

## روش‌های بهبود مقاومت بتن در مقابل حملات سولفاتی (مطالعه موردی)

### مقاله مروری

مصطفی آدرسی<sup>\*</sup>، استادیار، دانشکده عمران، گروه ژئوتکنیک و آب، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
نیما رشتی محمد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، گروه ژئوتکنیک و آب، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
<sup>\*</sup> پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.adresi@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۲۷۲-۲۶۱

### چکیده

هدف این مطالعه ارزیابی تخریب بتن، با در نظر گرفتن حملات سولفاتی و ارزیابی رویکرد مناسب برای مقابله با این پدیده است. اثرات شرایط رطوبتی، مانند غلظت محلول، دما، و شرایط غوطه‌وری، نوع سیمان و نسبت آب به سیمان مورد بررسی قرار گرفتند. به علاوه نشان داده شده است که مواد سیمانی مکمل و سیمان پرتلند معمولی با بهبود خواص ملات هیدراته شده، حمله خارجی سولفاتی را کاهش می‌دهند. این مطالعه یک بررسی جامع از عملکرد بهبودی سرباره و دوده سیلیس در برابر حمله سولفاتی را نیز ارائه می‌کند. نرخ جایگزینی بیش از ۲۰ درصد سرباره و ۳-۲ درصد دوده سیلیس برای بهبود مقاومت در برابر حمله سولفاتی در سولفات سدیم یافت شده است. افزایش نرخ دوز باعث بهبود عملکرد کلی برای همه‌ی مواد سیمانی مکمل به جز دوده سیلیس می‌شود. در سولفات منیزیم، در نرخ‌های جایگزینی بالاتر، عملکرد برای دوده سیلیس ضد و نقیض است همانطور که با افزایش انبساط نسبت به یک کنترل نشان داده شده است. به طور کلی سرباره و دوده سیلیس می‌توانند در کاهش حمله سولفات موثر باشند، اما عملکرد آن‌ها به نرخ جایگزینی، قرارگیری در معرض کاتیون سولفات و خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن، حمله‌ی سولفاتی، در معرض قرارگیری، دوام، مواد سیمانی مکمل

### ۱-مقدمه

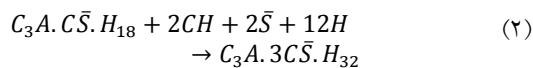
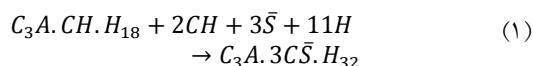
تخریب بتن در طول زمان می‌شود. حمله سولفاتی در بتن می‌تواند به شکل پوسته شدن، انبساط، ترک خوردن، افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت ظاهر شود ("Controlling Aluminate Phase Hydration for Sulfate Resistance of Portland-Limestone Cements," n.d.; Elahi & Shearer, n.d.; Tian & Cohen, 2000). حمله خارجی سولفاتی در بتن در درجه اول شامل تشکیل اترینگیت ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) و گچ ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) است. اترینگیت یک محصول هیدراتاسیون اولیه است که از واکنش هیدرات آلومینات کلسیم با یون‌های سولفات اسید سولفوریک ایجاد می‌شود و با انبساط، ترک خوردن و پوسته شدن همراه است (Rahman & Bassuoni, 2014). با این حال، زوال مواد سیمانی به دلیل انبساط اترینگیت هنوز بحث برانگیز است (Hanson, 1968). تئوری‌های مختلفی از جمله افزایش حجم جامد

حمله سولفاتی یک نگرانی قابل توجه برای مواد پایه سیمانی است که بسیاری از سازه‌های بتنی را تهدید می‌کند. اگرچه این موضوع جدیدی نیست، در چند دهه اخیر، تعداد بی‌شماری از سازه‌ها از جمله سدها، روسازی‌های بتنی، پایه‌های پل، شمع‌های بتنی، پی‌های بتنی مدفون، تونل‌های بزرگراه یا راه‌آهن، و دال‌های کف در سراسر جهان با تخریب قابل توجهی از حمله سولفاتی مواجه شده‌اند (Drimalas, 2011; H. Lee, 2005; Ma, 2006; Mingyu et al., 2006; Rahman & Bassuoni, 2014; Sahu & N., 2004; M. Thomas, 2008). تمرکز این مطالعه، یعنی حمله خارجی سولفاتی، زمانی ایجاد می‌شود که سولفات‌ها از یک محیط غنی از سولفات مانند خاک، آب دریا، مواد آلی در حال پوسیدگی و پساب صنعتی وارد بتن سخت می‌شوند (Monteiro & Kurtis, 2003). این یون‌های سولفات خارجی با اجزای ملات سیمان واکنش می‌دهند که منجر به

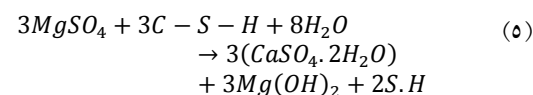
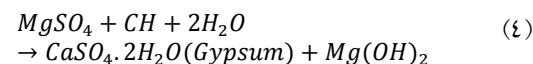
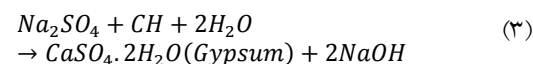
(Diamond & Lee, 1999; Santhanam et al., 2003). با این حال، روند دقیق و ماهیت تجزیه ناشی از گچ به طور کامل شناخته نشده است. برخی از مطالعات نشان دادند که تشکیل گچ باعث انبساط می‌شود (Hansen, 1963, 1966; Yang et al., 1996) در حالی که برخی برعکس آن را یافته‌اند (Bonen & Cohen, 1992; P. Mehta, 1992; Nielsen, 1966). در فرآیند تشکیل گچ، ابتدا pH سیستم کاهش یافته و سفتی و مقاومت بتن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با ادامه آسیب ناشی از تلفات مقاومت و چسبندگی، بتن در نهایت به یک توده غیر منسجم تبدیل می‌شود (Hanson, 1968). اندازه‌گیری دقیق آسیب مکانیکی ناشی از تشکیل گچ دشوار است زیرا گاهی اوقات با تشکیل اترینگیت در هنگام حمله سولفاتی پوشانده می‌شود (Thorvaldson, 1952). تست ASTM C1012 صدمات ناشی از تشکیل گچ را واقعاً نشان نمی‌دهد، زیرا فقط انبساط ناشی از تشکیل اترینگیت را اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین، آزمایش مقاومت فشاری می‌تواند ابزار بهتری برای ارزیابی حمله سولفات از تشکیل گچ باشد (ASTM C1012 / C1012M-18b., Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution,” 2018) میزان و نوع تخریب نیز به غلظت مواد مهاجم بستگی دارد: اگر غلظت  $SO_4^{2-}$  زیاد باشد، گچ تشکیل می‌شود. اگر کم باشد، اترینگیت تشکیل می‌شود (Girardi et al., n.d.).

