

تأثیر پودر پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن

امیر طریقت*، امیر کوشکی جهرمی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

کلمات کلیدی:

پومیس طبیعی تفتان

میکروسیلیس

مقاومت فشاری

مقاومت کششی

حمله سولفاتی

خلاصه: در این مقاله روش بهینه‌سازی پرش دایره‌ها که یک روش فرااکتشافی می‌باشد ارائه می‌گردد. در هر مسأله بهینه‌سازی یک فضای پاسخ تعریف می‌شود که الگوریتم‌های بهینه‌سازی با جستجو در آن فضا، پاسخ بهینه را می‌یابند. روش پیشنهاد شده در این مقاله از دو رکن مهم در جستجوی فضای پاسخ بهره می‌گیرد. رکن اول استفاده از اصول هندسه می‌باشد. در روش پرش دایره‌ها، از شکل دایره که در طول حل اندازه شعاع آن کاهش می‌یابد، بهره‌گیری شده است. رکن دوم کاربرد فرااکتشافی است. آنچه در الگوریتم‌های فرااکتشافی مشاهده می‌شود، پخش شدن تصادفی نقاط مورد بررسی در فضای پاسخ است. در روش پرش دایره‌ها که در این مقاله ارائه می‌شود، مرکز دایره مورد جستجو به بهینه‌ترین نقطه هر گام پرش می‌کند. الگوریتم ارائه شده شامل دو فاز می‌باشد. فاز اول اکتشاف بهینه‌ترین محدوده و فاز دوم بهره‌برداری از اکتشاف است. در پایان بهینه‌ترین نقطه گام آخر فاز دوم، پاسخ بهینه مسأله خواهد بود. در این مقاله با توجه به اینکه روش پیشنهادی با تأکید بر مسائل مهندسی ارائه می‌شود، سه مسأله محک خریا حل شده است. همچنین برای نشان دادن توانایی روش پیشنهادی مسأله پیچیده کین نیز با آن حل گردیده است. پاسخ‌های این مسأله‌ها با تعدادی از روش‌های مرسوم مقایسه شده و در جداول جداگانه ارائه می‌گردد. در نتایج روش پرش دایره‌ها، بهبود قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود

۱- مقدمه

فعالیت‌های آتشفشانی در جاهای مختلف جهان امری عادی

به حساب می‌آید و در پی فوران‌های آتشفشانی مکرر، آثار طبیعی بجای مانده از آن از جمله خاکستر آتشفشانی و پومیس به وفور یافت می‌شوند. در تحقیقاتی که در سال ۱۹۹۴ پس از وقوع فوران آتشفشان در شهر رابائول واقع در کشور پاپوآ گینه نو صورت گرفت، تلاش بر این بود تا امکان استفاده از خاکستر آتشفشانی و پومیس به جای قسمتی از سیمان و دستیابی به بتن مرغوب‌تر بررسی شود. نتیجه به این صورت حاصل شد که استفاده از خاکستر آتشفشانی و پومیس به جای قسمتی از سیمان در تولید بتن نه تنها باعث تولید بتن کم هزینه‌تر می‌شود، بلکه به کاهش خطرات زیست‌محیطی نیز کمک می‌کند. این تحقیق اطلاعات مفیدی را راجع به استفاده از خاکستر آتشفشانی و

باتوجه به حجم بالای بتن‌ریزی که سالیانه در کشور ما انجام می‌گیرد، عدم توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند می‌تواند پیامدهای مخربی را در پی داشته باشد. از این رو تلاش‌ها برای پیدا کردن جایگزین‌های مناسب برای سیمان پرتلند همچنان ادامه دارد و مهندسان عمران همواره به دنبال یافتن بهترین پوزولان‌ها و درصد بهینه جایگزینی هر یک از آن‌ها برای کاربری‌های گوناگون می‌باشند تا هم در هزینه‌ها صرفه جویی شود و هم به بتن‌هایی با خواص مکانیکی و دوام بالاتر از بتن‌هایی که امروزه در کشور برای ساخت و ساز استفاده می‌شود، دسترسی پیدا کنند.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tarighat@sru.ac.ir



سنگدانه (به عنوان جایگزین شن) و جهت ساخت بتن سبک سازه‌ای و یا غیر سازه‌ای بکار برده‌اند.

محققانی که بر روی تأثیر پودر پومیس بر خواص مکانیکی بتن کار کرده‌اند نتایج متفاوتی را گزارش داده‌اند. در تحقیقی که Mehmet Karatas [۵] و همکاران بر روی تأثیر پودر پومیس بر خواص مکانیکی بتن انجام داد. نتایج به این ترتیب حاصل شد که جایگزینی پودر پومیس در کوتاه مدت (نمونه‌های ۳ روزه) موجب کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن نسبت به طرح شاهد می‌شود. اما با گذشت زمان و رسیدن به سنین ۲۸ روز و ۹۰ روز مقاومت فشاری و خمشی طرح‌های حاوی پودر پومیس نسبت به طرح شاهد مقادیر بیشتری پیدا می‌کند و این افزایش مقاومت با افزایش درصد جایگزینی پودر پومیس بیشتر می‌شود. البته این موضوع برای جایگزینی تا سقف ۱۵ درصد وزنی صادق است و با بیشتر شدن درصد جایگزینی، خواص مکانیکی بتن کمی کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، رضانیان پور و همکاران [۶] گزارش کردند که مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پودر پومیس خاش در سنین ۷ و ۲۸ روز مقادیر کمتری را نسبت به نمونه شاهد دارا هستند، اما با رسیدن به سن ۹۱ روز مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پودر پومیس (تا سقف ۲۰ درصد وزنی) بالاتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد قرار می‌گیرد. از طرفی دیگر Nihat Kabay [۷] و همکاران [۸] و همچنین بنی‌اردلان و همکاران [۸] نتایجی متفاوت با آنچه تاکنون گفته شد را ارائه کرده‌اند و معتقدند که جایگزین کردن پودر پومیس به جای سیمان پرتلند سبب کاهش پیدا کردن مقاومت فشاری و کششی بتن در سنین مختلف می‌شود و این کاهش مقاومت با بیشتر شدن درصد جایگزینی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین نیاز به انجام تحقیقات بیشتری در این خصوص احساس می‌شود تا بتوان نتایج را راحت‌تر جمع بندی کرده و با اطمینان بیشتری راجع به تأثیر پودر پومیس بر خواص مکانیکی بتن نظر داد. بر خلاف نتایج گزارش شده در زمینه خواص مکانیکی، محققان گزارش‌های مشابهی را در خصوص تأثیر پودر پومیس بر دوام بتن ارائه کرده‌اند. Nihat Kabay [۷] گزارش کرد که جایگزین کردن پودر پومیس به جای سیمان پرتلند موجب می‌شود تا بتن در هنگام قرار گرفتن در معرض حمله سولفاتی، آسیب دیدگی ظاهری کمتر، تغییر وزن کمتر و کاهش مقاومت فشاری کمتری را داشته باشد و این موارد با افزایش درصد جایگزینی پودر پومیس مشهودتر نیز می‌شود.

پومیس در تولید بتن ارائه می‌کند و پیشنهاد می‌کند که از خاکستر آتشفشانی و پومیس نیز همانند خاکستریادی (تا حداکثر ۲۰ درصد وزنی سیمان) در تولید بتن استفاده شود [۱]. بهبود دوام بتن یکی از مهم‌ترین دلایل تولید بتن با استفاده از خاکستر آتشفشانی و پومیس می‌باشد، زیرا بتن باید بتواند کیفیت خود را در طول حیات سازه حفظ کند که خاکستر آتشفشانی و پومیس نیز مانند پوزولان‌هایی همچون خاکستریادی و میکروسیلیس به این موضوع کمک بسیاری می‌کنند [۲]. از این رو شناخت این پوزولان‌ها، نحوه واکنش آن‌ها و شناخت تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و دوام بتن بسیار مهم می‌باشد تا پتانسیل آن‌ها به عنوان ماده جایگزین سیمان بررسی گردد.

پومیس از سنگ‌های با منشاء آتشفشانی است و به رنگ‌های سفید، خاکستری، صورتی، زرد کمرنگ یا قهوه‌ای دیده می‌شود که به دانه‌های درشت‌تر از ۲ میلی‌متر، پومیس و انواع دانه‌های ریزتر را پومیسیت می‌نامند. به علت آنکه در ترکیب پومیس و پومیسیت مقدار زیادی گاز و بخار آب وجود دارد، لذا وزن مخصوص این مواد معمولاً بسیار کم و حجم آنها زیاد است (وزن مخصوص پومیس غالباً کمتر از یک است) [۳]. پودر پومیس از آسیاب کردن سنگدانه‌های پومیس به دست می‌آید که با توجه به ساختار سنگدانه‌های پومیس این کار نیاز به صرف انرژی زیادی ندارد. کشور ترکیه به عنوان عظیم‌ترین منبع پومیس در جهان شناخته می‌شود [۴]. در ایران نیز منابع قابل توجهی از این پوزولان طبیعی در دامنه آتشفشان‌های قدیمی نظیر تفتان در سیستان و بلوچستان (پومیس استفاده شده در این تحقیق)، دماوند در نزدیکی تهران و سهند و سبلان در آذربایجان شرقی وجود دارد.

طبق تعریف مبحث نهم مقررات ملی ساختمان میکروسیلیس یا دوده سیلیس محصول فرعی کوره‌های قوس الکتریکی صنایع فروآلیاژ و فروسیلیس بوده و ماده‌ای است با فعالیت پوزولانی بسیار شدید که بیش از ۸۵ درصد سیلیس بلوری نشده دارد. در اکثر تحقیقاتی که به منظور بررسی تأثیر یک پوزولان طبیعی بر خواص بتن صورت می‌گیرد، پوزولان میکروسیلیس با هدف انجام مقایسه و همچنین بهبود خواص مکانیکی بتن در کنار این پوزولان‌ها بکار برده می‌شود.

