

بهسازی پارامترهای مکانیکی و پایایی بتن ساختگاه آبگرم قوتورسویی

مهزاد اسمعیلی فلک *

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

رضا سرخانی بنماران

کارشناسی ارشد عمران، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

رسول سیفی

کارشناسی ارشد تکنیک، مدیر دفتر آب‌های معدنی، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل.

چکیده

به‌کارگیری افزودنی‌های معدنی از جمله روش‌های مورد استفاده در افزایش مقاومت مکانیکی و پایایی بتن است. با توجه به نیاز به احداث و بهره‌برداری ساختمان رفاهی و خدماتی در محل آبگرم قوتورسویی، در این مقاله پس از حصول شناخت ساختگاه مذکور، به بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی (خاکستر بادی و میکروسیلیس) از دیدگاه پارامترهای مکانیکی و دوام، توسط آزمایش‌های متعارف دوام و نیز تأثیر غوطه‌وری بر پارامترهای مکانیکی و پایایی، پرداخته شده است. در نمونه‌های حاوی افزودنی تک جزئی (فقط میکروسیلیس) و دوجزئی، سیمان نوع ۲ در کوتاه مدت و سیمان نوع ۵ در میان و بلند مدت مقاومت فشاری و دوام بیشتری نتیجه می‌دهند. در مورد نمونه‌های حاوی افزودنی، برای بهبود پارامترهای دوام، افزایش میکروسیلیس توصیه می‌شود. همچنین، خاکستر بادی در بلندمدت تأثیر مثبت تری بر مقاومت فشاری دارد. علاوه بر این، بیشترین مقاومت فشاری در افزودنی دوجزئی، مربوط به ترکیب ۱۰ درصد خاکستر بادی - ۱۰ درصد میکروسیلیس می‌باشد. در نمونه‌های حاوی افزودنی دو مؤلفه‌ای در محیط سولفاتی شدید مانند ساختگاه مطالعه حاضر (آبگرم قوتورسویی)، استفاده از درصدهای جایگزینی بالاتر (بالای ۱۰٪) برای میکروسیلیس و درصدهای جایگزینی پایین‌تر (حدود ۵٪) برای خاکستر بادی نتایج بهتری در بردارند.

واژه‌های کلیدی: بهسازی بتن، حمله سولفات، نفوذ یون کلرید، پایایی بتن، آزمایش‌های غوطه‌وری در محل، آبگرم معدنی قوتورسویی.

* نویسنده مسئول: Mahzad.ef@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

جانبی از صنایع دیگر هستند، این مواد زائد را می‌توان برای کاهش میزان سیمان مورد نیاز استفاده کرد و هزینه‌های بتن را کاهش داد. از طرفی دیگر تأثیر پوزولان‌ها در بهبود دوام بتن در محیط‌های سولفاتی را به بهبود ساختار حفرات و کاهش نفوذپذیری و همچنین کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در اثر واکنش‌های پوزولانی نسبت داده‌اند [۶].

خاکستر بادی معمولاً برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد و درصد جایگزینی تا حدود ۳۰٪ از کل مواد سیمانی است [۷]. علاوه بر این، اگر مقاومت اولیه عامل مهمی نباشد، خاکستر بادی تا ۶۰٪ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این یک واقعیت شناخته شده است که خاکستر بادی به طور کلی اثرات منفی بر مقاومت بتن، به‌ویژه در سنین اولیه دارد [۸]. طی مطالعه‌ای به این نتیجه رسیده‌اند که جایگزینی خاکستر بادی و پوزولان طبیعی در کوتاه مدت باعث کاهش مقاومت اولیه شده و این روند کاهش مقاومت، با افزایش مقدار جایگزینی بیشتر می‌گردد [۹]. از طرفی میزان بالای استفاده از خاکستر بادی، یک خمیر با چسبندگی بالا ایجاد می‌کند که در مقابل جریان بتن مقاومت می‌کند و باعث کاهش اسلامپ می‌شود. به همین جهت بتن‌های حاوی افزودنی‌ها باید به گونه‌ای بهینه‌سازی شوند که نه تنها از منظر اقتصادی، بلکه از منظر تأمین مقاومت بتن نیز جوابگو باشند [۱۰].

با توجه به اندازه ذرات کوچک، میکروسیلیس به عنوان یک پرکننده و پوزولان در بتن نقش دوگانه ایفا می‌کند. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که به علت افزایش نسبت حجم میکروسیلیس، کارایی بتن کاهش می‌یابد اما خواص مکانیکی کوتاه مدت آن مانند مقاومت فشاری ۲۸ روزه بهبود می‌یابد [۱۱-۱۴]. تعدادی از محققان با بررسی سطوح مختلف جایگزینی افزودنی‌های معدنی، محدوده درصدی ۲۰-۳۰ درصد را به عنوان درصد جایگزینی بهینه برای به دست آوردن حداکثر مقاومت بتن معرفی کرده‌اند [۱۵]. میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و مانع خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی می‌شود [۱۶]؛ اما نکته مهم میزان مصرف بهینه میکروسیلیس در شرایط محیط خورنده است که تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن دارد. به همین منظور در محیط‌های خورنده به‌ویژه محیطی همچون آب‌گرم قوتوسویی، یافتن طرح اختلاط مناسب بتن حاوی افزودنی‌های معدنی از اهمیت بالایی

به‌طور کلی خرابی‌های بتن تحت اثر عوامل بیرونی و درونی حادث می‌شوند. در گروه عوامل بیرونی که مورد بحث مطالعه حاضر نیز هست، می‌توان از درجه حرارت زیاد محیط و کاهش و افزایش متناوب رطوبت نسبی آن، آب و خاک موجود در اطراف بتن‌های ساخته شده که اغلب حاوی املاح مهاجم برای بتن هستند، انتقال یون‌ها توسط جریان هوا، طوفان‌های ماسه و حملات بیوشیمیایی نام برد. برای بروز خرابی‌های شیمیایی، سه عامل رطوبت، اکسیژن و حرارت لازم است. به‌طور کلی عامل مهم در ارتباط با خوردگی و حفاظت میلگرد، کیفیت پوشش بتن روی آرماتور است و این کیفیت بستگی مستقیم به نفوذپذیری و ضخامت پوشش دارد. اگر بتن کربناتی نشده باشد، درصد بحرانی یون کلر که نشان دهنده آستانه خوردگی میلگرد در بتن است ۰/۰۸ درصد وزن سیمان برای درصد بحرانی یون کلر است [۱].

مکانیسم اصلی انتقال یون‌های کلرید در سطح بتن، مخصوصاً وقتی این سطح غیراشباع باشد، جذب موئینگی است و تجمع این یون‌ها در لایه‌های سطحی بتن باعث انتقال یون‌ها به صورت انتشار به لایه‌های زیرین بتن می‌شود. نیروی رانش در انتشار یون‌های کلرید، اختلاف غلظت بین یون‌ها در قسمت‌های مختلف بتن است [۲]. در اثر واکنش سولفات با بتن سخت شده، محصولاتی به وجود می‌آید که دارای حجمی بیش از حجم اولیه مواد واکنش‌دهنده می‌باشند و این تغییر حجم باعث ایجاد انبساط داخلی در خمیر سیمان و تمرکز تنش‌های کششی در بتن سخت شده می‌گردد و سرانجام حمله سولفاتی در ترک‌ها، ورقه ورقه شدن و کاهش وزن، خود را نشان خواهد داد و تمامی این موارد باعث خسارت و آسیب دیدگی قسمتی از سطح بتن و یا تخریب تمام بتن می‌گردد. خرابی بتن معمولاً از لبه‌ها و گوشه‌ها شروع شده و با پیشرفت خرابی ترک و پکیدن حادث می‌شود [۳].