مجموعه‌ای از تحقیقات نشان داده است که شرایط رویارویی، نوع سیمان، نسبت آب به سیمان و ترکیب مواد سیمانی مکمل می‌تواند عملکرد ملات و بتن در معرض محیط‌های سولفاتی را افزایش دهد. دستورالعمل‌های زیادی وجود دارند که استراتژی‌های مختلف را برای حمله سولفاتی توصیه می‌کنند. با این حال، اخیراً هیچ مطالعه جامعی در مورد انتخاب روش مناسب برای مقاومت موثر در برابر سولفات وجود نداشته است. این مقاله به عنوان راهنمای انتخاب روشی مناسب برای بهبود مقاومت در برابر حمله سولفاتی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در راستای مواد مکمل سیمانی<sup>۱</sup> عمل می‌کند.

(Taylor, 1994)، واکنش توپوشیمیایی (Brown & Badger, 2000). تورم (Thorvaldson, 1952) یا رشد کریستال (Diamond, 1996) برای توصیف مکانیسم انبساط اترینگیت وجود دارد. در حضور هیدروکسید کلسیم (CH) و آب (H)، هیدرات مونو سولفو آلومینات ( $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{18}$ ) و هیدرات آلومینات کلسیم ( $C_3A \cdot CH \cdot H_{18}$ ) با سولفات خارجی (S) واکنش می‌دهند تا اترینگیت مطابق واکنش‌های زیر نشان داده شده در نماد شیمی سیمان<sup>۱</sup> تولید شود.



از طرف دیگر، تشکیل گچ به دلیل واکنش تبادل کاتیونی بین سولفات‌ها و CH رخ می‌دهد. هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) همچنین در معرض حمله خارجی سولفات در حضور سولفات منیزیم، که علاوه بر آن منیزیم هیدروکسید ( $Mg(OH)_2$ ) را تشکیل می‌دهد، مستعد تبدیل به گچ است. این واکنش‌ها به شرح زیر هستند (Kumar & Monterio, 2006).

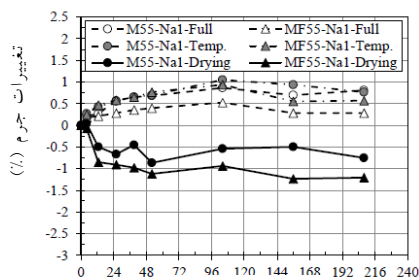


گچ عمدتاً نزدیک به سطح در بتنی که توسط سولفات خراب می‌شود، به ویژه در ترک‌ها و حفره‌ها مشاهده می‌شود

<sup>۲</sup> Supplementary Cementitious Materials (SCMs)

<sup>۱</sup> C=CaO, CH=Ca(OH)<sub>2</sub>, M=MgO, H=H<sub>2</sub>O, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C~CO<sub>2</sub>, S=SO<sub>3</sub>.

## ۲- اثر شرایط رویارویی



شکل ۱. اثر تغییرات دما و خشک شدن بر تغییر جرم  $(SO_4^{2-}, Na_2SO_4, 10000$  میلی گرم در لیتر)



شکل ۲. اثر تغییرات دما و خشک شدن بر عمق تخریب ناشی از حمله سولفات سدیم  $(SO_4^{2-}, 10000$  میلی گرم در لیتر)

## ۳- اثر نوع سیمان

به خوبی شناخته شده است که استفاده از سیمان با محتوای  $C_3A$  کم می‌تواند مقاومت خوبی در مورد حمله سولفات سدیم ایجاد کند. نتایج آزمایش (Qiao et al., 2021) نشان داده که نمونه‌های ساخته شده از سیمان  $N^3$  در مواجهه با محلول سولفات سدیم بیشترین انبساط را داشتند که منجر به ترک خوردگی و پوسته شدن لایه سطحی می‌شود. در مقایسه با سیمان  $N$ ، سیمان  $M^4$  با محتوای  $C_3A$  کمتر و آن‌هایی که با خاکستر بادی مخلوط شده بودند، با کاهش مقدار اترینگیت تشکیل شده، مقاومت بهتری از خود نشان دادند. با این حال، این مورد برای قرار گرفتن در معرض محلول

<sup>۳</sup>سیمان تایپ  $N$  سیمانی با مقاومت فشاری متوسط ملات ۷۵۰ پوند بر اینچ مربع و مقاومت ۲۸ روزه بین ۱۵۰۰ تا ۲۴۰۰ پوند بر اینچ مربع است که از یک بخش سیمان پرتلند، یک بخش آهک و ۶ بخش ماسه تشکیل می‌شود.

<sup>۴</sup>سیمان تایپ  $M$  سیمانی با مقاومت فشاری متوسط ملات ۲۵۰۰ پوند بر اینچ مربع است که از ۳ بخش سیمان پرتلند، یک بخش آهک و ۱۲ بخش ماسه تشکیل می‌شود.

نمونه‌های بتنی که در معرض سولفات سدیم با غلظت‌های مختلف قرار می‌گیرند رفتار مشابهی را نشان می‌دهند که با افزایش جرم و مقداری انبساط مشخص می‌شود. در رابطه با سولفات منیزیم، نمونه‌هایی که در معرض سطح پایین  $Mg^{2+}$  (250 میلی گرم بر لیتر) قرار گرفتند، به دلیل تولید بروسیت و گچ، رفتار افزایش جرم و انبساط مشابهی را نشان دادند. با این حال، با افزایش غلظت  $Mg^{2+}$ ، از دست دادن جرم قابل توجه و پوسته شدن لایه سطحی رخ می‌دهد. همانطور که مطالعات دیگر نشان داد (Santhanam et al., 2001)، هنگامی که بتن در معرض سطح بالایی از  $Mg^{2+}$  قرار می‌گیرد، تبدیل  $C-S-H$  به  $M-S-H$  غالب می‌شود و منجر به کلسیم زدایی بزرگ می‌شود. این می‌تواند کاهش شدید جرم مشاهده شده در این مطالعه را توضیح دهد.

