

بررسی مکانیزم حمله سولفاتی در ملات‌های حاوی میکروسیلیس با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی

امیر طریقت^۱، یاقوت مدرس^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

چکیده:

حمله سولفاتی یک مکانیزم پیچیده از تعامل خمیر سیمان سخت شده با یون‌های سولفات می‌باشد. اترینگایت یکی از محصولات اصلی واکنش است که انبساط و خرابی را به دنبال دارد، اما هنوز ارتباط مستقیمی بین اترینگایت و یا جامدات تشکیل شده طی حمله سولفاتی با میزان انبساط مشاهده شده، وجود ندارد. جایگزینی میکروسیلیس نقش مؤثری در بهبود ریزساختار، کاهش نفوذپذیری و حجم محصولات تشکیل شده دارد. در این کار تحقیقاتی از مدل‌سازی ترمودینامیکی برای پیش‌بینی تغییرات مرتبط با واکنش‌های سولفاتی استفاده شده است. با کمک این مدل‌سازی علاوه بر بررسی نوع و حجم فازهای تشکیل شده طی حمله سولفاتی، عوامل مؤثر بر آن از جمله شیمی سیمان، میکروسیلیس و محلول سولفاتی با غلظت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌سازی نمونه‌های ملات در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴ و ۴۴ گرم بر لیتر انجام شده و جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس در نظر گرفته شده است. محلول سولفات منیزیم در مقایسه با سایر محلول‌های سولفاتی خطرناک‌تر است و اثر خرابی بیش‌تر و تشکیل فازهایی با حجم بالاتر را به دنبال دارد. جایگزینی میکروسیلیس باعث مصرف آب‌آهک، افزایش ژل سیلیکاتی و کاهش فازهای مضر مانند اترینگایت و گچ می‌شود.

کلمات کلیدی: حمله سولفاتی، مدل‌سازی، ترمودینامیک، سیمان پرتلند، میکروسیلیس

Abstract

Sulfate attack is a complex mechanism of interaction between hardened cement paste and sulfate ions. Ettringite is one the main products of the reaction which causes expansion and destruction; However, there is no direct relationship between Ettringite or solids formation during the sulfate attack and the amount of expansion. Silica fume substitution has an effective role in microstructures improvement, reduced impermeability, and volume of forming products. Thermodynamic modeling was used for prediction of changes associated with sulfate reactions in this study. Type and volume of phases formed during the sulfate attack and factors affecting that such as cement chemistry, silica fume and sulfate solution with different concentrations were studied using the modeling. Modeling of mortar samples was performed in magnesium sulfate with concentrations of 4 and 44 g per liter and 10 and 15 percent silica fume substitution. Magnesium sulfate is more dangerous and destructive compared to other sulfates and forms phases with higher volumes. Silica fume substitution leads to portlandite consumption, increased calcium silicate hydrate(C-S-H), and reduced harmful phases like Ettringite and gypsum.

Keywords: sulfate attack, modeling, thermodynamic, Portland cement, silica fume

۱-مقدمه

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در سراسر جهان، موضوع حمله سولفاتی و پیامدهای آن در دوام سازه‌های بتنی می‌باشد. به‌طور طبیعی سولفات‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و یا منیزیم در خاک، آب‌های زیرزمینی و حتی گاهی اوقات در سنگ‌دانه‌ها حضور دارند. سولفات‌ها ممکن است در پساب‌های صنعتی و یا مواد زائد مانند صنایع مرتبط با تولید مواد شیمیایی نیز یافت شوند. تعامل بین مواد سیمانی با محلول‌های حاوی سولفات منجر به تشکیل واکنش‌هایی در مواد متخلخل می‌گردد. این واکنش‌ها افزایش حجم مواد جامد و انبساط را به دنبال دارند. از محصولات اصلی واکنش‌ها می‌توان به اترینگایت و همچنین گچ در غلظت‌های بالای محلول سولفاتی اشاره کرد. مشکل حمله سولفاتی برای مدت طولانی مورد مطالعه بوده است. هنوز دانش ما در مورد فرآیند واکنش‌هایی که اتفاق می‌افتد و رفتار مکانیکی بتن محدود می‌باشد. خرابی بتن در حمله سولفاتی به عوامل متعددی (شیمی سیمان، نسبت آب به سیمان، نوع و غلظت محلول سولفاتی و ...) بستگی دارد که در مطالعات آزمایشگاهی برای پیش‌بینی رفتار بتن، در نظر گرفتن این عوامل ضروری است؛ اما پیاده‌سازی تمامی این عوامل در حمله سولفاتی، مقیاس نمونه‌ها، به دست آوردن نتایج در حداقل زمان ممکن از مشکلات مطالعات آزمایشگاهی است. از این رو اهمیت مدل‌سازی‌های تئوری و نرم‌افزاری و همچنین ارائه روش‌های نوین در کنار مطالعات آزمایشگاهی، برای آنالیز و بررسی بهتر مکانیزم حمله سولفاتی با صرف زمان و هزینه کمتر، جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان، افزایش یافته است.