از روش‌های معمول و مورد استفاده در محدود کردن آثار مخرب حمله سولفاتی استفاده از سیمان‌های پرتلند تیپ ۲ و ۵ به جای سیمان پرتلند نوع ۱ است که به صورت آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی می‌شود [۴]. همچنین استفاده از افزودنی‌های معدنی جایگزین سیمان نظیر خاکستر بادی، میکروسیلیس و پوزولان‌های طبیعی می‌تواند در بهبود مقاومت بتن در مقابل حمله سولفاتی مؤثر باشد [۵]. از آنجایی که بسیاری از افزودنی‌های معدنی محصولات

است. به این صورت که تا ۱۸۰ روز مقاومت فشاری کاهش یافته و سپس در مدت زمان ۲۴۰ روز به مقاومت فشاری هدف خود رسیده است. [۲۱]

مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید برای بتن‌های حاوی میکروسیلیس و خاکستر بادی در مقابل حمله کلریدی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۱۵ تا ۲۵ درصد خاکستر بادی (برای تمام درصد‌های میکروسیلیس) افزایش مشهودی در برابر نفوذ یون کلرید داشته است. همچنین کلیه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، در دسته بسیار پایین از حیث نفوذپذیری یون کلرید قرار گرفتند. به طوری که نمونه‌های بتنی با بیش از ۱۵ درصد خاکستر بادی یا ۸ درصد میکروسیلیس کمترین نفوذپذیری در برابر حمله کلرید را دارا می‌باشند [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر اثر جایگزینی هم‌زمان میکروسیلیس (۵، ۱۰ و ۱۵٪) و خاکستر بادی (۱۰، ۲۰ و ۳۰٪) در برابر تهاجم سولفات (مستغرق به مدت ۱۸۰ روز) بر روی بتن بررسی شده است. مقاومت سولفات‌ها تمام نمونه‌های ساخته شده با میکروسیلیس و خاکستر بادی نسبت به نمونه شاهد بهتر است. به این دلیل که افزودنی‌های معدنی مقاومت در برابر سولفات بتن را با کاهش CH بهبود می‌بخشند. همچنین در این مطالعه با در نظر گرفتن دوام و مقاومت در برابر حمله سولفات، بهترین مقدار جایگزینی برای میکروسیلیس ۵ تا ۱۰ درصد و برای خاکستر بادی ۱۰ درصد است [۲۳].

در نهایت، با توجه به نیاز به تخریب سازه کنونی آبرگرم قوتورسویی و نیاز مبرم به احداث و بهره‌برداری از یک ساختمان بتن آرمه مدرن، هدف از مطالعه حاضر پس از شناخت دقیق شرایط محیطی ساختگاه آبرگرم قوتورسویی، ارائه طرح اختلاط، نوع مصالح و نیز نوع افزودنی مناسب، جهت ساخت و تجهیز سازه‌های بتنی آن ساختگاه است که در معرض حمله سولفات (و تا حدودی نفوذ یون کلرید) قرار دارد؛ زیرا علی‌رغم بازسازی‌های مکرر محل ارائه خدمات گردشگری آبرگرم، دوام طولانی مدتی نداشته و بعد از مدتی کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین، وجود حرارت نسبتاً بالا و وجود دائمی رطوبت نیز به تشدید نرخ خرابی بتن در این ساختگاه سرعت می‌بخشد که سعی بر آن بوده است تا با استفاده از آزمایش‌های دوام و تأثیر غوطه‌وری بر تغییر وزن، تغییر ابعاد و تغییر مقاومت فشاری، تمامی شرایط درجا مورد ملاحظه قرار گیرد.

برخوردار است و اهمیت انجام این پژوهش را برجسته‌تر می‌کند. همچنین نشان داده شده است که استفاده از میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری، کششی و مدول ارتجاعی بتن خودمتراکم تأثیرگذار بوده و با افزایش مقدار آن، خواص مکانیکی بتن بهبود می‌یابد [۱۷]. اثر جایگزینی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جای سیمان بر دوام بتن در مقابل حمله سولفاتی بررسی شده است. بهترین مقاومت در برابر سولفات برای مقاومت‌های فشاری و انعطاف‌پذیری از بتن‌هایی حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی و ۵ درصد دوده سیلیکا حاصل شده است [۱۸]. در مطالعه‌ای اثر جایگزینی چهار ماده افزودنی پودر سنگ، نرمه ماسه، میکروسیلیس و خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان با بررسی مقاومت فشاری، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که خاکستر بادی در دراز مدت مقاومت فشاری بتن را افزایش داده و در روزهای نخست مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. میکروسیلیس برای درصد‌های پایین جایگزینی منجر به کاهش و برای درصد‌های بیشتر منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. نرمه ماسه اندکی مقاومت فشاری بتن را کاهش داده و در نهایت جایگزینی پودر سنگ در درازمدت منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۱۹].

مطالعات متعددی به منظور بررسی تأثیر بتن‌های حاوی افزودنی‌های معدنی که در معرض حمله سولفات می‌باشند از دیدگاه پارامترهای دوام گسترش یافته است. در پژوهشی دوام بتن‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس در برابر تهاجم اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از بهبود دوام نمونه‌ها در برابر تهاجم اسید سولفوریک در صورت استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس دارد؛ اما ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس سیمان دارای بهترین مقاومت در برابر تهاجم اسید سولفوریک را نتیجه داده است [۲۰].

دوام بتن‌های خودمتراکم با درصد‌های جایگزینی متفاوت خاکستر بادی با مستغرق کردن ۱۸۰ و ۲۴۰ روزه در محلول سولفات‌ها بررسی شده است و به این نتیجه رسیده‌اند که خاکستر بادی تأثیری مثبت بر کارایی کلیه نمونه‌ها از جمله تأثیر بر کاهش نفوذپذیری و کاهش تخلخل داشته که ناشی از ایجاد پیوستگی بین مصالح بتن بوده است. نتیجه جالب توجه غیرمشابه بودن روند تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های در معرض محیط سولفات‌ها بوده

۲- مواد و روش‌ها

روش انجام مطالعه حاضر به صورت آزمایشگاهی است [۲۴-۳۱]. در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های شیمی، مکانیکی و دوام بر روی نمونه‌های ساخته شده از طرح اختلاط‌های ارائه شده جهت دستیابی به بهترین و بهینه‌ترین ترکیب ساخت بتن انجام شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به پیشینه پژوهشی موجود و نتایج آزمایش‌های شیمی مطالعه حاضر، از افزودنی‌های معدنی خاکستر بادی و میکروسیلیس به جهت بهبود پارامترهای مکانیکی و پایایی بتن بهره گرفته شده است. چشمه قوتورسویی یکی از مشهورترین چشمه‌های استان اردبیل واقع در شهرستان مشگین‌شهر و دامنه سرسبز سبلان است که در ۲۵ کیلومتری جنوب لاهرود و ۴۸ کیلومتری جنوب مشگین‌شهر واقع شده است. آب قوتورسویی در ردیف آب‌های معدنی سولفات کلسیک سدیک و گوگرد خیلی گرم است که آثار اسید سولفوریک آزاد دارد. آبگرم قوتورسویی به علت داشتن گوگرد خالص خاصیت درمانی ویژه‌ای برای از بین بردن امراض مختلف پوستی دارد. دمای چشمه آن ۴۲ درجه سانتی‌گراد و دبی آن ۱۳ لیتر در ثانیه است.

جهت شناسایی کیفیت دقیق شرایط محیطی ساختگاه آبگرم قوتورسویی، آزمایش کروماتوگرافی یونی بر روی نمونه‌های گرفته شده از آبگرم قوتورسویی انجام گرفت. به منظور انجام پژوهش حاضر، این آزمایش بر روی نمونه‌گیری‌های انجام شده در هر ۴ فصل سال صورت گرفت تا تأثیر تغییر فصول بر نتایج حاصل در نظر گرفته شود. هدف اصلی از انجام این آزمایش‌ها شناسایی محصولات موجود در آبگرم و انتخاب نوع سیمان و افزودنی‌های مناسب جهت بهسازی پایایی آزمون‌های بتنی بود. پس از اتمام ساخت آزمون‌های استاندارد هر آزمایش بر اساس آیین‌نامه طرح اختلاط بتن ACI211 [۳۲]، جهت کنترل نهایی طرح اختلاط انجام شده، آزمایش‌های کارایی بتن مطابق استاندارد ASTM-C143 [۳۳] و تعیین وزن مخصوص بتن مطابق استاندارد ASTM C138 [۳۴] بر روی نمونه‌ها انجام شدند. آزمایش مقاومت فشاری بتن سخت شده بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی-متری مطابق با استاندارد BS 1881-116 [۳۵] انجام گردید. تمامی آزمایش‌های مکانیکی در سنین مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شدند تا تأثیر نرخ رشد مقاومت در طول زمان نیز قابل بررسی باشد.



