

بررسی و مقایسه تأثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص رئولوژی و مکانیکی بتن

سیدفتح اله ساجدی *

دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

المیرا حیدری

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

چکیده

سوابق نشان می‌دهد که با جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس، خواص مکانیکی بتن بهبود می‌یابند. در این تحقیق سیمان با میکروسیلیس در ۵٪ و ۱۰٪ جایگزین گردید؛ ملاحظه شد که جایگزینی باعث بهبود خواص مکانیکی بتن شد که این بهبود در جایگزینی ۱۰٪ نتایج بهتری داشته است. سیمان با نانوسیلیس در ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ جایگزین و سه طرح اختلاط تهیه شدند. در طرح‌های حاوی نانوسیلیس، افزایش مقاومت فشاری بیش‌تر از طرح‌های حاوی میکروسیلیس بود. بهترین نتایج مربوط به طرح حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس بود. برای بهبود بیش‌تر خواص مکانیکی و کاهش مصرف سیمان، طرح اختلاط‌های ترکیبی (۵٪ و ۰/۵٪)، (۵٪ و ۱٪) و (۱۰٪ و ۱/۵٪) نیز ساخته شدند. برای آزمایش مقاومت فشاری سه نمونه مکعبی استاندارد در هر سن و هر طرح اختلاط و برای آزمایش‌های مقاومت کششی دو نیم‌شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی دو نمونه استوانه‌ای استاندارد، و در مجموع ۱۱۷ نمونه تهیه گردید. بر نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب، در سن ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه آزمایش مقاومت فشاری انجام شد. آزمایش‌های مقاومت کششی دونیم‌شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی بر نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب، در سن ۲۸ روزه انجام شدند. جایگزینی هم‌زمان بخشی از سیمان با میکروسیلیس و نانوسیلیس در درصد‌های کم بهبود قابل توجهی نسبت به استفاده جداگانه آنها را نتیجه داد. طرح ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس به عنوان طرح بهینه تعیین و معرفی می‌شود. در طرح بهینه افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی دو نیم‌شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی در سن ۲۸ روزه نسبت به طرح مرجع به ترتیب ۷۰٪، ۱۱۵٪ و ۲۹٪ بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن، ضریب ارتجاعی استاتیکی، میکروسیلیس، نانوسیلیس.

۱- مقدمه

دارد و آینده بسیار خوبی خواهد داشت. این علم با پایش مواد در مقیاس نانو، گشایش اسرار طبیعت در تمام عرصه‌ها را نوید می‌دهد. از جمله دستاوردهای این فن آوری، کاربرد آن در بتن به منظور بالا بردن کارایی و افزایش مقاومت را به دنبال خواهد داشت [۷]. بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح ساختمانی با استفاده از فن آوری نانو پیشرفت‌های عظیمی در صنعت ساختمان ایجاد نموده است و به طراحان و مهندسان امکان ایجاد ساختمان‌هایی پایدار و همساز با طبیعت را داده است. اهمیت استفاده از فن آوری نانو زمانی آشکار می‌شود که میزان سرمایه‌گذاری کشورهای توسعه یافته در این زمینه بررسی شود. نانوسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی برای تهیه بتن با توانمندی بالا به دلیل تأثیر مهم به دست آمده در ناحیه خمیر و دانه‌های سیمان همواره مورد توجه دانشمندان بوده است [۸]. ریزتر شدن اندازه ذرات سیلیس تا حد نانومتری خواص فیزیکی و شیمیایی بی نظیری به این مواد می‌دهد؛ نانوسیلیس با سطح مخصوص بسیار بالای خود می‌تواند واکنش پذیری بیشتری از خود نشان دهد [۹]. ذرات نانوسیلیس دارای انرژی سطحی و واکنش پذیری بالا می‌باشند که منجر به فعالیت پوزولانی بیشتر در سنین اولیه نسبت به میکروسیلیس می‌شود. کاربرد نانوسیلیس نشانگر افزایش مقاومت فشاری، به ویژه در سنین اولیه است. همچنین افزایش مقاومت پیوستگی ناحیه انتقالی سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان با استفاده از نانوسیلیس بسیار مؤثرتر از میکروسیلیس می‌باشد [۱۰]. مطالعات بسیار زیادی در راستای تأثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن صورت گرفته است. پژوهش‌ها در زمینه تأثیر نانوسیلیس بر بتن نشان داد که ذرات نانوسیلیس دارای واکنش پوزولانی مؤثرتری نسبت به میکروسیلیس است. بنابراین اندازه و مقدار بلورهای هیدروکسید کلسیم به شکل قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و مقاومت اولیه خمیر سیمان سخت شده، افزایش می‌یابد. همچنین اضافه کردن نانوسیلیس باعث افزایش گرمادهی در مراحل گیرش و سخت شدن سیمان می‌شود [۱۱، ۱۲]. تحقیقات چند دهه اخیر، برای کاهش و رفع نواقص بتن و رسیدن به بتن با دوام، استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس، نانوسیلیس، سرباره و خاکستر بادی را رایج کرده است [۱۳]. استفاده از این مواد ضمن کاهش مصرف انرژی، موجب کاهش آلودگی هوا و کمک به محیط زیست می‌شود و با جایگزین شدن به جای بخشی از سیمان، هزینه تولید بتن مصرفی را کاهش می‌دهند [۱۴]. در بین این مواد مضاف، پوزولان‌های مصنوعی به علت مسائل مربوط به محیط زیست بیش‌تر مورد توجه

بتن، امروزه یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین مصالح در ساخت و ساز است که در زندگی انسان‌ها نقش ایفاء می‌کند تا آنجا که حتی برخی آن را مهم‌ترین ماده در علوم مهندسی می‌دانند [۱]. بتن پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی در دنیا است و دلیل آن قیمت پایین، راحتی کاربرد و مقاومت نسبتاً خوب آن است [۲]. مواد اصلی تشکیل‌دهنده بتن سنگ‌دانه‌ها، سیمان و آب می‌باشد؛ همچنین در برخی از بتن‌ها برای دستیابی به برخی از خواص مثبت از مواد افزودنی استفاده می‌شود [۳]. نظر به اینکه سیمان استفاده شده در بتن گران‌ترین ماده مصرفی آن است و این ماده در فرایند تولید، آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کند و با توجه به خواص مطلوب پوزولان‌ها در بتن، استفاده از این مواد رواج چشم‌گیری داشته است [۳]. از جمله این مواد نانوسیلیس، میکروسیلیس و انواع فوق‌روان‌کننده‌ها و مواد افزودنی را می‌توان نام برد که در سال‌های اخیر در فن آوری بتن به کار گرفته شده‌اند و نتایج مطلوب چشم‌گیری به همراه داشته‌اند [۲]. در صنعت بتن، سیلیس یکی از موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکنندگی بتن با عملکرد بالا ایفا می‌کند [۴]. ریزی ذرات میکروسیلیس و واکنش هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراته شدن سیمان پرتلند را تسریع می‌نماید، ذرات خیلی ریز میکروسیلیس می‌توانند در فضای بین ذرات سیمان جای گیرند و تراکم را بهبود بخشند، همچنین وقتی که میکروسیلیس در مخلوط وجود داشته باشد، فوق‌روان‌کننده‌ها لازم خواهند بود، زیرا میکروسیلیس نیاز به آب مخلوط را افزایش می‌دهد [۵]. میکروسیلیس به علت بهبود خواص مکانیکی، کاهش سرعت هیدراتاسیون و افزایش کارایی استفاده می‌شود. میکروسیلیس موجب تبدیل بلورهای هیدروکسید کلسیم غیر مفید به ژل می‌گردد و همچنین خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس باعث توزیع یکنواخت محصولات به دست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط می‌شود. در نهایت دو ویژگی پرکنندگی و پوزولانی بودن آن، تولید جسمی متراکم و کم-تخلخل می‌نماید که کاهش نفوذپذیری و درجه قلیایی را به همراه خواهد داشت. همچنین اندازه لوله‌های موئینه با اضافه شدن میکروسیلیس کاهش می‌یابد [۶]. با گسترش استفاده از بتن، ویژگی‌هایی مانند مقاومت، دوام و کیفیت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. برای رسیدن به این اهداف از فن آوری‌های مختلف، بهره‌های فراوان برده می‌شود. نانو فن آوری علم ساختمان اتم به اتم مواد جدید با خواص مد نظر است که هنوز در آغاز راه خود در جهان قرار

کلراید و مقاومت الکتریکی بر نمونه‌ها نشان داد که با استفاده از نانوسیلیس در بتن می‌توان به مقاومت‌های فشاری قابل ملاحظه و به وضوح بیشتر از بتن‌های معمولی و حاوی میکروسیلیس در سنین اولیه دست یافت، اما این برتری در کسب مقاومت پس از گذشت زمان و رسیدن نمونه‌ها به سن ۲۸ روزه و بیش‌تر، با انجام واکنش پوزولانی میکروسیلیس چندان محسوس نبود. نانوسیلیس با بهبود ریزساختار بتن از طریق واکنش پوزولانی و پر نمودن حفرات ریزساختار بتن باعث کاهش قابل ملاحظه در نفوذپذیری بتن در مقابل آب و یون کلراید شده است. میکروسیلیس نیز اثر مشابهی در کاهش نفوذپذیری بتن داشته، اما با توجه به کندتر بودن واکنش پوزولانی آن نسبت به نانوسیلیس، اثر آن در سنین بالاتر نمایان شده است. نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس حکایت از اثر آنها در افزایش مقاومت الکتریکی بتن و در نتیجه افزایش مقاومت آن‌ها در مقابل خوردگی داشته است. نتایج کسب شده نشان-دهنده فعالیت موثرتر نانوسیلیس در افزایش مقاومت الکتریکی نمونه-های بتنی در سنین اولیه بوده است [۱۸]. در مطالعه‌ای که ورما آجای و همکاران^۳ درباره تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی انجام دادند؛ با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با میکروسیلیس نتایج قابل توجهی به-دست آمد. نمونه‌های آن‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و مدول نرمی درشت‌دانه‌ها ۲/۷۲ در مکعب‌های ۱۵ سانتی‌متری ساخته شدند. نمونه-ها به صورت مکانیکی مرتعش شدند و برای عمل‌آوری در آب قرار داده شدند و در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که میکروسیلیس تا حد زیادی مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد. مقاومت بتن تا افزودن ۱۵٪ وزنی سیمان میکروسیلیس، تا ۲۵٪ افزایش یافت، اما پس از آن برای ۲۰٪ میکروسیلیس، مقاومت در تمام سنین آزمایش با کاهش روبرو شد [۱۹]. رحمانی و همکاران تأثیر تغییرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت‌های فشاری و سایشی بتن‌های حاوی میکروسیلیس را بررسی نمودند. میزان میکروسیلیس تمام نمونه‌ها برابر ۷/۵٪ وزنی سیمان بود، درحالی‌که نسبت آب به سیمان به صورت ۰/۳۳، ۰/۴۰، ۰/۴۴ و ۰/۵۰ بودند. نتایج مربوط به مقاومت فشاری نشان داد که بیشینه و کمینه مربوط به نسبت آب به سیمان به مقادیر ۰/۳۳ و ۰/۵ بوده است. کم‌ترین

