فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۷، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۳۹۷

بررسی تأثیر نیترات سدیم بر خواص بدنه‌های گچی

هاجر احمدی مقدم

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

* hajar.ahmadi@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۹ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲ بهمن ۱۳۹۷

کلید واژه:

گچ، نیترات سدیم، زمان گیرش، خواص مکانیکی، ریزساختار

چکیده:

گچ در صنایع مختلف به دلایل خواصی مانند تولید آسان، ساگازی زیست محیطی و قیمت پایین کاربرد وسیعی دارد. در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از نیترات سدیم به عنوان افزودنی بر خواص فیزیکی و مکانیکی بدنه‌های گچ ساختمانی پرداخته شد. نیترات سدیم به مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی مقدار گچ اضافه گردید. طبق نتایج حاصل از زمان گیرش، نیترات سدیم با قابلیت حلالیت در آب نقش تسریع دهنده و کاهش زمان گیرش گچ را دارد. افزودن نیترات سدیم منجر به بهبود خواص مکانیکی بدنه گچ می‌گردد. بیشترین استحکام خمشی و فشاری برای نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم حاصل گردید. با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم، استحکام فشاری و خمشی به ترتیب به مقدار ۸۰ و ۷۳ درصد افزایش یافتند. افزودنی نیترات سدیم، منجر به کاهش درصد تخلخل و مقدار جذب آب می‌گردد. نتایج پراش اشعه ایکس نشان داد که حضور نیترات سدیم درجه بالاتر هیدراته شدن ایجاد می‌کند. کاهش درصد تخلخل بدنه‌های گچی با استفاده از افزودنی نیترات سدیم و ایجاد ریز ساختاری میله‌ای قفل شده در یکدیگر می‌تواند منجر به افزایش استحکام بدنه‌های گچی گردد. نیترات سدیم می‌تواند از طریق افزایش سرعت رسوب کریستال‌های سوزنی شکل سولفات کلسیم دوهیدراته از محلول اشباع منجر به کاهش زمان گیرش و افزایش خواص مکانیکی به دلیل ایجاد سوزن‌های کریستالی با اتصال بیشتر گردد.

۱- مقدمه

استفاده از گچ به زمان‌های حدود ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد در مقبره‌های مصر مربوط می‌شود. خصوصیات مناسب گچ از جمله تولید آسان، ساگازی زیست محیطی، قیمت پایین و زیبایی منجر به کاربرد گسترده گچ در صنایع مختلف گردیده است [۱،۲]. گچ مینرال سولفات کلسیم نیمه هیدراته ($CaSO_4.0.5H_2O$) می‌باشد که از طریق دهیدراته حرارتی سولفات کسیم دو هیدراته ($CaSO_4.2H_2O$) در کوره‌های دوار تهیه می‌شود. سولفات کسیم دو هیدراته خاصیت منحصر به فردی هنگام از دست دادن و بازیابی آب در نتیجه کریستالیزاسیون از خود نشان می‌دهد. در طی فرآیند کلسیناسیون سولفات کسیم دو هیدراته (ژیپسیت) در محدوده دمایی ۱۸۰°C-۱۲۰، ۱/۵ مولکول آب از دست می‌دهد و به سولفات کلسیم نیمه هیدراته (گچ) طبق

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

واکنش ۱ تبدیل می‌شود:

$$CaSO_4 .2H_2O \rightarrow CaSO_4.0.5H_2O + 1.5\ H_2O_{(g)} \quad (۱$$

(بخار) (گچ) (ژیپسیت)

واکنش هیدارته شدن سولفات کلسیم نیمه هیدراته بلافاصله بعد از مخلوط شدن با آب طبق واکنش ۲ رخ می‌دهد که این واکنش به صورت گرما زا می‌باشد [۳]:

$$CaSO_4.\ 0.5H_2O + 1.5\ H_2O \rightarrow \quad (۲$$

$$CaSO_4.2H_2O + heat$$

واکنش هیدراته شدن گچ از طریق مکانیزم کریستالیزاسیون طی سه مرحله انجام می‌شود:۱) مرحله حل شدن شیمیایی: هنگامی که کریستال‌های نیمه هیدراته با آب مخلوط می‌شوند، محلول اشباع از یون‌های Ca^{2+} و SO_4^{2-} ایجاد می‌شود، ۲) مرحله کریستالیزاسیون فیزیکی: وقتی محلول به حد اشباع رسید، کریستال‌های دوهیدراته سوزنی شکل رسوب می‌کنند و ۳) مرحله سفت شدن مکانیکی: سفت شدن دوغاب گچ با رشد کریستال‌ها و افزایش مناطق تماس آنها رخ می‌دهد [۳،۱].

