



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۱ تا ۱۷
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 11-17



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

بررسی اثر چهار نوع از پوزولانهای طبیعی ایران بر دوام بتنهای سازه ای در برابر حمله سولفاتی

علی اکبر رضانیانپور^۱، سید سجاد میروالد^{۲*}، احسان آرامون^۳، منصور پیدایش^۴

- ۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- مربی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۹۰/۱/۲۳، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۲۵)

چکیده

حمله سولفاتی یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در کاهش دوام بتن است. یکی از روشهای معمول مورد استفاده در افزایش مقاومت بتن در برابر حمله سولفاتی استفاده از پوزولانهای طبیعی می باشد. در این مقاله نتایج بررسی آزمایشگاهی بر روی اثر پوزولانهای طبیعی تراس جاجرود، پومیس اسکندان، توف آبیگ و پومیس خاش بر دوام بتنهای معمول سازه ای در حمله سولفاتی ارائه می شود. در این مطالعه نمونه های بتنی با سه درصد جایگزینی مختلف سیمان با پوزولان ساخته شده و در سنین مختلف آزمایش تغییر وزن و مقاومت فشاری نمونه های بتنی در محلول سولفات سدیم انجام گردیده است. همچنین نمونه های منشوری ملات به منظور بررسی انبساط نمونه ها در محلولهای سولفات سدیم و منیزیم نگهداری شده اند. نتایج بطور کلی نشان دهنده عملکرد مناسب پوزولانهای طبیعی در کاهش اثرات مضر حمله سولفاتی می باشد. میزان مقاومت بتن و ملات در برابر یونهای سولفات به خواص پوزولانهای طبیعی و میزان جایگزینی با سیمان بستگی دارد.

کلمات کلیدی

حمله سولفاتی، پوزولانهای طبیعی، مقاومت فشاری، انبساط ملات سیمان.

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: mirvalad@gmail.com

۱- مقدمه

درصد وزنی می باشد. منحنی دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در ساخت نمونه های بتنی (نمودار (۱))، در ناحیه مورد قبول استاندارد ایران برای دانه بندی با حداکثر قطر سنگدانه ۲۵ میلیمتر قرار دارد. همچنین منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در ساخت نمونه های ملات، منحنی دانه بندی ملات استاندارد می باشد.

سیمان و پوزولان

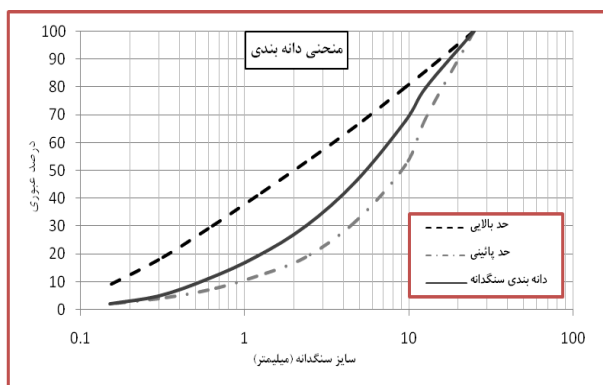
سیمان استفاده شده، سیمان I-425 کارخانه سیمان تهران است. پوزولانها طی بازدیدهایی از معادن جاجرد، اسکندان، آبیگ و خاش نمونه برداری شده و جهت استفاده در آزمایش آسیاب شده اند. نتایج آزمایش XRF و خواص مکانیکی سیمان و پوزولانها در جدول (۱) ارائه شده است.

آب و مواد افزودنی

در ساخت مخلوطهای بتنی از آب آشامیدنی تهران استفاده شده است. همچنین جهت ثابت نگاه داشتن اسلامپ مخلوطها از فوق روان کننده ژلنیم P110 استفاده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

در این برنامه آزمایشگاهی به منظور مطالعه دوام بتن در برابر حمله کلرایدی، ۱۳ طرح اختلاط با مقادیر مختلف پوزولان در نظر گرفته شد. کلیه طرحها دارای نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۵ و میزان مواد سیمانی 350 Kg/cm^2 می باشند. در ساخت مخلوطهای بتنی اسلامپ مخلوطها بوسیله فوق روان کننده در محدوده ۶ تا ۸ سانتیمتر نگاه داشته شده است. مشخصات مخلوطها در جدول (۲) مشاهده می شود.



