

تاثیر نانو سیلیس کلوئیدی با سطوح ویژه متفاوت بر ویژگی های مکانیکی ملات سیمان

کد موضوع مقاله: E کد

معصومه ابوالحسنی^{۱*}، فاطمه میرزایی^۲، پیام حسینی^۳، هرمز فامیلی^۴

۱- کارشناس ارشد عمران، گرایش سازه، موسسه آموزش عالی علاالدوله سمنانی، گرمسار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش سازه، موسسه آموزش عالی علاالدوله سمنانی

۳- سرپرست آزمایشگاه های بتن و مصالح ساختمانی، موسسه آموزش عالی علاالدوله سمنانی

۴- رئیس موسسه آموزش عالی علاالدوله سمنانی گرمسار

چکیده

در این مطالعه، به بررسی بکار گیری ذرات نانو سیلیس کلوئیدی با سطوح ویژه ۱۰۰ و ۳۰۰ (m²/g)، و با درصد های جایگزینی ۱/۵ و ۳ درصد وزنی سیمان، بر ویژگی های مکانیکی ملات سیمان پرداخته شده است. بدین منظور با انجام آزمایش های مختلف مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی در سنین عمل آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز، رفتار این نوع ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد افزودن نانو ذرات سیلیس کلوئیدی به ملات، منجر به بهبود مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها می شود. عملکرد نانو ذرات سیلیس با سطح ویژه بیشتر نسبت به نوع دارای سطح ویژه کمتر در بهبود مقاومت فشاری مناسب تر می باشد در حالی که در مقاومت خمشی در درصد جایگزینی کمتر (۱/۵ درصد)، نانو سیلیس درشت تر و در درصد جایگزینی بیشتر (۳ درصد)، نانو سیلیس ریز تر عملکرد بهتری دارند.

واژه های کلیدی: نانو سیلیس کلوئیدی، سطح ویژه، ملات سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی

۱. مقدمه

در سال های اخیر استفاده از مواد پوزولانی به منظور جایگزینی با بخشی از سیمان پرتلند در بتن و ملات های پایه سیمانی با هدف دستیابی به منافع اقتصادی و بهبود خواص بتن و ملات های سیمانی گسترش یافته است. در میان این مواد، دوده سیلیسی که محصول صنایع سیلیسیم و فرو سیلیس می باشد کاربرد گسترده ای در بهبود خواص مکانیکی و دوامی ترکیبات سیمانی دارد. نرخ سریع تر واکنش پوزولانی دوده سیلیسی در مقایسه با پوزولان های دیگر که ناشی از خلوص بالای سیلیس و سطح ویژه آن است بعنوان مزیت اصلی این ماده در نظر گرفته شده است. به علت تشابهات ساختاری مواد نانو سیلیس غیر بلوری با دوده سیلیس [۱] و نیز پیشرفت های چشمگیر در علم و تکنولوژی نانو، شکل های مختلف سیلیس غیر متبلور در اندازه نانو در دسترس قرار گرفته است. با توجه به سطح ویژه بسیار بالای این مواد نسبت به دوده سیلیسی، تحقیقات گسترده ای با هدف بررسی تاثیر نانو سیلیس ها روی خواص مکانیکی و دوامی بتن ها و ملات های سیمانی انجام شده است [۲]. اگرچه مطالعات زیادی تاثیر نانو سیلیس ها را بر روی خواص ترکیبات سیمانی مطالعه کرده اند اما تاثیرات آن ها هنوز بطور مناسب مشخص نشده است و برخی اختلافات و تفاوت ها در نتایج قابل مشاهده است. بعنوان مثال اندازه واکنش پوزولانی نانو سیلیس ها در برخی مطالعات تحت نسبت آب به سیمان بالا انجام شده است که قادر نخواهد بود واکنش پوزولانی آن ها را تحت شرایط آب به سیمان پایین بطور دقیق در بتن منعکس نماید [۳-۶]. از طرف دیگر علیرغم تاثیر سرعت بخشی نانو سیلیس ها روی درجه هیدراتاسیون فاز های سیمان در ساعات اولیه، تاثیر این مواد روی درجه هیدراتاسیون سیمان در سنین بعدی هنوز مشخص نشده است [۲]. همچنین نتایج متناقضی در خواص مکانیکی مخلوط های سیمانی بدست آمده است. برخی نتایج نشانگر تاثیر چشمگیر نانو سیلیس ها روی بهبود خواص مکانیکی ترکیبات سیمانی می باشند در حالی که برخی دیگر تاثیر غیر قابل ملاحظه [۷] و حتی مقادیر کمتر مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه کنترل را نشان می دهند [۸،۹]. برای مشخص کردن تاثیر نانو سیلیس ها بر روی خواص مخلوط های سیمانی بایستی این نکته را مد نظر قرار داد که نانو سیلیس ها به روش های مختلف تولید می شوند. بدون شک هر روش، نانو سیلیسی با ویژگی هایی متفاوت از نانو سیلیس دیگر تولید می کند [۲]. علاوه بر اختلافات در انواع نانو سیلیس ها، این مواد می توانند با سطوح ویژه مختلف از ۵۰ تا ۱۰۰۰ (m²/g) تولید شوند. همچنین نانو سیلیس های استفاده شده در مطالعات ترکیبات سیمانی دارای رنجی گسترده از سطوح ویژه می باشند. برای مثال نانو سیلیس های با سطوح ویژه ۵۰ [۴،۱۰،۱۱]، ۵۶ [۱۱]، ۶۰ [۱۰]، ۸۰ [۱۳،۱۴،۱۵]، ۹۰ [۳]، ۹۵ [۱۶]، ۱۰۰ [۱۷،۱۸]، ۱۳۰ [۴]، ۱۶۰ [۸،۱۹،۲۰]، ۱۶۵ [۲۱]، ۱۷۰ [۱۰]، ۱۹۰ [۱۰]، ۲۰۰ [۳-۵]، ۲۰۷ [۲۲]، ۲۳۴ [۸]، ۳۰۰ [۴،۹]، ۳۹۰ [۲۳]، ۵۰۰ [۲۴]، ۶۴۰ [۲۵] و ۶۷۰ [۲۶] (m²/g) در ترکیبات سیمانی استفاده شده اند. به دلیل اختلافاتی که در ویژگی های نانو سیلیس ها با سطوح ویژه مختلف وجود دارد، یک نانو سیلیس با سطح ویژه ۵۰ m²/g نمی تواند مانند یک نانو سیلیس با سطح ویژه ۶۷۰ m²/g در مخلوط های سیمانی عمل کند. برخی اختلافات که در نتایج تحقیقات مختلف وجود دارد ممکن است به انواع مختلف و سطوح ویژه مختلف نانو سیلیس های مورد استفاده نسبت داده شود [۲]. با توجه به نتایج تحقیقات صورت گرفته ذرات نانو سیلیس با اندازه ریز تر خاصیت پوزولانی سریع تری در مقایسه با اندازه های درشت تر دارند [۱]. هدف از انجام پژوهش پیش رو بررسی تاثیر نانو سیلیس با سطوح ویژه مختلف بر ویژگی های مکانیکی ملات سیمان می باشد. لذا در راستای این هدف، آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بر روی نمونه های حاوی نانو سیلیس با سطوح ویژه مختلف انجام شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۱.۲. مواد و مصالح مورد استفاده

آب مورد استفاده برای ساخت تمام نمونه ها، آب شرب گرمسار می باشد. سیمان مصرفی در این پژوهش با رده مقاومتی ۲۵ مگا پاسکال از شرکت سیمان مشهد تهیه گردید. سیمان مصرفی به صورت کیسه های ۴۰ کیلویی استفاده شد که به منظور حصول اطمینان از سیمانی همگن، محتویات تمام کیسه ها با یکدیگر ترکیب شدند تا سیمانی یکدست حاصل شود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات با خاصیت کاهندگی آب بالا، مطابق با استاندارد ASTM C 494 [۲۷] به منظور دستیابی به روانی مناسب در این پژوهش به کار گرفته شده است. ماسه مصرفی از شرکت متوساک واقع در غرب تهران تهیه شد. ماسه مورد استفاده دارای وزن مخصوص ۲/۶۳، جذب آب ۲/۵۹ و مدول نرمی ۳/۱۷ می باشد. دانه بندی ماسه مصرفی الزامات استاندارد ASTM C 33 [۲۸] را بر آورده می کند. نانوسیلیس های به کار گرفته شده با نام تجاری Levisal، از نوع کلوئیدی با دو سطح ویژه مختلف ۱۰۰ و ۳۰۰ (m²/g) می باشند. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس ها در جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان مصرفی

