

تأثیر عملکرد ذرات نانوسیلیس در بهبود مشخصات مکانیکی بتن

با افزایش عیار سیمان

گرشاسب خزانجی، کاندیدای دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مصطفی خزانجادی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محسن تدین، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

E-mail: khanzadi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳

چکیده

در سال‌های اخیر کاربرد ذرات نانو، فرصت‌های تازه‌ای برای بهبود مقاومت و دوام بتن ایجاد کرده است. ولی ناشناخته بودن تأثیر تغییر مشخصات طرح اختلاط بر خواص این نوع بتن‌ها، باعث عدم توسعه کاربرد آنها شده است. بنابراین در این مقاله تأثیر کاربرد ذرات نانوسیلیس بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن با عیار بالای سیمان بررسی شده است. برای این منظور مقاومت فشاری و کششی بر روی سه عیار ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در بتن مرجع و بتن حاوی نانوسیلیس مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای این تأثیر در ریز ساختار بتن بهره‌برداری شده است. نتایج این مشاهدات نشان می‌دهد که با تغییر عیار سیمان، روند تغییر مقاومت بتن دارای منحنی محدب و با یک نقطه حداکثری هستند. افزوده شدن نانوسیلیس به طرح اختلاط، علاوه بر افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به بتن مرجع، شکل منحنی تغییرات مقاومت نسبت به تغییر عیار سیمان را نیز به سطح بالاتری از عیار توسعه می‌دهد. در نتیجه با افزودن ذرات نانوسیلیس به بتن، امکان دستیابی به افزایش مقاومت فشاری و کششی در نسبت بالاتری از عیار سیمان فراهم می‌شود. بررسی ریزساختار بتن در تصاویر SEM، نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس از توسعه ریز ترک‌ها جلوگیری کرده و بنابراین مقاومت نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، علی‌رغم افزایش عیار سیمان، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تکنولوژی بتن، عیار سیمان، نانوسیلیس، ریزساختار، مقاومت مکانیکی

۱- مقدمه

برای بهبود خواص بتن موجود در سازه‌های حمل و نقل، منتشر شده‌اند ولی در سال‌های اخیر کاربرد ذرات نانو برای بهبود خواص بتن توجه بسیاری از محققان علم تکنولوژی بتن را به خود جلب کرده است. ذرات نانوسیلیس به علت اندازه ذرات بسیار کوچک خود و فعالیت شدید آنها، می‌توانند خواص جدیدی را در بتن ایجاد کرده یا موجب بهبود خواص بتن شوند [Scrivener, 2008].

G. Li (۲۰۰۴) گزارش کرده است که نانوسیلیس می‌تواند تأثیر و سرعت واکنش خاکستر بادی (که معمولاً بسیار کند واکنش

دوام و مقاومت سازه‌های بتنی در صنعت حمل و نقل از جمله پایه پل‌ها یا اسکله‌های دریایی، به علت حجم بار ترافیکی و قرارگیری در معرض عوامل محیطی، توجه زیادی را در علم تکنولوژی بتن به خود جلب کرده است [Ozyildirim, 1993]. بنابراین تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا با استفاده از افزودنی‌ها، مقاومت و دوام بتن بهبود یابد. از جمله این مطالعات: استفاده از میکروسیلیس، لاتکس و خاکستر بادی [Ozyildirim, 1993]، بهبود دوام با سرباره و پودر سنگ [مستوفی‌نژاد، ۱۳۸۵] و یا استفاده از خاکستر بادی و سرباره [Micah Hale, 2008]

آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفته و ریزساختار بتن با استفاده از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شده است. در مقایسه با کارهای قبلی صورت گرفته در زمینه شناخت تأثیر تغییر عیار سیمان بر مشخصات بتن، این مقاله با مطالعه ریزساختار بتن توانسته است نتایج ظاهراً متضاد ارایه شده در مطالعات قبلی را تکمیل و ساز و کار این تأثیر را مشخص کند. این مقاله همچنین برای اولین بار از ذرات نانوسیلیس برای جبران محدودیت افزایش عیار سیمان در بتن استفاده کرده است.

۲- تأثیر تغییر عیار سیمان بر خواص بتن

تغییر عیار سیمان در طرح مخلوط، با تغییر دو پارامتر مهم نسبت سنگدانه به سیمان (A/C) و حجم خمیر می‌تواند خواص مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار دهد. Georgiou و Kolias (۲۰۰۵) این کاهش مقاومت را به دلیل کاهش طول مسیر ترک، ناشی از تنش فشاری برای شکست بتن دانسته‌اند. در نتیجه کاهش طول ترک، به انرژی کمتر یا اعمال بار کمتری برای شکست نیاز است و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [Kolias, 2005]. Dahir و همکاران (۲۰۰۶) دلیل عمده تأثیر افزایش عیار سیمان را، تأثیر آن بر ریزساختار بتن دانسته‌اند. آنها نشان داده‌اند که با افزایش عیار سیمان، تخلخل در خمیر افزایش و مقاومت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آنها افزایش آب انداختگی داخلی بتن و کاهش چسبندگی خمیر به سنگدانه‌ها را نیز دلیل این امر ذکر کرده‌اند [Dahir, 2006]. Yegiter و همکاران (۲۰۰۷) نشان داده‌اند که در یک نسبت ثابت آب به سیمان، بسته به طرح اختلاط، با افزایش عیار سیمان در مخلوط، مقاومت بتن کاهش می‌یابد [Yegiter, 2007]. این پدیده، به‌ویژه در نسبت آب به سیمان پایین خود را بیشتر نشان می‌دهد. Deshpande و همکاران (۲۰۰۷) این کاهش مقاومت را با افزایش جمع‌شدگی بتن توجیه می‌کنند. آنها ادعا کرده‌اند که در نتیجه افزایش جمع‌شدگی بتن، ترک‌ها افزایش یافته و پیوستگی بین سیمان و سنگدانه کاهش می‌یابد که در نتیجه آن، مقاومت، کاهش و نفوذپذیری افزایش می‌یابد [Deshpande, 2007]. Poon و همکارانش (۲۰۰۸)، علت این امر را به کاهش مقاومت

