

The effect of nanosilica on the mechanical properties of cementitious composites containing polypropylene fibers

Moosa Mazloom^{1*}, Sarina Norouzi², Mohammad Akbari Jamkarani²

1- Faculty of Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Master of Science in Structural Engineering, Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the effects of adding nanosilica and microsilica on the mechanical properties of cementitious composites containing polypropylene fibers. For this purpose, 13 composite mixes with the water to cement ratio of 0.28 were considered. One mix without microsilica and nanosilica, 4 mixtures with 0.5%, 1%, 3% and 5% nanosilica replacement levels, 4 mixes with 5%, 7%, 10%, 15% of microsilica, and 4 mixtures with the combination of microsilica and nanosilica were investigated. According to the results of the experiments, the composite samples containing microsilica and nanosilica had better results than the samples containing only one of these particles. In fact, the results of 28-day tests showed that the combination of 10% microsilica and 1% nanosilica produced the best cementitious composite according to compressive, tensile and flexural tests.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 August 2019

Revise Date: 23 February 2020

Accept Date: 07 March 2020

Keywords:

Microsilica,
Cementitious composite,
Fiber,
Nanosilica,
Polypropylene

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.199749.1936>

*Corresponding author: Moosa Mazloom

Email address: mazloom@sru.ac.ir

بررسی تاثیر نانوسیلیس بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت های سیمانی حاوی الیاف پلی پروپیلن

موسی مظلوم^{*}، سارینا نوروزی^۲، محمد اکبری جمکرانی^۱

۱- هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت های سیمانی حاوی الیاف پلی پروپیلن است. بدین منظور، آزمایش هایی دربرگیرنده ی ۱۳ طرح مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۸ مد نظر قرار گرفتند. یک طرح بدون میکروسیلیس و نانوسیلیس، ۴ طرح با درصد نانوسیلیس جایگزین سیمان ۰/۵٪، ۱٪، ۳٪، ۵٪، ۴ طرح با درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان ۵٪، ۷٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۴ طرح با ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس در نظر گرفته شد. طبق نتایج آزمایش، نمونه های ترکیبی دارای میکروسیلیس و نانوسیلیس، نتیجه ی بهتری نسبت به نمونه های حاوی ذرات نانوسیلیس یا میکروسیلیس به تنهایی داشتند. در واقع، نتایج آزمایش های ۲۸ روزه نشان داد که ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس بهترین نتیجه را در مقاومت های فشاری و کششی و خمشی این کامپوزیت ایجاد کرد.

کلمات کلیدی: میکروسیلیس، کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف، نانوسیلیس، پلی پروپیلن

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------------------------|---|--------------|---------------|------------|------------------------------------|------------|
| doi: | https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.199749.1936 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2020.199749.1936 | ۱۴۰۰/۰۳/۳۰ | ۱۳۹۸/۱۲/۱۷ | ۱۳۹۸/۱۲/۱۷ | ۱۳۹۸/۱۲/۰۴ | ۱۳۹۸/۰۶/۰۸ |
| موسی مظلوم mazloom@sr.u.ac.ir | | | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

مالات‌های سیمانی و بتنی محبوب‌ترین مصالح ساختمانی هستند، همچنین تولید آن‌ها روز به روز افزایش می‌یابد، اما هنوز برخی مضرات ناشی از ماهیت این مواد مانند مقاومت کششی پایین وجود دارد. در سال‌های اخیر، استفاده از بتن سبک وزن به طور گسترده در سراسر جهان رو به افزایش است. بنابراین مطالعات زیادی بر روی این نوع بتن‌ها انجام گرفته است [۱-۳]. افزودنی‌های جدید و افزودنی‌های محلول، راه‌حل بهبود بسیاری از ویژگی‌ها و غلبه بر برخی از معایب بتن‌ها هستند. موادی که توجه محققان را به خود جلب می‌کنند، آن‌هایی هستند که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی، قادر هستند مواد جدید را با عملکردهای جدید، مانند پلیمرها و مواد نانو، تولید کنند. استفاده از پلیمر به بهبود دوام و خواص مکانیکی (به ویژه مقاومت خمشی و کششی) کامپوزیت سیمانی کمک می‌کند. با این حال، Ukowski و Czarnecki [۴] و Ramachandran [۵] گزارش می‌دهند که اثر پلیمر بر مقاومت فشاری اکثراً کم و یا حتی منفی است. در گذشته، بسیاری از محققان تلاش کردند تا نقش مواد سیمانی مکمل دیگر را در بتن بررسی کنند. محصولات جانبی مانند خاکستر بادی، فوم سیلیس و سرباره به طور کلی در بتن استفاده می‌شوند. [۶، ۷] با این حال، در میان این مواد، میکروسیلیس که همچنین فوم سیلیس نامیده می‌شود، یکی از پوزولان‌های محبوب در مقیاس میکرو می‌باشد [۸]. علاوه بر این، در سال‌های اخیر، فن‌آوری بتن مدرن، منجر به استفاده از ذرات مقیاس نانو در تحقیقات بتن شده است [۹، ۱۰]. این ذرات دارای اثرات مهمی بر روی خواص کامپوزیت‌های مبتنی بر سیمان به خاطر اندازه‌های ریز، خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها هستند [۱۱-۱۳].