همانطور که در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده، نتایج حمله سولفات سدیم همچنین نشان داد که تاریخچه دما تغییر فاز شیمیایی را تشدید می‌کند، در حالی که حمله فیزیکی با چرخه‌های خشک کردن و مرطوب شدن رخ می‌دهد.

آزمایش‌های صورت گرفته روی اثرات شرایط رویارویی (Qiao et al., 2021) نشان می‌دهد که آزمایش‌های تسریع شده، مانند آزمایش‌هایی با محلول‌های بسیار غلیظ و افزایش دما، به شدت وسعت کلسیم زدایی را تشدید می‌کنند و یک ناحیه ضعیف واضح در لایه سطحی نمونه ایجاد می‌کنند. مشخص نیست که آیا چنین درجه ای از تخریب ممکن است در نهایت پس از یک دوره قرار گرفتن طولانی‌تر در محیط‌های واقعی با غلظت کم عوامل تهاجمی رخ دهد یا خیر. علاوه بر این، در حمله سولفات منیزیم، مکانیسم تخریب به غلظت  $Mg^{2+}$  بستگی دارد. این تفاوت‌ها ارتباط نتایج آزمایش‌های تسریع شده با موقعیت‌های میدانی را چالش برانگیز می‌کند. از این رو، غوطه‌وری کامل در محلول با غلظت کم با دمای پایدار برای ارزیابی عملکرد طولانی مدت بتن عیار پایین ترجیح داده می‌شود.

پرتلند معمولی با SCM به طور متناسب محتوای  $C_3A$  ترکیبات OPC - SCM را کاهش می‌دهد. بسیاری از مطالعات، بهبود مقاومت سولفاتی OPC همراه با SCMها مانند خاکستر بادی کم کلسیم (Al-Dulaijan et al., 2003; Ramyar & Inan, 2007; Rasheeduzzafar, 1992; M. D. Thomas, 1999) سرباره کوره بلند دانه بندی شده (Al-Gahtani et al., 1994; Geiseler et al., 1995; T. Wee, 2000) متاکائولین (Al-Akhras, 2006; Khatib & Wild, 1998; Shi, 2019) و دوده سیلیس (Al-Dulaijan et al., 2003; T. Wee, 2000) را هنگامی که در بتن به عنوان جایگزین جزئی سیمان استفاده شود گزارش کرده‌اند. (Al-Dulaijan et al., 2003; Hooton, 1993; S. Lee et al., 2005; T. Wee, 2000) العمودی (Al-Amoudi, 2002) سه مکانیسم مختلف زیر که از طریق آن‌ها سیمان مخلوط با SCMها می‌تواند مقاومت سولفات را بهبود بخشد را گزارش کرده است:

-اصلاح و رقیق سازی گونه‌های کلینکر. افزودن یک SCM به سیمان می‌تواند به طور متناسب محتوای  $C_3A$  را کاهش دهد و در نتیجه باعث تشکیل مقادیر کمتر هیدرات‌های آلومینات در سیستم آماده واکنش با سولفات‌های خارجی می‌شود.

-همانطور که هیدراتاسیون ادامه می‌یابد، SCMها به دلیل واکنش پوزولانی آن، CH را بیشتر مصرف می‌کنند و C-S-H تولید می‌کنند، که در دسترس بودن CH که می‌تواند با سولفات‌های خارجی واکنش دهد تا گچ ایجاد کند یا باعث تولید اترینگیت اضافی با فروشویی کلسیم شود را کاهش می‌دهد.

-ساختار حفرات در بتن سخت شده حاوی SCM به دلیل تجمع بهتر ذرات و واکنش پوزولانی بهبود می‌یابد. این موضوع باعث ایجاد ریزساختاری متراکم‌تر می‌شود که حساسیت نفوذ سولفات خارجی را کاهش می‌دهد و در نتیجه مقاومت را بهبود می‌بخشد. بخش‌های زیر، اثربخشی خاکستر بادی، سرباره، دوده سیلیس و متاکائولین را برای بهبود مقاومت در برابر حمله سولفاتی خارجی بر اساس کاهش مقاومت فشاری و انبساط نسبت به دوز SCM به عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان OPC مورد بحث قرار می‌دهند. محدوده ترکیب اکسید و سطح ویژه SCMهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آرایه شده است.

سولفات منیزیم نیست. ضخامت مناطق ضعیف در نمونه‌های ساخته شده از سیمان M یا سیمان دوتایی<sup>۵</sup> تقریباً دو برابر سیمان N بود که به حمله مستقیم به C-S-H ناشی از  $Mg^{2+}$  نسبت داده می‌شود. بنابراین، هنگام تعیین نوع سیمان مناسب، غلظت  $Mg^{2+}$  در محیط‌های مواجهه بتن باید در نظر گرفته شود.

#### ۴- اثر نسبت آب به ماده سیمانی

عمق کربناسیون با کاهش نسبت w/b کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، مشخص شده است که هنگامی که محصولات گسترده مانند اترینگیت، گچ یا بروسیت تولید می‌شوند، تخلخل کمتری که با نسبت w/b کوچک به دست می‌آید می‌تواند منجر به رفتار انبساطی قابل توجهی پس از قرار گرفتن طولانی مدت در معرض سولفات‌های سدیم و منیزیم شود (Qiao et al., 2021).

#### ۵- اثر مواد سیمانی مکمل

به طور کلی، سه استراتژی اولیه برای مبارزه با حمله سولفات توصیه می‌شود که شامل (۱) محدود کردن محتوای  $C_3A$  در سیمان همانطور که در ASTM C150 تجویز شده است. (۲) کاهش محتوای هیدروکسید کلسیم (CH) با استفاده از SCMs به عنوان ماده جایگزین سیمان و (۳) کاهش نفوذپذیری بتن با کاهش نسبت آب-ماده سیمانی (Barcelo, 2014; D. Higgins & Crammond, 2003; Khatri et al., 1997; P. K. Mehta & J, 2017; Neville, 1995). از آنجایی که CH و هیدرات آلومینات کلسیم در واکنش حمله سولفاتی شرکت می‌کنند، انتظار داریم هر استراتژی که توانایی محدود کردن حضور این محصولات را داشته باشد، مقاومت در برابر حمله سولفاتی را نیز بهبود بخشد. ASTM C150 سیمان نوع II و نوع V را با محدود کردن محتوای  $C_3A$  آن‌ها، سیمانی مقاوم نسبت به سولفات معرفی کرده است. ("ASTM C150 / C150M-20. Standard Specification for Portland Cement," 2020)، اما این موضوع به تنهایی نمی‌تواند از همه‌ی گونه‌های حملات سولفاتی جلوگیری کند، زیرا CH هنوز نقش غالبی ایفا می‌کند. بنابراین، جایگزینی نسبی این سیمان‌ها با SCM می‌تواند به دلیل واکنش پوزولانی آن‌ها که CH را در ماتریس مصرف می‌کنند مفید باشد. علاوه بر این، جایگزینی سیمان