فاز نیمه هیدراته در تماس با آب محلول اشباع از یون‌های Ca^{2+} و SO_4^{2-} تشکیل می‌دهد و اولین مراکز جوانه زا برای تشکیل کریستال‌های دوهیدراته در مرحله اول ایجاد می‌شود. کریستال‌های دو هیدراته حلالیت کمتری در آب نسبت به کریستال‌های نیمه هیدراته دارند، بنابراین در مرحله دوم این کریستال‌ها به هم متصل و گیرش گچ شروع می‌شود. با تشکیل پیوسته کریستال ها، محیط از کریستال‌های تشکیل شده اشباع می‌شود و سفت شدن گچ رخ می‌دهد [۴].

تعداد مراکز جوانه زا در واحد حجم محلول بر سرعت رشد و اندازه کریستال‌ها تأثیر می‌گذارد. با افزایش یا کاهش تعداد مراکز جوانه زا می‌توان ساختار کریستالی و در نتیجه خواص مکانیکی بدنه گچی را تغییر داد. شرایط رشد کریستال نیز به صورت مستقیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. مقدار آب، ناخالصی‌ها و افزودنی‌ها عوامل مؤثر در رشد کریستال‌ها و خواص مکانیکی قطعه گچی می‌باشند [۵،۳].

تأثیر افزودنی‌های مختلف بر روی خصوصیات گچ بررسی شده‌اند [۶-۹]. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان به اسید سیتریک، الیاف و نانو لوله‌های کربن، اشاره نمود [۱۰-۱۲]. برخی از افزودنی‌ها می‌توانند زمان گیرش گچ را کاهش یا افزایش دهند و هم چنین موجب تغییر در مورفولوژی قطعه نهایی نیز شوند [۱۳]. پرکننده‌های آلی می‌توانند برای افزایش دانسیته و در نتیجه بهبود استحکام مکانیکی کامپوزیت گچ استفاده شوند [۷]. گچ یک ماده سرامیکی ترد می‌باشد و از فیبرها برای افزایش انرژی شکست، چقرمگی و مقاومت به ضربه آن استفاده می‌شود [۱۲،۳].

در این تحقیق، تأثیر استفاده از نیترات سدیم به عنوان یک افزودنی بر خصوصیات گچ ساختمانی از جمله زمان گیرش، خواص مکانیکی، جذب آب و ریزساختار آن بررسی گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق از گچ ساختمانی رایج ساخت ایران استفاده شد. دوغاب‌های گچی با نسبت وزنی گچ به آب ۱/۳ و حاوی نیترات سدیم به مقدار ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی گچ تهیه گردید. به منظور یکنواختی بهتر، ابتدا نیترات سدیم

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

در آب حل شد و سپس گچ به آن اضافه گردید. نحوه‌ی اضافه کردن گچ به آب به این صورت بود که در مدت ۹۰ ثانیه گچ به آب اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه به آن ماندگاری داده شد و در مدت ۶۰ ثانیه گچ و آب به آرامی مخلوط گردید تا دوغابی یکنواخت حاصل گردید و قبل از استفاده به مدت زمان ۹۰ ثانیه به دوغاب تهیه شده استراحت داده شد. برای تعیین زمان گیرش از دستگاه حلقه ویکات استفاده شد (شکل ۱). دوغاب گچی درون حلقه ویکات ریخته و با استفاده از کورنومتر زمان‌های گیرش اولیه و نهایی را از لحظه ریختن دوغاب در حلقه ویکات تا لحظه‌ای که اثری از سوزن‌های ویکات دیگر بر روی گچ باقی نمی ماند، اندازه‌گیری شد.

شکل ۱- دستگاه حلقه ویکات برای اندازه‌گیری زمان گیرش.

برای اندازه‌گیری استحکام خمشی، دوغاب‌های گچی درون قالب‌های فلزی مکعب مستطیل با ابعاد ۱۶cm×۴×۴ ریخته شد و همچنین نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵cm برای تعیین استحکام فشاری تهیه گردید. پس از سفت شدن، نمونه‌های گچی از قالب خارج و در خشک کن در دمای ۶۰°C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. برای تعیین استحکام خمشی، از خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد NF EN 196-1 استفاده شد. تست فشار با استفاده از دستگاه کشش تک محوره با ظرفیت ۳۰kN انجام گرفت. تست خمش و فشار برای هر ترکیب بر روی ۳ نمونه انجام و میانگین نتایج آنها گزارش شد.