شکل ۱- غوطه‌ورسازی نمونه‌ها در ورودی استخر آبگرم

قوتورسویی

مصالح استفاده شده در این پروژه، شامل مصالح سنگی، سیمان، میکروسیلیس، خاکستر بادی، آب و فوق روان کننده است که خصوصیات آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

طرح اختلاط بتن به روش ACI-211 انجام گرفته و بدین منظور از دو نوع سیمان پرتلند نوع ۲ زنجان و نوع ۵ کردستان با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ بهره گرفته شده است. با در نظر گرفتن اسلامپ ۴۰ میلی‌متر، بزرگ‌ترین اندازه شن ۲۵ میلی‌متر و درصد هوای غیر عمدی ۱/۵ درصد، طرح مخلوط به دست آمده در جدول ۳ گردآوری شده است. برای نمونه‌های شاهد میانگین وزن مخصوص تازه بتن برابر با 2393 Kg/m^3 است. بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده، سوپر پلاستی‌سایزر به مقدار ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی سیمان تارسیدن به اسلامپ مورد نظر استفاده گردید. در کل، ۶۹۶ نمونه مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب نیم‌ساعته، نفوذ آب تحت فشار، نفوذ یون کلرید و خرابی در محل (غوطه‌وری) قرار گرفت. علائم اختصاری مطابق جدول ۳ است که در آن منظور از T2 سیمان پرتلند نوع ۲، T5 سیمان پرتلند نوع ۵، S میکروسیلیس و F خاکستر بادی است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی

ترکیب	سیمان تپ ۵ کردستان (%)	سیمان تپ ۲ زنجان (%)	خاکس تر بادی	میکروسیلیس س
SiO ₂	۲۱/۳۲	۲۱/۷۷	۶۰/۵	۹۴
Al ₂ O ₃	۴/۴۰	۴/۵۳	۳۲/۴۰	۱
Fe ₂ O ₃	۴/۴۰	۳/۶۶	۴/۸۳	۰/۹
CaO	۶۴	۶۳/۱۳	۰/۹	-
SO ₃	۲/۵۷	۲/۲۲	۰/۰	-
K ₂ O	-	-	-	۰/۵
Na ₂ O	-	-	-	۰/۵

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌های شیمیایی بر روی آبگرم قوتورسویی

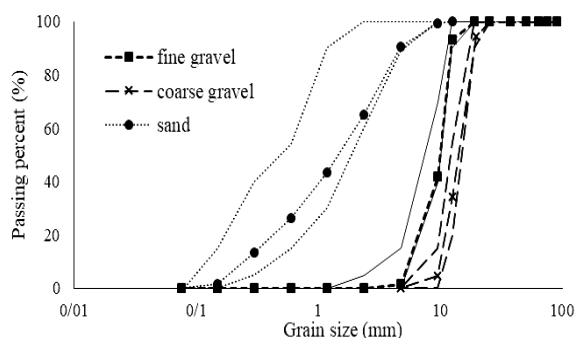
با استفاده از داده‌های به دست آمده و نمودارهای کالیبراسیون غلظت هریک از یون‌ها در نمونه‌های برگرفته از آبگرم قوتورسویی تحت آزمایش کروماتوگرافی یونی، غلظت یون‌های مختلف برای فصول مختلف در جدول ۴ گزارش شده است. مطابق نتایج جدول ۴ و بر اساس رده‌بندی شرایط محیطی مبحث ۹ مقررات ملی

مصالح سنگی که در این پروژه به عنوان شن و ماسه مورد استفاده قرار گرفته است، شامل شن‌های ریز و درشت کارخانه شن‌آویز نمین با خصوصیات ارائه شده در جدول ۱ است.

نمودار دانه‌بندی شن بادامی، نخودی و ماسه، همراه با محدوده استاندارد هر کدام در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این پژوهش از خاکستر بادی معمولی نوع F با مشخصات فیزیکی جرم حجمی $2/22 \text{ gr/cm}^3$ ، سطح ویژه $4095 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و ۱۲ درصد مانده روی الک ۳۲۵ مورد استفاده قرار گرفته است. حضور خاکستر بادی باعث به تأخیر افتادن هیدراتاسیون C₃S در مراحل اولیه می‌شود [۴۰] اما این واکنش در مراحل بعد سریع‌تر انجام خواهد شد [۴۱]. همچنین میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش، تولید کارخانجات ازنا با وزن مخصوص 2100 Kg/m^3 و سطح ویژه بلین $20/2 \text{ m}^2/\text{gr}$ است که به صورت درصد‌های مختلفی از وزن سیمان خشک به مخلوط اضافه شده است. مشخصات شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی به شرح جدول ۲ است.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی

شن	ماسه	مقدار	مشخصات
مشخصات	مشخصات	مقدار	مقدار
وزن مخصوص	درصد جذب	۲/۵۸	۳/۳٪
خشک‌شن	آب	gr/cm^3	
وزن مخصوص فضایی شن	مدول نرمی	۱/۶۳	۲/۹
		gr/cm^3	
درصد جذب آب	وزن مخصوص	٪۲	۲/۵۴
			gr/cm^3
بزرگ‌ترین قطر دانه مصرفی	مواد خاکی	۲۵ mm	۱ به ۱۵



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی شن بادامی، نخودی و ماسه مورد استفاده در مطالعه حاضر

ساختمان، آبگرم قوتورسویی مشمول شرایط محیطی متوسط با مقدار سولفات نزدیک به 500 PPM قرار می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام فصول غلظت یون سولفات در نمونه‌ها بیشتر از غلظت سایر یون‌ها است. پس از یون سولفات، آرماتورهای مدفون در آن گردد. هرچند تأثیر تمامی یون‌ها در آزمایش غوطه‌وری در محل، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- طرح اختلاط‌های انجام شده توسط سیمان نوع ۲ زنجان و نوع ۵ کردستان و علائم اختصاری

W/C	سیمان (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	جایگزینی خاکستر بادی (%)	جایگزینی میکروسیلیس (%)	نام اختصاری
۰/۴	۴۴۷/۵	۸۴۷/۸	۹۱۹	۰	۰	T (2 or 5) S0F0
۰/۴	۴۲۵/۱	۸۴۷/۸	۹۱۹	۰	۵	T (2 or 5) S5F0
۰/۴	۴۰۲/۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۰	۱۰	T (2 or 5) S10F0
۰/۴	۳۸۰/۴	۸۴۷/۸	۹۱۹	۰	۱۵	T (2 or 5) S15F0
۰/۴	۳۵۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۰	۲۰	T (2 or 5) S20F0
۰/۴	۴۲۵/۱	۸۴۷/۸	۹۱۹	۵	۰	T (2 or 5) S0F5
۰/۴	۴۰۲/۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۱۰	۰	T (2 or 5) S0F10
۰/۴	۳۸۰/۴	۸۴۷/۸	۹۱۹	۱۵	۰	T (2 or 5) S0F15
۰/۴	۳۵۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۲۰	۰	T (2 or 5) S0F20
۰/۴	۳۵۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۱۵	۵	T (2 or 5) S5F15
۰/۴	۳۵۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۵	۱۵	T (2 or 5) S15F5
۰/۴	۳۵۸	۸۴۷/۸	۹۱۹	۱۰	۱۰	T (2 or 5) S10F10

جدول ۴- غلظت یون‌ها مختلف در فصول مطالعه شده (غلظت‌ها برحسب ppm)

یون‌ها	خرداد ۹۷	شهریور ۹۷	آذر ۹۶	اسفند ۹۶
فلوراید	۰/۷۳۱	۱/۱۱۲	۰/۹۸۶	۱/۱۲۳
کلرید	۸۰/۷۱۲	۹۲/۱۲۱	۸۶/۶۴۸	۹۰/۳۲۱
برماید	۰/۱۳۲	۰/۳۱۲	۰/۱۶۸	۰/۱۷۳
نیترات	۰/۹۱۲	۰/۷۲۱	۰/۰۱۲	۰/۱۲۰
فسفات	۰/۱۹۱	۰/۳۲۱	۰/۲۹۴	۰/۱۳۲
سولفات	۴۲۰/۱۲۱	۴۶۱/۳۱۱	۴۴۱/۳۵۱	۴۳۱/۶۷۱

۱۱، ۲۳، ۲۵ و ۲۸ درصدی برای سیمان نوع ۲ و افزایش ۱۳، ۲۸، ۳۰ و ۳۴ درصدی برای سیمان نوع ۵ دارد. در نهایت برای بهبود بتن حاصل از سیمان نوع ۲، افزودنی میکروسیلیس به اندازه ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان و برای نوع ۵ در حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان به صورت جایگزین به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که افزودن میکروسیلیس هم در کوتاه مدت و هم در بلند مدت و در تمامی نمونه‌ها، منجر به افزایش مقاومت فشاری آزمون‌ها نسبت به نمونه شاهد می‌گردد.

