دوام بتن‌ها و ملات‌هاي داراي پودر سنگ‌آهک در محيط‌هاي سولفاتي با غلظت بالا

علی‌اکبر رمضانیان‌پور[1] *؛ ابراهیم قیاسوند[2]؛ محمداحسان کامل[3]

چکیده

در این مقاله، نتایج بررسی آزمایشگاهی بر روی اثر پودر سنگ‌آهک بر دوام بتن‌های قرار گرفته در محیط‌های سولفاتی با غلظت بالا ارائه می‌شود. به این منظور، نمونه‌ها با ۵ سطح جایگزینی سیمان توسط پودر سنگ‌آهک، ساخته شد. در سنین مختلف، آزمایش‌های تغییر مقاومت فشاری و وزن برروی نمونه‌های بتنی که در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد قرار داشتند انجام شد. هم‌چنین نمونه‌های منشوری ملات برای بررسی انبساط نمونه‌ها، در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۵ و ۱۰ درصد نگهداری شدند. بطور کلی دیده می‌شود با افزایش میزان پودر سنگ‌آهک، از مقدار مقاومت فشاری کاسته شده و شدت تخریب نمونه‌ها در هر دو محلول سولفات با افزایش غلظت محلول، تشدید می‌شود.

کلمات کلیدي

حمله سولفاتی، پودر سنگ آهک، مقاومت فشاری، انبساط نمونه های ملات

Durability of Concretes and Mortars Containing Limestone Powder Exposed to High Sulfate Environments

Ali A.Ramezanianpour; E. Ghiasvand; Mohammad E.Kamel

ABSTRACT

Sulfate attack is one of the most important problems concerning the durability of concrete structures. In this paper, the sulfate resistance of concrete and mortar specimens made from ordinary Portland cement containing limestone powder was studied. Strength reductions and mass changes of concrete specimens immersed in 10% Na_2SO_4 and $MgSO_4$ solutions and Expansion of mortar prisms immersed in 5% and 10% Na_2SO_4 and MgSO4 solutions were monitored.

It was observed that compressive strength decreases with the limestone replacement percent and also, deterioration is severer, the higher the concentration content sulfate.

KEYWORDS

Sulfate attack, Limestone Powder, Compressive Strength, Cement mortar expansion

تاریخ دریافت مقاله:۱۳۸۸/۷/۲۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۱۷

۱*نویسنده مسئول و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ aaramce@aut.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر; ebrahim_gh_63@yahoo.com

۳ دانشجوی کارشناسی؛ دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ehsan.kamel@gmail.com

۱- مقدمه

در صنعت ساخت‌وساز دنیا، سال‌های متمادی است که بتن نقشی اثربخش ایفا می‌نماید. از این‌رو مهندسان عمران همواره در تلاش برای بهبود خواص و کیفیت آن بوده‌اند. در چند دهه اخیر به علت بالا بودن قیمت انرژی، استفاده از سیمان‌های

آمیخته روبه افزایش است. این امر باعث ذخیره نمودن مقدار قابل توجهی انرژی در فرایند تولید سیمان می‌شود. هم‌چنین گسترش استفاده از انواع این سیمان‌ها، منجر به مشارکت در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (به خصوص CO_2) در فرآیند تولید کلینکر می‌شود. سیمان پرتلند آهکی یکی از انواع این سیمان‌ها است که تولید آن از چند دهه پیش شروع شده و امروزه یکی از پرمصرف‌ترین انواع سیمان-ها است. میزان استفاده از پودر سنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین کلینکر سیمان، در استانداردهای مختلف یکسان نیست. به‌عنوان مثال در استاندارد اروپا مشخصات ۴ نوع از این سیمان‌ها تعریف شده که در آن‌ها استفاده از ۵ تا ۳۵ درصد پودر سنگ-آهک مجاز است [۱].

هنگامی که پودر سنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین کلینکر استفاده می‌شود به‌دلیل وقوع پدیده‌هایی مانند رقیق‌سازی کلینکر، اثر فیلر و اثر هسته‌زایی غیرهمگن، تغییراتی در منافذ مویینه ایجاد می‌شود. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که در سیمان‌های پرتلند آهکی واکنشی بین C_3S و کربنات کلسیم انجام می‌شود که سبب افزایش سرعت هیدراتاسیون C_3S می‌شود و نسبت کلسیم به سیلیس را در ژل C-S-H اصلاح می‌نماید [۲] [۳].

