولی استفاده نمود.

مراجع

- ۱- مستوفی نژاد، د.، دانشگاه صنعتی اصفهان تکنولوژی طرح اختلاط بتن و ویرایش دوم چاپ ۴۲
- ۲- حیدری، علی، طاهر یسر تشنیزی، م.، ۱۳۹۲، استفاده از نانو سیلیس ورزین در بتن خودتراکم با مقاومت بالا، دومین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه اصفهان
- ۳- رمضان پور، ع.، مروج جهرمی، م.، مودی، ف.، ۱۳۸۸، تاثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن در مقایسه با میکرو سیلیس، هشتمین کنگره بین المللی مهندس عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.
- 4 - Maheswaran, S, et al. "An Overview on the Influence of Nano Silica in Concrete and a Research Initiative." *Research Journal of Recent Sciences*, ISSN2277(2013):2502
- 5 - McCusker, L.B.; Liebau, F.; Engelhardt, G. *Microporous Mesoporous Mater.* **2003**, 58,3
- 6- Tang, F.; Li, L.; Chen, D. *Adv. Mater* 2012, 24, 1504
- 7- Ye Qing, Zhang Zenon, Kong Deyu, Chen Rongshen. Influence of nano-Sio₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume "College of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, 310014 Hangzhou, PR China, accepted 7 September 2005
- 8- li, Hui, Hui_gang Xiao, and jin-ping Ou. "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano phase materials." *cement and concrete Research* 34.3 (2004):435-438.
- 9- Ji Tao, "Preliminary study on the water permeability and microstructure of Concrete.
- ۱۰- حسینعلی بیگی، م.، برنجیان، ج.، احمدوند، م.، پلطفی، ا.، عمران، ۱۳۹۱، بررسی آزمایشگاهی اثر توام الیاف و ذرات نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی، رئولوژی و دوام بتن خود تراکم، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اصفهان دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۱۱- حسینعلی بیگی، م.، واتقی امیری، ج.، روشن، ن.، باقریال، م.، ۱۳۹۲، بررسی استفاده از نانوسیلیس و میکروسیلیس بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن، کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، انجمن بتن ایران

