

بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن

میثم فضلوی^۱، سعید معدنی^{۲*}، حسین مهدی‌خانی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، قزوین، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، قزوین، ایران

چکیده

ملات ماده‌ای است که به دلیل دارا بودن مقاومت فشاری قابل توجه، کاربردش در قطعات تحت فشار مانند ستون‌ها و قوس‌ها بسیار مناسب است. لیکن علی‌رغم مزیت مذکور، مقاومت کششی کم و شکنندگی نسبتاً زیاد ملات استفاده از آن را برای قطعاتی که تماماً یا به طور موضعی تحت کشش هستند محدود می‌نماید. بهره‌گیری از الیاف می‌تواند راهکاری در راستای ممانعت از این نقایص باشد. اما ضعف پیوند ماتریس و الیاف می‌تواند به عنوان مانعی مطرح باشد. لذا افزودن نانوذرات می‌تواند در جهت رفع این مشکل استفاده گردد. در این تحقیق، نمونه‌های ملات سیمان تقویت شده با الیاف و حاوی نانوسیلیس تهیه گردید تا تأثیر نانوذرات سیلیس بر روی خواص مکانیکی ملات حاوی الیاف پلی پروپیلن و همچنین فاقد این الیاف مورد ارزیابی قرار گیرد. الیاف پلی پروپیلن مصرفی دارای طول ۱۸-۶ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۹۰۰-۳۰۰ بودند. تأثیر الیاف در دو درصد مختلف ۰/۱٪ و ۰/۲٪ و تأثیر نانوسیلیس در درصدهای متفاوت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵٪ روی ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. در مجموع ۱۰۸ نمونه مکعبی به ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ و همچنین ۱۰۸ نمونه مکعب مستطیلی به ابعاد $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ براساس استانداردهای ASTM ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۷ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. نتایج حاصل از آزمایشات بیانگر افزایش قابل توجهی در مشخصات مکانیکی ملات‌های حاصله بود؛ به طوری که استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۵۱٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۶۱٪ افزایش نشان داد. همچنین استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۴۸٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۵۵٪ افزایش نشان داد. افزایش چشم‌گیر خواص مکانیکی نشان از عملکرد مناسب این نوع ملات دارد.

کلمات کلیدی: ملات تقویت شده با الیاف، نانومواد، نانوذرات سیلیس، استحکام فشاری، استحکام خمشی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.122286.1499	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.122286.1499	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۹	۱۳۹۶/۱۲/۲۲
			*نویسنده مسئول:		
			سعید معدنی		
			پست الکترونیکی:		
			s_maadani@yahoo.com		

Investigation of the Effect of Nano-Silica on the Compressive and Flexural Strength of Cement Mortar Reinforced with Polypropylene Fibers

Meisam Fazlavi¹, Saeed Maadani^{2*}, Hossein Mehdikhani²

1- M. Sc. Graduate, Islamic Azad University, Takestan Branch, Qazvin, Iran
2- Assistant Professor, Islamic Azad University, Takestan Branch, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Mortar is suitable for utilizing in compressed parts such as columns and arches due to its considerable compressive strength. However, despite this advantage, the relatively low tensile strength and brittleness of the mortar limit its use for components that are under tensile loads. Using fibers and nano-particles can be a way to reduce these problems. In this research work, various fiber reinforced and nano-engineered cement mortars have been successfully prepared through the addition of nanosilica into plain and fiber reinforced mortars. In this way, effects of nano-SiO₂ on the mechanical properties of cement mortars with polypropylene fibers and also without it have been evaluated. Polypropylene fibers were used in lengths of 6-18 mm and aspect ratios of 300-900. The effect of fibers in two different percentages of 0.1% and 0.2%, and the influence of nano-silica in various percentages of 1, 2, 3, 4 and 5% on mortars with a water-to-binder weight ratio of 0.485 were evaluated and compared. A total of 108 cubic mortar samples with a dimension of 5×5×5 cm³ and 108 rectangular cubic samples with a dimension of 16×4×4 cm³ were made according to ASTM standards, and compressive and flexural strength tests were carried out on samples at the ages of 7 and 28 days. The results of the experiments indicated a significant enhancement in the mechanical properties of the prepared mortars, as the values of 7-day and 28-day compressive strength of the sample containing 0.1% fiber and 3% nano-SiO₂ were increased by 51% and 61%, respectively, compared to the control sample. Besides, the values of 7-day and 28-day flexural strength of the sample containing 0.2% fiber and 3% nano-SiO₂ were increased by 48% and 55%, respectively, compared to the control sample. A noticeable increase in mechanical properties indicated the suitable performance of this type of mortar.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 March 2018
Revise Date: 20 August 2018
Accept Date: 02 October 2018

Keywords:

Fiber Reinforced Mortar
Nanomaterials
Silica Nanoparticles
Compressive Strength
Flexural Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.122286.1499

*Corresponding author: Saeed Maadani
Email address: s_maadani@yahoo.com

۱- مقدمه

ملات و بتن به دلیل دارا بودن تطبیق پذیری و قابلیت تغییر، مقاومت فشاری قابل توجه، دوام و قابلیت تحمل بالا یکی از گسترده ترین مواد مورد استفاده در جهان هستند. بنابراین با فرایند صحیح طراحی و ساخت، عمر سرویس دهی این مواد می تواند به بیشتر از ۵۰ سال برسد [۱]. لیکن مقاومت کششی کم و شکنندگی نسبتاً زیاد آنها کاربردشان را برای قطعاتی که تماماً یا به طور موضعی تحت کشش هستند محدود می نماید. به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و کاهش ضعف شکنندگی، استحکام کششی و تردی ملات یا بتن تا حد ممکن، در چند دهه اخیر استفاده از الیاف نازک و نسبتاً طویل که در تمام حجم ملات یا بتن و در جهات مختلف پراکنده می شود متداول شده است [۲-۴].

ملات تقویت شده با الیاف^۱ (FRM) با اضافه کردن الیاف (معمولاً الیاف فولادی یا پلی پروپیلن) به مخلوط ملات تهیه می شود که باعث کنترل ترک انقباض پلاستیک و ترک انقباض در حین خشک کردن می شود. الیاف نفوذپذیری FRM را کاهش داده و باعث فشردگی بیشتر و مقاومت بیشتر به سایش و ترک مویی^۲ در FRM می شوند. مهم ترین خواص مورد نیاز برای الیاف شامل طول، نسبت طول به قطر، وزن مخصوص، مدول الاستیک و استحکام کششی می باشد [۵، ۶].

موضوع دیگری که از اوایل قرن ۲۱ مورد توجه دانشمندان علم بتن و ملات قرار گرفته است استفاده از نانومواد در ملات بوده است [۱، ۷]. محققان با آزمایشات مختلف به این نتیجه رسیدند که مشخصات ملات حاوی نانومواد در مقایسه با ملات معمولی تحت تأثیر واکنش های شیمیایی نانومواد با ذرات سیمان و بلورهای هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) موجود در سیمان قرار گرفته و بدین ترتیب می تواند عملکرد ماده مرکب بر پایه سیمان را به شدت تحت تأثیر قرار دهد [۸، ۹]. به طور کلی، اثرات مفید نانوذرات بر روی ریزساختار و عملکرد مواد پایه سیمانی به وسیله عوامل زیر توضیح داده شده اند [۱، ۶، ۱۰، ۱۱]:

- ❖ نانوذرات حفرات بین دانه های سیمان را پر می کنند و منجر به عدم تحرک آب آزاد می شوند (اثر پرکنندگی).
- ❖ نانوذرات با پراکنندگی مناسب می توانند به عنوان مراکز برای جوانه زنی و بلورسازی هیدرات های سیمان عمل کنند و از این رو، سرعت هیدراتاسیون را افزایش دهند.
- ❖ نانوذرات تمایل به تشکیل بلورهای کوچک هیدروکسید کلسیم و خوشه های یکنواخت با اندازه کوتاه C-S-H دارند.
- ❖ نانوذرات واکنش های پوزولانی را تسریع می کنند و موجب مصرف بلورهای هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) و تشکیل ژل اضافی C-S-H می گردند.
- ❖ نانوذرات نقاط تماس بین سنگدانه ها را افزایش می دهند و موجب بهبود پیوند بین سنگدانه ها و خمیر سیمان در ناحیه انتقالی میان سطحی^۳ (ITZ) و افزایش تراکم ریزساختار و کاهش تخلخل در این ناحیه می شوند.
- ❖ نانوذرات موجب جلوگیری از رشد ترک و قفل شدن بین صفحات لغزش می گردند که این امر، بهبود چقرمگی، استحکام خمشی و برشی مواد پایه سیمانی را در پی دارد.