<sup>۵</sup>سیمانی که از پرتلند و یک نوع ماده سیمانی مکمل تشکیل شده باشد (Binary)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مواد سیمانی تکمیلی (سرباره (Drimalas, 2007) و دوده سیلیس (Atahan & Arslan, 2016))

اکسیدها (درصد)	سرباره	دوده سیلیس	نانو/میکروسیلیکا
CaO	۳۵/۳_۴۳/۲	۰/۱_۳/۲	۰/۱_۰/۶
SiO <sub>2</sub>	۳۲/۳_۴۶/۱	۸۷/۳_۹۶/۲	>۹۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۴_۱۶/۳	۰/۳_۰/۶	۰_۰/۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۴_۱/۰	۰/۲_۰/۶	۰_۰/۳
MgO	۵/۲_۱۰/۸	۰/۳_۴/۵	۰/۱_۰/۵
K <sub>2</sub> O	۰/۳_۱/۲	۰/۱_۱/۳	۰_۰/۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۲_۱/۰	۰/۱_۱/۳	۰_۰/۲
SO <sub>3</sub>	۰/۲_۳/۲	۰/۲_۰/۵	۰/۳_۰/۴
LOI	۰/۴_۱/۲	۰/۷_۲/۷	۰/۵_۴/۴
سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /kg)	۳۸۴_۸۰۰	۱۴,۰۰۰_۲۷,۳۰۰	۳۰,۰۰۰_۹۵۴,۰۰۰

#### ۵-۱- سرباره‌ی کوره‌ی بلند

۸۵ درصد گزارش شد (P. Mehta, 1986). این روند کلی بهبود عملکرد در درصد جایگزینی بالاتر را نشان می‌دهد. مطالعه‌ای بر روی تاثیر آلومینای موجود در سرباره بر مقاومت سولفاتی سرباره - OPC که با کاهش انبساط و افزایش مقاومت ارزیابی شده است توسط نصحیان و همکاران انجام شد (Dunstan, 1980)؛ نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که بهبود در انبساط و استحکام در ۵۰-۷۰ درصد سرباره، به ویژه، در مقادیر بالاتر آلومینای ۱۴/۲۵ درصد و ۱۶/۲۵ درصد بیشترین بود.

نتیجه مشابهی در مطالعات دیگر گزارش شده است (Cao, 1997; Drimalas, 2007). بنابراین، استفاده از جایگزین‌های سرباره بالاتر با محتوای آلومینای بالاتر برای کاهش حمله سولفاتی بهترین گزینه است. به طور کلی، بهبود مقاومت در برابر سولفات مخلوط‌های سرباره - OPC به مصرف پرتلندیت، پالایش حفرات و کاهش نفوذپذیری نسبت داده می‌شود. علاوه بر این،  $C_3A$  سیمان کنترل نیز بسته به ترکیب سیمان و دوز جایگزینی سرباره، می‌تواند نقش حاکم در عملکرد را ایفا کند. مقادیر بالاتر آلومینا در مخلوط‌های سرباره - OPC می‌تواند C-S-H را با نسبت  $Ca/Si$  کمتر تولید کند و در نهایت از طریق

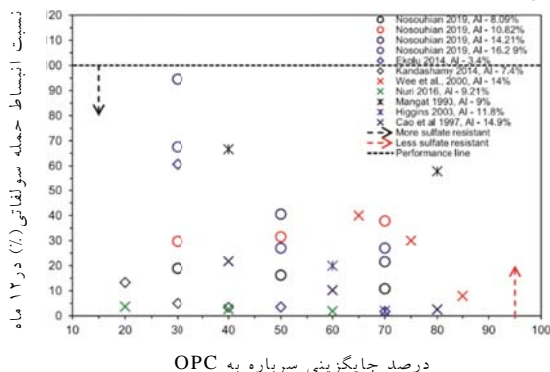
تعدادی از مطالعات، بهبود مقاومت سولفاتی را در سیمان مخلوط سرباره - OPC که در اینجا به صورت کاهش در انبساط اندازه‌گیری شده است را نشان داده‌اند که در شکل ۳ نمایش داده شده است (Aguayo, 2007; Cao, 1997; Dhole, 2013; Diab, 2012; Drimalas, 2007; Dunstan, 1980; P. Mehta, 1986; Tikalsky, 1993). این نشان می‌دهد که بهبود در کاهش انبساط با جایگزینی سرباره در همه نمونه‌ها با محدوده ۲۰ تا ۸۵ درصد در سولفات سدیم رخ داده است. تحقیقات توصیه کرده‌اند که نه تنها درصد سرباره (Al-Amoudi, 1998; Diab, 2012; Drimalas, 2007; P. Mehta, 1986; Park, 1999). بلکه میزان آلومینای سرباره نیز تأثیر قابل توجهی بر کارایی مقاومت سولفاتی سرباره - بتن مخلوط OPC دارد (Drimalas, 2007; Dunstan, 1980; Huang, n.d.; Tobón et al., 2015).