وقوع حمله سولفاتی در ملات یا بتن به علت تشکیل محصولاتی مانند اترینگایت و گچ از قدیم به‌عنوان پدیده‌ای مخرب شناخته شده است. در چند دهه گذشته به علت رشد مصرف سیمان پرتلند آهکی نوع دیگری از حمله سولفاتی شناسایی شده که محصول آن ماده‌ای به‌نام تومازایت است. تومازایت نیز مانند گچ و اترینگایت، سبب انبساط در خمیر سیمان شده و با گذشت زمان خاصیت چسبندگی خمیر سیمان را از بین می‌برد. از مهم‌ترین منابع مورد نیاز برای تشکیل این محصول، یون کربنات است. از این‌رو مهم‌ترین مشکل در سیمان‌های پرتلند آهکی به علت بالا بودن یون کربنات، دوام آن‌ها در برابر حمله سولفاتی است. در ملات یا بتن عواملی مانند افزایش غلظت محلول سولفات، افزایش یون کربنات، کاهش دما و وجود رطوبت منجر به تشدید خرابی ناشی از تشکیل تومازایت می‌شود [۴].

در این مقاله اثر مقادیر مختلف پودر سنگ‌آهک در رفتار ملات و بتن‌هایی که در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم در دمای حدود ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار داشتند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

سنگدانه

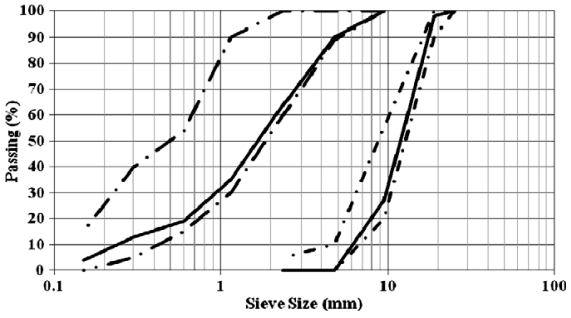
سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق، از یکی از معادن استان تهران تهیه شده است. ماسه مصرفی، ماسه طبیعی شسته با میزان جذب آب ۲/۷۵ درصد وزنی و شن مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر سنگدانه ۲۵ میلی‌متر با میزان جذب آب ۱/۹ درصد وزنی است. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی، در ناحیه مورد قبول استاندارد ایران برای دانه‌بندی با حداکثر قطر سنگدانه ۲۰ میلیمتر قرار دارد که در نمودار (۱) می‌توان دید.

سیمان و پودر سنگ‌آهک

سیمان استفاده شده، سیمان تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان تهران است. پودر سنگ‌آهک نیز از معدن کارخانه سیمان آبیک تهیه شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این مصالح در جدول (۱) قابل دیدن است. پودر سنگ‌آهک مصرفی در این تحقیق، ملاحظات گفته شده در استاندارد سیمان پرتلند آهکی ایران را برآورده می‌نماید.

۲-۲- طرح اختلاط

در این برنامه آزمایشگاهی به منظور مطالعه دوام بتنها در برابر حمله سولفاتی، ۵ طرح اختلاط با مقادیر مختلف پودر سنگ آهک در نظر گرفته شد. کلیه طرحها دارای نسبت آب به مواد سیمانی (مجموع سیمان و پودر سنگ آهک) ۰/۴۵ و میزان مواد سیمانی ۳۵۰ Kg/cm^2 می‌باشند. مشخصات مخلوط ها در جدول (۲) آورده شده است.



نمودار (۱): منحنی دانه بندی سنگدانه

جدول (۱): مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و پودر سنگ‌آهک مصرفی

مشخصات	سیمان	پودر سنگ آهک
CaO(%)	۶۱/۵	۵۴/۷۷
SiO_2(%)	۲۱/۵	۱/۴۷
MgO(%)	۴/۸	۰/۳

Al_2O_3(%)	۳/۶۸	۰/۲۲
Fe_2O_3(%)	۲/۷۶	۰/۲۹
SO_3(%)	۲/۵	۰/۰۶
K_2O(%)	۰/۹۵	۰/۰۸
Na_2O(%)	۰/۱۲	۰/۰۵
TiO_2(%)	۰/۰۴	۰/۰۵
P_2O_5(%)	۰/۲۳	۰/۰۱
LOI(%)	۱/۳۵	۴۲/۲۳
C_3S(%)	۵۱	-
C_2S(%)	۲۳	-
C_3A(%)	۵	-
C_4AF(%)	۸	-
$CaCo_3$ content(%)	-	۹۷/۸
TOC(%)	-	۰/۰۵
MBA(%)	-	۰/۰۷
Blaine (m^2/kg)	۳۲۰	۳۳۰
Specific gravity (t/m^3)	۳/۲۱	۲/۶۹