تعداد تحقیقاتی که تاکنون بر روی تأثیر پودر پومیس بر خصوصیات بتن صورت گرفته است اندک بوده و اکثر تحقیقاتی که از پوزولان پومیس در ساخت بتن استفاده کرده‌اند پومیس را به صورت

درصد جذب آب، میزان تخلخل، انقباض ناشی از خشک شدگی، سرعت امواج اولتراسونیک (فراصوت)، پتانسیل نیم پیل و عملکرد بتن در دمای بالا، نتایج حکایت از تأثیر مثبت پودر پومیس بر تمامی موارد ذکر شده دارد.

آزمایشهایی که برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن صورت می‌گیرد تاکنون بر روی طرح‌های حاوی هر دو پوزولان پودر پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس انجام نگرفته است و این تحقیق به دنبال گام برداشتن در جهت توسعه‌ی پایدار و دستیابی به بتن با مقاومت و دوام بیشتر و همچنین هزینه کمتر، به مطالعه‌ی تأثیر پوزولانهای پودر پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام بتن می‌پردازد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی در تحقیق

۲-۱-۱- مواد سیمانی

مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان، پودر پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس مصرفی در تحقیق در جدول ۱ ملاحظه می‌شود. تصویر پودر پومیس طبیعی تفتان مصرفی در تحقیق در شکل ۱ آورده شده است.

همچنین رضانیان پور و همکاران [۹] گزارش کردند که در هنگام وقوع حمله سولفاتی نمونه‌های حاوی پودر پومیس تغییر ابعادی به مراتب کمتر از نمونه شاهد دارا می‌باشند.

در خصوص آزمایش جذب مویینگی نتایج حاکی از آن است که پودر پومیس با بهبود ساختار بتن و کاهش تخلخل آن موجب کاهش یافتن مقدار آب جذب شده از طریق لوله‌های موئینه به داخل بتن می‌گردد و هرچه درصد جایگزینی پودر پومیس بالاتر رود مقدار آب جذب شده نیز کاهش بیشتری پیدا می‌کند و این اتفاق با گذشت زمان و تکمیل تر شدن واکنش‌های پوزولانی پومیس، چشمگیرتر نیز می‌شود [۶].

در تحقیقی که Kianoosh Samimi و همکاران [۱۰] بر روی تأثیر پومیس بر خواص بتن انجام دادند نتایج مقاومت الکتریکی این گونه بدست آمد که جایگزینی پومیس موجب افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود و این افزایش مقاومت با درصد جایگزینی پومیس رابطه‌ی مستقیم دارد و هرچه درصد پومیس مصرفی بالاتر رود، مقاومت الکتریکی بتن نیز افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد که در سنین بالا اختلاف مقاومت الکتریکی طرح‌های حاوی پومیس با طرح شاهد چشمگیر است.

در مورد آزمایش‌های متداول دیگری که در زمینه ارزیابی دوام بتن صورت می‌گیرد؛ از جمله مقاومت کلرایدی، ارتفاع جذب آب،

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی

Table 1. Chemical and physical properties of cementitious materials

ترکیبات شیمیایی (%)	سیمان	پومیس طبیعی تفتان	میکروسیلیس
SiO ₂	۲۱/۲۴	۵۹/۹۶	۹۵
Al ₂ O ₃	۴/۷۰	۱۷/۳۷	۰/۵۹۵
Fe ₂ O ₃	۳/۷۱	۵/۲	۰/۴۱۲
CaO	۶۲/۴۲	۷/۸۸	۰/۳۵۶
MgO	۳/۲۲	۲/۳	۱/۴۹۸
SO ₃	۱/۹۹	۰/۴۸	۰
K ₂ O	۰/۷۲	۲/۳	۱/۴۱۸
Na ₂ O	۰/۱۱	۱/۹	۰/۶۷۱
LOI	۱/۷۷	۲/۳۷	۰
Cl	۰	۰/۰۳۷	۰
مشخصات فیزیکی			
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۱۸	۲/۶۳	۲/۲
ریزی بلین (cm ² /gr)	۳۰۹۱	۴۶۰۰	۲۵۰۰۰۰



شکل ۱. بودر پومیس طبیعی تفتان
Fig. 1. Taftan natural pumice powder

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی
Table 2. Specifications of consumable aggregates

سنگدانه	درصد جذب آب	حداکثر اندازه سنگدانه (میلی‌متر)	مدول نرمی
شن	۱/۲۳	۱۹	-
ماسه	۳/۵۷	-	۳/۰۷

جدول ۳: دانه‌بندی شن مصرفی در تحقیق
Table 3. Gravel gradation used in research

شماره الک	اندازه الک (mm)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی روی الک	درصد عبوری از الک	محدوده مجاز درصد عبوری طبق ASTM C33
۱"	۲۵	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
۳/۴"	۱۹	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰-۹۰
۱/۲"	۱۲/۵	۳۱/۸۷	۳۱/۸۷	۶۸/۱۳	-
۳/۸"	۹/۵	۲۸/۱	۵۹/۹۷	۴۰/۰۳	۵۵-۲۰
۴	۴/۷۵	۳۷/۷۴	۹۷/۷۱	۲/۲۹	۱۰-۰
۸	۲/۳۶	۱/۷۹	۹۹/۵	۰/۵	۵-۰

مشخصات مربوط به این سنگدانه‌ها در جدول ۲ آورده شده است همچنین مشخصات مربوط به دانه‌بندی شن و ماسه‌ی مصرفی در این تحقیق به ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ ملاحظه می‌شود.

۲-۱-۲- سنگدانه

سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق، شن و ماسه‌ی دوبار شسته شده می‌باشند که از معادن موجود در اطراف تهران تهیه شده‌اند.

جدول ۴. دانه‌بندی ماسه مصرفی در تحقیق
Table 4. Sand gradation used in research

محدوده مجاز درصد عبوری	درصد عبوری از	درصد تجمعی	درصد مانده روی	اندازه الک (mm)	شماره الک
طبق ASTM C33	الک	روی الک	الک		
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۹/۵	۳/۸"
۱۰۰-۹۵	۹۲/۷۷	۷/۲۳	۷/۲۳	۴/۷۵	۴
۱۰۰-۸۰	۸۳/۳۲	۱۶/۶۸	۹/۴۵	۲/۳۶	۸
۸۵-۵۰	۵۶/۲	۴۳/۸	۲۷/۱۲	۱/۱۸	۱۶
۶۰-۲۵	۳۹/۴۵	۶۰/۵۵	۱۶/۷۵	۰/۶	۳۰
۳۰-۱۰	۱۹/۳۹	۸۰/۶۱	۲۰/۰۶	۰/۳	۵۰
۱۰-۲	۱/۵۷	۹۸/۴۳	۱۷/۸۲	۰/۱۵	۱۰۰

در نظر گرفته شد و پودر پومیس طبیعی تفتان در درصدهای ۰، ۱۰ و ۲۰ و میکروسیلیس نیز در درصدهای ۰، ۷ و ۱۰ در طرح مخلوطها جایگزین سیمان شدند. همچنین سنگدانه‌ها نیز به صورت مساوی در بتن مورد استفاده قرار گرفتند (نسبت ۵۰ به ۵۰ برای درشت‌دانه به ریزدانه). در این تحقیق به منظور یکسان بودن شرایط تمام طرح مخلوطها و برای انجام مقایسه بین آن‌ها، اسلامپ تمامی طرح مخلوطها در محدوده‌ی ۸ تا ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفت. لازم به ذکر است که به منظور رعایت حجم واحد، ضرایب تصحیح در مقادیر مصالح مصرفی برای ساخت طرح مخلوطها ضرب شده است، بدین ترتیب که ابتدا وزن مخصوص واقعی طرح مخلوطها بر وزن مخصوص فرض شده (۲۴۰۰) تقسیم و سپس عدد حاصله در تمامی مقادیر مصالح مصرفی برای ساخت آن طرح مخلوط ضرب شده و در آخر اعداد نهایی در جدول ۵ و جدول ۶ آورده شده است.

۳-۲-۲- روش آزمایش و عمل آوری

۳-۲-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری (ASTM C۳۹)

طبق استاندارد، نمونه‌های بتنی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر ساخته و پس از عمل آوری، در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تحت آزمایش قرار گرفتند.

۳-۲-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی (ASTM C۴۹۶)

به منظور انجام آزمایش مقاومت کششی، نمونه‌های بتنی استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر پس از عمل آوری، در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تحت آزمایش قرار گرفتند.

درصد عبوری از الک‌ها با استاندارد ASTM C۳۳ مطابقت داده شده و همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضوابط این استاندارد رعایت شده است.

۲-۱-۲- آب و فوق روان‌کننده

آب استفاده شده در این تحقیق آب قابل شرب شهر تهران بوده که دارای کیفیت مطلوب جهت ساخت بتن می‌باشد. به طور کلی جایگزین کردن پوزولان به جای درصدی از سیمان موجب کاهش اسلامپ بتن می‌شود که دلیل آن به بیشتر بودن سطح مخصوص پوزولان‌ها نسبت به سیمان بر می‌گردد که در نتیجه منجر به جذب آب بیشتر آنها می‌شود. بنابراین به منظور ثابت نگه داشتن اسلامپ بتن استفاده از فوق روان‌کننده اجتناب ناپذیر است. فوق روان‌کننده استفاده شده در این تحقیق بر پایه پلی‌کربوکسیلات بوده و دارای رنگ قهوه‌ای سوخته است.