اکسید	درصد
SiO ₂	۲۳/۱
CaO	۶۵/۲
Al ₂ O ₃	۴/۲
Fe ₂ O ₃	۰/۴
MgO	۲/۵
SO ₃	۲/۰
Na ₂ O	۰/۳
K ₂ O	۰/۴

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی سیمان مصرفی

نرمی (m ² /kg)	۳۸۵
وزن مخصوص	۳/۱۵
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۳۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۸۰

جدول ۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس های کلوئیدی به کار رفته در پژوهش

ویژگی	Levisal 300	Levisal 100
مقدار SiO ₂ (درصد جامد)	۳۰	۴۵
مقدار آب	۷۰	۵۵
سطح ویژه (m ² /g)	۳۰۰	۱۰۰
ابعاد متوسط ذرات (nm)	۹	۳۰
PH	۱۰	۱۰

۲.۲. طرح مخلوط های ملات

به منظور بررسی اهداف مورد نظر پژوهش، ۵ طرح، شامل یک طرح کنترل، ۲ طرح حاوی نانو سیلیس نوع ۱ (Levisal 100) و ۲ طرح حاوی نانو سیلیس نوع ۳ (Levisal 300)، ساخته و مورد آزمایش های مکانیکی واقع شده اند. نسبت آب به سیمانی که برای طرح ها در نظر گرفته شد ۰/۴ می باشد. از نانو سیلیس در نسبت های جایگزینی ۵/۱ و ۳ درصد وزنی سیمان برای ساخت این مخلوط های دو جزئی استفاده شده است. مقدار آب اشباع با سطح خشک، برای تمام طرح ها مقدار ثابت ۲۵ گرم و بر اساس اطلاعات داده شده در جدول ۴، مقدار ماسه برای تمام طرح ها برابر ۱۵۵۰ گرم می باشد. مطابق جدول ۴ طرح کنترل که شماره ۱ به آن اختصاص داده شده است، تنها شامل آب، سیمان و ماسه است و فاقد نانو سیلیس می باشد. طرح های ۲ و ۳، طرح های دو جزئی به ترتیب حاوی ۱/۵ درصد نانو ذرات سیلیس نوع ۱ و ۳ و طرح های ۴ و ۵ طرح های دو جزئی به ترتیب حاوی ۳ درصد نانو سیلیس نوع ۱ و ۳ می باشند که در آن ها تاثیر جایگزینی درصد های مختلف نانو سیلیس با سطوح ویژه مختلف بر خواص مکانیکی ملات های سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴، مقادیر اجزاء طرح های ساخته شده ارائه شده است. همچنین به منظور ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در مقدار ۰/۴، از مقادیر مختلف فوق روان کننده جهت دستیابی به کارایی مطلوب، استفاده گردیده است. در جدول ۵، می توان درصد فوق روان کننده ای که برای هر طرح مورد استفاده قرار گرفته است را مشاهده نمود. مقدار فوق روان کننده مصرفی را می توان به عنوان شاخصی از تاثیر کاربرد مواد مکمل سیمانی بر نیاز آبی ملات در نظر گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، مصرف فوق روان کننده در مقایسه با مخلوط کنترل با کاربرد نانو سیلیس افزایش می یابد که با زیاد شدن درصد جایگزینی نانو سیلیس از ۱/۵ به ۳ درصد شاهد افزایش بیشتری هستیم. همچنین مشاهده می شود این افزایش در مخلوط حاوی نانو سیلیس نوع ۳ بیشتر می باشد.

جدول ۴- مقادیر اجزاء مخلوط های ساخته شده

شماره طرح	مشخصه طرح	درصد نانو	نوع نانو	آب ۵۰٪ (gr)	آب ۱۰٪ (gr)	آب ۴۰٪ (gr)	سوسپانسیون نانو (gr)	آب اضافه بر نانو (gr)	سیمان (gr)	نانوی پودر (gr)	ماسه (gr)
۱	Control	-	-	۱۱۳	۲۳	۹۰	-	-	۵۶۵	-	۱۵۵۰
۲	1.5%L100	۱/۵	۱	۱۱۳	۲۳	۸۰	۱۸/۹	۱۰/۴	۵۵۷	۸/۵	۱۵۵۰
۳	1.5%L300	۱/۵	۳	۱۱۳	۲۳	۷۱	۲۸/۴	۱۹/۹	۵۵۷	۸/۵	۱۵۵۰
۴	3%L100	۳	۱	۱۱۳	۲۳	۷۰	۳۷/۸	۲۰/۸	۵۴۸	۱۷	۱۵۵۰
۵	3%L300	۳	۳	۱۱۳	۲۳	۵۱	۵۶/۷	۳۹/۷	۵۴۸	۱۷	۱۵۵۰