ذرات با اندازه نانو دارای نسبت مساحت سطحی به حجم بالایی هستند و به همین دلیل واکنش پذیری شیمیایی فوق العاده ای را نشان می دهند. در گزارش های منتشر شده نانو مواد متفاوتی از جمله نانوذرات سیلیس [۱۲]، نانو ذرات اکسید آهن [۷، ۱۳] و... جهت بهبود خواص بتن مورد آزمایش قرار گرفته اند که از میان آنها نانوذرات سیلیس (nano-SiO₂) به علت دارا بودن خواص پوزولانی بالا توجه

¹ Fiber Reinforced Mortar

² shatter

³ interfacial transition zone

بیشتری را به خود جلب نموده است. گزارش شده است که افزودن مقدار بهینه نانوسیلیس به مواد پایه سیمانی^۴ موجب شتاب بخشیدن به سرعت هیدراتاسیون، ریز شدن ساختار تخلخل، افزایش استحکام، کاهش حل شدن کلسیم (Ca) و افزایش دوام این مواد می شود [۸].

جهت بهبود پیوند ماتریس و الیاف و به منظور ارتقای خواص مکانیکی برای استفاده از پتانسیل مسلح کنندگی الیاف در کامپوزیت های سیمانی می توان از نانو مواد استفاده کرد. Hakamy و همکارانش نانوکامپوزیت های سیمانی تقویت شده با الیاف طبیعی همپ^۵ و صفحات نانورس تجاری (Cloisite 30B) را تهیه نمودند. Cloisite 30B نام تجاری یک رس مونت موریلونیت طبیعی $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ اصلاح شده با نمک آمونیوم می باشد. نتایج نشان داد که جایگزینی سیمان پرتلند معمولی با ۱ wt% نانورس ۱۵/۵٪ تخلخل کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف همپ را کاهش داده و دانسیته، استحکام خمشی و چقرمگی شکست را به ترتیب ۵/۳٪ و ۲۶/۲٪ و ۲۴/۹٪ در نانوکامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف همپ افزایش می دهد. نانورس نه تنها به عنوان یک پرکننده برای بهبود ریزساختار رفتار می کند؛ بلکه به عنوان یک فعال کننده برای پیش بردن واکنش پوزولانی و چسبندگی سیمان با الیاف همپ عمل می کند [۱۴].

تاکنون تأثیر همزمان الیاف و نانوذرات بر روی خواص مکانیکی مواد پایه سیمانی از قبیل ملات ها چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق، تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن و همینطور نانوساختارهای SiO_2 بر ملات های سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب هدف اصلی از این پژوهش، اضافه کردن الیاف تقویت کننده پلی پروپیلن به ملات و همچنین اصلاح پیوند بین الیاف و ماتریس در ملات الیافی به کمک اضافه کردن نانو سیلیس به منظور افزایش پیوستگی و بهبود مقاومت و کیفیت ملات می باشد. بنابراین الیاف و نانومواد تهیه شده جایگزین سیمان شده و به همراه ماسه، آب و افزودنی های دیگر برای ساخت نمونه های ملات به کار رفته اند تا اثر آنها بر روی خواص مکانیکی شامل استحکام فشاری و خمشی نمونه های حاصل سنجیده شود.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مواد اولیه و مصالح

در این مطالعه از فوق روان کننده با نام تجاری FARCO PLAST P10N محصول شرکت شیمی ساختمان که بر پایه پلی کربوکسیلیک بود به منظور ایجاد خمیری با سیالیت مناسب و تنظیم ویسکوزیته آن استفاده گردید. جدول ۱ مشخصات آن را نشان می دهد. جدول ۲ نیز مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. همچنین جدول ۳ بیانگر مشخصات سنگدانه مصرفی در ساخت ملات می باشد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده مورد استفاده به عنوان ماده اولیه

FARCO PLAST P10N	نام فوق روان کننده
کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید	نوع
آنیونی	طبیعت یونی
سبز تیره	رنگ
مایع	حالت فیزیکی

⁴ cement based materials

⁵ hemp

وزن مخصوص Kg/Lit	20 ± 0.02 در $20^\circ C$
کلراید ppm	۵۰۰ (max)

جدول ۲: مشخصات فنی الیاف پلی پروپیلن

شکل ظاهری	الیاف سفید رنگ
پایه شیمیایی	پلیمر پلی پروپیلن
فرمول شیمیایی	$-[CH_2-CH(CH_3)]_n-$
وزن مخصوص	$90.0 \frac{Kg}{m^3}$
طول	۶، ۹، ۱۲ و ۱۸ میلیمتر
قطر	در حدود ۲۰ میکرون
مقاومت کششی	$350 \frac{N}{mm^2}$
نقطه ذوب	$160^\circ C$
شرایط نگهداری	در محیط خشک
مدت نگهداری	در شرایط ایده ال نامحدود
بسته بندی	کیسه های ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۴۰ کیلو گرمی
ویژگی زیست محیطی	دوستدار محیط زیست

جدول ۳: مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی جهت ساخت ملات

سنگدانه	جذب آب (%)	چگالی در حالت SSD $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	مدول نرمی
ماسه	۱/۱	۲/۶۲	۲/۶۷

دانه بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات مطابق با استاندارد ASTM C778 انجام شد. حدود ماسه دانه بندی شده بر اساس استاندارد ASTM C778 و دانه بندی ماسه مورد استفاده در ساخت ملات ها در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: دانه بندی ماسه

شماره الک	درصد عبوری (استاندارد)	درصد عبوری (مورد استفاده)	درصد مانده (مورد استفاده)
NO.16	۱/۱۸ mm	۱۰۰	۰
NO.20	۸۵۰ μm	۱۰۰	۰
NO.30	۶۰۰ μm	۹۶-۱۰۰	۰
NO.40	۴۲۵ μm	۶۵-۷۵	۳۰
NO.50	۳۰۰ μm	۲۰-۳۰	۴۵
NO.100	۱۵۰ μm	۰-۴	۲۵

۲-۲- تهیه ملات‌ها

ابتدا مصالح لازم برای ساخت ملات الیافی و نانو مواد را بصورت یکجا تهیه می‌کنیم که شامل سیمان، ماسه استاندارد، الیاف پلی‌پروپیلن، و نانوسیلیس می‌باشد. سپس طرح‌های اختلاطی جهت بررسی اثر نانو مواد بر ملات الیافی و همچنین فاقد الیاف به صورت نشان داده شده در جدول ۵ در نظر گرفته شد. ملات شاهد (کنترل) با حرف S نمایش داده شده است. پودر نانوساختار تهیه شده در درصد‌های وزنی (% wt.) متفاوت جایگزین سیمان پرتلند شد. مقدار آب به کار رفته در همه نمونه‌ها $3 \frac{kg}{m}$ و مقدار ماسه

$1444 \frac{kg}{m^3}$ می‌باشد. از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مجزا تهیه گردید تا در آزمون‌های مقاومت مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند.

روش ساخت ملات‌ها به این صورت می‌باشد که ابتدا آب و فوق‌روان کننده لازم جهت ساخت ملات را که در آزمایش میز سیلان بدست آمده را در جام مخلوط کن ریخته و مخلوط کن را با سرعت کم روشن می‌کنیم. مواد سیمانی (سیمان و نانومواد هر طرح) را به آب اضافه می‌کنیم و عمل اختلاط را تا یک دقیقه ادامه می‌دهیم. مخلوط‌های ملات دارای نسبت ثابت آب به اتصال‌دهنده^۶، $0/485$ بر طبق استاندارد ASTM C109 بودند [۱۵، ۱۶]. درحالی که مخلوط‌کن کار می‌کند در فاصله ۳۰ ثانیه تمام ماسه لازم را در داخل آن می‌ریزیم و در طرح اختلاط‌هایی که الیاف پلی‌پروپیلن دارد تمام الیاف را به جام مخلوط کن اضافه می‌کنیم و مابقی اختلاط را مطابق استاندارد ASTM C305 انجام می‌دهیم [۱۷]. شکل ۱ (الف) تصویری از جام مخلوط‌کن مورد استفاده در تهیه طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد.

استفاده از فوق‌روان کننده راهکاری جهت جبران کاهش سیالیت ناشی از افزودن الیاف می‌باشد. جهت ساخت نمونه‌های سخت شده ملات با افزودن مقادیر متفاوت فوق‌روان کننده سعی گردید کارایی کلیه مخلوط‌ها که به وسیله میز سیلان اندازه‌گیری می‌شود در یک محدوده مشابه یعنی قطر معادل ۱۰۰ تا ۱۱۰ میلی‌متر حفظ گردد. بدین منظور در هر مرحله با افزودن تدریجی فوق‌روان کننده به داخل مخلوط کن و انجام آزمایش، مقادیر مورد نیاز فوق‌روان کننده در هر یک از طرح‌های اختلاط اندازه‌گیری و ثبت شد (جدول ۵).

