

دوام بتن‌ها و ملات‌های حاوی پودر سنگ آهک در محیط‌های سولفاتی با غلظت بالا

علی اکبر رمضانیاپور

مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ابراهیم قیاسوند

مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمد احسان کامل

مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهدی مهدی‌خانی

مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

aaramce@aut.ac.ir

چکیده

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

واژه‌های کلیدی: حمله سولفاتی، پودر سنگ آهک، مقاومت فشاری، انبساط نمونه‌های ملات.

۱- مقدمه

در صنعت ساخت و ساز دنیا، سال‌های متمادی است که بتن نقشی کلیدی و مؤثر ایفا می‌کند. از این رو مهندسان عمران همواره در تلاش برای بهبود خواص و کیفیت آن بوده‌اند. در دهه‌های اخیر به علت بالا بودن قیمت انرژی استفاده از سیمان‌های آمیخته روبه افزایش است. این امر باعث ذخیره کردن 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 (خصوصاً CO₂) 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 پر مصرف ترین سیمان‌ها می‌باشد. میزان استفاده از پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین کلینکر سیمان، در استانداردهای مختلف یکسان نیست. به عنوان مثال در استاندارد اروپا مشخصات ۴ نوع از این سیمان‌ها تعریف شده که در آنها استفاده از ۵ تا ۳۵ درصد پودر سنگ‌آهک مجاز است [۱].

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سنگدانه

سنگدانه مورد استفاده در این پروژه آزمایشگاهی، دریکی 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 می‌باشد. 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) قابل مشاهده است.

۲-۱-۱- سیمان و پودر سنگ‌آهک

سیمان استفاده شده، سیمان تیپ I ۴۲۵ کارخانه سیمان تهران می‌باشد. پودر سنگ‌آهک نیز از معدن کارخانه سیمان آبیگ تهیه گردید. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این مصالح در جدول (۱) قابل مشاهده است. پودر سنگ‌آهک مصرفی در این تحقیق، ملاحظات قید شده در استاندارد سیمان پرتلند آهکی ایران را برآورده می‌کند.

۲-۲- طرح اختلاط

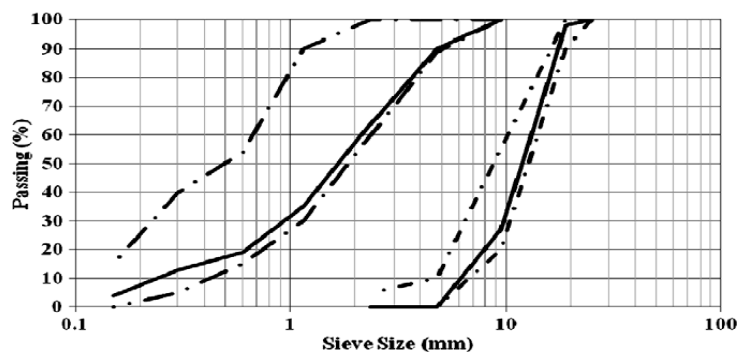
در این برنامه آزمایشگاهی به منظور مطالعه دوام بتن‌ها در برابر حمله کلرایدی، ۵ طرح اختلاط با مقادیر مختلف پودر سنگ‌آهک در نظر گرفته شد. کلیه طرح‌ها دارای نسبت آب به مواد سیمانی (مجموع سیمان و پودر سنگ‌آهک) ۰/۴۵ و میزان مواد سیمانی 350 Kg/cm^2 می‌باشند. مشخصات مخلوط‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

در فرایند تولید سیمان می‌شود. همچنین گسترش استفاده از انواع این سیمان‌ها، منجر به مشارکت در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (خصوصاً CO₂) 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 پر مصرف ترین سیمان‌ها می‌باشد. میزان استفاده از پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین کلینکر سیمان، در استانداردهای مختلف یکسان نیست. به عنوان مثال در استاندارد اروپا مشخصات ۴ نوع از این سیمان‌ها تعریف شده که در آنها استفاده از ۵ تا ۳۵ درصد پودر سنگ‌آهک مجاز است [۱].

هنگامی که پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین کلینکر استفاده می‌شود به دلیل وقوع پدیده‌هایی چون رقیق‌سازی کلینکر، اثر فیلر و اثر هسته‌زایی غیرهمگن، تغییراتی در منافذ موینه رخ می‌دهد. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد در سیمان‌های پرتلند آهکی واکنشی بین C3S و کربنات کلسیم رخ می‌دهد که منجر به افزایش سرعت هیدراتاسیون C3S می‌گردد و نسبت کلسیم به سیلیس را در ژل C S H اصلاح می‌نماید [۳۲].

تهاجم سولفاتی در ملات یا بتن به علت تشکیل محصولات نظیر اترینگایت و گچ از دیرباز به عنوان پدیده‌ای مخرب شناخته می‌شود.