جدول ۵- درصد فوق روان کننده های مخلوط ها

شماره طرح	مشخصه طرح	درصد فوق روان کننده
۱	Control	۰/۳۱
۲	1.5%L100	۰/۵۹
۳	1.5%L300	۰/۸۸
۴	3%L100	۰/۶۹
۵	3%L300	۱/۴۵

۳.۲. آزمایش های انجام شده

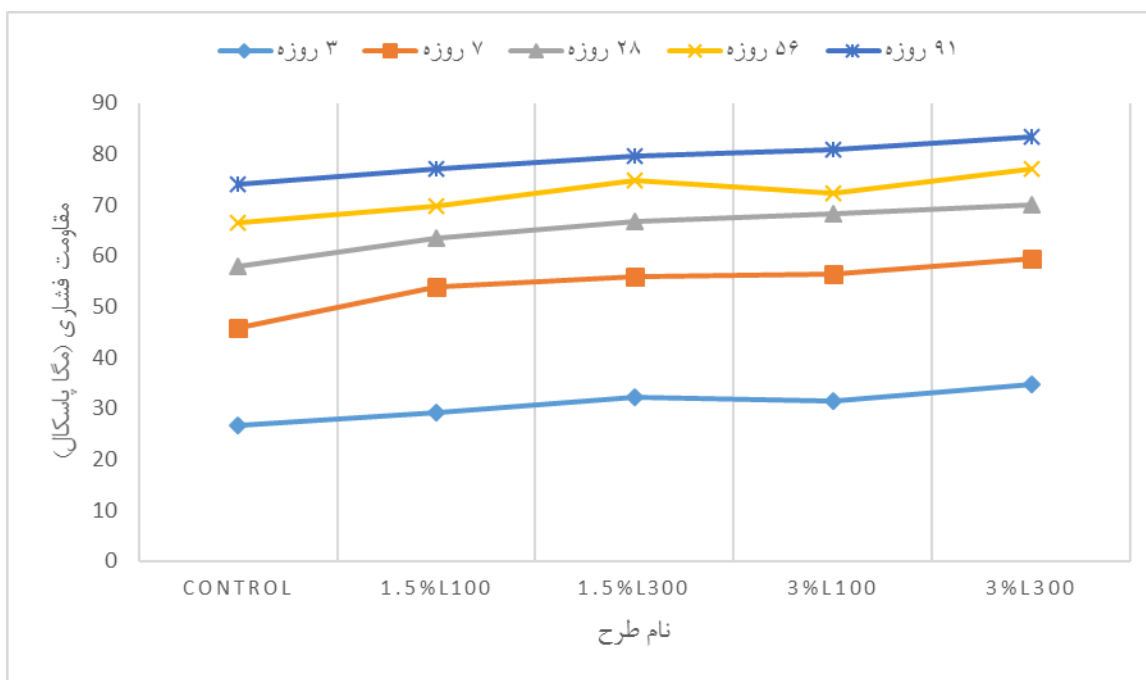
برای هر طرح ۱۲ نمونه مکعبی به ابعاد ۵۰*۵۰*۵۰ میلیمتر برای انجام آزمون مقاومت فشاری و ۱۲ نمونه منشوری به ابعاد ۴۰*۴۰*۱۶۰ به منظور انجام مقاومت خمشی ساخته شد و از نتایج حاصل از مقاومت نمونه ها میانگین گرفته شد. بعد از قالب ریزی، نمونه ها به مدت یک روز در قالب باقی می ماندند تا به یک مقاومت اولیه جهت انتقال دست یابند. روز بعد از ساخت، نمونه ها از قالب خارج گردیده و به مخزن آب آهک اشباع با دمای 21 ± 2 درجه سانتی گراد منتقل می گردند و تا سنین عمل آوری مورد نظر داخل مخزن قرار خواهند داشت. آزمون مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمانی به ترتیب مطابق با استاندارد های ASTM C 109 [۲۹] و ASTM C 348 [۳۰] در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز بر روی نمونه های مکعبی و منشوری انجام شدند. شایان ذکر است سنجش مقاومت خمشی ملات سیمان در واقع سنجش غیر مستقیم مقاومت کششی ملات سیمان می باشد.