شکل ۴ تأثیر افزودن خاکستر بادی با درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ با سیمان، نسبت به نمونه شاهد در بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و نوع ۵ کردستان در سنین مختلف را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست آمده، با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر بادی به نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب ۲/۵، ۶، ۸/۵ و ۱۲ درصد کاهش یافته؛ در حالی که مقاومت ۵۶ روزه آن‌ها به ترتیب ۵/۵، ۱۱، ۱۴/۵ و ۹/۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵، افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر

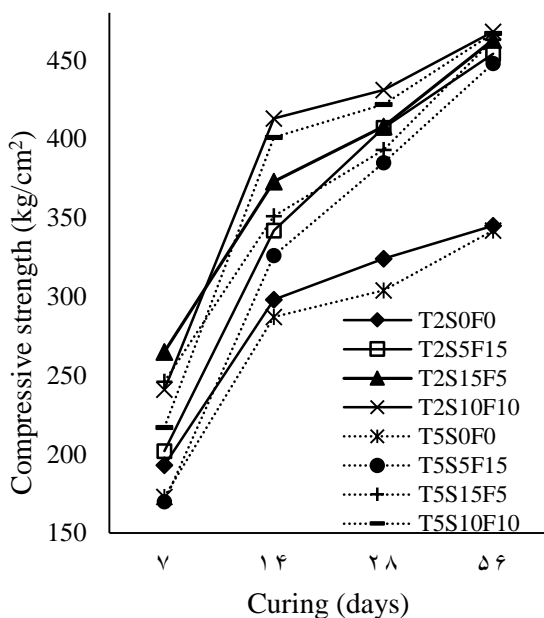
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده توسط میکروسیلیس در سنین مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل، تأثیر افزودن میکروسیلیس با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ را نسبت به نمونه شاهد در بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و نوع ۵ کردستان در سنین مختلف نشان داده شده است. نمودارهای حاصل از این آزمایش‌ها افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس، نشان از افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب

۲-۳- نتایج آزمایش‌های مکانیکی

۱۲۴ / تحقیقات بتن، سال سیزدهم، شماره دوم

جایگزینی این کاهش بیشتر می‌شود؛ هرچند در بلندمدت مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش نیز می‌یابد. از این رو اگر کاهش مقاومت ناشی از افزودن خاکستر بادی در سنین اولیه مشکل‌ساز نباشد، استفاده از آن می‌تواند کارآمد باشد. مطابق نتایج حاصل، درصد جایگزینی ۱۵ درصد به‌عنوان مقدار بهینه این افزودنی از دیدگاه مقاومت فشاری آزمونه‌ها معرفی می‌گردد.

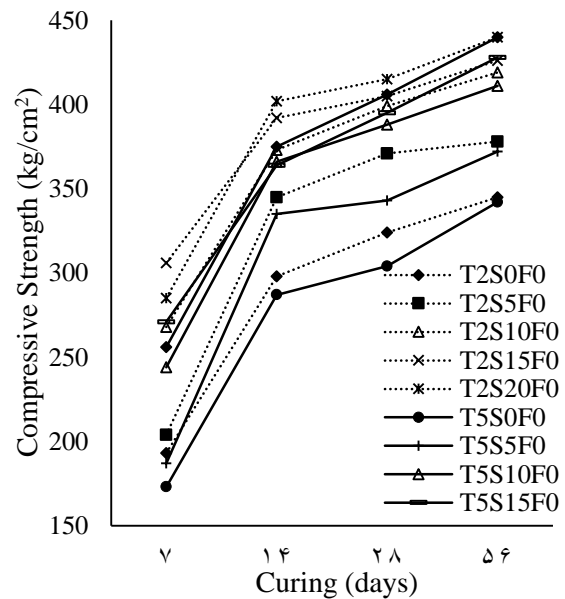
شکل ۵ تأثیر اندرکنشی میکروسیلیس و خاکستر بادی با درصدهای مختلف و در سنین مختلف بر مقاومت فشاری بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و نوع ۵ کردستان نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. می‌توان اظهار داشت که برای هر دو نوع سیمان با افزودن دوجزئی میکروسیلیس و خاکستر بادی، نقیصه افت مقاومت فشاری ناشی از افزودن تک جزئی خاکستر بادی در سنین اولیه بر طرف می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری در تمامی سنین در افزودنی دوجزئی، مربوط به ترکیب دوجزئی ۱۰ درصد میکروسیلیس-۱۰ درصد خاکستر بادی است به‌طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه را برای سیمان نوع ۲، ۳۳ درصد و برای سیمان نوع ۵، ۳۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد.



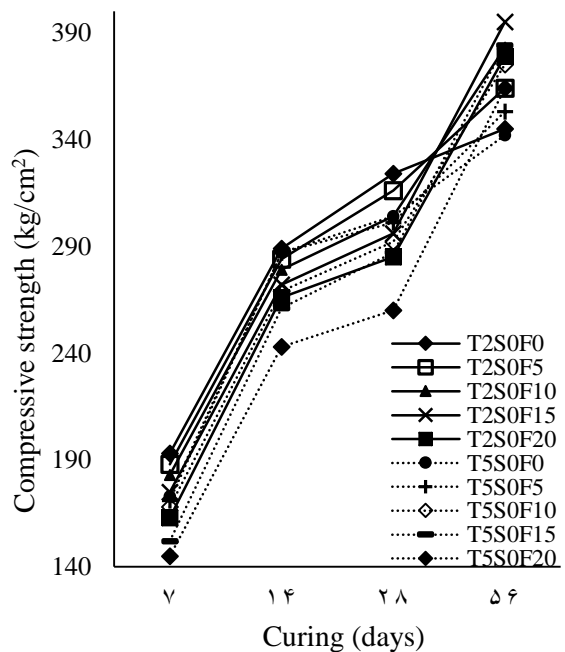
شکل ۵- تأثیر اندرکنشی میکروسیلیس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و ۵ کردستان

نکته قابل تأمل در مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ زنجان و سیمان نوع ۵ کردستان در سنین مختلف، چه در نمونه‌های شاهد، چه در نمونه‌های همراه با افزودنی جایگزین تک جزئی

بادی به ترتیب موجب کاهش ۱، ۴، ۵/۶ و ۱۴ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه شده، در حالی که مقاومت ۵۶ روزه آن‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۳/۲، ۹/۷، ۱۲/۳ و ۶/۴ افزایش یافته است.



شکل ۳- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و ۵ کردستان



شکل ۴- تأثیر خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن تهیه شده از سیمان نوع ۲ زنجان و ۵ کردستان

ملاحظه می‌گردد مطابق ادبیات فنی موجود، در این مطالعه نیز افزودن خاکستر بادی در سنین اولیه منجر به کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد می‌گردد که با افزایش درصد

جدول ۵ نشان می‌دهد که بدون حضور هیچ گونه افزودنی و در شرایط کاملاً یکسان، بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ جذب آب کمتری نسبت به بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ دارد که می‌تواند ناشی از ریزتر بودن آن باشد. همچنین می‌توان اظهار داشت که آزمون‌های حاوی میکروسیلیس عملکرد بهتری نسبت به آزمون‌های حاوی خاکستر بادی دارد، به طوری که در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد منجر به کاهش جذب آب شده و افزایش بیشتر مقدار جایگزینی منجر به افزایش جذب آب بتن می‌گردد.

همچنین از جدول ۵ قابل استنتاج است که بدون حضور هیچ گونه افزودنی و در شرایط کاملاً یکسان، بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ نفوذ آب تحت فشار کمتری (به میزان ۳۲٪) نسبت به بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ دارد که به طور مشابه، احتمالاً این امر ناشی از ریز بودن بیشتر سیمان نوع ۵ نسبت به سیمان نوع ۲ است. افزودن هردوی میکروسیلیس و خاکستر بادی تا ۲۰ درصد وزنی سیمان به صورت جایگزین، نفوذ آب تحت فشار نمونه‌های بتنی را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد به طوری که از ۵ درصد جایگزینی تا ۲۰ درصد، با افزایش مقدار جایگزینی، نفوذ آب کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان اظهار داشت که افزودن هردوی میکروسیلیس و خاکستر بادی در محدوده ۱۵ تا ۲۰ درصد منجر به کاهش نفوذ آب تحت فشار می‌گردد. در رابطه با افزودن میکروسیلیس و خاکستر بادی به صورت مؤلفه دوجزئی نیز کمترین مقدار نفوذ آب تحت فشار مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و خاکستر بادی کمتر از ۱۰ درصد است.

برخلاف تأثیر قابل توجه نوع سیمان مورد استفاده در آزمایش‌های جذب آب نیم‌ساعته و نفوذ آب تحت فشار، در آزمایش نفوذ یون کلرید این اختلاف در عمده طرح‌های اختلاف چندان قابل توجه نیست، به طوری که نفوذ یون کلرید برای نمونه‌های بتنی بدون ماده افزودنی برحسب کولمب، برای بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ به اندازه ۸/۹ درصد نسبت به بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ بزرگ‌تر است. افزودن میکروسیلیس به نمونه‌های بتنی ساخته شده از سیمان نوع ۲ به عنوان جایگزین سیمان از صفر تا ۲۰ درصد، باعث کاهش نفوذ یون کلرید به میزان ۲۸٪ می‌گردد. در طرف مقابل افزودن خاکستر بادی به نمونه‌های بتنی ساخته شده از سیمان نوع ۲ به عنوان جایگزین سیمان از صفر تا ۲۰ درصد، باعث افزایش نفوذ یون کلرید به میزان ۱۹٪ می‌گردد. در نهایت می‌توان اظهار داشت که افزودن

و دوجزئی این است که نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ در کوتاه مدت مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵ نشان می‌دهند. ولی در میان مدت نه تنها مقاومت فشاری بتن‌های حاصل از هر دو نوع سیمان تقریباً در یک سطح قرار می‌گیرند، بلکه در بلند مدت، بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵، مقاومت‌های فشاری بیشتری از بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ نشان می‌دهند. این امر مربوط به ساختار سیمان نوع ۵ است که نسبت به سیمان‌های نوع ۱، ۲ و ۳ به زمان بیشتری جهت کسب مقاومت فشاری نهایی نیاز دارد.