تکه‌های شکسته گچ حاصل از تست خمش، ابتدا وزن (وزن خشک m_0) و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار داده شد و با استفاده از افزایش وزن ناشی از جذب آب (وزن اشباع m_s)، درصد جذب آب (WA) (فرمول ۳) تعیین شد و هم چنین با استفاده از روش ارشمیدس و اندازه‌گیری وزن غوطه وری (m_w) درصد تخلخل ظاهری (AP) نمونه‌های با فرمول ۴ محاسبه شد. خواص مکانیکی و خواص فیزیکی (درصد جذب آب و تخلخل) بعد از ۷ و ۲۸ روز از تهیه نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید.

$$WA=(m_s-m_0)/m_0\times100\ (\%) \quad (۳$$

$$AP=(m_s-m_0)/(m_s-m_w)\times100\ (\%) \quad (۴$$

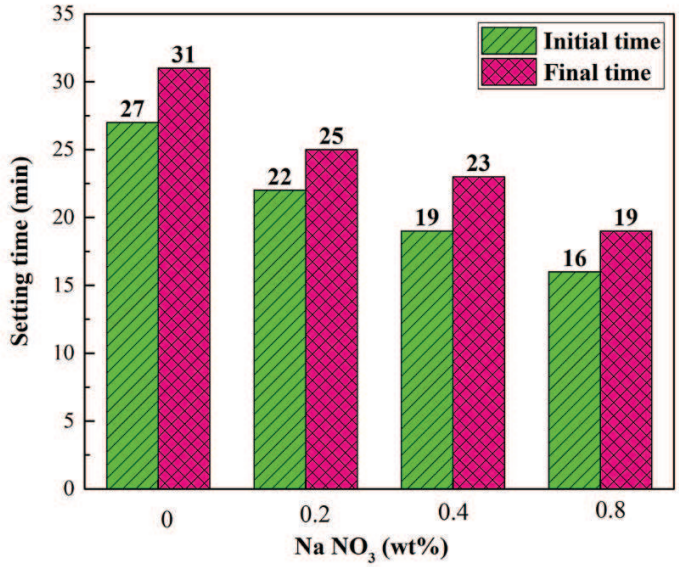
تست‌های مکانیکی و جذب آب بعد از ۷ و ۲۸ روز از تهیه نمونه‌ها انجام شد. با دستگاه پراش اشعه x (XRD) مدل Asenware AW-XDM 300 تشعشع Cu- kα با طول موج ۱/۵۴۲ Å، بررسی فازها نمونه‌های گچی بعد از ۲۸ روز صورت گرفت. مورفولوژی و ریز ساختار نمونه¬های گچی بعد از ۲۸ روز با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM مدل VEGA-TESCAN-LMU) بررسی گردید.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ نتایج مربوط بـه تـأثیر نیتـرات سـدیم بـر زمـان گیرش گچ آورده شده است. طبق نتایج نیترات سدیم نقـش تسریع دهنده و کاهش زمان گیرش گـچ را دارد. بـا اضـافه کردن نیترات سدیم به مقدار ۰/۸ درصد وزنی، زمان گیـرش از ۳۱ دقیقه برای نمونه گچ خـالص بـه ۱۹ دقیقـه کـاهش یافت. گزارش شده که نمک‌های قلیـایی از طریـق افـزایش سـرعت آزاد شـدن گرمـا در طـی هیدراتاسـیون و افـزایش پتانسیل یونی، زمان گیرش گـچ را کـاهش مـی‌دهنـد. هـم چنین افزایش pH آب به دلیل یون‌های سدیم نمک نیترات سدیم می‌تواند باعث تسریع گیـرش گـچ گـردد [۱۳]. پـس نیترات سدیم می‌توانـد منجـر بـه افـزایش سـرعت رسـوب کریستال‌های سوزنی سولفات کلسیم دوهیدراتـه از محلـول اشباع و در نتیجه کاهش زمان گیرش گردد.