۳. نتایج و تحلیل

۱.۳. نتایج مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری مخلوط های مختلف مورد مطالعه در شکل ۳ در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز مقایسه شده اند. مشاهده می کنیم با افزودن ذرات نانو سیلیس به ملات، مقاومت فشاری نمونه ها به مراتب بیشتر از نمونه کنترل است. بدلیل اینکه افزودن ذرات نانو سیلیس به ملات، ناحیه انتقالی سطح مشترک (ITZ) را یکنواخت می کند و حتی حفره های کوچک نیز حذف می گردند. ذرات نانو با کریستال های $Ca(OH)_2$ واکنش داده و $C-S-H$ را تولید می کنند که این ژل دلیل اصلی یکنواختی ITZ می باشد و در نتیجه مقاومت فشاری ملات را با کاهش خلل و فرج افزایش می دهد. با توجه به نتایج، در هر درصد مشخص جایگزینی نانو ذرات سیلیس (۱/۵ یا ۳ در صد)، عملکرد نانو ذرات سیلیس با سطح ویژه بیشتر (نانوی نوع ۳) نسبت به نوع دارای سطح ویژه کمتر (نانوی نوع ۱) در بهبود مقاومت فشاری مناسب تر می باشد. چرا که ذرات دارای سطح ویژه بالاتر توانایی بیشتری در انجام واکنش پوزولانی دارا هستند و از این طریق قادر خواهند بود مقاومت فشاری را بهبود دهند که این موضوع در تمامی سنین عمل آوری قابل مشاهده است. در طرح های حاوی ۱/۵ درصد نانو نوع ۱، افزایش ۹، ۱۸، ۹ و ۵ درصدی مقاومت فشاری را در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز و در طرح های حاوی ۱/۵ درصد نانو نوع ۳، افزایش ۲۰، ۲۶، ۱۵، ۱۲ و ۷ درصدی مقاومت را در سنین مذکور شاهد هستیم. نیز

با افزایش درصد جایگزینی نانو از ۱/۵ به ۳ درصد، مقاومت فشاری به طور چشمگیری نسبت به نمونه کنترل افزایش پیدا کرده است. نمونه های حاوی ۳ درصد نانو ۱، افزایش ۱۷، ۲۳، ۱۷، ۹ و ۹ درصدی مقاومت را در سنین ۳ تا ۹۱ روز و نمونه های حاوی ۳ درصد نانو نوع ۳، افزایش ۳۰، ۳۰، ۲۱، ۱۶ و ۱۲ درصدی در سنین مذکور نسبت به نمونه کنترل را دارند.