قرار گرفته‌اند [۱۳]. از حدود ۸۰ سال پیش تا کنون استفاده از سیلیس در ابعاد میکرونی به صورت گسترده‌ای در بتن‌های پایه سیمانی استفاده شده، به همین دلیل به تحقیقات بسیاری در زمینه اثر آن بر خواص بتن پرداخته شده است [۱۴]. این در حالی است که کاربرد نانوسیلیس در صنعت ساختمان کم‌تر از ۱۵ سال قدمت داشته و اثرات آن بر ویژگی-های بتن هنوز به درستی شناخته شده نیست [۱۵]. پریادارشانا و همکاران^۱ به بررسی اثرات نانوسیلیس، میکروسیلیس، خاکستربادی و خاکسترته‌نشینی بر مقاومت فشاری بتن پرداختند. نتایج نشان داده که تا ۵٪ نانوسیلیس، ۱۰٪ میکروسیلیس، ۲۰٪ تا ۳۰٪ خاکستربادی و ۵٪ خاکسترته‌نشینی می‌تواند با سیمان مخلوط شود و تأثیری بر مقاومت نداشته باشند. با این حال، درصدهای مطلوب این مواد (۱-۳) نانوسیلیس، (۳-۸) میکروسیلیس، ۱۰٪ خاکستربادی و ۵٪ خاکسترته-نشینی بوده است. میکروسیلیس و خاکستربادی استفاده شده در تمام طرح‌های مخلوط بتن بلندترین ساختمان جهان، برج خلیفه در دبی، به ترتیب (۵-۹) وزنی و (۱۲-۲۴) وزنی بوده است. میکروسیلیس و خاکستربادی در بسیاری از پروژه‌های ساختمان‌های بلند در جهان برای حصول به مقاومت بالاتر و دوام طولانی‌تر استفاده شده است. نانوسیلیس به علت قابلیت دسترسی و هزینه هنوز در صنعت ساخت و ساز جدید است [۱۶]. سانکاک و همکاران^۲ به بررسی اثرات دمای بالا بر مقاومت فشاری و کاهش وزن بتن سبک حاوی میکروسیلیس و روان‌کننده پرداختند. در طرح اختلاط‌ها از میکروسیلیس با درصدهای ۵ و ۱۰ و سیمان پرتلند و ۲٪ روان‌کننده استفاده شده است. نتایج نشان داد که در زمان استفاده از میکروسیلیس نیاز به آب افزایش و وزن، کمی کاهش یافت. رفتار بتن‌های معمولی و سبک که در معرض دمای بالا قرار گرفتند، مشابه هم بود، با این حال بتن معمولی کاهش مقاومت بیش‌تری نسبت به بتن سبک داشت. نرخ خرابی در بتن معمولی بالاتر از بتن سبک بود. هیچ‌کدام از بتن‌های معمولی و سبک نتوانستند دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کنند [۱۷]. رمضانی‌پور و همکاران به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن در مقایسه با میکروسیلیس پرداختند. در طرح اختلاط‌ها سیمان نوع یک، نانوسیلیس با درصدهای ۴/۵ و ۷/۵ و میکروسیلیس نیز با همین درصدها استفاده شدند. فوق روان‌کننده نیز به کار برده شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذ آب، نفوذ تسریع شده یون

3 Verma Ajay et al.

1 Priyadarshana et al.
2 Sancak et al.

۳۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و روان کننده استفاده شدند. برای بررسی مقاومت فشاری و کششی به ترتیب از نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای استاندارد استفاده شد و نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه شکسته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانوسیلیس از ۲/۵ تا ۸/۵ درصد، مقاومت فشاری بتن‌های با عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب به مقدار ۱۳/۴ تا ۲۸/۸، ۲۵/۱ تا ۱۴/۸، ۳۱/۷ تا ۱۴/۷ و ۳۱/۷ تا ۱۴/۷ افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش میزان نانوسیلیس از ۲/۵ تا ۸/۵ درصد، مقاومت کششی بتن با عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب به مقدار ۳/۶ تا ۱۴/۳، ۲/۹ تا ۱۱/۴، ۲/۴ تا ۷/۱ و ۵/۴ تا ۷/۳ افزایش یافت [۲۴].

هاشمی و محمدی به بررسی تأثیر نانوسیلیس در بتن سبک خودتراکم در حالات تازه و سخت شده پرداختند. تحقیق آن‌ها شامل ۶ طرح اختلاط با متغیر نانوسیلیس با نسبت‌های ۰/۶٪، ۱/۲٪، ۱/۸٪، ۲/۴٪ و ۳٪ جایگزین سیمان می‌باشد. آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه ل، قیف V و جعبه L در حالت تازه و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی در حالت سخت شده بر نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که جایگزینی نانوسیلیس در بتن موجب افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌شود. همچنین افزودن نانوسیلیس به مخلوط بتن سبک خودتراکم، افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی را به دنبال دارد، به عبارت دیگر سختی بتن سبک خودتراکم با افزایش نانوسیلیس افزایش می‌یابد [۲۵].

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق از کارخانه سیمان کارون واقع در استان خوزستان، با وزن مخصوص 3 g/cm^3 و $15/3 \text{ g/cm}^3$ و سطح ویژه $2922 \text{ cm}^2/\text{g}$ تهیه و در شرایط مطلوب نگهداری شده و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران و ASTM C150 را دارا بوده است [۲۶]. تجزیه و تحلیل شیمیایی این سیمان که حاصل آزمایش طیف-نگاری فلورسانس اشعه ایکس^۴ می‌باشد، در جدول ۱ ارائه گردیده است.

و بیشترین نرخ افزایش مقاومت در بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های با نسبت آب به سیمان به ترتیب ۰/۵ و ۰/۳۳ بود [۲۰]. تورک و همکاران^۱ با افزایش ۵٪ وزنی میکروسیلیس تا ۲۰٪ در نمونه‌های ساخته شده از بتن خودتراکم مقاومت آنها را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش درصد میکروسیلیس، پارامترهای مقاومتی و ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن مذکور به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد [۲۱]. مظلوم و همکاران^۲ به تأثیر میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن با کارایی بالا پرداختند. نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و میکروسیلیس در درصدهای ۶، ۱۰ و ۱۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که در مخلوط بتن با اسلامپ ثابت $10 \pm 10 \text{ mm}$ ، نمونه‌هایی که میزان بالاتری از میکروسیلیس داشتند، نیاز به مقادیر بیشتری از روان کننده داشتند. مقاومت فشاری مخلوط بتن پس از ۹۰ روز افزایش نداشته است. میکروسیلیس تأثیری بر جمع‌شدگی نهایی بتن ندارد، با این حال، با افزایش درصد میکروسیلیس جمع‌شدگی خود بخودی بتن با توانمندی بالا افزایش یافته است و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن کاهش داشته است [۲۲]. نوائی‌نیا و همکاران به تأثیر میکروسیلیس بر رفتار درازمدت بتن خودتراکم پرداختند. آنها با تهیه سه طرح اختلاط با مقاومت‌های فشاری نمونه‌های مکعبی ۳۰، ۳۵ و ۴۵ مگاپاسکال به ترتیب با ۳، ۵ و ۸ درصد میکروسیلیس و ساخت ۲۱ نمونه بتن خودتراکم برای هر طرح و در مجموع ۶۳ نمونه، اثر میکروسیلیس بر کرنش‌های وابسته به زمان شامل خزش و جمع‌شدگی و نیز خواص مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن خودتراکم را بررسی نمودند. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها بیانگر آن بود که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها، ضریب ارتجاعی و مقاومت کششی در سنین مختلف افزایش یافت. از آنجایی که ماهیت پدیده‌های جمع‌شدگی و خزش یکسان و تحت تأثیر عوامل مشابه قرار دارند، با افزایش درصد میکروسیلیس در نمونه‌ها کرنش‌های ناشی از جمع‌شدگی و خزش کاهش یافت [۲۳]. قاسمی و حسینی‌واعظ به بررسی آزمایشگاهی اثر افزودنی نانوسیلیس بر رفتار مقاومتی بتن پرداختند. آنها برای بررسی هر یک از مقاومت‌های فشاری و کششی ۲۰ طرح اختلاط ساختند. در طرح اختلاط‌ها از نانوسیلیس با درصدهای ۲/۵، ۴/۵، ۶/۵ و ۸/۵ عیار سیمان نوع یک به میزان ۳۰۰،

1 Blaine

2 X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

1 Turk et al.

2 Mazloom et al.

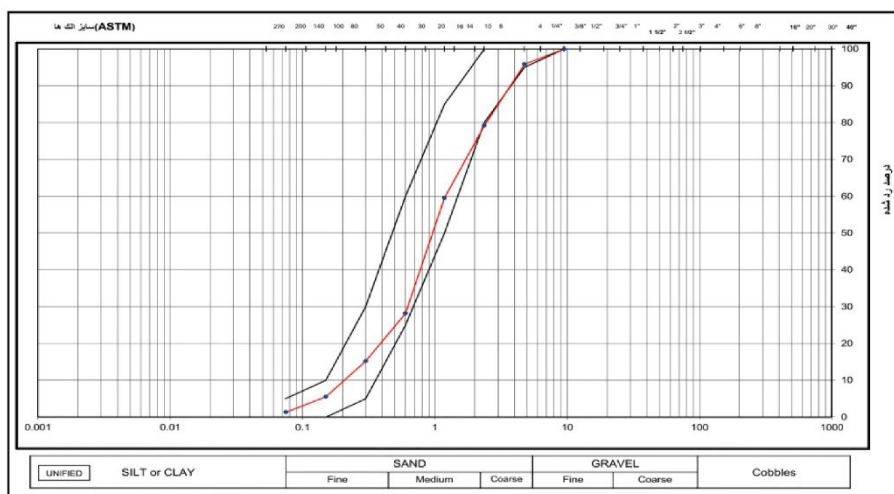
جدول ۱- تجزیه شیمیایی سیمان نوع ۲ مصرفی در تحقیق

Element	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	Cl	K2O	CaO	TiO2	V2O5	Cr2O3	MnO
Wt. %	<0.01	1.952	4.179	22.431	<0.01	2.894	<0.01	0.867	61.349	0.256	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Fe2O3	CoO	NiO	CuO	ZnO	Ga	Ge	As2O3	Se	Br	Rb2O	SrO	Y
Wt. %	3.471	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	ZrO2	Nb2O5	Mo	Ag	Cd	SnO2	Sb2O5	Te	I	Cs	Ba	La	Ce
Wt. %	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Pr	Nd	Hf	Ta2O5	WO3	Hg	Tl	PbO	Bi	Th	U		LOI
Wt. %	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		2.5