جدول (۲): طرح اختلاط مخلوط های بتنی

Mix	w/b	LS (%)	Concrete composition (kg/m^3)				
			LS	C	W	Ca	Fa
LS ۰	۰/۴۵	۰	۰	۳۵۰	۱۵۷/۵	۹۱۲/۳	۹۵۰
LS ۵	۰/۴۵	۵	۱۷/۵	۳۳۲/۵	۱۵۷/۵	۹۱۰/۲	۹۵۰
LS ۱۰	۰/۴۵	۱۰	۳۵	۳۱۵	۱۵۷/۵	۹۰۸/۱	۹۵۰
LS ۱۵	۰/۴۵	۱۵	۵۲/۵	۲۹۷/۵	۱۵۷/۵	۹۰۶	۹۵۰
LS ۲۰	۰/۴۵	۲۰	۷۰	۲۸۰	۱۵۷/۵	۹۰۳/۹	۹۵۰

LS: پودر سنگ‌آهک C: سیمان W: آب Ca: سنگدانه درشت Fa: سنگدانه ریز

۲-۳- روش آزمایش و عمل‌آوری

آزمایش مقاومت فشاری (ISIRI ۳۲۰۶)

طبق استاندارد ایران نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده و تا سن آزمایش در محلول آب و آهک اشباع نگهداری شده‌اند. آزمایش در سنین ۲۸، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۵ روز بر روی نمونه‌ها انجام شد.

آزمایش تغییر مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های بتنی در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد:

برای انجام این آزمایش نمونه‌های بتنی مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در محلول آب و آهک اشباع عمل‌آوری شدند سپس به ظرف‌های دارای محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰٪ منتقل شدند. در این تحقیق pH محلول‌های سولفات که در آن نمونه‌های بتنی قرار داشتند در محدوده خاصی نگهداری نشده است؛ بلکه pH این محلول‌ها با گذر زمان ثابت شدند. پس از گذشت حدود ۳ ماه دیده شد که pH محلول‌های سولفات منیزیم و سدیم به‌ترتیب در حدود عدد ۱۰ و ۱۲ ثابت ماند. برای بررسی تغییر مقاومت فشاری و وزن، در سنین آزمایش مقاومت فشاری و میزان تغییر وزن نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات سدیم اندازه‌گیری شد.

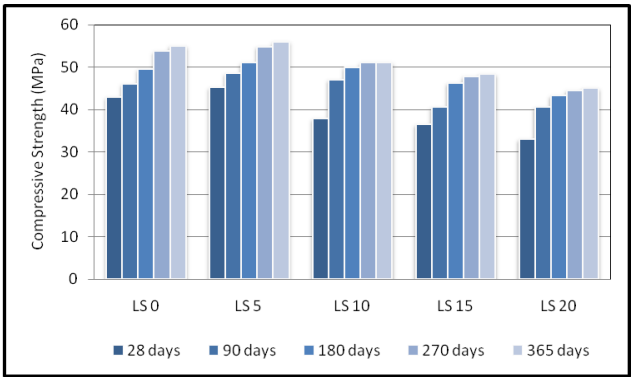
آزمایش تغییر طول ملات منشوری در محلول سولفات سدیم و منیزیم (ASTM C۱۰۱۲):

طبق این استاندارد، نمونه‌های منشوری ملات با ابعاد ۲۸×۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر ساخته شد. نمونه‌ها را پس از رسیدن به مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال از قالب خارج نموده و بلافاصله در محلول سولفات سدیم و منیزیم ۵٪ و ۱۰٪ قرار گرفت. تغییر طول نمونه ها در مدت ۸ ماه ثبت شده است.

۳- نتایج آزمایش و تفسیر

۳-۱- مقاومت فشاري

در نمودار (۲) نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود به‌طور کلی با گذشت زمان، به علت تکمیل شدن فرایند هیدراتاسیون، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد همچنین با افزایش میزان پودر سنگ‌آهک از میزان مقاومت فشاری کاسته شده که البته این کاهش مقاومت، در نمونه‌هایی که مقادیر سنگ‌آهک در آن‌ها بیش از ۱۰ درصد وزن سیمان باشد مشهودتر است.