مطابق ASTM C-1240 جایگزینی میکروسیلیس از ۵ تا ۱۵ درصد، کاهش انبساط رضایت‌بخشی طی حمله سولفاتی از خود نشان داده است. وی و همکارانش^[۱] اثر غلظت سولفات منیزیم بر ریزساختار و مقاومت ملات‌های سبک را که حاوی ۱۵ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد میکروسیلیس بودند، بررسی کردند. با توجه به نتایج بدست آمده مکانیزم خرابی ملات‌های سبک بر اساس غلظت محلول سولفاتی، نوع و درصد جایگزینی مواد افزودنی تغییر کرده است. ملات‌های سبک حاوی میکروسیلیس عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی و حاوی خاکستر بادی از خود نشان دادند [۱]. زلیک و همکارانش^[۲] مقاومت سولفاتی نمونه‌های ملات سیمان پرتلند را با جایگزینی ۲ تا ۱۵ درصد میکروسیلیس که در معرض محلول سولفات منیزیم به مدت ۶ ماه قرار داشتند را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که میکروسیلیس تاثیر مثبتی در مقاومت سولفاتی داشته است و نمونه‌های ملاتی که حاوی بیش از ۸ درصد میکروسیلیس بودند، مقاومت سولفاتی بیش‌تر و انبساط کمتری را نسبت به نمونه‌های شاهد از خود نشان داده‌اند [۲].

مانند هر سیستم شیمیایی دیگر، هیدراتاسیون سیمان و فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی که به هنگام قرارگیری در معرض محیط‌های مهاجم منجر به تغییر در مواد سیمانی می‌گردند، همه از قوانین ترمودینامیک پیروی می‌کنند. در دهه‌های اخیر، اصلی‌ترین جنبه‌های شیمی سیمان بسیار مورد توجه واقع شده است و پیشرفت در این زمینه باعث گردیده که تیم‌های تحقیقاتی بسیاری در سراسر جهان به توسعه مدل‌های ترمودینامیکی به‌منظور بررسی بیش‌تر پیچیدگی سیستم‌های سیمانی هیدراته شده و بهبود توانایی در پیش‌بینی عملکرد آن‌ها در طول زمان بپردازند. لوتنباخ و همکارانش^[۳] با استفاده از ترکیب کدهای انتقال و

¹ - Wee et al

² - Zelic et al

³ - Lothenbach et al

مدل سازی ترمودینامیکی به توصیف مکانیزم حمله سولفاتی پرداخته‌اند [۳]. راستین و همکارانش^۱ از محاسبات ترمودینامیکی برای به دست آوردن درک بهتری از تغییرات در سیستم‌های سیمانی تازه و مقایسه ترکیبات اندازه‌گیری شده از محلول منفذی با شاخص‌های اشباع برای جامدات مختلف (آب‌آهک، ژل سیلیکاتی، اترینگایت و...) استفاده کرده‌اند [۴]. یکی دیگر از مدل‌ها توسط آتکینسون و هرن^۲ ارائه شده، این مدل بر اساس رابطه تجربی بین انبساط حجمی ساختار و مقدار اترینگایت تشکیل شده است [۵].

در این تحقیق برای درک بهتر حمله سولفاتی، از روش ترمودینامیکی برای مدل سازی رفتار نمونه‌های ملات ساخته شده از سیمان پرتلند معمولی و سیمان حاوی میکروسیلیس، استفاده شده است. مدل سازی ترمودینامیکی امکان پیش‌بینی ترکیب فازهای هیدراته شده تحت شرایط مختلف را فراهم می‌کند و همچنین باعث کاهش در زمان و هزینه مصرفی می‌گردد.

۲- مشخصات مصالح مصرفی در مدل سازی

مواد اولیه مورد استفاده شامل سیمان پرتلند و میکروسیلیس می‌باشد. آنالیز شیمیایی میکروسیلیس در جدول ۱ آورده شده است [۶]. سیمان مصرفی، سیمان I 42.5 N است که شامل ۰/۲ درصد CO₂ می‌باشد [۳]. ترکیبات شیمیایی و مینرالی سیمان پرتلند I 42.5 N در جدول ۲ ارائه شده که توسط آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF^۳) به دست آمده است. در این مطالعه از نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۵ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. برای بررسی حمله سولفاتی، محلول سولفات منیزیم با غلظت‌های ۴ و ۴۴ گرم بر لیتر و جایگزینی میکروسیلیس با مقدار ۱۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) نمونه آنالیز شیمیایی میکروسیلیس (% [۶])

K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
-	-	۰/۰۵	۱/۶	-	۰/۷۲	۱/۱۳	۹۳/۱۶

جدول (۲) ترکیب سیمان پرتلند (% [۳])