جدول ۵: کد و مقادیر مواد به کار رفته در طرح‌های مختلف اختلاط

شماره	کد طرح	الیاف (% wt.)	نانوسیلیس (% wt.)	روان کننده (kg/m^3)
۱	S	۰	۰	۰
۲	INS	۰	۱	۰/۴۲

⁶ water/binder ratio

۰/۶۴	۲	۰	2NS	۳
۰/۹۵	۳	۰	3NS	۴
۱/۵۹	۴	۰	4NS	۵
۲/۰۱	۵	۰	5NS	۶
۱/۵۹	۰	۰/۱	0.1F	۷
۲/۲۸	۱	۰/۱	1NS0.1F	۸
۲/۸۶	۲	۰/۱	2NS0.1F	۹
۳/۶	۳	۰/۱	3NS0.1F	۱۰
۴/۷۱	۴	۰/۱	4NS0.1F	۱۱
۶/۵۲	۵	۰/۱	5NS0.1F	۱۲
۴/۵	۰	۰/۲	0.2F	۱۳
۵/۰۱۹	۱	۰/۲	1NS0.2F	۱۴
۶/۴۷	۲	۰/۲	2NS0.2F	۱۵
۷/۵۸	۳	۰/۲	3NS0.2F	۱۶
۸/۳۲	۴	۰/۲	4NS0.2F	۱۷
۹/۰۶	۵	۰/۲	5NS0.2F	۱۸

۲-۳- ارزیابی مقاومت مکانیکی

مخلوط‌های حاصل در داخل قالب‌های مناسب ریخته شده و بر طبق روش استاندارد متراکم و به کمک میز لرزان هوای آن خارج می‌گردد. نمونه‌های ملات تهیه شده بعد از ۲۴ ساعت از داخل قالب خارج شده و با اعمال رطوبت کافی و دمای مناسب تحت عمل‌آوری (Curing) قرار می‌گیرند.

مخلوط‌های ملات حاصل در قالب‌های مکعبی با ابعاد $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ جهت آزمون مقاومت فشاری و قالب‌های مکعب‌مستطیلی با ابعاد $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ جهت آزمون مقاومت خمشی ریخته شد. در نهایت خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) نمونه‌های شکل‌گرفته و هیدراته در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱ (ب و ج) تصاویری از دستگاه آزمون استحکام فشاری و نمونه مکعبی مربوطه را نمایش می‌دهد.



(ج)



(ب)



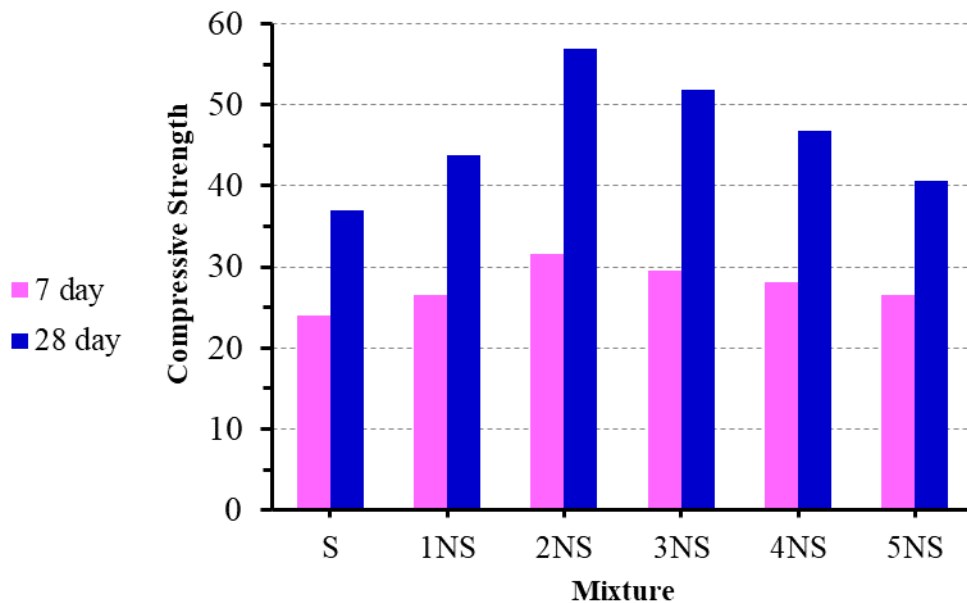
(الف)

شکل ۱: تصاویری از (الف) جام مخلوط کن مورد استفاده در تهیه طرح‌های اختلاط، (ب) دستگاه آزمون استحکام فشاری و (ج) نمونه مکعبی مربوطه.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- استحکام فشاری طرح‌های فاقد الیاف

نمودار ستونی شکل ۲ نتایج آزمون استحکام فشاری در طرح‌های اختلاط فاقد الیاف در اثر افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است؛ استحکام فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز طرح حاوی ۰.۲٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانوسیلیس در همه سنین از نمونه شاهد بیشتر بوده و با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس تا ۰.۲٪ مقاومت فشاری افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد.



شکل ۲: مقاومت فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

بر طبق شکل ۲، استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۳۲٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۵۴٪ افزایش نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری ملات با افزایش زمان عمل‌آوری بیشتر شده است.

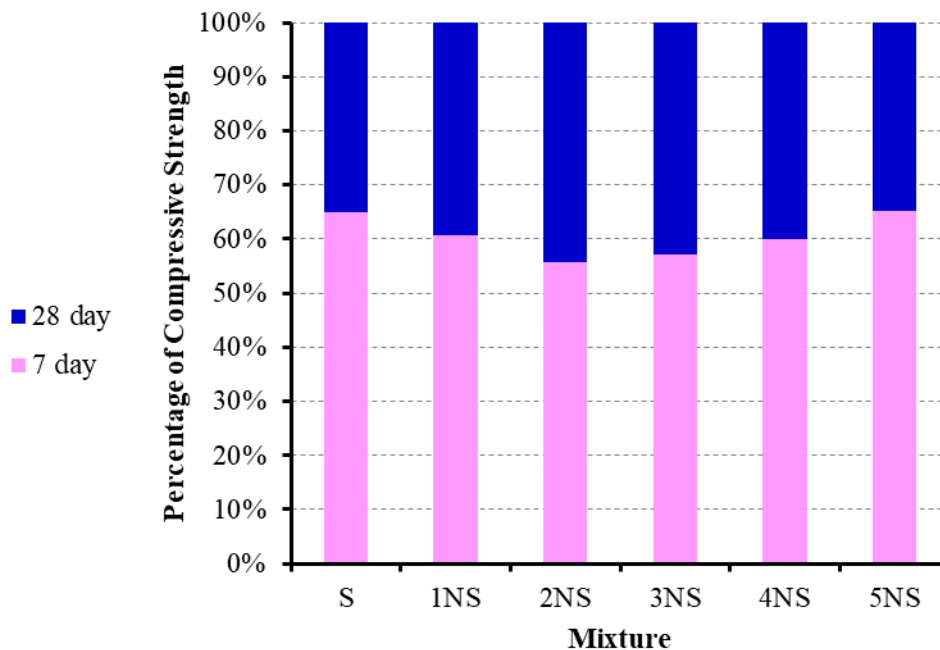
مکانیزم افزایش استحکام فشاری در اثر افزودن نانوسیلیس عمدتاً به دلیل اثر نانوپرکنندگی و واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. اندازه خیلی ریز ذرات نانوسیلیس می‌تواند بخشی از حفرات بزرگ و تخلخل‌های موئینی را پر کرده و باعث کوچکتر شدن ساختار تخلخل خمیر سیمان شود. از طرفی دیگر، اثر جوانه‌زنی^۷ و واکنش پوزولانی نانوسیلیس می‌تواند پرتلندیت^۸ را مصرف کرده و نه تنها اندازه کریستالی را کاهش دهد؛ بلکه سبب می‌شود که محصولات هیدراتاسیون دارای C-S-H بیشتر و همگن‌تری شوند [۹]. دلایل اشاره شده در بالا در منطقه انتقالی میان سطحی (ITZ) مشهودتر هستند و اتصال بهتر و پیوستگی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان می‌تواند در عملکرد مکانیکی بهتر ملات نقش مؤثری ایفا نماید [۱۸، ۱۹].

