

اثر سیلیس الیافی بر استحکام کششی و فشاری بتن سبک

پویا خوش کلامیان، سیدمحمد قریشی*

دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ اصفهان - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۲/۱۰

چکیده: بتن‌های سبک به علت پایین بودن وزن مخصوص‌شان از مقاومت کم‌تری نسبت به سایر بتن‌ها برخوردارند، این مقاله به بررسی اثر سیلیس الیافی نانو و میکرو و ماکروی استخراج شده از کانی مربوطه بر خصوصیت‌های مکانیکی بتن سبک، شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌پردازد که به دلیل ریخت‌شناسی‌ای که دارند می‌توانند در بهبود خواص پیش‌گفته تأثیر داشته باشند. نتیجه‌های به دست آمده نشان از بهبود خصوصیت‌های مکانیکی بتن سبک به ازای استفاده از نانوسیلیس تا ۴٪ وزن سیمان می‌دهد. در اثر ترکیب نانو با میکرو سیلیس و تأثیر آن در خصوصیت مکانیکی بتن‌ها مشخص شد که بالاترین مقاومت فشاری در استفاده از ۲٪ نانوسیلیس و ۸٪ میکروسیلیس حاصل می‌شود. ولی ترکیب نانوسیلیس با درصد‌های بیش‌تر از ۸٪ میکروسیلیس باعث کاهش خواص مکانیکی نمونه می‌شود. هم‌چنین اختلاط ماکروسیلیس در بتن تا ۲۵٪ باعث افزایش مقدار مقاومت‌های کششی و فشاری می‌شود.

کلیدواژه‌ها: خواص مکانیکی، بتن سبک، سیلیس الیافی

The effect of silica Fibers on the compressive strength and tensile strength of light concrete

P. Khoshkalamyan, S.M. Ghoreishi*

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, P.O.Box: 83111-84156, Isfahan-Iran

Abstract: In the feasibility studies used for the correct use of this side product, it was decided to investigate the effect of this substance in a light concrete. Due to the low specific gravity, the lightweight concrete is less resistant compared to other concretes. So, in this study, the effect of nanocrystalline silica nano and micro and macro silica fibers, a mineral extracted on the mechanical properties of light concrete, including the compressive strength and tensile strength, were investigated. The results showed the improvement of the mechanical properties of the light concrete for the use of nano silica to 4% cement weight. By combining nanosilica with micro silica and its effect on the mechanical properties of concrete, we found that the highest compressive strength was in using 2% nano silica and 8% micro silica. However, the combination of the nano-silica with a percentage of more than 8% of micro silica reduced the mechanical properties of the sample. Also, the mixing of macro-silica in concrete up to 25% increased the tensile and compressive strength.

Keywords: Mechanical properties, Light concrete, Silica fiber

*Email: ghoreshi@cc.iut.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در طراحی ایمن در برابر زلزله، به خصوص ایمنی ساختمان‌های بلند و پل‌های طویل که از جنس بتن هستند وزن مرده‌ی مصالح استفاده شده در آن‌ها است به همین دلیل در صورت استفاده از بتن‌های سبکی که دارای خواص مکانیکی (از جمله استحکام فشاری و کششی) مناسب باشد، امتیازهای بسیار گسترده‌ای می‌توان به دست آورد که از جمله‌ی آن‌ها کاهش در بار مرده و نیروی زلزله است که در نتیجه به اقتصادی شدن طرح و کاهش خسارت‌ها منجر خواهد شد. ولی به این دلیل که عموماً خاصیت‌های مقاومت بتن با وزن آن رابطه‌ی مستقیم دارد در نتیجه استفاده از بتن‌های سبک به تنهایی توصیه نمی‌شود. از این رو پژوهش‌گران همواره در تلاش بوده‌اند تا با افزودن مواد مختلف به بتن سبک بتوانند خواص مکانیکی آن را بهبود بخشند. در پژوهش حاضر برای تولید بتن سبک با مقاومت فیزیکی بالا، اختلاط‌های با درصد‌های متفاوت میکرو، نانو و ماکروسیلیس (که به صورت الیاف از کانی زیرکن استخراج می‌شود) (۰، ۲، ۴ و ۶٪ نانوسیلیس و ۰، ۸ و ۱۶٪ میکروسیلیس و ۱۵ و ۲۵٪ ماکروسیلیس) ساخته شده و خاصیت‌های مکانیکی بتن اندازه‌گیری شد و با خواص نمونه‌ی کنترل (منظور نمونه‌ی شاهد بدون سیلیس) مقایسه و بهترین اختلاط در سه حالت بتن میکروسیلیس‌دار، نانوسیلیس‌دار و مخلوط میکرو و نانوسیلیس و ماکروسیلیس بررسی شد.

سبک‌دانه که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت لیکای ریزدانه بود که به جای ماسه انتخاب شد. دلیل این انتخاب، هم مقاومت بالای لیکا به عنوان ریزدانه بود و هم چنین طبق مطالعات مشخص شد که دانه‌ی لیکا هرچه از لحاظ اندازه کوچک‌تر باشد، هم مقاومت بیش‌تری دارد و هم جداسدگی را کاهش می‌دهد [۱]. نسبت آب به سیمان در تمام مرحله‌های آزمایش ثابت و برابر ۰٫۲۵ در نظر گرفته شد. عیار سیمان هم 400 kg m^{-3} انتخاب شد.

۱.۱ جنبه‌های اقتصادی بتن سبک

به دلیل این‌که نیروهای لرزه‌ای با وزن مرده‌ی ساختمان رابطه‌ی مستقیم دارد، کاهش وزن ساختمان مزیت بسیار

بزرگی محسوب می‌شود چون باعث زیاد شدن مقاومت اعضای برشی در زلزله می‌شود. با وجود این‌که هزینه‌ی بتن سبک از بتن معمولی و ساده بیش‌تر است اما قیمت ساختمانی که از بتن سبک ساخته می‌شود معمولاً از قیمت ساختمان ساخته شده با بتن معمولی کم‌تر است. از مزیت‌های بتن سبک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. عایق‌بندی حرارتی و مقاومت در برابر آتش و یخ‌زدگی نسبت به بتن معمولی؛

۲. وزن و بار مرده‌ی کم‌تر بتن.

کاملاً مشخص است که کاهش بار مرده و در نتیجه بار جانبی زلزله در ساختمان باعث کاهش بسیار زیاد در وزن اسکلت سازه، ابعاد فونداسیون و آرماتور مصرفی در فونداسیون می‌شود، به علاوه زمان اجرا نیز به مراتب کوتاه‌تر بوده و بازگشت سرمایه سریع‌تر خواهد بود. مصرف کم مصالح در تولید بتن کفی و به کارگیری آن در ساخت بناها، باعث می‌شود که از منابع‌ها به طور صحیح استفاده شود.