در چند دهه گذشته به علت رشد مصرف سیمان پرتلند آهکی نوع دیگری از جمله سولفاتی شناسایی شده که محصول آن ماده‌ای به نام تومازایت می‌باشد. تومازایت نیز همانند گچ و اترینگایت، منجر به بروز انبساط در خمیر سیمان گردیده و با گذشت زمان خاصیت چسبندگی خمیر سیمان را از بین می‌برد. از مهم‌ترین منابع مورد نیاز جهت تشکیل این محصول، یون کربنات است. از این رو مهم‌ترین مشکل در سیمان‌های پرتلند آهکی به علت بالا بودن یون کربنات، دوام آنها در برابر تهاجم سولفاتی می‌باشد. در ملات یا بتن عواملی چون افزایش غلظت محلول



نمودار (۱): منحنی دانه‌بندی سنگدانه

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

مشخصات	سیمان	پودر سنگ آهک
CaO(%)	61/5	54/77
SiO ₂ (%)	21/5	1/47
MgO(%)	4/8	0/3
Al ₂ O ₃ (%)	3/68	0/22
Fe ₂ O ₃ (%)	2/76	0/29
SO ₃ (%)	2/5	0/06
K ₂ O(%)	0/95	0/08
Na ₂ O(%)	0/12	0/05
TiO ₂ (%)	0/04	0/05
P ₂ O ₅ (%)	0/23	0/01
LOI(%)	1/35	42/23
C ₃ S(%)	51	-
C ₂ S(%)	23	-
C ₃ A(%)	5	-
C ₄ AF(%)	8	-
CaCO ₃ content(%)	-	97/8
TOC(%)	-	0/05
MBA(%)	-	0/07
Blaine (m ² /kg)	320	330
Specific gravity (t/m ³)	3/21	2/69

جدول (۲): طرح اختلاط مخلوط‌های بتنی

Mix	w/b	LS (%)	Concrete composition (kg/m ³)				
			LS	C	W	Ca	Fa
LS 0	0/45	0	0	350	157/5	912/3	950
LS 5	0/45	5	17/5	332/5	157/5	910/2	950
LS 10	0/45	10	35	315	157/5	908/1	950
LS 15	0/45	15	52/5	297/5	157/5	906	950
LS 20	0/45	20	70	280	157/5	903/9	950

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

۲-۳- روش آزمایش و عمل آوری

آزمایش مقاومت فشاری: (ISIRI 3206)

طبق استاندارد ایران نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر ساخته 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 گردید.

آزمایش تغییر مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های بتنی

در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد:

به منظور 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 شده، سپس به ظرف‌های حاوی محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰٪ انتقال داده شده‌اند. در این تحقیق PH محلول‌های سولفات را که در آن نمونه‌های بتنی قرار داشتند در محدوده خاصی نگهداری نمودیم بلکه اجازه دادیم PH این محلول‌ها با گذر زمان ثابت شود. پس از گذشت حدود ۳ ماه مشاهده کردیم که PH محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب در حدود عدد ۱۲ و ۱۰ ثابت ماند. به منظور 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 سولفات منیزیم: (ASTM C1012)

مطابق این استاندارد، نمونه‌های منشوری ملات با ابعاد ۲/۵*۲/۵*۲۸ سانتیمتر ساخته شد. نمونه‌ها را پس از رسیدن به مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال از قالب خارج کرده و بلافاصله در محلول سولفات سدیم و سولفات منیزیم ۵٪ و ۱۰٪ قرار دادیم. تغییر طول نمونه‌ها به مدت ۸ ماه قرائت شده است.

۳- نتایج آزمایش و تفسیر

۳-۱- مقاومت فشاری

در نمودار (۲) نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ملاحظه می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌طور کلی با گذشت زمان به علت تکمیل شدن فرایند هیدراتاسیون،

مقاومت فشاری افزایش می‌یابد همچنین با افزایش میزان پودر سنگ آهک از میزان مقاومت فشاری کاسته می‌شود که البته این کاهش مقاومت، در نمونه‌هایی که مقادیر سنگ آهک در آنها بیش از ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد مشهودتر است.