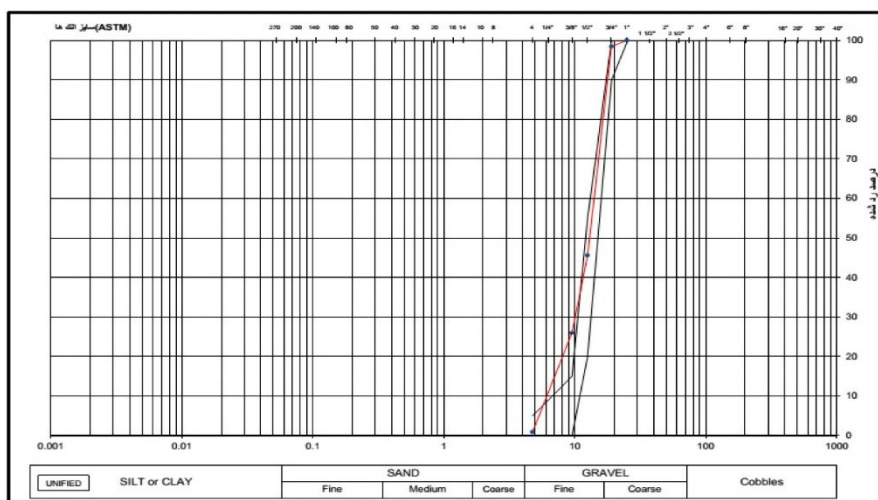
۲-۱-۲- سنگ‌دانه‌ها

مخصوص ظاهری نیز به ترتیب ۱/۷۸، ۱/۶۲ و ۱/۶۷ گرم بر

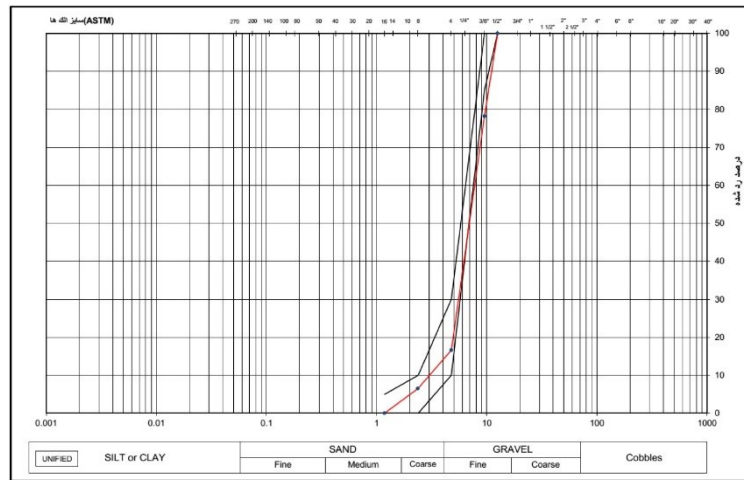
در این تحقیق آزمایش وزن مخصوص و جذب آب سنگ‌دانه‌ها مطابق استاندارد ASTM C128 برای مصالح سنگی ریزدانه و استاندارد ASTM C127 برای مصالح سنگی درشت دانه انجام پذیرفت [۲۷ و ۲۸]. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ماسه، شن بادی و شن نخودی به ترتیب ۲/۵۸، ۲/۶۴ و ۲/۶۰ و وزن شده است.



نمودار ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی تحقیق



نمودار ۲- منحنی دانه‌بندی شن ۳/۸ اینچ تحقیق



نمودار ۳- منحنی دانه بندی شن ۳/۴ اینچ تحقیق

۳-۱-۲- میکروسیلیس

دوام آن افزایش می یابد [۳۰]. مزایای استفاده از میکروسیلیس در بتن شامل مقاومت فشاری اولیه بالا، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و ضریب ارتجاعی استاتیکی بالا، افزایش مقاومت پیوستگی، تقویت دوام، نفوذپذیری بسیار پایین در برابر کلراید و آب، افزایش مقاومت سایشی، مقاومت الکتریکی بالا و نفوذپذیری مغناطیسی پایین و مقاومت بسیار بالا در برابر حملات شیمیایی کلرایدها، اسیدها، نترات-ها و سولفات ها می باشد [۱۳]. تجزیه شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

میکروسیلیس دو نقش اساسی در بتن بازی می کند. نخست آنکه با خاصیت سیمانی و پوزولانی خود ترکیبات جدیدتری از جنس سیلیکات کلسیم هیدراته^۱ را تولید کرده و بافت مستحکمی برای بتن فراهم می کند؛ و دوم آنکه به دلیل ریزی فوق العاده خود، تمام حفره ها و خلل و فرج میکروسکوپی خمیر سیمان را پر کرده و حتی فواصل میکروسکوپی بین دانه های سیمان را نیز پر می نماید. به این ترتیب خمیر سیمان در بتن بسیار توپر، متراکم و مستحکم شده و مقاومت و

جدول ۲- تجزیه شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در تحقیق

Element	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO
Wt. %	1.112	1.02	0.73	90.629	0.149	0.395	<0.01	0.858	0.587	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Fe ₂ O ₃	CoO	NiO	CuO	ZnO	Ga	Ge	As ₂ O ₃	Se	Br	Rb ₂ O	SrO	Y
Wt. %	0.55	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	Mo	Ag	Cd	SnO ₂	Sb ₂ O ₅	Te	I	Cs	Ba	La	Ce
Wt. %	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Pr	Nd	Hf	Ta ₂ O ₅	WO ₃	Hg	Tl	PbO	Bi	Th	U		LOI
Wt. %	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		3.97

۴-۱-۲- نانوسیلیس

با انجام واکنش های شیمیایی با آب، هیدروکسید کلسیم آزاد شده موجود در بتن را مصرف می کند و از خاصیت قلیایی آن می کاهد و در کنار آب به صورت شوره از بتن خارج می شود و از خوردگی میلگردهای قرار گرفته در بتن جلوگیری می کند. از نقطه نظر شیمیایی میزان درصد خلوص سیلیس در نانوسیلیس بیش از ۹۹/۵٪ است [۳۱]. تجزیه شیمیایی نانوسیلیس مصرفی در تحقیق به شرح جدول ۳ است.

از خواص نانوسیلیس که سبب بهبود خواص مکانیکی بتن می شود، می توان به اثر پرکنندگی، اثر هسته زایی و فعالیت پوزولانی آن نام برد [۳۱]. واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم مقدار ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را افزایش می دهد در نتیجه سبب متراکم سازی بیشتر مخلوط و متعاقباً بهبود ساختار میکروسکوپی سطح تماس، مقاومت و پایداری مواد می شود [۳۲]. از طرفی اکسید سیلیس

^۱ Calcium Silicate Hydrate (CSH)

جدول ۳- تجزیه شیمیایی نانوسیلیس مصرفی در تحقیق

Element	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	Cl	K2O	CaO	TiO2	V2O5	Cr2O3	MnO
Wt.%	1.41	<0.01	<0.01	88.036	<0.01	1.021	<0.01	<0.01	0.033	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Fe2O3	CoO	NiO	CuO	ZnO	Ga	Ge	As2O3	Se	Br	Rb2O	SrO	Y
Wt.%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	ZrO2	Nb2O5	Mo	Ag	Cd	SnO2	Sb2O5	Te	I	Cs	Ba	La	Ce
Wt.%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Element	Pr	Nd	Hf	Ta2O5	WO3	Hg	Tl	PbO	Bi	Th	U		LOI
Wt.%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		9.5

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

طرح مخلوط بتن، روند تعیین نسبت اجزای بتن است به نحوی که بتن حد امکان مقرون به صرفه شود و الزامات لازم شامل خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام را برآورده نماید. طرح اختلاط به مفهوم فرایندی است که طی آن ترکیب مناسب اجزای بتن، طبق مشخصات فنی داده شده، تعیین گردد. در این بخش، پس از مطالعه و جستجو در تحقیقات گذشته نسبت جایگزینی میکروسیلیس به ۱۰٪ و نانوسیلیس به ۱/۵٪ وزنی سیمان محدود شد. در این تحقیق برای مقایسه و بررسی نمونه‌ها، ابتدا طرح مرجع بدون هیچ گونه افزودنی و سپس دو طرح اختلاط با جایگزینی میکروسیلیس با درصدهای ۵ و ۱۰ و سه طرح اختلاط با جایگزینی نانوسیلیس با درصدهای ۱/۵، ۱ و ۱/۵ با سیمان ساخته شد. برای حصول نتیجه بهتر خواص مکانیکی بتن و مقایسه نتایج طرح‌ها با یکدیگر، سه طرح اختلاط با افزودن همزمان میکروسیلیس و نانوسیلیس نیز ساخته شدند. این سه طرح به صورت، ۵٪ نانوسیلیس و ۵٪ میکروسیلیس، ۱٪ نانوسیلیس و ۵٪ میکروسیلیس و در نهایت ۱/۵٪ نانوسیلیس و ۱۰٪ میکروسیلیس به صورت جایگزین با سیمان ساخته شدند. روش نام-گذاری طرح‌های اختلاط به این صورت است که SF، M و NS به ترتیب بیانگر نمونه‌های مرجع، حاوی میکروسیلیس و حاوی نانوسیلیس می‌باشد. در طرح‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس عدد پس از شاخص‌ها نشانگر درصد استفاده از این مواد به عنوان جایگزین با سیمان است. به طور مثال CSF5 یعنی در این طرح اختلاط ۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان نمونه مرجع شده یا در CNS0.5، ۰/۵٪ نانوسیلیس و در خصوص طرح اختلاط، CSF10NS1.5، ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس جایگزین سیمان در طرح مرجع شده است. جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق برای یک متر مکعب بتن در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۱-۵- فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ها، آب مصرفی در بتن را بدون آنکه در کشش سطحی آب تأثیر بگذارند، روان می‌کنند و به همین دلیل هوای اضافی وارد بتن نمی‌شود و آب مخلوط شده با فوق روان کننده، یک لایه لغزنده بین ذرات سیمان و دانه‌های سنگی ایجاد می‌کند و اصطکاک بین آنها را کم کرده و چسبندگی ذرات را افزایش می‌دهد. فوق روان کننده‌ها در ایران براساس استاندارد ۲۹۳۰ ساخته می‌شوند. فوق روان کننده مصرفی در ساخت بتن‌های تحقیق با نام تجاری رئوبیلت-۱۵۶۱ برای افزایش کارایی بتن طراحی شده است که کاهش شدید مقدار نسبت آب به سیمان را به دنبال دارد. این ماده ذرات ریز موجود در مخلوط بتن را پخش کرده و سبب می‌شود که آب موجود در مخلوط به نحو مؤثرتری عمل کند. کاهش آب مصرفی در بتن، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت بتن می‌شود. تولید این فوق روان کننده بر اساس استاندارد ۲۹۳۰ ایران و استاندارد ASTM C494-G ساخته شده است [۳۳].

مشخصات فنی فوق روان کننده در جدول ۴ داده شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی فوق روان کننده رئوبیلت ۱۵۶۱ [۳۴]

مشخصه	نوع/ مقدار
شکل ظاهری	مایع
رنگ	قهوه‌ای
وزن مخصوص g/cm^3	1.15 ± 0.05
یون کلر	کمتر از ۰/۱ درصد وزنی
pH	7 ± 1

۲-۱-۶- آب

آب مصرفی در تحقیق حاضر آب شرب شهر اهواز بود.