۲.۱ تأثیر سیلیس الیافی بر مقاومت فشاری بتن

براساس پژوهش‌های انجام شده بر روی تقویت‌کننده‌های مختلف مشخص شده است که این مواد در آزمایش‌های فشاری دارای رفتار کاملاً مشخصی هستند، به عنوان مثال با اضافه کردن مقدار مشخصی از هر تقویت‌کننده در ترکیب بتن، بیش‌ترین مقاومت فشاری به دست می‌آید و بعد از آن با افزایش مقدار تقویت‌کننده، مقدار مقاومت کم می‌شود [۲]. به منظور تأیید این ادعا پژوهش‌هایی روی نوعی پومیس انجام شده است که شاخص افزایش مقاومت برای ترکیب‌های شامل ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ پومیس به جای سیمان، بیش‌تر از ۷۵٪ ولی برای درصد‌های بالاتر پومیس، این شاخص از ۷۵٪ کم‌تر است و پیشنهاد نشده است که این مقدار افزایش پیدا کند؛ مقدار بهینه‌ی این جای‌گزینی ۲۰٪ اعلام شده است [۳]. پژوهش‌ها مشخص می‌کند که ذره‌های افزودنی با ایجاد تأخیر در زمان گیرش، گرمای آبپوشی^۱ واکنش‌های سیمان را به حداقل می‌رساند [۴]. نتیجه‌هایی که از فعالیت پوزولان‌های^۲ معمول به دست آمده است، نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های

1. Hydration
2. Pozzolans

خاصیت‌های سنگ‌دانه‌ها روی بتن‌های سبک‌دانه نشان دادند که مقاومت بتن توسط جزء ضعیف‌تر (سنگ‌دانه‌ها) کنترل می‌شود. بررسی‌های شچنوف و ویت [۷] نشان داد که با استفاده از سبک‌دانه‌های سیلیسی منبسط شده با مصرف سیمان تا 520 kg m^{-3} و میکروسیلیس تا ۲۰٪ وزن سیمان می‌توان به مقاومتی معادل 70.5 MPa دست یافت. پژوهش‌های روزیگ‌نولو و همکاران [۸] نشان داد که با استفاده از دانه‌های سبک برزیلی می‌توان به مقاومت ۲۸ روزهی معادل 53.6 MPa نایل شد. کیلیک و همکاران [۹] نشان دادند که با استفاده از دانه‌های بازالت-پومیس با مصرف سیمان تا 450 kg m^{-3} و میکروسیلیس تا ۱۰٪ وزن سیمان به صورت جای‌گزین می‌توان به مقاومت فشاری 43.8 MPa با وزن خشک 1820 kg m^{-3} دست یافت. مالهورترا [۱۰] نیز توانست با استفاده از سنگ‌دانه‌های سنگ رسی منبسط شده، به بتن سبکی با مقاومت فشاری 70 MPa که دارای وزن مخصوص 2000 kg m^{-3} بود دست یابد و به این نتیجه رسید که بهترین نسبت اختلاط هنگامی به دست می‌آید که از مواد سیمانی به مقدار 500 kg m^{-3} متشکل از سیمان نوع سه طبق استاندارد آمریکا برای آزمایش مصالح و خاکستر بادی و محلول میکروسیلیس استفاده شود. فری‌من و همکاران [۱۱] نیز نفوذپذیری بتن‌های سبک در مقابل یون کلرید را با بتن‌های معمولی مقایسه کردند. این گروه در کار خود عملکرد بتن‌های سبک با چهار طرح اختلاط را تحت آزمون نفوذپذیری سریع [یون] کلرید^۱ (RCPT) با بتن‌های معمولی مقایسه کردند. نتیجه‌های کار آن‌ها حاکی از پایین‌تر بودن نفوذ کلرید در بتن‌های سبک بود [۱۱]. هاگ و همکاران [۱۲]، دوام بتن‌های سبک را تحت شرایط محیطی مختلف با بتن‌های معمولی مقایسه کردند. برای این منظور این گروه تعدادی نمونه‌ی بتن سبک با مقاومت ۳۵ و 50 Mpa و تعدادی بتن معمولی با مقاومت 50 Mpa را به مدت ۲ سال در شرایط محیطی دریایی گرم قرار دادند. داده‌های آزمایش‌ها نشان داد که نفوذپذیری آب و عمق کربناتی شدن در بتن‌های سبک بیشتر از بتن‌های معمولی و این امر مستقل از شرایط عمل‌آوری بود. فان بریجل و تبری [۱۳]، نفوذ کلرید در تیرهای بتنی ساخته شده از بتن

ساخته شده از این مواد با افزایش نسبت سیلیس رابطه‌ی مستقیم و با مقدار Fe_2O_3 نسبت عکس دارد و افزایش نسبت بین K_2O و MgO باعث کاهش فعالیت پوزولانی و در نهایت کاهش استحکام می‌شود [۵].

۳.۱ مقایسه‌ی خواص میکرو و نانوسیلیس

به دلیل نبود شناخت کافی در مورد رفتار نانوسیلیس، در این بخش توضیحات به صورت مقایسه‌ای با میکروسیلیس ارائه می‌شود.

۱. مقدار آبپوشی در نانوذره‌ها در مقایسه با میکروذره‌ها مطلوب‌تر است.

۲. به دلیل این که نانوسیلیس شامل $4/5$ مولکول OH در گروه‌های سیلانول در هر نانومتر مربع است، سطح ذره‌های نانوسیلیس دارای بالاترین خاصیت هیدروکسیل کردن است. هم‌چنین بالا بودن سطح مؤثر سیلیس در ابعاد نانو، باعث ایجاد واکنش شدید می‌شود که مقدار این فعالیت بسیار بالاتر از همین مقدار در میکروسیلیس است.

۳. استحکام فشاری بهتر؛

۴. چه از نظر اقتصادی و چه از نظر دشواری‌های تولید، نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس برتری دارد.

در نظر گرفتن تمامی عامل‌های بالا، از نانوسیلیس یک گزینه‌ی برتر نسبت به میکروسیلیس می‌سازد. نانوسیلیس در ترکیب با مواد دیگر نیز عملکرد بسیار بهتری دارد و تا اندازه‌ی زیادی می‌تواند جای‌گزین سایر افزودنی‌ها شود. در پژوهش حاضر میکروسیلیس خروجی کارخانه توسط آسیاب‌های سیاره‌ای به نانوسیلیس تبدیل و در طرح اختلاط‌ها شرکت داده شد.

۳.۲ پیشینه‌ی پژوهش

اولین گزارش‌های تاریخی در مورد کاربرد بتن سبک و مصالح سبک وزن به روم باستان برمی‌گردد. در اوایل قرن بیستم پس از تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی، بتن سبک‌دانه وارد مرحله‌ی جدیدی شد. در سال‌های ۱۹۷۰ ساخت بتن سبک‌دانه‌ی پرمقاومت آغاز شد و نتیجه‌های آن در اوایل دهه‌ی ۹۰ منتشر شد. چی و همکاران [۶] ضمن مطالعه‌هایی درباره‌ی تأثیر

1. Rapid chlorid- ion permeability

حدود کاربرد بتن ساخته شده با این دانه‌ها را مشخص نمود. ناصری [۲۰] به بررسی خاصیت‌های مقاومتی بتن با سبک‌دانه‌ی اسکوریا پرداخت و نشان داد بتن سبک‌دانه‌ی اسکوریا در محدوده‌ی بتن‌های سبک سازه‌ای قرار دارد و افزودن الیاف پروپیلن و الیاف فلزی نتایج‌های مثبتی بر رفتار بتن سبک‌دانه‌ی اسکوریا دارد. همچنین عباس عابد و همکاران [۲۱] با استفاده از روش‌های ریاضی‌برداری به پیش‌بینی خواص فشاری بتن‌های سبک پرداختند. این پژوهش برخلاف پژوهش‌های پیشین که در آن‌ها از مواد آزمایشگاهی استفاده شده است، به تأثیر افزودن سیلیس استحصال شده طی فرایند استخراج زیرکن، در ابعاد ماکرو، میکرو و نانو پرداخته شده و در نهایت بهینه نسبت بهینه‌ی آن را نیز مشخص می‌کند.