پس از گذشت یکسال حداکثر و حداقل مقاومت فشاری برابر ۵۶ MPa و ۴۵ MPa می‌باشد که این مقادیر به ترتیب مربوط به نمونه‌های LS 5 و LS 20 می‌باشند. در سیمان‌های پرتلند آهکی، در یک نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، با افزایش پودر سنگ آهک از میزان کلینکر سیمان کاسته می‌شود از این رو نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد که این رخداد خصوصیات رفتاری این سیمان‌ها را تضعیف می‌نماید. از این پدیده به‌عنوان رقیق‌سازی کلینکر یاد می‌شود. در رفتار سیمان‌های یادشده پدیده‌های دیگری چون فیلر و هسته‌زایی غیرهمگن نیز اثرگذار هستند که این اثرات منجر به بهبود رفتار این سیمان‌ها می‌گردد. در سیمان‌های یاد شده مقدار جایگزینی بهینه‌ای برای پودر سنگ آهک موجود است که اثر منفی رقیق‌سازی کلینکر با اثرات مثبت فیلر و هسته‌زایی غیرهمگن خنثی می‌شود. با جایگزینی کمتر از این مقدار بهینه، اثرات مثبت غالب می‌گردد و بعکس [۴]. مقدار بهینه جایگزینی پودر سنگ آهک در این سیمان‌ها معمولاً کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. در این مقاله کاهش مقاومت فشاری با افزایش میزان پودر سنگ آهک را می‌توان به پدیده رقیق‌سازی کلینکر نسبت داد.

۳-۲- تغییر وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در

محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد

ترکیبات مختلف توسط سولفات‌ها مورد حمله قرار می‌گیرند. حمله سولفات‌ها به هیدروکسید کلسیم و هیدرو آلومینات کلسیم سبب تشکیل ترکیباتی نظیر سولفات کلسیم (گچ) و اترینگایت می‌شود که با افزایش حجم همراه است. این افزایش حجم قابل ملاحظه 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 حاوی پودر سنگ آهک هستند، پس از تهاجم سولفاتی علاوه بر اترینگایت و گچ استعداد تشکیل محصولی دیگر تحت عنوان تومازایت وجود دارد. تومازایت می‌تواند در

نمونه‌های بتنی در مدت زمان‌های غوطه‌وری مختلف در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد مشاهده می‌شود.

با دقت در نمودارهای یادشده ملاحظه می‌شود پس از گذشت ۵ ماه از زمان غوطه‌وری، روند افزایش مقاومت در تمامی نمونه‌های واقع در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد مشاهده می‌شود اما بعد از آن، کاهش مقاومت در نمونه‌ها رخ می‌دهد. اما در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد، روند کاهش مقاومت در نمونه‌ها در مدت زمان کوتاه‌تری مشاهده می‌شود. افزایش مقاومت در نمونه‌ها را می‌توان به پر شدن خلل و فرج‌های موجود در آنها توسط محصولاتی انبساط‌زایی نظیر 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 می‌کنند و این افزایش حجم، سبب ایجاد فشار در بتن می‌شود.

این روند باعث ترک خوردن و تکه تکه شدن بتن در سنین بالا و کاهش مقاومت آن می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان بیان نمود در نمونه LS 20 بعد از گذشت ۱۱ ماه از شروع غوطه‌وری در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب، کاهش مقاومت نسبت به مقاومت ۲۸ روزه برابر ۱/۱۸٪ و ۶/۶٪ می‌باشد.

Pipilikaki و همکاران در سال ۲۰۰۸ نشان دادند در نمونه‌های ملات که با سیمان پرتلند آهکی حاوی ۳۵ درصد پودر سنگ آهک ساخته شدند، پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم ۵ درصد به مدت ۱،۵ سال، حدود ۳۳ درصد افت در مقاومت فشاری دیده می‌شود و آنها این افت مقاومت و عملکرد ضعیف در محلول سولفات را به وجود تخلخل و منافذ داخلی بیشتر این سیمان‌ها نسبت دادند [۶].

Tosun و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ نشان دادند 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 می‌کند به طوری که در این محلول شدت کاهش مقاومت فشاری بیشتر بوده است. ایشان در این تحقیق میزان PH را در یک محدوده ثابت نگه نداشتند بلکه اجازه دادند PH محلول با گذشت زمان به یک مقدار ثابت برسد 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

محیطی مرطوب و در حضور یون‌های سیلیکات کلسیم و کربنات تشکیل گردد [۴].

هم چنین این موضوع باید مورد توجه قرار گیرد که سیمان‌های آمیخته آهکی همانند سیمان‌های آمیخته پوزولانی (در این سیمان‌ها از پوزولان‌هایی نظیر خاکستر بادی، میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و ... استفاده شده است) به علت اثر مخرب رقیق‌سازی کلینکر که به آن اشاره شد نمی‌توانند خصوصیات نفوذپذیری را بهبود بخشند و از آنجایی که یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای دوام بتن‌ها یا ملات‌ها در برابر تهاجم سولفاتی، نفوذپذیری می‌باشد بروز خسارت در اثر حمله سولفاتی در سیمان‌های یادشده، در مدت زمان کوتاه‌تری دور از انتظار نیست. بر اساس مشاهدات و مطالعات صورت گرفته اثر محلول‌های سولفات بر روی مقاومت فشاری و انبساط نمونه‌ها همیشه موازی یا یکسان نیست. حتی در این دو مورد می‌توان نتایج کاملاً متضاد را نیز مشاهده نمود. مکانیزم حمله سولفاتی به دلیل نسبت حجم به سطح و لاغری متفاوت نمونه‌ها، نرخ ورود و عمق موثر محلول سولفات، تحت اثر قرار می‌گیرد و هم‌چنین مکانیزم خرابی مربوط به مقاومت فشاری از مود انبساط متفاوت است [۵].