نمودار (۱): منحنی دانه بندی سنگدانه

یکی از موضوعات پر اهمیت در طراحی و ساخت سازه های بتنی، عمر سرویس دهی آنهاست. از پارامترهای تاثیر گذار در میزان عمر سرویس دهی سازه های بتنی، شرایط محیطی و کیفیت بتن می باشد. خرابی سولفاتی یکی از جدی ترین مشکلاتی است که عمر سرویس دهی سازه های بتنی را کاهش می دهد. نمک های سولفات موجود در خاک، آبهای زیر زمینی و آب دریا با فازهای مختلف خمیر سیمان هیدراته شده نظیر هیدرات مونو سولفات و هیدروکسید کلسیم واکنش داده و بلورهای سوزنی شکل اترینگایت و سولفات کلسیم (گچ) تولید می کنند. حجم این بلورها از حجم مواد اولیه تشکیل دهنده بیشتر می باشد و این موضوع سبب ایجاد فشار در حفره های بتن و در نتیجه بروز ترک هایی در آن می شود. رفته رفته این ترک ها گسترش یافته و کاهش مقاومت را در بتن سبب می شود [۱].

از روشهای معمول و مورد استفاده در محدود کردن آثار مخرب حمله سولفاتی استفاده از سیمانهای پرتلند تیپ ۲ و ۵ به جای سیمان پرتلند تیپ ۱ می باشد [۲]. همچنین استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر خاکستر بادی، میکروسیلیس و پوزولانهای طبیعی می تواند در بهبود مقاومت بتن در مقابل حمله سولفاتی موثر باشد [۳]. تاثیر پوزولانها در بهبود دوام بتن در محیطهای سولفاتی را به بهبود ساختار حفرات و کاهش نفوذپذیری و همچنین کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در اثر واکنش های پوزولانی نسبت داده اند.

در کشور ما به جهت وجود معادن متعدد با ذخیره حجمی زیاد پوزولانهای طبیعی، استفاده از این مواد به عنوان ماده جایگزین سیمان گسترش یافته است. به همین جهت مطالعه بر روی خواص پوزولانهای مصرفی در سیمانها می تواند به تولید سیمانهای با کیفیت بهتر و در نتیجه به ساخت بتنهای با دوامتر منجر شود. هدف از این مطالعه بررسی تاثیر چهار نوع از پوزولانهای طبیعی و پر مصرف کشور بر روی دوام بتن در محیط های خورنده سولفاتی می باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

سنگدانه

سنگدانه مورد استفاده در این پروژه آزمایشگاهی از شرکت متوساک تهیه شده است. ماسه مصرفی، ماسه طبیعی شسته با میزان جذب آب ۲/۵۶ درصد وزنی و شن مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر سنگدانه ۲۵ میلیمتر با میزان جذب آب ۱/۷۵