پوزولانی از خود نشان می‌دهد) را در بتن افزایش دهند [Li, 2004]. T. Ji (۲۰۰۵) نشان داده است که نفوذپذیری بتن‌های حاوی نانوسیلیس کاهش می‌یابد [Ji, 2005]. Bjeornstream و همکاران (۲۰۰۵) بهبود رفتار بتن را در برابر یخ‌زدگی و آب‌شدگی با افزودن نانوسیلیس به طرح مخلوط گزارش کرده‌اند [Bjeornstream, 2005]. H. Li و همکاران (۲۰۰۶) افزایش مقاومت سایشی بتن را با نانوسیلیس گزارش کرده‌اند [Li, 2006]. نتایج مطالعات Qing و همکاران (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که این ذرات خواص پوزولانی بالاتری از میکروسیلیس داشته و باعث افزایش مقاومت به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌شوند [Qing, 2007]. آزمایش‌های Jo و همکاران (۲۰۰۷) مقدار این افزایش مقاومت فشاری را برای ملات‌های حاوی نانوسیلیس ۳ تا ۱۲ درصد نشان می‌دهد [Jo, 2007]. H. Li و همکاران (۲۰۰۸) نشان داده‌اند که این ذرات مقاومت خستگی بتن را نیز بهبود می‌دهند. آنها همچنین گزارش کرده‌اند که در اثر افزودن نانوسیلیس، ریزساختار بتن بهبود یافته و ساختار متراکم‌تر و با منافذ کمتری ایجاد می‌شود [Li, 2008]. ولی توسعه کاربرد ذرات نانو در بتن، نیازمند شناخت تأثیر این مواد بر خواص دوامی بتن و حساسیت نانوسیلیس به تغییرات در ترکیب طرح اختلاط است. یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار بتن، تغییرات عیار سیمان در طرح مخلوط است. افزایش عیار سیمان در مخلوط بتن، تأثیر بسیاری در کاهش مقاومت و رفتار مکانیکی بتن از یک سو و همچنین کاهش نفوذپذیری و دوام بتن از سوی دیگر دارد [Shah, 2000 and Yegiter, 2007]. به همین دلیل است که آیین‌نامه پایایی بتن [رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۴]، عیار سیمان را به حداکثر مقدار ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (در شرایط با خوردگی بالا) محدود کرده است. هدف این مقاله بررسی تأثیر عملکرد ذرات نانوسیلیس در بهبود خواص مکانیکی بتن، با تغییر در مقدار عیار سیمان در طرح مخلوط است. به این وسیله می‌توان رفتار بتن‌های حاوی نانوسیلیس را برای شرایط کارآیی و عملکردی متفاوت تعیین کرده و کاربرد ذرات نانوسیلیس را به شرایط متفاوت در طرح اختلاط توسعه داد. برای این منظور سه عیار متفاوت سیمان (۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) در بتن مرجع و بتن حاوی ذرات نانوسیلیس مورد مطالعه قرار گرفته است.

Yigiter و همکاران (۲۰۰۷) نیز نتایج متفاوتی را برای تأثیر افزایش عیار سیمان بر نفوذ یون کلر گزارش کرده‌اند. آنها با آزمایش عمق نفوذ کلر در عیارهای ۲۵۰ و ۳۵۰ و ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب، گزارش کرده‌اند که افزایش عیار سیمان موجب کاهش میزان عمق نفوذ کلر شده است [Yigiter, 2007]. مرور نتایج متضاد گزارش شده، نشان‌دهنده اختلاف در نتایج مطالعات مختلف در زمینه تغییر عیار سیمان در طرح مخلوط است. به‌ویژه این مسئله وقتی نگران‌کننده‌تر می‌شود که تغییر عیار در طرح مخلوطی انجام گیرد که برای افزایش مقاومت بتن با افزودن نانوسیلیس ساخته شده است. در این مقاله همچنین تأثیر تغییر عیارهای مختلف سیمان بر رفتار دوامی بتن‌های حاوی نانوسیلیس مورد آزمایش قرار گرفته است.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

برای سنگدانه‌ها در طرح مخلوط این تحقیق از ماسه گرد گوشه رودخانه‌ای با چگالی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مربع و شن با حداکثر اندازه ذرات ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است. سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136-96 دانه‌بندی شده‌اند. فوق روان‌کننده مصرفی از نوع GLENIUM 51P از نوع پلی‌کربوکسیلاتی است. سیمان مصرفی از نوع پورتلند تیپ ۱-۴۲۵ و محصول کارخانه سیمان تهران است.

نانوسیلیس استفاده شده در این تحقیق با درصد خلوص ۹۹/۹ درصد سیلیس، قطر ذرات ۵ نانومتر و چگالی ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مربع؛ از نوع معلق در آب با غلظت ۱۵ درصد به‌صورت سوسپانسیون، محصول کشور سوئد است. ذرات نانوسیلیس با نسبت ۱/۵ درصد از وزن سیمان به عنوان جایگزین سیمان انتخاب شد. مخلوط بتن مرجع با نام OPC و مخلوط حاوی نانوسیلیس با نام SN مشخص شدند و عدد پس از آخرین حرف، نشان‌دهنده عیار سیمان مربوطه است، لازم به ذکر است که نسبت آب به سیمان برای تمامی مخلوط‌ها ثابت و برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. عنوان و ترکیب مخلوط‌ها در جدول ۱ آمده است.

سنگدانه‌ها، مقاومت خمیر و چسبندگی بین خمیر و سنگدانه به علت کاهش حجم سنگدانه‌ها در مخلوط نسبت داده‌اند [Poon, 2008]. گزارش‌های مشابهی از تأثیر منفی افزایش عیار سیمان بر نفوذپذیری و مقاومت الکتریکی بتن ارایه شده است [Shi, 2004]. Shah و همکاران (۲۰۰۰) افزایش نفوذپذیری بتن را با افزایش عیار سیمان گزارش کرده‌اند.