[g/100 g] آنالیز شیمیایی		[g/100g] ترکیب فازهای اصلی	
CaO	۶۳/۷	Alite	۶۲/۵
SiO ₂	۲۰/۱	Belite	۱۰/۵
Al ₂ O ₃	۴/۴	Aluminate	۷/۱
Fe ₂ O ₃	۲/۷	Ferrite	۸/۲
CaO(free)	۰/۸۵	CaO(free)	۰/۸۵
MgO	۱/۶	CaSO ₄ .2H ₂ O	۴/۷
K ₂ O	۰/۸۶	K ₂ SO ₄	۱/۳
Na ₂ O	۰/۱۵	Na ₂ SO ₄	۰/۱۴
CO ₂	۰/۲	MgO	۱/۶
SO ₃	۲/۹	K ₂ O	۰/۱۴
Ignition loss	۰/۷۲	Na ₂ O	۰/۰۹
[m ² /kg] سطح مخصوص	۳۵۰	CaCO ₃	۰/۴۵

¹ - Rothstein et al

² - Atkinson and Hearne

³ - X-ray fluorescence

۳- مدل سازی ترمودینامیکی حمله سولفاتی

مدل سازی ترمودینامیکی با استفاده از روش به حداقل رساندن انرژی آزاد گیبس و نرم افزار GEM انجام شده است. این مدل سازی می تواند برای سیستم های سیمانی به منظور محاسبه مجموعه فازهای پایدار، مورداستفاده قرار گیرد. تعادل ترمودینامیکی در سیستم زمانی به دست می آید که دیگر تمایلی برای تغییر خود به خودی وجود نداشته باشد، در زمان تعادل، انرژی آزاد گیبس در حالت حداقل خود قرار دارد. اولین پایگاه داده ای جامع مربوط به سیستم های سیمانی در سال ۱۹۶۵ توسط بابوشکین^۱ منتشر شد و برای مدت زمان طولانی به عنوان پایگاه داده ای استاندارد برای سیستم های سیمانی مورداستفاده قرار گرفت. یکی از اشکالات اولیه ی بسیاری از پایگاه های داده ای این بود که فقط مناسب شرایط محیطی بودند. داده های ترمودینامیکی برای گونه های آبی و فازهای گازی در پایگاه داده ای ترمودینامیکی PSI-GEMS آورده شده است. جدیدترین پایگاه داده ای سیمان (cemdata14) در سال ۲۰۱۴ منتشر شده و شامل داده های ترمودینامیکی (انحلال محصولات، انرژی آزاد گیبس، آنتالپی، آنتروپی، ظرفیت گرمایی) برای تعدادی از فازهای سیمان مانند ژل سیلیکاتی (C-S-H)، فازهای مونوسولفات و اترینگایت (AFm و AFt)، هیدروتالسیت و... است [۷].

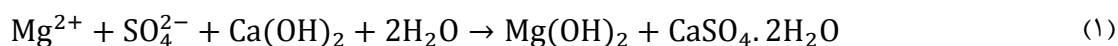
هیچ محدودیتی در نوع هیدرات های محاسبه شده اعمال نمی شود، به استثنای تومازیت^۲ که تشکیل آن در دمای محیط بسیار آهسته است و از نظر سینتیکی ممکن نیست. این روش بر اساس این نظریه است که هسته نمونه اصلاً و یا به سختی تحت اثر محلول سولفاتی قرار می گیرد، در حالی که لایه خارجی تر در تماس با مقدار زیادی محلول سولفاتی می باشد. مزیت این مدل سازی این است که محاسبات بسیار سریع و قابل انعطاف می باشند، اما این اشکال را هم دارد که داده های محاسبه شده به زمان بستگی ندارند.

جذب سدیم و پتاسیم در ژل سیلیکاتی برای سیمان ها در نظر گرفته شده است، اما جذب آلومینیوم در این فاز را شامل نمی شود. حمله سولفاتی در مدل سازی با استفاده از افزایش مقدار محلول سولفاتی در سیمان، شبیه سازی شده است و فرض می شود که تمام یون ها با نرخ مشابه به داخل ملات نفوذ می کنند.

۴- نتایج مدل سازی و تحلیل آن ها

۴-۱ بررسی مدل سازی سیمان پرتلند در معرض محلول سولفات منیزیم

تغییر در مجموعه فازها، به علت تعامل خمیر سیمان سخت شده با محلول سولفاتی به عنوان تابعی از نسبت محلول سولفات (سولفات منیزیم) به مقدار سیمان، محاسبه شده است. مدل سازی ترمودینامیکی در هسته هیدراته شده نمونه ملات، حضور ژل سیلیکاتی (C-S-H)، آب آهک (Portlandite)، مونوسولفات (AFm)، اترینگایت (AFt) و مقدار کمی هیدروتالسیت^۳ (ht) و همی کربنات (hc) را پیش بینی می کند (شکل ۱). با افزایش مقدار سولفات، ابتدا تمام آلومینیوم موجود برای تشکیل اترینگایت وارد واکنش می شود. تکامل فازها در پیش بینی ترمودینامیکی در ابتدا با تبدیل فاز مونوسولفات و آب آهک به اترینگایت ادامه می یابد؛ بعد از تبدیل شدن تمام آلومینات موجود به اترینگایت، فازهایی به صورت متفاوت برای محلول سولفات با غلظت های مختلف تشکیل می شوند. سولفات منیزیم در ابتدا با کلسیم هیدروکسید (آب آهک) واکنش می دهد، طی این واکنش مطابق رابطه (۱) منیزیم هیدروکسید (بروسیت^۴) و گچ تشکیل می شود:

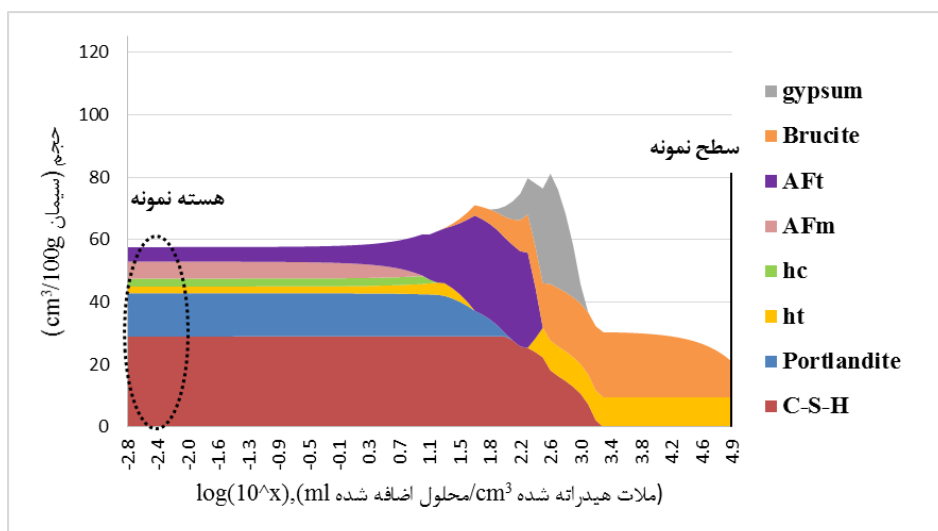


¹ - Babushkin

² - Thaumasite

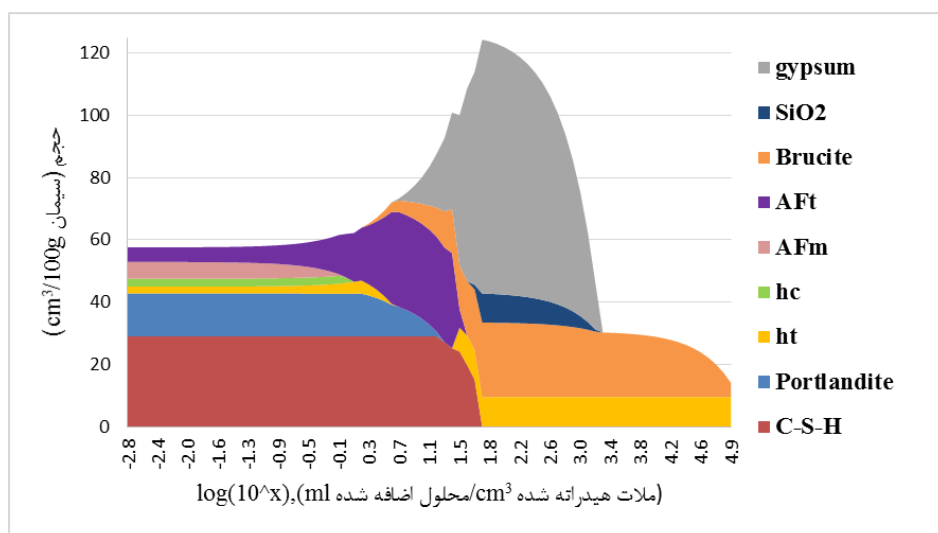
³ - hydrotalcite

⁴ - Brucite



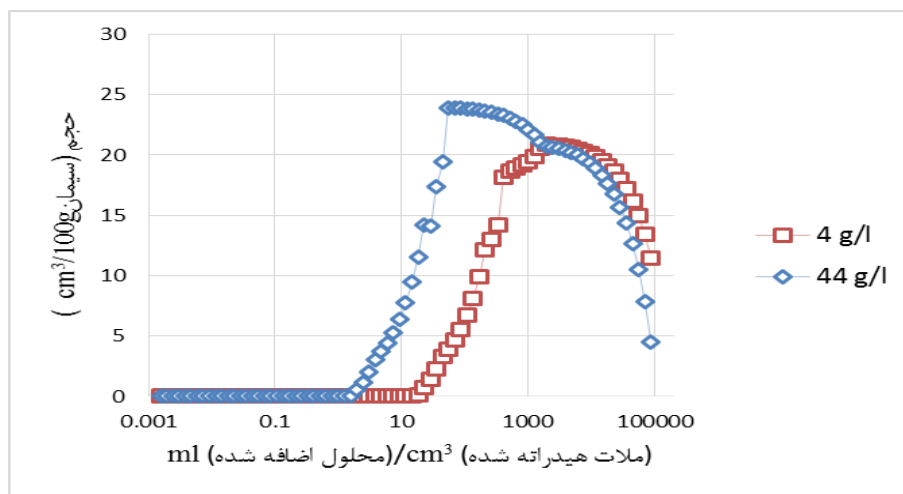
شکل (۱) تغییر مجموعه فازهای نمونه ملات CEM I 42.5 در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴ g/l و نسبت آب به سیمان ۰/۵۰