نمودار (۲): مقاومت فشاری نمونه های بتنی در سنین مختلف

پس از گذشت یکسال، بیشینه و کمینه مقدار مقاومت فشاری برابر ۵۶ MPa و ۴۵ MPa می‌باشد که این مقادیر به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های LS ۵ و LS ۲۰ هستند. در سیمان‌های پرتلند آهکی، در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، با افزایش پودر سنگ‌آهک از میزان کلینکر سیمان کاسته می‌شود؛ از این‌رو نسبت آب به سیمان افزایش یافته که ویژگی‌های رفتاری این سیمان‌ها را ضعیف می‌نماید. به این پدیده عنوان

رقیق‌سازی کلینکر گفته می‌شود. در رفتار سیمان‌های گفته‌شده، پدیده‌های دیگری مانند فیلر و هسته‌زایی غیرهمگن نیز اثرگذار هستند که این اثرات سبب بهبود رفتار می‌شود. در این سیمان‌ها مقدار جایگزینی بهینه‌ای برای پودر سنگ‌آهک وجود دارد که اثر منفی رقیق‌سازی کلینکر را با اثرات مثبت فیلر و هسته‌زایی غیرهمگن خنثی می‌نماید. با جایگزینی کمتر از این مقدار بهینه، اثرات مثبت غالب می‌شوند و بالعکس [۴]. مقدار بهینه جایگزینی پودر سنگ‌آهک در این سیمان‌ها معمولا کمتر از ۱۰ درصد است. در این مقاله کاهش مقاومت فشاری با افزایش میزان پودر سنگ‌آهک را می‌توان به پدیده رقیق‌سازی کلینکر نسبت داد.

۳-۲- تغییر وزن و مقاومت فشاري نمونه هاي بتني در محلول‌هاي سولفات سديم و منيزيم ۱۰ درصد

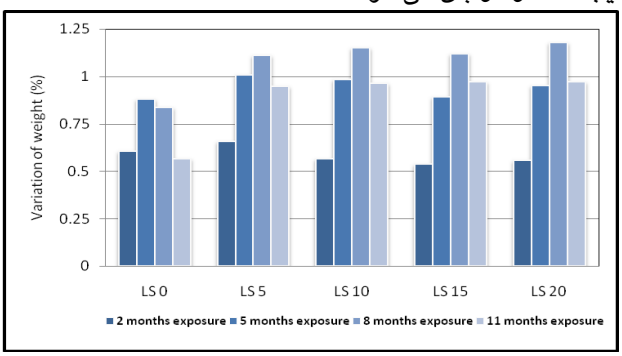
ترکیبات مختلف به‌وسیله سولفات‌ها مورد حمله قرار می‌گیرند. حمله سولفات‌ها به هیدروکسیدکلسیم و هیدرو آلومینات کلسیم سبب تشکیل ترکیباتی مانند سولفات کلسیم (گچ) و اترینگایت می‌شود که سبب افزایش حجم می‌شود. این افزایش حجم، سبب ایجاد ترک و ریزش بتن و کاهش مقاومت آن در دراز مدت می‌شود. همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شد در ملات یا بتن‌هایی که دارای پودر سنگ‌آهک هستند، پس از حمله سولفاتی علاوه بر اترینگایت و گچ امکان تشکیل محصولی دیگر با عنوان تومازایت وجود دارد. تومازایت می‌تواند در محیطی مرطوب و با وجود یون‌های سیلیکات کلسیم و کربنات تشکیل گردد [۴].

همچنین این موضوع باید مورد توجه قرار گیرد که سیمان‌های آمیخته آهکی مانند سیمان‌های آمیخته پوزولانی (در این سیمان‌ها از پوزولان‌هایی مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و غیره استفاده شده است) به علت اثر مخرب رقیق‌سازی کلینکر که به آن اشاره شد نمی‌توانند خصوصیات نفوذپذیری را بهبود بخشند. از آنجاییکه یکی از مهم‌ترین عوامل برای دوام بتن‌ها یا ملات‌ها در برابر حمله سولفاتی، نفوذپذیری است بروز خسارت در اثر حمله سولفاتی در سیمان‌های گفته‌شده، درمدت زمان کوتاه‌تری رخ می‌دهد.

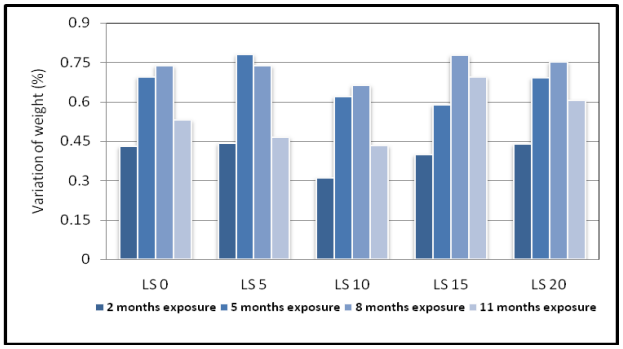
بر اساس مطالعات انجام شده اثر محلول‌های سولفات بر روی مقاومت فشاری و انبساط نمونه‌ها همیشه موازی یا یکسان نیست. حتی در این دو مورد می‌توان نتایج متضادی را یافت. چگونگی حمله سولفاتی به‌دلیل نسبت‌های حجم به سطح و طول به عرض متفاوت نمونه‌ها، نرخ ورود و عمق موثر محلول سولفات، تحت اثر قرار می‌گیرد و همچنین نحوه خرابی مربوط به مقاومت فشاری از حالت انبساط متفاوت است [۵].