جدول (۱): خواص شیمیایی و مکانیکی سیمان و پوزولانها

ترکیبات شیمیایی (%)	سیمان	توف خاش (K)	پومیس آبیگ (A)	پومیس اسکندان (P)	تراس جاجرود (T)
SiO ₂	۲۱/۵۷	۶۲/۶۴	۷۳/۹۱	۶۷/۷۰	۶۵/۷۴
Al ₂ O ₃	۲/۸۷	۱۵/۱۹	۱۳/۳۲	۱۵/۸۰	۱۲/۲۴
Fe ₂ O ₃	۲/۶۵	۴/۴۷	۱/۳۷	۳/۳۹	۲/۰۵
CaO	۶۱/۶۰	۶/۸۳	۱/۱۳	۳/۹۰	۲/۸۷
SO ₃	۰	۰/۳۸	۰	۰/۳۳	۰
MgO	۳/۹۵	۱/۷۱	۰/۶۸	۰/۹۹	۰/۹۶
Na ₂ O	۰/۱۲	۲/۷۷	۱/۸۳	۲/۹۵	۱/۹۲
K ₂ O	۰/۵۷	۲/۰۹	۴/۱۴	۲/۰۰	۲/۰۲
LOI	۲/۲۸	۲/۸۸	۳/۱۵	۲/۳۰	۸/۵۰
خصوصیات فیزیکی					
وزن مخصوص	۳/۱۸	۲/۶۶	۲/۶۰	۲/۵۴	۲/۵۰
ریزی بلین (cm ² /g)	۳۳۰۰	۴۵۰۰	۳۴۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰

انتقال داده شدند. pH محلول در طول مدت آزمایش توسط اضافه کردن اسید سولفوریک در محدوده ۶ تا ۸ ثابت نگه داشته شد. به منظور بررسی تغییر مقاومت فشاری و وزن، در سنین آزمایش مقاومت فشاری و میزان تغییر وزن نمونه های قرار گرفته در محلول سولفات سدیم اندازه گیری شد.

آزمایش تغییر طول ملات منشوری در محلول سولفات

سدیم و سولفات منیزیم (ASTM C1012)

مطابق با استاندارد، نمونه های منشوری ملات با ابعاد ۲/۵*۲/۵*۲۸ سانتیمتر ساخته شد. نمونه ها پس از رسیدن به مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال در محلول سولفات سدیم و سولفات منیزیم ۵٪ قرار داده شد. تغییر طول نمونه ها به مدت ۲۶ هفته قرائت شده است.

۲-۳- روش آزمایش و عمل آوری

آزمایش مقاومت فشاری (ISIRI 3206)

طبق استاندارد ایران نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر ساخته و تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع نگهداری شده اند آزمایش در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روز بر روی نمونه ها انجام گردید.

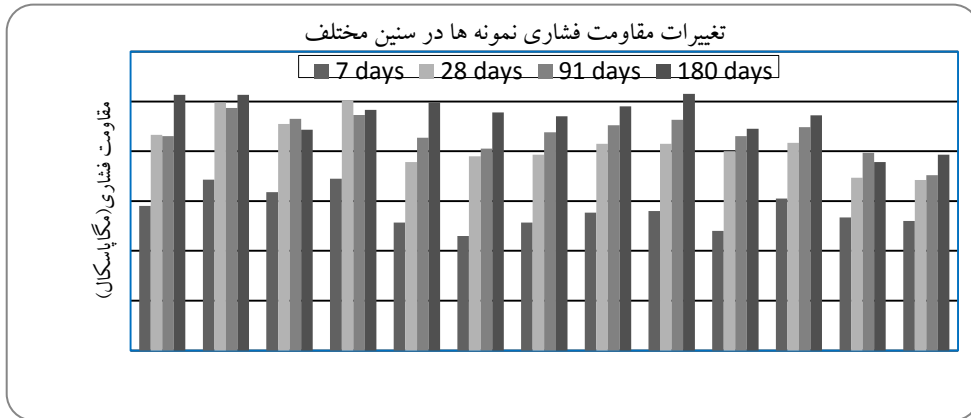
آزمایش تغییر مقاومت فشاری و وزن نمونه های بتنی در

محلول سولفات سدیم

به منظور انجام این آزمایش نمونه های بتنی مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر ساخته شد. نمونه ها ابتدا به مدت ۲۸ روز عمل آوری گردیدند سپس به ظرف حاوی محلول سولفات سدیم ۵٪