۲-۲- مشخصات طرح مخلوطها

در این تحقیق ۱۸ طرح مخلوط در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شد که هر نسبت آب به مواد سیمانی شامل ۹ طرح می‌باشد و برای هر نسبت آب به مواد سیمانی یک طرح به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد. مقصود از آب در اینجا آب آزاد است و آب لازم برای رسیدن سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک جدا محاسبه شده و به طرحها اضافه شده است. در این تحقیق عیار مواد سیمانی برای کلیه طرحها برابر $kg/m^3 400$

جدول ۵. مشخصات طرح مخلوط‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

Table 5. Specifications of mix design made with water to cementitious materials ratio of 0.4

شناسه طرح	درصد پومیس	درصد میکروسیلیس	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	پومیس (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	درصد فوق روان کننده
POSF0	۰	۰	۹۰۱/۶	۹۰۱/۶	۱۵۶/۸	۳۹۲	۰	۰	۰/۷
P10SF0	۱۰	۰	۸۹۲/۴	۸۹۲/۴	۱۵۵/۲	۳۴۹/۲	۳۸/۸	۰	۰/۹
P20SF0	۲۰	۰	۸۸۹/۶	۸۸۹/۶	۱۵۴/۷	۳۰۹/۴	۷۷/۴	۰	۱/۰۵
POSF7	۰	۷	۸۸۴/۱	۸۸۴/۱	۱۵۳/۷	۳۵۷/۵	۰	۲۶/۹	۰/۹
POSF10	۰	۱۰	۸۸۲/۳	۸۸۲/۳	۱۵۳/۴	۳۴۵/۲	۰	۳۸/۴	۰/۹۵
P10SF7	۱۰	۷	۸۷۶/۸	۸۷۶/۸	۱۵۲/۵	۳۱۶/۴	۳۸/۱	۲۶/۷	۱/۰۵
P10SF10	۱۰	۱۰	۸۶۶/۶	۸۶۶/۶	۱۵۰/۷	۳۰۱/۴	۳۷/۷	۳۷/۷	۱/۱
P20SF7	۲۰	۷	۸۶۹/۴	۸۶۹/۴	۱۵۱/۲	۲۷۵/۹	۷۵/۶	۲۶/۵	۱/۲
P20SF10	۲۰	۱۰	۸۵۶/۵	۸۵۶/۵	۱۴۹	۲۶۰/۷	۷۴/۵	۳۷/۲	۱/۲۵

جدول ۶. مشخصات طرح مخلوط‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵

Table 6. Specifications of mix design made with water to cementitious materials ratio of 0.45

شناسه طرح	درصد پومیس	درصد میکروسیلیس	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب آزاد (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	پومیس (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	درصد فوق روان کننده
POSF0	۰	۰	۸۸۵/۴	۸۸۵/۴	۱۷۵/۱	۳۸۹/۲	۰	۰	۰/۶
P10SF0	۱۰	۰	۸۷۸/۱	۸۷۸/۱	۱۷۳/۷	۳۴۷/۴	۳۸/۶	۰	۰/۷۵
P20SF0	۲۰	۰	۸۶۴/۵	۸۶۴/۵	۱۷۱	۳۰۴	۷۶	۰	۰/۹۵
POSF7	۰	۷	۸۷۶/۳	۸۷۶/۳	۱۷۳/۳	۳۵۸/۲	۰	۲۷	۰/۷۵
POSF10	۰	۱۰	۸۶۶/۳	۸۶۶/۳	۱۷۱/۴	۳۴۲/۷	۰	۳۸/۰۸	۰/۸
P10SF7	۱۰	۷	۸۵۳/۶	۸۵۳/۶	۱۶۸/۸	۳۱۱/۴	۳۷/۵	۲۶/۳	۰/۹
P10SF10	۱۰	۱۰	۸۴۸/۱	۸۴۸/۱	۱۶۷/۸	۲۹۸/۲	۳۷/۳	۳۷/۳	۱
P20SF7	۲۰	۷	۸۴۴/۵	۸۴۴/۵	۱۶۷	۲۷۱	۷۴/۲	۲۶	۱/۱
P20SF10	۲۰	۱۰	۸۳۵/۴	۸۳۵/۴	۱۶۵/۲	۲۵۷	۷۳/۴	۳۶/۷	۱/۱۵

گرفت که بالاترین مقاومت فشاری را در میان طرح‌های خود دارا بودند (نمونه‌های بهینه در هر طرح). به عنوان مثال از میان طرح‌هایی که پومیس طبیعی تفتان به تنهایی در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته بود، طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس بالاترین مقاومت را از خود نشان داد. بنابراین از میان طرح‌هایی که فقط شامل پومیس بودند این طرح برای آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی انتخاب شد. در میان طرح‌هایی که فقط شامل میکروسیلیس بودند، طرح حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و در میان طرح‌هایی که شامل هر دو پوزولان پومیس و میکروسیلیس بودند طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد

۲-۳-۳- آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی (ASTM C1012)

در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت در برابر حمله سولفاتی، ابتدا نمونه‌ها به منظور عمل آوری مرطوب به مدت ۷ روز در حوضچه آب قرار داده شدند و سپس به محلول سولفات سدیم با غلظت ۵ درصد منتقل شدند و بعد از رسیدن به سنین آزمایش (۲۸ روز و ۹۰ روز) از محلول خارج شده و عملکرد آن‌ها با بررسی شکل ظاهری (عکس برداری از نمونه‌ها)، محاسبه تغییر وزن و اندازه‌گیری مقاومت فشاری، مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این تحقیق آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی بر روی نمونه‌هایی صورت

$$w = s\sqrt{t} + b \quad (1)$$

که w وزن نمونه‌ها بر حسب گرم، s ضریب جذب مؤئینه بر حسب گرم بر مجذور ثانیه، t زمان بر حسب ثانیه و b عرض از مبدأ است.

۲-۳-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی معیاری برای ارزیابی دوام بتن در مقابل نفوذ یون کلراید و مقاومت آن در برابر خوردگی می‌باشد. هر چه مقاومت الکتریکی بتن بیشتر باشد یعنی مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید بالاتر خواهد بود [۱۱]. در این تحقیق به منظور انجام آزمایش مقاومت الکتریکی، نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه و ۹۰ روزه با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه اهم‌متر دیجیتالی و دو صفحه مسی تحت آزمایش قرار گرفتند. برای این کار ابتدا مقداری خمیر سیمان آماده شده و به بالا و پایین نمونه کشیده شد و سپس دو صفحه مسی روی سطوحی از بتن که خمیر سیمان کشیده شده بود، گذاشته شدند (هدف از کشیدن سیمان بر روی نمونه ایجاد اتصال بهتر است). دستگاه اهم متر دیجیتالی دارای دو الکتروود می‌باشد که پس از روشن کردن دستگاه هریک از آن‌ها به یکی از صفحات مسی اتصال داده شدند و سپس عدد ثبت شده بر روی دستگاه قرائت گردید.

۳- نتایج و بحث

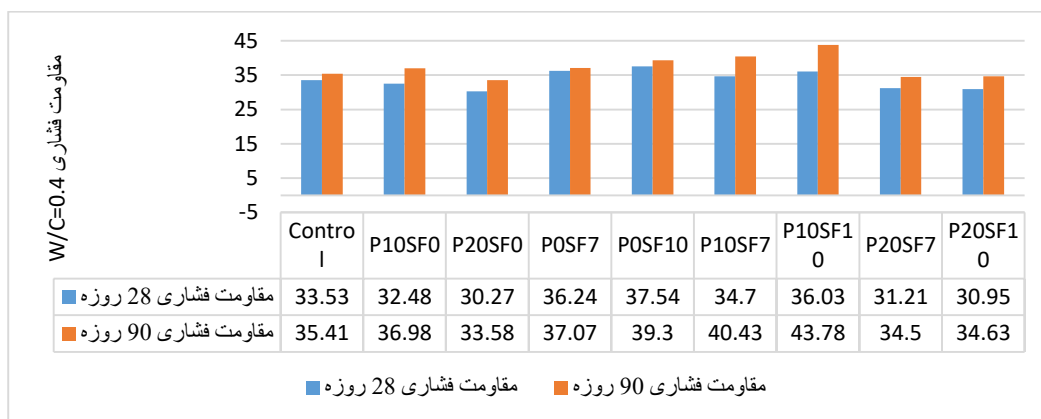
۳-۱- مقاومت فشاری

همان‌طور که در شکل ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه تعدادی از نمونه‌های پوزولانی از مقاومت فشاری

میکروسیلیس طرح‌های بهینه شدند و جهت انجام آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی انتخاب شدند. در نهایت طرح شاهد نیز به منظور انجام مقایسه در کنار این طرح‌ها قرار گرفت.

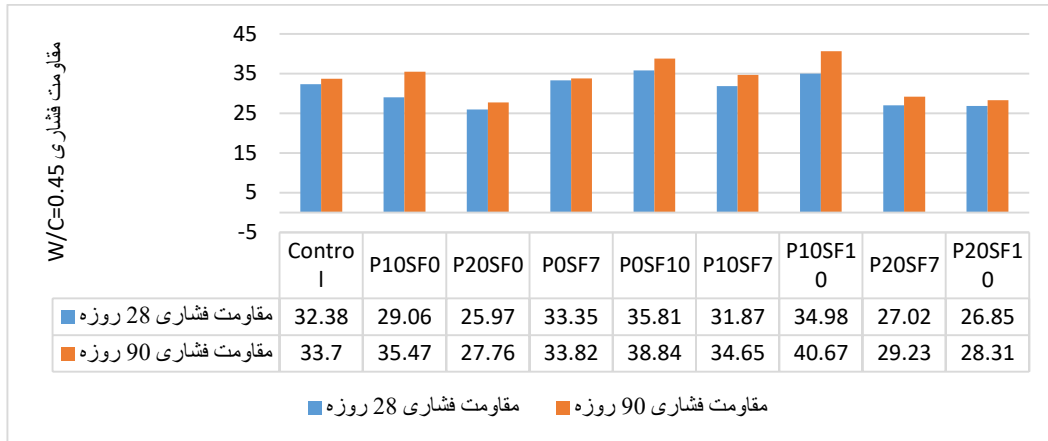
۲-۳-۴- آزمایش جذب موئینی (ASTM C ۱۵۸۵)