یکی از بیشترین مواد مورد استفاده و تعیین شده از مواد نانو سایز سیمانی، نانوسیلیس است. در بازارهای جهانی معمولاً نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس خیلی گران است. نانو سیلیس نسبت به سیمان به مراتب گرانتر است ولی با توجه به افزایش مقاومت حاصل، از نظر اقتصادی قابل توجیه است. Horszczaruk و همکاران [۱۴-۱۵] گزارش دادند که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری کلی بتن سخت شده، به دلیل خاصیت پوزولانی می‌شود، که فازهای هیدراته‌ی ریزتر (ژل C S H) و ریز ساختار متراکم را نتیجه می‌دهد. Quercia و سایرین [۱۶] به همراه مطالعات قبلی انجام شده توسط Horszczaruk و سایرین [۱۴-۱۵] نشان داده‌اند که حضور نانوذرات سیلیس در فشرده‌سازی ناحیه انتقال سطحی^۲ و بهبود مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۲۷٪ و ۸٪ است. با وجود ویژگی‌های جالب و کاربرد بالا، ترکیب نانوسیلیس قوام کامپوزیت‌های سیمانی را کم می‌کند. زیرا تقاضای آب نانو ذرات (اثر بالای مساحت سطح به نسبت حجمی نانوسیلیس) زیاد است. اگر چه تعداد نشریات اختصاص داده شده به تاثیر نانوسیلیس بر روی خواص کامپوزیت سیمانی در طول دهه گذشته افزایش یافته است، اما زمینه کامپوزیت‌های پلیمری - سیمانی^۳ همچنان مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، این مقاله با کاربرد بالقوه و تاثیر نانوسیلیس بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت سیمانی سر و کار دارد [۱۷]. اصلاح بتن با استفاده از مواد پلیمری از ۴ دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور کلی، تقویت مصالح ساختمانی شکننده با الیاف شناخته شده است؛ به عنوان مثال قرار دادن نی در گل و لای دیوارهای خانه‌ها یا ملات تقویت کننده با استفاده از موی حیوانات و غیره در دوره باستان قابل ذکرند. الیاف مصنوعی مانند پلی وینیل الکل^۴، پلی پروپیلن، پلی اتیلن^۵، پلی آمیدها^۵ امروزه برای تقویت بتن استفاده می‌شوند [۱۸-۲۰]. در این تحقیق، تاثیر نانوسیلیس بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری - سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است.

^۲ NSiO₂^۳ Interfacial transition zone (ITZ)^۵ Polymer cement composites (PCC)^۱ Polyvinyl alcohol^۲ Polyethylene^۳ Polyamide

۲- مواد و روش اختلاط

۲-۱- مصالح

در این مطالعه، از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان تهران، ماسه ی سیلیسی با بیشینه قطر ۰/۳ میلی متر، عبوری از الک نمره ۵۰، میکروسیلیس طبق استاندارد ASTM C1240 با قطر متوسط ۰/۱ میکرون، نانو سیلیس از نوع آمورف کلئیدی با غلظت ۳۵٪ تولیدی شرکت Chems آلمان می باشد. الیاف استفاده شده پلی پروپیلن بود که مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح، به ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی مصالح

| خصوصیت | الیاف پلی پروپیلن | میکروسیلیس | فوق روان کننده (Dezobuild D10) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------|---|
| چگالی حجمی | ۲۳ Kg/m ³ | ۲۵۰ gr/cm ³ | ۱/±۱ (کیلوگرم بر لیتر) در دمای ۲۰°C ۰/۰۲ |
| سختی | - | - | - |
| دانه ها | - | - | - |
| رنگ | - | کروی و غیر کریستاله (آمورف) | قهوه ای تیره |
| حالت فیزیکی | - | خاکستری روشن | مایع |
| قطر (μm) | ۹۱۰ | پودر پوزولان | - |
| طول (mm) | ۱۲ | - | - |
| نقطه ی ذوب (°C) | ۱۶۵ | - | - |
| مدول الاستیسیته (Gpa) | ۱۰ | - | - |
| مقاومت کششی (MPa) | ۴۰۰ | - | - |
| کلراید (PPM) | - | - | حداکثر ۵۰۰ |
| طبیعت یونی | - | - | آنیونی |
| ترکیب شیمیایی | - | - | کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید |

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس و ماسه سیلیسی

| ترکیب | سیمان (%) | میکروسیلیس (%) | ماسه سیلیسی (%) |
|--------------------------------|-----------|----------------|-----------------|
| SiO ₂ | ۲۱/۳۰ | ۹۶/۴ | ۹۸/۱ |
| CaO | ۶۳/۴۸ | ۰/۴۹ | ۰/۰۶ |
| Al ₂ O ₃ | ۵/۱۳ | ۱/۳۲ | ۱/۱ |
| Fe ₂ O ₃ | ۳/۴۷ | ۰/۸۷ | ۰/۱ |
| Na ₂ O | ۰/۲۳ | ۰/۳۱ | ۰/۵ |
| MgO | ۲/۵۱ | ۰/۹۷ | - |
| P ₂ O ₅ | - | ۰/۱۶ | - |
| SO ₃ | ۱/۶۷ | ۰/۱۰ | - |
| K ₂ O | ۰/۵۶ | ۱/۰۱ | ۰/۵ |
| SiC | - | ۰/۵ | - |
| C | - | ۰/۳ | - |
| CL | - | ۰/۰۴ | - |
| H ₂ O | - | ۰/۰۸ | - |

۲-۲- ساخت نمونه ها

در ابتدا ماسه سیلیسی به همراه کل الیاف داخل میکسر به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس مواد از ریز دانه به درشت دانه (میکروسیلیس-سیمان) اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه چرخیدند. در نهایت آب و روان کننده اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. سپس کامپوزیت سیمانی تازه را داخل قالب ها ریخته و در دمای مناسب نگهداری شدند. مانند تحقیقات قبلی بعد از ۱ روز قالب ها باز شده و برای مدت ۲۷ روز عمل آوری شده و آماده آزمایش شدند [۲۱-۲۲]. طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ساخته شده در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. مواد تشکیل دهنده طرح مخلوط سیمان پرتلند، میکروسیلیس، ماسه سیلیسی، ابر روان کننده و الیاف پلی پروپیلن در ۲ درصد حجمی به کار رفته است. مشخصات شیمیایی سیمان و ماسه سیلیسی در جدول ۲، همچنین جدول ۴ تعداد نمونه ها را نشان داده شده است.

جدول ۳: طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف پلی پروپیلن (kg/m^3)