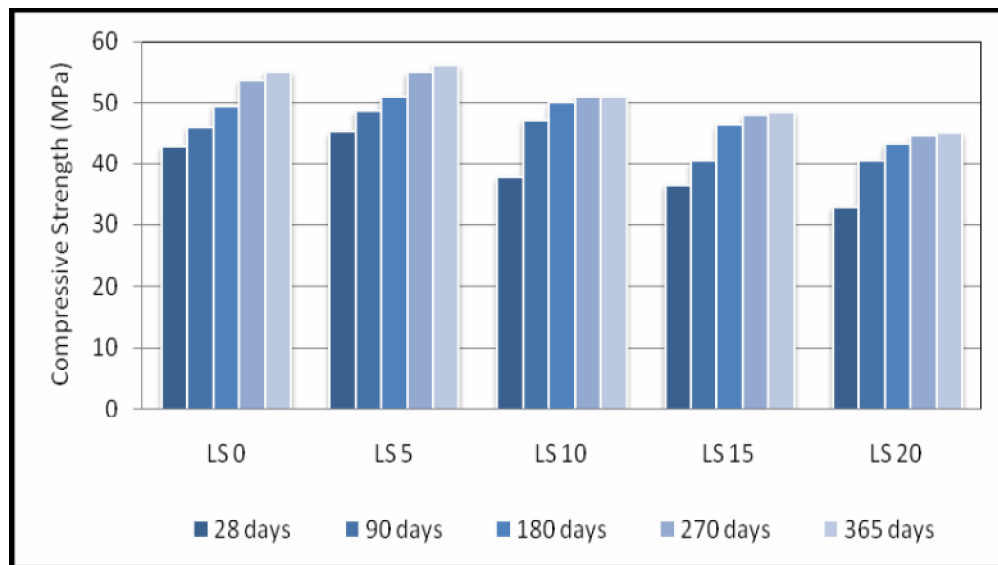
در نمودارهای (۳) و (۴) به ترتیب، تغییرات وزن نمونه‌های بتنی در مدت زمان‌های غوطه‌وری مختلف در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد مشاهده می‌شود. با دقت در نتایج مشاهده می‌کنیم که در تمامی نمونه‌ها بعد از گذشت ۵ ماه از غوطه‌وری در محلول‌های سولفات افزایش وزن مشاهده می‌شود. افزایش وزن موجود در نمونه‌های بتنی را می‌توان ناشی از تشکیل اترینگایت، گچ و یا تومازایت در اثر واکنش‌های سولفات‌های سدیم و منیزیم با هیدروکسید کلسیم و نیز C3A دانست. این محصولات در فضاهای خالی بتن جای می‌گیرند و به وزن نمونه بتن می‌افزایند. در دراز مدت به دلیل اینکه این محصولات حجم بیشتری نسبت به مواد اولیه دارند، موجب ترک خوردگی در ماتریس سیمان و تخریب بتن و کاهش وزن می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌ها بعد از گذشت ۱۱ ماه از شروع غوطه‌وری در محلول‌های سولفات، کاهش وزن مشاهده می‌شود. با دقت در نمودارهای (۳) و (۴) ملاحظه می‌شود. تغییرات وزن در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد شدیدتر است. در نمودارهای (۵) و (۶) به ترتیب، تغییرات مقاومت فشاری