جدول (۲): طرح اختلاط مخلوطها

اسم طرح	نوع پوزولان	نسبت آب به سیمان	جایگزینی (%)	(Kg/m ³) سیمان	(Kg/m ³) پوزولان	آب (Kg/m ³)	سنگدانه (Kg/m ³)
Control	-	۰/۵	۰	۳۵۰/۰	۰/۰	۱۷۵۰/۰	۱۷۵۰/۰
P10	پومیس اسکندان	۰/۵	۱۰	۳۱۵/۰	۳۵/۰	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
P15	پومیس اسکندان	۰/۵	۱۵	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
P20	پومیس اسکندان	۰/۵	۲۰	۲۸۰/۰	۷۰/۰	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
A15	توف آبیگ	۰/۵	۱۵	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
A20	توف آبیگ	۰/۵	۲۰	۲۸۰/۰	۷۰/۰	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
A25	توف آبیگ	۰/۵	۲۵	۲۶۲/۵	۸۷/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
K15	پومیس خاش	۰/۵	۱۵	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
K20	پومیس خاش	۰/۵	۲۰	۲۸۰/۰	۷۰/۰	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
K25	پومیس خاش	۰/۵	۲۵	۲۶۲/۵	۸۷/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
T15	تراس جاجرود	۰/۵	۱۵	۲۹۷/۵	۵۲/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
T20	تراس جاجرود	۰/۵	۲۰	۲۸۰/۰	۷۰/۰	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰
T25	تراس جاجرود	۰/۵	۲۵	۲۶۲/۵	۸۷/۵	۱۷۵/۰	۱۷۵۰/۰



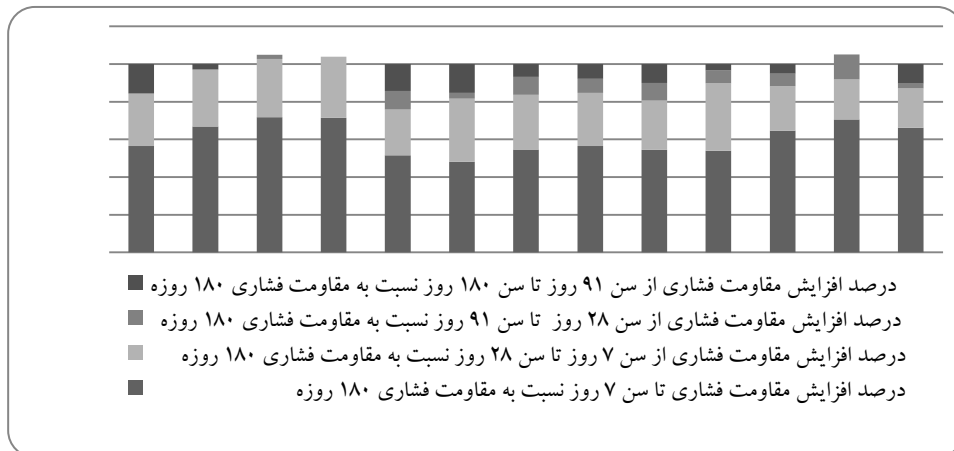
نمودار (۲): تغییر مقاومت فشاری نمونه های بتنی در سنین مختلف

۳- نتایج آزمایش و تفسیر ۳-۱- مقاومت فشاری

نزدیک شده است. نمونه های بتنی حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی توف آبیگ عملکرد مقاومتی ضعیفتری نسبت به دیگر نمونه ها از خود نشان داده اند.

نمودار (۳) که درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها در بازه های مختلف زمانی نسبت به مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه را نشان می دهد بیانگر این است که نمونه های حاوی پوزولانهای تراس جاجرود تا سن ۷ روز بیش از ۶۰ درصد مقاومت نهایی خود را کسب کرده اند. همچنین این نمونه ها پس از سن ۹۱ روز رشد مقاومتی محسوسی نداشته اند. این موضوع بیانگر این است که واکنشهای پوزولانی در نمونه های حاوی تراس جاجرود سرعت بالایی داشته و تا سن ۹۱ روز عمده این واکنشها صورت می پذیرد. ولی در مورد سایر نمونه های بتنی، تاثیر فعالیت های پوزولانی بر روی مقاومت فشاری تا سن ۱۸۰ روز دیده می شود.