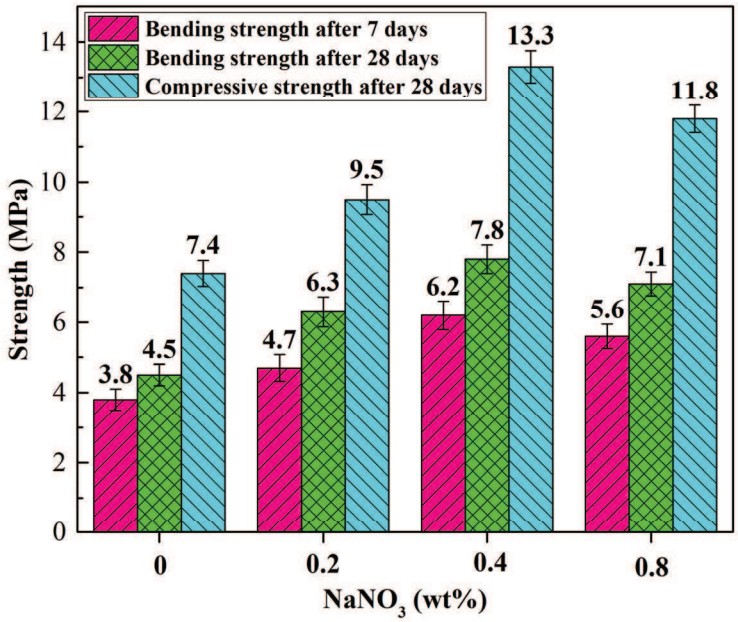
شکل ۲- تأثیر نیترات سدیم بر زمان اولیه و نهایی گیرش گچ.

نتاج مربوط به خواص مکـانیکی و تـأثیر نیتـرات سـدیم بـر استحکام خمشی و استحکام فشاری گچ در شـکل ۳ نـشان داده شده است. استحکام خمـشی، ۷ و ۲۸ روز بعـد از تهیـه نمونه‌ها اندازگیری شد و نتایج استحکام فـشاری بعـد از ۲۸ روز می‌باشد. استحکام خمشی گچ به عنوان یک مـاده تـرد، کمتر از استحکام فشاری آن خواهد بود. با افـزایش زمـان از ۷ روز به ۲۸ روز، استحکام خمشی نمونه‌هـا افـزایش یافتـه است. طبـق نتـایج دیگـر محققـان، بعـد از ۲۸ روز واکـنش هیدراتاسیون گچ به طـور کامـل انجـام شـده اسـت [۱،۷]. پیشرفت واکنش هیدراتاسیون، رشد کریستال‌هـای سـولفات کلسیم دو هیدراته و افزایش اتصالات بین کریستال‌ها و هم چنین تبخیـر آب‌هـای بـاقی مانـده در بدنـه گچـی و رشـد کریـستال‌هـا در حفـرات بـاقی مانـده ناشـی از تبخیـر آب می‌توانند به عنوان دلایل بهبود استحکام بدنه گچـی بعـد از گذشت ۲۸ روز اشاره گردند [۱۴،۷]. افزودن نیتـرات سـدیم منجر به بهبود خواص مکانیکی بدنه گچ می‌گردد. بیـشترین

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

استحکام خمشی و فشاری برای نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم حاصل گردید. با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم، استحکام فشاری و خمشی به ترتیب مقادیر MPa ۱۳/۳±۰/۴۵ و ۷/۸ ±۰/۴۰ حاصل شد.



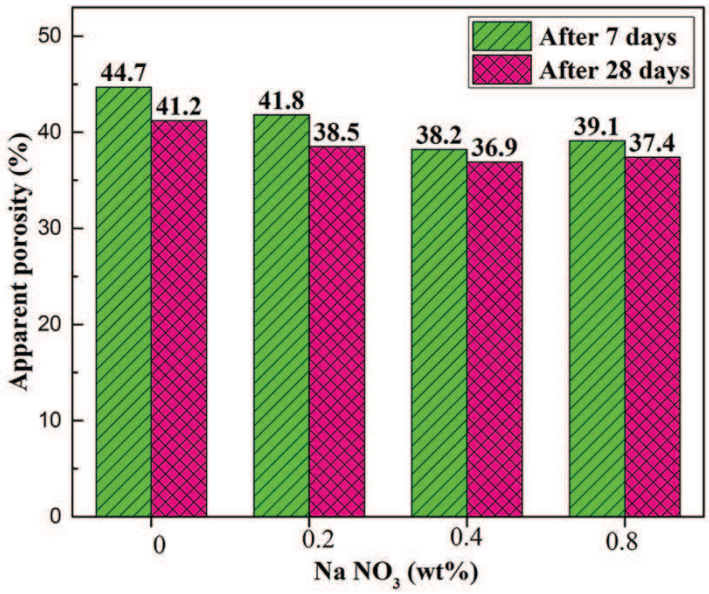
شکل ۳- استحکام خمشی و فشاری بدنه‌های گچی حاوی درصدهای وزنی متفاوت نیترات سدیم.