مطابق با استاندارد، پس از رسیدن سن نمونه‌ها به سنین آزمایش (۲۸ روز و ۹۰ روز) نمونه‌ها از حوضچه آب خارج شدند و پس از خشک شدن نمونه‌ها، وزن آن‌ها اندازه گرفته شد و سپس داخل یک سینی که مقدار اندکی آب در آن قرار داشت گذاشته شدند، به طوری که فقط کف نمونه‌ها در تماس با آب قرار گیرد و نفوذ آب یک بعدی باشد و به ترتیب پس از ۳۰ ثانیه، ۱ دقیقه، ۲ دقیقه، ۴ دقیقه، ۸ دقیقه، ۱۶ دقیقه، ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت، نمونه‌ها از سینی خارج شده و پس از خشک کردن سطح آن‌ها با دستمال پارچه‌ای، وزن آن‌ها اندازه گرفته شد و مقدار افزایش وزن نمونه‌های مختلف در طی این آزمایش یادداشت گردید و سپس باتوجه به اعداد حاصله، نمودارهای مربوطه رسم شده و در نهایت ضریب جذب مؤئینه از نمودارهای رسم شده و با کمک رابطه‌ی (۱) استخراج گردید. لازم به ذکر است که در این آزمایش نباید سطح نمونه‌ها به کف سینی بچسبد، زیرا در این صورت جذب توسط خاصیت موئینی صورت نمی‌گیرد، در این تحقیق برای جلوگیری از این موضوع ابتدا چندین سکه در سینی گذاشته شدند و سپس آب به اندازه‌ای که ۱ میلی‌متر از سطح سکه‌ها بالاتر بیاید، در سینی ریخته شد و بعد از آن نمونه‌ها بر روی سکه‌ها قرار داده شدند.



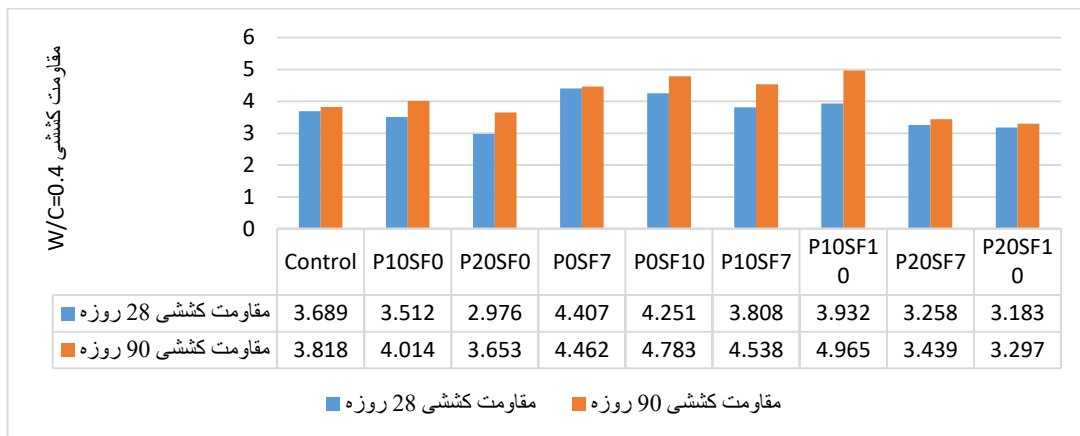
شکل ۲. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ (مگاپاسکال)

Fig. 2. Compressive strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.4 (MPa)



شکل ۳. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ (مگاپاسکال)

Fig. 3. Compressive strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.45 (MPa)

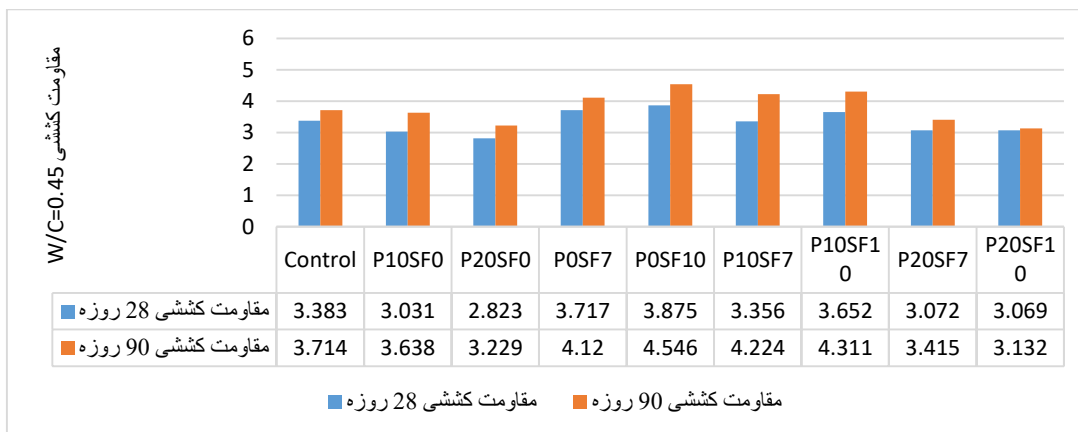


شکل ۴. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ (مگاپاسکال)

Fig. 4. Tensile strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.4 (MPa)

بالاترین مقاومت فشاری در این سن به طرح حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس اختصاص پیدا کند. در نمونه‌هایی که پومیس طبیعی تفتان در کنار میکروسیلیس مورد استفاده قرار گرفته است، نتایج متفاوتی در مقاومت فشاری بتن حاصل شده است. به این ترتیب که زمانی که پومیس با مقدار جایگزینی ۱۰ درصد در کنار میکروسیلیس (۷ درصد و ۱۰ درصد) قرار گرفته است، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است؛ اما زمانی که مقدار پومیس به ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد

بتن شاهد در همین سن، کمتر شده است. دلیل این موضوع تکمیل نشدن واکنش‌های پوزولانی و خاصیت رقیق‌کنندگی آن‌ها می‌باشد. اما به ترتیبی که در شکل‌ها هم مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که میکروسیلیس به تنهایی در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، این شرایط را ندارند و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها نسبت به بتن شاهد بیشتر شده است. دلیل آن به وجود درصد بالای سیلیس فعال در میکروسیلیس بر می‌گردد که باعث می‌شود واکنش‌های میکروسیلیس با سرعت بالاتری نسبت به بقیه پوزولان‌ها انجام گیرد و در نتیجه



شکل ۵. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ (مگاپاسکال)

Fig. 5. Tensile strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.45 (MPa)

سیمانی بالاترین مقاومت فشاری را کسب کرده است (طرح بهینه) و مقاومت فشاری بتن را بیش از ۲۰ درصد افزایش داده است. از مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌هایی که با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵ ساخته شدند میتوان دریافت که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. نسبت آب به مواد سیمانی یک پارامتر بسیار مهم در ساخت بتن به حساب می‌آید و تقریباً می‌توان گفت که بر روی تمامی خصوصیات بتن (در کوتاه‌مدت و بلندمدت) تأثیرگذار است. هنگامی که مقدار آب در بتن از یک مقداری فراتر رود، حتی بعد از سخت شدن بتن همچنان مقداری آب در آن وجود دارد که بدون استفاده باقی‌مانده است. این آب محبوس شده به تدریج بخار میشود و فضای خالی را در ساختار بتن برجای می‌گذارد و در نتیجه منجر به افزایش تخلخل بتن میشود. این افزایش تخلخل کاهش مقاومت فشاری بتن را در پی دارد.

۳-۲- مقاومت کششی

در شکل ۴ و شکل ۵ مشاهده می‌شود که در سن ۲۸ روز نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد پومیس عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است و مقاومت کششی آن تقریباً به اندازه مقاومت کششی نمونه شاهد شده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که این پوزولان (با درصد جایگزینی ۱۰ درصد) در سن ۲۸ روز نیز به دلیل نقش فیلمانند (پرکن) خود می‌تواند مقاومت مناسبی را سبب شود. با افزایش درصد جایگزینی پومیس به ۲۰ درصد کاهش نسبتاً زیادی در مقدار مقاومت

کمی کاهش پیدا کرده که این می‌تواند به نبودن آب آهک کافی در بتن برای واکنش با این مقدار زیاد از پوزولان مربوط باشد.

مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت زمان (از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز) افزایش پیدا می‌کند که این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی پوزولان (به جز نمونه‌هایی که فقط شامل میکروسیلیس هستند) بیشتر از نمونه‌ی شاهد است، زیرا با گذشت زمان و کامل‌تر شدن واکنش‌های پوزولانی، ژل سلیکاتی بیشتری در این طرح‌ها تولید می‌شود که مترادف‌تر شدن بتن را در پی دارد.