۳-۳- تغییر طول نمونه‌های منشوری ملات در

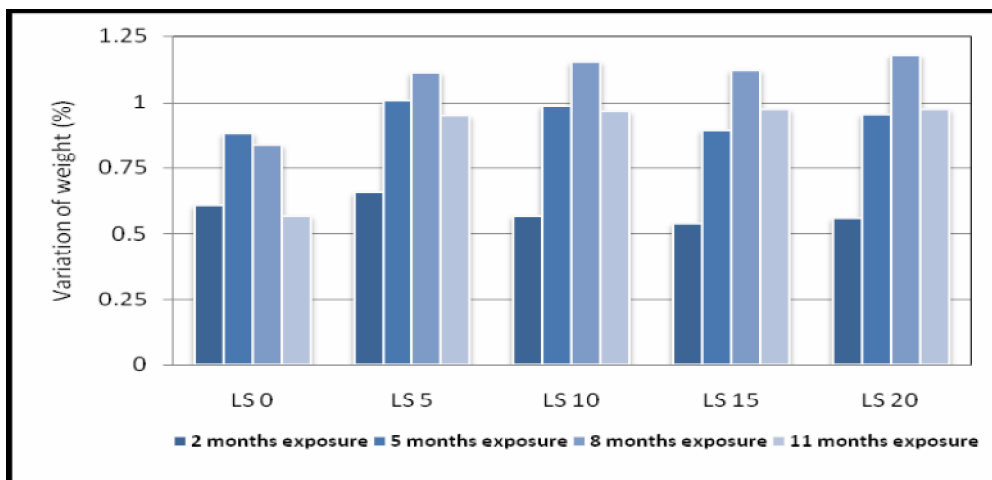
محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۵ و ۱۰ درصد در نمودارهای (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۵ و ۱۰ درصد مشاهده می‌شود. همانطور که ذکر شد یکی از عوامل مؤثر در حمله سولفاتی و نیز شدت آن، میزان غلظت یون سولفات می‌باشد. با توجه به نمودارها و جداول یاد شده ملاحظه می‌شود 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 (۱۰ گرم سولفات در ۱ لیتر آب مقطر) بر میزان تغییر طولها افزوده می‌شود که این موضوع به دلیل افزایش میزان غلظت سولفات می‌باشد. در اکثر موارد تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن است که در نمونه‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند آهکی، در غلظت‌های پایین تر از ۵ درصد، محلول سولفات منیزیم مخرب‌تر از محلول سولفات سدیم عمل می‌کند که این موضوع به بهتر مهیا شدن شرایط جهت تشکیل تومازایت در جوار یون‌های منیزیم مرتبط است [۴].

۱۰ رسید و بیان کردند میزان PH در رفتار سیمان‌های آمیخته آهکی در محلول‌های سولفات مؤثر می‌باشد. این محققان با تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان دادند در ملات‌های حاوی ۴۰ درصد پودر سنگ آهک در محلول سولفات سدیم محصول عمده اترینگایت است و در محلول سولفات منیزیم بیشتر بروسیت، گچ و کمی تومازایت می‌باشد [۵].

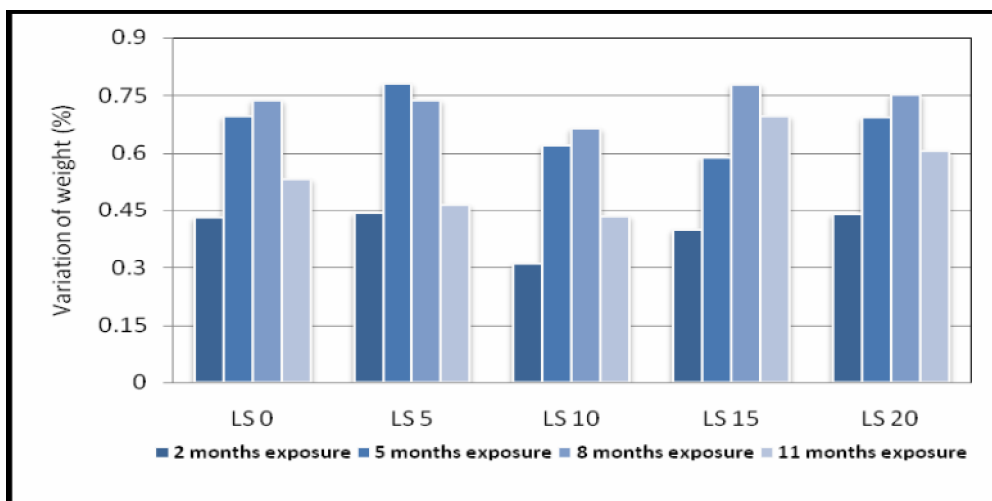
ما نیز در مقاله حاضر PH محلول‌های سولفات را که در آن نمونه‌های بتنی قرار داشتند در محدوده خاصی نگهداری نمودیم بلکه اجازه دادیم PH این محلول‌ها با گذر زمان ثابت شود. پس از گذشت حدود ۳ ماه مشاهده نمودیم PH محلول سولفات سدیم در حدود عدد ۱۰ ثابت ماند. از این رو با توجه به تحقیقات صورت گرفته پیشین، به نظر می‌رسد محصول عمده در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند آهکی در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم به ترتیب اترینگایت و گچ باشد و در هر دوی این محلول‌ها، تومازایت نیز مشاهده شود. اما به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های واقع در محلول‌های سولفات در برنامه تحقیقاتی آینده قرار دارد.