۳-۳- نتایج آزمایش‌های دوام

جهت ارزیابی کوتاه‌مدت پایایی بتن‌های طراحی شده، آزمایش‌های جذب آب نیم‌ساعته، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ یون کلرید در سن ۲۸ روز مدنظر قرار گرفته و نتایج به دست آمده در جدول ۵ تهیه و تنظیم شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های جذب آب نیم‌ساعته، نفوذ آب

تحت فشار و نفوذ یون کلرید بر روی آزمون‌های بتنی

طرح اختلاط	نفوذ آب تحت		نفوذ یون کلرید (کولمب)
	جذب آب نیم ساعته (%)	فشار (میلی‌متر)	
T2S0F0	۲/۹۱	۳۵/۱۲	۱۹۵۱
T2S5F0	۲/۷۳	۳۱/۶۹	۱۸۹۹
T2S10F0	۲/۵۹	۲۸/۸۳	۱۷۲۳
T2S15F0	۲/۷۸	۲۳/۱۹	۵۸۱
T2S20F0	۲/۹۷	۲۰/۰۱	۱۴۲۵
T2S0F5	۲/۸۵	۳۲/۵۶	۱۶۹۶
T2S0F10	۲/۷۶	۲۷/۹۳	۱۹۹۳
T2S0F15	۲/۸۴	۲۲/۸۲	۲۱۰۶
T2S0F20	۳/۰۲	۱۹/۳۱	۲۰۵۱
T2S5F15	۲/۸۱	۱۸/۶۵	۱۸۹۸
T2S15F5	۲/۷	۲۰/۱۱	۱۵۲۵
T2S10F10	۲/۹۸	۱۸/۳۹	۱۶۱۹
T5S0F0	۲/۳۷	۲۶/۶۷	۱۸۶۵
T5S5F0	۲/۲۱	۲۳/۲۲	۱۷۸۹
T5S10F0	۲/۰۹	۱۹/۵۱	۱۶۵۳
T5S15F0	۲/۲۹	۱۷/۱۹	۱۴۸۹
T5S20F0	۲/۴۵	۱۵	۱۳۳۴
T5S0F5	۲/۲۹	۲۴/۰۶	۱۸۸۷
T5S0F10	۲/۳۴	۱۹/۱۳	۱۸۹۹
T5S0F15	۲/۴۱	۱۹/۷۶	۱۹۱۸
T5S0F20	۲/۴۹	۱۴/۵۱	۱۹۶۹
T5S5F15	۲/۳۸	۱۵/۱۱	۱۷۵۳
T5S15F5	۲/۳۳	۱۵/۸۵	۴۷۸
T5S10F10	۲/۳۹	۱۴/۶۴	۱۳۱۱

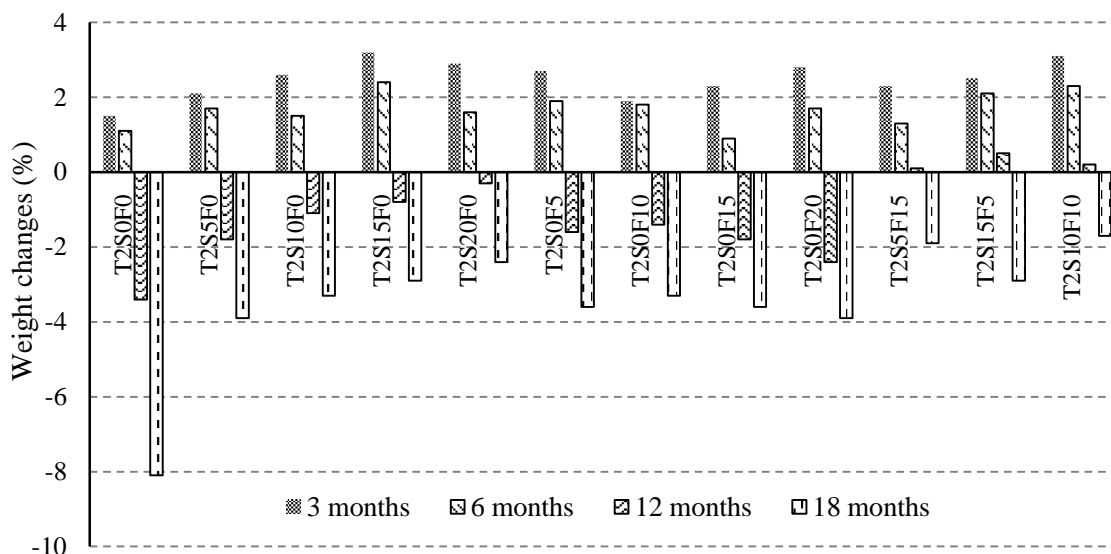
۳-۴- نتایج آزمایش‌های غوطه‌وری در محل

تأثیر یون‌های موجود در آب‌گرم قوت‌رسانی بر روی ۳۲ طرح اختلاط معرفی شده، در ۲ گام پیش و پس از غوطه‌وری بر تغییر وزن و تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بررسی شدند. تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس در بازه‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۱۸ ماه تحت غوطه‌وری و سنجش تغییرات وزن و مقاومت فشاری قرار گرفتند و تمامی نمودارها در قیاس با نمونه پیش از غوطه‌وری (مقاومت فشاری ۲۸ روزه استاندارد که در نمودارها با لجن 1 month نشان داده شده است) ترسیم شده‌اند.

بررسی نمودارها در شکل ۶ نشان می‌دهند که در حالت کلی وزن نمونه‌ها در مدت کوتاهی پس از غوطه‌وری افزایش یافته و در بلند مدت (۱۲ تا ۱۸ ماه) کاهش می‌یابد. نرخ افزایش وزن در کوتاه مدت در نمونه‌های شاهد کمتر از نمونه‌های بهسازی شده و شدت کاهش وزن در بلند مدت در نمونه شاهد نسبت به نمونه‌های بهسازی شده بسیار بیشتر است. دلیل این امر تفاوت بین عوامل وقوع تغییر وزن نمونه‌های شاهد و بهسازی شده است.

میکروسلیس باعث کاهش نفوذ یون کلرید و افزایش خاکستری بادی باعث افزایش نفوذ یون کلرید در بتن‌های ساخته شده از هر دو سیمان نوع ۲ و ۵ می‌گردد. در صورتی که استفاده دو مؤلفه‌ای از دو افزودنی مذکور مدنظر باشد، استفاده از درصد‌های جایگزینی بالاتر (بالای ۱۰٪) برای میکروسلیس و درصد‌های جایگزینی پایین‌تر (حدود ۵٪) برای خاکستری بادی پیشنهاد می‌شود.

اغلب نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های بتنی ساخته شده از سیمان نوع ۵ که توسط افزودنی‌های معدنی بهسازی شده‌اند، نتایج بهتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ به همراه افزودنی‌های یکسان از خود نشان می‌دهند. حال آنکه استفاده از سیمان نوع ۵ برای استفاده در محیط‌هایی که یون‌های کلرید و سولفات به‌طور هم‌زمان وجود دارند، مطابق اکثر آیین‌نامه‌های بتن (به‌عنوان مثال مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان) ممنوع است. دلیل این امر غلظت پایین یون کلرید و غلظت متوسط یون سولفات در محل مورد مطالعه است که به صورت هم‌زمان تأثیر مخربی بر بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ به همراه پوزولان‌های مصنوعی، ندارند.