آنها نشان داده‌اند که با افزایش عیار سیمان در مخلوط (A/C) در برابر حرکت مایعات، سنگدانه‌های کمتری مانع ایجاد می‌کند و پیچ و خم کمتری در مسیر وجود دارد که در نتیجه ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد [Shah, 2000]. همچنین Shi (۲۰۰۴) گزارش کرده است که با افزایش عیار سیمان، مقاومت الکتریکی بتن نیز کاهش می‌یابد. او علت این کاهش مقاومت الکتریکی را در کاهش حجم سنگدانه‌ها جستجو و استدلال می‌کند که سنگدانه‌ها مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به خمیر در برابر حرکت یون‌ها دارند و با کاهش حجم سنگدانه‌ها در مخلوط به علت افزایش عیار سیمان، مقاومت الکتریکی کل نمونه کاهش می‌یابد [Shi, 2004]. Harrt و همکاران (۲۰۰۴) کاهش مقاومت الکتریکی را به دلیل افزایش تخلخل خمیر می‌دانند.

آنها نشان داده‌اند که با افزایش عیار سیمان، حجم خمیر و در نتیجه آن تخلخل مخلوط بتنی افزایش می‌یابد. افزایش تخلخل بتن، آب منفذی بتن بیشتری را برای انتقال یون‌های کلراید در اختیار قرار می‌دهد که موجب کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود [Harrr, 2004].

با این وجود، در برخی مطالعات روندی معکوس گزارش شده است. مطالعات Shain و همکاران (۲۰۰۳) نشان داده است که با افزایش عیار سیمان، از ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. آنها ادعا کرده‌اند که به علت بالا بودن سطح ویژه ذرات سیمان نسبت به سایر اجزای مخلوط، با افزایش عیار سیمان، دانسیته بتن افزایش یافته و در نتیجه، بتن چگال‌تر می‌شود و به همین علت مقاومت فشاری نیز با افزایش عیار سیمان بیشتر می‌گردد. همچنین، مشاهدات آنها نشان می‌دهد که جذب آب بتن با افزایش عیار سیمان کاهش می‌یابد که علت احتمالی این امر را کاهش تخلخل بتن با افزایش ذرات ریز سیمان بیان کرده‌اند [Shain, 2003].

جدول ۳. طرح مخلوط نمونه‌های مورد آزمایش

اسلامپ (mm)	فوق روان کننده (kg/m ³)	نانوسیلیس (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نام مخلوط
۸۰	۱/۵۰	-	۷۳۵	۱۰۶۸	۱۸۷	۳۵۰	OPC.35
۸۰	۱/۵۰	-	۴۸۵	۹۹۶	۱۹۹	۴۰۰	OPC.40
۸۰	۱/۶۳	-	۶۴۵	۹۴۱	۲۱۹	۴۵۰	OPC.45
۸۰	۳/۹۲	۵/۲۵	۷۲۴	۱۰۵۳	۱۴۸	۳۴۵	NS.35
۸۰	۴/۸۰	۶/۰۰	۶۸۳	۹۹۴	۱۶۵	۳۹۴	NS.40
۸۰	۵/۴۰	۶/۷۵	۶۴۶	۹۴۰	۱۸۲	۴۴۳	NS.45

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای ساخت نمونه‌های نانوسیلیسی، ذرات نانوسیلیس را در یک مخلوط‌کن با سرعت بالا، با بخشی از آب طرح اختلاط، مخلوط می‌کنند تا لجن به دست آید. سپس نیمی از مواد خشک در مخلوط‌کن ترکیب شده، در مرحله بعدی نیمی از آب به آن اضافه و مخلوط گردیده است. نیمه دیگر مواد خشک به همراه باقی‌مانده آب و فوق روان کننده به دیگ اضافه و در انتها، لجن نانوسیلیس با دور بالا به این مخلوط افزوده شد.

برای تعیین مقاومت فشاری و کششی طبق استانداردهای BS 1881-108,110 و ASTM C192 از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری برای مقاومت فشاری و استوانه‌های ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متری برای مقاومت کششی استفاده شده است. برای مشاهدات میکروسکوپی از عکس‌های SEM با بزرگ‌نمایی تا ۳۰۰۰۰ مرتبه، در پژوهشکده پلیمر رازی استفاده شده است.

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی

شکل ۱ و ۲ نمایانگر مقاومت فشاری و کششی بتن‌های مرجع و نانوسیلیسی هستند. ملاحظه می‌شود که با افزودن مقدار کمی (۱/۵٪ وزن سیمان) ذرات نانوسیلیس به مخلوط، در نسبت‌های متفاوتی از عیار سیمان، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها ایجاد شده است. این تأییدکننده نتایج مطالعات منتشر شده از توسعه خواص مکانیکی بتن با نانوسیلیس است [Jo, 2007]. ذرات نانوسیلیس مقاومت فشاری و کششی بتن را

بهبود بخشیده و حتی در سنین کم عمل‌آوری نیز، توسعه مقاومت بالایی را تجربه می‌کنند. Li (۲۰۰۴) به تفصیل این پدیده را بررسی و سازوکارهای تأثیرگذاری نانوسیلیس برای بهبود مقاومت بتن را تشریح کرده است [Li, 2004].

با مقایسه نتایج آزمایش‌های فشاری OPC در شکل ۱، مشاهده می‌شود که با افزایش عیار سیمان از ۳۵۰ به ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری نمونه مرجع در عیار ۳۵۰ در سن ۹۱ روزه برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و با افزایش عیار تا ۴۵۰ به کمترین مقدار خود در ۴۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد. این پدیده مشابه نتایج گزارش شده در مطالعات Yigiter و همکارانش [Yigiter, 2007] است.

ولی روند نتایج آزمایش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در شکل ۱ روندی متفاوت را نشان می‌دهد. حداکثر مقاومت فشاری ۹۱ روزه در بتن مرجع مربوط به نمونه دارای عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است، در حالی که حداکثر مقاومت بتن نانوسیلیسی در نمونه ساخته شده با عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب به مقدار ۶۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مشاهده می‌شود. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس (NS) مقاومت فشاری از عیار ۳۵۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش می‌یابد، ولی با ادامه روند افزایش عیار به ۴۵۰، منحنی شیب کاهش می‌یابد. در نتیجه منحنی مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، بر خلاف آنچه در نمونه‌های مرجع مشاهده شد، دارای یک قله حداکثری است.