در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری اکثر نمونه‌های حاوی پوزولان از مقاومت فشاری نمونه شاهد بیشتر شده است. در این سن مقاومت فشاری نمونه با ۱۰ درصد پومیس از مقاومت فشاری نمونه شاهد پیشی گرفته است (برخلاف مقاومت فشاری ۲۸ روزه). این مسأله گویای این مطلب است که هر زمان از پوزولان‌های طبیعی (که سلیس فعال کمتری نسبت به پوزولان‌های مصنوعی دارند) استفاده می‌شود، باید منتظر ماند تا تأثیر آن‌ها را در درازمدت بر بتن بررسی کرد. ممکن است در کوتاه‌مدت تأثیر منفی بر مقاومت فشاری بتن داشته باشند، اما به مانند این تحقیق در سنین بالاتر این موضوع جبران می‌شود. رضانیان‌پور و همکاران [۶] نیز نتایج مشابهی را ارائه کرده‌اند. همان‌طور که گفته شد در سن ۲۸ روز نمونه با ۱۰ درصد میکروسیلیس بیشترین مقدار مقاومت فشاری را داشت؛ اما در سن ۹۰ روز و با تکمیل‌تر شدن فعالیت‌های پوزولانی، نمونه با ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس در هر دو نسبت آب به مواد



نمونه‌های 28 روزه



نمونه‌های 90 روزه

شکل ۶. تصاویری از تشکیل گچ و اترینگایت بر روی نمونه‌ها
Fig. 6. Images of gypsum and ettringite formation on samples

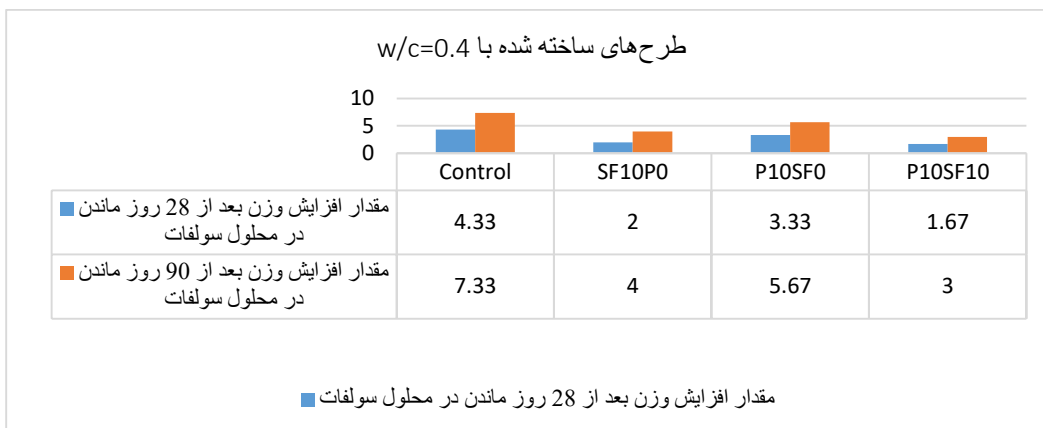
در ادامه با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات این موضوع روشن خواهد شد که نمونه‌هایی که تغییر وزن بیشتری در پی تشکیل گچ و اترینگایت داشته‌اند، مقاومت فشاری کمتری را نسبت به سایر نمونه‌ها خواهند داشت.

۲-۳- اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها

با ورود یون‌های سولفات به درون بتن و تشکیل گچ و اترینگایت، در ابتدا منافذ بتن بسته شده و در نتیجه تراکم بتن بالا می‌رود که این موضوع باعث افزایش یافتن مقاومت فشاری بتن می‌شود. اما با گذشت زمان و افزایش حجم اترینگایت و در نتیجه متورم شدن و ترک برداشتن بتن، شاهد یک کاهش مقاومت چشمگیر خواهیم بود.

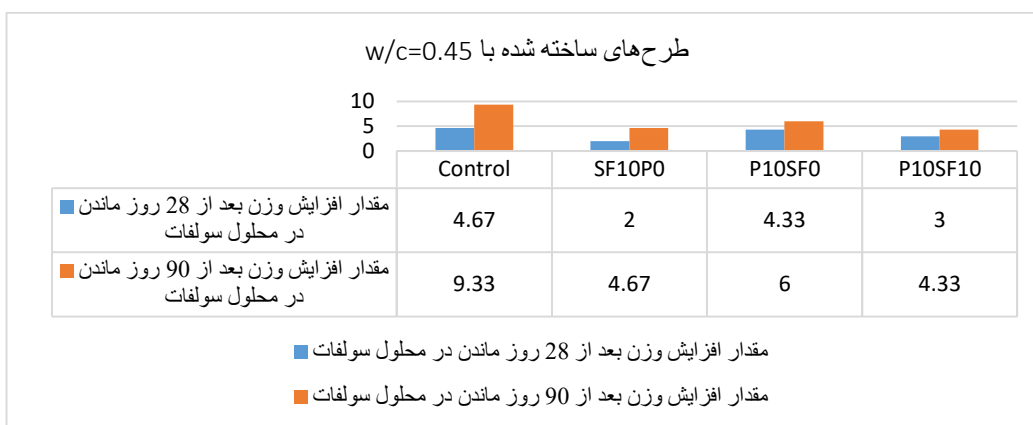
تغییر می‌کند. رضانیان پور و همکاران [۹] نیز نتایج مشابهی را ارائه کرده‌اند.

با مقایسه شکل ۷ و شکل ۸ در می‌یابیم که افزایش نسبت آب به مواد سیمانی موجب بیشتر شدن مقدار افزایش وزن نمونه‌ها شده است که دلیل آن افزایش مقدار تخلخل (منافذ) بتن در پی افزایش مقدار آب مصرفی می‌باشد که بدین ترتیب یون‌های سولفات بیشتری وارد بتن شده و گچ و اترینگایت بیشتری نیز تشکیل می‌گردد و در نتیجه افزایش وزن بیشتری را در پی دارد. بنابراین آب مصرفی در بتن باید کاملاً تحت کنترل باشد؛ زیرا اگر نسبت آب به مواد سیمانی از یک حدی فراتر رود علاوه بر کاهش خواص مکانیکی، دوام بتن نیز با خطرات جدی مواجه می‌شود.



شکل ۷. تغییر وزن نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴ پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم (گرم)

Fig. 7. Weight change of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.4 after placement in sodium sulfate solution (gram)



شکل ۸. تغییر وزن نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم (گرم)

Fig. 8. Weight change of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.45 after placement in sodium sulfate solution (gram)

می‌زند. در این مدت طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس (ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴) با بیش از ۱ مگاپاسکال افزایش، بیشترین رشد مقاومت کششی را در میان نمونه‌ها داشته است. ملاحظه می‌شود که در این مدت کمترین افزایش مقاومت مربوط به طرح حاوی ۷ درصد میکروسیلیس (ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴) است که نشان از سرعت واکنش بالای میکروسیلیس دارد و باعث می‌شود عمده‌ی آب آهک را تا سن ۲۸ روز مصرف کند.

در سن ۹۰ روز مقاومت کششی تعدادی از طرح‌های حاوی پوزولان با اختلاف زیادی نسبت به نمونه شاهد بیشتر شده است و

کششی بتن حاصل شده است که این موضوع حتی در نمونه‌هایی که این مقدار پومیس در کنار میکروسیلیس بکار برده شده است نیز دیده می‌شود. این اتفاق به دلیل خاصیت رقیق‌کنندگی این درصد از پوزولان پومیس است.

از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز، افزایش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی پومیس طبیعی تفتان بسیار مناسب بوده است و در همه‌ی موارد به جز طرح حاوی ۲۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس رشد مقاومتی بیشتر از طرح شاهد داشته‌اند. این موضوع به سبب خاصیت پوزولانی پومیس طبیعی تفتان می‌باشد که با تولید ژل سیلیکاتی و پر کردن خلل و فرج بتن، افزایش مقاومت‌های چشمگیری را رقم

اترینگایت در نمونه‌های پوزولانی نسبت به نمونه شاهد کمتر است، زیرا پوزولان‌ها به دلیل عملکرد فیلر مانند خود و همچنین مصرف آب آهک و تبدیل آن به ژل سیلیکاتی باعث بسته شدن منافذ بتن می‌شوند. در نتیجه یون سولفات کمتری وارد بتن شده و در پی آن گچ و اترینگایت کمتری تشکیل می‌شود که این موضوع در سطح بتن نیز قابل دید است. در این تحقیق نیز این موضوع از مقایسه سطح نمونه شاهد با نمونه‌های پوزولانی قابل برداشت بود؛ به طوری که روی سطح نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس حتی پس از ۹۰ روز ماندن در محلول سولفات گچ و اترینگایتی زیادی دیده نشد، اما در نمونه شاهد تشکیل گچ و اترینگایت به وضوح قابل ملاحظه بود.

۳-۳-۲- اندازه‌گیری مقدار تغییر وزن نمونه‌ها

عامل ایجاد تغییر وزن در نمونه‌های بتنی تشکیل بلورهای گچ و اترینگایت در اثر واکنش یون‌های سولفات با کلسیم هیدروکسید و هیدروآلومینات کلسیم می‌باشد [۹]. پس از انجام این واکنش اتفاقاتی که در بتن رخ می‌دهد به این ترتیب است که اترینگایت تشکیل شده با گذشت زمان افزایش حجم می‌دهد و این افزایش حجم تا حدود سن ۹۰ روز موجب افزایش وزن نمونه‌ها نسبت به وزن اولیه می‌شود (به دلیل پر شدن منافذ بتن توسط گچ و اترینگایت). اما بعد از آن اوضاع متفاوت می‌شود و افزایش حجم اترینگایت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که نیروی زیادی در بتن ایجاد می‌گردد و این نیرو از ظرفیت کششی بتن فراتر می‌رود و در نتیجه بتن متورم شده و در سطح آن ترک‌هایی ایجاد می‌شود. اما این موضوع به اینجا ختم نمی‌شود و افزایش حجم اترینگایت همچنان ادامه پیدا می‌کند تا ترک‌ها عمیق‌تر شده و در نتیجه تکه‌هایی از سطح بتن کنده می‌شود که موجب کاهش وزن نمونه‌ها نسبت به وزن اولیه آن‌ها می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، قرار گرفتن نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم موجب افزایش وزن آن‌ها شده است. این افزایش وزن با گذشت زمان (از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز) بیشتر نیز شده است که در این میان نمونه شاهد بیشترین افزایش وزن را داشته است. به ترتیبی که در شکل مشخص است، نمونه‌های پوزولانی تغییر وزن کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند که دلیل آن به مترکم‌تر شدن بتن و کاهش فازهای منفی در پی استفاده از

این گویای این مسأله است که تأثیر پوزولان‌ها (به خصوص پوزولان پومیس طبیعی تفتان) در این سن نمود پیدا می‌کند. در سن ۹۰ روز، طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس مقاومتی در حد نمونه شاهد کسب کرده است؛ اما مقاومت کششی نمونه حاوی ۲۰ درصد پومیس کمتر از نمونه شاهد شده است. بنابراین در این قسمت نیز همانند آزمایش مقاومت فشاری درصد بهینه پوزولان پومیس ۱۰ درصد می‌باشد که هنگام بکار بردن این درصد پومیس در کنار میکروسیلیس نتایج شکل بهتری نیز به خود می‌گیرد. البته باید توجه داشت که طرح‌هایی که درصد جایگزینی پوزولان زیاد است، زمان بیشتری لازم است تا واکنش‌های پوزولانی تکمیل گردد و شاید در درازمدت (پس از ۱۸۰ روز و یا بیشتر)، نتایج طرح‌های حاوی ۲۰ درصد پومیس به گونه‌ی دیگری رقم بخورد.