¹ Reobilt-561

جدول ۵- جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق

مقدار مصالح (kg/m ³)							نسبت جایگزینی (%)		نام طرح	
میکروسیلیس	نانوسیلیس	ماسه شسته شوستر	شن ۳/۴"	شن ۳/۸"	فوق روان کننده	آب	سیمان	نانوسیلیس		میکروسیلیس
۰	۰	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۳۰۰	۰	۰	M
۱۵	۰	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۸۵	۰	۵	CSF5
۳۰	۰	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۷۰	۰	۱۰	CSF10
۰	۳	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۹۷	۰/۵	۰	CNS0.5
۰	۱/۵	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۹۸/۵	۱	۰	CNS1
۰	۴/۵	۸۸۹	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۹۵/۵	۱/۵	۰	CNS1.5
۱۵	۱/۵	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۳۸/۵	۰/۵	۵	CSF5CNS0.5
۱۵	۳	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۸۲	۱	۵	CSF5NS1
۳۰	۴/۵	۸۹۸	۶۵۸/۲	۴۳۸/۸	۶	۱۰۵	۲۶۵/۵	۱/۵	۱۰	CSF10NS1.5

انجام شود. در هر دو نوع از قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی، مخلوط بتن باید در سه لایه ریخته شود. به این صورت که هر لایه حدود یک سوم ارتفاع قالب را پر کند و با استفاده از چکش مخصوص به میزان ۲۵ ضربه کوبیده شود و پس از کوبش هر لایه، با چکش لاستیکی مخصوص به دور تا دور قالب ۱۰ ضربه زده شد تا عمل تراکم صورت گیرد و هوای بتن خارج شده و خلل و فرجی در بتن باقی نماند. در ادامه پس از کوبش لایه سوم، سطح بتن را با خط کش صاف کرده و نمونه‌ها به محل عمل‌آوری منتقل شدند و به مدت ۲۴ ساعت زیر پوشش مرطوب قرار گرفتند. پس از گذشت این زمان قالب‌ها را باز کرده و نمونه‌ها خارج شدند و تا زمان آزمایش در حوضچه عمل‌آوری با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. عمل‌آوری در حوضچه‌های آب به صورت غرقاب انجام شد. در جدول ۶ مشخصات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی.

۲-۳- ساخت بتن، نمونه‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها
ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM C192/C192M-07 و ACI304R-00 انجام شده است [۳۶ و ۳۵]. برای آماده شدن مخلوط ابتدا شن، سیمان، ماسه و نصف میزان آب مصرفی در مخلوط‌کن ریخته شده و حدود ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند. سپس نصف دیگر آب مصرفی به همراه فوق روان‌کننده مخلوط شده و به درون مخلوط‌کن به آرامی ریخته شد و حدود ۵ دقیقه اختلاط ادامه یافت. در اختلاط‌های حاوی میکروسیلیس و یا نانوسیلیس، این مواد به همراه سیمان به مخلوط‌کن اضافه می‌شوند. پس از آماده شدن مخلوط براساس استاندارد ASTM C172 نمونه‌گیری از بتن برای انجام آزمایش‌های مربوطه صورت گرفت. ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها با روغن مخصوص چرب شدند تا پس از سخت شدن بتن، جدا شدن نمونه‌ها از قالب‌ها به راحتی

جدول ۶- مشخصات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

شرایط عمل‌آوری	تعداد نمونه	سن نمونه (روز)	نوع نمونه و ابعاد (سانتی‌متر)	تعداد طرح	آزمایش
غرقاب	۳	۷	مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵	۹	مقاومت فشاری
غرقاب	۳	۲۸			
غرقاب	۳	۹۱			
غرقاب	۲	۲۸	استوانه ۳۰*۱۵		مقاومت کششی
غرقاب	۲	۲۸	استوانه ۳۰*۱۵		ضریب ارتجاعی استاتیکی

۳- آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش اسلامپ

برای تعیین اسلامپ بتن از روش ذکر شده در استاندارد ASTM C143/C143 M-10 و استاندارد ایران به شماره ۳۲۰۳-۲ استفاده شد [۳۷]. تعیین اسلامپ به منظور سنجش میزان روانی بتن یا تعیین شل یا سفت بودن بتن تازه انجام می‌گیرد. برای بتن‌های تازه‌ای که تغییرات اسلامپ بعد از ۱ دقیقه هم‌چنان ادامه دارد، این آزمایش مناسب نیست. محدوده مناسب برای تعیین روانی بتن تازه، اسلامپ بین ۱۰ تا ۲۱۰ میلی‌متر می‌باشد. برای محاسبه روانی بتن‌های با اسلامپ خارج از این محدوده باید از روش‌های دیگر استفاده کرد. در این آزمایش قالب‌های مخروطی شکل به ارتفاع ۳۰، قطر ۲۰ در پایین و قطر ۱۰ سانتی‌متر در بالا، با سه لایه بتن که هر لایه با ۲۵ ضربه به صورت مارپیچ و کج (از محیط به سمت مرکز) متراکم شده، بتن‌ریزی شدند. بعد از تراکم و صاف نمودن نمونه، قالب به آرامی و بدون چرخش در امتداد عمودی به طرف بالا کشیده و خارج می‌شود. اختلاف ارتفاع بتن قبل و بعد از برداشتن قالب، عدد اسلامپ می‌باشد.

۳-۲- آزمایش وزن مخصوص بتن در حالت تازه

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C138/C138M-10a و استاندارد ایران به شماره ۳۲۰۳-۶ انجام شد [۳۸]. این روش آزمایش، تعیین وزن مخصوص بتن تازه را پوشش می‌دهد. این آزمایش برای پایش صحت طرح مخلوط و یا یکنواختی اختلاط بتن انجام می‌شود که نیاز به پیمانانه مخصوص دارد.

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881-116 انجام شده است [۳۹]. به این صورت که، نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتی‌متر پس از عمل‌آوری به مدت ۷، ۲۸ و ۹۱ روز، از حوضچه خارج شده و در دستگاه جک بتن‌شکن با سرعت بارگذاری kg/s ۱۳۵۰ قرار داده تا حداکثر نیروی قابل تحمل توسط به نمونه به دست آید. مقاومت فشاری نمونه با تقسیم حداکثر نیروی وارده طی آزمایش به سطح مقطع آن محاسبه می‌شود. از هر طرح اختلاط در هر سن دارای ۳ نمونه تهیه شده که میانگین نتایج آنها به عنوان مقاومت فشاری سن مربوطه منظور گردید.

۳-۴- آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن

آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن بر اساس استاندارد ASTM C496-M-04 انجام پذیرفت [۴۰]. نمونه استوانه‌ای با ارتفاع و قطر به ترتیب ۳۰ و ۱۵ سانتی‌متر پس از عمل‌آوری در آب در سن ۲۸ روزه از حوضچه خارج شده و این آزمایش با استفاده از جک بتن‌شکن با سرعت بارگذاری kg/s ۹۴۰ انجام شد. در ضمن، تعداد نمونه برای هر طرح اختلاط ۲ عدد بوده و نتایج نهایی، میانگین آنها می‌باشد. مقدار مقاومت کششی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$T = 2P / \pi Ld \quad (1)$$

در رابطه (۱)، T بیانگر مقاومت کششی دونیم شدن بر حسب kg/s²، P حداکثر بار اعمال شده بر حسب kg، L طول آزمون بر حسب cm و d قطر آزمون بر حسب cm می‌باشند.



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمونه استوانه‌ای استاندارد تحت آزمایش کششی به روش دونیم شدن. الف: نمونه اصلی ب: نمونه شکسته شده

۳-۵- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

می‌باشد، ثبت شوند. در این تحقیق، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بر اساس استاندارد ASTM-C-192/C-192-M ساخته شدند و تا سن ۲۸ روزه در حوضچه‌های مخصوص عمل‌آوری، قرار داشته و انجام این آزمایش از هر طرح اختلاط دو نمونه استفاده شدند.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.00005)} \quad (2)$$

در رابطه ۲، E بیانگر ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن، S₂ تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی، S₁ تنش متناظر با کرنش طولی $\epsilon_1 = 0.00005$ و ϵ_2 کرنش متناظر با تنش S₂ می‌باشد.



شکل ۲- نمونه تحت آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

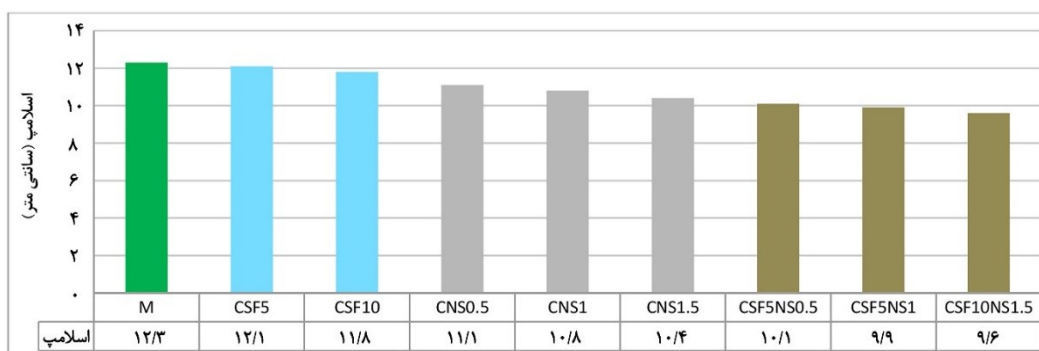
۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- تحلیل نتایج اسلامپ

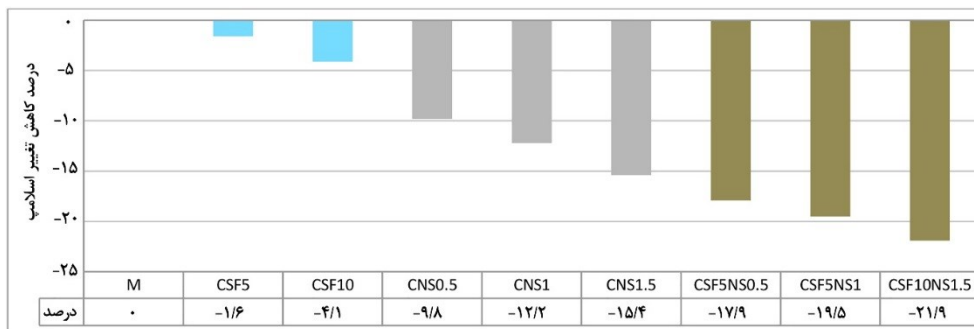
نتایج آزمایش اسلامپ طرح‌های ساخته شده در جدول ۷ داده شده است. این نتایج در نمودار ۴ به صورت میله‌ای ارائه شده‌اند. درصد تغییر اسلامپ طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط مرجع در نمودار ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۷- نتایج آزمایش اسلامپ (cm)

طرح	M	CSF5	CSF10	CNS0.5	CNS1	CNS1.5	CSF5NS0.5	CSF5NS1	CSF10NS1.5
اسلامپ	۱۲/۳	۱۲/۱	۱۱/۸	۱۱/۱	۱۰/۸	۱۰/۴	۱۰/۱	۹/۹	۹/۶



نمودار ۴- تغییرات اسلامپ در طرح‌های تحقیق



نمودار ۵- درصد کاهش اسلامپ طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع

۴-۱-۱- اسلامپ طرح‌های حاوی میکروسیلیس

در نمودار ۴ دیده می‌شود که در طرح‌های حاوی میکروسیلیس با افزایش درصد جایگزینی، کاهش اسلامپ نسبت به طرح اختلاط مرجع وجود دارد. همچنین از نمودار ۵ می‌توان دریافت که با افزایش میزان جایگزینی میکروسیلیس از ۵٪ به ۱۰٪، کاهش اسلامپ از ۱/۵٪ به ۴٪ نسبت به طرح مرجع رسیده است که این کاهش را می‌توان به ریز بودن ذرات این پوزولان و نیز افزایش نیاز به آب اختلاط آن نسبت داد.