۳. روش پژوهش

در این پژوهش ۱۴ نوع طرح اختلاط بررسی و مقایسه شد؛ در همه‌ی طرح‌ها، نانو، میکرو و ماکروسیلیس به مقدار متفاوتی اضافه و نانو سیلیس مصرفی جای‌گزین ۲، ۴ و ۶٪ وزن سیمان و میکروسیلیس مصرفی جای‌گزین ۸ و ۱۶٪ وزن سیمان و ماکروسیلیس جای‌گزین ۱۵ و ۲۵٪ وزن سیمان شد. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به سیمان (W/C) ثابت و برابر مقدار ۰٫۲۵ و مقدار روان‌کننده نیز ثابت بود. عیار سیمان نیز 400 kg m^{-3} در نظر گرفته شد. مشخصه‌های طرح اختلاط در جدول ۱ درج شده است. از نمونه‌ها بر مبنای استاندارد ۳-۱۲۳۹۰ BS EN آزمون فشار، و بر مبنای استاندارد ۶-۱۲۳۹۰ BS EN آزمون کشش، به عمل آمد. آزمایش مقاومت فشاری بتن سخت شده بر روی نمونه‌های مکعبی، و آزمایش مقاومت کششی بتن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بوده است. برای هر طرح اختلاط ۳ آزمایش انجام و میانگین آن‌ها به عنوان مقدار نهایی استحکام گزارش شد. توجه به این نکته ضروری است که انحراف معیار هر یک از نتیجه‌های آزمون نباید بیش‌تر از ۰٫۵ باشد و داده‌های با انحراف بیش‌تر از این مقدار حذف شدند.

سبک را بررسی کردند. این گروه اثر تنش‌های ثانویه در تار بالای تیر تحت اثر خوردگی را بررسی کردند. یافته‌های کار نشان داد که رفتار بتن‌های سبک در مقایسه با بتن‌های معمولی تحت اثر بارهای سیکلی و گرمایی در محیط خورنده تفاوت زیادی ندارد و در بعضی موارد عملکرد بتن‌های سبک مناسب‌تر نیز است. علی قدس [۱۴] اثر الیاف فولادی را بر دوام بتن‌های سبک مورد بررسی قرار داد. او در کار خود اثر این الیاف را بر خواص مکانیکی بتن سبک تحت سیکل‌های تر و خشک مورد بررسی قرار داد. رنجبر و همکاران [۱۵] دوام بتن‌های سبک حاوی دانه‌های منبسط‌شونده پلی‌استایرن را در محیط‌های حاوی یون کلرید مورد بررسی قرار دادند. این گروه بتن‌های سبک حاوی میکروسیلیس را در محیط حاوی ۵٪ سدیم کلرید تحت سیکل تر و خشک قرار داده و موقعیت این بتن‌ها را با بتن‌های معمولی مقایسه کردند. احمدی و سهرابی [۱۶] اثر پوزولان متاکائولن را بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های سبک در شرایط خورنده بررسی کردند. این گروه در پژوهش خود دوام بتن‌های سبک با چگالی 1500 kg m^{-3} را در منطقه‌ی خلیج‌فارس بررسی کردند. نتیجه‌ی کار حاکی از بالاتر بودن مقاومت فشاری و پایین‌تر بودن درصد تخریب در بتن‌های حاوی متاکائولن نسبت به بتن‌های معمولی بود. علی احمدوند [۱۷] با بررسی آزمایشگاهی کاربرد بتن سبک در دال‌های مرکب نشان داد که سقف‌های مرکب با بتن سبک در مقایسه با سقف‌های مرکب دیگر سبک‌تر بوده و نقش دیافراگمی خوبی دارند. محمدرضا یدالهی [۱۸] با تهیه‌ی بتن سبک با استفاده از سبک‌دانه‌ی لیکا به بررسی مقاومت فشاری و خمشی و مدول گسیختگی و خزش این نوع بتن و مسایل اقتصادی پیرامون این بتن پرداخت که معلوم شد بتن لیکا تنها به لحاظ هزینه، بتن مصرفی مقرون به صرفه نیست ولی هزینه‌های مربوط به آرماتور و آرماتوربندی را کاهش می‌دهد. عبدالناصر ریگی [۱۹] با استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی پامیس به ارزیابی خواص مقاومتی بتن ساخته شده پرداخت و

جدول ۱. مشخصه‌های طرح‌های اختلاط شامل سیلیس، میکروسیلیس و نانوسیلیس

شماره‌ی طرح	نسبت آب به سیمان	نانوسیلیس (%)	میکروسیلیس (%)	سیلیس (%)	درشت‌دانه (شن) kg m^{-3}	سبک‌دانه (لیکا) kg m^{-3}	درصد فوق روان‌کننده نسبت به سیمان
۱	۰٫۲۵	۰	۰	۰	۸۴۴	۱۲۰	۰
۲	۰٫۲۵	۲	۰	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۳	۰٫۲۵	۴	۰	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۴	۰٫۲۵	۶	۰	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۵	۰٫۲۵	۰	۸	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۶	۰٫۲۵	۰	۱۶	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۷	۰٫۲۵	۲	۸	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۸	۰٫۲۵	۴	۸	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۹	۰٫۲۵	۶	۸	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۱۰	۰٫۲۵	۲	۱۶	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۱۱	۰٫۲۵	۴	۱۶	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۱۲	۰٫۲۵	۶	۱۶	۰	۸۴۴	۱۲۰	۲
۱۳	۰٫۲۵	۰	۰	۱۵	۸۴۴	۱۲۰	۲
۱۴	۰٫۲۵	۰	۰	۲۵	۸۴۴	۱۲۰	۲

۴. یافته‌ها

۱.۴ مقاومت فشاری برای طرح‌های دارای نانوسیلیس (۲، ۳ و ۴)

در این مجموعه از طرح‌ها، نانوسیلیس ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی وارد سیمان شده و نتیجه‌ها با نمونه‌ی شاهد که نمونه‌ی شماره ۱ است مقایسه شد. نتیجه‌های آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۲ قابل مشاهده است.