استاندارد ASTM C989 (Tobón, n.d.) نشان می‌دهد که مقاومت سولفاتی سرباره - سیمان OPC ممکن است به محتوای آلومینای سرباره بستگی داشته باشد (۱۱ درصد  $Al_2O_3$  به عنوان کم آلومینا و ۱۸ درصد  $Al_2O_3$  به عنوان پر آلومینا). با این حال، جایگزینی ۶۰ درصد سرباره برای افزایش مقاومت سولفاتی با صرف نظر از ترکیب اکسید سرباره توصیه می‌شود. علاوه بر این، بدون توجه به نسبت آب به سیمان (۰/۴۰ و ۰/۵۰) و دوره عمل‌آوری (۳ روز، ۷ روز و ۲۸ روز)، مقاومت سولفاتی بیشتری با محتوای سرباره ۷۵ و

(n.d. با این حال، افزایش مقدار SF منجر به بهبود عملکرد نشده است. در مقابل، انبساط نسبتاً بالاتری در مقایسه با نمونه کنترل OPC برای سیستم‌های سیمانی یکسان قرار گرفته در معرض سولفات منیزیم با عملکرد بدتر در درصد جایگزینی بالاتر مشاهده شد (Cao, 1997; Dhole et al., 2013; Ekolu & Ngwenya, 2014; Hou, 2015; Kandasamy & Shehata, 2014; Mangat & Khatib, 1996; Sahmaran, 2007). برخی از نمونه‌ها با نرخ جایگزینی پایین‌تر همچنان انبساط سولفات منیزیم را در مقایسه با کنترل OPC کاهش می‌دهند تأثیر نوع قرار گرفتن در معرض سولفات بر عملکرد سیمان مخلوط SF - OPC توسط العمودی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت (Kandasamy & Shehata, 2014). خلاصه نتایج آزمایش، همانطور که در جدول ۲ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که انبساط در سولفات سدیم کمتر از سولفات منیزیم است. همچنین، هنگامی که در معرض سولفات منیزیم قرار گرفت کاهش استحکام به طور قابل توجهی بالاتر (۸۹ درصد کاهش استحکام با ۲۰ درصد SF در ۳۶۰ روز) در مقایسه با سولفات سدیم مشاهده شد. عملکرد بهبود یافته در سولفات سدیم به کاهش CH و واکنش پوزولانی SF نسبت داده می‌شود. در حالی که سولفات منیزیم به دلیل CH ناکافی موجود در سیستم مستعد واکنش مستقیم با ژل C-S-H اولیه و ثانویه است، (Hou, 2015; Mangat & Khatib, 1996; Nosouhian, 2019) باعث تسریع در روند زوال بتن می‌شود. در سولفات سدیم، در بتن‌های دارای SF، گچ و اترینگیت نمی‌توانند تا حد زیادی در ملات سیمان داخلی به دلیل عدم وجود پورتلندیت آزاد و سخت‌تر بودن نفوذ حمله، تشکیل شوند و انبساط بتن‌های حاوی SF ناچیز است (Girardi et al., n.d.).

به طور کلی، مواد سیمانی SF - OPC ورود یون‌های مضر خارجی و انبساط را کاهش می‌دهند. با این حال، همانطور که قبلاً توضیح داده شد، هنگامی که این مواد سیمانی در سولفات منیزیم غوطه‌ور شدند، کاهش استحکام به طور قابل توجهی بالاتر و افزایش انبساط گزارش شد (Björnström, 2004; S. Lee et al., 2005; Mangat & Khatib, 1996). دیاب و همکاران (Cao, 1997) تحقیقات گسترده‌ای در مورد انبساط و کاهش استحکام ماده‌های سیمانی SF - OPC انجام دادند و افزایش انبساط و

اتصال آلومینیوم، هیدروآکسید تشکیل دهد (Nazari & Riahi, 2011; Qing, 2007; Said, 2012) این امر، آلومینیوم آزاد در سیستم را برای واکنش با سولفات‌های خارجی محدود می‌کند و در نتیجه مقاومت سولفاتی را بهبود می‌بخشد (Li, 2004; Mukharjee & Barai, 2014).

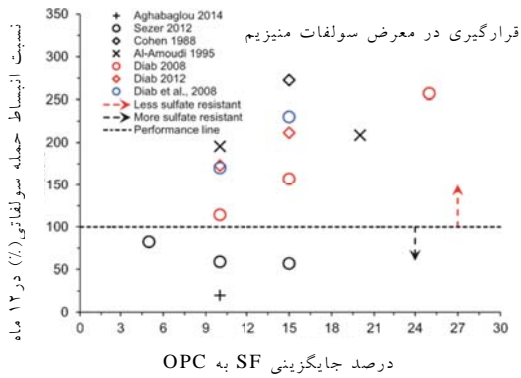


شکل ۳. نسبت انبساط حمله سولفات ملات و بتن ساخته شده از مخلوط سرباره - OPC در معرض سولفات سدیم ۵-۲- دوده‌ی سیلیس

تعدادی از مطالعات بهبود مقاومت در برابر حمله سولفاتی را در بتن مخلوط دوده‌ی سیلیس<sup>۷</sup> - OPC (۳-۲۵ درصد دوده‌ی سیلیس) نشان داده‌اند، اما بسته به نوع قرار گرفتن در معرض سولفات، عملکرد ضعیف نیز دارد (Al-Dulaijan et al., 2003; Hooton, 1993; S. Lee et al., 2005; T. Wee, 2000). شکل ۴ و شکل ۵ انبساط ملات و بتن ساخته شده با مخلوط‌های SF - OPC را نشان می‌دهد که به ترتیب در معرض محیط‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم قرار گرفتند. روند رایج مشاهده شده این است که به طور کلی انبساط در ترکیبات SF - OPC در صورت قرارگیری در معرض سولفات سدیم کاهش می‌یابد (Dhoke et al., 2013; D. D. Higgins, 2003; Hou, 2015; Kandasamy & Shehata, 2014; Mangat & Khatib, 1996; P. Mehta, 1983; Nosouhian, 2019; Tikalsky et al., 1992; T. H. Wee et al.,

<sup>۶</sup> هیدروآکسید یک ترکیب معدنی با ساختار لایه ای میباشد. در شکل طبیعی آن، یک هیدروکربنات منیزیم-آلمینیوم با فرمول کلی  $Mg(1-x)Al_x(OH)_2(CO_3)_x/2 \cdot mH_2O$  است. که X ثابت استوکیومتری و M مقدار آب آن است. هیدروآکسید ها ساختاری شبیه به پرکننده تالک دارند. ساختار صفحه ای در هیدروآکسید ها با آرایش های مختلفی روی یکدیگر قرار می گیرند و در فضای بین صفحات آنیون های کربناتی قرار می گیرند که اتصالی ضعیفی دارند و به همین دلیل هیدروآکسید ها به راحتی می توانند در واکنش های تعویض یونی شرکت کنند.