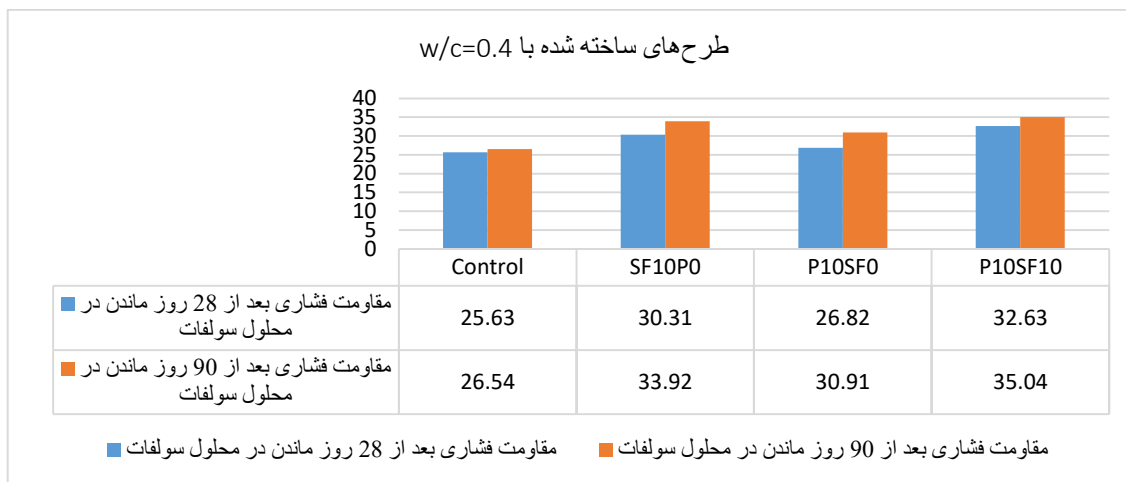
نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی در این تحقیق، با نتایجی که Nihat Kabay و همکاران [۷] ارائه کرده‌اند همخوانی دارد. با مشاهده نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی در سن ۹۰ روز، می‌توان گفت که بهترین نتایج در زمینه خواص مکانیکی بتن زمانی حاصل می‌شود که پومیس طبیعی تفتان (با جایگزینی ۱۰ درصد وزنی) در کنار میکروسیلیس (خصوصاً ۱۰ درصد) در تولید بتن بکار برده شود که این تأییدکننده‌ی سازگاری مناسب این دو پوزولان در کنار یکدیگر به منظور تولید بتن می‌باشد.

۳-۳-۳- مقاومت در برابر حمله سولفاتی

۳-۳-۱- عکس‌برداری از سطح نمونه‌ها

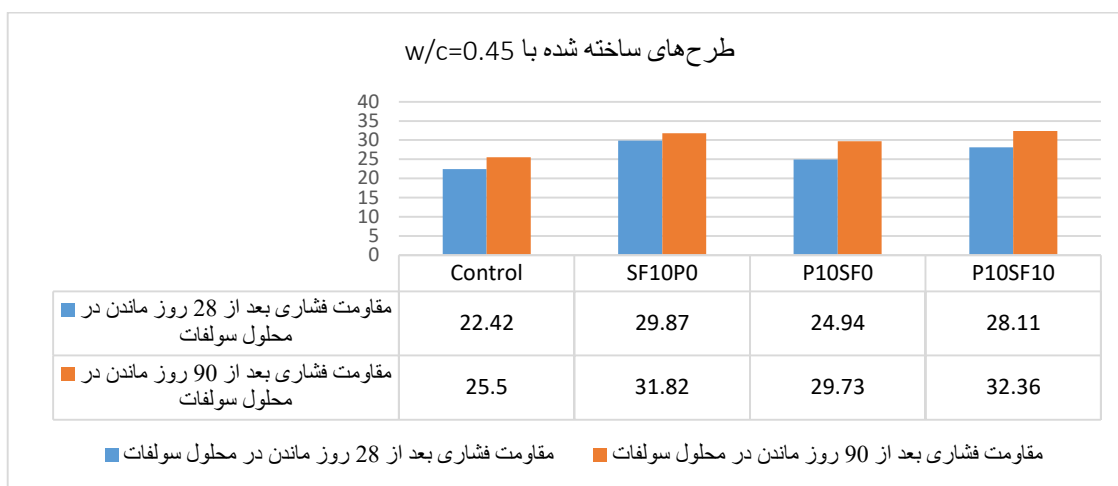
در این مرحله به منظور ارزیابی مقاومت طرح‌ها در برابر حمله سولفاتی، پس از خارج کردن نمونه‌ها از محلول سولفات سدیم از سطح آن‌ها عکس‌برداری صورت گرفت. در ادامه چند نمونه از این تصاویر را که نشان‌دهنده‌ی تشکیل گچ و اترینگایت بر روی نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات سدیم است، در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بر روی نمونه‌های خارج شده از محلول سولفات سدیم بلورهای سوزنی اترینگایت و سفیدک تشکیل شده است که این موضوع در نمونه‌هایی که ۹۰ روز در محلول سولفات سدیم قرار گرفته بودند (به خصوص نمونه شاهد) شدیدتر بود. به ترتیبی که در شکل ملاحظه می‌شود، حمله سولفاتی موجب آسیب دیدن لبه‌ی نمونه‌ها شده است. تشکیل گچ و



شکل ۹. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴ پس از قرارگیری در محلول سولفات (مگاپاسکال)

Fig. 9. Compressive strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.4 after exposure to sulfate solution (MPa)



شکل ۱۰. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ پس از قرارگیری در محلول سولفات (مگاپاسکال)

Fig. 10. Compressive strength results of samples made with water to cementitious materials ratio of 0.45 after exposure to sulfate solution (MPa)

نمونه شاهد داشته‌اند. در میان نمونه‌های پوزولانی طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس کمترین تغییر وزن را (در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی) به خود اختصاص داده است. این موضوع تا حدودی قابل پیش‌بینی بود، زیرا با افزایش درصد پوزولان مصرفی تراکم بتن بیشتر شده و در نتیجه منافذ بیشتری از بتن بسته می‌شوند و تشکیل گچ و اترینگایت ثانویه که نتیجه‌ی ورود یون سولفات به داخل بتن است کمتر صورت می‌گیرد و وزن بتن کمتر

پوزولان‌های پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس مربوط می‌شود. در پی بسته شدن تعداد زیادی از منافذ بتن در نمونه‌های پوزولانی، راه‌های ورود مواد مضر از جمله یون سولفات بسیار کمتر می‌شود و با کاهش یافتن مقدار یون سولفات وارد شده به بتن، گچ و اترینگایت کمتری نیز در بتن ایجاد می‌شود. بنابراین بتن آسیب کمتری می‌بیند و خواص فیزیکی و شیمیایی آن دچار تغییرات کمتری می‌شود. در این تحقیق نیز وزن نمونه‌های پوزولانی تغییرات کمتری را نسبت به

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات سدیم در شکل ۹ و شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه شاهد از همه‌ی نمونه‌ها حتی نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس طبیعی تفتان کمتر شده است. این در صورتی است که در قسمت‌های قبل (نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب) مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه شاهد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس بیشتر شده بود. این اتفاق بیانگر این است که پومیس طبیعی تفتان در محیط‌هایی که مواد مضر وجود دارد با بهبود دوام بتن سبب ثابت ماندن مقاومت فشاری (خواص مکانیکی) بتن می‌شود؛ اما نمونه شاهد با کاهش در مقاومت روبرو خواهد شد. همچنین در شکل ملاحظه می‌شود که مقاومت ۲۸ روزه نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس از مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس در همین سن بیشتر شده است که این موضوع نیز در نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب به‌گونه‌ی دیگری رقم خورده بود و در آن‌جا عکس این اتفاق را شاهد بودیم. دلیل این‌گونه حاصل شدن نتایج این است که در محیط‌های حاوی مواد مضر از جمله یون‌های سولفات، شرایط کاملاً متفاوت است و در آنجا دوام بتن است که تعیین‌کننده مقدار مقاومت فشاری آن می‌باشد. هرچه دوام بتن بالاتر باشد، مقاومت بهتری را نتیجه می‌دهد؛ زیرا مواد مضر کمتری به آن را پیدا کرده‌اند و ساختار بتن آسیب کمتری دیده است.