شکل ۱ رابطه‌ی بین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذره و درصد نانوسیلیس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با وارد شدن نانوسیلیس به سیستم، مقاومت‌های فشاری تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۱ افزایش نانوذره تا ۴٪ موجب افزایش در مقاومت فشاری می‌شود. با افزایش نانوذره به بیش‌تر از ۴٪، مقاومت فشاری با شیب بیش‌تری کاهش می‌یابد. دلیل این مسأله این است که وقتی مقدار نانوذره در بتن از حد معینی بیش‌تر می‌شود به خاطر زیاد بودن شدت واکنش، نانوذره با کمبود آب مواجه می‌شود؛ استفاده از فوق روان‌کننده تا درصدهای معینی از نانوذره این کمبود را جبران می‌کند، اما با توجه به محدودیت استفاده از فوق روان‌کننده در درصدهای بالاتر نانوذره این معضل هم‌چنان پا برجاست که در نتیجه در بتن مقداری تخلخل ایجاد می‌شود که در اثر آن مقادیر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نکته‌ی دیگر این است که نانوسیلیس به دلیل سطح مخصوص و شدت بالای واکنش، در یک زمان کم باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. نانوذرات با کلسیم

هیدروکسیدی که به دلیل آبپوشی سیمان تشکیل می‌شود، واکنش می‌دهد و تولید سیلیکا کلسیم هیدراته می‌کند که همان ماده‌ی سخت عامل مقاومت بتن است. هم‌چنین همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است در نمونه‌ی ۷ روزه روند افزایشی و در نمونه‌های ۲۸ و ۴۵ روزه روند در ۴٪ نانوسیلیس کاهشی شده است. دلیل این رفتار احتمالاً این است که نمونه‌های ۷ روزه در زمان آزمون با کمبود آب ناشی از شدت واکنش دچار نشده‌اند. در نتیجه در بتن تخلخل داخلی هنوز ایجاد نشده است ولی این اتفاق در مورد بتن‌های ۲۸ و ۴۵ روزه افتاده است.

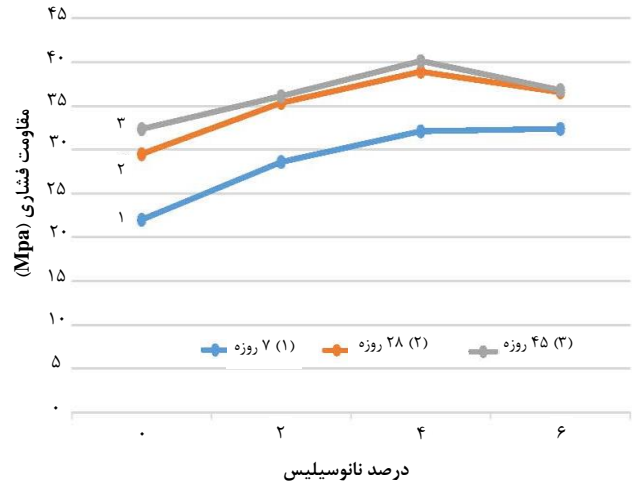
درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب در ۲٪ نانوسیلیس ۱۹٪، در ۴٪ نانوسیلیس، ۳۳٪ و در ۶٪ نانوسیلیس، ۲۴٪ بود.

جدول ۲. مقاومت فشاری برای طرح‌های اختلاط حاوی نانوسیلیس

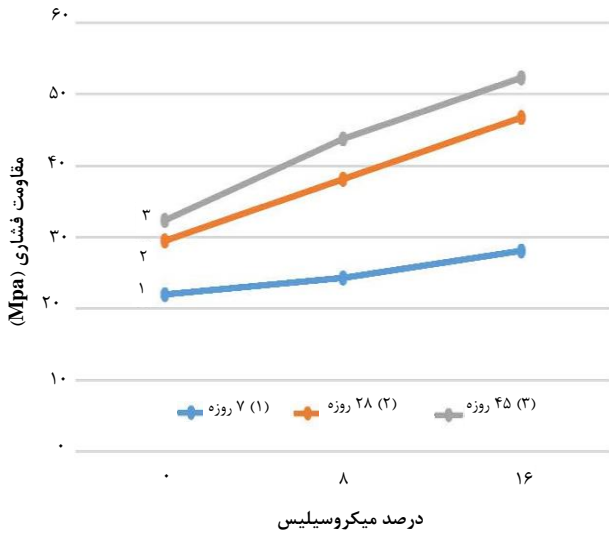
شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	۴۵ روزه
۱	۲۲	۲۹٫۵	۳۲٫۳۵
۲	۲۸٫۶	۳۵٫۳۳	۳۶٫۱۱
۳	۳۲٫۱	۳۸٫۹	۴۰٫۱۲۲
۴	۳۲٫۳۸	۳۶٫۵۵	۳۶٫۷۸

جدول ۳. مقاومت فشاری برای طرح‌های دارای میکروسیلیس

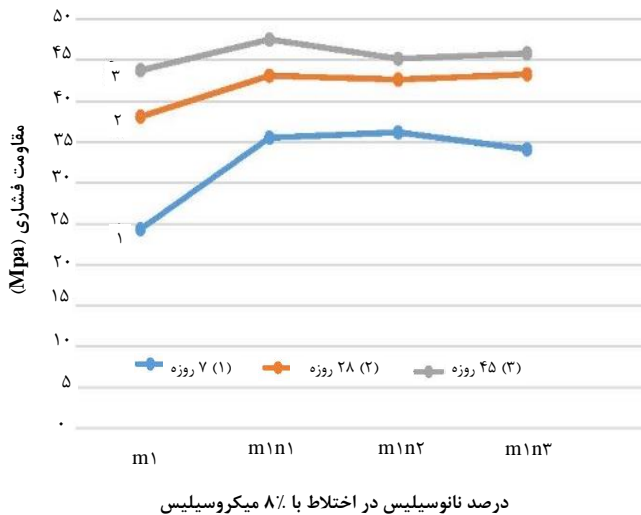
شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)		
	روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷
۱	۳۲,۳۵	۲۹,۵	۲۲
۵	۴۳,۷۷	۳۸,۱	۲۴,۳۳
۶	۵۲,۲۹	۴۶,۷۳۱	۲۸,۰۹۹



شکل ۱. تغییرات مقاومت فشاری با درصد نانو سیلیس.



شکل ۲. تغییرات مقاومت فشاری با درصد میکرو سیلیس.



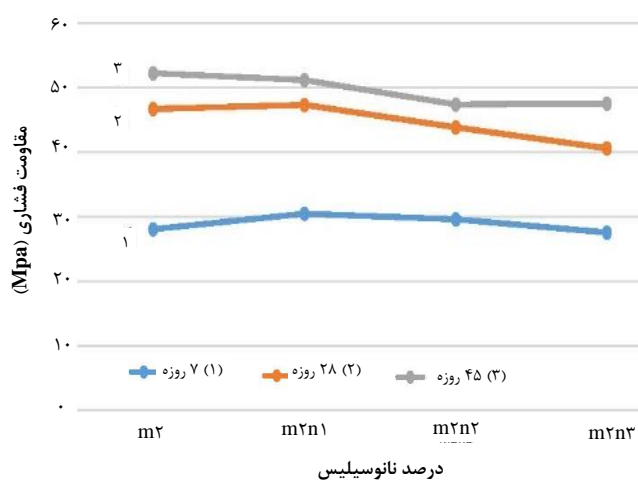
شکل ۳. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و درصد نانو سیلیس در اختلاط با ۸٪ میکرو سیلیس.