Jo و همکارانش تأثیر نانوذرات SiO₂ را بر ملات سیمانی بررسی نموده و به استحکام فشاری ۵۴/۳ MPa در سن ۲۸ روز برای طرح ساخته شده از ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیس به جای سیمان، دست یافتند [۱۲]، که اندکی بیشتر از مقدار ۵۱/۸۳ MPa برای نمونه 3NS این پژوهش است. استحکام فشاری ملات‌ها با افزایش مقدار SiO₂ از ۳٪ تا ۱۲٪ افزایش یافته است، به طوریکه بیشینه استحکام فشاری ۶۸/۸ MPa در سن ۲۸ روز برای طرح ساخته شده از ۱۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیس بدست آمده است [۱۲].

روند کسب مقاومت فشاری در طرح‌های اختلاط فاقد الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس در شکل ۳ نشان داده شده است. بر طبق شکل مشخص است که طرح حاوی ۲٪ نانوسیلیس تا سن ۷ روز، فقط ۵۶٪ مقاومت نهایی خود را (نسبت به سن ۲۸ روز) کسب نموده است که کمترین مقدار در بین نمونه‌های دیگر نمایش داده شده در شکل می‌باشد؛ اما طرح شاهد، ۶۵٪ مقاومت نهایی را تا سن ۷ روز بدست آورده است.

⁷ nucleation effect

⁸ Portlandite



شکل ۲: درصد مقاومت فشاری کسب شده در سنین ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

برای دانه‌های معمولی سیمان، هیدراتاسیون ابتدایی فقط به سطح دانه محدود می‌شود و با انجام آن، دانه سیمان مصرف شده و محصولات هیدراتاسیون رسوب کرده بر روی سطح دانه سیمان، رشد کرده و ضخیم‌تر می‌شوند. با افزایش زمان ماندگاری به سنین بالاتر، به دلیل تولید محصولات هیدراتاسیون احاطه‌کننده، انتقال یونی بین ذرات سیمان هیدراته نشده و محلول اطراف سخت‌تر شده که ادامه هیدراتاسیون سیمان را در سنین بالاتر محدود کرده و تولید ساختار متراکم C-S-H را مشکل می‌سازد [۹]. در تحقیق حاضر، هیدراتاسیون نمونه شاهد مشابه با چنین فرایندی است که باعث می‌شود طرح شاهد، ۶۵٪ مقاومت نهایی خود را تا سن ۷ روز بدست آورد. همچنین مقدار منافذ این نمونه در حالت سخت شده نسبتاً بالا بوده و مقاومت فشاری آن در مقایسه با طرح‌های حاوی نانوذرات کم می‌شود.

هنگامی که مقدار نانوسیلیس کمتر از ۲٪ باشد، مقدار دانه های C-S-H جدید تولید شده نیز کم است که به این معنی است که تا حد زیادی، بیشترین هیدراتاسیون هنوز روی سطح ذرات سیمان صورت می‌گیرد. از این رو، منافذ ماتریس سیمان سخت شده هنوز نسبتاً بزرگ است و استحکام فشاری کم است. اما از طرفی دیگر هنگامی که مقدار نانوذرات سیلیس بیش از حد بالا است (به عنوان مثال ۵٪ نسبت به وزن اتصال‌دهنده)، وجود مقادیر کافی از دانه‌های C-S-H تولید شده باعث می‌شوند که محصولات هیدراتاسیون بر روی سطوحشان رشد نمایند و منجر به یک ژل C-S-H متراکم شوند. با این وجود، به دلیل آنکه اضافه شدن نانوذرات به میزان زیادی ویسکوزیته مخلوط‌های سیمان را افزایش می‌دهد، مقدار زیادی از هوا می‌تواند در داخل سیستم سیمانی محبوس شود که به نوبه خود باعث افزایش منافذ ملات سخت شده می‌گردد. هنگامی که مقدار نانوذره بهینه است، اثر مثبت جوانه‌زنی و تأثیر منفی محبوس شدن هوا به خوبی می‌تواند به تعادل برسند [۹]. بدین ترتیب مقدار نانو سیلیس بهینه برای بیشینه شدن استحکام فشاری در طرح‌های اختلاط این تحقیق ۲٪ می‌باشد.

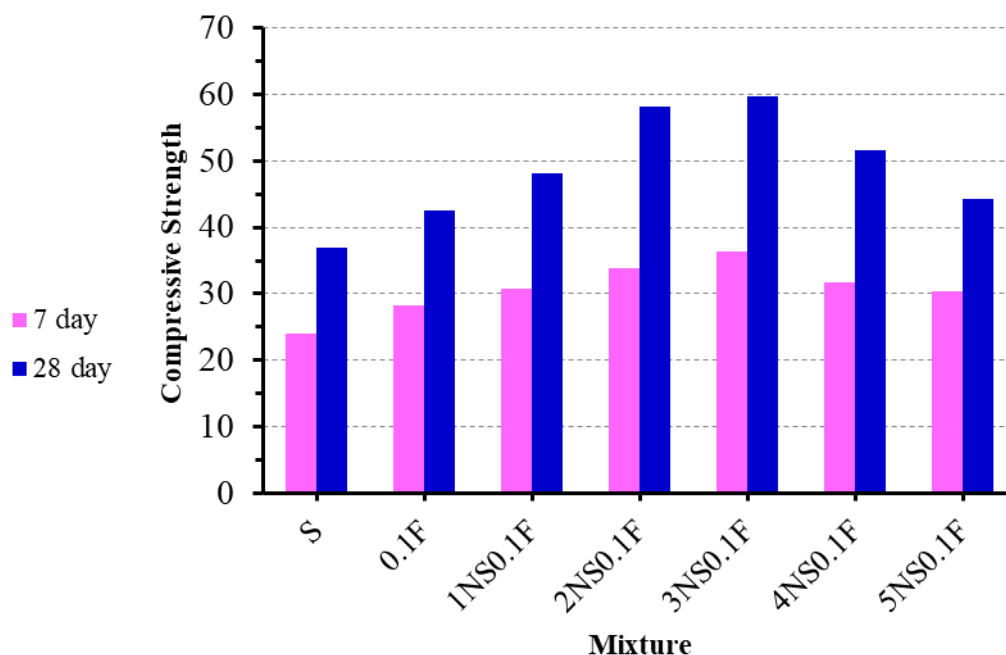
همچنین چنانچه مقدار نانوذرات از حدی (مقدار بهینه ۲٪) بیشتر شود، فاصله بین آنها کاهش می‌یابد و کریستال‌های $Ca(OH)_2$ به اندازه کافی نمی‌توانند رشد کنند که منجر به کاهش نسبت کریستال در ژل C-S-H شده و متعاقباً ریزساختار ماتریس ملات را تضعیف کرده و موجب کاهش مقاومت ملات می‌گردد [۲۰].

۳-۲- استحکام فشاری طرح‌های اختلاط حاوی نانوذرات و الیاف

شکل ۴ نتایج آزمون استحکام فشاری در طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۱٪ الیاف در اثر افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس را نمایش می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود؛ استحکام فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز طرح حاوی ۳٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می‌باشد. پراکندگی ضعیف الیاف پلی‌پروپیلن در ملات حجم منافذ را در ماتریس سیمان افزایش می‌دهد [۲۱] و باعث می‌شود که برای دستیابی به طرح بهینه از نانوسیلیس بیشتری به عنوان پرکننده نسبت به طرح‌های فاقد الیاف (۲٪ نانوسیلیس) استفاده کنیم.

بر طبق شکل ۴، استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۵۱٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۶۱٪ افزایش نشان می‌دهد. همچنین وجود نانوذرات خاصیت تقویت‌کنندگی الیاف را بهبود بخشیده است؛ به طوریکه استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح حاوی فقط ۰/۱٪ الیاف حدود ۲۹٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۴۰٪ افزایش نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری بیشتر شده است.

Mohammadi و همکارانش تأثیر همزمان الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس را بر بتن معمولی بررسی نموده و به بیشینه استحکام فشاری ۶۰/۷۲ MPa در سن ۲۸ روز برای طرح حاوی ۰/۳٪ الیاف و ۶٪ نانوسیلیس دست یافتند که اندکی بیشتر از مقادیر گزارش شده در این تحقیق می‌باشد [۲۲]. خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس باعث می‌شود تا جایی که خلل و فرج بتن پر نشده باشد، افزایش نانومواد موجب افزایش استحکام فشاری گردد. بنابراین به دلیل وجود منافذ بین الیاف و ماتریس، طرح حاوی ۰/۳٪ الیاف در تحقیق Mohammadi و همکارانش به مقدار بیشتری نانوذره (۰/۶٪) جهت دستیابی به استحکام فشاری بهینه نیاز داشته است.