بروسیت به شکل لایه‌ای در نزدیک سطح نمونه، همراه با یک لایه فرعی گچ تشکیل می‌گردد. لایه‌ای از بروسیت می‌تواند با کاهش نفوذپذیری، اندکی از نمونه حفاظت کند، اما سولفات می‌تواند همچنان از طریق لایه بروسیت انتشار یابد تا اترینگایت را در عمق نمونه جایی که pH بیشتر است تشکیل دهد. این موانع در نهایت شکسته می‌شوند و مکانیزم تخریب شدت می‌گیرد [۶]. در این محلول حتی در غلظت‌های پایین، ۴ g/l گچ حضور دارد. در نزدیکی سطح جایی که غلظت محلول سولفات نسبت به هسته نمونه ملات بسیار بیشتر است، علاوه بر گچ و بروسیت، هیدروتالسیت نیز تشکیل می‌شود. علاوه بر این در غلظت‌های بالا، ۴۴ g/l در نزدیک سطح، سایر آمورف‌ها و کریستال‌های ضعیف مانند SiO_2 نیز حضور دارند (شکل ۲). اترینگایت تشکیل شده نیز در غلظت بالای محلول در نزدیک سطح غیر پایدار می‌گردد و حل خواهد شد.



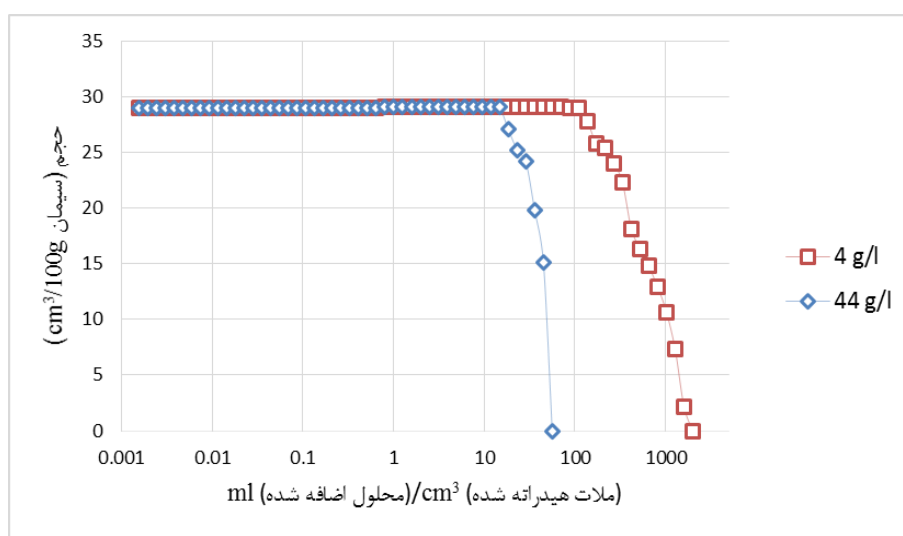
شکل (۲) تغییر مجموعه فازهای نمونه ملات CEM I 42.5 در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴۴ g/l و نسبت آب به سیمان ۰/۵۰

ماهیت تهاجمی این نمک در نتیجه انحلال بسیار پایین بروسیت است. pH محلول اشباع در بروسیت برابر ۱۰/۵ می‌باشد که برای پایداری ژل سیلیکاتی و اترینگایت خیلی کم است؛ در نتیجه، کلسیم‌گیری از ژل سیلیکاتی نیز ممکن است اتفاق بیفتد. همان‌طور که ذکر شد مونوسولفات با آب‌آهک و سولفات منیزیم واکنش می‌دهد و در نتیجه آن اترینگایت و بروسیت تشکیل می‌گردند؛ از این رو با افزایش غلظت محلول سولفاتی میزان فازهای آب‌آهک و مونوسولفات کاهش می‌یابد و افزایشی در مقدار اترینگایت و بروسیت مشاهده می‌شود (شکل ۳).



شکل (۳) مقایسه فاز بروسیت در نمونه ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ در محلول سولفات منیزیم

بروسیت به شکل لایه‌ای در نزدیکی سطح نمونه است که با افزایش غلظت محلول سولفاتی به سمت داخل نمونه پیشروی می‌کند. حجم گچ تشکیل شده نیز با افزایش غلظت محلول سولفاتی افزایش می‌یابد. زمانی که آب‌آهک به اتمام برسد کلسیم گیری از ژل سیلیکاتی آغاز می‌گردد، به همین دلیل کاهش نیز در ژل سیلیکاتی قابل مشاهده است (شکل ۴). سولفات منیزیم می‌تواند منجر به شکل‌گیری منیزیم سیلیکات هیدرات (M-S-H) نیز شود. گلوپ و تیلور^۱ برای این فاز نسبت منیزیم به سیلیکون را برابر ۱/۵ اندازه‌گیری نمودند و یک فاز مشابه با ترکیب $M_3S_2H_2$ را پیشنهاد کردند [۸].