۲.۴ مقاومت فشاری برای طرح‌های دارای میکروسیلیس (۵ و ۶) در این گروه از طرح‌ها، میکروسیلیس با درصدهای ۸ و ۱۶ در سیمان وارد شده است. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری برای این اختلاط‌ها در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۲ نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری را در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۴۵ روزه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در نمونه‌ی ۲۸ روزه به ازای ۸٪ میکروذره، ۲۹٪ و به ازای ۱۶٪ میکروذره، ۵۸٪ افزایش در مقاومت فشاری نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار میکروذره است، اما به دلیل این که سطح مؤثر میکروسیلیس نسبت به نمونه‌ی نانو کم‌تر است شدت واکنش نیز کم می‌شود و به همین دلیل افزودن مقدار میکروسیلیس به نمونه‌ی ۷ روزه باعث افزایش محسوس مقاومت فشاری نمی‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که هر چند با افزایش میکروسیلیس مقاومت فشاری افزایش می‌یابد اما این روند با افزایش میکروسیلیس نسبت خطی ندارد، یعنی با افزایش میکروذره در بعد از ۸٪ افزایش مقاومت چندان چشمگیر نیست؛ در منابع هم درصد بهینه‌ی میکروسیلیس برای اختلاط را ۱۰٪ می‌دانند [۲۲] که به جهت تفاوت‌هایی در ساختار سیلیس‌های مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف این تفاوت نتیجه‌ها اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. باید به این نکته توجه داشت که رفتار سیلیس آزمایشگاهی و سیلیس معدنی می‌تواند در شرایط مختلف نتیجه‌های متفاوتی داشته باشد.

سیمان شده است. شکل ۵ و جدول ۵ نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۴۵ روزه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن سیلیس مقاومت‌های فشاری را تغییر می‌دهد. با توجه به شکل ۵ افزودن سیلیس مقدار مقاومت را با شیب ملایمی افزایش می‌دهد و وقتی این مقدار به ۲۵٪ می‌رسد شیب نمودار کمی افزایش می‌یابد. ولی افزودن بیش‌تر از ۲۵٪ سیلیس به نمونه احتمالاً این روند خطی را تغییر می‌دهد به این دلیل که وقتی مقدار سیلیس در بتن از حد معینی فراتر می‌رود شدت واکنش سیلیسی زیاد و در نتیجه بتن با کمبود آب مواجه می‌شود و در نهایت به تردی بتن و کاهش مقاومت فشاری می‌انجامد.

جدول ۴. مقاومت فشاری برای طرح‌های دارای نانو و میکروسیلیس

شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	۴۵ روزه
۵	۲۴,۳۳	۳۸,۱	۴۳,۷۷
۶	۲۸,۰۹۹	۴۶,۷۳۱	۵۲,۲۹
۷	۳۵,۵۳	۴۳,۱۲	۴۷,۵۵
۸	۳۶,۱۷	۴۲,۶۳	۴۵,۲
۹	۳۴,۰۹	۴۳,۲۸	۴۵,۸۳
۱۰	۳۰,۴۸	۴۷,۳۸	۵۱,۲۲
۱۱	۲۹,۶۱	۴۳,۸۷	۴۷,۴۴
۱۲	۲۷,۵۷	۴۰,۶۲	۴۷,۵۷



شکل ۴. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و درصد نانوسیلیس در اختلاط با ۱۶٪ میکروسیلیس.

۳.۴ مقاومت فشاری برای طرح‌های دارای نانو و میکروسیلیس (۷ تا ۱۲) در این ردیف از طرح اختلاط‌ها، ۲، ۴ و ۶٪ نانوسیلیس به طرح اختلاط‌های ۵ و ۶ اضافه شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای این ردیف از طرح اختلاط‌ها در جدول ۴ درج شده است. لازم به یادآوری است که اختلاط ۲٪ نانو با ۸٪ میکروسیلیس با نماد m₂n₁ و ۴٪ نانو با ۸٪ میکرو با نماد m₂n₂ و ۶٪ نانو با ۸٪ میکرو با نماد m₂n₃ و به همین ترتیب اختلاط ۲، ۴ و ۶ درصد نانو با ۱۶ درصد میکرو به ترتیب با m₂n₁ و m₂n₂ و m₂n₃ در رسم نمودارها مشخص شده است.

با توجه به شکل ۳ اختلاط تا ۲٪ نانوذره با ۸٪ میکروذره مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد و در مقدارهای بالاتر از ۲٪ نانوذره مقاومت کاهش می‌یابد، دلیل این مسأله آن است که نانوسیلیس سطح مخصوص بزرگی دارد و به همین دلیل به شدت واکنش داده و باعث کاهش کارایی و تخلخل در بتن می‌شود. هم‌چنین اثر اختلاط نانوذره و میکروذره‌ی درون بتن در روند افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های با سن پایین‌تر بیش‌تر مشخص است، برای مثال مقاومت فشاری ۷ روزه در طرح اختلاط شماره ۷ نسبت به نمونه‌ی شاهد (طرح اختلاط شماره ۵) ۴۵٪ افزایش نشان می‌دهد؛ این در حالی است که برای همین طرح اختلاط مقاومت فشاری ۲۸ و ۴۵ روزه نسبت به نمونه‌ی شاهد (طرح اختلاط شماره ۵) به ترتیب ۱۳ و ۱۰٪ افزایش نشان می‌دهند. از شکل ۴ دیده می‌شود با اختلاط درصد‌های متفاوت نانوذره با ۱۶٪ میکروذره مقاومت فشاری از ابتدا روند نزولی به خود می‌گیرد. بنابراین به نظر می‌رسد اختلاط نانوذره با درصد‌های بالای میکروذره مقرون به صرفه و اقتصادی نیست و در این پژوهش بر مبنای داده‌های حاصل از سنجش مقاومت فشاری، اختلاط ۲٪ نانوذره با ۸٪ میکروذره به عنوان حالت بهینه‌ی ممکن اختلاط نانوذره با میکروذره معرفی می‌شود.

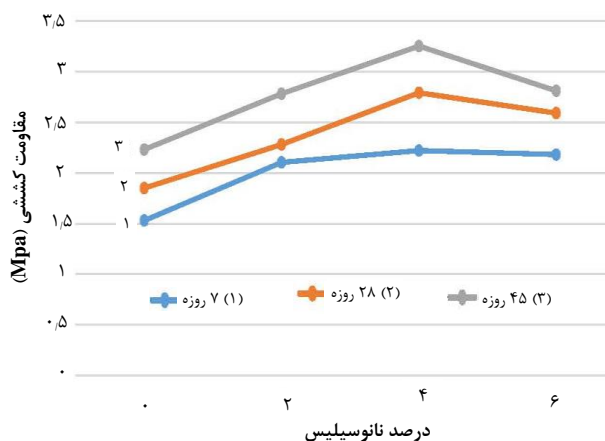
۴.۴ مقاومت فشاری برای طرح‌های حاوی سیلیس خام (ماکرو سیلیس ۱۳ و ۱۴)

در این مجموعه از طرح‌ها در مقایسه با طرح اختلاط ۱ که فاقد سیلیس است، سیلیس با درصد‌های وزنی ۱۵ و ۲۵ وارد