نمودار (۲) نتایج مقاومت فشاری نمونه های بتنی ساخته شده در سنین مختلف را نشان می دهد. مقاومت نمونه های حاوی درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان در سن ۷ روز کمتر از نمونه شاهد می باشد. این موضوع را می توان به دلیل کاهش مقدار سیمان در این نمونه ها و واکنش پذیری کم پوزولانها در این سن نسبت داد. البته در مورد نمونه های حاوی پوزولان تراس جاجرود حتی تا سن هفت روز هم افزایش مقاومت چشمگیری دیده می شود. این مسئله را می توان به فعالیت پوزولانی بالای تراس جاجرود نسبت داد. چنین پدیده ای در مطالعات پیشین بر روی این پوزولان دیده شده است [۴]. همچنین مشاهده می شود که با افزایش سن نمونه ها به دلیل تکمیل شدن واکنش های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نمونه های بتنی، مقاومت فشاری تا حد زیادی به نمونه شاهد



نمودار (۳): نسبت مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه نمونه های بتنی نسبت به نمونه شاهد

۳-۲- تغییر مقاومت فشاری و وزن نمونه های بتنی

در حمله سولفات سدیم

داشته اند. افزایش وزن کمتر نمونه های پوزولانی نشانگر کمتر بودن پتانسیل تولید گچ و اترینگایت در آنها می باشد. بتنهای پوزولانی بدلیل نفوذپذیری کمتر و نیز بدلیل کمتر بودن مقدار C_3A (بدلیل جایگزینی مقداری از سیمان با پوزولان) و $Ca(OH)_2$ (بدلیل صورت گرفتن واکنشهای ثانویه پوزولانی) پتانسیل کمتری در تولید گچ و اترینگایت دارند. این مسئله در نتایج این آزمایش تا سن ۳۰۰ روز دیده می شود.

۳-۳- تغییر طول نمونه های منشوری ملات در

محلول سولفات سدیم و منیزیم

آزمایش تغییر طول ملات در محلول سولفات سدیم و منیزیم تا شش ماه انجام گرفته است. نتایج این آزمایش در جدول (۴) مشاهده می شود. در حمله سولفات سدیم به نمونه های ملات مشاهده می شود که نمونه های حاوی پوزولانهای تراس جاجرود، توف آبیک، پومیس اسکندان و خاش تغییر طول های کمتر یا در حد نمونه شاهد داشته اند. در این مورد نمونه حاوی ۲۵ درصد پوزولان آبیک استثناست و درصد افزایش طول بسیار زیادی دارد. در بین نمونه های ملات، نمونه های حاوی ۱۵ درصد تراس جاجرود، ۱۰ درصد پومیس اسکندان، ۲۰ درصد پومیس خاش و ۱۵ درصد توف آبیک تغییر طول کمتری در حمله سولفات سدیم نسبت به دیگر نمونه ها داشته اند.

در حمله سولفات منیزیم نیز مشاهده می شود که بجز نمونه حاوی ۲۵ درصد توف آبیک، نمونه های ملات تغییر طول هایی کمتر و یا در حد نمونه شاهد داشته اند. در مجموع با توجه به نتایج شش ماهه حمله سولفات منیزیم، می توان اظهار داشت که نمونه های ملات حاوی ۲۰ درصد تراس جاجرود، ۱۵ درصد پومیس اسکندان و ۲۵ درصد پومیس خاش تغییر طول های کمتری داشته اند. در مقایسه نتایج مربوط به حمله سولفات سدیم و منیزیم مشخصاً می توان بیشتر بودن تغییر طول ها در حمله سولفات منیزیم نسبت به حمله سولفات سدیم را مشاهده نمود.