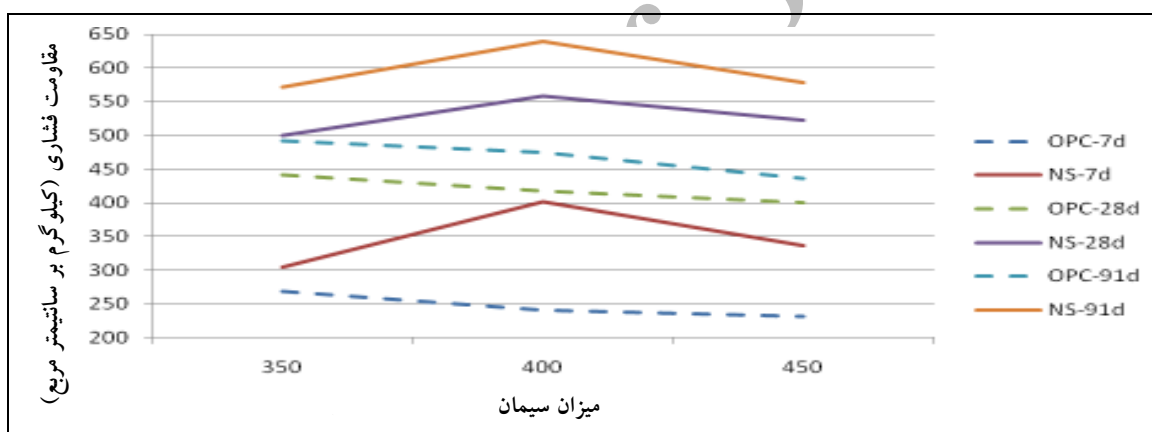
تأثیر عملکرد ذرات نانوسیلیس در بهبود مشخصات مکانیکی بتن . . .

مقاومت کششی، نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با افزایش عیار سیمان در شکل ۲، مانند آنچه در نتایج مقاومت فشاری ارایه شد، روندی متمایز مشاهده می‌شود. مقاومت کششی نمونه از عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در نمونه SN.350 تا عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در نمونه SN.400 روندی صعودی دارد و به حداکثر مقدار خود در عیار ۴۰۰ برابر با ۴۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد.

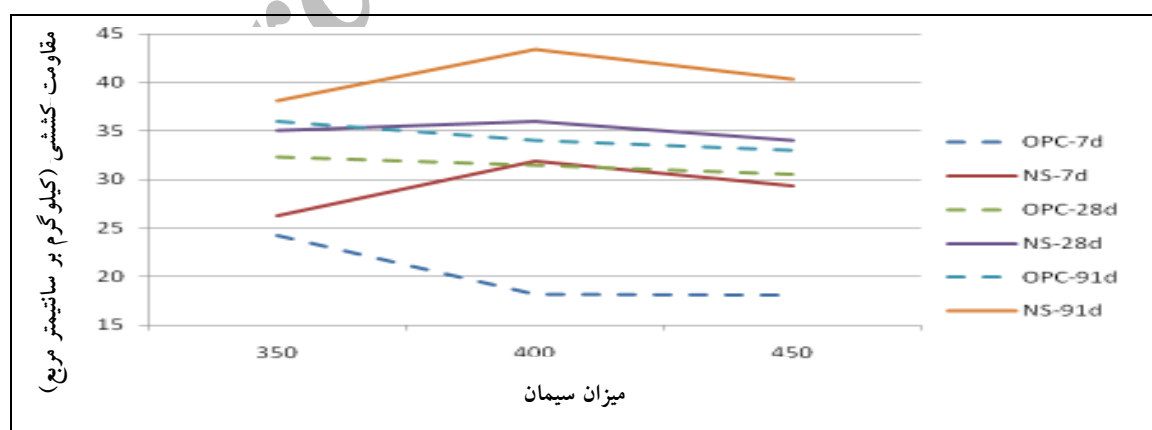
با افزایش عیار بیش از این مقدار حداکثر، مشابه آنچه در نتایج مقاومت فشاری مشاهده شد، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و در نمونه نانوسیلیس با عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (SN.450) به مقدار ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد. این روند برخلاف انتظار، کاملاً متفاوت با روند مشاهده شده در نمونه‌های بتن مرجع است.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در بتن‌های نانوسیلیسی با افزایش عیار تا مقداری معین (تقریباً ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب) مقاومت بتن افزایش نشان می‌دهد، پس از آن مقدار حداکثری، روند مورد انتظار کاهش مقاومت با افزایش عیار، مشاهده می‌گردد. روندی مشابه را در مقاومت کششی نمونه‌های نانوسیلیسی در شکل ۲ نیز می‌توان مشاهده کرد.

حداکثر مقدار مقاومت کششی برای بتن مرجع در نمونه با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب برابر با ۳۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مشاهده می‌شود و با افزایش عیار در نمونه‌های مرجع، مقاومت کاهش یافته تا به حداقل مقدار خود در عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب برابر با ۳۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برسد. بنابراین در اینجا نیز با افزایش عیار منحنی مقاومت کششی دارای شیب منفی است و افزایش عیار موجب کاهش مقاومت کششی در بتن مرجع می‌شود، ولی در بررسی تغییرات



شکل ۱. مقاومت فشاری بتن مرجع و بتن نانوسیلیسی برای عیارهای متفاوت سیمانی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه



شکل ۲. مقاومت کششی بتن مرجع و بتن نانوسیلیسی برای عیارهای متفاوت سیمانی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه

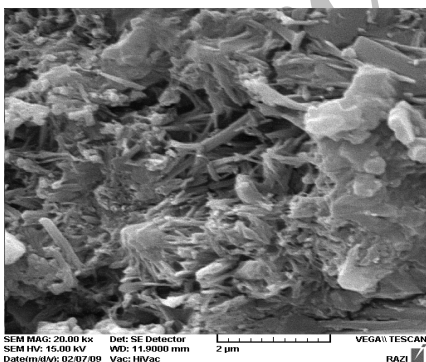
۴-۲- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روپشی (SEM)