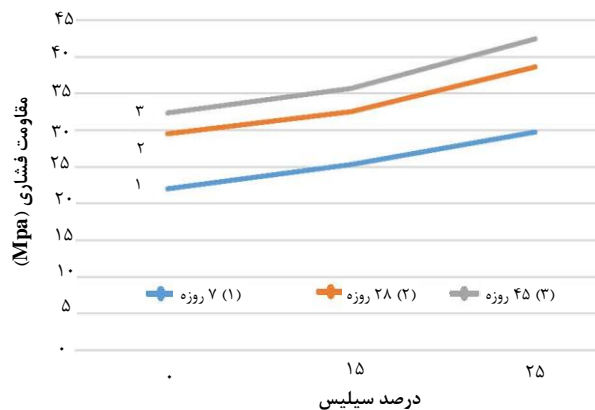
نانوسیلیس از محصول‌های جانبی آبیوشی سیمان استفاده می‌کند، با افزایش مصرف این مواد روند افزایش مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد و این مواد به عنوان یک ماده‌ی جداکننده فازهای سیمان سخت شده عمل می‌کنند. در درصد‌های بالاتر از ۴ با کاهش شدید و افت ناگهانی مقاومت کششی مواجه می‌شویم. هم‌چنین با توجه به شکل ۶ واضح است که افزایش مقاومت در درصد‌های پایین نانو سیلیس با شیب تندتری همراه است و با افزایش بیش‌تر درصد نانو این افزایش مقاومت با شیب کم‌تری اتفاق می‌افتد. هرچند در درصد‌های بالای نانو سیلیس افت مقاومت را می‌توان با مصرف بیش‌تر فوق روان‌کننده تا حدی کنترل کرد اما با توجه به محدودیت استفاده از فوق روان‌کننده این کمبود در درصد‌های بالای نانو سیلیس هم‌چنان باقی است. استفاده از درصد‌های بالای نانو سیلیس از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست و از نظر اجرایی هم مشکلات عدیده‌ای به همراه دارد، بنابراین استفاده از درصد‌های بالای نانو سیلیس در طرح اختلاط‌های بتن توصیه نمی‌شود.

جدول ۶. مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های اختلاط حاوی

مقاومت فشاری (MPa)			شماره‌ی طرح اختلاط
روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷	
۲,۲۳	۱,۸۵	۱,۵۳	۱
۲,۷۸	۲,۲۸	۲,۱۰۳	۲
۳,۲۵	۲,۷۹	۲,۲۲	۳
۲,۸۱	۲,۵۹	۲,۱۸	۴



شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی با درصد نانو سیلیس.



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری با درصد ماکروسیلیس.

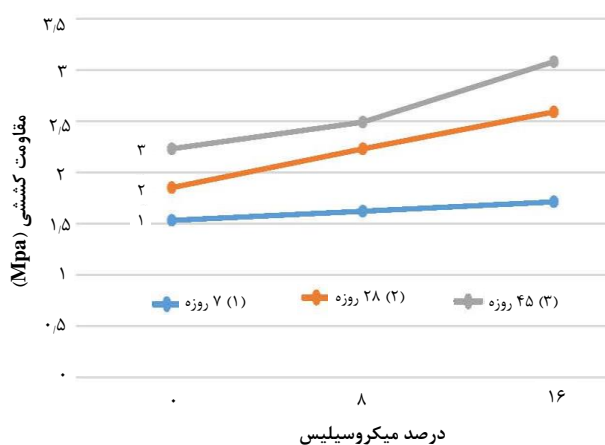
جدول ۵. مقاومت فشاری برای طرح‌های اختلاط حاوی سیلیس

شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)		
	روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷
۱	۳۲,۳۵	۲۹,۵	۲۲
۱۳	۳۵,۷	۳۲,۵۲	۲۵,۳۲
۱۴	۴۲,۴۶	۳۸,۶۳	۲۹,۷۵

۵.۴ مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های نانو سیلیس دار (۲، ۳ و ۴)

نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح اختلاط نانو سیلیس دار ۲، ۳ و ۴ در جدول ۶ درج شده است.

با توجه به شکل‌های ۶ و جدول ۶ مشخص می‌شود که با افزودن نانو سیلیس، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در تمام دوره‌ها با افزودن نانو سیلیس تا ۴ درصد مقاومت کششی افزایش می‌یابد، به این دلیل که اولاً نانوذره‌ها با پر کردن فضاهای خالی بسیار ریز و میکروسکوپی بتن تخلخل بتن را به حداقل رسانده، بر دوام و پیوستگی بتن می‌افزایند، ثانیاً نانوذره‌های سیلیس با کلسیم هیدروکسید آزاد شده‌ی ناشی از عملیات آبیوشی سیمان با آب به شدت واکنش داده و ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) تولید می‌کنند که این ماده هم با سنگ‌دانه‌ها چسبندگی بسیار زیاد داشته و هم نقش سخت‌کنندگی بتن را دارند، اما در درصد‌های بالا با مصرف بیش‌تر نانو سیلیس به دلیل واکنش‌پذیری بسیار زیاد، نانو سیلیس به شدت با کمبود آب مواجه می‌شود که ضمن مشکل نمودن لرزش بتن تخلخل و تردی بتن را نیز به همراه دارد. هم‌چنین با توجه به این‌که افزودنی‌های سیلیسی



شکل ۷. تغییر مقاومت کششی با درصد میکروسیلیس.

جدول ۸. مقاومت کششی برای طرح‌های اختلاط حاوی نانو و

مقاومت کششی (MPa)			شماره طرح اختلاط
روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷	
۲,۴۹	۲,۲۳	۱,۶۲	۵
۳,۰۸	۲,۵۹	۱,۷۱۱	۶
۲,۸۰	۲,۵۳	۲,۱۴	۷
۳,۵۰	۲,۷۸	۲,۳۳	۸
۳,۷۵	۳,۱	۲,۵۲	۹
۳,۱	۲,۴۱	۱,۸۰	۱۰
۳,۳۱	۲,۷۸	۱,۷۲	۱۱
۳,۳۱	۲,۷۵	۱,۹	۱۲

با توجه به جدول ۸ و شکل ۸ معلوم می‌شود که اختلاط نانوسیلیس با ۸٪ میکروسیلیس به خصوص در اولین روزهای ساخت بتن باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. این افزایش از آهنگ رشد بسیار مناسبی برخوردار است که حاکی از سرعت بسیار زیاد واکنش نانوسیلیس با کلسیم هیدروکسید است. نمودار برای دوره‌ی ۷ روزه از شیب تندتری نسبت به دوره‌ی ۲۸ و ۴۵ روزه برخوردار است. بنابراین اختلاط نانوسیلیس با میکروسیلیس در کوتاه مدت می‌تواند ما را به خواص مطلوب بتن در کوتاه‌ترین زمان ممکن برساند. با افزایش درصد نانو روند افزایش مقاومت کششی سرعت کم‌تری به خود می‌گیرد. بنابراین به نظر می‌رسد اختلاط درصد‌های بالاتر از ۶ نانو با میکروسیلیس چندان بر روند رشد مقاومت کششی تأثیرگذار نیست و حتی به خاطر شدت واکنش نانوسیلیس و در نتیجه‌ی خشک و گلوله‌ای شدن مخلوط بتن می‌توان پیش‌بینی کرد که نه تنها مقاومت افزایش نخواهد یافت بلکه روند کاهش به خود خواهد گرفت.

۶.۴ مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های دارای میکروسیلیس (۵ و ۶)

نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم برای این ردیف طرح اختلاط در جدول و شکل ۷ داده شده است.