| شماره | نام طرح | الیاف | | آب | نانوسیلیس | | میکروسیلیس | | ماسه سیلیسی | سیمان | روان کننده |
|-------|---------|-------|--------|-----|-----------|-------|------------|-------|-------------|--------|------------|
| | | درصد | مقدار | | درصد | مقدار | درصد | مقدار | | | |
| ۰ | N0M0 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۵۹۷/۵ | ۱۱۳۵/۵ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۲ | N0M15 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰ | ۰ | ۱۵ | ۱۷۰/۳ | ۵۹۷/۵ | ۹۶۵ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۳ | N0M10 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰ | ۰ | ۱۰ | ۱۱۳/۵ | ۵۹۷/۵ | ۱۰۲۲ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۴ | N0M7 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰ | ۰ | ۷ | ۷۹/۴۷ | ۵۹۷/۵ | ۱۰۵۶ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۵ | N0M5 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰ | ۰ | ۵ | ۵۶/۷۶ | ۵۹۷/۵ | ۱۰۷۸ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۶ | N0.5M0 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰/۵ | ۱۶/۲۲ | ۰ | ۰ | ۵۹۷/۵ | ۱۱۱۹ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۷ | N1M0 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۱ | ۳۲/۴۳ | ۰ | ۰ | ۵۹۷/۵ | ۱۱۰۳ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۸ | N3M0 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۳ | ۹۷/۳۱ | ۰ | ۰ | ۵۹۷/۵ | ۱۰۳۸ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۹ | N5M0 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۵ | ۱۶۲/۲ | ۰ | ۰ | ۵۹۷/۵ | ۹۷۳/۱ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۱۰ | N0.5M15 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۰/۵ | ۱۶/۲۲ | ۱۵ | ۱۷۰/۳ | ۵۹۷/۵ | ۹۴۸/۷ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۱۱ | N1M10 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۱ | ۳۲/۴۳ | ۱۰ | ۱۱۳/۵ | ۵۹۷/۵ | ۹۸۹/۳ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۱۲ | N3M7 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۳ | ۹۷/۳۱ | ۷ | ۹۰/۸۲ | ۵۹۷/۵ | ۹۴۷/۱ | ۲۹/۸۷۵ |
| ۱۲ | N5M5 | ۲ | ۲۱/۷۴۹ | ۳۱۸ | ۵ | ۱۶۲/۲ | ۵ | ۶۸/۱۲ | ۵۹۷/۵ | ۹۰۵ | ۲۹/۸۷۵ |

جدول ۴: تعداد نمونه های هر آزمایش

| تعداد | آزمایش |
|-------|---------------|
| ۳ | مقاومت فشاری |
| ۳ | مقاومت کششی |
| ۳ | خمش ۴ نقطه ای |

۲-۳- آزمايش ها و روش انجام آنها

با توجه به آنکه در این طرح تاثیر این مواد بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی مد نظر بوده است، لذا با توجه به آیین نامه‌های مربوطه که در بخش‌های بعدی ذکر شده است، آزمایش‌های مقاومت فشاری کششی و خمشی انتخاب شده‌اند.

۱-۲-۳- آزمايش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد BS استفاده شد. همچنین نرخ بارگذاری مطابق با آیین نامه ی BS1881 و تحقیقات قبلی برابر $0.3/0$ مگاپاسکال بر ثانیه بود [۲۳-۲۵]. دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: دستگاه آزمايش مقاومت فشاری

۲-۳-۲- آزمايش مقاومت کششی

آزمایش انجام شده بر روی نمونه‌ها برای تعیین مقاومت کششی آزمایش کشش غیر مستقیم (برزلی) بود؛ نمونه‌های مورد استفاده برای این آزمایش استوانه‌هایی به ابعاد 10×20 سانتی متر مطابق استاندارد BS1881 می باشد. همچنین نرخ بارگذاری مطابق با آیین نامه BS1881 برابر $0.2/0$ مگاپاسکال بر ثانیه بوده است.

۲-۳-۲- آزمايش مقاومت خمشی ۴ نقطه ای

آزمایش مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای بر روی نمونه‌های $35 \times 10 \times 10$ سانتی متری مطابق شکل ۲ منطبق بر استاندارد ASTM C1609 و تحقیقات قبلی صورت گرفته است [۲۶-۲۸]. همچنین نرخ سرعت بارگذاری 0.5 میلی متر بر دقیقه بوده است.



شکل ۲: دستگاه zwick roell

۲-۳-۴- تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی که به آن Scanning Electron Microscope یا به اختصار SEM می گویند. یکی از تجهیزات استراتژیک در جهت پیشبرد، تحلیل و بررسی تحقیقات به خصوص در حوزه فناوری نانو است؛ که با کمک بمباران الکترونی تصاویر اجسامی به کوچکی ۱۰ نانومتر را برای مطالعه تهیه می کند. با توجه به گسترش پروژه های تحقیقاتی و صنعتی در زمینه نانو و نیاز روز افزون به استفاده از تجهیزاتی برای بررسی و تحلیل آن ها، میکروسکوپ های الکترونی به عنوان یکی از اساسی ترین دستگاه های تشخیص از اهمیت ویژه ای برخوردارند.

۳- نتایج

نتایج آزمون های مقاومت کششی و فشاری و خمشی در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج آزمون‌های مقاومت کششی و فشاری و خمشی

| شماره | نام طرح | مقاومت | | مقاومت خمشی |
|-------|---------|-------------|------------|-------------|
| | | فشاری (MPa) | کششی (MPa) | (MPa) |
| ۰ | N0M0 | ۴۲/۳۸ | ۳/۲۰۲ | ۵/۳۴۷ |
| ۱ | N0M15 | ۵۸/۸۳ | ۳/۹۰۵ | ۶/۰۵ |
| ۲ | N0M10 | ۵۱/۶۴ | ۳/۷۲ | ۵/۸۶۵ |
| ۳ | N0M7 | ۴۸/۲۷ | ۳/۵۸۵ | ۵/۷۳ |
| ۴ | N0M5 | ۴۴/۵۶ | ۳/۳۸۵ | ۵/۵۳ |
| ۵ | N0.5M0 | ۴۵/۹۸ | ۳/۴۵۴ | ۵/۵۹۹ |
| ۶ | N1M0 | ۴۷/۵۷ | ۳/۵۴ | ۵/۶۸۵ |
| ۷ | N3M0 | ۵۵/۳ | ۳/۶۹۷ | ۵/۸۴۲ |
| ۸ | N5M0 | ۳۷/۴۱ | ۳/۳۹۶ | ۵/۵۴۱ |
| ۹ | N0.5M15 | ۵۴/۲۳ | ۳/۰۳۱ | ۶/۱۷۶ |
| ۱۰ | N1M10 | ۶۱/۳۲ | ۴/۳۱۹ | ۶/۹۷۱ |
| ۱۱ | N3M7 | ۴۵/۲۷ | ۳/۴۴۹ | ۵/۵۹۴ |
| ۱۲ | N5M5 | ۳۵/۲۴ | ۲/۵۷۶ | ۴/۷۲۱ |