تأثیر نیترات سدیم بر روی خواص فیزیکی شامل تخلخل ظاهری و جذب آب بدنه‌های گچی در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. طبق نتایج با افزایش زمان از ۷ روز به ۲۸ روز، درصد تخلخل ظاهری کاهش و در نتیجه مقدار جذب آب نیز کمتر می‌شود. افزودنی نیترات سدیم، منجر به کاهش درصد تخلخل و مقدار جذب آب می‌گردد. کاهش درصد تخلخل بعد از ۲۸ روز را می‌توان به کامل شدن واکنش هیدراتاسیون نسبت داد [۱]. کمترین درصد تخلخل و جذب آب برای نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم بعد از ۲۸ روز حاصل گردید. کاهش درصد تخلخل بدنه‌های گچی با استفاده از افزودنی نیترات سدیم می‌تواند منجر به افزایش استحکام بدنه‌های گچی گردد [۸،۳].

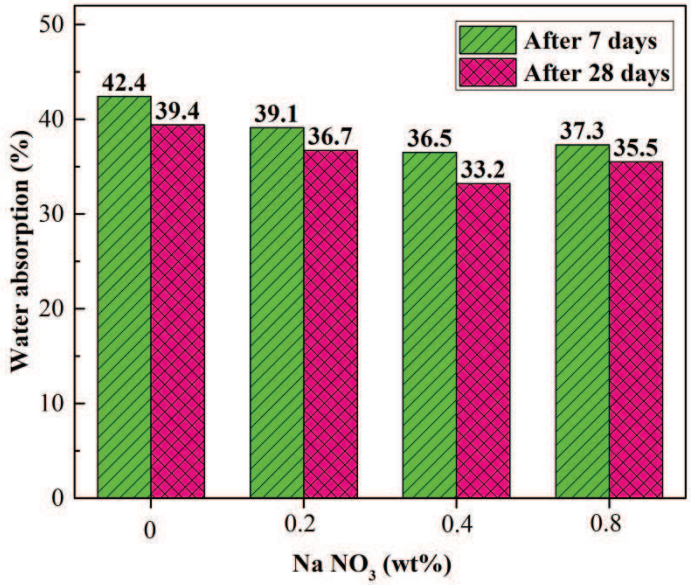
شکل ۶ الگوهای پراش اشعه x مربوط به دو نمونه خالص و نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم بعد از ۲۸ روز را نشان می‌دهد. بر طبق الگو پراش x، فازهای سولفات کلسیم دوهیدراته به عنوان فاز غالب و اصلی همراه با مقدار کمی فاز سولفات کلسیم نیمه هیدراته در بدنه گچی شناسایی شده است. شدت کمتر پیک فاز سولفات کلسیم نیمه هیدراته در زاویه ۲۵/۴۹° در نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم بیان‌گر درجه بالاتر هیدراته شدن در این نمونه می‌باشد. طبق نتایج، افزودنی نیترات سدیم منجر به افزایش هیدراتاسیون گچ می‌گردد [۴، ۶و۱۵].

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]



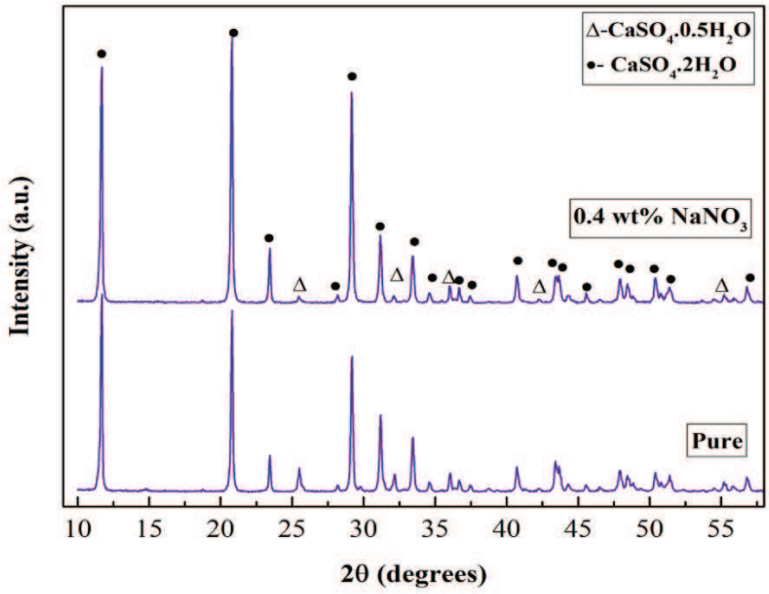
شکل ۴- درصد تخلخل ظاهری بدنه‌های گچی حاوی درصدهای وزنی متفاوت نیترات سدیم.



