

علمی - تخصصی

## بررسی اثر تهاجم سولفاتی بر دوام کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی و پلی پروپیلن

### حاوی نانوذرات سیلیس

صفا پیمان<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

#### چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی اثر تهاجم سولفاتی بر دوام کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی و پلی پروپیلن حاوی نانوذرات سیلیس پرداخته شده است. به همین منظور از درصد های جایگزینی ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیس به عنوان جایگزین سیمان و ۱ درصد وزنی الیاف فولادی و ۰/۲ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن به عنوان افزودنی های میکرومقیاس به صورت مجزا و همزمان در کامپوزیت سیمانی در معرض تهاجم سولفاتی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین کامپوزیت های سیمانی اجرا شده با طرح مخلوط های پژوهش حاضر به مدت ۶ ماه در معرض تهاجم سدیم سولفات ۵ درصد قرار گرفته و اثر محیط خورنده سولفاتی در تغییرات مقاومت فشاری، تغییرات وزن و انبساط طولی نمونه ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که حضور همزمان نانوذرات سیلیس، الیاف های فولادی و پلی پروپیلن سبب افزایش دوام در برابر تهاجم سولفاتی می شود. به نحوی که ترکیب همزمان ۲ درصد نانوذرات سیلیس، ۱ درصد الیاف فولادی و ۰/۲ درصد الیاف پلی پروپیلن در کامپوزیت سیمانی کمترین مقدار افت مقاومت فشاری، تلفات جرمی و انبساط طولی را پس از ۶ ماه غوطه وری در محلول سولفاتی را در مقایسه با سایر طرح مخلوط های ساخته شده از خود نشان داد. براساس نتایج بدست آمده از این پژوهش می توان بیان کرد که حضور همزمان نانوذرات سیلیس و الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در ماتریس سیمانی می تواند به شکل قابل توجهی موجب بهبود دوام در برابر تهاجم سولفاتی کامپوزیت های پایه سیمانی شود.

**کلید واژه ها:** تهاجم سولفاتی، کامپوزیت سیمانی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، نانوذرات سیلیس

#### ۱. مقدمه

می دهند [۶ و ۷]. در واقع هنگامی که یون های سولفات وارد مواد سخت شده پایه سیمانی می شوند، مونو سولفوآلومینات (AFm) و تری کلسیم آلومینات آب نشده ( $C_3A$ ) را به اترینگایت (Aft)،  $(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O)$  و همینطور هیدروکسید کلسیم (CH) به گچ ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) تبدیل می شود؛ بنابراین تشکیل فرآورده های انبساطی همچون اترینگایت و گچ باعث انبساط و ترک خوردگی در مواد پایه سیمانی سخت شده می شود، که تجزیه کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) را به دنبال خواهد شد. در نهایت تحت چنین شرایطی، تهاجم سولفاتی منجر به کاهش عمر مفید سازه های بتنی می شود [۶ و ۸].

به طور کلی، سه استراتژی اولیه برای مقابله با تهاجم سولفاتی توصیه می شود که شامل موارد ذیل می شود: (۱) محدود کردن

تهاجم سولفاتی به عنوان یک نگرانی قابل توجه در زمینه دوام کامپوزیت های پایه سیمانی شناخته شده است؛ که دوام بسیاری از سازه های بتنی را تهدید می کند. اگرچه این موضوع پدیده جدیدی نیست، اما در چند دهه اخیر، تعداد بی شماری از اعضای سازه های از جمله سدها، روسازی بتنی، پایه های پل، شمع های بتنی، پایه های مدفون بتنی، تونل های بزرگراه یا راه آهن، و دال های کف با تخریب قابل توجه ناشی از تهاجم سولفاتی در سرتاسر دنیا مواجه شده اند [۱-۶].

تهاجم سولفاتی خارجی، فرآیندی است که در آن یون های سولفات محیط خارجی وارد کامپوزیت های پایه سیمانی می شوند و با محصولات حاصل از هیدراسیون سیمان پرتلند واکنش

الیدیب [۳۱]، اثر الیاف فولادی بر دوام در معرض تهاجم سولفاتی بتن پرمقاومت خود متراکم مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه حاوی ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۵۲ درصد حجمی الیاف فولادی در معرض محلول سولفات با غلظت بالا (۵ درصد وزنی سولفات سدیم) و در دمای بالا (۵۰ درجه سانتی‌گراد) برای ارزیابی دوام بتن در مواجهه با تهاجم سولفات استفاده شد. در همین راستا مقاومت فشاری بتن در فواصل زمانی مختلف پس از غوطه‌ور شدن در محلول سولفات (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه) اندازه‌گیری شده و با مقاومت فشاری قبل از غوطه‌وری در محلول سولفات مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۳ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات افزایش یافته است؛ این را می‌توان به دمای بالا نسبت داد که ممکن است باعث تسریع واکنش‌های شیمیایی به‌ویژه واکنش پوزولانی شود؛ و بالطبع آن افزایش مقاومت را در نمونه‌ها به دنبال داشته باشد. از طرفی کاهش مقاومت فشاری تا ۱۲ ماه غوطه‌وری در محلول سولفاتی برای مخلوط‌های مختلف حدود ۱۲ درصد بود که نشان‌دهنده اثر جزئی گنجاندن کسرهای حجمی مختلف الیاف فولادی در کاهش افت مقاومت فشاری در محیط سولفاتی می‌باشد. همچنین بهفرنیا و فرشادفر [۳۲] در پژوهشی مقاومت سولفاتی بتن خود متراکم تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن تحت تهاجم محلول منزیم سولفات با غلظت جرمی ۵٪ و ۱۰٪ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کاهش جرم و افت مقاومت فشاری بتن غوطه‌ور در محلول منزیم سولفات را کاهش دهد.

بنابراین براساس مطالب ارائه شده، نانوذرات سیلیس و همچنین الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن دارای مکانیزم‌های عملکردی قابل توجهی در راستای بهبود دوام کامپوزیت‌های سیمانی در برابر تهاجم سولفاتی می‌باشند. از سویی بررسی محققین این مقاله حاکی از عدم وجود پژوهشی جامع و مدون در خصوص تأثیر توأم نانوذرات سیلیس و الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر دوام سولفاتی ملات سیمانی بود. لذا در پژوهش حاضر هدف بررسی اثر تهاجم سولفاتی بر دوام کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن حاوی نانو ذرات سیلیس در نظر گرفته شد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر از سیمان پرتلند معمولی تیپ دو مطابق با استاندارد ASTM C150 [۱۳]، با سطح ویژه ۰/۳۴ متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۳/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده