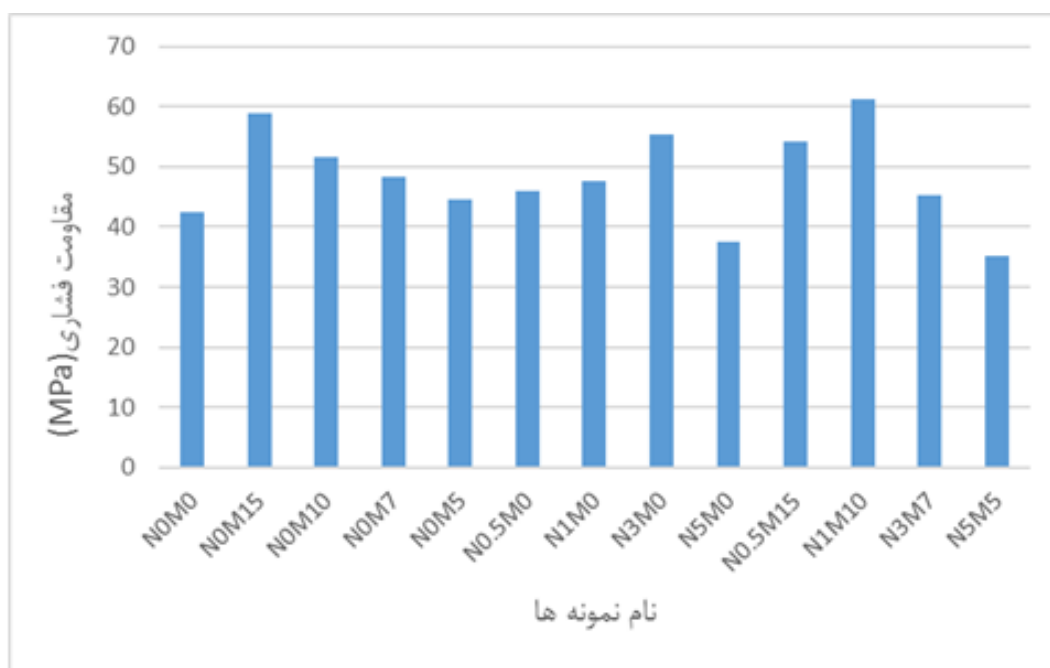
۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری به عنوان یکی از مهمترین ویژگی‌های بتن سخت شده برای طبقه بندی در آیین نامه‌های بین المللی می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برای نمونه‌های مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر بر اساس آیین نامه BS 1881 انجام شد. مانند تحقیقات قبلی در هر سن ۳ نمونه برای هر اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت [۲۹-۳۰] و میانگین این سه عدد در گزارش آمده است. نتایج حاصل از مقاومت فشاری در نمودار شکل ۳ و همینطور در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶: نتایج و درصد تغییرات مقاومت

| شماره | نام طرح | فشاری | |
|-------|---------|-----------------------|-----------------|
| | | مقاومت فشاری (MPa) | درصد تغییرات |
| ۰ | NOM0 | ۴۲/۳۸ | ۰ |
| ۱ | NOM15 | ۵۸/۸۳ | ۳۸/۸۱ |
| ۲ | NOM10 | ۵۱/۶۴ | ۲۱/۸۴ |
| ۳ | NOM7 | ۴۸/۲۷ | ۱۳/۸۹ |
| ۴ | NOM5 | ۴۴/۵۶ | ۵/۱۴ |
| ۵ | N0.5M0 | ۴۵/۹۸ | ۸/۴۹ |
| ۶ | N1M0 | ۴۷/۵۷ | ۱۲/۳۴ |
| ۷ | N3M0 | ۵۵/۳ | ۳۰/۴۸ |
| ۸ | N5M0 | ۳۷/۴۱ | -۱۱/۷۲ |
| ۹ | N0.5M15 | ۵۴/۲۳ | ۲۷/۹۶ |
| ۱۰ | N1M10 | ۶۱/۳۲ | ۴۴/۶۹ |
| ۱۱ | N3M7 | ۴۵/۲۷ | ۶/۸۱ |
| ۱۲ | N5M5 | ۳۵/۲۴ | -۱۶/۸۴ |



شکل ۳: نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری مشاهده شده است که در سن ۲۸ روز مقاومت نمونه شاهد ۴۲/۳۸ مگاپاسکال بوده است. در نمونه های بدون نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر، نمونه های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را دارند که به مقدار ۵۸/۸۳ مگاپاسکال و ۳۸/۸۱ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود داشته است. از طرفی در نمونه های بدون میکروسیلیس و نانوسیلیس متغیر، نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس دارای بالاترین مقاومت بوده است که به مقدار ۵۵/۳ مگاپاسکال و ۴۸/۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود داشته است. در نمونه های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر به صورت همزمان، نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس نتیجه ی بهتری نسبت به سایر نمونه ها داشت. مقاومت فشاری این کامپوزیت سیمانی ۶۱/۳۲ مگاپاسکال بوده و ۴۴/۶۹ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود داشته است. با توجه به جدول نتایج، در نمونه ی حاوی ۵ درصد نانوسیلیس و میکروسیلیس ۰ درصد نتیجه ی بدتری نسبت به نمونه ی شاهد گرفته شده است. مقاومت فشاری ۳۷/۴۱ مگاپاسکال و درصد تغییرات نسبت به نمونه ی شاهد ۱۱/۷۲- بوده است. همچنین در نمونه های ترکیبی میکروسیلیس و نانوسیلیس، کامپوزیت سیمانی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد نانوسیلیس با کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه ی شاهد مواجه شده است. مقاومت فشاری این نمونه ۳۵/۲۴ مگاپاسکال و درصد تغییرات نسبت به نمونه ی شاهد ۱۶/۸۴- درصد بوده است.