۴-۱-۲- اسلامپ طرح‌های حاوی نانوسیلیس

همان‌طور که از نمودار ۴ مشخص است تمام طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع کاهش داشته‌اند. در طرح‌های حاوی نانوسیلیس با افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۰٪، کاهش اسلامپ نسبت به طرح مرجع از حدود ۱۰٪ به ۱۵/۵٪ می‌رسد و روند کاهش تقریباً به صورت خطی می‌باشد. میزان کاهش این پوزولان نسبت به میکروسیلیس بیش‌تر بوده است که دلیل آن می‌تواند ریزی ذرات در مقیاس نانو و درصد خلوص بیش‌تر سیلیس در نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس باشد.

۴-۱-۳- اسلامپ طرح‌های ترکیبی

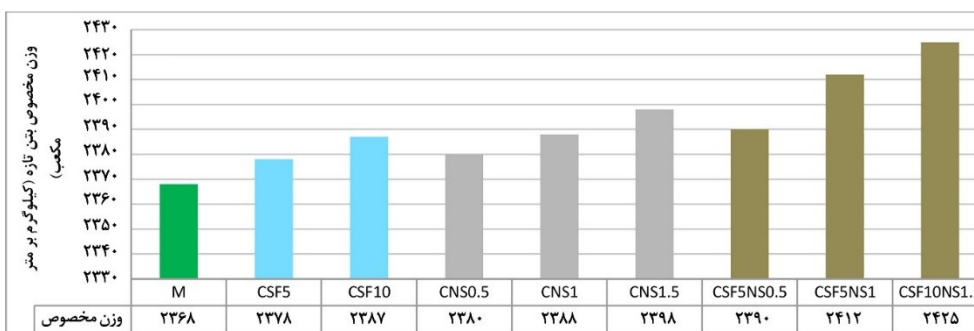
در طرح‌های اختلاط که میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت هم‌زمان به کار رفته کاهش شدید اسلامپ به میزان ۱۸٪ تا ۲۲٪ نسبت به طرح مرجع وجود دارد که این کاهش به مراتب بیش‌تر از جایگزینی هر یک از آن‌ها به صورت جداگانه است. دلیل احتمالی این کاهش آن است که میکروسیلیس و نانوسیلیس نیاز به آب اختلاط را افزایش می‌دهند و از طرفی وجود این دو ماده باعث شده که خلل و فرج بین ذرات سیمان و سنگ‌دانه‌ها پر شده و همچنین همگنی مخلوط بتن حاوی این دو پوزولان به مراتب بیش‌تر از طرح می‌باشد.

۴-۲- تحلیل نتایج وزن مخصوص بتن تازه

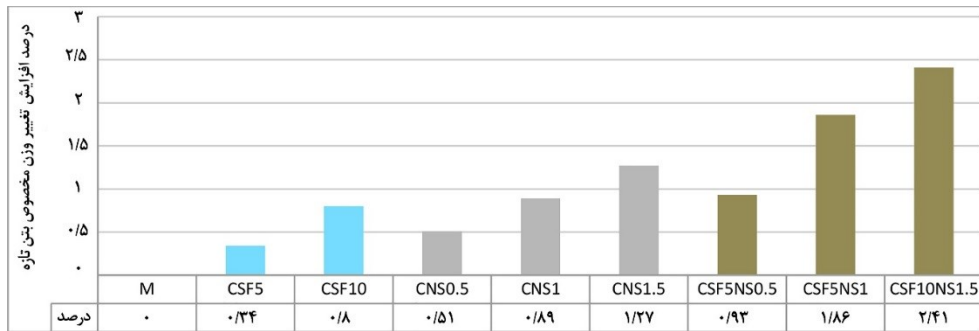
نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه طرح اختلاطها در جدول ۸ داده شده است؛ این نتایج در نمودار ۶ به صورت میله‌ای نمایش داده شدند. درصد تغییر وزن مخصوص بتن تازه طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع در نمودار ۷ ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه (kg/m^3)

طرح	M	CSF5	CSF10	CNS0.5	CNS1	CNS1.5	CSF5NS0.5	CSF5NS1	CSF10NS1.5
وزن مخصوص	۲۳۷۶	۲۳۶۸	۲۳۸۷	۲۴۲۰	۲۴۱۲	۲۳۹۸	۲۳۸۷	۲۳۹۴	۲۴۰۹



نمودار ۶- تغییرات وزن مخصوص بتن تازه در طرح‌های تحقیق



نمودار ۷- درصد افزایش وزن مخصوص بتن تازه طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع

۴-۲-۱- وزن مخصوص طرح‌های حاوی میکروسیلیس

با توجه به نمودار ۶ با افزایش میزان میکروسیلیس در مخلوط بتن، مقدار وزن مخصوص بتن تازه افزایش می‌یابد. در نمودار ۷ با افزایش میکروسیلیس از ۵٪ به ۱۰٪ میزان افزایش وزن مخصوص بتن تازه نسبت به طرح مرجع از ۰/۳۵٪ به ۰/۸٪ می‌رسد. این افزایش به دلیل نرمی زیاد این پوزولان است که توانسته حفره‌های میکروسکوپی خمیر سیمان را پر کرده و بتن کاملاً یک‌دست و توپری را فراهم کند.

۴-۲-۲- وزن مخصوص طرح‌های حاوی نانوسیلیس

در نمودار ۶ مشخص است که با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس در مخلوط بتن، مقدار وزن مخصوص بتن تازه افزایش می‌یابد. با افزایش نانوسیلیس از ۵٪ به ۱۵٪، در نمودار ۷ مشهود است که درصد افزایش وزن مخصوص بتن تازه نسبت به طرح مرجع از ۵٪ به ۱/۲۳٪ تغییر می‌کند. اینکه افزایش وزن مخصوص بتن تازه نسبت به طرح‌های حاوی میکروسیلیس بیش تر بوده به دلیل نرمی بیش تر و ریزتر بودن ذرات نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس می‌تواند باشد.

۴-۲-۳- وزن مخصوص طرح‌های ترکیبی

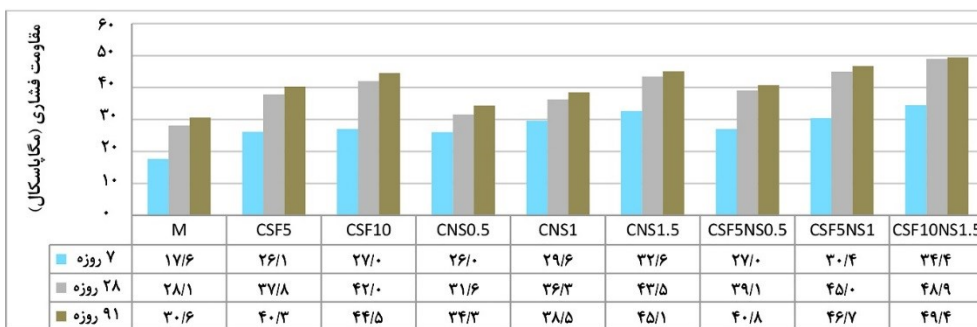
در طرح‌های اختلاط حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت همزمان نیز افزایش وزن مخصوص بتن تازه مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار ۷ میزان افزایش وزن مخصوص بتن تازه طرح اختلاط‌های ترکیبی نسبت به طرح مرجع با افزایش درصدهای جایگزینی افزایش یافته و بین ۱٪ تا ۲/۵٪ می‌باشد. دلیل افزایش بیش تر وزن مخصوص بتن تازه در طرح‌های ترکیبی نسبت به طرح‌هایی که میکروسیلیس یا نانوسیلیس به تنهایی به کار برده شده را می‌توان به ترکیب مناسب هر دو پوزولان و نقش مکمل آن‌ها در بتن نسبت داد.

۴-۳- مقاومت فشاری بتن

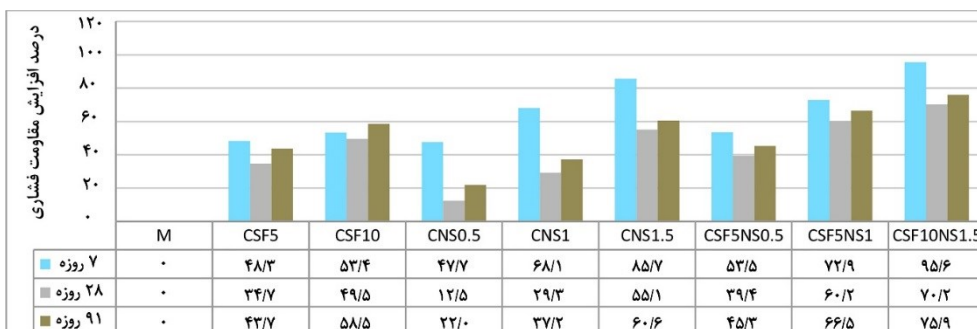
جدول ۹ حاوی نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه می‌باشد. این نتایج در نمودار ۸ به صورت میله‌ای نمایش داده شده است. تغییر مقاومت فشاری طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع در نمودار ۹ ارائه گردید.

جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد بتنی (مگاپاسکال)

نام طرح	سن نمونه (روز)		
	۷	۲۸	۹۱
M	۱۷/۵	۲۸/۰	۳۰/۶
CSF5	۲۶/۰	۳۷/۸	۴۰/۳
CSF10	۲۶/۹	۴۱/۹	۴۴/۴
CNS0.5	۲۵/۹	۳۱/۵	۳۴/۲
CNS1	۲۹/۵	۳۶/۳	۳۸/۵
CNS1.5	۳۲/۶	۴۳/۵	۴۵/۰
CSF5NS0.5	۲۶/۹	۳۹/۱	۴۰/۷
CSF5NS1	۳۰/۳	۴۴/۹	۴۶/۷
CSF10NS1.5	۳۴/۳	۴۸/۹	۵۱/۳



نمودار ۸- تغییرات مقاومت فشاری در طرح های تحقیق



نمودار ۹- درصد افزایش مقاومت فشاری طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع

فشاری را در تمام سنین داشته همانطور که حیدری و رضاشهرضا نیز به این نسبت بهینه رسیدند [۳].

۴-۳-۳- مقاومت فشاری طرح های ترکیبی

در این طرح ها، روند کسب مقاومت با افزایش جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس افزایش داشته است. کسب مقاومت اولیه در این طرح ها نسبت به طرح مرجع بسیار عالی بوده است، به گونه ای که در طرح CSF10NS1.5 در سن ۷ روزه درصد افزایش مقاومت نسبت به طرح مرجع به ۹۵/۶٪ درصد رسیده است که این بهترین نتیجه در بین ۸ طرح اختلاط نسبت به طرح مرجع می باشد. عامل افزایش مقاومت فشاری طرح های ترکیبی را می توان در کاهش منافذ بین ذرات سیمان در اثر قرارگیری ذرات میکروسیلیس و نانوسیلیس در این منافذ و تشکیل ساختار منسجم دانست [۴۳].