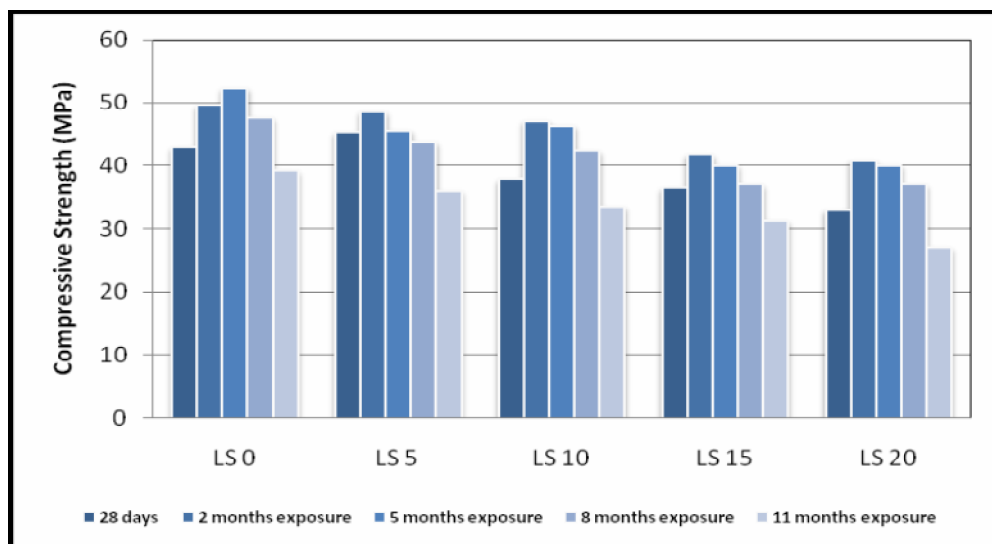
نمودار (۲): مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین مختلف



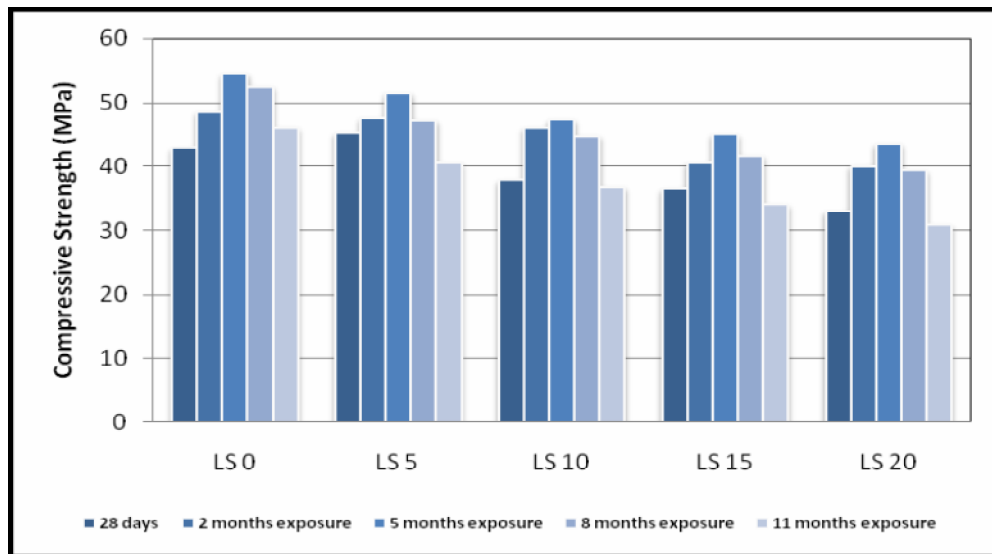
نمودار (۳): تغییرات وزن نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد



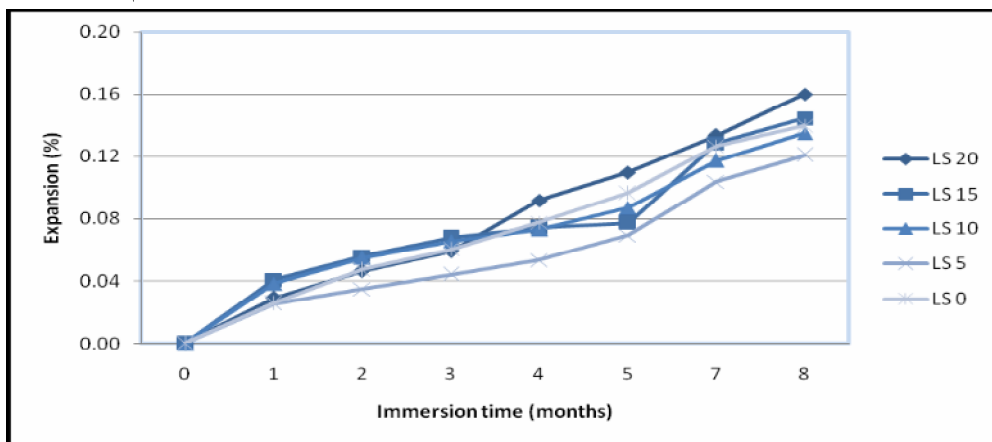
نمودار (۴): تغییرات وزن نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد



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



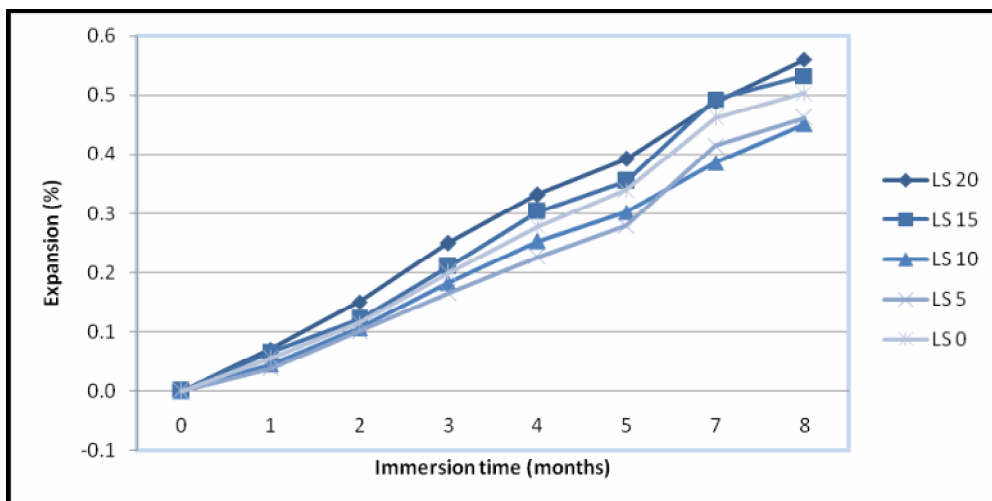
نمودار (۶): تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد



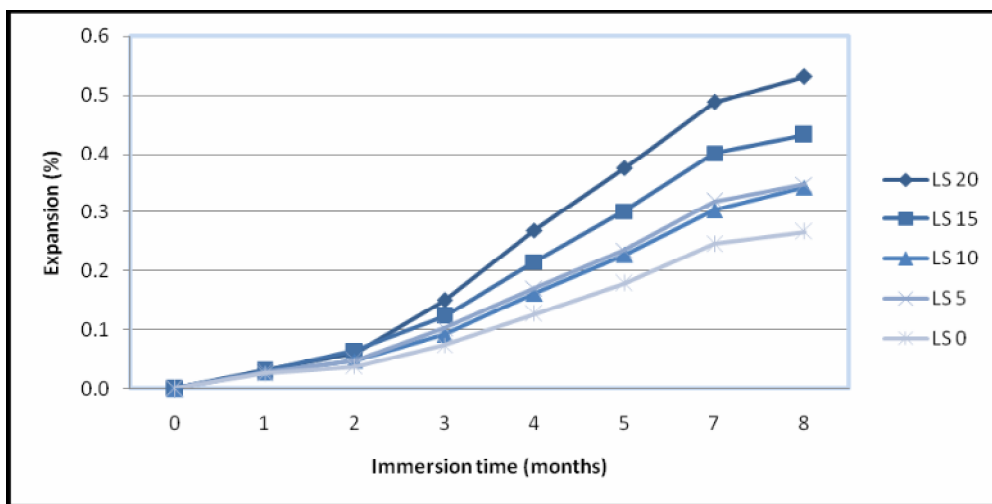
نمودار (۷): تغییرات طول نمونه‌های منشوری ملات پس از غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم ۵ درصد

از بین محلول‌های ۵ درصد سولفات منیزیم و سدیم مطابق انتظار محلول سولفات منیزیم اثر تخریبی بیشتری بر نمونه‌ها وارد کرده و میزان انبساط‌ها نیز بیشتر است. به طور مثال پس از گذشت ۸ ماه، نمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ آهک در محلول ۱۰ درصد سولفات سدیم نسبت به نمونه‌های نظیر آنها در محلول ۵ درصد سولفات سدیم به ترتیب ۳/۶، ۳/۸۲، ۳/۳۴، ۳/۸۳ و ۳/۳۳ برابر تغییر طول داده اند در حالی که نمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ آهک در محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم نسبت به نمونه‌های نظیر آنها در محلول ۵ درصد سولفات منیزیم به ترتیب ۱/۴۷، ۱/۳۱، ۱/۵، ۱/۲۷ و ۱/۱ برابر تغییر طول داده‌اند. به طور کلی نمونه‌هایی که در محلول سولفات منیزیم قرار دارند با افزایش در میزان پودر سنگ آهک آنها بر میزان تغییر طول آنها افزوده می‌شود.