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی را برای بتن مرجع در سه عیار متفاوت نمایش می‌دهد. در شکل ۳-الف ساختار نمونه‌های مرجع با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب نمایش داده شده است. در عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب علی‌رغم مشاهده کریستال‌های بزرگ و متقاطع در بافت نمونه، ولی منافذ بزرگ در نمونه کمتر مشاهده می‌گردد. در حالی که در عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در شکل ۳-ب این منافذ راحت‌تر مشاهده می‌شود و در شکل ۳-پ که نمایش‌دهنده یک بافت کاملاً ناهمگن در ریزساختار نمونه با عیار سیمانی ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است، کریستال‌های بزرگ با منافذ بین آنها به وضوح قابل مشاهده است. با دقت در شکل ۳-پ می‌توان ذرات کروی شکل سیمان هیدراته نشده را نیز تشخیص داد که نشان‌دهنده عدم هیدراسیون تمامی ذرات سیمان حتی در سن ۹۱ روزه است. براساس تصاویر SEM در شکل ۳، می‌توان مشاهده کرد که هرچه عیار سیمان در طرح افزایش می‌یابد، منافذ بزرگ در بین کریستال‌ها و ذرات سیمان هیدراته نشده با وضوح بیشتری پدیدار می‌شود. این مشاهدات تأییدکننده نتایج گزارش شده توسط Dahir و همکاران است [Dahir, 2006].

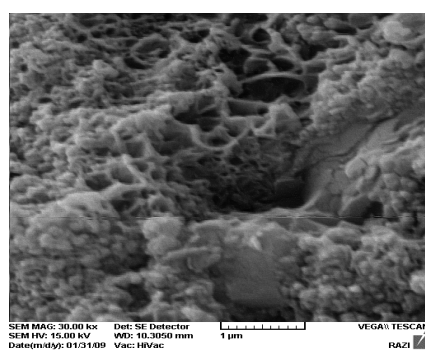
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی را در بتن حاوی نانوسیلیس در عیارهای متفاوت سیمانی نمایش می‌دهد. در مقایسه با تصاویر شکل ۳، در اینجا بافتی به مراتب آمورف و همگن‌تر مشاهده می‌شود. کاهش اندازه کریستال‌ها و حجم منافذ، کاملاً تأییدکننده افزایش مقاومت فشاری و کششی است که در بخش قبل (بخش ۳-۱) مشاهده شد.

در شکل ۴-الف نمونه نانوسیلیسی عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان بافتی یکپارچه و بدون کریستال‌های بزرگ را مشاهده کرد، ولی هنوز منافذ بین محصولات هیدراسیون با رنگ تیره‌تر از ژل C-S-H قابل مشاهده است. در شکل ۴-ب که مربوط به همان طرح نانوسیلیسی ولی با عیار سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است، حجم و تعداد این منافذ باز هم کمتر شده است. در طرح NS.400 کریستال‌های کوچک را به سختی می‌توان تشخیص داد و به نظر توده آمورف C-S-H در تمامی سطح شکست، یکپارچه و متصل است ولی شکل ۴-پ نشان می‌دهد که روند بهبود ساختار بتن‌های نانوسیلیسی با افزایش عیار متوقف شده است. در این شکل که ساختار میکروسکوپی نمونه‌های با عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب را نمایش می‌دهد، رشد ساختار بی‌شکل دیده شده در نمونه‌های قبلی، دیده نمی‌شود بلکه در بعضی موارد کریستال‌های درختی شکل مشاهده می‌گردد.

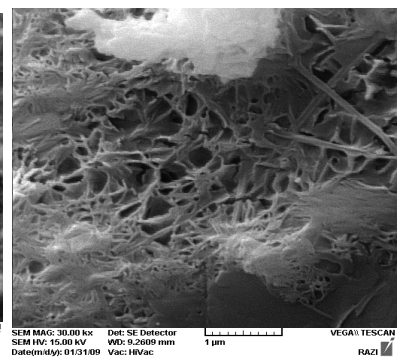
در شکل ۴-ب یکپارچگی بافت از بین رفته و منافذ دوباره خود را نشان می‌دهند. این تغییرات در ساختار بتن می‌تواند به خوبی نشان‌دهنده علت افت مقاومت بتن نانوسیلیسی در عیار بیشتر از ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (آن‌چنان که در بخش ۳-۱ دیده شد) باشد. در نمونه‌های نانوسیلیسی بر خلاف نمونه‌های مرجع، تا عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (شکل ۴-ب) ساختار بتن بهبود می‌یابد و توسعه ماتریس سیمانی منافذ بزرگ را مسدود می‌سازد، ولی با گذشتن از عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب (شکل ۴-پ) روند بهبود ساختار متوقف شده، کریستال‌ها رشد یافته و منافذ بزرگ دوباره پدیدار می‌شوند.



پ) نمونه با عیار ۴۵۰ (OPC.450)



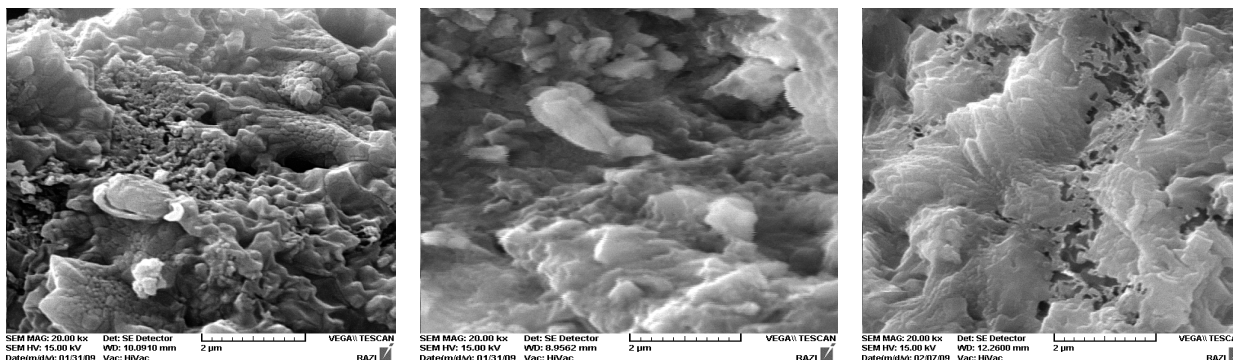
ب) نمونه با عیار ۴۰۰ (OPC.400)