شکل ۶- تأثیر غوطه‌وری بر تغییر وزن بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ به همراه افزودنی‌های معدنی

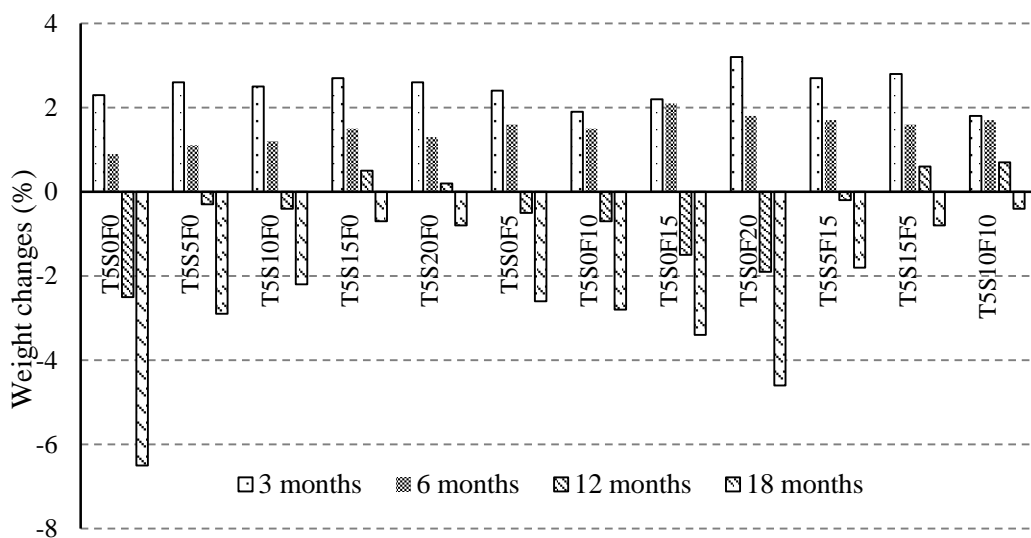
تولید نشده و یا بسیار کم تولید شده که متعاقباً منجر به ترک خوردگی نمی‌گردد و افزایش وزن نمونه‌ها در کوتاه مدت به‌طور هم‌زمان ناشی از این پدیده و رسوب‌گذاری در خلل و فرج قسمت‌های نزدیک سطح آزمون‌ها و در بلند مدت فقط ناشی از لایه‌برداری جزئی روی سطح نمونه است. تأثیر افزودنی‌های معدنی

در نمونه شاهد در کوتاه مدت به دلیل تولید مواد منبسط شونده ناشی از حمله سولفات‌ها و پر شدن خلل و فرج بتن توسط آن، وزن نمونه افزایش یافته و در بلند مدت به دلیل ترک خوردن بتن و افزایش تخلخل، وزن نمونه کاهش می‌یابد؛ در حالی که در نمونه‌های بهسازی شده در اثر حمله سولفات‌ها، مواد منبسط شونده

شاهد و بهسازی شده نیز مشابه رفتار نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ بوده و همان استدلال مذکور برای نحوه تغییر وزن آن‌ها در اینجا نیز استوار است، با این تفاوت که آزمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵ نسبت به نوع ۲ در شرایط کاملاً مشابه، عملکرد بهتری دارند. در میان نمونه‌های بهسازی شده توسط افزودنی‌های معدنی و ساخته شده از سیمان نوع ۵، بهترین عملکرد از لحاظ افت وزنی در بلند مدت (۱۸ ماه غوطه‌وری) به طرح اختلاط‌های T5S20F0، T5S15F5 و T5S10F10 مربوط می‌شود که نرخ افت وزنی آن‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۸۸، ۸۸ و ۹۴ درصد کاهش می‌یابد.

در حدی است که حتی در طول مدت ۱۲ ماه غوطه‌وری، برخی نمونه‌ها حتی دچار کاهش وزن نشده و افزایش وزن جزئی در آن‌ها مشاهده می‌شود. بهترین عملکرد از لحاظ افت وزنی در بلند مدت (غوطه‌وری به مدت ۱۸ ماه) به طرح اختلاط‌های T2S20F0، T2S5F15 و T2S10F10 مربوط می‌شود که نرخ افت وزنی آن‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۷۰، ۷۷ و ۷۹ درصد کاهش می‌یابد.

شکل ۷ تأثیر غوطه‌وری در کوتاه مدت و بلند مدت را بر روی افت وزنی نمونه‌های بتنی ساخته شده از سیمان نوع ۵ به همراه افزودنی‌های معدنی را نشان می‌دهد. رفتار این دسته از نمونه‌های



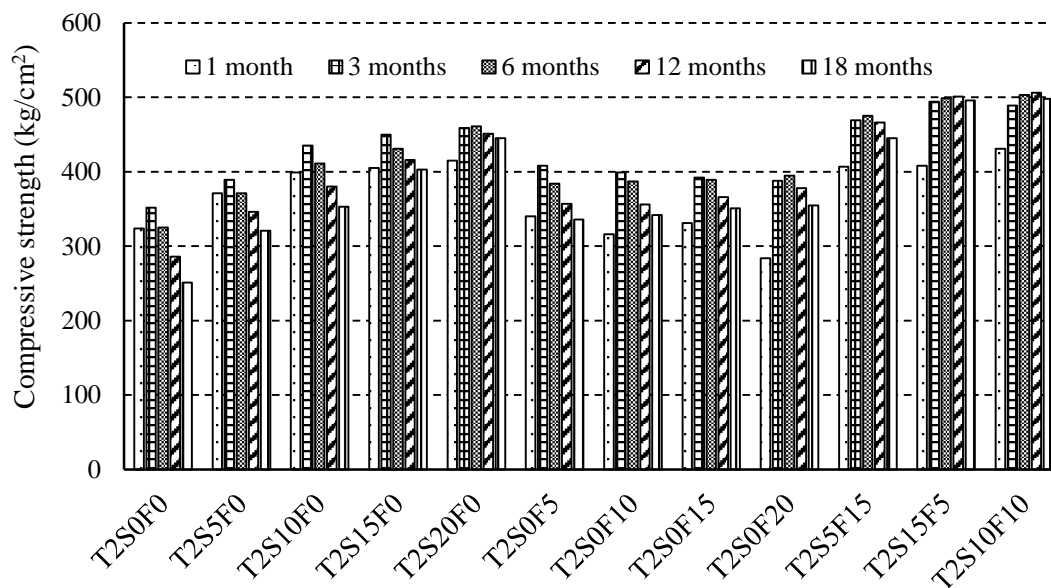
شکل ۷- تأثیر غوطه‌وری بر تغییر وزن بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵ به همراه افزودنی‌های معدنی

و محدود از سطح است. بهترین عملکرد از لحاظ افت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان نوع ۲ در بلند مدت (غوطه‌وری به مدت ۱۸ ماه) به طرح اختلاط‌های T2S20F0، T2S15F5 و T2S10F10 مربوط می‌شود که مقاومت فشاری آن‌ها نسبت به نمونه شاهد در سن غوطه‌وری مشابه به ترتیب ۷۷، ۹۷ و ۹۸ درصد افزایش می‌یابد.

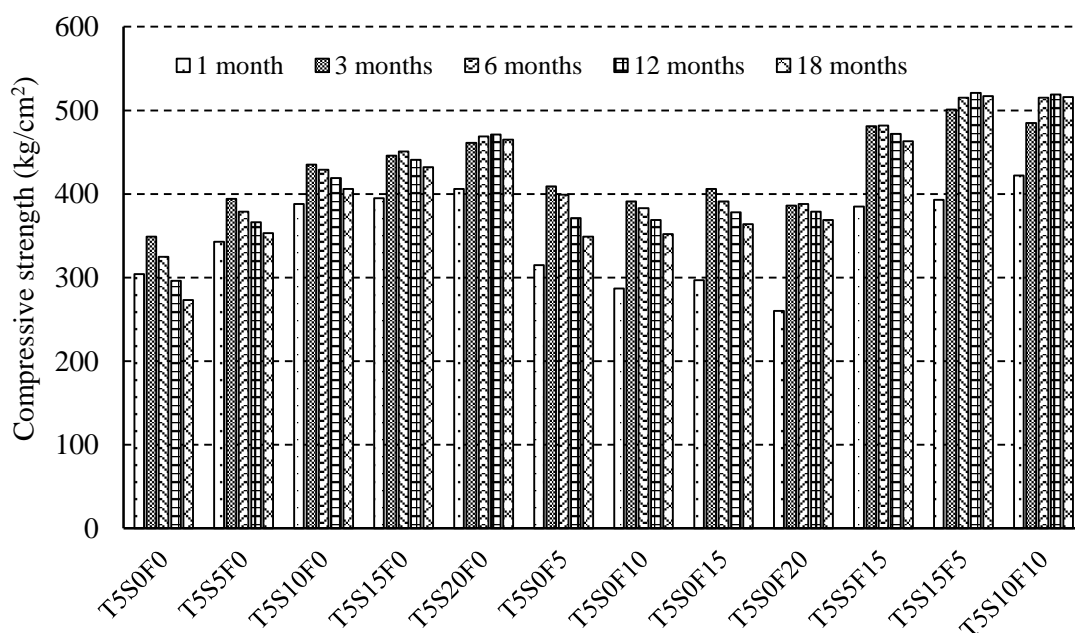
شکل ۹ تأثیر غوطه‌وری در کوتاه مدت و بلند مدت بر روی تغییرات مقاومت فشاری استاندارد نمونه‌های مکعبی بتنی ساخته شده از سیمان نوع ۵ به همراه افزودنی‌های معدنی را نشان می‌دهد. رفتار این دسته از نمونه‌های شاهد و بهسازی شده نیز مشابه رفتار نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ بوده و همان استدلال مذکور برای نحوه تغییر وزن آن‌ها در اینجا نیز استوار است. توجه