محتوای کلسیم آلومینات هیدراته (C3A) در سیمان همانطور که در ASTM C150 تجویز شده است. ۲) کاهش محتوای CH با استفاده از مواد سیمانی مکمل به عنوان ماده جایگزین سیمان، و ۳) کاهش نفوذپذیری بتن با کاهش نسبت آب به سیمان [۶ و ۹-۱۲]. از آنجایی که CH و C3A در واکنش تهاجم سولفاتی شرکت می‌کنند، هر استراتژی که بتواند حضور این محصولات را محدود کند می‌توان انتظار داشت که مقاومت در برابر تهاجم سولفاتی را بهبود بخشد. استاندارد ASTM C150 سیمان‌های نوع II و نوع V را با محدود کردن محتوای C3A موجود در آن‌ها به عنوان مقاوم در برابر تهاجم سولفاتی معرفی کرده است [۱۳]، اما این عامل به تنهایی نمی‌تواند مانع از کلیه اشکال تهاجم سولفاتی شود؛ زیرا حضور CH همچنان نقش غالب را در تهاجم سولفاتی را ایفا می‌کند [۶]. بنابراین، جایگزینی جزئی این سیمان‌ها با مواد سیمانی مکمل میکرو مقیاس (از جمله خاکستر بادی کم کلسیم [۱۴-۱۶]، سرباره کوره آهن‌گدازی [۱۷-۱۹]، متاکائولین [۲۰-۲۲] و دود سیلیس [۱۴ و ۱۹ و ۲۳ و ۲۴]) و نانومقیاس (از جمله نانوذرات سیلیس [۲۵ و ۲۶] و نانورس‌ها [۲۶ و ۲۷]) می‌تواند به دلیل خاصیت پوزولانی آن‌ها که منجر به مصرف CH در حین واکنش پوزولانی می‌شود، مفید باشد. در همین راستا، در پژوهشی توسط توبون و همکاران [۲۸]، انبساط طولی ناشی از تهاجم سولفاتی را در نمونه‌های ملات سیمانی حاوی ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات سیلیس مورد مطالعه قرار دادند. لذا نمونه‌ها را به مدت ۱۵۴ هفته در محلول ۵ درصد منزیم سولفات غوطه‌ور کرده و انبساط طولی آن‌ها به صورت هفتگی ثبت شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد جایگزینی نانوذرات سیلیس میزان انبساط طولی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در آخرین قرائت (هفته ۱۵۴م) با جایگزینی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوذرات سیلیس به ترتیب ۴۹، ۶۳ و ۸۳ درصد انبساط طولی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر که توسط آشوک و همکاران [۲۹] انجام شده است؛ تأثیر افزودن همزمان ۱/۵ درصد نانوذرات سیلیس و ۲ درصد نانومتاکائولن در ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول ۵ درصد سدیم سولفات را به مدت ۱۴ هفته بررسی نمودند؛ که به این نتیجه رسیدند که میزان درصد انبساط طولی نمونه مذکور در مدت‌زمان غوطه‌وری در بازه صفر تا ۰/۳۳ می‌باشد که بسیار کمتر از حد مجاز ۰/۱ درصدی است که توسط استاندارد ASTM C1012 ارائه گردیده است.

علاوه بر این، افزودن انواع میکروالیاف‌ها نیز می‌تواند از طریق مکانیزم‌هایی همچون کاهش نفوذپذیری، کاهش ترک‌خوردگی با افزایش شکل‌پذیری و اثر پل‌زدگی در مهار ترک‌ها، در حین تهاجم سولفاتی منجر به بهبود دوام کامپوزیت‌های سیمانی در معرض محیط‌های خورنده سولفاتی شود [۳۰]. لذا در پژوهشی توسط

پلی پروپیلن مطابق با مشخصات بیان شده در جدول (۴) استفاده شد. لازم به ذکر است به منظور دستیابی به کارایی مورد نظر در کامپوزیت سیمانی و همینطور به عنوان یک ماده سطح پرداز جهت پخش شدگی مناسب نانوذرات سیلیس در کامپوزیت سیمانی، از فوق روان کننده پلی کربوکسیلات-اثر محصول شرکت وندشیمی، مطابق با رده بندی F براساس استاندارد ASTM C494/C494M-16 [۳۴]، استفاده شد. افزون بر این، آب شرب شهری با مقدار pH برابر با ۶/۹ مورد استفاده قرار گرفت.

است. ترکیبات شیمیایی سیمان حاصل از آنالیز شیمیایی XRF در جدول (۱) قابل مشاهده است. ماسه سیلیسی طبیعی با وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب و مدول نرمی ۲/۴۹ به عنوان ریزدانه مورد استفاده قرار گرفت؛ که الزامات دانه بندی آن در جدول (۲) مطابق با استاندارد ASTM C778 [۳۳] ارائه شده است. نانوذرات سیلیس مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت صنایع نانوذرات سیلیس ایساتیس بوده، که مشخصات آن در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین از الیاف فولادی و

جدول (۱). ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند معمولی تیپ دو

MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	ترکیبات شیمیایی
۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۷۱	۲/۷۰	۳/۲۳	۳/۶۳	۶/۷۸	۱۹/۴۲	۶۳/۰۱	درصد وزنی

جدول (۲). الزامات دانه بندی ماسه مصرفی در پژوهش حاضر براساس ASTM C778

درصد عبوری از الک		شماره الک	سایز الک
برنامه آزمایشگاهی	ASTM C778		
۱۰۰	۱۰۰	۱۶	۱/۱۸ mm
۹۷	۱۰۰-۹۶	۳۰	۶۰۰ μm
۷۰	۷۵-۶۵	۴۰	۴۲۵ μm
۲۶	۳۰-۲۰	۵۰	۳۰۰ μm
۲	۴-۰	۱۰۰	۱۵۰ μm

جدول (۳). مشخصات نانوذرات سیلیس مصرفی در پژوهش حاضر

شکل	درصد خلوص	رنگ	pH	اندازه ذرات
نانو پودر	۹۹	سفید	۳/۵-۵/۵	۱۵ تا ۱۸ میلی متر

جدول (۴). مشخصات الیاف فولادی و پلی پروپیلن مصرفی در پژوهش حاضر

ویژگی	الیاف فولادی	الیاف پلی پروپیلن
طول (میلی متر)	۱۸	۱۲
قطر (میلی متر)	۰/۷	۰/۱
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۰۵۰	۳۲۰
نسبت ابعادی (L/D)	۲۵/۷	۱۲۰

سپس بشر را در دستگاه مافوق صوت پروبی قرار داده و با انتخاب توان ۲۰۰ وات و مدت زمان ۱۰ دقیقه، عمل پراکنش نانوذرات سیلیس در آب انجام می گردید. لازم به ذکر است که در حین فرآیند آلتراسونیک بشر را در حمام آب یخ گذاشته، تا در حین پراکنش توسط دستگاه مافوق صوت از گرم شدن بیش از حد محلول جلوگیری شود. علاوه بر این، عملیات پراکنش در بازه های زمانی ۲۰ ثانیه انجام گردید؛ که در هر دوره ۲۰ ثانیه ای پراکنش،

## ۲-۲. روش ساخت سوسپانسیون حاوی نانوذرات سیلیس

به منظور ساخت سوسپانسیون حاوی نانوذرات سیلیس، ابتدا به اندازه مورد نیاز آب، نانوذرات سیلیس و فوق روان کننده پلی کربوکسیلات-اثر توزین کرده و در بشر شیشه ای ریخته شده و

همچنین از آزمایش‌های مینی اسلامپ و میز جریان به منظور ثابت نگه داشتن کارایی در کلیه مخلوط‌ها استفاده گردید. در همین راستا درصدهای مختلف فوق روان‌کننده مصرفی (بر حسب درصد وزنی مواد سیمانی)، براساس آزمایش مینی اسلامپ برای مقدار افت اسلامپ  $1 \pm 1/20$  سانتی‌متر و همینطور آزمایش میز جریان برای مقدار پخش‌شدگی  $10 \pm 130$  میلی‌متر تنظیم گردید.