شکل ۵- درصد جذب آب بدنه‌های گچی حاوی درصدهای وزنی متفاوت نیترات سدیم.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]



شکل ۶- الگوهای پراش اشعه x مربوط به نمونه خالص و نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم.

خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بدنه‌های گچی وابسته به مورفولوژی کریستالی فاز سولفات کلسیم دوهیدراته می‌باشد که به وسیله تعداد اتصال و استحکام اتصال کریستال‌ها به یکدیگر تعیین می‌گردد. مطالعات مورفولوژی نشان می‌دهد که استحکام ایجاد شده در طی هیدراتاسیون سولفات کلسیم نیمه هیدراته به ساختار بین قفلی[1]، اندازه و شکل کریستال‌های گچ و عیوب آن مربوط می‌شود [۱۷،۱۶]. شکل ۷، تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های خالص و حاوی نیترات سدیم را نشان می‌دهد. طبق تصاویر الف و ب در شکل ۷، حفره‌های روی سطح در بزرگ نمایی کم در نمونه خالص با اندازه‌های متفاوت و توزیع غیر یکنواخت وجود دارد در حالی که در نمونه حاوی ۰/۴ درصد نیترات سدیم حفره‌ها به صورت یکنواخت‌تر توزیع شده اند. مطابق با تصاویر ج و د، میزان کریستال‌های سوزنی شکل در ریزساختار نمونه حاوی نیترات سدیم بیشتر می‌باشد که می‌تواند بیان‌گر درجه بالاتر هیدراته شدن گچ در حضور نیترات سدیم نیز باشد. در تصاویر SEM با بزرگ نمایی بالاتر (شکل‌های ه و و) تراکم بیشتر، اتصالات بیشتر کریستال‌ها و ساختار بین قفلی بالاتر در نمونه حاوی نیترات سدیم مشاهده می‌شود. بنابراین تغییرات در مورفولوژی گچ شامل توزیع یکنواخت تر حفرات در سطح، تراکم بیشتر و اتصالات بیشتر بین کریستال‌های سوزنی شکل می‌توانند منجر به بهبود خواص مکانیکی بدنه گچ در حضور افزودنی نیترات سدیم گردد [۴،۳].