الف) نمونه با عیار ۳۵۰

شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریز ساختار بتن مرجع (الف) نمونه با عیار 350 kg/cm^3 (OPC.350) ب) نمونه با عیار 400 kg/cm^3 (OPC.400)

پ) نمونه با عیار 450 kg/cm^3 (OPC.450)



پ) نمونه با عیار ۴۵۰

ب) نمونه با عیار ۴۰۰

الف) نمونه با عیار ۳۵۰

شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریز ساختار بتن حاوی نانوسیلیس (الف) نمونه با عیار 350 kg/cm^3 (NS.350) ب) نمونه با عیار 400 kg/cm^3 (NS.400) پ) نمونه با عیار 450 kg/cm^3 (NS.450)

۵- بررسی و تحلیل نتایج

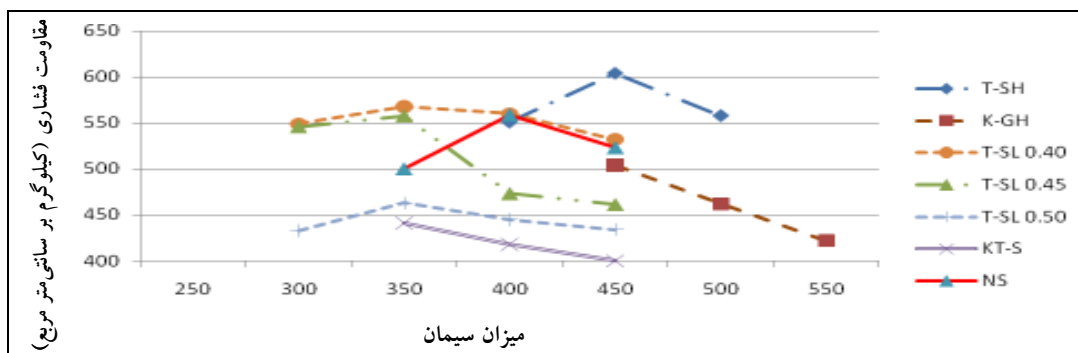
۴۰۰، مقاومت، افزایش نشان می‌دهد، ولی پس از گذشتن از عیار حداکثری، کاهش می‌یابد و در عیار ۴۵۰ به مقداری پایین‌تر از مقاومت نمونه‌های با عیار ۴۰۰ می‌رسد. برای درک این پدیده، روند تغییرات عیار در نسبت‌های اختلاط متفاوت بررسی شده است. برای این منظور نتایج سه مطالعه مستقل، که هدف تمامی آنها بررسی تأثیر تغییرات عیار سیمان بر خواص بتن بوده است، با نتایج این مقاله مورد مقایسه قرار گرفته‌اند: (۱) تدین و سلیمانی (T-SL) اثر تغییرات عیار سیمان و نسبت‌های آب به سیمان بر خوردگی بتن را مورد مطالعه قرار داده‌اند [تدین، ۱۳۸۷]. (۲) خانزادی، تدین و قهرمانی (K-GH) تغییر عیار سیمان را بر بتن‌های خودتراکم بررسی کرده‌اند [خانزادی، ۱۳۸۵] و (۳) تدین و شیبانی (T-SH) تغییرات عیار سیمان را بر بتن‌های تراورس مورد آزمایش قرار داده‌اند [تدین، ۱۳۸۵].

فارغ از مقادیر مطلق نتایج گزارش شده در این مطالعات، که به علت تفاوت در طرح اختلاط و نحوه ساخت قابل قیاس نیستند، مقایسه روند تغییر مقاومت فشاری با تغییرات عیار سیمان در این مطالعات مجزا، نکات بسیار قابل توجهی را نشان می‌دهد که کمک می‌کند رفتار بتن‌های حاوی نانوسیلیس (NS) را بتوان در برابر تغییرات عیار سیمان درک و توجیه کرد.

شکل ۵، نتایج این مطالعات را برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در عیارهای متفاوت سیمان، نمایش داده است. در تمامی این نتایج نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰/۴۵ است، به غیر از نتایج تدین و سلیمانی (T-SL) که مقادیر نسبت آب به سیمان آنها در برابر عنوان موارد مورد نظر، ذکر شده است.

آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن‌های مرجع، نشان‌دهنده کاهش مقاومت بتن با افزایش عیار از ۳۵۰ به ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است (شکل ۱). این پدیده، مشابه مطالعات پیشین [Koliyas, 2005] نشان‌دهنده آن است که با افزایش عیار سیمان در طرح مخلوط، حجم خمیر افزایش یافته و در مقابل سنگدانه‌ها به‌عنوان قیدهایی در برابر توسعه ترک‌ها کاهش می‌یابند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در عیارهای بیشتر، ریزترک‌ها در هنگام اعمال بار سریع‌تر توسعه یافته و موجب کاهش مقاومت بتن گردد. بررسی مشاهدات SEM به ما نشان می‌دهد که کاهش مقاومت بتن، علاوه بر افزودن به حجم بخش ترد (خمیر) بتن، تغییر عیار سیمان ساختار و حجم منافذ بتن را نیز متأثر می‌کند. مقایسه تصاویر شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش عیار سیمان از ۳۵۰ به ۴۵۰ موجب افزایش اندازه و توزیع منافذ در ساختار بتن می‌گردد. بنابراین براساس این مشاهدات می‌توان با تأیید نظرات Dahir و همکاران [Dahir, 2006]، افزایش اندازه و توزیع منافذ بتن را نیز یکی از علل کاهش مقاومت بتن مرجع با افزایش عیار دانست.