براساس جزئیات طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ارائه شده در جدول (۵) و مطابق روش پیشنهادی استاندارد ASTM C305 [۳۹] مصالح مصرفی مخلوط شدند. پس از روغن کاری قالب‌های مربوطه، کامپوزیت سیمانی ساخته شده در قالب‌ها ریخته شد. برای کاهش حباب‌های هوای موجود در کامپوزیت سیمانی، نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه با فرکانس ۲۵ هرتز بر روی میز لرزه قرار داده شده و تحت ویبره قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و در آب آهک اشباع شده مطابق با استاندارد ASTM C511 [۴۰] عمل‌آوری شدند.

جدول (۵). جزئیات طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

کدگذاری نمونه	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	نانوسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف فولادی (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف پلی‌پروپیلن (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان‌کننده (kg/m <sup>3</sup> )
Control	۵۱۸/۵۰	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	-	-	-	۱/۵۶
M1	۵۱۳/۳۰	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۵/۱۸۵	-	-	۲/۵۹
M2	۵۰۸/۱۳	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۱۰/۳۷۰	-	-	۲/۸۵
M3	۵۰۲/۹۵	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۱۵/۵۶۰	-	-	۳/۱۱
M4	۵۱۸/۵۰	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	-	۵/۱۸۵	-	۲/۵۹
M5	۵۱۸/۵۰	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	-	-	۱/۰۳۷	۲/۸۵
M6	۵۱۳/۳۰	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۵/۱۸۵	۵/۱۸۵	۱/۰۳۷	۳/۱۱
M7	۵۰۸/۱۳	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۱۰/۳۷۰	۵/۱۸۵	۱/۰۳۷	۳/۶۳
M8	۵۰۲/۹۵	۱۳۴۸/۱	۲۳۳/۳	۱۵/۵۶۰	۵/۱۸۵	۱/۰۳۷	۴/۱۵

نمونه‌ها، توزین و سپس به داخل محلول بازگردانده شده‌اند. لازم به ذکر است که هر هفته پس از ثبت داده‌های مربوطه، محلول سدیم سولفات مطابق با دستورالعمل ارائه شده در استاندارد ASTM C1012 [۴۱] مجدداً ساخته شده و نمونه‌ها در آن قرار داده می‌شود. درصد تغییر وزن نمونه‌ها نسبت به وزن اولیه (قبل از غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات) مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\Delta M = \frac{M_x - M_i}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\Delta M$  درصد تغییر وزن نمونه،  $M_x$  وزن اندازه‌گیری شده نمونه در سن  $x$ ،  $M_i$  وزن اندازه‌گیری شده نمونه در قرائت

دستگاه مافوق صوت ۱۷ ثانیه امواج فراصوت در محلول منتشر نموده و ۳ ثانیه متوقف می‌گردد.

## ۳-۲. نحوه اختلاط، آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی

جزئیات نسبت‌های مخلوط کامپوزیت سیمانی در جدول (۵) ارائه شده است. درصدهای مصرفی نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، در این پژوهش براساس درصدهای مطلوب و بهینه مورد استفاده در پژوهش‌های اخیر انتخاب گردیده است. در همین راستا از ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی سیمان نانوذرات سیلیس [۲۵ و ۳۵] به‌عنوان جایگزین سیمان و به‌ترتیب ۱ درصد وزنی مواد سیمانی از الیاف فولادی [۳۵-۳۷] و ۰/۲ درصد وزنی مواد سیمانی الیاف پلی‌پروپیلن [۳۰ و ۳۵ و ۳۸] به‌عنوان افزودنی در کامپوزیت سیمانی به‌صورت مجزا و همچنین به‌صورت توأمان استفاده شده است. لازم به ذکر است در کلیه طرح مخلوط‌ها از نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ و نسبت ماسه به مواد سیمانی ۲/۶ استفاده شد.

## ۴-۲. شرح آزمایش

### ۴-۲-۱. آزمایش تغییر وزن نمونه‌های کامپوزیت سیمانی در محلول سدیم سولفات

در راستای تعیین تغییرات وزن نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در آب آهک اشباع عمل‌آوری گردیدند. سپس وزن خشک اولیه نمونه‌های ملات سیمانی ساخته شده ثبت گردید. در ادامه نمونه‌های ملات سیمانی به مدت ۲۶ هفته در محلول ۵ درصد سدیم سولفات غوطه‌ور شده و هر هفته از محلول خارج شده و پس از خشک کردن سطوح

داده شد. با استفاده رابطه (۲) درصد انبساط طولی نمونه‌ها محاسبه گردید:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن  $\Delta L$  درصد انبساط طولی نمونه،  $L_x$  طول اندازه‌گیری شده نمونه در سن  $x$ ،  $L_i$  طول اندازه‌گیری شده نمونه در قرائت اولیه (به هنگام شروع زمان غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات) و  $G$  طول اسمی نمونه که مطابق با استاندارد برابر با  $250\text{ mm}$  می‌باشد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

در شکل (۱) نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمانی قبل از غوطه‌وری و نمونه‌های پس از ۹۰ و ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات نشان داده شده است. همچنین جهت ارائه مقایسه بهتر میان طرح مخلوط‌ها، درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از فرارگیری در معرض محیط خورنده سولفاتی در جدول (۶) ارائه شده است. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل (۱) و جدول (۶) می‌توان چنین برداشت کرد که در هر طرح مخلوط با افزایش تعداد روزهای در معرض قرار گرفتن محیط سولفاتی مقاومت فشاری بیشتر کاهش یافته است. علت کاهش مستمر مقاومت فشاری در تهاجم سولفاتی به واسطه از بین رفتن چسبندگی بین محصولات حاصل از هیدراسیون سیمان و ایجاد گسیختگی در نمونه‌هاست [۶ و ۴۳]. از سویی هنگامی که نمونه‌های حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیس (M1، M2 و M3) در معرض حمله سولفاتی قرار گرفته‌اند، افت مقاومت فشاری کمتری را در مقایسه با نمونه شاهد داشته‌اند. به عنوان مثال افت مقاومت فشاری نمونه شاهد پس از ۹۰ و ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات به ترتیب به میزان ۱۰/۱۲ و ۱۶/۱۸ درصد (نسبت به مقاومت فشاری اولیه قبل از غوطه‌وری در محیط سولفاتی) بوده است؛ که این مقادیر برای نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانوسیلیس (M2) برابر با ۵/۱۳ و ۱۰/۱۹ درصد می‌باشد. علت افت مقاومت فشاری کمتر در نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های عملکردی هم‌چون اثر هسته‌زایی، پرکنندگی و پیوزولانی نانوذرات سیلیس باشد. در واقع اثر هسته‌زایی نانوذرات سیلیس منجر به تسریع واکنش هیدراسیون سیمان شده و تشکیل تشکیل ژل C-S-H را منجر خواهد شد؛

اولیه (به هنگام شروع زمان غوطه‌وری، قبل از ورود به محلول سدیم سولفات) می‌باشد.