<sup>۷</sup> Silica Fume (SF)



شکل ۵. نسبت انبساط حمله سولفات ملات و بتن ساخته شده از مخلوط‌های SF - OPC در معرض سولفات منیزیم

### ۵- نتیجه گیری

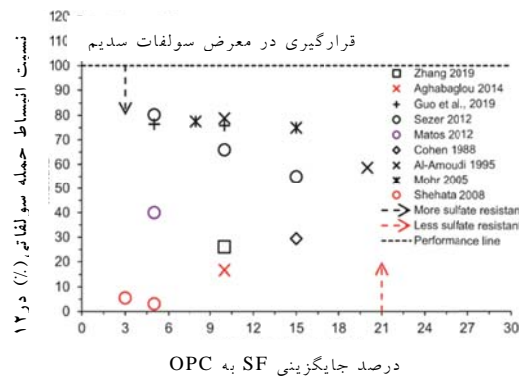
اثرات شرایط رویارویی، نوع سیمان و نسبت w/b و عملکرد بتن و مواد سیمانی با SCM ها از جمله سرباره و دوده سیلیس در کاهش حمله سولفات خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، عملکرد مواد سیمانی همراه با SCM ها به صورت درصد کاهش در انبساط در مقایسه با کنترل OPC به صورت تابعی از هر دو درصد جایگزینی OPC از نظر وزن و ترکیب شیمیایی ارزیابی شده است. بر اساس این بررسی، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- تأثیر کاهش نسبت w/b دوچندان بود: نفوذ یون‌های مضر به دلیل تخلخل کم ملات مهار شد، در حالی که در صورت تشکیل محصولات منبسط کننده، باعث انبساط بیشتر می‌شد.

- ادغام هر نوع SCM اثرات گوناگونی بر ترکیبات - SCM OPC دارد که شامل رقیق کردن کلینکر، مصرف CH، تولید C-S-H ثانویه و بهبود ساختار حفرات است، اما به این موارد محدود نمی‌شود. هنگامی که همه این عوامل در یک سیستم بتنی کار می‌کنند، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و CH موجود تولید شده توسط هیدراتاسیون OPC کاهش می‌یابد. بنابراین، نفوذ سولفات خارجی کاهش می‌یابد و واکنش بعدی برای تولید اترینگیت و گچ محدود می‌شود.

- عملکرد مخلوط‌های سرباره - OPC در سولفات سدیم به ویژه در سطوح جایگزینی پایین تحت تأثیر محتوای آلومینا سرباره قرار گرفت. به طور کلی، جایگزینی بیش از ۲۰ درصد

کاهش استحکام بالاتر را با افزایش SF اضافه شده به OPC تأیید کردند. مطالعات مربوطه این نویسندگان نیز یافته‌های مشابهی را گزارش کرده‌اند کاهش استحکام در سولفات منیزیم با تشکیل گچ و تامازیت<sup>۸</sup> کنترل می‌شود در حالی که محصول اصلی حمله سولفات در سولفات سدیم، اترینگیت بود (S. Lee et al., 2005). همانطور که در مطالعات متعدد توضیح داده شده است، کاهش مقاومت بیشتر در سولفات منیزیم به دلیل توانایی یون‌های سولفات منیزیم برای واکنش مستقیم با C-S-H است که منجر به کلسیم زدایی و به دنبال آن تشکیل غیر منسجم M-S-H می‌شود. این امر تشکیل اترینگیت را محدود می‌کند و در عوض تشکیل گچ را افزایش می‌دهد، که به صورت نرم شدن و از دست دادن استحکام مواد پایه سیمانی ظاهر می‌شود (Al-Gahtani et al., 1994; Aleem et al., 2014; S. Lee et al., 2005; Mangat & Khatib, 1996)



شکل ۶. نسبت انبساط حمله سولفات ملات و بتن ساخته شده SF - OPC مخلوط در معرض سولفات سدیم

<sup>۸</sup> سولفات کلسیم از طرق مختلف از قبیل گچ اضافه شده به سیمان، گچ موجود در محیط‌های سولفاته، نفوذ سولفات‌های حلال به داخل بتن و واکنش با Ca، وارد ملات و بتن می‌شود C3S و C2S یون کلسیم (Ca) تولید می‌نمایند که با یون سولفات تبدیل به گچ و اترینگیت (اترینگات) و در نهایت تامازیت ایجاد می‌کند. تامازیت (Thaumasite) کمپلکسی از کریبات کلسیم و سیلیکات کلسیم و سولفات کلسیم هیدراته می‌باشد که با فرمول  $CaCO_3 \cdot CaSiO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$  نشان داده می‌شود. تامازیت گرد سفیدرنگی است که از حمله سولفات‌ها به بتن و ملات حاصل می‌شود و هیچ اتصالی با تشکیل دهنده‌های بتن و ملات وجود نمی‌آورد.

یافت، اما عملکرد مشابهی حتی در جایگزینی ۵ درصد مشاهده شد. در رویارویی با سولفات منیزیم، جایگزینی OPC با SF، مقاومت سولفات را به ویژه در دوزهای بالاتر به دلیل واکنش های مختلف سولفات که با منیزیم در مقایسه با Na اتفاق می افتد تا حدی کاهش می دهد.

سرباره با یک مزیت مشاهده شده در نرخ جایگزینی بالاتر بدون توجه به محتوای آلومینا عملکرد را بهبود بخشید. -مقاومت در برابر حمله سولفاتی مخلوط های SF-OPC به نوع محلول سولفات مورد استفاده در طول آزمایش بستگی دارد. در سولفات سدیم، انبساط مخلوط های SF - OPC در مقایسه با OPC کنترل تا ۲۰ درصد جایگزینی کاهش

جدول ۲. انبساط و کاهش مقاومت دوده سیلیس-OPC در معرض سولفات سدیم و منیزیم

(Kandasamy & Shehata, 2014)

درصد کاهش مقاومت				درصد انبساط				نوع مخلوط
سولفات منیزیم		سولفات سدیم		سولفات منیزیم		سولفات سدیم		
روز ۳۶۰	روز ۱۸۰	روز ۳۶۰	روز ۱۸۰	روز ۳۶۰	روز ۱۸۰	روز ۳۶۰	روز ۱۸۰	
۶۲	۴۵	۳۹	۳۲	۰/۰۴۷*	۰/۰۲۸	۰/۱۰۴	۰/۰۷۸	تیپ I
۷۲	۵۵	۹	۶	۰/۰۹۶	۰/۰۵۲	۰/۰۸۲	۰/۰۶۲	تیپ I + 10% SF
۸۹	۶۵	-۴	-۴	۰/۰۹۰*	۰/۰۶۲	۰/۰۶۱	۰/۰۴۸	تیپ I + 20% SF

\* اندازه گیری های انبساط زودتر از ۳۶۰ روز انجام شد.

concentrations of sodium sulfate. Cement and Concrete Composites, 25(4), 429-437. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00083-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00083-5)

-Al-Gahtani, R., A., & Al-Saadoun, S. (1994). Rebar corrosion and sulfate resistance of blast-furnace slag cement. Journal of Materials in Civil Engineering, 6-2.