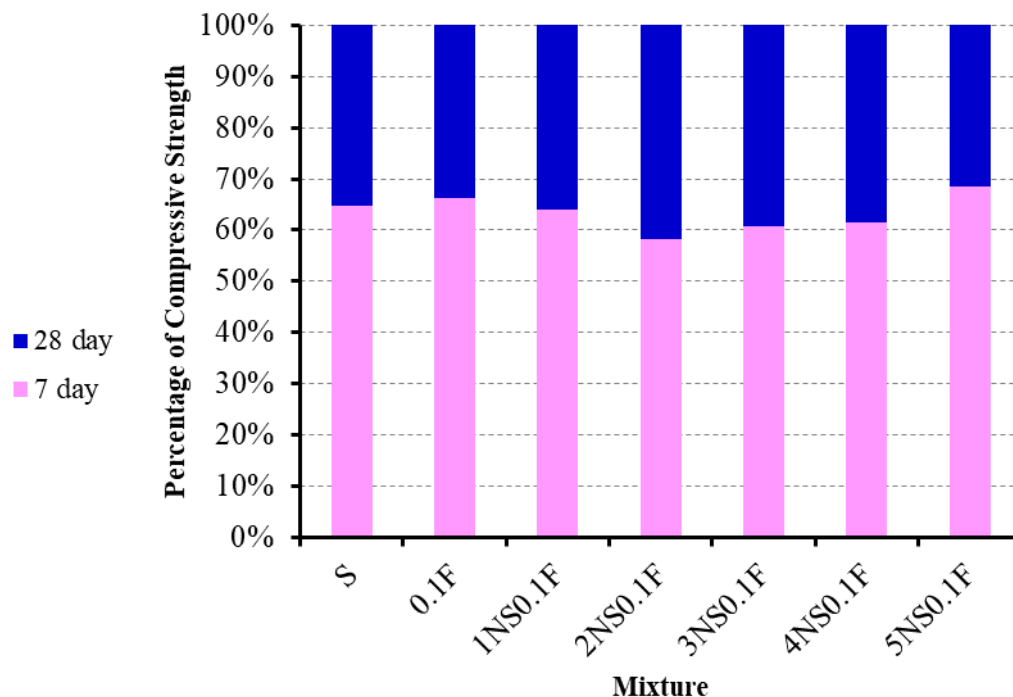
شکل ۴: مقاومت فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز نمونه‌های حاوی ۰/۱٪ الیاف با درصدهای متفاوت نانوسیلیس.

روند کسب مقاومت فشاری در طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۱٪ الیاف در اثر افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس در شکل ۵ نشان داده شده است. بر طبق شکل مشخص است که طرح دارای بیشترین مقدار نانوسیلیس (۵٪) تا سن ۷ روز، حدود ۶۸/۵٪ مقاومت نهایی خود را کسب نموده است؛ اما طرح حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس، حدود ۶۱٪ مقاومت نهایی را تا سن ۷ روز بدست آورده است.

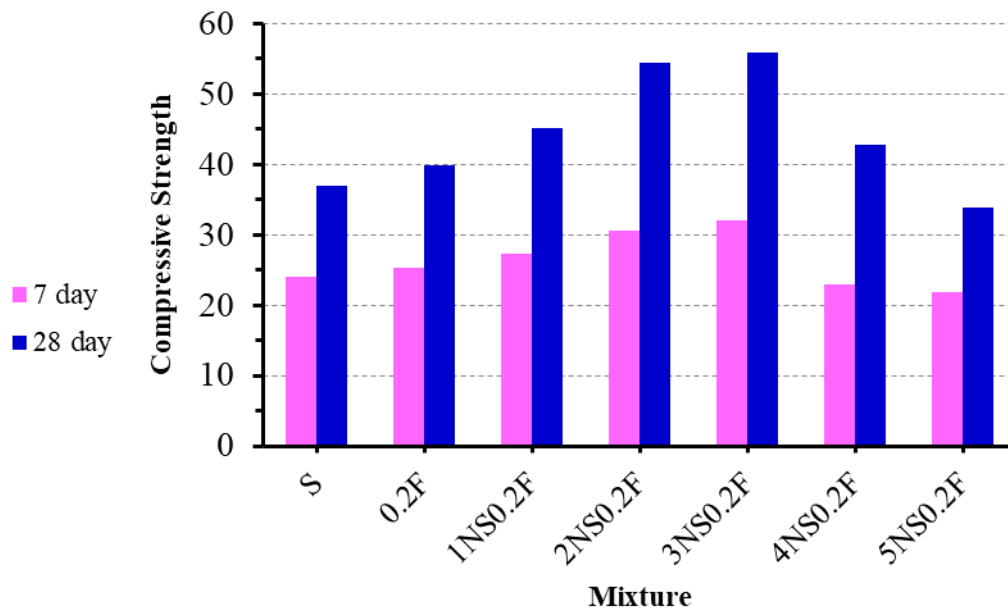
همچنین طرح حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۰/۲٪ نانوسیلیس دارای کمترین مقدار کسب مقاومت تا سن ۷ روز (۵۸٪) می باشد. این موضوع در توافق با نتایج شکل ۳ برای نمونه فاقد الیاف حاوی ۰/۲٪ نانوسیلیس می باشد.

شکل ۶ نتایج آزمون استحکام فشاری در طرح های اختلاط حاوی ۰/۲٪ الیاف در اثر افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس را نمایش می دهد. Mazaheripour و همکارانش تأثیر الیاف پلی پروپیلن را بر بتن خود متراکم سبک وزن بررسی نموده و به بیشینه استحکام فشاری ۲۶/۵ MPa در سن ۲۸ روز برای ۰/۲ درصد حجمی الیاف دست یافتند که کمتر از مقدار ۳۹/۸ MPa در سن ۲۸ روز برای نمونه ملات 0.2F گزارش شده در این تحقیق می باشد [۴].

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود؛ استحکام فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز طرح حاوی ۰/۳٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می باشد. بر طبق این شکل، استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۰/۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۳۳٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۵۱٪ افزایش نشان می دهد. همچنین وجود نانو ذرات خاصیت تقویت کنندگی الیاف را بهبود بخشیده است؛ به طوریکه استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۰/۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح حاوی فقط ۰/۲٪ الیاف حدود ۲۶٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۴۰٪ افزایش نشان می دهد. این موضوع نشان می دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف با افزایش زمان عمل آوری بیشتر شده است. همچنین تأثیر افزودن ۰/۳٪ نانوسیلیس بر افزایش مقاومت فشاری ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف تقریباً مشابه با تأثیر آن بر ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف بوده است ولیکن مقاومت فشاری ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۰/۳٪ نانوسیلیس کمتر از ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۰/۳٪ نانوسیلیس می باشد. الیاف می توانند به عنوان موانعی در برابر رشد ترک ها عمل کنند و مقاومت فشاری را افزایش دهند؛ اما به دلیل زیاد شدن منافذ بین الیاف و ماتریس، افزایش بیش از مقدار بهینه الیاف موجب افت استحکام فشاری می شود.

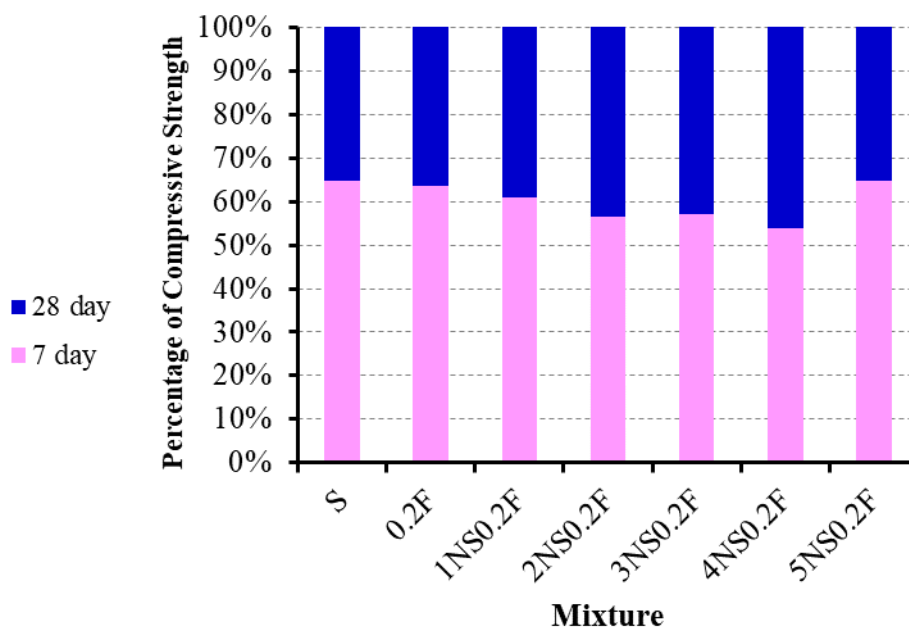


شکل ۵: درصد مقاومت فشاری کسب شده در سنین ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه های حاوی ۰/۱٪ الیاف با درصدهای متفاوت نانوسیلیس