#### ۳-۲. آزمایش تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی در محلول سدیم سولفات

در راستای تعیین تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در آب آهک اشباع عمل‌آوری گردیدند. سپس مقاومت فشاری اولیه (قبل از غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات) نمونه‌های ملات سیمانی ساخته شده ثبت گردید. تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C109 [۴۲] انجام شد. از طرفی به منظور تعیین تغییرات مقاومت فشاری، نمونه‌ها بعد از هفته ۱۳م و ۲۶م غوطه‌وری، از محلول سدیم سولفات خارج شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند؛ و درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به مقاومت اولیه مطابق رابطه ذیل محاسبه گردید:

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_x - \sigma_i}{\sigma_i} \times 100 \quad (۲)$$

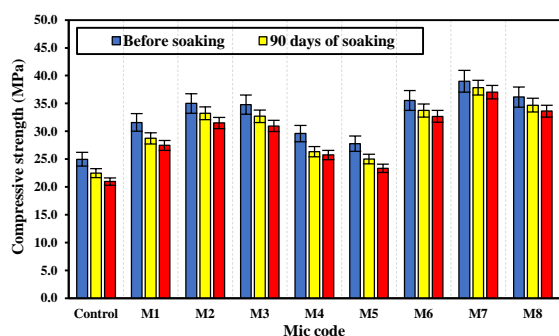
که در آن  $\Delta \sigma$  درصد تغییر مقاومت فشاری نمونه،  $\sigma_x$  مقاومت فشاری نمونه در سن  $x$ ،  $\sigma_i$  مقاومت فشاری اولیه نمونه (به هنگام شروع زمان غوطه‌وری، قبل از ورود به محلول سدیم سولفات) می‌باشد.

#### ۳-۲. آزمایش انبساط طولی نمونه‌های منشوری ملات سیمانی در محلول سدیم سولفات

به منظور تعیین انبساط طولی ناشی از تهاجم سولفاتی، نمونه‌های منشوری شکل ملات سیمانی با ابعاد  $28/5 \times 28/5 \times 2/5$  سانتی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C1012 [۴۱] تحت آزمایش قرار گرفتند. بدین صورت که نمونه‌های ساخته شده پس از رسیدن به مقاومت فشاری  $20 \pm 1$  مگاپاسکال به مدت ۲۶ هفته در محلول ۵ درصد سدیم سولفات غوطه‌ور شده و هر هفته از محلول خارج شده و پس از خشک کردن سطوح نمونه‌ها، تغییر طول آن‌ها به کمک دستگاه کمپراتور تغییر طول نمونه‌های منشوری قرائت شده و سپس به داخل محلول بازگردانده شده‌اند. لازم به ذکر است که هر هفته پس از ثبت داده‌های مربوطه، محلول سدیم سولفات مطابق با دستورالعمل ارائه شده در استاندارد ASTM C1012 [۴۱] مجدداً ساخته شده و نمونه‌ها در آن قرار

یکپارچگی و بالطبع آن افت مقاومت فشاری نقش ویژه‌ای را ایفا نمایند (شکل (۲)).

از طرفی، به هنگام استفاده همزمان نانوذرات سیلیس و الیاف-های فولادی و پلی‌پروپیلن، مقادیر افت مقاومت فشاری به شکل قابل‌توجهی کاهش یافته است. به‌گونه‌ای که در نمونه M7، کمترین مقدار افت مقاومت فشاری در ۹۰ و ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محیط سولفات‌ها به دست آمده است که این مقادیر به ترتیب برابر با ۴/۲۹ و ۶/۰۹ درصد بوده است. در توجیه چنین بهبودی می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نمونه‌های حاوی اثر ترکیبی نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل حضور همزمان سه ماده افزودنی در ملات سیمانی می‌توان مجموعه‌ای از مکانیزم-های فوق‌الذکر را به صورت همزمان متصور بود.



شکل (۱). مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

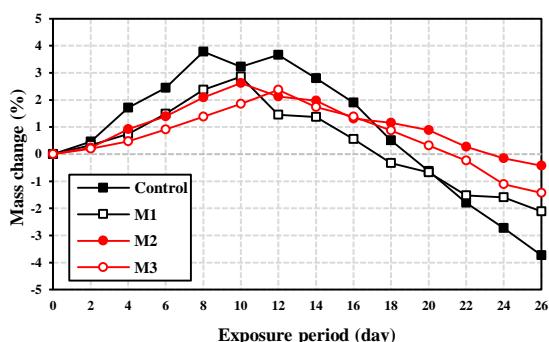
جدول (۶). درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سیمانی در معرض محلول سدیم سولفات

کد طرح	افت مقاومت فشاری (%)	
	۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات	۱۸۰ روز غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات
Control	۱۰/۱۲	۱۶/۱۸
M1	۹/۲۱	۱۳/۴۵
M2	۵/۱۳	۱۰/۱۹
M3	۶/۱۹	۱۱/۳۱
M4	۱۰/۰۴	۱۳/۲۴
M5	۹/۹۵	۱۵/۱۸
M6	۶/۲۱	۸/۱۹
M7	۴/۲۹	۶/۰۹
M8	۵/۱۲	۷/۴۲

که به نوبه خود می‌تواند به بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل در ماتریس سیمانی کمک نماید. همچنین، نانوذرات سیلیس به واسطه ابعاد نانویی خود نقش فیلر (پرکننده) را داشته و حفرات موجود در ماتریس سیمانی را پر کرده و سبب بهبود و اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی می‌شوند [۳۸ و ۴۳-۴۵]. علاوه بر این، نانوذرات سیلیس دارای خاصیت پوزولانی می‌باشند؛ لذا خاصیت پوزولانی آن‌ها به تشکیل ژل C-S-H بیشتر کمک نموده و در نتیجه در ایجاد ریزساختار متراکم‌تر می‌تواند اثر مضاعفی داشته باشند [۳۸ و ۴۳-۴۶]. بنابراین سه مکانیزم فوق‌الذکر به واسطه ایجاد تخلخل کمتر و ریزساختار متراکم‌تر، منجر به عدم اجازه نفوذ بیشتر یون سولفات به داخل ملات سیمانی شده و در نتیجه افت مقاومت فشاری کمتری را در نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس در مقایسه با نمونه شاهد سبب می‌شود. از سویی دیگر، بار الکتریکی منفی موجود در سطح نانوذرات سیلیس نیز ممکن است در دفع یون‌های سولفات به علت همنام بودن بارهای الکتریکی تا حدودی مؤثر باشد [۴۷].