در نمودارهای (۳) و (۴) به‌ترتیب، تغییرات وزن نمونه‌های بتنی در مدت زمان‌های غوطه‌وری مختلف در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد دیده می‌شود. با دقت در نتایج می‌یابیم که در همه نمونه‌ها بعد از گذشت ۵ ماه از غوطه‌وری در محلول‌های سولفات، افزایش وزن دیده می‌شود. افزایش وزن موجود در نمونه‌های بتنی را می‌توان ناشی از تشکیل اترینگایت، گچ و یا تومازایت در اثر واکنش‌های سولفات‌های سدیم و منیزیم با هیدروکسیدکلسیم و نیز C_3A دانست. این محصولات در فضاهای خالی بتن جای می‌گیرند و به وزن نمونه بتن می‌افزایند. در دراز مدت به‌دلیل اینکه این محصولات حجم بیش‌تری نسبت به مواد اولیه دارند، سبب ترک خوردگی در ماتریس سیمان و تخریب بتن و کاهش وزن می‌شوند. همان‌طور که دیده می‌شود در همه نمونه‌ها پس از گذشت ۱۱ ماه از شروع غوطه‌وری در محلول‌های سولفات، کاهش وزن دیده می‌شود. با دقت در نمودارهای (۳) و (۴) می‌توان دریافت که تغییرات وزن در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد شدیدتر است.

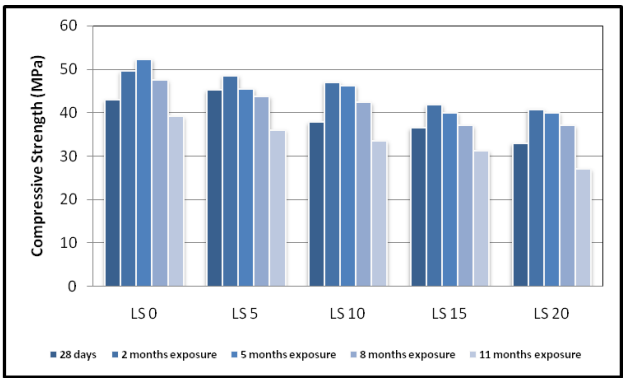
در نمودارهای (۵) و (۶) به‌ترتیب، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در مدت زمان‌های غوطه‌وری مختلف در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد دیده می‌شود. با دقت در این نمودارها دیده می‌شود که پس از گذشت ۵ ماه از زمان غوطه‌وری، روند افزایش مقاومت در نمونه‌های واقع در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد مشاهده می‌شود اما پس از آن، کاهش مقاومت در نمونه‌ها رخ می‌دهد. اما در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد، روند کاهش مقاومت در نمونه‌ها در مدت زمان کوتاه‌تری دیده می‌شود. افزایش مقاومت در نمونه‌ها را می‌توان به پر شدن خلل و فرج‌های موجود در آن‌ها به‌وسیله محصولاتی انبساط‌زایی مانند اترینگایت، گچ و یا تومازایت نسبت داد. کاهش مقاومت فشاری را نیز می‌توان به همین پدیده نسبت داد زیرا اترینگایت، گچ و تومازایت حجم بیش‌تری نسبت به محصولات اولیه ایجاد می‌نمایند و این افزایش حجم، سبب ایجاد فشار در بتن می‌شود.



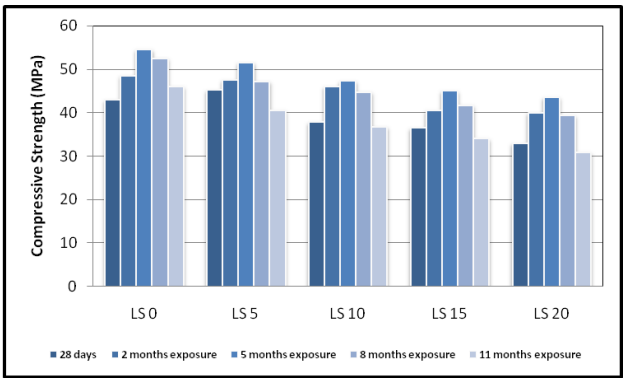
نمودار (۳): تغییرات وزن نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد



نمودار (۴): تغییرات وزن نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد



نمودار (۵): تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد



نمودار (۶): تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد

این روند باعث ترک خوردن و تکه‌تکه شدن بتن در سنین بالا و کاهش مقاومت آن می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان بیان نمود که در نمونه LS ۲۰ بعد از گذشت ۱۱ ماه از شروع غوطه‌وری درمحلول‌های سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب، کاهش مقاومت نسبت به مقاومت ۲۸ روزه برابر با ۱۸/۱٪ و ۶/۶٪ می‌باشد.