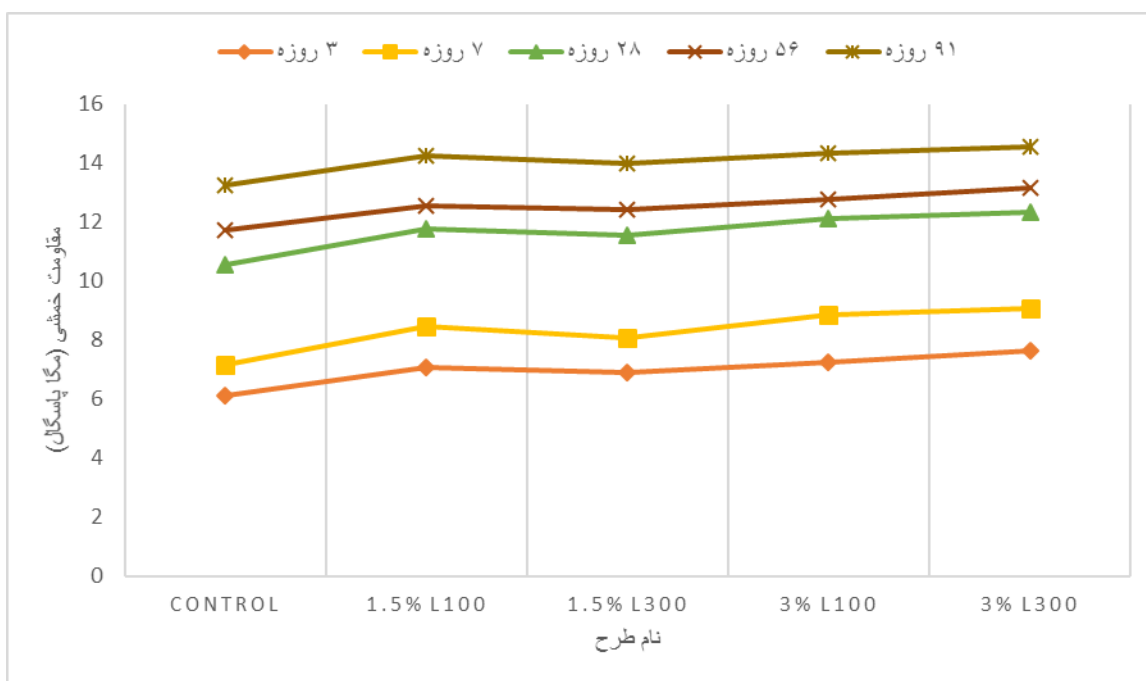


شکل ۱- نمودار مقاومت فشاری مخلوط های ساخته شده

۲.۳. مقاومت خمشی

نتایج آزمون مقاومت خمشی نمونه های مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. با افزودن نانو سیلیس به ملات، مقاومت خمشی مانند مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است. تفاوت هایی در نتایج مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری قابل ملاحظه می باشد. به طوری که تقریباً در تمام سنین عمل آوری، در درصد های کمتر جایگزینی (۱/۵ درصد)، نانو سیلیس درشت تر (نوع ۱) و در درصد های بیشتر (۳ درصد)، نانو سیلیس ریز تر تاثیر بالاتری در بهبود مقاومت خمشی داشته اند. در این رابطه می توان گفت از آنجا که مکانیزم شکست در خمش با همین مکانیزم در فشار متفاوت است، لذا تاثیر بکارگیری نانو سیلیس نیز اندکی متفاوت می باشد. چرا که شکست در خمش بر اساس تعداد کمی ترک رخ می دهد و چون نانو ذرات سیلیس نمی توانند ماتریس را به مانند الیاف مسلح سازند، در نتیجه تاثیر کلوخه های نانو ذرات که در نانو سیلیس ریز تر بیشتر مشاهده می گردد قابل توجه می باشد. بر همین اساس در ۱/۵ درصد جایگزینی، نانو سیلیس نوع ۱ عملکرد مناسب تری داشته است چرا که تعداد کلوخه های کمتری نسبت به نوع ۳ دارد. اما در مقدار ۳ درصد جایگزینی، از آنجا که تعداد نانو ذرات توزیع شده در ماتریس نسبت به جایگزینی ۱/۵ درصد بیشتر می باشند، لذا تاثیر کلوخه ها نسبت به برقراری واکنش پوزولانی سریع تر توسط نانو ذرات سیلیس نوع ۳ کمتر بوده و بر همین اساس در مقدار جایگزینی بالاتر، نانو نوع ۳ عملکرد مناسب تری را نشان داده است. نمونه های حاوی ۱/۵ درصد نانو نوع ۱، افزایش ۱۵، ۱۷، ۱۱، ۷ و ۷ درصدی در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز نسبت به نمونه کنترل و نمونه های حاوی ۱/۵ درصد نانو نوع

۳، افزایش ۱۲، ۱۲، ۹، ۵ و ۵ درصدی را دارا می باشند. با افزایش درصد جایگزینی نانو سیلیس از ۱/۵ به ۳ درصد، شاهد افزایش مقاومت خمشی نمونه ها نسبت به نمونه کنترل و نمونه های حاوی ۱/۵ درصد نانو سیلیس می باشیم. به این دلیل که افزایش نانو سیلیس باعث افزایش یکنواختی ITZ شده و حفرات کوچک را حذف می نماید و ژل C-S-H که دلیل اصلی یکنواختی و جلوگیری از کلوخه شدن ملات می باشد تولید شده و افزایش مقاومت خمشی را شاهد می باشیم. نمونه های حاوی ۳ درصد نانو نوع ۱، افزایش ۱۸، ۲۳، ۱۵، ۸ و ۸ درصدی را نسبت به نمونه کنترل در سنین ۳ تا ۹۱ روز و نمونه های دارای ۳ درصد نانو نوع ۳، افزایش ۲۴، ۲۶، ۱۷، ۱۲ و ۹ درصدی را در سنین مذکور دارا می باشند.