۴-۳-۴- تحلیل روند رشد مقاومت فشاری نمونه ها با زمان

به منظور گزارش نتایج روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه های هر طرح اختلاط نسبت به سن نمونه ها، از چهار دسته روابط خطی، نمایی، توانی و لگاریتمی با ارائه ضریب همبستگی آنها استفاده شده که در جدول ۹ ارائه گردیده اند. از جدول مشهود است که بهترین رابطه رگرسیون که می تواند با دقت بالایی روند رشد مقاومت نمونه ها را با زمان تعیین نماید، رابطه لگاریتمی می باشد.

۴-۳-۱- مقاومت فشاری طرح های حاوی میکروسیلیس

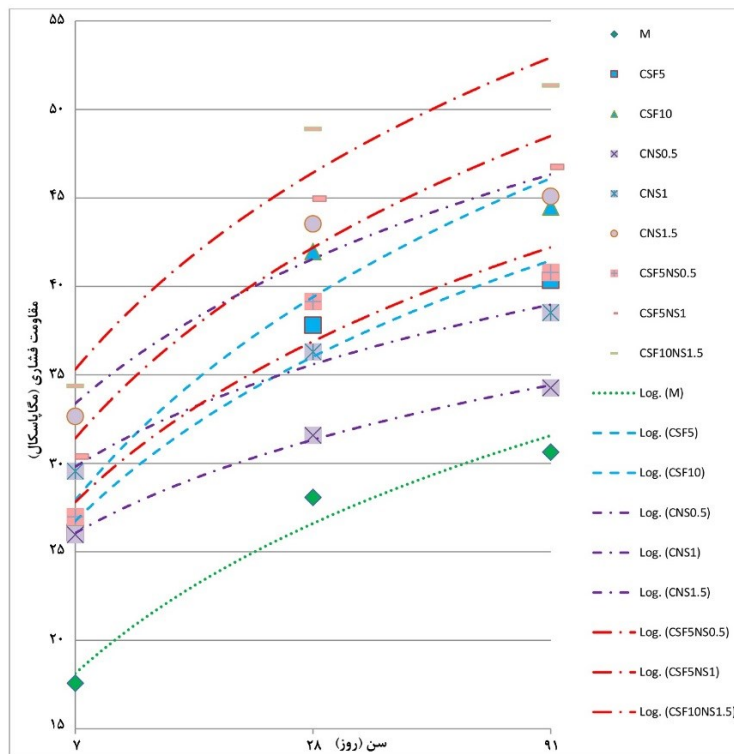
از نمودار ۸ کاملاً مشخص است که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، مقاومت فشاری افزایش یافته است. با توجه به نمودار ۹ با افزایش جایگزینی از ۵ به ۱۰ درصد میکروسیلیس، مقاومت فشاری نسبت به طرح اختلاط مرجع، در سن ۷ روزه از ۴۸/۳۵٪ به ۵۳/۳۶٪ افزایش داشته و در سن ۲۸ روزه این افزایش از ۳۴/۶۶٪ و ۴۹/۵۲٪ در ۹۱ روزه از ۴۳/۷۱٪ از ۵۸/۴۶٪ می باشد. همان طور که مشاهده می شود میزان افزایش مقاومت اولیه یا همان ۷ روزه نسبت به طرح اختلاط مرجع بسیار چشمگیر است اما در سن ۲۸ روز میزان افزایش کم تر بوده و در سن ۹۱ روزه با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس میزان افزایش از هر دو سن دیگر بیش تر بوده است. مقاومت فشاری نمونه های حاوی میکروسیلیس با افزایش نسبت جایگزینی تا میزان ۱۰ درصد افزایش یافته که این مهم در تحقیق عدیلی و اکبرزاده شهرستانک نیز بررسی و به اثبات رسیده است [۴۲].

۴-۳-۲- مقاومت فشاری طرح های حاوی نانوسیلیس

با توجه به نمودار ۸ در طرح های حاوی نانوسیلیس افزایش مقاومت مشهود است. افزایش مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانوسیلیس با افزایش درصد جایگزینی به صورت تصاعدی افزایش داشته است. جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس با نسبت بیش ترین مقاومت

جدول ۱۰- روابط و ضریب رگرسیون رشد مقاومت فشاری با سن نمونه‌ها در طرح اختلاط‌های تحقیق

ضریب همبستگی				کد طرح
رابطه رگرسیون				
لگاریتمی	توانی	نمایی	خطی	
۰/۹۶۵۵	۰/۹۴۹۶	۰/۸۶۴۹	۰/۸۹۰۸	M
$y=12/237\ln(x)+18/121$	$y=23/0.4x^{0.5239}$	$y=14/188e^{0.2778x}$	$y=6/53x+12/37$	
۰/۹۵۸۲	۰/۹۴۵۸	۰/۸۵۵۹	۰/۸۷۸۶	CSF5
$y=13/40.3\ln(x)+26/735$	$y=26/689x^{0.4119}$	$y=22/0.67e^{0.2181x}$	$y=7/13x+20/48$	
۰/۹۴۳۲	۰/۹۳۰۲	۰/۸۳۵۷	۰/۸۵۴۹	CSF10
$y=16/562\ln(x)+27/912$	$y=27/794x^{0.4754}$	$y=22/378e^{0.2503x}$	$y=8/76x+20/283$	
۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۳۱	۰/۹۴۶۵	۰/۹۶	CNS0.5
$y=7/60.49\ln(x)+26/0.61$	$y=26/1x^{0.2554}$	$y=23/0.4e^{0.1385x}$	$y=4/145x+22/313$	
۰/۹۸۲۲	۰/۹۷۵۱	۰/۹۰۷۷	۰/۹۲۱۶	CNS1
$y=8/2343\ln(x)+29/812$	$y=29/825x^{0.2773}$	$y=26/521e^{0.1325x}$	$y=4/485x+25/82$	
۰/۹۳۴۵	۰/۹۲۶۵	۰/۸۳۰۳	۰/۸۴۱۹	CNS1.5
$y=11/786\ln(x)+33/381$	$y=33/317x^{0.3067}$	$y=28/981e^{0.1613x}$	$y=6/215x+27/99$	
۰/۹۳۱۹	۰/۹۲۲۲	۰/۸۲۴۱	۰/۸۳۸۲	CSF5NS0.5
$y=13/106\ln(x)+27/809$	$y=27/712x^{0.3935}$	$y=23/186e^{0.2067x}$	$y=6/90.5x+21/827$	
۰/۹۲۷	۰/۹۱۷۴	۰/۸۱۷۴	۰/۸۳۱	CSF5NS1
$y=15/551\ln(x)+31/412$	$y=31/279x^{0.4107}$	$y=25/985e^{0.2154x}$	$y=8/18x+24/34$	
۰/۹۴۴۲	۰/۹۳۳۵	۰/۸۴۰۵	۰/۸۵۶۵	CSF10NS1.5
$y=16/0.46\ln(x)+35/303$	$y=35/217x^{0.3804}$	$y=29/594e^{0.2006x}$	$y=8/49x+27/90.7$	



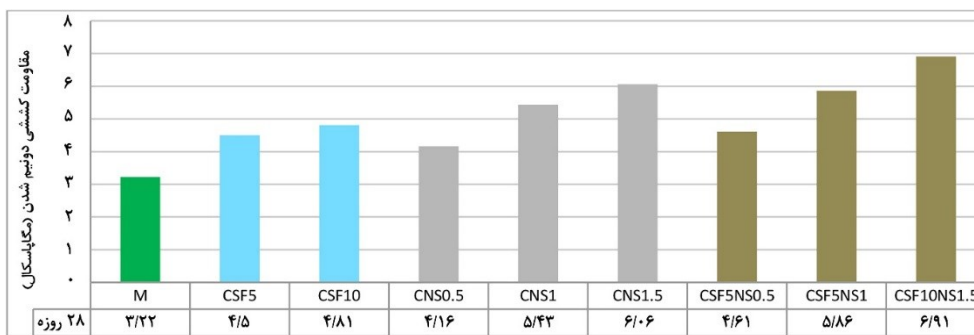
نمودار ۱۰- رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها بر حسب زمان در طرح اختلاط‌های تحقیق بر اساس روابط رگرسیون لگاریتمی

تا ۲۸ روزه نسبت به طرح مرجع بیش تر بوده است. این روند افزایش بعد از سن ۲۸ روزه نیز ادامه دارد با این تفاوت که نسبت به قبل از ۲۸ روز نرخ آن کم تر می باشد. در نمودار ۱۰ می توان به اختلاف منحنی طرح CSF10NS1.5 نسبت به طرح های دیگر و طرح مرجع توجه کرد که نشان دهنده روند افزایش بیش تر مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه ها نسبت به دیگر طرح ها می باشد.

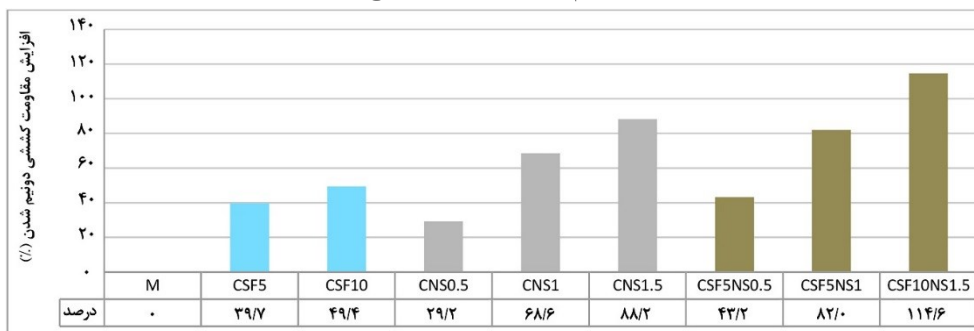
۴-۴-۴- مقاومت کششی دو نیم شدن

نتایج حاصل از این آزمایش در نمودار ۱۱ به صورت میله ای ارائه گردید. در نمودار ۱۲ تغییر نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن طرح اختلاط های نسبت به طرح مرجع نشان داده شده است.

در نمودار ۱۰ مشخص است که افزایش نسبت جایگزینی میکروسیلیس با سیمان روند افزایش مقاومت فشاری نسبت به زمان را به طور کلی افزایش داده و این روند افزایش در محدوده سنی ۷ تا ۲۸ روزه بیش تر مشهود است. با توجه به نمودار ۱۰ و از مقایسه روند افزایش مقاومت فشاری بر اساس سن نمونه ها، در طرح های حاوی نانوسیلیس با طرح مرجع، روشن است که افزایش نانوسیلیس سبب رشد روند افزایش مقاومت نمونه ها شده است. در محدوده زمانی ۷ تا ۲۸ روزه روند افزایش مقاومت نسبت به بعد از سن ۲۸ روزه، با شیب بیش تری همراه است. ملاحظه می شود که روند افزایش مقاومت فشاری طرح های ترکیبی حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت هم زمان در محدوده سنین ۷



نمودار ۱۱- تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه ها در طرح اختلاط های تحقیق در سن ۲۸ روزه



نمودار ۱۲- درصد افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه ها در طرح اختلاط ها نسبت به طرح مرجع

۴-۴-۲- مقاومت کششی دو نیم شدن طرح های حاوی نانوسیلیس

در این طرح ها نیز افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن کاملاً مشهود است. افزایش مقاومت کششی طرح های حاوی نانوسیلیس نسبت به طرح مرجع همان طور که در نمودار ۱۲ مشخص است به صورت تصاعدی بوده به این صورت که، با جایگزینی نانوسیلیس به میزان ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪، مقاومت کششی به ترتیب حدود ۳۰٪، ۶۹٪ و ۸۸٪ نسبت به طرح مرجع بهبود یافته است.