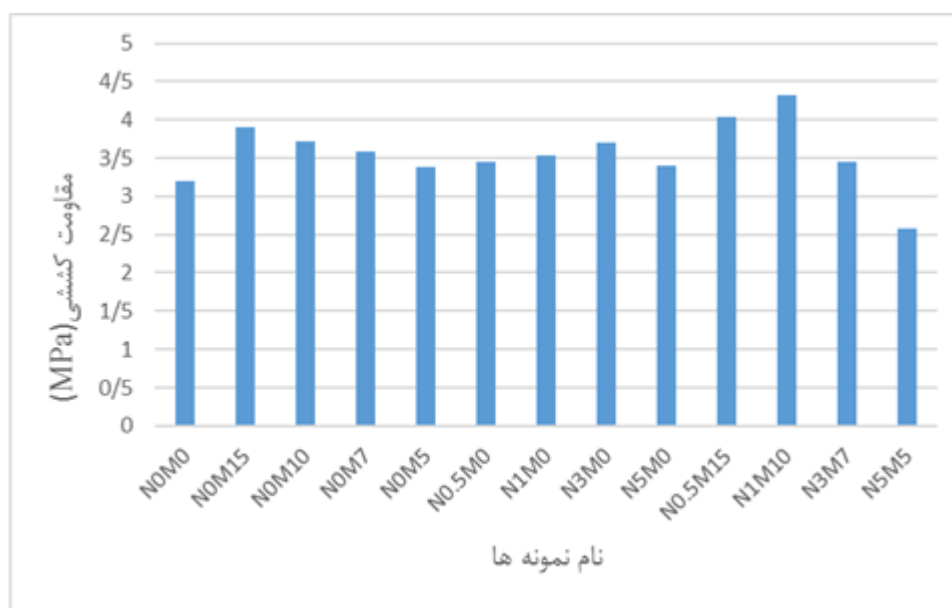
به عبارتی وجود میکروسیلیس با هر درصدی، منجر به بهبود مقاومت فشاری شده است که به علت خاصیت پوزولانی بالای این ماده می باشد. همچنین نمونه های دارای نانوسیلیس دارای مقاومت بالاتر نسبت به نمونه شاهد بودند که البته به دلیل خاصیت پوزولانی این ماده است که هنگام عمل آوری C-S-H بیشتری تولید می کند. در نمونه دارای ۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت افت کرده است که به علت بالا بودن مقدار پوزولان در طرح می باشد. در واقع وقتی مقدار پوزولان از حدی بالاتر رود این پوزولان ها کامل واکنش نداده و باعث افت مقاومت می شوند.

۳-۲- نتایج مقاومت کششی

مقاومت کششی به عنوان یکی از مهمترین ویژگی های بتن سخت شده برای طبقه بندی در آیین نامه های بین المللی بوده است. از طرفی یکی از مهمترین دلایل استفاده از الیاف در کامپوزیت بتنی ضعف کششی آن می باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه برای نمونه های استوانه ای به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی متر انجام شد. در هر سن ۳ نمونه برای هر اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین این سه عدد در گزارش آمده است. نتایج حاصل از مقاومت کششی در نمودار شکل ۴ و همینطور در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷: نتایج و درصد تغییرات مقاومت کششی

| شماره | نام طرح | مقاومت کششی (MPa) | درصد تغییرات |
|-------|---------|-------------------|--------------|
| ۰ | NOM0 | ۳/۲۰۲ | ۰ |
| ۱ | NOM15 | ۳/۹۰۵ | ۲۱/۹۵ |
| ۲ | NOM10 | ۳/۷۲ | ۱۶/۱۷ |
| ۳ | NOM7 | ۳/۵۸۵ | ۱۱/۹۶ |
| ۴ | NOM5 | ۳/۳۸۵ | ۵/۷۱ |
| ۵ | N0.5M0 | ۳/۴۵۴ | ۷/۸۷ |
| ۶ | N1M0 | ۳/۵۴ | ۱۰/۵۵ |
| ۷ | N3M0 | ۳/۶۹۷ | ۱۵/۴۵ |
| ۸ | N5M0 | ۳/۳۹۶ | ۶/۰۵ |
| ۹ | N0.5M15 | ۴/۰۳۱ | ۲۵/۸۹ |
| ۱۰ | N1M10 | ۴/۳۱۹ | ۳۴/۸۸ |
| ۱۱ | N3M7 | ۳/۴۴۹ | ۷/۷۱ |
| ۱۲ | N5M5 | ۲/۵۷۶ | -۱۹/۵۵ |



شکل ۴: نمودار نتایج آزمایش مقاومت کششی

در جدول ۷ و شکل ۴ نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی در سن ۲۸ روز بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش کششی مشاهده شد که در سن ۲۸ روز در نمونه‌های بدون نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر، نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس بیشترین مقاومت را دارند که با مقدار ۳/۹۰۵ مگاپاسکال ۲۱/۹۵ درصد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های بدون میکروسیلیس و درصد نانوسیلیس متغیر، نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس دارای بالاترین مقاومت کششی بوده است، که با مقدار ۳/۶۹۷ مگاپاسکال ۱۵/۴۵ درصد بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر به صورت همزمان، مقاومت بهینه برای نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد

میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس بود که با مقدار ۴/۳۲ مگاپاسکال ۳۴/۸۸ درصد بهبود داشت. نمونه‌ی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد نانوسیلیس با کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌ی شاهد مواجه شده است. این نوع کامپوزیت سیمانی دارای مقاومت کششی ۲/۵۷۶ مگاپاسکال و درصد تغییرات ۱۹/۵۵- درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بوده است.

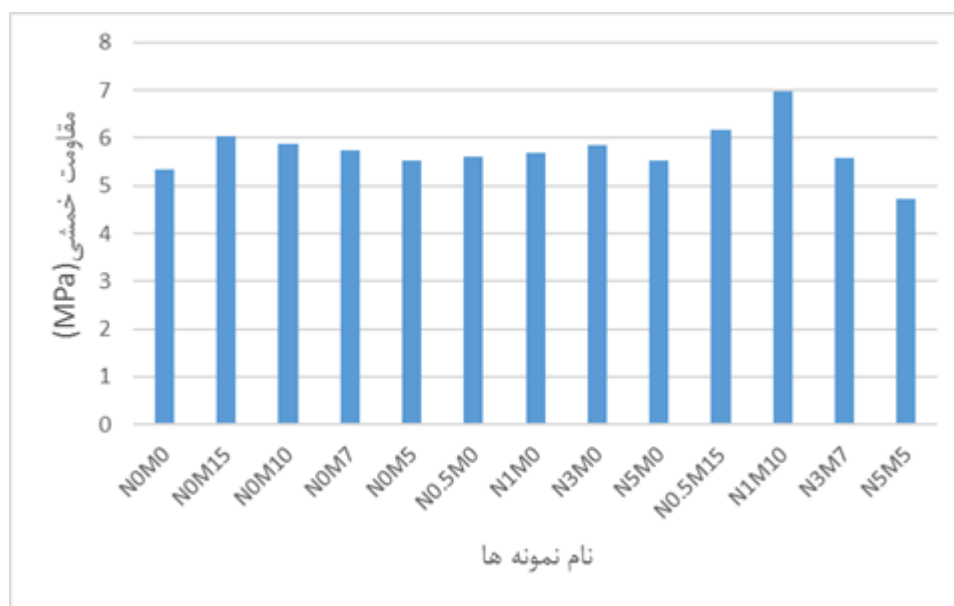
۳-۳- نتایج مربوط به مقاومت خمشی

مقاومت خمشی به عنوان یکی از مهمترین ویژگی‌های بتن سخت شده برای طبقه بندی در آیین نامه‌های بین المللی می‌باشد، و از طرفی یکی از مهمترین دلایل استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی ضغف خمشی آن می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه برای نمونه‌های منشوری به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلی متر انجام شد. در هر سن ۳ نمونه برای هر اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین این سه عدد در گزارش آمده است. نتایج حاصل از مقاومت خمشی در نمودار شکل ۵ و همینطور در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸: نتایج و درصد تغییرات مقاومت خمشی