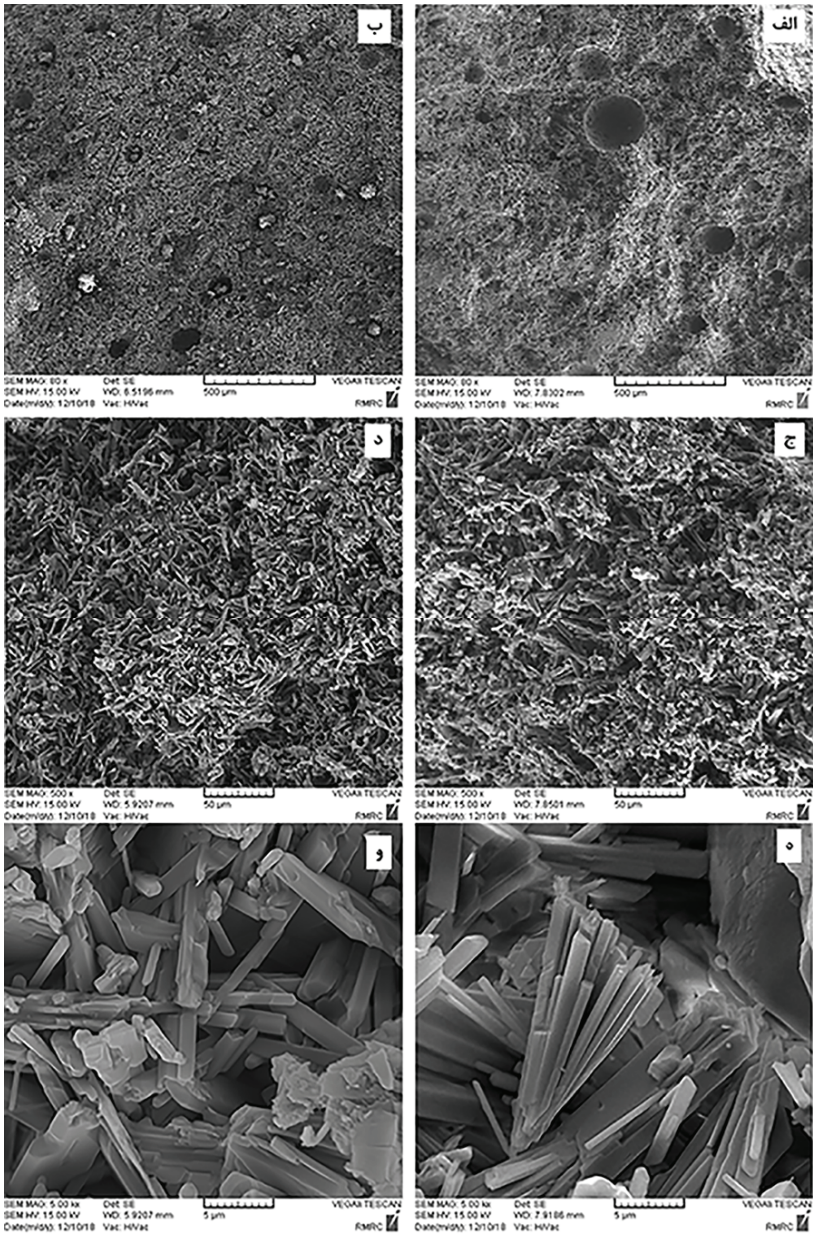
تصویر SEM مربوط به نمونه حاوی ۰/۸ درصد وزنی نیترات سدیم در شکل ۸ آورده شده است. کریستال‌های سوزنی شکل کوتاه‌تر این نمونه نسبت به نمونه‌های خالص و حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم (شکل ۷ ه و و) کاملاً مشخص است. با توجه به زمان گیرش کوتاه مدت

[1] Interlocking structure Interlocking structure

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

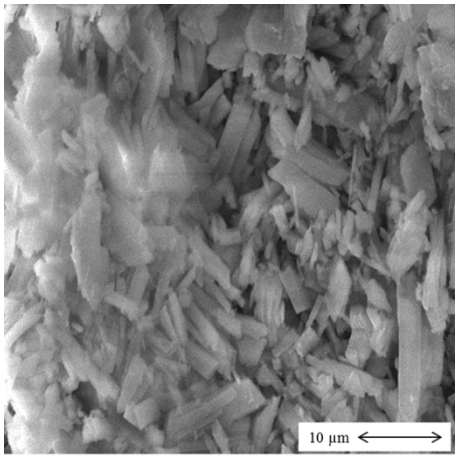
نمونه حاوی ۰/۸ درصد وزنی نیترات سدیم، سرعت رسوب کریستال‌های سوزنی بسیار بالا بوده به گونه ای که زمان کافی برای رشد و افزایش سطح اتصالات با کریستال‌های مجاور خود را نداشته اند. به عبارت دیگر می‌توان گفت سرعت جوانه زنی کریستال‌های سوزنی شکل در مقادیر بالا نیترات سدیم به شدت افزایش می‌یابد و منجر به مورفولوژی شامل تعداد زیادی کریستال‌های سوزنی کوتاه می‌گردد که این ریزساختار باعث کاهش استحکام در نمونه حاوی ۰/۸ درصد وزنی نیترات سدیم می‌شود [۳].