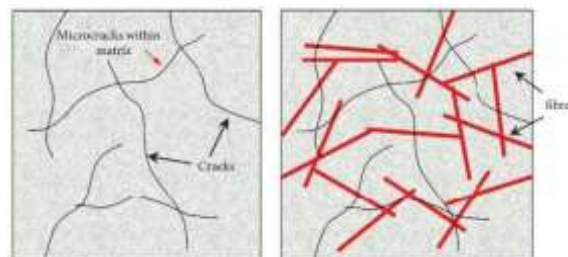
افزون بر این، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (M4 و M5) نیز بهبودی نسبی در کاهش افت مقاومت فشاری ملات سیمانی در معرض محیط سولفات‌ها در مقایسه با نمونه شاهد از خود نشان داده‌اند. به‌نحویکه در ۹۰ روز غوطه‌وری در محلول سولفات‌ها میزان افت مقاومت فشاری در نمونه‌های M4 و M5 به ترتیب برابر با ۱۰/۰۴ و ۹/۹۵ درصد بوده که این مقدار در نمونه شاهد برابر با ۱۰/۱۲ درصد بوده است. با این وجود، با افزایش زمان غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات از ۹۰ به ۱۸۰ روز، عملکرد الیاف مذکور در کاهش افت مقاومت ملات سیمانی قابل‌توجه‌تر بوده است. به بیان دیگر افت مقاومت فشاری در نمونه‌های M4 و M5 به ترتیب برابر با ۱۳/۲۴ و ۱۵/۱۸ درصد بوده است که در نمونه شاهد افت مقاومت فشاری پس از ۱۸۰ روز غوطه‌وری در محیط سولفات‌ها برابر با ۱۶/۱۸ درصد بوده است. علت اصلی کاهش افت مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به تنهایی به‌واسطه عملکرد مسلح‌کنندگی آن‌ها در پل‌زدگی ترک‌های داخلی ناشی از تهاجم سولفات‌ها می‌باشد [۳۲ و ۴۸]. در واقع در هنگام حمله یون‌های سولفات به کامپوزیت‌های سیمانی، به‌واسطه واکنش آن‌ها با کلسیم هیدروکسید، کلسیم سولفات (گچ) و کلسیم سولفوآلومینات (اترینگایت) در ماتریس سیمانی تشکیل خواهد شد که هر دو فرآورده شیمیایی مذکور دارای حجم بیشتری نسبت به اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت سیمانی که جایگزین آن‌ها شده‌اند، اشغال می‌کنند، به‌طوری که کامپوزیت سیمانی سخت شده دچار انبساط و گسیختگی خواهد شد [۴۹ و ۵۰]. از این‌رو حضور الیاف-های فولادی و پلی‌پروپیلن می‌توانند با کمک اثر مسلح‌کنندگی در پل‌زدگی ترک‌های داخلی ناشی از تهاجم سولفات‌ها در کاهش افت

می توان با توجه به مکانیزم های عملکردی تشریح شده در بالاتر، که ناشی از حضور نانوذرات سیلیس در ماتریس سیمانی است، توجیه نمود. به صورت خلاصه می توان گفت که کاهش تخلخل به واسطه اثر پرکنندگی و هسته زایی نانوذرات سیلیس و از طرف دیگر اثر پوزولانی آن ها و کمک به بهبود ریزساختار در ماتریس سیمانی از جمله دلایل کاهش تلفات جرم در نمونه های حاوی نانوذرات سیلیس است [۲۶ و ۴۳ و ۵۱ و ۵۲]. هرچند که دفع یون های سولفات توسط نانوذرات سیلیس به واسطه همانام بودن بارهای الکتریکی نیز ممکن است تأثیرگذار باشد [۴۷].



شکل (۳). تغییرات جرم نمونه های شاهد، M1، M2 و M3 غوطه ور در محلول سدیم سولفات

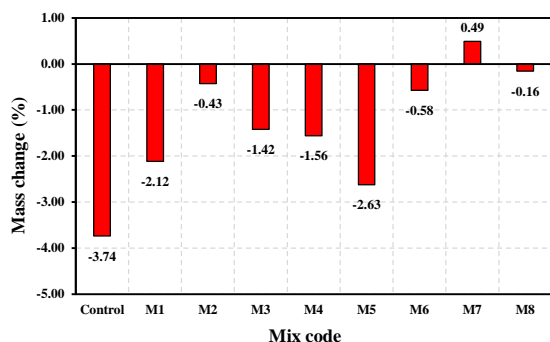
از سویی مطابق شکل (۴) در نمونه های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن نیز شاهد کاهش تلفات جرمی در مقایسه با نمونه کنترل هستیم. به نحویکه پس از ۶ ماه غوطه وری در محلول سدیم سولفات درصد تغییرات جرمی در نمونه های M4 و M5 به ترتیب برابر با  $1/56$  - و  $2/63$  - درصد بوده که در مقایسه با مقدار  $3/74$  - درصد مربوط به نمونه شاهد تلفات جرمی کمتری را تجربه کرده اند. این پدیده را می توان به عملکرد الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در کنترل افزایش ترک های ناشی از جمع شدگی پلاستیک در ساعات اولیه گیرش و ترک های ثانویه یا حرارتی که منجر به ایجاد تخلخل در کامپوزیت سیمانی خواهند شد؛ نسبت داد. لذا استفاده از الیاف در کامپوزیت سیمانی میزان ترک های جمع شدگی پلاستیک را کاهش داده و باعث ایجاد اختلال در شکل گیری کانال های متخلخل در ماتریس سیمانی که عامل اصلی در افزایش فضاهای مؤئینه هستند، خواهد شد، و به همین دلیل میزان تخلخل کامپوزیت سیمانی را کاهش داده [۵۳ و ۵۴] و بالطبع آن نفوذ یون های مخرب سولفات به ماتریس سیمانی نیز کاهش یافته است [۳۲].



شکل (۲). نمایش شماتیک اثر پل زدگی ترک های داخلی توسط الیاف فولادی و پلی پروپیلن در ماتریس سیمانی

### ۲-۳. تغییرات وزن نمونه های ملات سیمانی غوطه ور در محلول سدیم سولفات

میانگین درصد تغییرات نسبی وزن نمونه های ملات سیمانی قرار داده شده در محلول سدیم سولفات نسبت به وزن اولیه آن ها (پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب آهک) در شکل های (۳) الی (۵) ارائه شده است، که علامت مثبت نشان دهنده افزایش وزن نمونه ها و علامت منفی نشان دهنده کاهش وزن نمونه های ملات سیمانی است. علاوه بر این شکل (۶) مقایسه مقادیر تغییر جرم نمونه های ملات سیمانی غوطه ور در محلول سدیم سولفات پس از ۶ ماه را به تصویر می کشد. همانطور که از شکل (۳) مشاهده می شود مخلوط های M1، M2 و M3 به ترتیب افزایش جرمی مداوم را تا هفته های دهم تا دوازدهم غوطه وری در محلول سولفاتی نشان دادند. افزایش جرم نمونه ها را می توان به جذب محلول سولفات توسط نمونه ها در طول دوره مواجهه نسبت داد. شایان ذکر است که در این مرحله، مخلوط شاهد در مقایسه با نمونه های حاوی نانوذرات سیلیس، افزایش جرم بیشتری را از خود نشان داد. این مشاهدات احتمالاً به تخلخل بالاتر نشان داده شده توسط نمونه شاهد در مقایسه با مخلوط های حاوی نانوذرات سیلیس نسبت داده می شود. توجه به این نکته حائز اهمیت است که با اشباع شدن تدریجی نمونه ها از محلول سولفاتی، افزایش محلول جذب شده کمتر شد. متعاقباً با گذشت زمان، جرم نمونه ها به تدریج کاهش یافت که نشان دهنده زوال احتمالی ناشی از حمله سولفات ها مانند پوسته شدن، متلاشی شدن و نرم شدن است. تشکیل گچ و اترینگایت در نمونه ها و به دنبال آن از بین رفتن چسبندگی بین محصولات حاصل از هیدراسیون سیمان، علت کاهش وزن نمونه -هاست [۵۰]. به عنوان مثال پس از ۶ ماه غوطه وری در محلول سدیم سولفات ۵ درصد، تغییرات جرمی نمونه های شاهد، M1، M2 و M3 برابر با  $3/74$  -،  $2/12$  -،  $0/43$  - و  $1/42$  - درصد بوده که نشان دهنده عملکرد مناسب حضور نانوذرات سیلیس در کاهش تلفات جرمی در نمونه های ملات سیمانی می باشد. علت این امر را