ولی بررسی روند توسعه مقاومت در بتن‌های حاوی نانوسیلیس روندی متمایز از قبل را نشان می‌دهد. در این نوع بتن‌ها، مقاومت بتن با افزایش عیار، نه تنها روند کاهشی نشان نداده، بلکه منحنی تغییرات مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی دارای نقطه حداکثری است. یعنی با افزایش عیار از ۳۵۰ تا ۴۵۰، ابتدا تا عیار



شکل ۵. روند توسعه مقاومت فشاری ۲۸ روزه با تغییر در عیار سیمان

علت روند محذب تغییر مقاومت در نمونه‌های نانوسیلیسی را با مراجعه به شکل ۴، می‌توان در ریزساختار بتن مشاهده کرد. در تصاویر میکروسکوپی شکل ۴ مشاهده می‌گردد که با افزایش عیار سیمان از ۳۵۰ به ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در نمونه‌های نانوسیلیسی، بافتی یکپارچه‌تر و با اندازه کریستال‌های کوچک‌تر مشاهده می‌گردد. در حقیقت با اضافه شدن نانوسیلیس به مخلوط، به علت ریزدانه‌گی و سطح ویژه بالای آن، هسته‌هایی کوچک ایجاد می‌شوند که فرآیند هیدراسیون را سرعت می‌بخشد و از افزایش ابعاد کریستال‌ها در بافت بتن جلوگیری می‌کند [Li, 2004]، که در نتیجه ساختار یکپارچه‌تر و همگن‌تری به وجود می‌آید. علاوه بر این، این هسته‌ها مانند سنگدانه‌ها قیدهایی را ایجاد می‌کنند که توسعه ریزترک‌های ایجاد شده در اثر اعمال بار را محدود می‌کند. بنابراین ذرات نانوسیلیس با بهبود بافت یکپارچه ساختار بتن و جلوگیری از توسعه ریزترک‌ها، توسعه کسب مقاومت را حتی با افزایش عیار به ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب نیز امکان‌پذیر می‌کنند.

با ادامه روند افزایش عیار سیمان در مخلوط به ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب، مقاومت نمونه‌های نانوسیلیسی افت می‌کند (شکل ۱ و ۲). در واقع با افزایش حجم خمیر در اثر افزایش عیار سیمان بیش از مقدار حداکثر، فاصله هسته‌های نانوسیلیس افزایش می‌یابد و پیوند آنها به خوبی برقرار نمی‌شود؛ بنابراین منافذ بزرگ‌تر و بیشتری در ماتریس سیمان مشاهده می‌شود. فاصله هسته‌های نانوسیلیس تأثیر آنها را در مقیدسازی توسعه ترک‌ها و رشد کریستال‌ها نیز کاهش می‌دهد. بنابراین کاهش مقاومت نمونه‌های نانوسیلیسی را در عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب شاهد هستیم. مشاهده تصاویر SEM در شکل ۴ اثبات‌کننده نتایج ارائه شده است. در ساختار نمونه نانوسیلیسی با

مقایسه روند تغییرات مقاومت فشاری نسبت به تغییر عیار سیمان در مخلوط‌های نمایش داده شده در شکل ۵، این فرضیه را تقویت می‌کند که مقاومت بتن با افزایش عیار دارای شکلی محذب بوده و نقطه‌ای با حداکثر مقدار را نشان می‌دهد. این مقدار حداکثری بسته به طرح اختلاط، می‌تواند متفاوت باشد. علت آنکه در مواردی این روند افزایش و کاهش به‌طور کامل مشاهده نمی‌شود آن است که محدوده عیارهایی که مورد آزمایش قرار گرفته‌اند به‌طور کامل نسبت‌های مؤثر عیار سیمان را پوشش نمی‌دهند. این می‌تواند تناقض اشاره شده در بخش ۲ این مقاله را در ارتباط با نتایج متضاد گزارش شده برای تأثیر تغییرات عیار بر خواص بتن توجیه کند. اختلاف ظاهری بین نتایج مشاهده شده توسط Kolias (۲۰۰۵) [Kolias, 2005] و Shain (۲۰۰۳) [Shain, 2003]، در حقیقت به دلیل تفاوت در سطح اختلاط و محدوده عیارهایی است که در این دو تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بنابراین می‌توان تصور کرد اگر Kolias نسبت‌های عیار بیشتری را نیز مورد آزمایش قرار می‌داد، روندی مشابه با کار Shain را می‌توانست تجربه کند.

نکته قابل توجه در ارتباط با نمونه‌های نانوسیلیسی در شکل ۵ آن است که در مقایسه با نمونه‌های مرجع و با طرح اختلاطی مشابه، منحنی تغییرات مقاومت به سمت عیارهای بالاتر حرکت کرده است. به معنای آنکه با فرض وجود یک نقطه حداکثر برای مقاومت در روند افزایش عیار سیمان، در نمونه‌های نانوسیلیسی این نقطه در عیار سیمانی بالاتری حاصل می‌شود؛ مانند آنکه منحنی مربوط به بتن مرجع به سمت راست منتقل شده باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانوسیلیس تغییری در شکل روند توسعه مقاومت بتن با تغییر عیار نمی‌دهد، بلکه موجب بهبود مقاومت بتن در عیارهای بالاتر سیمان می‌شود.

برابر عیار سیمان، ثابت می‌ماند. به این معنا که در واقع نانوسیلیس، منحنی رفتار مقاومت بتن در برابر تغییر عیار سیمان را به سطح بالاتر منتقل کرده و دستیابی به نقطه حداکثری را در عیاری بالاتر ممکن می‌کند. بنابراین با استفاده از ذرات نانوسیلیس در طرح اختلاط یکسان، می‌توان حتی در نسبت عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب نیز مقاومت فشاری و کششی بالایی را به دست آورد.