شکل ۸ تأثیر غوطه‌وری بر مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ در بازه‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۱۸ ماهه نسبت به نمونه پیش از غوطه‌وری را نشان می‌دهد. در نمونه شاهد تا سن ۳ ماه مقاومت فشاری همچنان رشد می‌کند. دلیل این امر احتمالاً پر کردن فضای خالی بتن توسط ماده منبسط شونده اترینگایت بوده و هنوز حجم این ماده از فضای خالی موجود در بتن تجاوز ننموده است، اما از این سن به بعد حجم اترینگایت از حجم فضای خالی بتن تجاوز کرده و ترک‌ها و خرابی‌ها آغاز و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و با افزایش مدت غوطه‌وری این کاهش بیشتر رخمون می‌گردد. درحالی‌که در نمونه‌های بهسازی شده، هر چه به طرح اختلاط بهینه نزدیک می‌شویم افزایش مقاومت مشاهده می‌شود و کاهش مقاومت بسیار جزئی در بلند مدت به دلیل لایه‌برداری بسیار جزئی

به این نکته حائز اهمیت است که نمونه شاهد بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ در مدت زمان غوطه‌وری ۱ و ۳ ماه، مقاومت فشاری کمتری در قیاس با نمونه شاهد بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ از خود نشان می‌دهد که در بلند مدت این روند معکوس می‌گردد و تقریباً در اکثر نمونه‌های مشابه بهسازی شده نیز تا حدودی قابل مشاهده است. دلیل این امر ریزتر بودن ذرات سیمان نوع ۲ نسبت به سیمان نوع ۵ است که گیرش اولیه و نهایی در آن‌ها به سرعت اتفاق می‌افتد. در میان نمونه‌های ساخته شده توسط سیمان نوع ۵ و افزودنی‌های معدنی، بهترین عملکرد از لحاظ مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در بلند مدت (غوطه‌وری به مدت ۱۸ ماه) به طرح اختلاط‌های T5S15F5، T5S20F0 و T5S10F10 مربوط می‌شود که مقاومت فشاری آن‌ها نسبت به نمونه شاهد در سن غوطه‌وری مشابه به ترتیب ۷۰، ۹۰ و ۸۹ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۸- تأثیر غوطه‌وری بر تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان نوع ۲ و افزودنی‌های معدنی



شکل ۹- تأثیر غوطه‌وری بر تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان نوع ۵ و افزودنی‌های معدنی

جهت بررسی عملکرد روش مورد استفاده در این تحقیق مقایسه‌ای بین نتایج حاصله با تحقیق تانگ و همکاران [۴۳] صورت پذیرفته و نتایج حاصل از این مقایسه در جدول‌های ۶ ارائه شده است. این مقایسه با بررسی تأثیر زمان غوطه‌وری نمونه‌ها تهیه شده در محیط خورنده بر تغییر مقاومت فشاری تهیه و تنظیم شده است. با مقایسه دو مطالعه، در زمان غوطه‌وری کوتاه مدت (۲ و ۳ ماه)، افزایش درصد خاکستر بادی موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. در حالی که در طولانی مدت (۶ ماه به بعد)، افزایش خاکستر بادی

موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. در ضمن مشاهده می‌شود که با افزایش زمان غوطه‌وری، مقاومت فشاری نسبت به کوتاه مدت کاهش می‌یابد. به ازای زمان غوطه‌وری ثابت، اختلاف حدوداً ۱۰ مگاپاسکالی مقاومت فشاری، می‌تواند ناشی از متفاوت بودن غلظت سولفات در شرایط غوطه‌وری و جنس مصالح استفاده شده باشد. همچنین در هر دو مطالعه مشاهده می‌شود که در زمان غوطه‌وری ۶ ماه، مخصوصاً در نمونه‌هایی که از سیمان نوع ۵ استفاده شده است، مقاومت‌های فشاری بیشترین مقدار را دارند.

جدول ۶- مقایسه تأثیر زمان غوطه‌وری نمونه‌های تهیه شده در محیط خورنده بر تغییر مقاومت فشاری با مطالعه تانگ و همکاران

[۴۳] (۲۰۱۹)

مطالعه حاضر			تانگ و همکاران ۲۰۱۹ [۴۳]		
سیمان نوع ۲		سیمان نوع ۵	سیمان نوع ۵		سیمان نوع ۵
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	زمان غوطه‌وری (ماه)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	زمان غوطه‌وری (ماه)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۴۳/۹	۱۰	۳۹/۱۰۲	۳۸/۳۱۸	۲	۴۲/۵
۴۲/۵	۲۰	۳۸/۰۲۴	۳۷/۸۲۸	۶	۴۸/۱
۴۸/۱	۱۰	۳۷/۹۲۶	۳۷/۵۳۴	۱۴	۵۱/۳
۵۱/۳	۲۰	۳۸/۰۲۴	۳۸/۰۲۴	۱۸	۴۵/۲
۴۵/۲	۱۰	۳۴/۸۸۸	۳۶/۱۶۲	۱۲	۴۷/۴
۴۷/۴	۲۰	۳۷/۰۴۴	۳۷/۱۴۲	۱۸	۴۲
۴۲	۱۰	۳۳/۵۱۶	۳۴/۴۹۶	۱۸	۴۳/۶
۴۳/۶	۲۰	۳۴/۷۹	۳۶/۱۶۲		

۴- نتیجه‌گیری

نتایج برجسته به دست آمده از مطالعه حاضر به شرح زیر است:

میکروسیلیس و خاکستر بادی، نقیصه افت مقاومت فشاری ناشی از افزودن خاکستر بادی در کوتاه مدت برطرف می‌شود. بیشترین مقاومت فشاری در تمامی سنین در افزودنی دوجزئی، مربوط به ترکیب F10S10 است، به طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه را برای سیمان نوع ۲، ۳۳ درصد و برای سیمان نوع ۵، ۳۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد.

در نمونه‌های با افزودنی دوجزئی، نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ در کوتاه مدت مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵ نشان می‌دهند. ولی در میان مدت و بلند مدت بتن‌های ساخته شده از سیمان نوع ۵، مقاومت‌های فشاری بیشتری کسب می‌کنند.

- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس با سیمان نوع ۵ افزایش بیشتری نسبت به نمونه‌های با سیمان نوع ۲ نشان می‌دهد. برای بتن حاصل از سیمان نوع ۲، میکروسیلیس به اندازه ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان و برای نوع ۵ در حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان به صورت جایگزین به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌گردد.
- افزایش خاکستر بادی در کوتاه مدت تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری نداشته ولی در بلند مدت به عنوان افزودنی مناسب قابل قبول است. از این رو برای هر دو نوع سیمان با افزودن دوجزئی

۶- مراجع

- [1]. مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲). طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، جدول ۹-۶-۲، صفحه ۴۸.
- [2]. Atkinson, A., & Nickerson, A. K. (1984). The diffusion of ions through water-saturated cement. *Journal of materials science*, 19(9), 3068-3078.
- [3]. Marchand, J., Odler, I., & Skalny, J. P. (2003). *Sulfate attack on concrete*. CRC Press.
- [4]. Stephens, J. B., & Carrasquillo, R. L. (2000). Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete (No. 0-1706-3). University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- [5] Zheng, D. D., Ji, T., Wang, C. Q., Sun, C. J., Lin, X. J., & Hossain, K. M. A. (2016). Effect of the combination of fly ash and silica fume on water resistance of Magnesium-Potassium Phosphate Cement. *Construction and Building Materials*, 106, 415-421.
- [6] Saha, Ashish Kumer. "Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete." *Sustainable environment research* 28, no. 1 (2018): 25-31.
- [7] Lam L, Wong YL, Poon CS. Effect of FA and SF on compressive and fracture behaviors of concrete. *Cement Concrete Res* 1998; 28:271-83.
- [8] Babu KG, Rao GSN. Early strength of FA concrete. *Cement Concrete Res* 1994; 24:277-84.
- [9] Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 542-549.
- [10] Cabrera, J. G., & Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 12(3), 157-161.
- [11] Atan, M. N., & Awang, H. (2011). The compressive and flexural strengths of self-compacting concrete using raw rice husk ash. *J. Eng. Sci. Technol*, 6(6), 720-732.
- [12] Domone, P. L. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, 29(1), 1-12.
- [13] Felekoğlu, B., Türkel, S., & Baradan, B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42(4), 1795-1802.
- [14] Hubertova, M., & Hela, R. (2007). The effect of metakaolin and silica fume on the properties of