شکل ۶: مقاومت فشاری سنین ۷ روز و ۲۸ روز نمونه‌های حاوی ۰/۲٪ الیاف با درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

روند کسب مقاومت فشاری در طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۲٪ الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس در شکل ۷ نشان داده شده است. بر طبق شکل مشخص است که طرح دارای بیشترین مقدار نانوسیلیس (۰/۵٪) تا سن ۷ روز، حدود ۶۵٪ مقاومت نهایی خود را کسب نموده است که همراه با نمونه شاهد (کد S) دارای بیشترین مقدار در بین نمونه‌های دیگر نمایش داده شده در شکل می‌باشند؛ اما طرح حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۰/۳٪ نانوسیلیس، حدود ۵۷٪ مقاومت نهایی را تا سن ۷ روز بدست آورده است. همچنین طرح حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۰/۴٪ نانوسیلیس دارای کمترین مقدار کسب مقاومت تا سن ۷ روز (۵۴٪) می‌باشد.



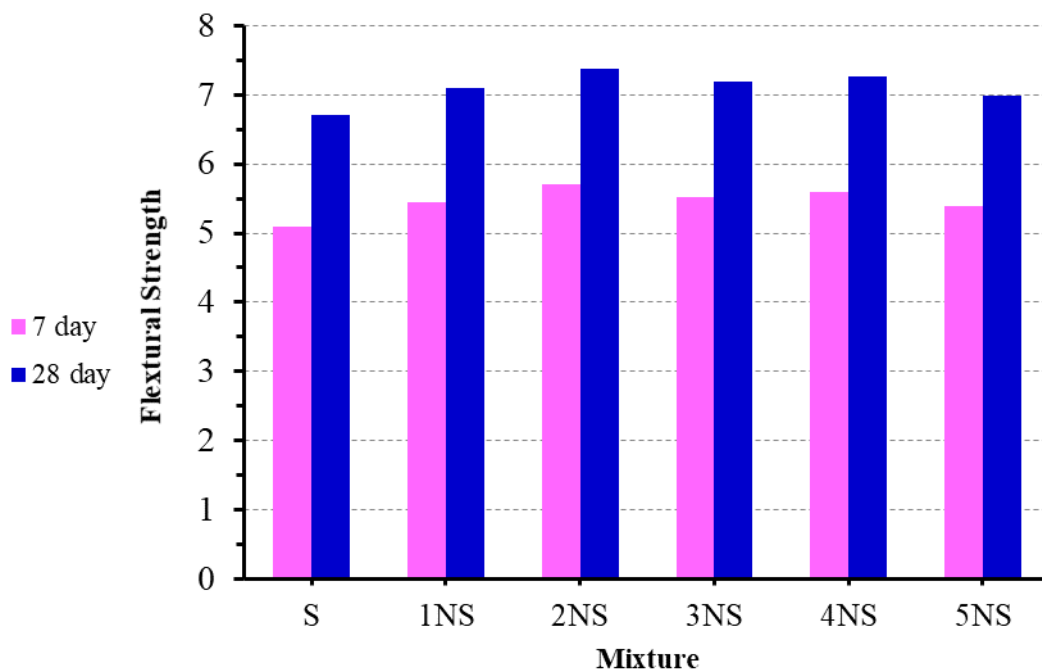
شکل ۷: درصد مقاومت فشاری کسب شده در سنین ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی ۰/۲٪ الیاف با درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

۳-۳- استحکام خمشی طرح‌های فاقد الیاف

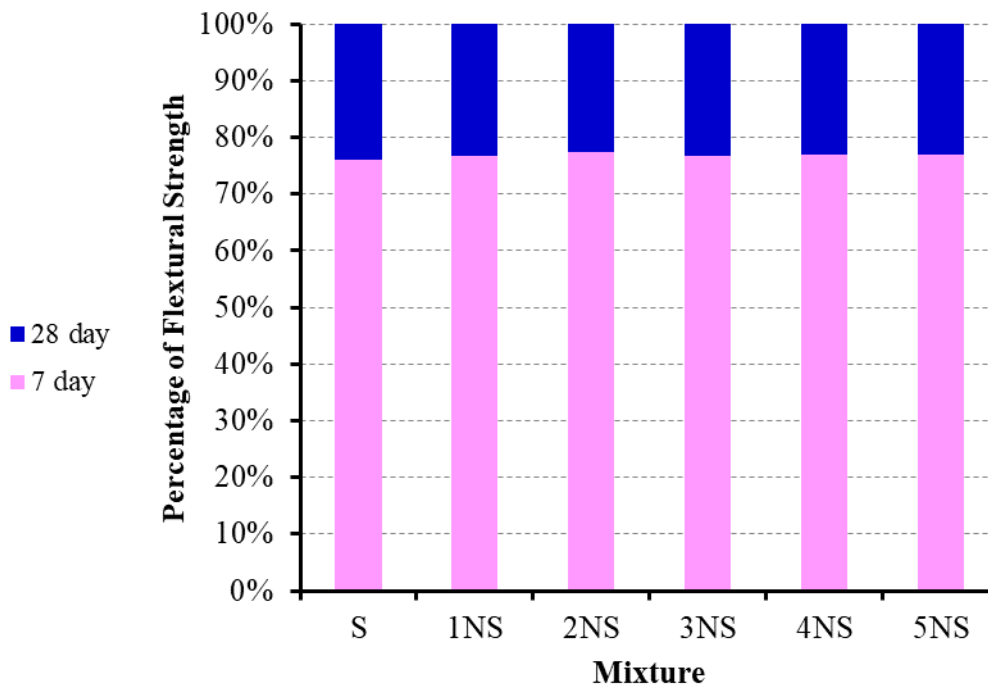
شکل ۸ نتایج آزمون استحکام خمشی در طرح‌های اختلاط فاقد الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس را نمایش می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود؛ استحکام خمشی سنین ۷ روز و ۲۸ روز طرح حاوی ۲٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می‌باشد.

بر طبق شکل ۸، مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در همه سنین از نمونه شاهد بیشتر بوده و با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس تا ۲٪ مقاومت خمشی افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۱۲٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۱۰٪ افزایش نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت خمشی ملات با افزایش زمان عمل‌آوری اندکی کمتر شده است. این درحالی است که استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۳۲٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۵۴٪ افزایش نشان داد (شکل ۲). بنابراین اضافه کردن نانوسیلیس بر افزایش استحکام فشاری مؤثرتر بوده است که این موضوع می‌تواند به کاهش در تخلخل کلی و ایجاد ریزساختاری با منافذ کوچکتر در ملات حاوی نانوسیلیس نسبت داده شود [۱۶]. با توجه به اینکه خمش ترکیبی از بارگذاری کششی و فشاری می‌باشد و تحقیقات نشان داده است که نسبت استحکام فشاری به کششی با افزایش تخلخل ملات کاهش می‌یابد [۲۳]، بدین ترتیب این موضوع می‌تواند بر تأثیرگذاری بیشتر کم شدن تخلخل بر افزایش استحکام فشاری دلالت کند.

روند کسب مقاومت خمشی در طرح‌های اختلاط فاقد الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس در شکل ۹ نشان داده شده است. بر طبق شکل مشخص است که طرح‌های نشان داده شده از لحاظ کسب مقاومت خمشی در سنین مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس در سن ۷ روز تا ۷۷/۵٪ مقاومت خمشی نهایی خود را (نسبت به سن ۲۸ روز) کسب نموده است که با اختلاف اندکی، بیشترین مقدار در بین نمونه‌های دیگر نمایش داده شده در شکل می‌باشد. بنابراین در مقایسه با شکل ۳ دیده می‌شود که نمونه‌های مختلف در سنین اولیه (تا ۷ روز) درصد مقاومت خمشی بیشتری را نسبت به مقاومت فشاری کسب می‌نمایند.