۷- مراجع

- تدین، محسن، رضایی، ف.، نیلی، م. و سلیمانی راد، م. (۱۳۸۷) "تأثیر عیار سیمان بر مقاومت، جذب آب و انتشار یون کلرید در بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان ثابت"، دانشکده فنی دانشگاه تبریز، شماره ۳۷ (پیاپی ۵۵، مهندسی عمران)، پاییز ۸۷، ص. ۸-۱.
- تدین، محسن و شیانی، الف. (۱۳۸۵) "تأثیر عیار سیمان (نسبت سنگدانه به سیمان) بر برخی پارامترهای دوام بتن تراورس پیش‌تینده در برابر خوردگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- خانزادی، مصطفی، تدین، محسن و قهرمان، م. (۱۳۸۵) "تأثیر عیار سیمان بر پارامترهای دوام (خوردگی آرماتور) بتن خودتراکم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- رضایان‌پور، علی‌اکبر و پورخورشیدی، ع. (۱۳۸۴) "آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، شماره نشریه: ض - ۲۸، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص. ۸۷.
- مستوفی‌نژاد، داود و نظری‌منفرد، حامدحسین (۱۳۸۵) "افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام آن در محیط سولفاتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۵، ص. ۱۳۹-۱۴۵.
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Björjesson, L. and Panas, I. (2004) "Accelerating

عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب در شکل ۴-پ به وضوح مشاهده می‌گردد که اندازه و توزیع منافذ افزایش یافته و کریستال‌های بزرگ دوباره پدیدار شده‌اند. بنابراین می‌بایست انتظار داشت با افزایش درصد نانوسیلیس در مخلوط و با افزایش عیار بیشتر از ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب نیز شاهد بهبود مقاومت باشیم. البته باید توجه داشت ترکیب درصدی بیشتر نانوسیلیس دشوار است؛ زیرا ذرات نانو به علت سطح ویژه بالای آنها، تمایل به آگلومره (کلوخه) شدن داشته و در نتیجه می‌توانند منطقه ضعیف را در مخلوط ایجاد کرده و خود باعث کاهش مقاومت شوند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM)، تأثیر ذرات نانوسیلیس بر مقاومت و ریزساختار بتن در اثر تغییر عیار سیمان بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که در بتن مرجع با افزایش عیار سیمان تا ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب مقاومت افزایش می‌یابد و در عیار بیش از این مقدار شاهد کاهش مقاومت هستیم؛ در حالی که با اضافه شدن نانوسیلیس به طرح مخلوط، این افزایش مقاومت تا عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب ادامه داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد. بررسی‌های میکروسکوپی اثبات کرد که این افزایش مقاومت به علت بهبود ساختار بتن و کاهش منافذ بزرگ در اثر اضافه شدن نانوسیلیس است. بنابراین نتیجه گرفته شد که اضافه شدن ذرات نانوسیلیس، می‌تواند تأثیر منفی افزایش عیار سیمان را تا حدی جبران کند. با مقایسه مطالعات مستقل انجام گرفته توسط نویسندگان این مقاله، نشان داده شد که افزایش عیار سیمان در بتن بیش از مقداری مشخص، موجب کاهش مقاومت بتن می‌گردد. روند تغییرات مقاومت نمونه‌های بتنی با تغییر عیار سیمان، دارای منحنی محدب و با نقطه حداکثری است. به این معنا که با افزایش عیار سیمان در طرح مخلوط، مقاومت نمونه‌ها تا حد معینی افزایش یافته و با گذشتن از این مقدار شیب منفی پیدا می‌کند. نسبت عیار سیمان که حداکثر مقاومت در آن به دست می‌آید، بسته به طرح اختلاط متفاوت است. بهبود حاصل از ذرات نانوسیلیس در حالی که دست آمده است که روند بیان شده برای تغییر مقاومت بتن در

- Li, H., Zhang, M. and Ou, J. (2007) "Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement", *International Journal of Fatigue*, No. 29, pp. 1292-1301.
- Micah, Hale, W., Freyne, S. F., Bush Jr., Thomas D. and Russell, B. W. (2008) "Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 9, September 2008, pp. 1990-2000
- Ozyildirim, C. (1993) "High-performance concrete for transportation structures", *Concrete International Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 33-38
- Poon, C. S. and Lam, C. S. (2008) "The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregate on the properties of pre-cast concrete blocks", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 283-289.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, C. (2007) "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with Silica fume", *Construction and Building Materials*, No. 21, pp. 539-545.
- Scrivener, K. L. and Kirkpatrick, R. J. (2008) "Innovation in use and research on cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 128-136.
- Shain, R., Demirboga R. (2003) "The effect of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratio on the compressive strength and densities of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1245-1249.
- Shah, S. P., in: Leung, C. K.Y., Li, Z. and Ding, J. T. (Eds) (2000) "High – performance concrete – Workability, strength and durability", Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- Shi, C. (2004) "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and rapid chloride permeability test (ASTM C 1202 or ASSHTO T277) results", *Cement and Concrete Research*, No. 34, pp. 537 – 545.
- Yegiter, H. and Yezici, H. (2007) "Effect of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete", *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 1770-1776.
- effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement", *Chemical Physics Letters*, No. 392, pp. 242-248.
- Deshpande, S., Darwin, D., and Browning, J. (2007) "Evaluation free shrinkage of concrete for control of cracking in bridge decks", *Structural Engineering and Engineering Materials*, SM Report No. 89.
- Dahir, R.K., McCarthy, M.J. and Tittle, P.A.J. (2006) "Role of cement content in specification for concrete durability: Aggregate type influences", *Structures & Buildings*, No. 159, pp. 229-242.
- Hartt, W.H., Powers, R.G., Leroux, V. and Lysogorski, D.K. (2004) "A critical literature review of high performance corrosion reinforcement in concrete bridge application", Report No. FHWA-HRT-04-093, Federal Highway Administration, pp. 54.
- Ji, T. (2005) "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", *Cement and Concrete Research*, No. 35, pp. 1943-1947.
- Jo, B., Kim, C., Tae, G. and Park, J. (2007) "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1351-1355.
- Kolia, S. and Georgiou, C. (2005) "Effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete", *Cement & Concrete Composites*, No. 27, pp. 211-216.
- Li, G. (2004) "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1034-1049.
- Li, H., Xiao, H. G., Jie, J. and Ou, J. P. (2004) "Microstructure of cement mortar with nano-particles", *Composites, Part B: Engineering*, Vol. 35 (2), pp. 185-189.
- Li, H., Zhang, M. and Ou, J. (2004) "A Study on mechanical and pressure- sensitive properties of cement mortar with nano phase materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 435-438.
- Li, H., Zhang, M. and Ou, J. (2006) "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement", *Wear*, Vol. 260, pp. 1262-1266.