| شماره | نام طرح | مقاومت خمشی (MPa) | درصد تغییرات |
|-------|---------|-------------------|--------------|
| ۰ | NOM0 | ۵/۳۴۷ | ۰ |
| ۱ | NOM15 | ۶/۰۵ | ۱۳/۱۴ |
| ۲ | NOM10 | ۵/۸۶۵ | ۹/۶۸ |
| ۳ | NOM7 | ۵/۷۲ | ۷/۱۶ |
| ۴ | NOM5 | ۵/۵۳ | ۳/۴۲ |
| ۵ | N0.5M0 | ۵/۵۹۹ | ۴/۷۱ |
| ۶ | N1M0 | ۵/۶۸۵ | ۶/۳۲ |
| ۷ | N3M0 | ۵/۸۴۲ | ۹/۳۵ |
| ۸ | N5M0 | ۵/۵۴۱ | ۳/۶۲ |
| ۹ | N0.5M15 | ۶/۱۷۶ | ۱۵/۵۰ |
| ۱۰ | N1M10 | ۶/۹۷۱ | ۳۰/۳۷ |
| ۱۱ | N3M7 | ۵/۵۹۴ | ۴/۶۱ |
| ۱۲ | N5M5 | ۴/۷۲۱ | -۱۱/۷۰ |



شکل ۵: نمودار نتایج آزمایش مقاومت خمشی

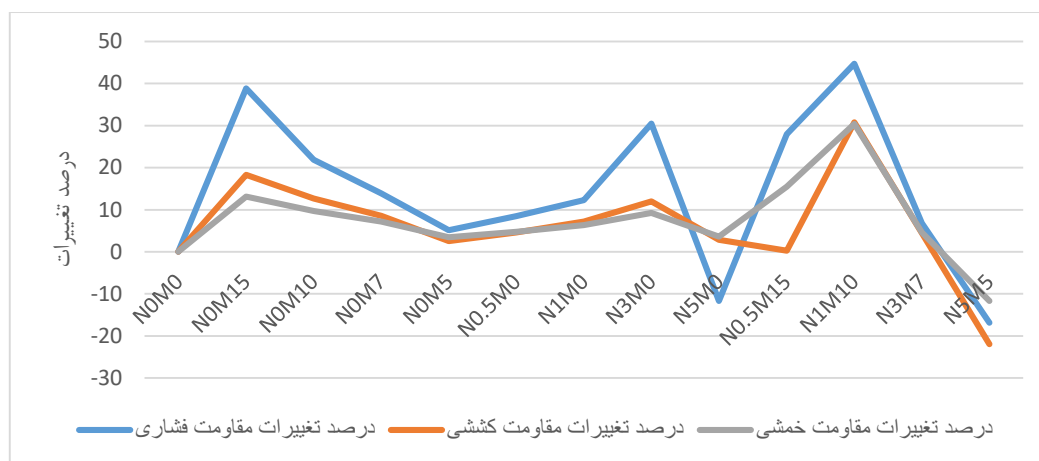
در جدول ۸ و شکل ۵ نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای مشاهده شد که در سن ۲۸ روز در نمونه‌های بدون نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را دارند که با مقدار ۶/۰۵ مگاپاسکال ۱۳/۱۴ درصد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های بدون میکروسیلیس و نانوسیلیس متغیر، نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس دارای بالاترین مقاومت خمشی بوده است، که با مقدار ۵/۸۴۲ مگاپاسکال ۹/۲۵ درصد بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر به صورت همزمان، درصد بهینه مقاومت برای نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس بود که با مقدار ۶/۹۷۱ مگاپاسکال ۳۰/۳۷ درصد بهبود داشت. همچنین نمونه‌ی ترکیبی حاوی ۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد نانوسیلیس کمترین مقاومت خمشی را به خود اختصاص داده است. مقاومت خمشی این کامپوزیت ۴/۷۲۱ مگاپاسکال و درصد تغییرات آن نسبت به نمونه شاهد ۱۱/۴۰- درصد بوده است. نتایج درصد تغییرات نمونه‌ها در نمودار شکل ۶ به صورت همزمان و یک جا نشان داده شده است.

به عبارتی وجود میکروسیلیس با هر درصدی، منجر به بهبود مقاومت کششی و خمشی شده است که به علت خاصیت پوزولانی بالای این ماده می‌باشد. همچنین نمونه‌های دارای نانوسیلیس دارای مقاومت بالاتر نسبت به نمونه شاهد بودند که البته به دلیل خاصیت پوزولانی این ماده است که هنگام عمل آوری C-S-H بیشتری تولید می‌کند. در نمونه دارای ۵ درصد میکروسیلیس و ۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت افت کرده است که به علت بالا بودن مقدار پوزولان در طرح می‌باشد. در واقع وقتی مقدار پوزولان از حدی بالاتر رود این پوزولان‌ها کامل واکنش نداده و باعث افت مقاومت می‌شوند.

Horszczaruk و سایرین [۱۴-۱۵] نشان داده‌اند که حضور نانوذرات سیلیس در فشرده‌سازی ناحیه انتقال سطحی^۳ و بهبود مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۲۷٪ و ۸٪ است.

در مطالعه‌ای مظلوم و همکاران اثر میکروسیلیس را بر بتن سبک خودتراکم بررسی کردند. در نهایت اعلام کردند میکروسیلیس باعث افزایش دوام و بهبود خواص مکانیکی این بتن شده است، همچنین مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۴۳ و ۲۳ درصد بهبود بخشیده است [۳۱].