شکل (۴) مقایسه فاز ژل سیلیکاتی در نمونه ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ در محلول سولفات منیزیم

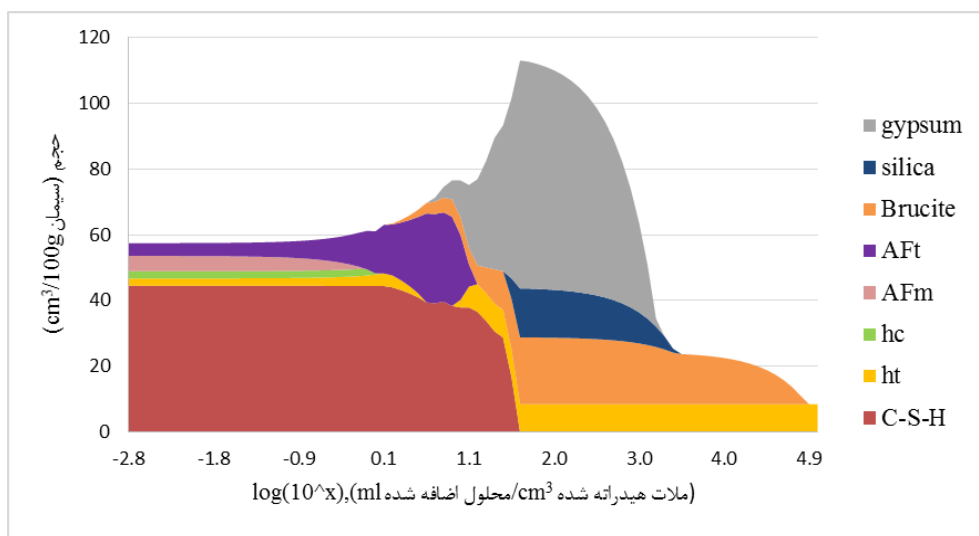
۲-۴ بررسی نمونه ملات سیمانی حاوی میکروسیلیس در معرض محلول سولفات منیزیم

ترکیب پوزولان‌ها با سیمان پرتلند سبب تشکیل یک سیستم پیچیده‌تر می‌شود. هیدراتاسیون سیمان پرتلند و واکنش هیدرولیک مواد پوزولانی به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند و ممکن است بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند. واکنش اکثر مواد پوزولانی کندتر از واکنش فازهای کلینکر است. مواد پوزولانی ریزساختار بتن را به علت تغییر در ترکیب‌های شیمیایی و واکنش‌های هیدراتاسیون، بهبود می‌بخشند. میکروسیلیس فعالیت پوزولانی نسبتاً بالایی دارد. استفاده از سیستم‌های سیمانی حاوی میکروسیلیس، مناسب‌ترین راه برای نشان دادن اثر مواد غنی از سیلیس در مجموعه فازهای سیمان پرتلند، به‌ویژه در محاسبات

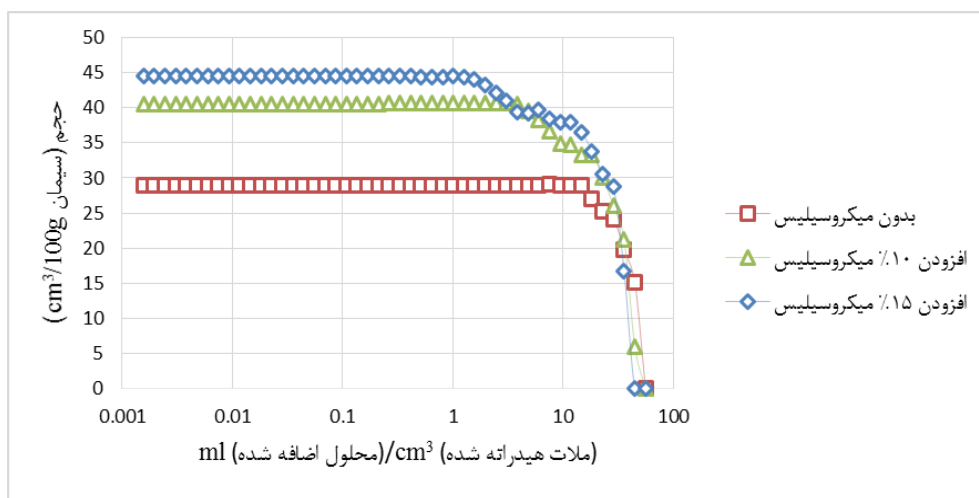
¹ - Gollop and Taylor

ترمودینامیکی می‌باشد. با توجه به محاسبات ترمودینامیکی، با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس، مجموعه فازهای تشکیل شده مشابه قبل است، اما کاهشی در حجم کلی این فازها، مشاهده می‌شود. میکروسیلیس آب‌آهک را مصرف می‌کند و منجر به افزایش قابل توجهی در میزان ژل سیلیکاتی می‌گردد. در محلول سولفات منیزیم علاوه بر آب‌آهک، کاهشی در مقدار فازهای اترینگایت (AFt)، مونوسولفات (AFm) و به مقدار کم در هیدروتالسیت (ht) و همی‌کربنات (hc) قابل مشاهده است. با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس، آب‌آهک به‌طور کامل مصرف می‌شود و میزان ژل سیلیکاتی افزایش می‌یابد (شکل ۵، ۶). پس از مصرف کامل آب-آهک دیگر جایگزینی بیشتر میکروسیلیس به دلیل ایجاد فرصت مناسب برای واکنش سولفات منیزیم با ژل سیلیکاتی، مطلوب نیست؛ زیرا علاوه بر افزایش تخلخل با تجزیه ژل سیلیکاتی افت شدید مقاومت سولفاتی را به دنبال خواهد داشت.