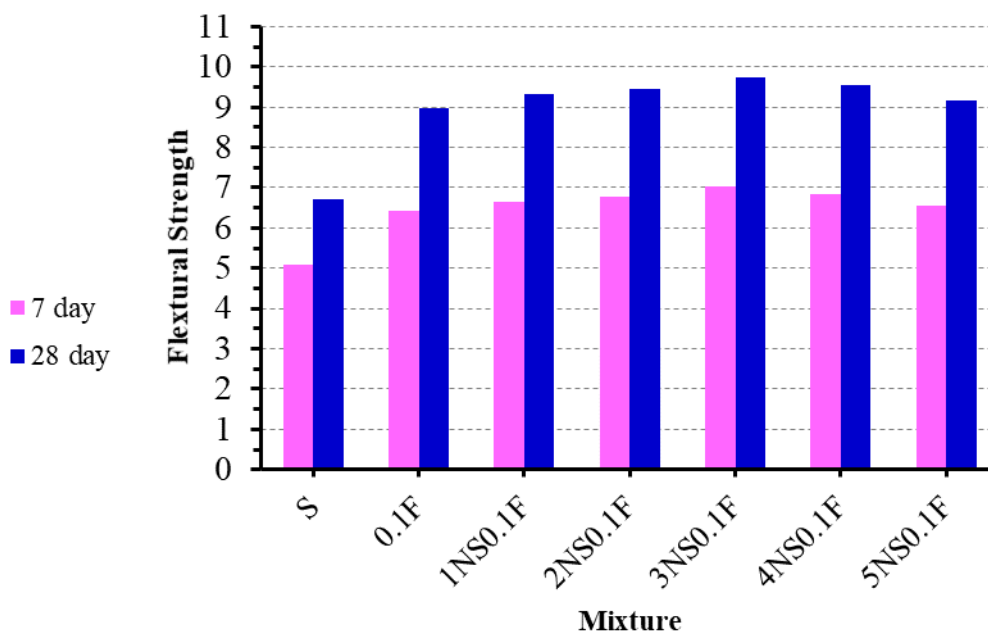
شکل ۸: مقاومت خمشی سنین ۷ روز و ۲۸ روز نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.



شکل ۹: درصد مقاومت خمشی کسب شده در سنین ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

۳-۴- استحکام خمشی طرح‌های اختلاط حاوی نانوذرات و الیاف

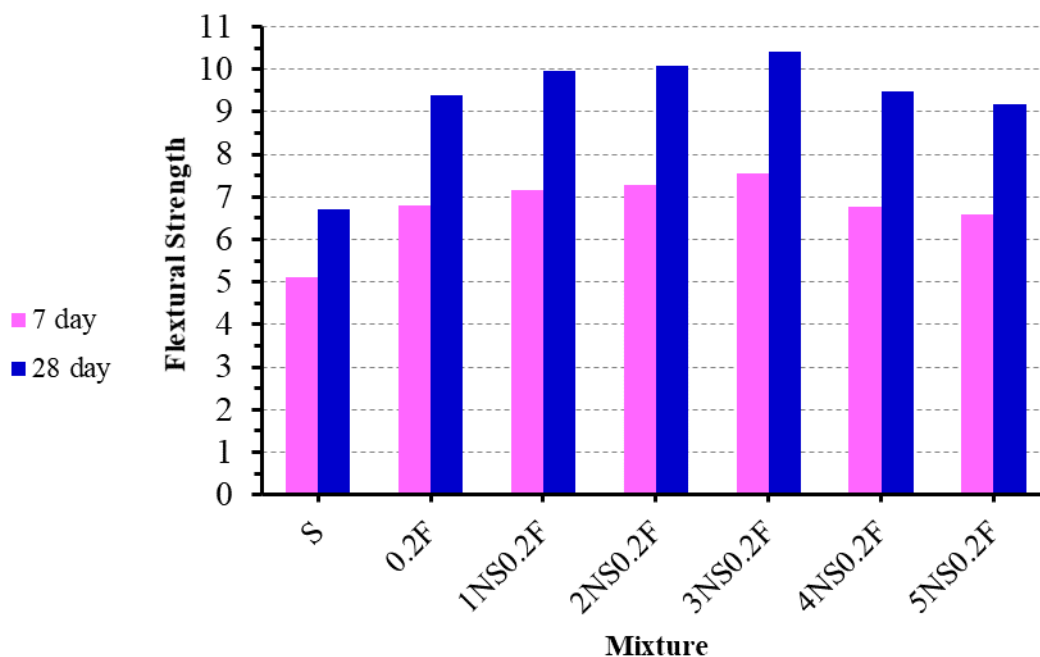
شکل ۱۰ نتایج آزمون استحکام خمشی در طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۱٪ الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس را نمایش می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود؛ استحکام خمشی سنین ۷ روز و ۲۸ روز طرح حاوی ۳٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می‌باشد.



شکل ۱۰- مقاومت خمشی سنین ۷ روز و ۲۸ روز نمونه‌های حاوی ۰/۱٪ الیاف با درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

بر طبق شکل ۱۰ استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۳۸٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۴۵٪ افزایش نشان می‌دهد. همچنین وجود نانوذرات خاصیت تقویت‌کنندگی الیاف را بهبود بخشیده است؛ به طوری که استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح حاوی فقط ۰/۱٪ الیاف حدود ۹٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۸٪ افزایش نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت خمشی ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری تغییر چندانی نکرده است. همچنین با مقایسه نتایج شکل‌های ۴ و ۱۰ می‌توان دید که تأثیر نانوسیلیس بر افزایش مقاومت خمشی نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف کمتر از تأثیر آن بر افزایش مقاومت فشاری بوده است.

شکل ۱۱ نتایج آزمون استحکام خمشی در طرح‌های اختلاط حاوی ۰/۲٪ الیاف در اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس را نمایش می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود؛ استحکام خمشی سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه طرح حاوی ۳٪ نانوسیلیس دارای مقداری بیشینه می‌باشد.



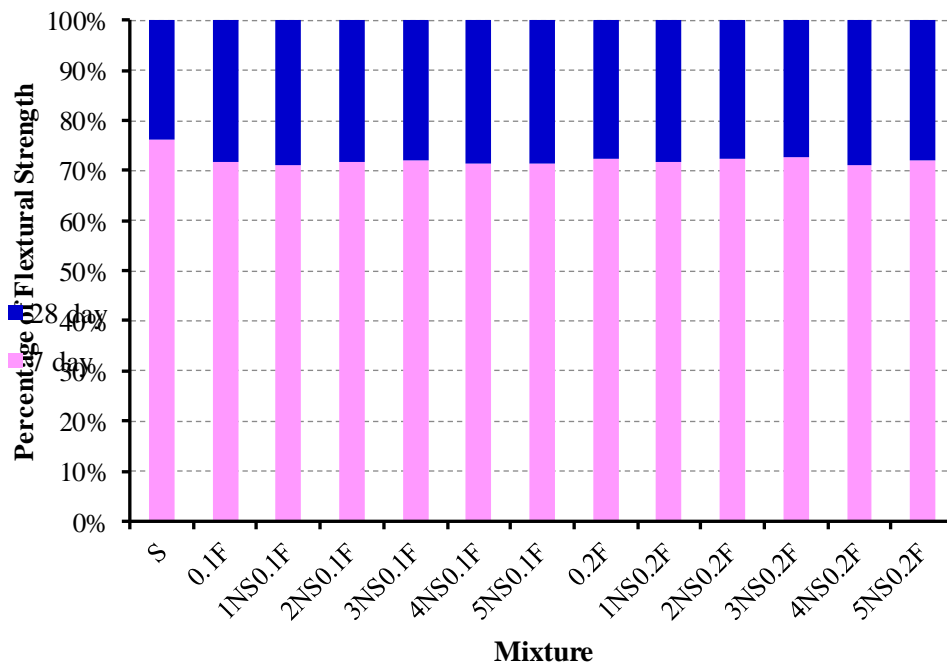
شکل ۱۱: مقاومت خمشی سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ۰/۲٪ الیاف با درصد‌های متفاوت نانوسیلیس.

بر طبق شکل ۱۱، استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۴۸٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۵۵٪ افزایش نشان می‌دهد. همچنین وجود نانوذرات خاصیت تقویت‌کنندگی الیاف را بهبود بخشیده است؛ به طوری که استحکام خمشی ۷ روزه و همچنین ۲۸ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح حاوی فقط ۰/۲٪ الیاف حدود ۱۱٪ افزایش نشان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت خمشی ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف با افزایش زمان عمل‌آوری ثابت بوده است. همچنین تأثیر افزودن ۳٪ نانوسیلیس بر افزایش مقاومت خمشی ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف تقریباً مشابه با تأثیر آن بر ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف بوده است ولیکن مقاومت خمشی ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس بیشتر از ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس می‌باشد.