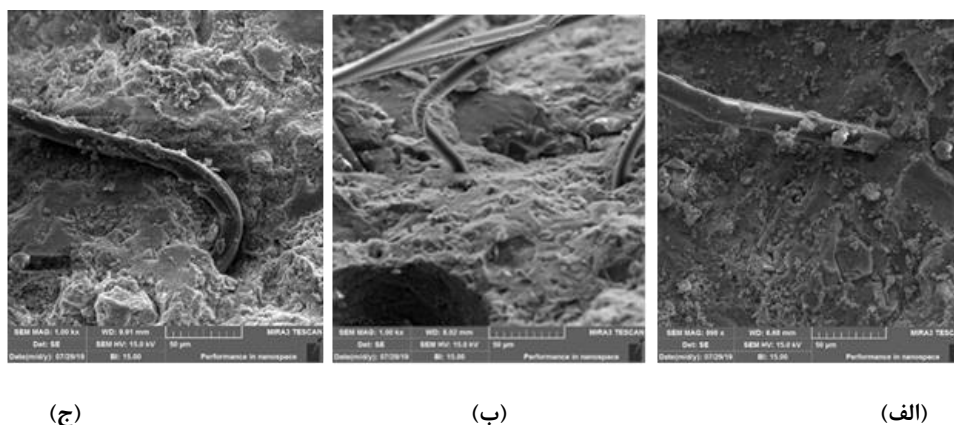
³ Interfacial transition zone (ITZ)



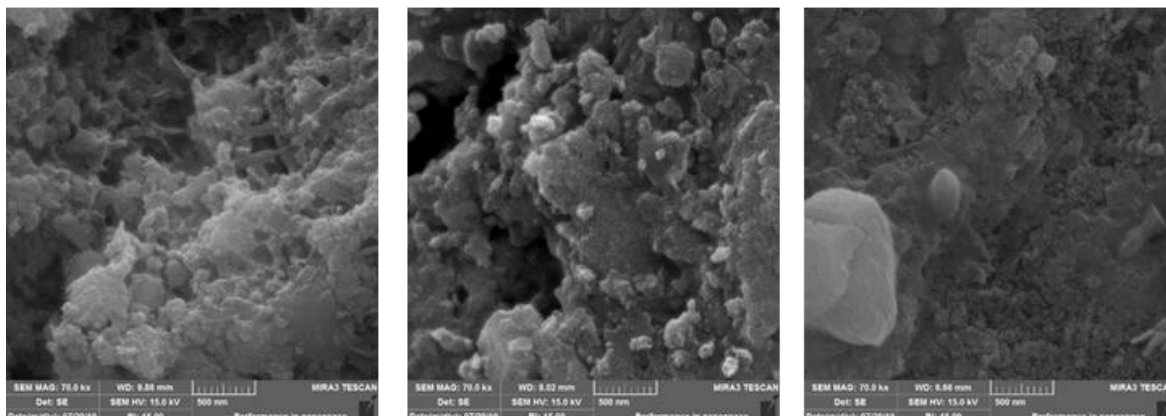
شکل ۶: درصد تغییرات مقاومت فشاری و کششی و خمشی

۳-۴- نتایج مربوط به تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM)

شکل های ۷ و ۸ نتایج تصویر برداری الکترونی را نشان می‌دهند، و شکل ۹ نمونه های آماده شده برای انجام این آزمایش را به تصویر می‌کشد. با توجه به تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی دیده شد که ریزساختار بتن با نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس به مراتب متراکم تر و چگال تر است. همپنین طرح ترکیبی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس متراکم ترین ریز ساختار را داشته است. واضح است که هرچه ریز ساختار بتن متراکم تر و میزان حفرات و فضای خالی بتن کمتر باشد، بتن از مقاومت بالاتری برخوردار است. زیرا که مقاومت بتن را بخش توپر و صلب آن تامین می‌نماید و فضاهای خالی اثر قابل توجهی بر آن دارند. در خمیر سیمان هیدراته شده، فضای بین لایه‌ها و حفرات ریزی که در آن وجود دارند، در ظرفیت مقاومتی آن تاثیر زیادی دارد. زیرا تمرکز تنش و شکست ناشی از آن در اثر اعمال بار از همین حفرات و ترک‌هایی که در خمیر شکل گرفته‌اند آغاز می‌شود. از آنجایی که نمونه‌های بالا با یک نسبت آب به مواد سیمانی واحد و در شرایط مشابه ساخته عمل آوری و آزمایش شده‌اند؛ بنابراین تخلخل و موینگی کمتر را نشانی از افزایش درجه‌ی هیدراتاسیون با استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس دانست. همانطور که پیش از این اشاره شد؛ ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه یکی از پارامترهای مهمی است که بر خواص و رفتار بتن تاثیر می‌گذارد. در کل می‌توان گفت که میکروسیلیس و نانوسیلیس به علت خاصیت پوزولانی و ریزی در واکنش‌ها شرکت می‌کنند و ژل متراکم‌تری را تولید می‌نمایند.



شکل ۷: الف) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس؛ ب) تصویر SEM نمونه حاوی ۳ درصد میکروسیلیس؛ ج) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۸: الف) تصویر SEM با مقیاس ۵۰۰ nm نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس؛ ب) تصویر SEM با مقیاس ۵۰۰ nm نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس؛ ج) تصویر SEM با مقیاس ۵۰۰ nm نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس



شکل ۹: نمونه های آماده شده جهت آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها به صورت خلاصه در زیر آمده است:

- در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس و بدون نانوسیلیس، نمونه‌ی دارای ۱۵ درصد از این ماده بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی را داشته است. مقدار ۵۸/۸۳ مگاپاسکال مقاومت فشاری با ۳۸/۸۱ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد، و مقدار ۳/۹۰۵ مگاپاسکال مقاومت کششی با ۲۱/۹۵ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد، و همچنین مقدار ۶/۰۵ مگاپاسکال مقاومت خمشی با ۱۳/۱۴ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد قابل مشاهده است.