با توجه به شکل ۷ و جدول ۷ مشخص می‌شود که افزودن میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود، اما این افزایش مقاومت در کوتاه مدت زیاد قابل توجه نیست و در دراز مدت به وضوح دیده می‌شود، زیرا سرعت واکنش میکروسیلیس در مقایسه با نانوسیلیس به خاطر سطح مخصوص کم‌تر میکروسیلیس نسبت به نانوسیلیس پایین‌تر است.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود نمودار تغییرات مقاومت کششی برای نمونه‌هایی که ۷ روزه مورد آزمون قرار گرفتند از شیب ملایمی برخوردار است، یعنی آهنگ افزایش مقاومت کششی پایین است اما این نمودار برای نمونه‌هایی که ۲۸ روزه و مخصوصاً ۴۵ روزه مورد آزمون قرار گرفته‌اند دارای شیب تندتری است، یعنی آهنگ افزایش مقاومت کششی با گذشت زمان افزایش می‌یابد که دلیل این امر در قسمت‌های قبل توضیح داده شده است.

۷.۴ مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های دارای نانوسیلیس میکروسیلیس (۷ تا ۱۲)

در این ردیف طرح اختلاط، ۲ و ۴ و ۶٪ نانوسیلیس به ترتیب با علامت نمادین Π_1 و Π_2 و Π_3 به طرح اختلاط‌های شماره ۵ و ۶ با ۸٪ میکروسیلیس (m_1) و ۱۶٪ میکروسیلیس (m_2) اضافه شده است. داده‌های حاصل از آزمون مقاومت کششی برای این ردیف طرح اختلاط در جدول ۸ درج شده است.

جدول ۷. مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های اختلاط حاوی میکروسیلیس

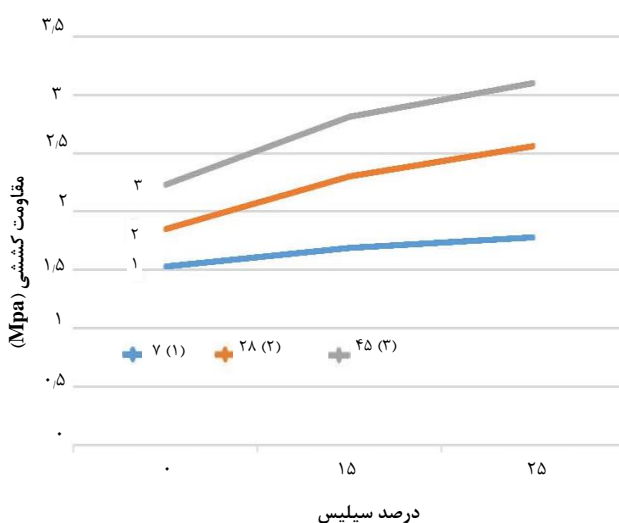
مقاومت کششی (MPa)			شماره طرح اختلاط
روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷	
۲,۲۳	۱,۸۵	۱,۵۳	۱
۲,۴۹	۲,۲۳	۱,۶۲	۵
۳,۰۸	۲,۵۹	۱,۷۱۱	۶

۸.۴ مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های دارای سیلیس خام (ماکروسیلیس ۱۳ و ۱۴)

نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم برای این ردیف طرح اختلاط در جدول ۹ و شکل ۱۰ داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۹ مشخص می‌شود که با افزودن سیلیس، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد، اما این افزایش مقاومت همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است تا درصد معینی از سیلیس ادامه دارد. در این پژوهش مشاهده می‌شود که درصدهای ۱۵ و ۲۵ برای سیلیس در تمام دوره‌ها با افزودن سیلیس مقاومت کششی افزایش می‌یابد. اما پیش‌بینی می‌شود که در درصدهای بالا با مصرف بیش‌تر سیلیس به دلیل واکنش‌پذیری زیاد، سیلیس به شدت با کمبود آب مواجه می‌شود که در نتیجه، ارتعاش بتن مشکل شده و به تخلخل و تردی بتن می‌انجامد.

جدول ۹. مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های اختلاط حاوی سیلیس

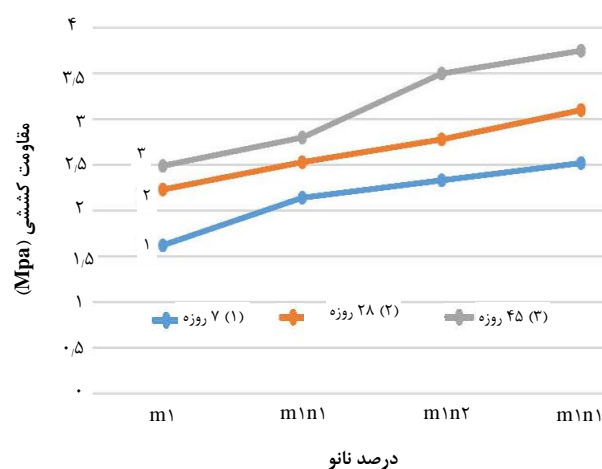
شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت کششی (MPa)		
	روزه ۴۵	روزه ۲۸	روزه ۷
۱	۲,۲۳	۱,۸۵	۱,۵۳
۱۳	۲,۸۱	۲,۳۰	۱,۶۹
۱۴	۳,۱	۲,۵۶	۱,۷۸



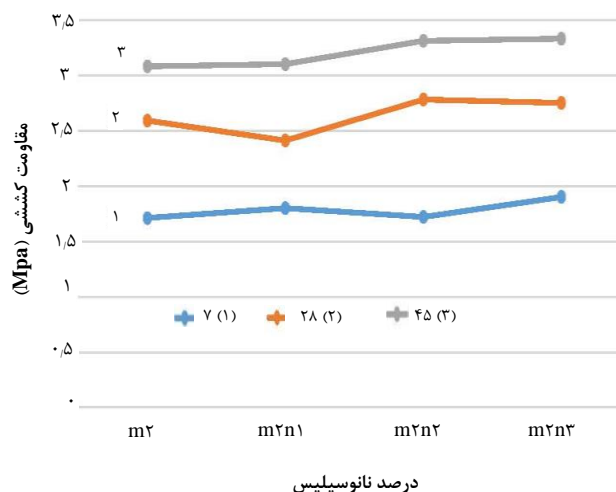
شکل ۱۰. رابطه‌ی بین مقاومت کششی و درصد سیلیس.

با توجه به شکل ۹ مشخص است که اختلاط نانوسیلیس با ۱۶٪ میکروسیلیس نه تنها باعث افزایش مقاومت کششی نمی‌شود بلکه باعث کاهش آن هم می‌شود، زیرا هنگام اختلاط بتن به شدت با کمبود آب و خشک شدن آن مواجه می‌شویم، بنابراین اختلاط درصدهای بالای نانوذره و میکروذره‌ی سیلیس با هم در عمل بسیار مشکل و حتی ناممکن است و باید از آن پرهیز شود.

از شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود که بالاترین مقاومت کششی به ازای اختلاط ۸٪ میکروسیلیس با ۶٪ نانوسیلیس حاصل می‌شود.



شکل ۸. رابطه‌ی بین مقاومت کششی و درصد نانوسیلیس در اختلاط با ۸٪ میکروسیلیس.