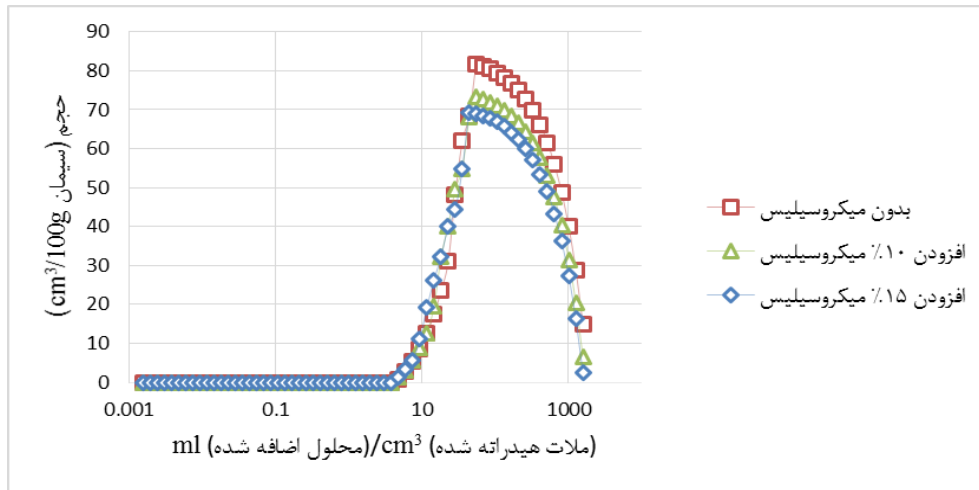
مدل‌سازی ترمودینامیکی کاهش چشم‌گیری در مقدار فازهای گچ، بروسیت و اترینگایت را پیش‌بینی می‌کند (شکل ۸، ۷). همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده شد در نزدیکی سطح علاوه بر هیدروتالسیت برخی کریستال‌های ضعیف مانند SiO_2 نیز حضور دارند که میزان این فازها نیز با جایگزینی میکروسیلیس کاهش می‌یابد. مجموعه هیدرات مشاهده شده به صورت تجربی در نمونه ملات سیمانی آمیخته با میکروسیلیس با نتایج مدل‌سازی مطابقت دارد. جایگزینی بالای میکروسیلیس سبب ناپایداری اترینگایت و مانع از رسوب گچ می‌شود.



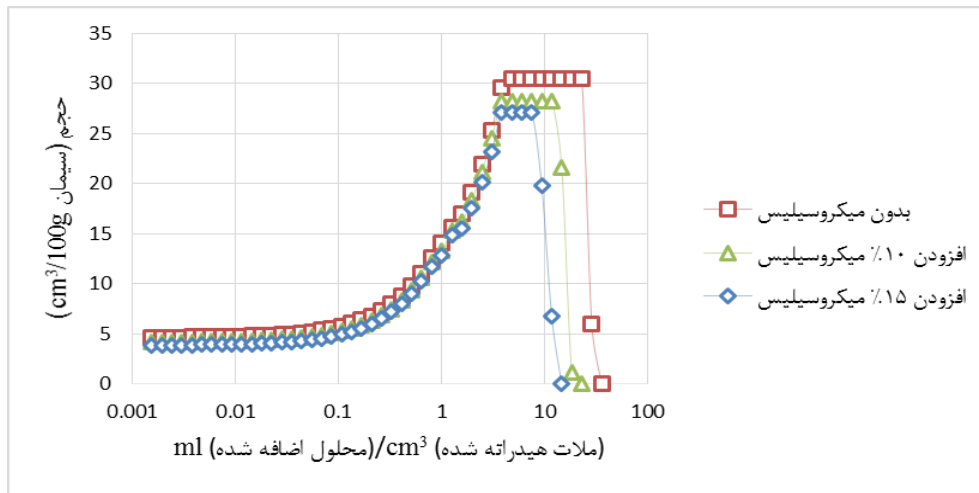
شکل (۵) مجموعه فازهای نمونه ملات حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴۴g/l و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰



شکل (۶) مقایسه فاز ژل سیلیکاتی با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴۴g/l



شکل (۷) مقایسه فاز گچ با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴۴g/l



شکل (۸) مقایسه فاز اترینگایت با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در محلول سولفات منیزیم با غلظت ۴۴g/l