-Aleem, S. A. E., Heikal, M., & Morsi, W. M. (2014). Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica, Constr. Build. Mater, 59, 151-160.

-ASTM C1012 / C1012M-18b., Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. (2018). ASTM International.

-ASTM C150 / C150M-20. Standard specification for portland cement. (2020). ASTM International, 25, "(4-5)" # "429-437."

Atahan, H. N., & Arslan, K. M. (2016). Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: the role of nano & micro additives. Sustainable Cities and Society, 22, 40-48.

-Barcelo, L. (2014). A modified ASTM C1012 procedure for qualifying blended cements containing limestone and SCMs for use in sulfate-rich environments, Cem. Concr. Res,

## ۶- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گرت شماره ۴۹۳۵ مورخ ۱۴۰۲/۰۳/۰۶ انجام گردیده است.

## ۷- مراجع

-Aguayo, J., (2007). External sulfate attack of concrete: an accelerated test method, mechanisms, and mitigation techniques. The University of Texas at Austin. 2007. Doctoral dissertation.

-Al-Akhras, N. M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, Cem. Concr. Res, 36(9), 1727-1734.

-Al-Amoudi, O. S. B. (1998). Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments, Build. Environ, 33(1), 53-61.

-Al-Amoudi, O. S. B. (2002). Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, Cem. Concr. Compos, 24, "(3-4)" # "305-316."

-Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Sharif, A. M., Shameem, M., & Ibrahim, M. (2003). Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying



- Concrete and Aggregates (Vol. 2, Issue 1, 20–30.
- Ekolu, S. O., & Ngwenya, A. (2014). Sulphate resistance of concrete made with moderately high alumina slag. *Constr. Mater. Struct.*
- Elahi, M. M. A., & Shearer, C. R. (n.d.). Improving the sulfate attack resistance of portland-limestone cement through sulfate optimization: A calorimetry-based approach. *Conference proceeding. Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>.
- Geiseler, J., Kollo, H., & Lang, E. (1995). Influence of blast furnace cements on durability of concrete structures. *Materials Journal*, 92(3), 252–257.
- Girardi, F., Vaona, W., & Maggio, R. D. (n.d.). Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 595–602.
- Hansen, W. (1963). Crystal growth as a source of expansion in Portland cement concrete. In *Proc. ASTM*.
- Hansen, W. (1966). Attack on Portland Cement Concrete by Alkali Soils and Waters—A Critical Review, *Highway Res. Rec.*, 113.
- Hanson, W. (1968). *Chemistry of sulfate-resisting portland cement*. University of Toronto Press.
- Higgins, D., & Crammond, N. (2003). Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack, *Cem. Concr. Compos.*, 25(8), 929.
- Higgins, D. D. (2003). Increased sulfate resistance of ggbs concrete in the presence of carbonate. In *Cem. Concr. Compos* (Vol. 25, Issue 8, pp. 913–919).
- Hooton, R. (1993). Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *Materials Journal*, 90(2), 143–151.
- Hou, P. (2015). Characteristics of surface-treatment of nano-SiO<sub>2</sub> on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios, *Cem. Concr. Compos.*, 55, 26–33.
- Huang, Q. (n.d.). Effect of nanosilica on sulfate resistance of cement mortar under partial immersion, *Constr. Build. Mater.*, 231, 117180.
- 63, 75–88.
- Björnström, J. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chem. Phys. Lett.*, 392(1), 242–248.
- Bonen, D., & Cohen, M. D. (1992). Magnesium sulfate attack on portland cement paste-I. In *Microstructural analysis, Cement and Concrete Research* (Vol. 22, Issue 1).
- Brown, P., & Badger, S. (2000). The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> attack, *Cem. Concr. Res.*, 30(10), 1535–1542.
- Cao, H. (1997). The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of portland cements and blended cements, *Cem. Concr. Compos.*, 19(2), 161–171.
- Controlling aluminate phase hydration for sulfate resistance of Portland-limestone cements. (n.d.). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials*, 1–13.
- Dhole, R. (2013). Characterization of fly ashes for sulfate resistance, *ACI Mater. J.*, 110(2).
- Dhole, R., Thomas, M. D. A., & Folliard, K. (2013). Characterization of Fly Ashes for Sulfate Resistance. *ACI Mater. J.*, 110(2).
- Diab, A. M. (2012). Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack, *Constr. Build. Mater.*, 36, 311–318.
- Diamond, S. (1996). Delayed ettringite formation—processes and problems, *Cem. Concr. Compos.*, 18(3), 205–215.
- Diamond, S., & Lee, R. (1999). Microstructural alterations associated with sulfate attack in permeable concretes, *American Ceramic Society Inc, Materials Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanisms(USA)*, 123–173.
- Drimalas, T. (2007). Laboratory and field evaluations of external sulfate attack. The University of Texas at Austin. 2007. Doctoral dissertation.
- Drimalas, T. (2011). Sulfate resistance of concrete exposed to external sulfate attack. Texas Department of Transportation: Austin, Texas.
- Dunstan, E. R. (1980). A possible method for identifying fly ashes that will improve. In the sulfate resistance of concrete, *Cement*