پیپیلی‌کاکی و همکاران در سال ۲۰۰۸ نشان دادند که در نمونه‌های ملات ساخته شده با سیمان پرتلند آهکی با ۳۵ درصد پودر سنگ‌آهک، پس از قرار گیری در محلول سولفات سدیم ۵ درصد به مدت یک سال و نیم، حدود ۳۳ درصد افت در مقاومت فشاری دیده می‌شود و آن‌ها این افت مقاومت و عملکرد ضعیف در محلول سولفات را به وجود تخلل و منافذ داخلی بیش‌تر این سیمان‌ها نسبت دادند [۶].

تاسون و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ نشان دادند که در هر دو مقطع زمانی ۶ و ۱۲ ماه پس از غوطه‌وری در محلول‌های سولفات با غلظت ۲۰ درصد و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، سولفات سدیم از سولفات منیزیم مخرب‌تر عمل می‌نماید به‌طوری که در این محلول شدت کاهش مقاومت فشاری بیش‌تر بوده است. آنها در این تحقیق میزان pH را در یک محدوده ثابت نگه نداشته بلکه pH محلول با گذشت زمان به یک مقدار ثابت رسید. pH در محلول سولفات سدیم پس از گذشت ۶ ماه از ۸/۵ به حدود ۱۲/۵ رسید و در محلول سولفات منیزیم از ۶/۵ به حدود ۱۰ رسید و بیان نمودند که میزان pH در رفتار سیمان‌های آمیخته آهکی در محلول‌های سولفات موثر است. این محققین با تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان دادند در ملات‌های با ۴۰ درصد پودر سنگ آهک در محلول سولفات سدیم، عمده محصول اترینگایت است و در محلول سولفات منیزیم بیش‌تر بروسیت، گچ و کمی تومازایت می‌باشد.[۵]

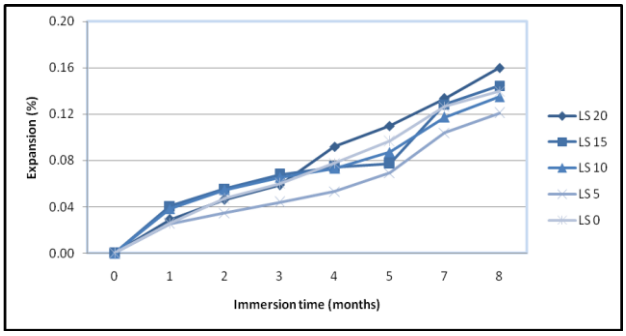
در این مقاله نیز پس از گذشت حدود ۳ ماه دیده شد که pH محلول سولفات سدیم در حدود عدد ۱۲ و pH محلول سولفات منیزیم در حدود عدد ۱۰ ثابت ماند. از این‌رو با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی، به نظر می‌رسد محصول عمده در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند آهکی در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم به‌ترتیب اترینگایت و گچ باشد و در هر دوی این محلول‌ها، تومازایت نیز دیده شود. اما برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های واقع در محلول‌های سولفات در برنامه تحقیقاتی آینده قرار دارد.

۳-۳- تغییر طول نمونه‌های منشوری ملات در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۵ و ۱۰ درصد

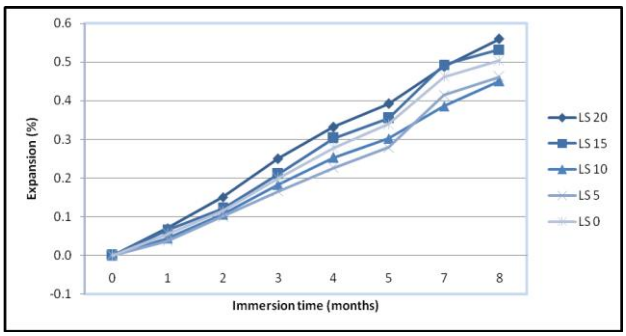
در نمودارهای (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۵ و ۱۰ درصد دیده می‌شود. همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل موثر در حمله سولفاتی و نیز شدت آن، میزان غلظت یون سولفات است. با توجه به نمودارها و جداول دیده می‌شود که در هر یک