۴-۴-۱- مقاومت کششی دو نیم شدن طرح های حاوی میکروسیلیس

طبق از نمودار ۱۱ دیده می شود مقاومت کششی دو نیم شدن تمام طرح ها افزایش داشته اند. در نمودار ۱۲ مشخص است که با افزایش میکروسیلیس از ۵٪ به ۱۰٪ میزان افزایش مقاومت کششی نسبت به طرح مرجع از حدود ۴۰٪ به ۵۰٪ می رسد. این موضوع بیانگر آن است که میکروسیلیس در بهبود مقاومت کششی دو نیم شدن بتن نقش به سزایی داشته است و دلیل آن شرکت در فرایند هیدراتاسیون سیمان و هم چنین کمک به همگنی هر چه بیش تر مخلوط بتن می باشد.

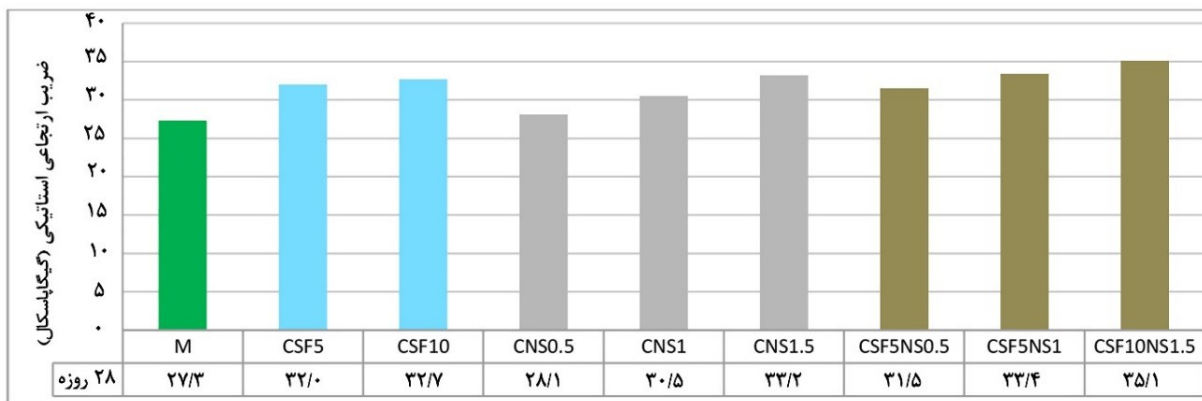
در مخلوط بتن نتایج بسیار بهتری نسبت به مصرف هر کدام از آنها به صورت جداگانه دارد.

۴-۵- ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن

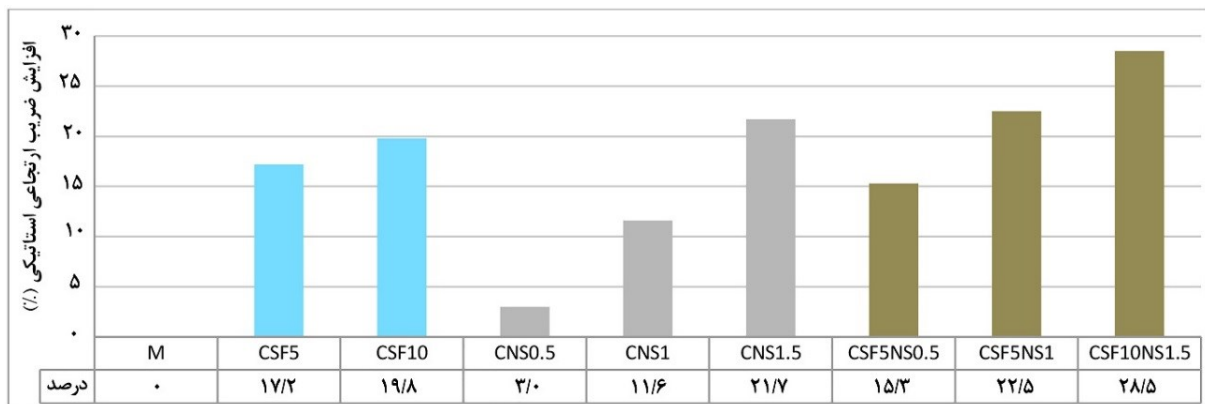
نتایج به دست آمده از این آزمایش برای همه طرح اختلاط‌های تحقیق حاضر در نمودار ۱۳ ارائه شده است. تغییر نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع در نمودار ۱۴ نمایش داده شده است.

۴-۳- مقاومت کششی دو نیم‌شدن طرح‌های ترکیبی

طبق از نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود با افزودن هم‌زمان میکروسیلیس و نانوسیلیس به مخلوط بتن میزان افزایش مقاومت کششی دو نیم‌شدن بسیار چشم‌گیر بوده است. در طرح اختلاط CSF5NS0.5 افزایش مقاومت کششی دو نیم‌شدن نسبت به طرح مرجع ۴۳٪ می‌باشد که این افزایش در طرح اختلاط CSF5NS1 به ۸۲٪ و در CSF10NS1.5 به بالاترین میزان یعنی ۱۱۴٪ رسیده است. این افزایش مقاومت کششی ثابت می‌کند که ترکیب این دو پوزولان



نمودار ۱۳- تغییرات ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌ها در طرح اختلاط‌های تحقیق در سن ۲۸ روزه



نمودار ۱۴- درصد افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌ها در طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع

۴-۵-۲- ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های حاوی نانوسیلیس

در طرح اختلاط‌های حاوی نانوسیلیس با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس، افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی رخ داده است. در طرح اختلاط‌های حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس، افزایش این ضریب نسبت به طرح مرجع به ترتیب حدود ۳، ۱۱ و ۲۱ درصد می‌باشد.

۴-۵-۱- ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های حاوی میکروسیلیس

طبق در نمودار ۱۳ دیده می‌شود که ضریب ارتجاعی استاتیکی تمام طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع افزایش داشته‌اند. در طرح اختلاط‌های حاوی میکروسیلیس با افزایش درصد جایگزینی، با توجه به نمودار ۱۴، افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی را به همراه دارد. میزان افزایش ضریب ارتجاعی CSF10 نسبت به طرح مرجع حدود ۲۰٪ می‌باشد.

- ۴-۵-۳- ضریب ارتجاعی استاتیکی طرح‌های ترکیبی با توجه به نمودار ۱۳، با افزایش همزمان درصد جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس در طرح اختلاط‌ها، ضریب ارتجاعی استاتیکی افزایش یافته است. میزان افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی در طرح CSF5NS0.5 نسبت به طرح مرجع ۱۵٪ می‌باشد. این در حالی است که در طرح اختلاط CSF5NS1 به ۲۲/۵٪ و در طرح CSF10NS1.5 به بالاترین میزان افزایش یعنی ۲۸/۵٪ می‌رسد.

۴-۶- نتیجه‌گیری کلی

- به‌طور کلی با افزودن جداگانه میکروسیلیس یا نانوسیلیس به مخلوط بتن، بهبود خواص مکانیکی به میزان قابل توجهی نبوده، اما با استفاده ترکیبی از این دو پوزولان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، بهبود خواص مکانیکی به صورت چشم‌گیری رخ داده است که این نتیجه بیانگر آن است که استفاده توأم میکروسیلیس و نانوسیلیس به بهبود فرایند هیدراتاسیون، کاهش خلل و فرج بتن و افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی و همین‌طور ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن منجر شده و در نهایت بتن‌هایی با عملکرد بالاتر حاصل شده است.

۵- نتایج

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر هستند:

۵-۱- طرح‌های حاوی میکروسیلیس

- با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، اسلامپ در تمام طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع، کاهش یافت.
- با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، وزن مخصوص بتن‌ها در حالت تازه نسبت به طرح مرجع، به میزان ناچیزی افزایش داشته است.
- با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت فشاری طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع در تمام سنین افزایش داشته‌اند.
- افزایش مقاومت فشاری در سن ۷ روزه بسیار بیش‌تر از سنین بعد از ۷ روز بوده است. این نتیجه نشان‌دهنده فعالیت پودر میکروسیلیس در هیدراتاسیون سیمان و بهبود ناحیه خمیری بتن می‌باشد که منجر به افزایش مقاومت در سن ۷ روزه می‌شود.

- میزان افزایش مقاومت فشاری در طرح اختلاط حاوی ۵٪ میکروسیلیس نسبت به طرح مرجع، حدود ۴۸٪ در سن ۷ روزه، ۳۵٪ در سن ۲۸ روزه و ۴۴٪ در سن ۹۱ روزه بوده است.
- با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت کششی دونیم شدن تمام طرح اختلاط‌ها نسبت به طرح مرجع افزایش یافته است.
- در ۵٪ جایگزینی، حدود ۴۰٪ افزایش مقاومت کششی دونیم شدن نسبت به طرح مرجع نتیجه شد.
- در طرح‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس افزایش مقاومت کششی دونیم شدن نسبت به طرح مرجع به حدود ۵۰٪ رسید.
- با افزایش درصد جایگزینی، ضریب ارتجاعی استاتیکی تمام طرح‌ها نسبت به طرح مرجع افزایش داشته است.
- در طرح‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس، حدود ۲۰٪ افزایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نسبت به طرح مرجع نتیجه شد.

۵-۲- طرح‌های حاوی نانوسیلیس

- اسلامپ، در تمام طرح‌ها نسبت به طرح مرجع کاهش داشته، لیکن با افزایش درصد جایگزینی، مقدار کاهش اسلامپ، افزایش یافته است.
- با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس تا ۱٪، وزن مخصوص بتن‌ها در حالت تازه نسبت به طرح مرجع، افزایش ناچیز داشته است.
- با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس به بیش از ۱٪، وزن مخصوص بتن در حالت تازه نسبت به طرح مرجع، حدود ۱/۳٪ افزایش داشته است که قابل توجه نمی‌باشد.
- در جایگزینی ۰/۵٪ نانوسیلیس، میزان افزایش مقاومت نسبت به طرح مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب به میزان ۴۸٪، ۱۲/۵٪ و ۲۲٪ بوده است.
- در جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس، میزان افزایش مقاومت در طرح‌ها نسبت به طرح اختلاط مرجع بسیار زیاد بوده، به گونه‌ای که در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب ۸۵٪، ۵۵٪ و ۶۱٪ بوده است.
- با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس، مقاومت کششی دونیم شدن در تمام طرح اختلاط‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به طرح مرجع، افزایش یافته است.
- در جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس، مقاومت کششی دونیم شدن نسبت به طرح مرجع به میزان ۸۸٪ افزایش داشت.