شکل ۲- نمودار مقاومت خمشی مخلوط های ساخته شده

۴. نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح ذیل می باشند:

الف- افزودن نانو سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها نسبت به نمونه کنترل گردید. چرا که ذرات نانو سیلیس، ناحیه انتقالی سطح مشترک ملات را یکنواخت می نمایند، بطوریکه حتی حفره های کوچک نیز حذف می شوند. در واقع بوسيله واکنش ذرات نانو سیلیس با کریستال های $Ca(OH)_2$ و تشکیل ژل C-S-H که دلیل اصلی یکنواختی ناحیه انتقالی سطح مشترک است، مقاومت مکانیکی ملات با کاهش خلل و فرج افزایش می یابد.

ب- در هر دو درصد جایگزینی نانو ذرات سیلیس (۱/۵ یا ۳ در صد)، شاهد عملکرد بهتر نانو ذرات سیلیس با سطح ویژه بیشتر (نانوی نوع ۳) نسبت به نوع دارای سطح ویژه کمتر (نانوی نوع ۱) در بهبود مقاومت فشاری هستیم. چرا که ذرات ریز تر به دلیل داشتن سطح ویژه بالاتر، توانایی بیشتری در انجام واکنش پوزولانی دارا هستند و از این طریق قادر خواهند بود مقاومت فشاری را بهبود دهند که این موضوع در تمامی سنین عمل آوری قابل مشاهده است.

ج- در درصد کمتر جایگزینی (۱/۵ درصد)، نانو سیلیس درشت تر تاثیر بیشتری در بهبود مقاومت خمشی نسبت به نانو سیلیس ریز تر داشته اند. به این دلیل که در این مقدار جایگزینی، نانو سیلیس درشت تر، تعداد کلوخه های کمتری را نسبت به نانو سیلیس ریز تر دارا می باشد.

د- در درصد بالاتر جایگزینی (۳ درصد)، از آنجا که تعداد نانو ذرات توزیع شده در ماتریس نسبت به جایگزینی ۱/۵ درصد بیشتر می باشد، لذا تاثیر کلوخه ها نسبت به برقراری واکنش پوزولانی سریع تر توسط ذرات توزیع شده نانو سیلیس نوع ۳ کمتر بوده و در نتیجه نانو سیلیس ریز تر عملکرد بهتری در افزایش مقاومت خمشی نمونه ها نسبت به نانو سیلیس درشت تر دارد.

۵. مراجع

- [1] Madani, H. Bagheri, A. Parhizkar, T. and Raisghasemi, A. , "Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing nanosilica hydrosols with different specific surface areas", *Cement & Concrete Composites*, 53(2014), 18-24, 2014.
- [2] Madani, Hesam, Bagheri, Alireza and Parhizkar, Tayebbeh, "The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, 42 (2012), 1563-1570, 2012.
- [3] Z.Q. Wu, J.F. young, "The hydration of tricalcium silicate in presence of colloidal silica", *J. Mater. Sci*, 19 (1984), 3477-3486, 1984.
- [4] S.S. Beedle, G.W. Groves, S.A. Rodger, "The effect of fine pozzolanic and other particles on hydration of C3S", *Adv. Cem. Res*, 2 (1989), 3-8, 1989.
- [5] B. Lothenbach, G.L. Saout, M.B. Hala, R. Figi, E. Wieland, "Hydration of low alkali CEM III/B-SiO₂ cement (LAC)", *Cem. Concr. Res*, 42 (2012), 410-423, 2012.
- [6] A. Korpa, R. Trettin, K.G. Bottger, J. Thieme, C. Schmidt, Pozzolanic reactivity of nanoscale pyrogene oxides and their strength contribution in cement-based systems, *Adv. Cem. Res*. 20 (2008) 35-46.
- [7] L. Sneff, D. Hortza, W.L. Repette, V.M. Ferreria, J.A. Labrincha, "Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars", *Mater. Sci. Eng. A*, 532 (2012), 354-361, 2012.
- [8] H. Ji, "Preliminary study on water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", *Cem. Concr. Res*, 35 (2005), 1943-1947, 2005.
- [9] M. Ltifi, A. Guefrech, P. Mounanga, A. Khelidj, "Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars", *Procedia Eng*, 10 (2011), 900-905, 2011.
- [10] A. Korpa, T. Kowald, R. Trettin, "Hydration behavior, structure and morphology of hydration phases in advanced cement-based systems containing micro and nanoscale pozzolanic additives", *Cem. Concr. Res*, 38 (2008), 955-962, 2008.
- [11] G. Quercia, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, "Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste", *Cem. Concr. Res*, 42 (2012), 344-357, 2012.
- [12] B.W. Jo, C.H. Kim, G.H. Tao, J.B. Park, "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", *Construct. Build Mater*, 21 (2007), 1351-1355, 2007.
- [13] S. Chandra, S.C. Maiti, "Improved properties of cement mortar and concrete with colloidal silica", *National Council for Cement and Building Materials (Eds.), Proceeding of sixth NCB international seminar on cement and building materials, The Council, New Delhi, 1998, pp. 24-27.*