از محلول‌های سولفات با افزایش میزان غلظت سولفات از ۵ درصد (۵ گرم سولفات در ۱ لیتر آب مقطر) به ۱۰ درصد (۱۰۰ گرم سولفات در ۱ لیتر آب مقطر) بر میزان تغییر طول‌ها افزوده می‌شود که این موضوع به دلیل افزایش میزان غلظت سولفات است. در بیش‌تر موارد تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که در نمونه‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند آهکی، در غلظت‌های پایین‌تر از ۵ درصد، محلول سولفات منیزیم مخرب‌تر از محلول سولفات سدیم عمل می‌نماید که این موضوع به بهتر مهیا شدن شرایط برای تشکیل تومازایت در کنار یون‌های منیزیم مرتبط است [۴].

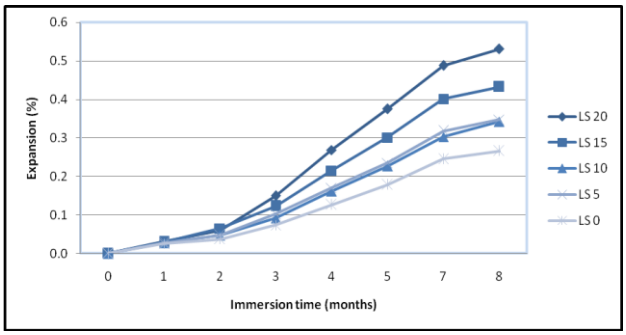
از بین محلول‌های ۵ درصد سولفات منیزیم و سدیم طبق انتظار محلول سولفات منیزیم اثر تخریبی بیش‌تری بر نمونه‌ها داشته و میزان انبساط‌ها نیز بیش‌تر است. برای مثال پس از گذشت ۸ ماه، نمونه‌های دارای صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک در محلول ۵ درصد سولفات منیزیم نسبت به نمونه‌های مانند آن‌ها در محلول ۵ درصد سولفات سدیم به ترتیب ۱/۹، ۲/۹، ۲/۵۴، ۳ و ۳/۳۲ برابر تغییر طول داده‌اند، اما تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد به‌طور تقریبا یکسان است. این موضوع بیان‌گر این پدیده است که افزایش تغییر طول در نمونه‌های منشوری با افزایش غلظت سولفات در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد محسوس‌تر است. برای مثال پس از گذشت ۸ ماه، نمونه‌های دارای صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک در محلول ۱۰ درصد سولفات سدیم نسبت به نمونه‌های مانند آن‌ها در محلول ۵ درصد سولفات سدیم به ترتیب ۳/۶، ۳/۸۲، ۳/۳۴، ۳/۸۳ و ۳/۳۳ برابر تغییر طول داده‌اند در حالی‌که نمونه‌های با صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک در محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم نسبت به نمونه‌های مشابه آن‌ها در محلول ۵ درصد سولفات منیزیم به ترتیب ۱/۴۷، ۱/۳۱، ۱/۵، ۱/۲۷ و ۱/۱ برابر تغییر طول داده‌اند. به‌طور کلی نمونه‌هایی که در محلول سولفات منیزیم قرار دارند با افزایش میزان پودر سنگ‌آهک، بر میزان تغییر طول آن‌ها افزوده می‌شود.



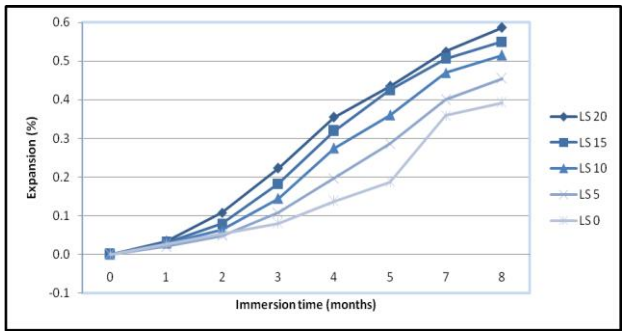
نمودار (۷): تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۵ درصد



نمودار (۸): تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد



نمودار (۹): تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات پس از غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۵ درصد



نمودار (۱۰): تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات پس از غوطه-وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد

پس از گذشت ۸ ماه، تغییر طول نمونه‌های با صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک در محلول سولفات منیزیم ۵ درصد نسبت به نمونه دارای صفر درصد پودر سنگ‌آهک به‌ترتیب برابر ۱، ۱/۳، ۱/۲۸، ۱/۶ و ۲ است و همین نسبت در محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم به‌ترتیب برابر ۱، ۱/۱۶، ۱/۳۱، ۱/۴ و ۱/۵ است. هم‌چنین محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد سولفات سدیم نمونه‌های با ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند و نمونه‌های با ۵ و ۱۰ درصد، از نمونه‌های شاهد بهتر عمل می‌نمایند. در محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد سولفات سدیم نمونه‌های دارای ۲۰