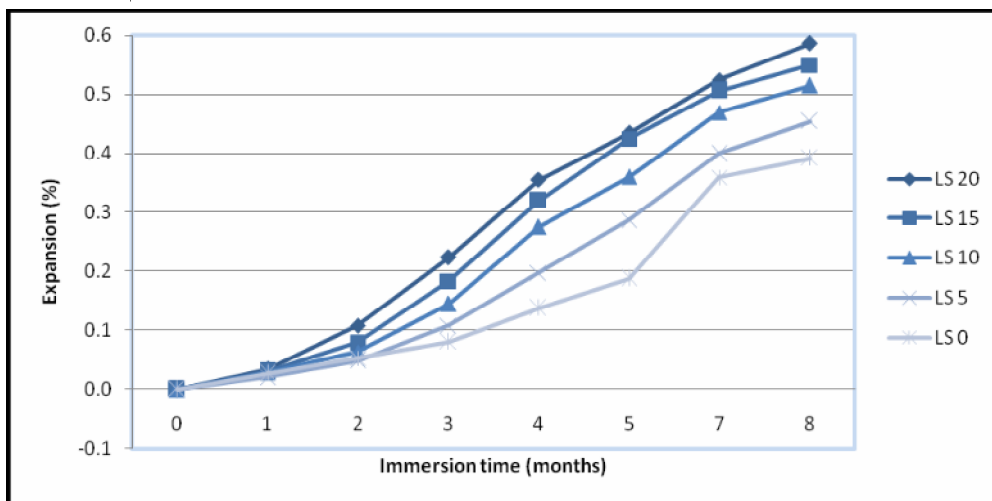
از بین محلول‌های ۵ درصد سولفات منیزیم و سدیم مطابق انتظار محلول سولفات منیزیم اثر تخریبی بیشتری بر نمونه‌ها وارد کرده و میزان انبساط‌ها نیز بیشتر است. به طور مثال پس از گذشت ۸ ماه، نمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ آهک در محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم نسبت به نمونه‌های نظیر آنها در محلول ۵ درصد سولفات منیزیم به ترتیب ۳/۳۲ و ۳، ۲/۵۴، ۲/۹، ۱/۹، ۱/۹، ۱/۹، ۲/۵۴، ۲/۹ و ۳ برابر تغییر طول داده‌اند اما تغییر طول نمونه‌های منشوری در محلول‌های سولفات سدیم و منیزیم ۱۰ درصد تقریباً یکسان می‌باشد. 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.



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 غوطه‌وری در محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد

پس از گذشت ۸ ماه، تغییر طول نمونه‌های حاوی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک در محلول سولفات منیزیم ۵ درصد نسبت به نمونه دارای صفر درصد پودر سنگ‌آهک به ترتیب برابر ۱، ۱/۳، ۱/۲۸، ۱/۶ و ۲ می‌باشد و همین نسبت در محلول ۱۰ درصد سولفات منیزیم به ترتیب برابر ۱، ۱/۱۶، ۱/۳۱، ۱/۴ و ۱/۵ است. هم‌چنین در محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد سولفات سدیم نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند و نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ درصد از نمونه‌های شاهد بهتر عمل می‌کنند. در محلول‌های ۵ و ۱۰ درصد سولفات سدیم نمونه‌های دارای ۲۰ درصد پودر سنگ‌آهک نسبت به نمونه شاهد تغییر طول را به ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۱ درصد افزایش می‌دهد و در همین محلول‌ها نمونه‌های دارای ۵ درصد پودر سنگ‌آهک نسبت به نمونه‌های شاهد تغییر طول را به ترتیب به میزان ۸/۳ و ۱۳/۵ درصد کاهش می‌دهد Gonzalez و Irassar 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 احتمالاً به دلیل تشکیل مونوکربوآلومینات در حضور سنگ‌آهک می‌باشد و از این رو تبدیل اترینگایت به مونوسولفوآلومینات به تأخیر می‌افتد و یا اصلاً صورت نمی‌گیرد. [۷] Tosun و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ نشان دادند 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 حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر سنگ‌آهک دارای تغییر طول بسیار نزدیک به یکدیگر بودند و نمونه‌های دارای ۴۰ درصد پودر سنگ‌آهک عملکرد بسیار ضعیفی را از خود نشان دادند [۵].

۵- مراجع

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. Cyr, Lawrence M., Ringo P. t, 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.
- [4]. Irassar, EF.; "Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler—A review", *Cem Concr Res*; 39: p.241–54, 2009.
- [5]. Tosun Kamile. Felekoglu Burak. Baradan Bülent. I, Altun Akın.; "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.
- [6]. Pipilikaki, P. Katsioti, M. Gallias, J.L.; "Performance of limestone cement mortars in a

۴- نتیجه گیری

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

limestone filler on the sulfate resistance of low C3A Portland cement", Cement and Concrete Research; (28), p.1655–67, 1998.

high sulfates environment", Construction and Building Materials; (23): p. 1042–1049, 2009.
[7].Gonzalez, MA. Irassar, EF.; "Effect of