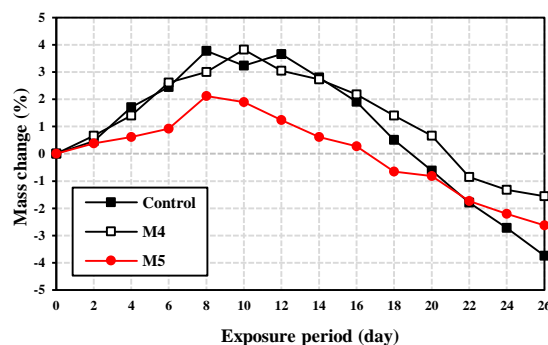


شکل (۶). مقایسه مقادیر تغییر جرم نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات پس از ۶ ماه

### ۳-۳. تغییر طول نمونه‌های منشوری ملات سیمانی در محلول سدیم سولفات

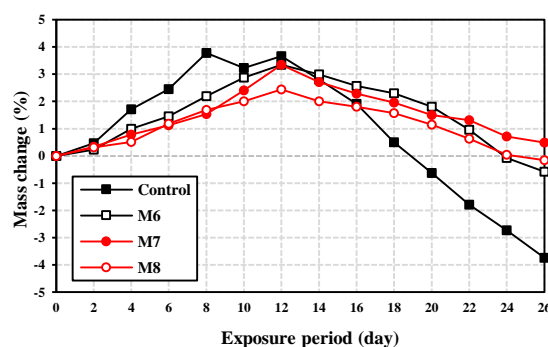
میانگین درصد انبساط طولی نمونه‌های ملات سیمانی قرار داده شده در محلول سدیم سولفات در شکل‌های (۷) الی (۹) ارائه شده است. علاوه بر این شکل (۱۰) مقایسه مقادیر انبساط طولی نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات پس از ۶ ماه را به تصویر می‌کشد. همانطور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود مخلوط‌های M1، M2 و M3 به ترتیب انبساط طولی مداوم را تا انتهای دوره غوطه‌وری در محلول سولفاتی نشان دادند. انبساط طولی را می‌توان به تشکیل گچ و اترینگایت ناشی از تهاجم سولفاتی نسبت داد. شایان ذکر است که در این مرحله، مخلوط شاهد در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس، انبساط طولی بیشتری را از خود نشان داد. این مشاهدات احتمالاً به تخلخل بالاتر نشان داده شده توسط نمونه شاهد در مقایسه با مخلوط‌های حاوی نانوذرات سیلیس نسبت داده می‌شود.

به‌عنوان مثال پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات ۵ درصد، انبساط طولی نمونه‌های شاهد، M1، M2 و M3 برابر با ۰/۰۶۸، ۰/۰۶۲، ۰/۰۴۲ و ۰/۰۴۷ درصد بوده که نشان‌دهنده عملکرد مناسب حضور نانوذرات سیلیس در کاهش انبساط طولی در نمونه‌های ملات سیمانی می‌باشد. علت این موضوع را می‌توان چنین بیان کرد که، افزودن نانوذرات سیلیس به‌واسطه ایجاد تخلخل کمتر در ماتریس سیمانی و عدم اجازه نفوذ بیشتر یون سولفات به داخل ملات سیمانی، منجر به کاهش تشکیل فرآورده‌هایی همچون گچ و اترینگایت در واکنش سولفاتی شده و به دنبال آن کاهش انبساط در نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس مشاهده گردید. همچنین با توجه به اینکه سطح نانوذرات سیلیس، بارهای الکتریکی منفی دارد، این امر نیز ممکن است در دفع یون‌های



شکل (۴). تغییرات جرم نمونه‌های شاهد، M4 و M5 غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

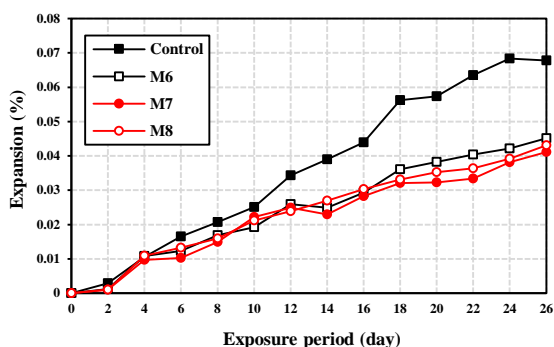
علاوه بر این، به هنگام استفاده همزمان نانوذرات سیلیس و الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن، مقادیر تلفات جرمی به شکل قابل توجهی کاهش یافته است (شکل (۵)). به‌عنوان مثال مطابق شکل (۶) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات درصد تغییرات جرمی نمونه‌های M6، M7 و M8 برابر با ۰/۵۸-، ۰/۴۹+ و ۰/۱۶- درصد بوده است. که در مقایسه با سایر نمونه‌ها از کمترین مقادیر تلفات جرمی برخوردار هستند. در ارتباط با درصد افزایش جرم مربوط به نمونه M7 می‌توان بیان کرد که تلفات جرمی ناشی از حمله سولفاتی کمتر از افزایش وزن ناشی از محلول جذب شده اولیه بوده است که نشان دهنده سطح نسبتاً پایینی از زوال در مخلوط M7 است. در توجیه چنین بهبود می‌توان چنین بیان کرد که در نمونه‌های حاوی ترکیب نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل حضور همزمان سه ماده افزودنی در ملات سیمانی می‌توان مجموعه‌ای از مکانیزم‌های عملکردی فوق‌الذکر را به‌صورت همزمان برای چنین طرحی متصور بود.



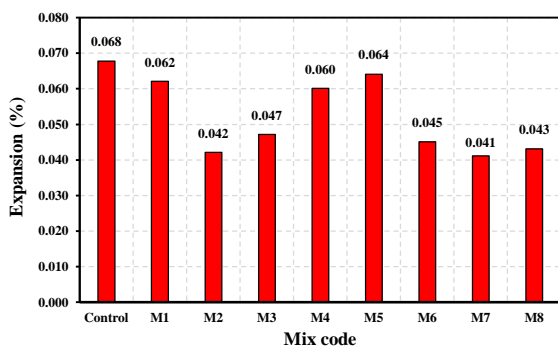
شکل (۵). تغییرات جرم نمونه‌های شاهد، M6، M7 و M8 غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات



شکل (۹) پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات درصد انبساط طولی نمونه‌های M6، M7 و M8 برابر با ۰/۰۴۱، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۴۳ درصد بوده است. که در مقایسه با سایر نمونه‌ها از کمترین مقادیر انبساط طولی برخوردار هستند. در توجیه چنین بهبودی می‌توان این‌گونه بیان کرد که در نمونه‌های حاوی ترکیب نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن به دلیل حضور همزمان سه ماده افزودنی در ملات سیمانی می‌توان مجموعه‌ای از مکانیزم‌های عملکردی فوق‌الذکر را به‌صورت همزمان متصور بود.