- [14] S. Chandra, H. Bergqvist, "Interaction of silica colloid with Portland cement", H. Justnes (Ed.), Proceedings of the 10th International Congress on Chemistry of Cement, Amarkai and Congrex Göteborg Gothenburg, Gothenburg, V. 6, 3ii106, 1997.
- [15] N. Diamantonis, I. Marinos, M.S. Katsiotis, A. Sakellariou, A. Papathanasiou, V. Kaloidas, M. Katsioti, "Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete", *Construct. Build Mater*, 24 (2010), 1518–1522, 2010.
- [16] A. Anderson, A. Roy, R.K. Seeds, F.K. Carlidge, H.A. Akhter, S.C. Jones, "A preliminary assessment of the use of an amorphous silica residual as a supplementary cementing material", *Cem. Concr. Res*, 30 (2000) 437–445, 2000.
- [17] P. Mondal, S.P. Shah, L.D. Marks, J.J. Gaitero, "Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete", *J. Transp. Res. Board*, 2141 (2010), 6–9, 2010.
- [18] A. Porro, J.S. Dolado, I. Campillo, E. Erkizia, Y. de Miguel, Y. Saez.de. Ibara, "Effects of nanosilica additions on cement pastes", R.K. Dhir, M.D. Newlands, L.J. Csetenyi (Eds.), *Proceeding of Applications of Nanotechnology in Concrete Design*, Thomas Telford, Dundee, pp. 87–96, 2005.
- [19] R. Madandoust, M.M. Ranjbar, S.Y. Mousavi, "An investigation on the properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene", *Construct. Build Mater*, 25 (2011) 3721–3731, 2011.
- [20] A. Naji Givi, S. Abdul Rashid, F.N.A. Aziz, M.A. Mohd Salleh, "Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete", *Compos. Part B-Eng*, 41 (2010) 673–677, 2010.
- [21] M. Jalal, E. Mansouri, M. Sharifipour, A.R. Pouladkhan, "Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles", *Mater. Des*, 34 (2012), 389–400, 2012.
- [22] H.N. Stein, J.M. Stevels, "Influence of silica on the hydration of 3CaO.SiO₂", *J. Appl. Chem*, 14 (1964), 338–346, 1964.
- [23] J.A. Nelson, J.F. Young, "Additions of colloidal silicas and silicates to Portland cement pastes", *Cem. Concr. Res*, 7 (1977), 277–282, 1977.
- [24] J. Bjornstorm, A. Martinelli, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas, "Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement", *Chem. Phys. Lett*, 392 (2004) 242–248, 2004.
- [25] M.H. Zhang, H. Li, "Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement", *Construct. Build Mater*, 25 (2011), 608–616, 2011.
- [26] K.L. Lin, W.C. Chang, D.F. Lin, H.L. Luo, M.C. Tsai, "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar", *J. Environ. Manage*, 88 (2008) 708–714, 2008.
- [27] ASTM C 494, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", American Standard for Testing and Materials, 2015.
- [28] ASTM C 33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", American Standard for Testing and Materials, 2013.
- [29] ASTM C 109, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Standards for Testing and Materials, 2002.
- [30] ASTM C 348, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", American Standards for Testing and Materials, 2002.