- 987–993.
- Mukharjee, B. B., & Barai, S. V. (2014). Assessment of the influence of nano-silica on the behavior of mortar using factorial design of experiments, *Constr. Build. Mater*, 68, 416–425.
- Nazari, A., & Riahi, S. (2011). The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete, *Compos. B Eng*, 42(3), 570–578.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete IV*. IV Prentice Hall, Harlow, UK.
- Nielsen, J. (1966). Investigation of resistance of cement paste to sulfate attack, *Highway Res. Rec*, 113.
- Nosouhian, F. (2019). Effects of slag characteristics on sulfate durability of Portland cement-slag blended systems, *Constr. Build. Mater*, 229, 116882.
- Park, Y. S. (1999). Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment, *Cem. Concr. Res*, 29(9), 1397–1402.
- Qiao, D., Matsushita, T., Maenaka, T., & Shimamoto, R. (2021). Long-term performance assessment of concrete exposed to acid attack and external sulfate attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(7), 796–810.  
<https://doi.org/10.3151/jact.19.796>
- Qing, Y. (2007). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Constr. Build. Mater*, 21(3), 539–545.
- Rahman, M., & Bassuoni, M. (2014). Thaumassite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation, *Constr. Build. Mater*, 73, 652–662.
- Ramyar, K., & Inan, G. (2007). Sodium sulfate attack on plain and blended cements, *Build. Environ*, 42(3), 1368–1372.
- Rasheeduzzafar. (1992). Influence of cement composition on concrete durability. *ACI Mater. J*, 89(6), 574–586.
- Sahmaran, M. (2007). Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements, *Cem. Concr. Compos*, 29(3), 159–167.
- Sahu, S., & N. (2004). Thaulow, Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties, *Cem. Concr. Res*, 34(9), 1675–1681.
- Said, A. M. (2012). Properties of concrete
- Kandasamy, S., & Shehata, M. H. (2014). Durability of ternary blends containing high calcium fly ash and slag against sodium sulphate attack, *Constr. Build. Mater*, 53, 267–272.
- Khatib, J., & Wild, S. (1998). Sulphate resistance of metakaolin mortar, *Cem. Concr. Res*, 28(1), 83–92.
- Khatri, R., Sirivivatnanon, V., & Yang, J. (1997). Role of permeability in sulphate attack, *Cem. Concr. Res*, 27(8), 1179–1189.
- Kumar, M. P., & Monterio, P. J. (2006). *Concrete: microstructure, properties and materials*, Indian Edition, 17–39.
- Lee, H. (2005). The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration, *Cem. Concr. Res*, 35(2), 332–343.
- Lee, S., Moon, H., & Swamy, R. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss, *Cem. Concr. Compos*, 27(1), 65–76.
- Li, H. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles, *Compos. B Eng*, 35(2), 185–189.
- Ma, B. (2006). Thaumassite formation in a tunnel of Bapanxia Dam in Western China, *Cem. Concr. Res*, 36(4), 716–722.
- Mangat, P. S., & Khatib, J. M. (1996). Influence of fly ash, silica fume, and slag. In *on sulfate resistance of concrete*, *Fule and Energy Abstract* (Vol. 6, Issue 5, p. 423).
- Mehta, P. (1983). Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete: A critical review, *The use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete*. ACI Special Publication, Detroit.
- Mehta, P. (1986). Effect of fly ash composition on sulfate resistance of cement. *Journal Proceedings*, 83(6).
- Mehta, P. (1992). Sulfate attack on concrete—a critical review. *Mater. Sci. Concr*, 105.
- Mehta, P. K., & J, P. (2017). *Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials*.
- Mingyu, H., Fumei, L., & Mingshu, T. (2006). The thaumassite form of sulfate attack in concrete of Yongan Dam, *Cem. Concr. Res*, 36(10).
- Monteiro, P. J., & Kurtis, K. E. (2003). Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack, *Cem. Concr. Res*, 33(7),

- gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?, *Cem. Concr. Res.*, 30(1), 117–123.
- Tikal'sky, P. (1993). Influence of fly ash on the sulfate resistance of concrete. *Materials Journal*, 89(1), 69–75.
- Tikal'sky, P., Carrasquillo, R., & Snow, P. (1992). Sulfate resistance of concrete containing fly ash (Vol. 131, pp. 255–266). *Specail Publication*.
- Tobón, J. I. (n.d.). Mineralogical evolution of portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength, *Constr. Build. Mater.*, 36, 736–742.
- Tobón, J. I., Payá, J., & Restrepo, O. J. (2015). Study of durability of portland cement mortars blended with silica nanoparticles, *Constr. Build. Mater.*, 80, 97.
- Wee, T. (2000). Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures. *Materials Journal*, 97(5), 536–549.
- Wee, T. H., Suryavanshi, K., Wong, S. F., & Rahman, A. K. M. A. (n.d.). No Title. In *Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures*, *ACI Mater* (Vol. 97, Issue 5, pp. 536–549).
- Yang, S., Zhongzi, X., & Mingshu, T. (1996). The process of sulfate attack on cement mortars, *Adv. Cem. Based Mater.*, 4(1), 1–5.
- incorporating nano-silica, *Constr. Build. Mater.*, 36, 838–844.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Sulfate attack research — whither now? *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845–851.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00510-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00510-5)
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack, *Cem. Concr. Res.*, 33(3), 325–332.
- Shi, Z. (2019). Sulfate resistance of calcined clay–limestone–portland cements, *Cem. Concr. Res.*, 116, 238–251.
- Taylor, H. (1994). Sulfate reactions in concrete—microstructural and chemical aspects, *Ceram. Trans.*, 40, 61.
- Thomas, M. (2008). Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures, *Cem. Concr. Res.*, 38(6), 841–847.
- Thomas, M. D. (1999). Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 29(8), 1207–1214.
- Thorvaldson, T. (1952). Chemical aspects of the durability of cement products. *Proceedings of The*.
- Tian, B., & Cohen, M. D. (2000). Does

# Methods for Improving Concrete Resistance against Sulfate Attacks - A Review Study

*Mostafa Adresi, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.*

*Nima Rashti Mohammad, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.*

*Email: m.adresi@sru.ac.ir*

Received: March 2023- Accepted: August 2023

## **ABSTRACT**

The aim of this study is to evaluate the degradation of concrete, taking into account sulfate attacks, and to propose an appropriate approach to tackle this phenomenon. The effects of exposure conditions such as solution concentration, temperature, and immersion conditions, type of cement, and water to cement ratio were investigated. Additionally, it has been demonstrated that supplementary cementitious materials and ordinary Portland cement improve the properties of hydrated mortar and reduce external sulfate attack. This study also presents a comprehensive review of the performance improvement of slag and silica fume against sulfate attack. Replacement rates of over 20% slag and 3-20% silica fume have been found to improve resistance to sodium sulfate attack. Increasing the dosage rate improves overall performance for all supplementary cementitious materials except silica fume. In magnesium sulfate, at higher replacement rates, the performance for silica fume is mixed as it has been shown to expand relative to a control. Overall, slag and silica fume can be effective in reducing sulfate attack, but their performance depends on replacement rates, exposure to sulfate cations, and their chemical and physical properties.

**Keywords:** Concrete, Sulfate Attack, Exposure, Durability, Supplementary Cementitious Materials