شکل (۸). انبساط طولی نمونه‌های شاهد، M6، M7 و M8 غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

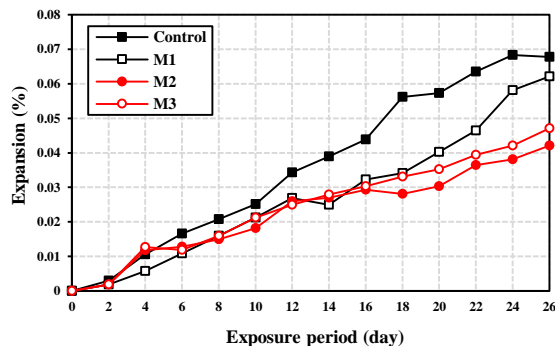


شکل (۹). مقایسه مقادیر انبساط طولی نمونه‌های ملات سیمانی غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات پس از ۶ ماه

#### ۴. نتیجه گیری

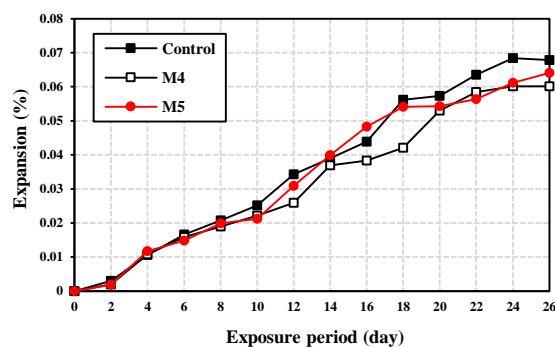
در پژوهش حاضر اثر تهاجم سولفاتی بر دوام کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف فولادی و پلی پروپیلن حاوی نانو ذرات سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به آزمایش تهاجم سولفاتی حاکی از آن بود که حضور همزمان نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن سبب افزایش دوام در برابر تهاجم سولفاتی شده است. به‌نحویکه ترکیب همزمان ۲ درصد نانوذرات سیلیس، ۱ درصد الیاف فولادی و ۰/۲ درصد الیاف پلی پروپیلن

سولفات به علت همنام بودن بارهای الکتریکی مؤثر باشد [۲۶ و ۴۳ و ۵۱ و ۵۲].



شکل (۷). انبساط طولی نمونه‌های شاهد، M1، M2 و M3 غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

از سویی مطابق شکل (۸) در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن نیز شاهد کاهش انبساط طولی در مقایسه با نمونه شاهد هستیم. به‌نحویکه پس از پایان ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات درصد انبساط طولی در نمونه‌های M5 و M4 به ترتیب برابر با ۰/۰۶۰ و ۰/۰۶۴ درصد بوده که در مقایسه با مقدار ۰/۰۶۸ درصد مربوط به نمونه شاهد انبساط طولی کمتری را تجربه کرده‌اند. این پدیده را می‌توان به عملکرد الیاف فولادی و پلی پروپیلن در کاهش تخلخل ماتریس سیمانی نسبت داد [۵۳ و ۵۴]. لذا در پی کاهش تخلخل ماتریس سیمانی نفوذ یون‌های مخرب سولفات به ماتریس سیمانی نیز کاهش یافته و انبساط طولی کمتری در نمونه‌های حاوی الیاف مذکور رخ خواهد داد [۳۲].



شکل (۷). انبساط طولی نمونه‌های شاهد، M4 و M5 غوطه‌ور در محلول سدیم سولفات

علاوه بر این، به هنگام استفاده همزمان نانوذرات سیلیس و الیاف فولادی و پلی پروپیلن، مقادیر انبساط طولی به شکل قابل توجهی کاهش یافته است (شکل (۸)). به‌عنوان مثال مطابق

- research, vol. 27, no. 8, pp. 1179-1189, 1997.
- [۱۰] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [۱۱] L. Barcelo *et al.*, "A modified ASTM C1012 procedure for qualifying blended cements containing limestone and SCMs for use in sulfate-rich environments," *Cement and Concrete Research*, vol. ۶۳, pp. 75-88, 2014.
- [۱۲] D. Higgins and N. Crammond, "Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack," *cement and concrete Composites*, vol. 25, no. 8, pp. 921-929, 2003.
- [۱۳] *ASTM C150 / C150M-20. Standard specification for portland cement*, ASTM International. 2020. West Conshohocken, PA.
- [۱۴] M. Al-Zahrani, "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate," *Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate*, 2003.
- [۱۵] K. Ramyar and G. Inan, "Sodium sulfate attack on plain and blended cements," *Building and environment*, vol. 42, no. 3, pp. 1368-1372, 2007.
- [۱۶] M. D. Thomas, M. Shehata, S. Shashiprakash, D. Hopkins, and K. Cail, "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete," *Cement and concrete research*, vol. 29, no. 8, pp. 1207-1214, 1999.
- [۱۷] A. Al-Gahtani, Rasheeduzzafar, and S. Al-Saadoun, "Rebar corrosion and sulfate resistance of blast-furnace slag cement," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 223-239, 1994.
- [۱۸] J. Geiseler, H. Kollo, and E. Lang, "Influence of blast furnace cements on durability of concrete structures," *Materials Journal*, vol. 92, no. 3, pp. 252-257, 1995.
- [۱۹] T. Wee, A. K. Suryavanshi, S. Wong, and A. A. Rahman, "Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures," *Materials Journal*, vol. 97, no. 5, pp. 536-549, 2000.
- [۲۰] N. M. Al-Akhras, "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack," *Cement and concrete research*, vol. 36, no. 9, pp. 1727-1734, 2006.
- [۲۱] J. Khatib and S. Wild, "Sulphate resistance of metakaolin mortar," *Cement and concrete research*, vol. 28, no. 1, pp. 83-92, 1998.
- [۲۲] Z. Shi *et al.*, "Sulfate resistance of calcined clay-Limestone-Portland cements," *Cement and Concrete Research*, vol. 116, pp. 238-251, 2019.
- [۲۳] R. Hooton, "Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity," *materials Journal*, vol. 90, no. 2, pp. 143-151, 1993.
- [۲۴] S. Lee, H. Moon, and R. Swamy, "Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 1, pp. 65-76, 2005.
- [۲۵] P. Abhilash, D. K. Nayak, B. Sangoju, R. Kumar, and V. Kumar, "Effect of nano-silica in concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 278, p. 122347, 2021.
- [۲۶] A. M. Diab, H. E. Elyamany, M. Abd Elmoaty, and M. M. Sreh, "Effect of nanomaterials additives on performance of concrete resistance against magnesium sulfate and acids," *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 210-231, 2019.
- [۲۷] A. S. Faried, S. A. Mostafa, B. A. Tayeh, and T. A. Tawfik, "Mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporated with various nano waste materials under different curing conditions," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102569, 2021.
- [۲۸] J. I. Tobón, J. Payá, and O. J. Restrepo, "Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles," *Construction and Building*

در ملات سیمانی کمترین مقدار افت مقاومت فشاری، تلفات جرمی و انبساط طولی را پس از ۶ ماه غوطه‌وری در محلول سدیم سولفات ۵ درصد را در مقایسه با سایر طرح مخلوط‌های ساخته شده در این پژوهش از خود نشان داد؛ که به‌منزله بهبود دوام در برابر تهاجم سولفاتی می‌باشد.