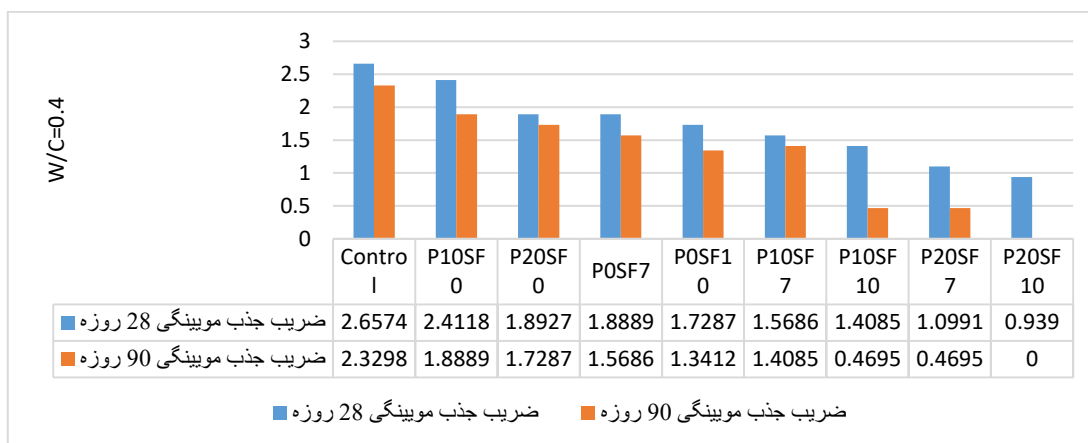
از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز نمونه‌های حاوی پوزولان افزایش مقاومتی به مراتب بیشتر از نمونه شاهد از خود نشان داده‌اند؛ البته نه به مقدار افزایش مقاومتی که این نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری در آب معمولی داشتند، زیرا در اینجا یون‌های سولفات وارد شده به بتن در انجام واکنش‌های پوزولانی اختلال ایجاد کرده و افزایش مقاومت را با کاهش روبرو می‌کنند. البته شاید بتوان گفت که درنمونه‌های حاوی پوزولان بخشی از افزایش مقاومت مربوط به انجام واکنش‌های پوزولانی است و بخشی دیگر مربوط به پر شدن منافذ توسط گچ و اترینگایت؛ زیرا منافذ بتن هیچگاه به صورت کامل و صد درصدی بسته نمی‌شوند و حتی در نمونه‌های حاوی پوزولان نیز مقداری تخلخل وجود دارد. بنابراین مقداری یون سولفات به درون نمونه‌های پوزولانی نیز راه پیدا می‌کند که البته مقدار آن نسبت به نمونه شاهد

بسیار کمتر است.

پس از ۹۰ روز از ماندن نمونه‌ها درون محلول سولفات سدیم، اختلاف مقاومت فشاری نمونه شاهد با نمونه‌های پوزولانی چشمگیر می‌باشد. بیشترین مقاومت حاصله در این سن مربوط به طرحی است که بیشترین درصد پوزولان مصرفی را دارد (طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس) و مقاومت بتن را حدود ۳۰ درصد افزایش داده است، زیرا پوزولان‌ها میزان آب آهک را کاهش می‌دهند و به این ترتیب آب آهک کمتری برای تشکیل گچ و یا فراهم کردن کلسیم برای تشکیل اترینگایت، در دسترس است. از طرفی C_4A موجود در سیمان پرتلند بسیار واکنش‌پذیر است و واکنش آن با یون‌های سولفات موجب تخریب ساختار بتن می‌شود که طبیعتاً مقدار آن در نمونه شاهد بیشتر از نمونه‌های پوزولانی است [۷]. بنابراین در محیط‌های سولفاتی استفاده از پوزولان‌ها اجتناب‌ناپذیر است و مقاومت بتن معمولی (شاهد) در این محیط‌ها بسیار ناچیز است که این موضوع پایداری سازه را با خطرات جدی روبرو می‌کند.

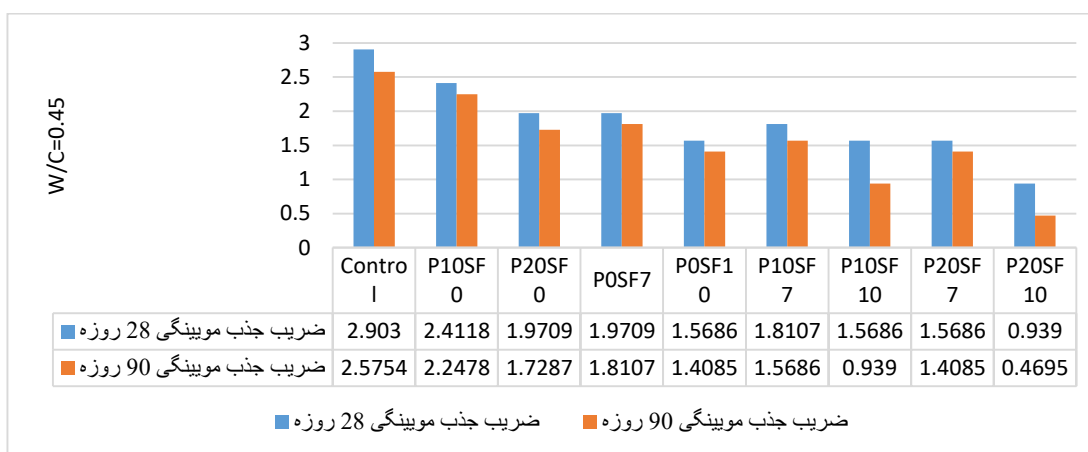
۳-۴- جذب مؤینگی

همان‌گونه که در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب جذب مؤینگی نمونه‌ها با افزایش سن کاهش پیدا کرده است؛ زیرا با گذشت زمان ذرات بیشتری از سیمان پرتلند هیدراته شده و از طرفی هم واکنش‌های پوزولانی کامل‌تر می‌گردد و در نتیجه بتن ساختار بهتری پیدا کرده و متراکم‌تر می‌شود. استفاده از پوزولان‌های پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس سبب شده است تا آب کمتری از طریق لوله‌های مؤینه به درون بتن راه پیدا کند؛ زیرا پوزولان‌ها در سنین پایین همانند فیلر عمل کرده و منافذ موجود در بتن را تا حدود زیادی مسدود می‌کنند و با گذشت زمان نیز آب آهک حاصله از فرآیند هیدراتاسیون را مصرف کرده و آن را به ژل سیلیکاتی تبدیل می‌کنند. ژل سیلیکاتی تولید شده توسط پوزولان‌ها حفره‌ها و فضا-های خالی را پر می‌کند و یا باعث تغییر در ساختار آن‌ها می‌گردد (منقطع کردن حفرات از یکدیگر) و در نتیجه آب کمتری به درون بتن راه پیدا خواهد کرد. با افزایش درصد پوزولان مصرفی، مقدار ضریب جذب مؤینگی کاهش بیشتری پیدا می‌کند که این اتفاق نتیجه‌ی پر شدن حفرات بیشتر و ترمیم ساختار بتن است. Nihat Kabay و همکاران [۷] نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند.



شکل ۱۱. ضریب جذب موئینگی نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

Fig. 11. Capillary absorption coefficient of the sample made with water to cementitious materials ratio of 0.4



شکل ۱۲. ضریب جذب موئینگی نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵

Fig. 12. Capillary absorption coefficient of the sample made with water to cementitious materials ratio of 0.45

تخلخل را دارد که با توجه به درصد پوزولان مصرفی در این طرح این موضوع منطقی به نظر می‌آید.

از مقایسه شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌توان دریافت که مقادیر ضریب جذب موئینگی بتن با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴ به ۰/۴۵، افزایش پیدا کرده‌اند (به جز طرح حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس). افزایش ضریب جذب موئینگی به منزله‌ی ورود آب بیشتر به درون بتن از طریق لوله‌های موئینه می‌باشد و این یعنی با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، میزان حفرات و منافذ موجود در ساختار نمونه‌ها بیشتر شده و در نتیجه مقدار آب بیشتری توانسته

در شکل مشاهده می‌شود که مقدار ضریب جذب موئینگی برخی از طرح‌های حاوی پوزولان از سن ۲۸ روز تا ۹۰ روز کاهش بیشتری نسبت به بقیه طرح‌ها داشته است (طرح‌هایی که بیشترین مقدار پوزولان مصرفی را داشته‌اند). این رخداد می‌تواند به این دلیل باشد که عمده واکنش پوزولانی این طرح‌ها در این فاصله انجام گرفته است و به همین دلیل مقدار آب جذب شده توسط این نمونه‌ها در سن ۹۰ روز بسیار ناچیز بوده است. کمترین میزان آب جذب شده در سن ۲۸ و ۹۰ روز به طرح حاوی ۲۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس اختصاص دارد و از شواهد پیداست که این طرح کمترین میزان

با جایگزینی پوزولان‌های پومیس و میکروسیلیس، مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. بیشترین مقاومت الکتریکی بدست آمده مربوط به طرحی است که بیشترین درصد جایگزینی پوزولان را داشته است؛ زیرا در این طرح مقدار تخلخل بتن به کمترین میزان خود می‌رسد و در نتیجه نفوذپذیری این طرح ناچیز خواهد بود. می‌توان گفت که مقدار مقاومت الکتریکی بتن با درصد پوزولان مصرفی نسبت مستقیم دارد و هر چه درصد پوزولان مصرفی در بتن افزایش پیدا کند، مقاومت الکتریکی آن نیز افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد و در نتیجه نفوذپذیری بتن در برابر یون کلراید کمتر خواهد شد. Askarian و همکاران [۱۱] نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند.