۵- نتیجه گیری

با استفاده از مدل سازی ترمودینامیکی می توان رفتار خمیر سیمان سخت شده در محیط های سولفاتی را پیش بینی نمود. نرم افزار GEM امکان بررسی فازهای تشکیل شده در محلول های سولفاتی، تحت شرایط مختلف را به ما می دهد. در محلول سولفات منیزیم حضور گچ، بروسیت، هیدروتالسیت و مقداری کریستال های ضعیف مانند SiO_2 در نزدیکی سطح مشاهده شده است. اترینگایت تشکیل شده در این محلول به دلیل کاهش pH، ناپایدار است و حل می گردد. اثر تخریبی سولفات منیزیم بسیار بیش تر از سایر محلول های سولفاتی است، زیرا می تواند با تمام فازهای سیمان هیدراته شده وارد واکنش شود. هسته نمونه خیلی تحت تأثیر محلول سولفاتی قرار نمی گیرد. در محلول سولفات منیزیم تشکیل لایه ای از بروسیت در نزدیکی سطح می تواند در کاهش نفوذ یون های سولفات مؤثر باشد.

مطالعات و اندازه گیری های انجام شده نشان می دهد که در سیستم های آمیخته با میکروسیلیس تخلخل کل مساوی و یا حتی بیش تر از مقدار خمیر سیمان پرتلند است، اما ساختار منافذ بهبود می یابد که می تواند منجر به کاهش نفوذ پذیری گردد. آب آهک کریستال های صفحه ای شکل دارد که نقش چندان مهمی در مقاومت ایفا نمی کنند و ژل سیلیکاتی عمده مقاومت را تأمین می نماید؛ افزودن میکروسیلیس سبب مصرف آب آهک و تولید ژل سیلیکاتی می گردد (به طوری که با جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس آب آهک کامل مصرف می گردد)؛ از این رو افزایش مقدار ژل سیلیکاتی می تواند بهبود مقاومت، دوام و عملکرد مواد سیمانی را به دنبال داشته باشد. بهتر است جایگزینی مواد غنی از سیلیس همچون میکروسیلیس به نحوی باشد که به مقدار کم آب آهک در بین فازها باقی بماند زیرا مصرف کامل آب آهک فرصت مناسبی برای واکنش مستقیم یون های سولفات با ژل سیلیکاتی فراهم

می‌کند که تشدید تجزیه ژل سیلیکاتی را به دنبال خواهد داشت؛ به‌طور کلی جایگزینی میکروسیلیس بین ۱۰ تا ۱۵ درصد مطلوب می‌باشد.

با استفاده از نرم‌افزار GEM می‌توان حمله سولفاتی را با صرف زمان کمتر شبیه‌سازی نمود و عوامل تأثیرگذار در آن مانند شیمی سیمان، پوزولان‌ها، غلظت محلول سولفاتی، دما و... را به‌آسانی بررسی کرد. نتایج حاصل با مطالعات و نتایج آزمایشگاهی که ریزساختار را بررسی نموده‌اند تطابق خوبی دارد. یعنی پیش‌بینی‌های بی‌ثباتی فاز AFm و آب‌آهک در نزدیکی سطح نمونه ذخیره‌شده در محلول‌های سولفاتی، تشکیل اترینگایت و گچ در نزدیکی سطح و آبشویی Ca از C-S-H تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند [۹،۸].

۶- مراجع

- [1] Tanyildizi, H. 2016. The investigation of microstructure and strength properties of lightweight mortar containing mineral admixtures exposed to sulfate attack, *Measurement*, 77:143–154.
- [2] TRAJNOST, V. D. S. F. N. (2007). The effect of silica fume additions on the durability of Portland cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. *Materiali in tehnologije*, 41(2), 91-94.
- [3] Lothenbach, B., Bary. B, Le Bescop. P, Schmidt. T, Leterrier. N. 2010, Sulfate ingress in Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 1211–1225.
- [4] Lothenbach. B, Winnefeld. F, 2005, Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 36 209–226.
- [5] Atkinson, A; Haxby, A. and Hearne, J.A. 1988. The Chemistry and Expansion of Limestone-Portland Cement Mortars Exposed to Sulphate-Containing Solutions. *NIREX Report*. NSS/R127. United Kingdom: NIREX.
- [۶]. شکرچی‌زاده، محمد؛ ولی‌پور، مهدی؛ پرگر، فرهاد، ۱۳۸۹، بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت و لیاف پلی پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن در شرایط محیطی جزیره قشم، نشریه مهندسی عمران، شماره ۱، صفحه ۳.
- [7] Hummel. W, Berner. U, Curti. E, Pearson. F.J, Thoenen. T. 2002, “Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01, *Universal Publishers/uPUBLISH.com*, USA, also published as Nagra Technical Report NTB 02-16”, Wettingen, Switzerland.
- [8] Whittaker. M, and L. Black. 2015. Current knowledge of external sulfate attack. *Advances in Cement Research*.ISSN 0951-7197.
- [9] Kunther. W, Lothenbach. B, Scrivener. K, 2013, on the relevance of volume increase for the length changes of mortar bars in sulfate solutions, *EPFL, Laboratory of Construction Materials*, CH-1015 Lausanne, Switzerland.