۲. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس متغیر و بدون میکروسیلیس، نمونه‌ی دارای ۳ درصد از این ماده بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی را داشته است. مقدار مقاومت فشاری ۵۵/۳ مگاپاسکال بود که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۳۰/۴۸ درصد افزایش داشت. مقاومت کششی ۳/۶۹۷ مگاپاسکال با ۱۵/۴۵ درصد افزایش و مقاومت خمشی ۵/۸۴۲ مگاپاسکال با ۹/۲۵ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد بدست آمد.
۳. در نمونه‌های ترکیبی حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس متغیر، نمونه‌ی دارای ۱ درصد نانوسیلیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی را دارا می‌باشد. مقدار مقاومت فشاری ۶۱/۳۲ مگاپاسکال با ۴۴/۶۹ درصد افزایش، مقاومت کششی ۴/۳۱۹ مگاپاسکال با ۳۴/۸۸ درصد افزایش، و مقاومت خمشی ۶/۹۷۱ مگاپاسکال با ۳۰/۳۷ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی شاهد است.
۴. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس چگال‌تر و نفوذ ناپذیر تر از نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به تنهایی می‌باشند.
۵. مقدار نانوسیلیس بیشتر از ۳ درصد، هم در نمونه‌های ترکیبی و هم در نمونه‌های بدون میکروسیلیس، نتیجه‌ی منفی نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته است. به عنوان مثال در نمونه‌ی حاوی ۵ درصد نانوسیلیس و بدون میکروسیلیس، مقدار مقاومت فشاری ۳۷/۴۱ مگاپاسکال است و درصد تغییرات نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۱/۷۲- درصد می‌باشد.

مراجع

- [1] Mazloom, M., & Salehi, H. (2018). *The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [2] Salehi, H., & Mazloom, M. (2019). Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 622-632.
- [3] Kaffetzakis, M., & Papanicolaou, C. C. (2016). Lightweight aggregate self-compacting concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology. *Construction and Building Materials*, 123, 254-260.
- [4] Czarnecki, L., & Łukowski, P. (2010). Polymer-cement concretes. *Cement Wapno Beton*, 5, 243-258.
- [5] Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*: William Andrew.
- [6] Elahi, A., Basheer, P., Nanukuttan, S., & Khan, Q. (2010). Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 24(3), 292-299.
- [7] Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. (2015). Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 79, 326-336.
- [8] Mazloom, M., Ramezani-pour, A., & Brooks, J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347-357.
- [9] Li, H., Xiao, H.-g., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- [10] Nazari, A., & Riahi, S. (2010). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), 7663-7672.
- [11] Khaloo, A., Mobini, M. H., & Hosseini, P. (2016). Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 188-201.
- [12] Naniz, O. A., & Mazloom, M. (2018). Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete. *Journal of Building Engineering*, 20, 400-410.
- [13] Naniz, O. A., & Mazloom, M. (2019). Assessment of the influence of micro-and nano-silica on the behavior of self-compacting lightweight concrete using full factorial design. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(1), 57-70.
- [14] Horszczaruk, E., Mijowska, E., Cendrowski, K., Mijowska, S., & Sikora, P. (2013). The influence of nanosilica with different morphology on the mechanical properties of cement mortars. *Cem. Lime Concr*, 1, 24-32.
- [15] Horszczaruk, E., Mijowska, E., Cendrowski, K., & Sikora, P. (2014). Influence of the new method of nanosilica addition on the mechanical properties of cement mortars. *Cement Wapno Beton*, 5, 308-315.
- [16] Quercia, G., Spiesz, P., Hüskén, G., & Brouwers, J. (2012). *Effects of amorphous nano-silica additions on mechanical and durability performance of SCC mixtures*. Paper presented at the Proceedings of the International Congress on Durability of Concrete (ICDC 2012).

- [17] Quercia, G., Spiesz, P., Hüskén, G., & Brouwers, J. (2012). *Effects of amorphous nano-silica additions on mechanical and durability performance of SCC mixtures*. Paper presented at the Proceedings of the International Congress on Durability of Concrete (ICDC 2012).
- [18] Sheldon, R. P. (1982). *Composite polymeric materials*: Applied Science London.
- [19] Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Hernández-López, S., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., & Menchaca-Campos, C. (2005). Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers. *Polymer Engineering & Science*, 45(10), 1426-1431.
- [20] Quercia, G., Spiesz, P., Hüskén, G., & Brouwers, J. (2012). *Effects of amorphous nano-silica additions on mechanical and durability performance of SCC mixtures*. Paper presented at the Proceedings of the International Congress on Durability of Concrete (ICDC 2012).
- [21] Mazloom, M., & Ranjbar, A. (2010). *Relation between the workability and strength of self-compacting concrete*. Paper presented at the Proceedings of 35th Conference on our world in concrete & structures, Singapore, 315-322.
- [22] Mazloom, M., & Miri, M.S. (2017). Interaction of magnetic water, silica fume and superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *Advances in Concrete Construction*, 5(2), 87-99.
- [23] Mazloom, M., Saffari, A., & Mehrvand, M. (2015). Compressive, shear and torsional strength of beams made of self-compacting concrete. *Computers and Concrete*, 15(6), 935-950.
- [24] Mazloom, M., Allahabadi, A., & Karamloo, M. (2017). Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC. *Advances in Concrete Construction*, 5(6), 587-611.
- [25] Mazloom, M., Homayooni, S.M., & Miri, S.M. (2018). Effect of rock flour type on rheology and strength of self-compacting lightweight concrete. *Computers and Concrete*, 21(2), 199-207.
- [26] Karamloo, M., Mazloom, M., & Payganeh, G. (2017). Effect of size on nominal strength of self-compacting lightweight concrete and self-compacting normal weight concrete: A stress-based approach. *Materials Today Communications*, 13, 36-45.
- [27] Mazloom, M., Soltani, A., Karamloo, M., Hasanloo, A., & Ranjbar, A. (2018). Effects of silica fume, superplasticizer dosage and type of superplasticizer on the properties of normal and self-compacting concrete. *Advances in Material Research*, 7(1), 407-434.
- [28] Naniz, O. A., & Mazloom, M. (2019). Fracture behavior of self-compacting semi-lightweight concrete containing nano-silica. *Advances in Structural Engineering*, 22(10), 2264-2277.
- [29] Salehi, H., & Mazloom, M. (2018). Effect of magnetic-field intensity on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 71(13), 665-679.
- [30] Mazloom, M., & Miri, M. (2016). Effects of magnetic water on strength and workability of high performance concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(2), 30-411.
- [31] Mazloom, M., & Allahabadi, A., & M. Karamloo, M. (2017) *Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC*, *Advances in concrete construction*, 5(6) 587-611.