۶- منابع

- [1]. Kazemi, M.; Nazari Kalehjoub, H., (2015), "Study of the simultaneous effects of microsilica and water to cement ratio on the compressive strength of concrete", the Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management (In Persian).
- [2]. skandari, H.; Hosseini, S., A., (2015), "Corrosion behavior of concrete rebars containing microsilica and air bubbles using TOEFL test", Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management (In Persian).
- [3]. Heydari, A.; Reza Shahreza, M., (2015), "Evaluation of compressive strength of self-compacting concrete containing nanosilica in sulfate and water environment", Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management (In Persian).
- [4]. Sadeghi, R., (2004), "Application of nanostructured materials in the construction industry", the 11th conference of civil students across the country, Hormozgan province (In Persian).
- [5]. Al-Amoudi, O.S.B; Maslehuddin, M and Al-Mana, A.I, (1993), "Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes", Materials Journal, 90(6): pp. 564-570.
- [6]. Qale Noei, M.; Khodabakhshian, A.; Asadi Shamsabadi, A., (2015), "The effect of using marble powder and microsilica wastes as a substitute for cement on the mechanical properties of concrete", the Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management (In Persian).
- [7]. Ramsden, J. Essentials of nanotechnology, Free Book. Net, (2009), Ramoden and ventus publishing.
- [8]. Madan Doost, R.; Alipour Khomeini, A.; Ghasemzadeh, S., H., (2015), "Evaluation of engineering properties of self-compacting copper-containing concrete with different percentages of microsilica and nanosilica", Third International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management (In Persian).
- [9]. Tarighat, A.; Yazdani, S., (2013), "Properties of wollastonite and its effect on the mechanical properties of concrete", Fifth Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran (In Persian).
- [10]. Qing, Y; Zenan, Z; Deyu, K and C. Rongshen, (2007), "Influence of nano-sio₂ addition on properties of hardened cement paste as compared

• با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس، ضریب ارتجاعی استاتیکی در تمام طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع افزایش یافته است؛ بیشترین میزان افزایش نسبت به طرح مرجع ۲۲٪ بود که مربوط به جایگزینی سیمان با ۱/۵٪ نانوسیلیس می‌باشد.

۵-۳- طرح‌های ترکیبی

- اسلامپ، در تمام طرح‌ها نسبت به طرح مرجع کاهش داشته، لیکن با افزایش درصد جایگزینی، مقدار کاهش اسلامپ، افزایش یافته است.
- با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس، وزن مخصوص بتن‌ها در حالت تازه به مقدار ناچیزی افزایش داشت. بیشترین میزان افزایش مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس و به میزان ۲/۵٪ نسبت به طرح مرجع بوده است.
- در طرح حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس، افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح مرجع در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب به میزان ۷۳٪، ۶۰٪ و ۶۶/۵٪ بوده است.
- در طرح حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس، میزان افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح اختلاط مرجع قابل توجه بوده است. میزان افزایش در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه به ترتیب به میزان ۹۶٪، ۷۰٪ و ۷۶٪ بود؛ این طرح به عنوان طرح بهینه معرفی می‌شود.
- بیشترین افزایش مقاومت فشاری در تمام طرح‌های ترکیبی مربوط به سن ۷ روزه بود و با افزایش سن، نرخ افزایش مقاومت کاهش داشت؛ کلاً روند افزایش مقاومت صعودی بوده است.
- با افزایش هم‌زمان درصد جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس، مقاومت کششی دونیم شدن در تمام طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع، افزایش داشته است. بیشترین میزان افزایش مربوط به جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس به میزان ۱۱۴٪ بود.
- با افزایش هم‌زمان درصد جایگزینی میکروسیلیس و نانوسیلیس، ضریب ارتجاعی استاتیکی در تمام طرح اختلاطها نسبت به طرح مرجع، افزایش داشته است؛ بیشترین میزان افزایش مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱/۵٪ نانوسیلیس و به میزان ۲۹٪ بود.

- J.J, (2004), "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement & Concrete Composites*, 26, pp. 347-357.
- [23]. Nuainia, B .; Sangi, M .; Hossein Ali Beigi, M., (2013), "The effect of microsilica on the long-term behavior of self-compacting concrete", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 90-83 (In Persian).
- [24]. Ghasemi, J.; Hosseini Vaez, R., (2017), "Laboratory study of the effect of nanosilica on the strength behavior of concrete", the fourth national conference on recent achievements in civil engineering, architecture and urban planning (In Persian).
- [25]. Hashemi, S.H.; Mohammadi, M., (2015), "Investigation of the effect of nanosilica on self-compacting lightweight concrete in fresh and hardened state", the first national conference on new concrete technologies (In Persian).
- [26]. ASTM C150-99a, "Standard specification for Portland cement", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 1999.
- [27]. ASTM C128-12, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2012.
- [28]. ASTM C127-12, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2012.
- [29]. ASTM C136-06, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 1984.
- [30]. Mostofinejad, D., (2015), *Technology and Concrete Mixing Design*, Arkan Danesh Publications, 42nd Edition, 384 pages (In Persian).
- [31]. Jafari Zadeh, M.; Sohrabi, M.; Morvati, J., (2010), "Study of mechanical properties of concrete containing pozzolanic powder of Bash Aghaj and nanosilica", Fifth Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian).
- [32]. Hosseini, P., (2010), "The effect of nanosilica replacement with cement on the microstructure and strength properties of cement paste and mortar for repair and improvement of concrete structures", *Internal Journal of Concrete Association*, Year 9, No. (In Persian).
- [33]. ASTM C494/C494M-99a, "Standard specification for chemical admixtures for Concrete", American Society for Testing and Materials, 1999.
- [34]. Concrete Pass Company Catalog, p. 64 (In Persian).
- with silica fume," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 3, pp. 539-545.
- [11]. Byung, W.J; Chng, H.K; Ghi, H.T; Jong, B.P, "Characteristics of cement mortar with nano silica particles", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1351-1353, 2007.
- [12]. Lin, K.L; Change, W.C; Lin, D.F; Luo, H.L; Tsai, M.C, (2008), "Effects of nano silica and different ash particle sizes on sludge ash", 88, pp. 708-714.
- [13]. Siddique, R., (2011), Utilization of silica fume in concrete, Review of hardened properties, Resources, Conservation and Recycling, 55, pp. 923-932.
- [14]. Brock, Sh., (2016), "Study of permeability of lightweight concrete containing Leca, perlite and nanosilica in chlorate environment", Master Thesis in Civil Engineering, Mohaghegh Ardabili University (In Persian).
- [15]. Mohammadi, S., (2010), "Using nanosilica additive to produce concrete with special properties", Master Thesis in Civil Engineering, Tafresh University (In Persian).
- [16]. Priyadarshana, T; Dissanayake, R; Mendis, P, (2015), "Effects of Nano Silica, Micro Silica, Fly Ash and Bottom Ash Compressive Strength of Concrete", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9, pp. 1146-1152.
- [17]. sancak, E; Sari, Y.D, (2008), "Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss the light-weight concrete with Silica fume and superplasticizer", *Osman Simsek, Cement & Concrete Composites*, 30, pp. 715-721.
- [18]. Ramezani pour, A.; Moravej Jahromi, M.; Modi, F., (2009), "The effect of nanosilica on mechanical properties and durability of concrete compared to microsilica", 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz (In Persian).
- [19]. Ajay, V; Rajeev, C; Yadav, R.K, (2012), "Effect of micro silica on the strength concrete with ordinary Portland cement", *Research Journal of Engineering Sciences*, Vol. 1, pp. 2278-2281.
- [20]. Rahmani, K; Shamsai, A; Saghafian, B; Saber, P, (2012), "Effect of Watter and Cement Ratio on Compressive Strenght and Abrasion of Microsilica Concrete", *Middle-East Journal of Scientific Research* 12 (8), pp. 1056-1061.
- [21]. Turk, K; Turgut, P; Karatas, M; Benli, A, (2010), "Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Silica Fume/Fly Ach", the 9 International Congress on Advances in Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- [22]. Mazloom, M; Ramezani pour, A.A; Brooks,

- [35]. ASTM C192, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in laboratory", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 1988.
- [36]. ACI Committee 304, "Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete (ACI 304R-00)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 39, 2000.
- [37]. ASTM C143/C143 M-10, "Standard test method for slump of Concrete", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 1978.
- [38]. ISIRI 3203-6, "Determination of density test method fresh Concrete", Institute of Standard and Industrial Research of Iran, 2007.
- [39]. BS EN 12390-03, "Compressive strength of test specimens", British Standard Institution, Testing hardened concrete, part.3, 2009.
- [40]. ASTM C496-M11, "Standard test method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2011.
- [41]. ASTM C496-02, "Standard test method for Static Modulus of Elasticity of Concrete in Compression", ASTM, West Conshohocken, PA, p. 5, 2002.
- [42]. Adili, A.; Akbarzadeh Shahrestanak, Z., (2017), "The effect of combination of microsilica and nanosilica in concrete using native materials of Iranshahr city on the compressive strength of concrete", the sixth national conference and the second international conference on new materials and structures in civil engineering (In Persian).
- [43]. Moghneinejad, M.; Rostami, M.; Akrami, A.; Morvati, J., (2013), "The effect of nanosilica and microsilica composition on the compressive strength of concrete", 7th National Congress of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, Zahedan (In Persian).

Investigation and comparison of the effect of microsilica and nanosilica on the rheological and mechanical properties of concrete

Seyed Fathollah Sajedi *

Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Elmira Heidari

M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abstract

Research records show that the replacement of microsilica and nanosilica improves the mechanical properties of concrete. Cement was replaced with microsilica at 5% and 10%; it was observed that the replacement improved the mechanical properties of concrete, which resulted in 10% better results. Cement was replaced with nanosilica in 0.5%, 1% and 1.5% and three mixes were prepared. In designs containing nanosilica, the increase in compressive strength was greater than in designs containing microsilica. The best results were related to the design containing 1.5% nanosilica. To further improve the mechanical properties and reduce cement consumption, the mixes (5%, 0.5%), (5%, 1%) and (10%, 1.5%) were also made. For compressive strength test, three standard cubic specimens were prepared at each age and each mixing design, and for split cylinder test and static modulus of elasticity, two standard cylindrical specimens were prepared, for a total of 117 specimens. Compressive strength tests were performed on water-cured specimens at 7, 28 and 91 days of age. Split cylinder and modulus of elasticity tests, were performed on water-cured specimens at 28 days of age. Simultaneous replacement of some cement with microsilica and nanosilica in small percentages resulted in a significant improvement over their separate use. 10% microsilica and 1.5% nanosilica design are determined and introduced as the optimal design. In the optimal design, the increase in compressive strength and split cylinder test as well as modulus of elasticity at the age of 28 days were 70%, 115% and 29%, respectively, compared to the reference design.

Keywords: Slump, Compressive strength, Split cylinder test, Static modulus of elasticity, Microsilica, Nanosilica.

* Corresponding: sajedi@iauahvaz.ac.ir