- بدون حضور هیچ گونه افزودنی، بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ دوام بهتری نسبت به بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ دارد.
- افزودن میکروسیلیس منجر به کاهش جذب آب، کاهش نفوذ آب تحت فشار و کاهش نفوذ یون کلرید می‌شود. برخلاف میکروسیلیس، افزایش بیشتر خاکستر بادی تا حدودی باعث افزایش نفوذ یون کلرید می‌گردد.
- در نمونه‌های حاوی افزودنی دومؤلفه‌ای در معرض نفوذ یون کلرید، استفاده از درصد‌های جایگزینی بالاتر (بالای ۱۰٪) برای میکروسیلیس و درصد‌های جایگزینی پایین‌تر (حدود ۵٪) برای خاکستر بادی نتایج بهتری در بردارند.
- نرخ افزایش وزن در کوتاه مدت در نمونه‌های شاهد (برای هر دو نوع سیمان) کمتر از نمونه‌های بهسازی شده و شدت کاهش وزن در بلند مدت در نمونه شاهد نسبت به نمونه‌های بهسازی شده بسیار بیشتر است.
- در نمونه شاهد در کوتاه مدت به دلیل تولید مواد منبسط شونده ناشی از حمله سولفات‌ها، وزن نمونه افزایش یافته و در بلند مدت به دلیل ترک خوردن بتن، وزن نمونه کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که در نمونه‌های بهسازی شده، مواد منبسط شونده تولید نشده و یا بسیار کم تولید شده که متعاقباً منجر به ترک خوردگی نمی‌گردد و افزایش وزن نمونه‌ها در کوتاه مدت توأماً ناشی از این پدیده و رسوب‌گذاری و در بلند مدت فقط ناشی از لایه‌برداری جزئی روی سطح نمونه است. بهترین عملکرد از لحاظ افت وزنی و افت مقاومت فشاری در بلند مدت به طرح اختلاط‌های S10F10 و S5F15، S20F0 مربوط می‌شود.
- هم در نمونه شاهد و هم نمونه‌های مشابه بهسازی شده، بتن ساخته شده از سیمان نوع ۵ در مدت زمان غوطه‌وری ۱ و ۳ ماه، مقاومت فشاری کمتری در قیاس با نمونه شاهد بتن ساخته شده از سیمان نوع ۲ از خود نشان می‌دهد که در بلند مدت این روند معکوس می‌گردد.

۵- تشکر و قدردانی

- بدین‌وسیله از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل (گروه تحقیقات و ارتباط با دانشگاه) در راستای اجرای پروژه حاضر تشکر و قدردانی می‌گردد.

- [26]. Esmaeili-choobar, N., Esmaeili-falak, M., Roohi-hir, M., & Keshtzad, S. (2013). Evaluation of Collapsibility Potential at Talesh, Iran. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18.
- [27]. Esmaeili-Falak, M. (2017). Effect of system's geometry on the stability of frozen wall in excavation of saturated granular soils (Doctoral dissertation, University of Tabriz).
- [28]. Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., Vadiati, M., & Adamowski, J. (2019). Predicting Triaxial Compressive Strength and Young's Modulus of Frozen Sand Using Artificial Intelligence Methods. *Journal of Cold Regions Engineering*, 33(3), 04019007.
- [29]. Nassr, A., Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., & Javadi, A. (2018). A new approach to modeling the behavior of frozen soils. *Engineering geology*, 246, 82-90.
- [30]. Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., & Javadi, A. (2020). The effect of freezing on mechanical behavior of granular and cohesive soils-A case study of Tabriz Subway. *American Society of Civil Engineers*.
- [31]. Esmaeili-Falak, M. (2013). Study of displacement potential of landslides in Yamchi dam's abutments and slopes lake (M.Sc Thesis, Islamic Azad university of Science and research branch).
- [32]. Hover, K. "Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI 211.1-91". *Concrete International* 17 no. 9, (1995): 49-53.
- [33] ASTM C143 / C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
- [34] ASTM, R. "C138-Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete". (2001).
- [35] Standard, B. (1881). "Testing Concrete-Part 116: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes". BS, 116, (1983).
- [۳۶]. مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲). طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، جدول ۹-۶-۲، صفحه ۴۷.
- [37] British Standard. Testing concrete. Part 122. Method for determination of water absorption.
- [38] BS EN12390-8. (2000). Depth of penetration of water under pressure.
- [39] ASTM C1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete ability to resist chloride ion penetration.
- [40] Uchikawa, H., and S. Uchida. "Influence of pozzolana on the hydration of C3A." In *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of light weight self consolidating concrete*. Special Publication, 243, 35-48.
- [15] Nili, M., & Salehi, A. M. (2010). Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2108-2116.
- [16] Cabrera, J. G., & Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 12(3), 157-161.
- [17] Maghsoudi, A. A., Mohamadpour, S. H., & Maghsoudi, M. (2011). Mix design and mechanical properties of self compacting light weight concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 9(3), 230-236.
- [18] Bingöl, A. Ferhat, and H. Haghghipour Balaneji. "Determination of Sulfate Resistance of Concretes Containing Silica Fume and Fly Ash." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* (2018): 1-12.
- [19] Esmaeili, F. M., LOTFI, E. A., & Nematzadeh, S. (2019). Improvement of Mechanical Parameters of Concrete Yielded from Pozzolanic Cement for Irrigation and Drainage Projects.
- [۲۰]. رحمانی حمید، جوکار محسن، پروین نیا محمد. تأثیر توأم نانوسیلیس و میکروسیلیس بر دوام بتن‌های با مقاومت بالا در برابر تهاجم اسید سولفوریک. *مهندسی عمران مدرس*. ۱۳۹۴؛ ۱۵ (۲) ۱۲-۱:
- [21]. Al-Atta, Tareq & Taha, A. (2018). Performance of High-volum Fly Ash Self-Compacting Concrete Exposed to External Sulphate Attack.
- [22]. Wang, D., Zhou, X., Fu, B., & Zhang, L. (2018). Chloride ion penetration resistance of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 169, 740-747.
- [23]. Bingöl, A. F., & Balaneji, H. H. (2019). Determination of Sulfate Resistance of Concretes Containing Silica Fume and Fly Ash. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43(1), 219-230.
- [24]. Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., & Javadi, A. (2018). Experimental study of the mechanical behavior of frozen soils-A case study of Tabriz subway. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 117-125.
- [25]. Esmaeili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A., & Rahimi, S. (2017). Experimental investigation of stress and strain characteristics of frozen sandy soils-A case study of Tabriz subway. *Modares Civil Engineering journal*, 17(5), 13-23.

of Cement, Sub-Theme IV, Paris, France, (1980): 24-29.

[۴۱]. نیلی محمود، صالحی امیر مسعود، (۱۳۹۰). چه نوع پوزولان و به چه میزان در بتن‌های حجیم با مقاومت زیاد بکار ببریم؟. نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری (دانشکده فنی). دوره ۴۵، شماره ۲، صفحات ۲۴۷-۲۵۶.

[42] ASTM C150/C150M-18. "Standard Specification for Portland Cement". ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018), www.astm.org.

[43]. Dong, W., Li, W., Tao, Z., & Wang, K. "Piezoresistive properties of cement-based sensors: review and perspective". *Construction and Building Materials*, (2019), 203, 146-163.

Improvement of the Mechanical and Durability Parameters of Construction Concrete of the Qotursuyi Spa

Mahzad Esmacili-Falak*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran.

Reza Sarkhani

M.Sc. in Civil engineering, Dep. of Geotechnics, Faculty of Civil Eng., Tabriz University.

Rasoul Seifi

M.Sc. in Tectonics, Manager of Mineral Water Department, Ardabil Regional Water Co.

Abstract

Mineral additives are one of the used methods to prevent the decrease in strength of concrete against sulfate and chloride attack. In this paper, after identifying the characteristics and properties of Qotursui spa construction site, the effects of mineral additives (fly ash and micro-silica) on mechanical and durability parameters of the concrete specimens have been investigated via conventional and immersion in the Qotursuyi spa pool and its effects on the mechanical and durability parameters. Results showed that, in the improved samples with single component additives (e.g. micro-silica only) and two components, in the short-term cement type II and in the medium and long-term cement type V has been resulted greater compressive strength and durability. Fly ash has more positive effect on compressive strength in the long-term. The compressive strength of concrete samples containing type V cement with microsilica showed a greater increase than that of type II cement. Optimum amount of microsilica for concretes made of type II and type V cements are 10-15 percent and 10 percent replaced with cement, respectively. Similarly, optimum amount of flyash for concretes made of type II and type V cements are 15 for both, percent replaced with cement. The highest compressive strength in the two component additives is the F10S10 compound. It is also recommended to increase the silica content to improve the durability parameters. In the samples containing two-component additives, in severe sulfate environment such as the present study site, the use of higher replacement rates (above 10%) for micro-silica and lower replacement rates (about 5%) for fly ash serve better results. Short-term weight loss rates in the pilot samples (for both types of cement) were lower than in the improved samples and the intensity of long-term weight loss in the control samples was much higher than in the improved samples. In both the pilot and similar refined samples, concrete made of type V cement at 1 and 3 months immersion time showed less compressive strength than concrete type II concrete. In the long run, this trend reverses.

Keywords: Concrete Improvement, Sulfate Attack, Chloride ion penetration, Concrete Durability, Qotursuyi Spa.

* Corresponding Author: Mahzad.ef@tabrizu.ac.ir