همچنین نتایج حاکی از آن است که در طرح‌های اختلاط حاوی الیاف برای رسیدن به مقدار بهینه مقاومت خمشی بایستی از مقدار نانومواد (نانوسیلیس) بیشتری نسبت به طرح‌های فاقد الیاف استفاده نمود که این موضوع در توافقی با نتایج حاصل از استحکام فشاری

طرح‌های مختلف می‌باشد. این موضوع حاکی از آن است که جهت بهبود پیوند ماتریس و الیاف و برای ارتقای خواص مکانیکی به منظور استفاده از پتانسیل مسلح‌کنندگی الیاف در کامپوزیت‌های سیمانی بایستی از نانوذرات بیشتری استفاده نمود. ورود الیاف به داخل ملات ممکن است منافذ بیشتری را در فصل مشترک الیاف و ماتریس به وجود آورد که نانوذرات بیشتری با قرارگیری در داخل آنها، باعث کم شدن منافذ و افزایش استحکام فشاری و خمشی می‌شوند.

روند کسب مقاومت خمشی در طرح‌های اختلاط حاوی درصد‌های مختلف نانوذرات سیلیس و الیاف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر طبق شکل مشخص است که طرح‌های نشان داده شده از لحاظ کسب مقاومت خمشی در سنین مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند که از این لحاظ مشابه با نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس به صورت نشان داده شده در نمودار شکل ۹ می‌باشند و به صورت متوسط در سن ۷ روز تا ۷۱٪ مقاومت خمشی نهایی خود را کسب نموده‌اند که نسبت به نمونه شاهد (۷۶٪) و همچنین نمونه‌های فاقد الیاف حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس کمتر است. بنابراین به طور کلی در مقایسه با نتایج مربوط به کسب مقاومت فشاری در سنین مختلف دیده می‌شود که نمونه‌های متفاوت در سنین اولیه (تا ۷ روز) درصد مقاومت خمشی بیشتری را نسبت به مقاومت فشاری کسب نموده‌اند.



شکل ۱۲: درصد مقاومت خمشی کسب شده در سنین ۷ روز و ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی ۱/۰٪ و ۲/۰٪ الیاف و با درصد‌های مختلف نانوسیلیس.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی اثر نانو سیلیس بر روی مقاومت فشاری و خمشی ملات‌های فاقد الیاف و همچنین ملات‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن پرداخته شد و نتایج بدین صورت حاصل گردید:

- افزودن نانو SiO_2 تا ۲ درصد موجب افزایش استحکام فشاری و خمشی طرح‌های اختلاط فاقد الیاف گردید و پس از آن استحکام کاهش یافت ولیکن برای طرح‌های اختلاط حاوی الیاف برای رسیدن به مقدار بهینه مقاومت فشاری و خمشی بایستی از مقدار نانوسیلیس بیشتری (۳ درصد) نسبت به طرح‌های فاقد الیاف استفاده نمود.
- نانوسیلیس به عنوان پوزولان و ماده پرکننده نقش مثبت و مؤثری در بهبود خواص ملات دارد.
- تأثیر افزودن الیاف بر افزایش استحکام خمشی بیشتر از تأثیر آن بر افزایش استحکام فشاری می‌باشد که ناشی از ضعیف بودن استحکام کششی ملات‌های معمولی و تأثیر زیاد الیاف بر افزایش استحکام کششی و در پی آن مقاومت خمشی ملات است. استحکام خمشی ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۴۸٪ و استحکام خمشی ۲۸ روزه آن حدود ۵۵٪ افزایش نشان داد، در حالیکه مقاومت فشاری ۷ روزه این نمونه (3NS0.2F) نسبت به طرح شاهد حدود ۳۳٪ و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۵۱٪ افزایش نشان داد.
- مقاومت فشاری ملات حاوی ۰/۲٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس کمتر از ملات حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس می‌باشد که حاکی از آن است که افزایش بیش از مقدار بهینه الیاف موجب افت استحکام فشاری می‌شود. استحکام فشاری ۷ روزه نمونه حاوی ۰/۱٪ الیاف و ۳٪ نانوسیلیس نسبت به طرح شاهد حدود ۵۱٪ و استحکام فشاری ۲۸ روزه آن حدود ۶۱٪ افزایش نشان داد.
- اضافه کردن نانومواد بر افزایش استحکام فشاری مؤثرتر نسبت به افزایش استحکام خمشی بوده است که این موضوع می‌تواند به کاهش در تخلخل کلی و ایجاد ریزساختاری با منافذ کوچکتر در ملات‌های حاوی نانوذرات نسبت داده شود که بر استحکام فشاری تأثیر بیشتری دارند.
- خاصیت پرکنندگی نانوسیلیس باعث می‌شود تا جایی که خلل و فرج ملات پر نشده باشد، افزایش نانومواد موجب افزایش استحکام فشاری و خمشی گردد، ولی زمانی که مقدار نانوذرات بیش از حد در مخلوط افزایش یافته و از مقدار بهینه بیشتر می‌شود، موجب کاهش استحکام خواهد شد. بنابراین به دلیل وجود منافذ بین الیاف و ماتریس، طرح‌های حاوی الیاف به مقدار بیشتری نانوذره جهت دستیابی به استحکام بهینه نسبت به طرح‌های فاقد الیاف نیاز دارند.
- استفاده از نانوذرات به جای سیمان در تولید ملات و بتن موجب خواهد شد تا از یک سو طول عمر سازه‌های بتنی افزایش یابد و از سوی دیگر کاهش مصرف و تقاضای سیمان، کاهش آلودگی زیست‌محیطی را به دنبال دارد.

مراجع

- [1] Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J. and Tighe, S. L. (2014). State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (10), 940-949.
- [2] Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A. and Fraternali, F. (2015). Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80, 200-209.
- [3] Hanif, I. M., Syuhaili, M. R. N., Hasmori, M. F. and Shahmi, S. M. (2017). Effect of nylon fiber on mechanical properties of cement based mortar, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Ed., IOP Publishing.
- [4] Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H. and Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (1), 351-358.
- [5] Sanjuán, M. A. and Moragues, A. (1997). Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: Optimization to control plastic shrinkage. *Composites Science and Technology*, 57 (6), 655-660.
- [6] Gopalakrishnan, K., Birgisson, B., Taylor, P. and Atttoh-Okine, N. O. (2011). *Nanotechnology in Civil Infrastructure*, Berlin: Springer-Verlag.

- [7] Li, H., Xiao, H.-g., Yuan, J. and Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35 (2), 185-189.
- [8] Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M. and Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, 47, 1069-1077.
- [9] Yu, R., Spiesz, P. and Brouwers, H. J. H. (2014). Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, 65, 140-150.
- [10] Shah, S. P., Hou, P. and Konsta-Gdoutos, M. S. (2016). Nano-modification of cementitious material: toward a stronger and durable concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 5 (1-2), 1-22.
- [11] Norhasri, M. S. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91-97.
- [12] Jo, B.-W., Kim, C.-H., Tae, G.-h. and Park, J.-B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1351-1355.
- [13] Madandoust, R., Mohseni, E., Mousavi, S. Y. and Namnevis, M. (2015). An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO. *Construction and Building Materials*, 86, 44-50.
- [14] Hakamy, A., Shaikh, F. U. A. and Low, I. M. (2014). Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay–cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 50, 27-35.
- [15] American Association State. (2008). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, in *ASTM C109*, Ed., ASTM International.
- [16] Zahedi, M., Ramezaniapour, A. A. and Ramezaniapour, A. M. (2015). Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, 78, 354-361.
- [17] American Association State. (2006). Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, in *ASTM C305*, Ed., ASTM International.
- [18] Du, H., Du, S. and Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, 705-712.
- [19] Sadrmtomtazi, A. and Tahmouresi, B. (2018). Assessment of aggregates- cement paste border in concretes containing silica fume and fly ash. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4, 136-154.
- [20] Li, H., Zhang, M.-h. and Ou, J.-p. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260 (11), 1262-1266.
- [21] Sadrmtomtazi, A., Fasihi, A. and Hagi, A. K. (2009). Effect of polypropylene fibers on mechanical and physical properties of mortars containing nano-SiO₂, in *3rd International Conference on Concrete & Development*, Ed., pp. 1163-1172.
- [22] Mohammadi, Y. and Seifollahi, F. (2017). Effects of nano-silica and polypropylene fibers on mechanical properties and durability of normal and lightweight concretes. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 17.
- [23] Chen, X., Wu, S. and Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874.