بهبود دوام در برابر تهاجم سولفاتی ملات سیمانی در هنگام استفاده همزمان نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌واسطه مجموعه‌ای از مکانیزم‌های عملکردی مواد مذکور باشد. در واقع اثر پراکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و فعالیت پوزولانی نانوذرات سیلیس می‌تواند به کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی کمک شایانی نماید. از طرفی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز به موجب اثر مسلح‌کنندگی و کنترل میکروتکرک‌های موجود در ماتریس سیمانی مانع از گسترش ماکروتکرک‌ها و شکست ترد در ملات سیمانی می‌شوند. افزون بر این، اثر کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک در ساعات اولیه گیرش و ترک‌های ثانویه یا حرارتی به‌واسطه اثر پل‌زدگی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز می‌تواند در بهبود دوام ملات سیمانی در محیط خورنده سولفاتی ایفای نقش نماید.

## ۵. مراجع

- [۱] H. Lee, R. Cody, A. Cody, and P. Spry, "The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 2, pp. 332-343, 2005.
- [۲] B. Ma, X. Gao, E. A. Byars, and Q. Zhou, "Thaumasite formation in a tunnel of Bapanxia Dam in Western China," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 4, pp. 716-722, 2006.
- [۳] H. Mingyu, L. Fumei, and T. Mingshu, "The thaumasite form of sulfate attack in concrete of Yongan Dam," *Cement and Concrete Research*, vol. 3, no. 10, 2006.
- [۴] M. Rahman and M. Bassuoni, "Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation," *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 652-662, 2014.
- [۵] S. Sahu and N. Thaulow, "Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties," *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 9, pp. 1675-1681, 2004.
- [۶] M. M. A. Elahi *et al.*, "Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review," *Construction and Building Materials*, vol. 281, p. 122628, 2021.
- [۷] J. Cao, Q. Ding, D. Hou, C. Xiong, Z. Jin, and G. Zhang, "Influence of hoop restraint on microstructure and phase composite of cement paste filled steel tube under external sulfate attack," *Construction and Building Materials*, vol. 366, p. 130195, 2023.
- [۸] Z. Guo, P. Hou, Z. Xu, J. Gao, and Y. Zhao, "Sulfate attack resistance of tricalcium silicate modified with nano-silica and supplementary cementitious materials," *Construction and Building Materials*, vol. 321, p. 126332, 2022.
- [۹] R. Khatri, V. Sirivivatnanon, and J. Yang, "Role of permeability in sulphate attack," *Cement and concrete*

- [۴۲] ASTM C109 / C109M-16a, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016 . .
- [۴۳] Q. Huang *et al.*, "Long-term performance and microstructural characteristics of cement mortars containing nano-SiO<sub>2</sub> exposed to sodium sulfate attack," *Construction and Building Materials*, vol. 364, p. 130011, 2023.
- [۴۴] A. M. Said, M. S. Zeidan, M. Bassuoni, and Y. Tian, "Properties of concrete incorporating nano-silica," *Construction and building materials*, vol. 36, pp. 838-844, 2012.
- [۴۵] H. S. Lee, B. Balasubramanian, G. Gopalakrishna, S.-J. Kwon, S. Karthick, and V. Saraswathy, "Durability performance of CNT and nanosilica admixed cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 463-472, 2018.
- [۴۶] M. A. M. Langaroudi and Y. Mohammadi, "Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures," *Construction and building materials*, vol. 191, pp. 619-634, 2018.
- [۴۷] H. Rahmani and Y. Imani Asbagh, "Effects of sulphate ions on the corrosion resistance of Montmorillonite-modified dense concretes," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 248-255, 2018.
- [۴۸] W. Wongprachum, M. Sappakittipakorn, P. Sukontasukkul, P. Chindaprasirt, and N. Banthia, "Resistance to sulfate attack and underwater abrasion of fiber reinforced cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 189, pp. 686-694, 2018.
- [۴۹] Y. Li *et al.*, "A review on durability of basalt fiber reinforced concrete," *Composites Science and Technology*, vol. 225, p. 109519, 2022.
- [۵۰] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete technology*. Longman Scientific & Technical England, 1987 .
- [۵۱] A. M. Sharkawi, M. A. Abd-Elaty, and O. H. Khalifa, "Synergistic influence of micro-nano silica mixture on durability performance of cementitious materials," *Construction and Building Materials*, vol. 1, pp. 579-588, 2018.
- [۵۲] Q. Huang *et al.*, "Will the magnesium sulfate attack of cement mortars always be inhibited by incorporating nanosilica?," *Construction and Building Materials*, vol. 305, p. 124695, 2021.
- [۵۳] O. Karahan and C. D. Atiş, "The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete," *Materials & Design*, vol. 32, no. 2, pp. 1044-1049, 2011.
- [۵۴] H. A. Toutanji, "Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 13, no. 4, pp. 171-177, 1999.
- [۲۹] M. Ashok, A. Parande, and P. Jayabalan, "Strength and durability study on cement mortar containing nano materials," *Advances in nano research*, vol. 5, no. 2, p. 99, 2017.
- [۳۰] V. Afroughsabet, L. Biolzi, and T. Ozbakkaloglu, "High-performance fiber-reinforced concrete: a review," *Journal of materials science*, vol. 51, pp. 6517-6551, 2016.
- [۳۱] A. S. El-Dieb, "Mechanical ,durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers," *Materials & Design*, vol. 30, no. 10, pp. 4286-4292, 2009.
- [۳۲] K. Behfarnia and O. Farshadfar, "The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 64-71, 2013.
- [۳۳] ASTM C778-13, *Standard Specification for Standard Sand*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013 .
- [۳۴] ASTM C494/C494M-16, *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016 .
- [۳۵] H. Sujay, N. A. Nair, H. S. Rao, and V. Sairam, "Experimental study on durability characteristics of composite fiber reinforced high-performance concrete incorporating nanosilica and ultra fine fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 262, p. 120738, 2020.
- [۳۶] K. J. Folliard, D. Sutfin, R. Turner, and D. P. Whitney, "Fiber in continuously reinforced concrete pavements," 2006.
- [۳۷] M. Khooshechin and J. Tanzadeh, "Experimental and mechanical performance of shotcrete made with nanomaterials and fiber reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 199-205, 2018.
- [۳۸] M. H. Beigi, J. Berenjian ,O. L. Omran, A. S. Nik, and I. M. Nikbin, "An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete," *Materials & Design*, vol. 50, pp. 1019-1029, 2013.
- [۳۹] ASTM C305-14, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014 .
- [۴۰] ASTM C 511-03, *Standard Practice for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014 .
- [۴۱] ASTM C1012 - 04, *Standard Specification for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004 . .