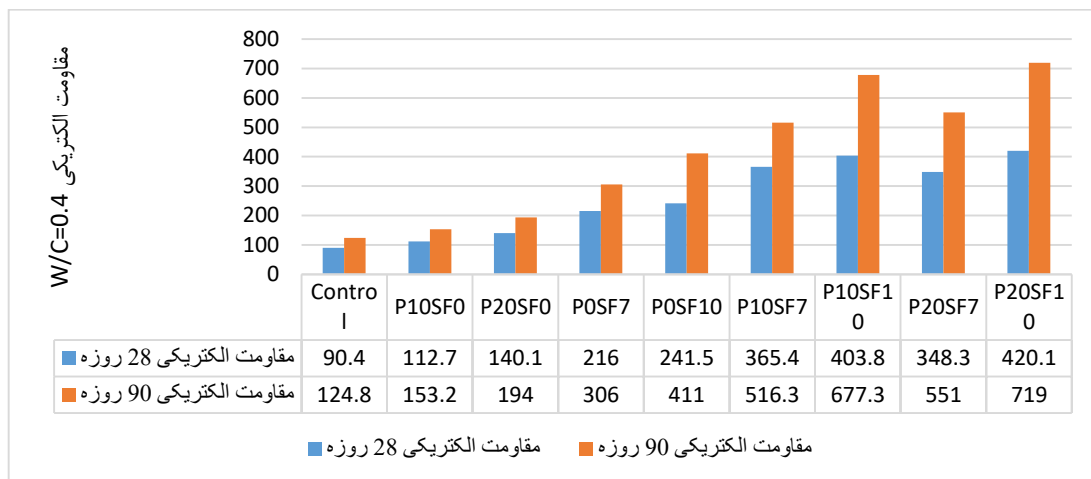
در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه طرح‌های حاوی میکروسیلیس (چه طرح‌هایی که میکروسیلیس به تنهایی در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و چه طرح‌هایی که میکروسیلیس در کنار پومیس استفاده شده است) رشد چشمگیری را نسبت به مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه خود داشته‌اند. دلیل آن به تولید ژل سیلیکاتی در پی واکنش پوزولان میکروسیلیس با آب آهک و در نتیجه کاهش یون‌های آزاد و تخلخل بتن مربوط می‌شود. رشد مقاومت الکتریکی طرح‌های حاوی پوزولان پومیس طبیعی تفتان در این فاصله (از سن ۲۸ روز تا سن ۹۰ روز) به مراتب بهتر از طرح

است تا به درون بتن راه پیدا کند. این موضوع کاهش یافتن دوام بتن و در نتیجه به خطر افتادن سلامت آن در پی افزایش نسبت آب به مواد سیمانی را در بر دارد که یکی از دلایل آن این است که با افزایش مقدار آب مصرفی در بتن میزان بلورهای هیدروکسید کلسیم موجود در بتن نیز افزایش پیدا می‌کند.

۳-۵- مقاومت الکتریکی

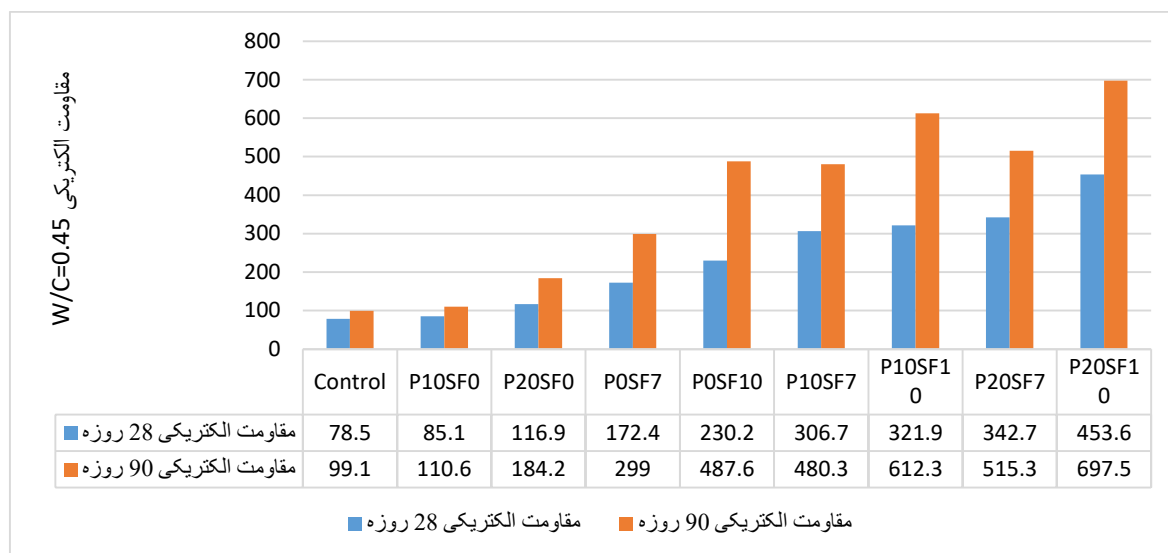
با مشاهده شکل ۱۳ و شکل ۱۴ برداشت می‌شود که مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند و بیشترین مقدار به دست آمده از مقاومت الکتریکی طرح‌ها مربوط به سن ۹۰ روزه آن‌ها می‌باشد؛ زیرا با گذشت زمان ذرات بیشتری از سیمان پرتلند هیدراته شده و پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون موجب کاهش تخلخل موجود در بتن می‌شود. در طرح‌های پوزولانی نیز گذشت زمان باعث پیشرفت واکنش‌های پوزولانی، مصرف آب آهک بیشتر و در پی آن کاهش غلظت کاتیون‌ها و تولید ژل سیلیکاتی بیشتر می‌گردد که در نتیجه حفرات موجود در بتن کمتر و کمتر می‌شود.

کمترین مقاومت الکتریکی حاصله مربوط به طرح شاهد می‌باشد. بنابراین طبق انتظار این طرح دارای بیشترین تخلخل است و در برابر نفوذپذیری یون کلراید ضعیف‌ترین عملکرد را خواهد داشت.



شکل ۱۳. نتایج مقاومت الکتریکی طرح‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ (اهم در متر)

Fig. 13. Results of electrical resistance of designs made with water to cementitious materials ratio of 0.4 (ohm per meter)



شکل ۱۴. نتایج مقاومت الکتریکی طرح‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ (اهم در متر)

Fig. 14. Results of electrical resistance of designs made with water to cementitious materials ratio of 0.45 (ohm per meter)

فشاری بتن). دلیل آن این است که پوزولان پومیس برای انجام فعالیت‌های پوزولانی خود نیاز به زمان دارد.

۲- خواص مکانیکی طرح‌هایی که پومیس طبیعی تفتان و میکروسیلیس همزمان در آن‌ها به کار برده شده بسیار مناسب بوده است و پس از ۹۰ روز بالاترین مقادیر مقاومت فشاری و مقاومت کششی به طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس اختصاص دارد (با بیش از ۲۰ درصد افزایش در مقاومت فشاری بتن).

۳- در آزمایش‌های مقاومت در برابر حمله سولفاتی، جذب موئینگی و مقاومت الکتریکی که برای ارزیابی دوام بتن صورت گرفتند، طرح‌هایی که بالاترین درصد جایگزینی پوزولان را داشتند بهترین عملکرد را در بین نمونه‌ها از خود نشان دادند. به این ترتیب که در آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس و در آزمایش‌های جذب موئینگی و مقاومت الکتریکی نیز طرح حاوی ۲۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد میکروسیلیس طرح‌های بهینه شدند، زیرا در این طرح‌ها تخلخل بتن به حداقل مقدار خود رسید.

مراجع

[1] K. Hossain, Properties of volcanic ash and pumice

شاهد بوده است؛ اما به اندازه‌ی رشد طرح‌های حاوی میکروسیلیس نبوده است، زیرا سرعت واکنش پوزولان‌های طبیعی از جمله پومیس به مراتب پایین‌تر از سرعت واکنش پوزولان مصنوعی میکروسیلیس است (که حدود ۹۵ درصد سیلیس فعال دارد) و شاید پومیس نتوانسته است تا در این مدت نسبتاً کوتاه به اندازه‌ی میکروسیلیس در واکنش‌ها شرکت کرده و مقدار مقاومت الکتریکی را به این اندازه افزایش دهد.

افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴ به ۰/۴۵ موجب کاهش یافتن مقادیر مقاومت الکتریکی شده است، زیرا با افزایش مقدار آب مصرفی در بتن مقدار آب آهک افزایش پیدا می‌کند و با افزایش آب آهک درصد تخلخل بتن بیشتر می‌شود. این موارد باعث می‌شوند تا نفوذپذیری بتن افزایش پیدا کرده و در نتیجه مقاومت الکتریکی کاهش پیدا کند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌هایی که پوزولان پومیس به تنهایی در آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته از مقاومت فشاری طرح شاهد کمتر شده است. اما با گذشت زمان و رسیدن به سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری طرح حاوی ۱۰ درصد پومیس از مقاومت طرح شاهد بیشتر شده است (با حدود ۵ درصد افزایش در مقاومت

- [7] N. Kabay, M.M. Tufekci, A.B. Kizilkanat, D. Oktay, Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials, *Construction and Building Materials*, 85 (2015) 1-8.
- [8] R.B. Ardalan, A. Joshaghani, R.D. Hooton, Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume, *Construction and Building Materials*, 134 (2017) 116-122.
- [9] A.A. Ramezaniipoor, M. Peydayesh, E. Aramoon, S. Mirvalad, M. Mahdikhani, Effect of various natural pozzolans on concrete durability against sulfate attack, in: *First National Conference of Concrete National Library and Archives of Iran*, 2009. (in Persian)
- [10] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, *Construction and building materials*, 151 (2017) 292-311.
- [11] M. Askarian, S. Fakhretaha Aval, A. Joshaghani, A comprehensive experimental study on the performance of pumice powder in self-compacting concrete (SCC), *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 7(6) (2018) 340-356.
- concrete, IABSE Report, 80 (1999) 145-150.
- [2] K. Hossain, M. Lachemi, Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34(4) (2004) 695-702.
- [3] M.R. Zamani Abyane, S. Maharati, G. Derhamjani, Z. Ziaee, Effect of natural pozzolans on the mechanical properties of self-compacting concrete, in: *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development of Contemporary Iran*, Iran, Tehran, 2017. (in Persian)
- [4] K. Hossain, S. Ahmed, M. Lachemi, Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics, *Construction and Building Materials*, 25(3) (2011) 1186-1195.
- [5] M. Karataş, A. Benli, A. Ergin, Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars, *Construction and Building Materials*, 150 (2017) 467-479.
- [6] A.A. Ramezaniipoor, M. Peydayesh, E. Aramoon, M. Mahdikhani, Effect of various natural pozzolans on concrete durability against chloride attack, in: *First National Conference of Concrete, National Library and Archives of Iran*, 2009. (in Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Tarighat, A. Kooshki Jahromi., (2021). *The Effect of Pumice and Silica Fume on the Mechanical Properties and Durability of Concrete*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 2131-2148.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17335.6534](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17335.6534)