شکل ۷- تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های خالص (الف، ج و ه) و حاوی نیترات سدیم (ب، د و و) در بزرگنمایی‌های متفاوت.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]



شکل ۸- تصویر SEM مربوط به نمونه حاوی ۰/۸ درصد وزنی نیترات سدیم.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر نیترات سدیم بر خواص فیزیکی و مکانیکی گچ ساختمانی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی نیترات سدیم اضافه گردید. برای نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی نیترات سدیم، بیشترین استحکام خمشی و فشاری حاصل گردید. مطابق نتایج به دست آمده، نیترات سدیم نقش تسریع دهنده و کاهش زمان گیرش را دارد. حضور نیترات سدیم می‌تواند از طریق افزایش سرعت رسوب کریستال‌های سوزنی شکل سولفات کلسیم دو هیدراته، منجر به کاهش زمان گیرش، افزایش هیدراتاسیون و ایجاد ریزساختاری با کریستال‌های سوزنی شکل بیشتر با اتصالات بالاتر گردد و در نتیجه باعث کاهش تخلخل بدنه گچی، کاهش درصد جذب آب و افزایش استحکام آن شود.

مراجع

[1] J. Karin, and E. Karin, "Gypsum in construction: origin and properties," Materials and Structures, vol. 28, pp. 92–100, 1995.

[2] N. F. Medina, and M. M. Barbero-barrera, "Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler," Construction and Building Materials, vol. 131, pp.165–177, 2017.

[3] L. M. Baltar, C. A. M. Baltar, and M. Benachour, "Effect of carboxymethylcellulose on gypsum re-hydration process," International Journal of Mineral Processing, vol. 125, pp. 5–9, 2013.

[4] M. Lanzón, and P. A. García-ruiz, "Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters," Construction and Building Materials, vol. 28, pp. 506–511, 2012.

[5] D. Bülichen, and J. Plank, "Water retention capacity and working mechanism of methyl hydroxypropyl cellulose (MHPC) in gypsum plaster—which impact has sulfate?," Cement and Concrete Research, vol. 46, pp. 66–72, 2013.

[6] Q. Wu, Z. Zhu, S. Li, S. Wang, and B. Chen, "Effect of polyacrylic ester emulsion on mechanical properties of macro- defect free desulphurization gypsum plaster," Construction and Building Materials, vol. 153, pp. 656–662, 2017.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]

[7] A. Khalil, A. Tawfik, A. A. Hegazy, and M. F. El-shahat, "Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites," Construction and Building Materials, vol. 68, pp. 580–586, 2014.
[8] G. Camarini, M.C. Cavalini Pinto, A. G. Moura, and N. R. Manzo, "Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components," Construction and Building Materials, vol. 124, pp. 383–390, 2016.
[9] S. Gutiérrez-González, M. M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, and V. Calderón, "Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes," Construction and Building Materials, vol. 38, pp. 407–412, 2013.
[10] Y. Tokarev, E. Ginchitsky, S. Sychugov, V. Krutikov, G. Yakovlev, A. Buryanov, and S. Senkov "Modification of gypsum binders by using carbon nanotubes and mineral additives," Procedia Engineering, vol. 172, pp. 1161–1168, 2017.
[11] J. Qu, J.H. Peng, and B.Z. Li, "Effect of citric acid on the crystal morphology of gypsum and its action mechanism," In Advanced Materials Research, vol. 250, pp. 321–326, 2011.
[12] O. Gencel, J.J. Coz Diaz, M. Sutcu, F. Koksal, F.P. Álvarez Rabanal, and G. Martínez-Barrera, "A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers," Construction and Building Materials, vol. 113, pp. 732–740, 2016.
[13] M. J. Ridge, and H. Surkevicius, "Variations in the kinetics of setting of calcined gypsum. I. Effects of retarders and accelerators," Journal of Applied Chemistry, vol. 11, pp. 420–427, 1961.
[14] H. Wu, Y. Xia, X. Hu, and X. Liu, "Improvement on mechanical strength and water absorption of gypsum modeling material with synthetic polymers," Ceramics International, vol. 40, pp. 14899–14906, 2014.
[15] P. Wei, and W. Peiming, "Effect of compounding of sodium tripolyphosphate and super plasticizers on the hydration of α -calcium sulfate hemihydrate," Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed, vol. 26, pp. 737–744, 2011.
[16] G. N. Pervyshin, G. I. Yakovlev, A. F. Gordina, J. Keriene, I.S. Polyanskikh, H.B. Fischer, N.R. Rachimova, and A.F. Buryanov, "Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers," Procedia Engineering, vol. 172, pp. 867–874, 2017.
[17] R.E. Ochoa, C.A. Gtiérrez, J.C. Rendón, and J.L. Rodríguez, "Effect of preparation variables of plaster molds for slip casting of sanitary ware," Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 56, pp. 263–272, 2017.

[Downloaded from ijcse.ir on 2025-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1397.7.3.7.5]