شکل ۹. رابطه‌ی بین مقاومت کششی و درصد نانوسیلیس در اختلاط با ۱۶٪ میکروسیلیس.

۵. نتیجه گیری

امکان استفاده از نانوذره‌های سیلیس، میکروسیلیس و ماکروسیلیس در بتن سبک حاوی سنگ‌دانه‌ی لیکا مورد بررسی قرار گرفت. هدف، استفاده از سیلیس به دست آمده از کانی زیرکن به صورت الیافی بود. در این راستا خاصیت‌های مختلف بتن سبک در سه حالت مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

از داده‌های حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی داده‌های زیر به دست آمد:

۱. افزودن نانوسیلیس به بتن باعث بهبود استحکام فشاری و کششی می‌شود.

۲. استحکام فشاری و کششی بتن با افزایش نانوسیلیس تا ۴٪ از روند صعودی برخوردار بوده و در درصدهای بالاتر نانوسیلیس کاهش می‌یابد.

۳. با مخلوط کردن ۲٪ نانوسیلیس با ۸٪ میکروسیلیس استحکام فشاری نسبت به نمونه‌های تنها حاوی ۸٪ میکروسیلیس افزایش می‌یابد و اختلاط درصدهای بالاتر نانوسیلیس با میکروسیلیس موجب کاهش استحکام فشاری می‌شود.

۴. افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط باعث افزایش استحکام فشاری و کششی می‌شود و افزایش استحکام کششی و فشاری با گذشت زمان قابل ملاحظه می‌شود.

۵. اختلاط ۸٪ میکروسیلیس با نانوسیلیس تا ۶٪ موجب افزایش استحکام کششی می‌شود. اختلاط درصدهای متفاوت نانوسیلیس با ۱۶٪ میکروسیلیس تأثیر چندانی بر استحکام کششی ندارد.

۶. با توجه به یافته‌ها می‌توان استنباط کرد که اختلاط نانوذره با درصدهای بالای میکروذره (۱۶٪) مقرون به صرفه نبوده و اثر معکوس بر روی خاصیت‌های بتن سبک دارد.

۷. اثر افزایش اختلاط نانوسیلیس با میکروسیلیس در روند بهبود استحکام فشاری در نمونه‌های کم‌سن (۷ روزه) بسیار قابل توجه است. بنابراین اختلاط نانوسیلیس با میکروسیلیس برای دستیابی به استحکام بالا در حداقل زمان ممکن انتخاب مناسبی است.

۸. از آن‌جا که معیار انتخاب طرح بهینه‌ی اختلاط بتن، استحکام فشاری بتن است، افزودن ۴٪ نانوسیلیس به طرح اختلاط به عنوان طرح بهینه معرفی شد و در صورت اختلاط نانوسیلیس با میکروسیلیس طرح بهینه به صورت اختلاط ۲٪ نانوسیلیس با ۸٪ میکروسیلیس پیشنهاد می‌شود.

۹. افزودن سیلیس به طرح اختلاط موجب بهبود قابل ملاحظه در مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن سبک می‌شود.

۱۰. پیش‌بینی می‌شود که افزایش مقدار سیلیس در بتن، به بیش از ۲۵٪، باعث کاهش مقاومت فشاری بتن و تردی بتن شود.

تشکر و قدردانی

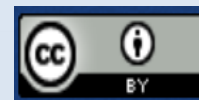
در پایان از دانشگاه صنعتی اصفهان به خاطر حمایت از انجام این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. H. Irani, V. Rahmi and B. Hasani, *In: National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development of Iran* (civilica, 2011) pp 201-207 (In persian).
2. B.Y. Pekmezci, S. Akyuz, *In: Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete*(SD, Turkey, 2004) pp 2175-2179.
3. M. Nehdi, and S. Mindess, *Optimization of high strength limestone filler cement mortars*, Cement and concrete research. **26**, 883 (1996).
4. P. Kumar Mehta, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4nd ed.*(McGraw-Hill Education, Illinois, 2013).
5. L. Turanlı, B. Uzal, F. Bektas, *Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements*, Cement and Concrete Research. **35**, 1106 (2005).
6. J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, J.J. Chang, *Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete*, Cement and Concrete Composites, **25**, 2, 197, (2003).
7. V. Novokshchenov and W. Whitcomb, *How to Obtain High-Strength Concrete Using Low-Density Aggregate*, Special Publication, 121, (1990).
8. João A Rossignolo, Marcos V.C Agnesini, Jerusa A Morais, *Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates*, Cement and Concrete Composites, **25**, 1, 77 (2003).
9. Alaettin Kılıç, Cengiz Duran Atış, Ergül Yaşar, Fatih Özcan, *High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures*, Cement and Concrete Research, **33**, 10, 1595 (2003).
10. V.M. Malhotra, *Properties of High-Strength, Lightweight Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume*. Special Publication, 121, 645 (1990).
11. C. Freeman, J.R. Wall, https://static1.squarespace.com/static/59c91fb8f7e0ab097112fbc4/t/5b06faa2f950b78f1bfaf72b/1527184034957/Improved_permeability_Chloride_Resistance.pdf.
12. N. Haque, and H. Al-Khaiat, *Mat. Struct, Strength and durability of light weight concrete in hot marine exposure condition*, Kluwer Academic Publishers, **32**, 533, (1999), doi.org/10.1007/BF02481638.
13. V. Breugel, K. & Foo, W.L. & Abdullahi, Mohammed, *Rapid chloride permeability test on lightweight concrete made with oil palm clincker*, J Eng Res Appl, **1**, 1863, (2011).
14. A. Qods, *In: The effect of steel fibers on durability of lightweight concrete*, (Civilica,Zahedan, 2009), pp. 1-6 (inpersian).
15. M. Ranjbar, et al, *Evaluation of durability of lightweight concrete containing expanded polystyrene beads (EPS) in destructive salt environment*, (civilica, shiraz, 2010) pp. 22-30 (in persian).
16. A. Ahmadi, M.R. Sohrabi, *The effect of metaquoline on mechanical properties and durability of lightweight concrete under aggressive environmental conditions*, (civilica, sistan balochestan, 2011) pp. 43-51 (in Persian).
17. A. Ahmadvand, M.Sc. Thesis, Iran University of Science and Technology, 1997 (in Persian).
18. M.R. Yadoulahy, M.Sc. Thesis, Iran University of Science and Technology, 2001 (in Persian).
19. A.N. Rigi, M.Sc. Thesis, University of Sistan and Baluchestan, 2004 (in Persian).
20. A. Nasery, M.Sc. Thesis, University of Tehran, 2007 (in Persian).
21. Abbas M. Abd, Suhad M. Abd, *Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM)*, Case Studies in Construction Materials, **6**, 8, (2017).
22. T. Tafaraj Fakour et al, *Investigation of Lightweight Concrete Mixing Design Containing Microsilica and Nanosilica*, (civiliva, khomeyn, 2010) pp. 126-132 (in Persian).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

پویا خوش کلامیان، سیدمحمد قریشی (۱۳۹۸)، اثر سیلیس الیافی بر استحکام کششی و فشاری بتن سبک، ۸۹، ۹۹-۱۱۰

DOI: 10.24200/nst.2019.1030

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1030.html