درصد پودر سنگ‌آهک نسبت به نمونه شاهد تغییر طول را به‌ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۱ درصد افزایش می‌دهد و در همین محلول‌ها نمونه‌های با ۵ درصد پودر سنگ‌آهک نسبت به نمونه های شاهد تغییر طول را به‌ترتیب به میزان ۸/۳ و ۱۳/۵ درصد کاهش می‌دهد. برخی محققین نیز نشان دادند افزودن سنگ‌آهک به مقدار ۱۰ درصد حدود ۳۰ درصد انبساط را در مدت ۶ ماه در محلول ۵ درصد سولفات سدیم کاهش می‌دهد که این موضوع به‌احتمال تشکیل مونوکربوآلومینات در حضور سنگ آهک است. از این‌رو تبدیل اترینگایت به مونوسولفوآلومینات به تاخیر می‌افتد و یا انجام نمی‌شود [۷]. تاسون و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ نشان دادند که میزان تغییر طول در ملات‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند آهکی که در محلول سولفات سدیم ۲۰ درصد (۲۰۰ گرم سولفات در ۱ لیتر آب) و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارند با افزایش در میزان پودر سنگ‌آهک افزایش می‌یابد. در این تحقیق نمونه‌های با ۵ و ۱۰ درصد پودر سنگ‌آهک تغییر طول بسیار نزدیک به یکدیگر داشته و نمونه‌های دارای ۴۰ درصد پودر سنگ‌آهک عملکرد بسیار ضعیفی را از خود نشان دادند [۵].

٤- نتیجه گیری

- از میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با پودر سنگ‌آهک، با افزایش در میزان جایگزینی پودر سنگ‌آهک کاسته می‌شود، اما می‌توان بیان نمود که این کاهش در سنین مختلف تا میزان جایگزینی ۱۰ درصد محسوس نیست و حتی در برخی سنین افزایش مقاومت دیده می‌شود.

- در حمله سولفاتی، در هر دو محلول سولفات سدیم و منیزیم با افزایش غلظت یون سولفات، شدت تخریب بیش‌تر می‌شود که این موضوع در محلول سولفات سدیم محسوس‌تر است.

- پس از گذشت ۸ ماه، تغییر طول نمونه‌های واقع در محلول سولفات منیزیم با افزایش میزان پودر سنگ‌آهک بیش‌تر می‌شود، اما این موضوع در محلول سولفات سدیم به شکلی دیگر است به‌طوری که استفاده از پودر سنگ‌آهک تا میزان ۱۰ درصد منجر به کاهش تغییر طول نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شده است.

- به‌طور کلی می‌توان بیان نمود در هر دو پدیده تغییر وزن و تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد اثر تخریبی بیش‌تری داشته است.

- در مجموع می‌توان بیان نمود که سیمان‌های آمیخته آهکی با ۱۰ پودر سنگ‌آهک خصوصیات قابل رقابتی را در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی دارند.

۵- مراجع

[۱] Bonavetti, V. Donza, H. Rahhal, V. Irassar, EF.; “High strength concrete with limestone filler cements”, In: Malhotra VM et al., editors. High-performance concrete and performance and quality of concrete structures, vol. 186. Farmington Hill (MI USA): ACI Special Publication; p. 567–80, 1999.

[۲] Bonavetti, V. Donza, HA. Menendez, G. Cabrera, OA. Irassar, EF.; “Limestone filler cement in low w/c concrete a rational use of Energy", Cem Concr Res; 33(6): p. 865–71, 2003.

[۳] Cyr, M. Lawrence, P. Ringot, E.; “Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength”, Cem Concr Res; 36(2): p.264–77, 2006.

[۴] Irassar, EF.; “Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler—A review”, Cem Concr Res;39: p.241–54, 2009.

[۵] Kamile Tosun. Burak Felekoglu. Bülent Baradan. I, Akın Altun.; “Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations”, Construction and Building Materials; p. 2534–2544, 2009.

[۶] Pipilikaki, P. Katsioti, M. Gallias, J.L.; “Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment”, Construction and Building Materials; (23): p. 1042–1049, 2009.

[۷] Gonzalez, MA. Irassar, EF.; “Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low C_3A Portland cement”, Cement and Concrete Research; (28), p.1655–67, 1998.