استاندارد ASTM C1157 محدودیت هایی برای تغییر طول های شش ماهه و یک ساله در نمونه های ملات حاوی سیمان ضد سولفات و سیمان ضد سولفات ویژه معرفی می کند. طبق این استاندارد نمونه های ملات حاوی سیمان ضد سولفات ویژه پس از شش ماه تغییر طولی کمتر از ۰/۰۵ درصد دارند. بر این اساس و با توجه به نتایج تغییر طول تا شش ماه، نمونه های ملات قرار گرفته در محلول سولفات سدیم بجز نمونه حاوی ۲۰ درصد تراس جاجرود در رده نمونه های حاوی سیمان ضد سولفات ویژه در حمله سولفات سدیم قرار می گیرند. به همین

در جدول (۳) درصد تفاوت مقاومت فشاری نمونه های بتنی در معرض حمله سولفات سدیم و نمونه های بتنی عمل آوری شده در آب آهک مشاهده می شود. با توجه به اینکه تشکیل شدن بلورهای گچ و اترینگایت در فضاهای خالی بتن در کوتاه مدت می تواند موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شود، در این مقطع زمانی به صراحت نمی توان افزایش مقاومت فشاری نمونه بتنی را ناشی از مقاومت مطلوب آن در مقابل حمله یونهای سولفات دانست. اما کم شدن مقاومت فشاری را در این مقطع زمانی می توان به اثر مخرب سولفات سدیم بر بتن نسبت داد. از این منظر و با توجه به اینکه بیشترین کاهش در مقاومت فشاری در نمونه بتنی شاهد دیده می شود، می توان گفت که نمونه های بتنی حاوی پوزولان مقاومت بهتری در مقابل یونهای سولفات از نظر حفظ نمودن مقاومت فشاری داشته اند.

نمودار (۴) نمایانگر درصد تغییر وزن نمونه های بتنی قرار گرفته در محلول سولفات سدیم در طول زمان می باشد. افزایش وزن نمونه های بتنی در این بازه های زمانی نشانگر آن است که فضاهای خالی بتن با بلورهای گچ و اترینگایت پر شده است. مشاهده می شود که نمونه شاهد بیشترین افزایش وزن در بین نمونه ها را دارد. و نمونه های پوزولانی افزایش وزن کمتری

جدول (۳): درصد تفاوت مقاومت فشاری نمونه های بتنی در معرض حمله سولفات سدیم و نمونه های بتنی عمل آوری شده در آب آهک

درصد تفاوت مقاومت فشاری نمونه قرار گرفته در محلول سولفات سدیم نسبت به نمونه عمل آوری شده در محلول آب آهک پس از ۱۸۰ روز قرار گیری در معرض حمله سولفاتی	
-۱۲/۱	Control
-۴/۵	T15
۰/۰	T20
-۰/۵	T25
-۴/۶	P10
-۱۱/۹	P15
-۴/۰	P20
-۸/۱	K15
-۸/۷	K20
-۲/۹	K25
-۴/۶	A15
-۱/۰	A20
-۳/۳	A25

در رده نمونه های حاوی سیمان ضد سولفات ویژه قرار می گیرد.

۴- نتیجه گیری

۱- مقاومت فشاری نمونه های بتنی پوزولانی به خصوص در سنین بالا تفاوت چندانی با نمونه شاهد نداشته است. این مسئله را می توان به تولید ژل های سیلیکاتی ناشی از واکنش های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نسبت داد. بنابراین استفاده از این پوزولانها با درصد یاد شده در این مقاله به لحاظ معیار مقاومت فشاری چندان نگران کننده نمی باشد. البته استفاده از پوزولان توف آبیگ با ریزی انتخاب شده و با بیش از ۱۵ درصد جایگزینی از بعد مقاومتی توصیه نمی شود.

۲- در حمله سولفات سدیم به نمونه های بتنی، از نظر حفظ مقاومت فشاری نمونه های حاوی پوزولان عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته اند. همچنین پتانسیل تشکیل گچ و اترینگایت در این نمونه ها کمتر از نمونه شاهد بوده است.

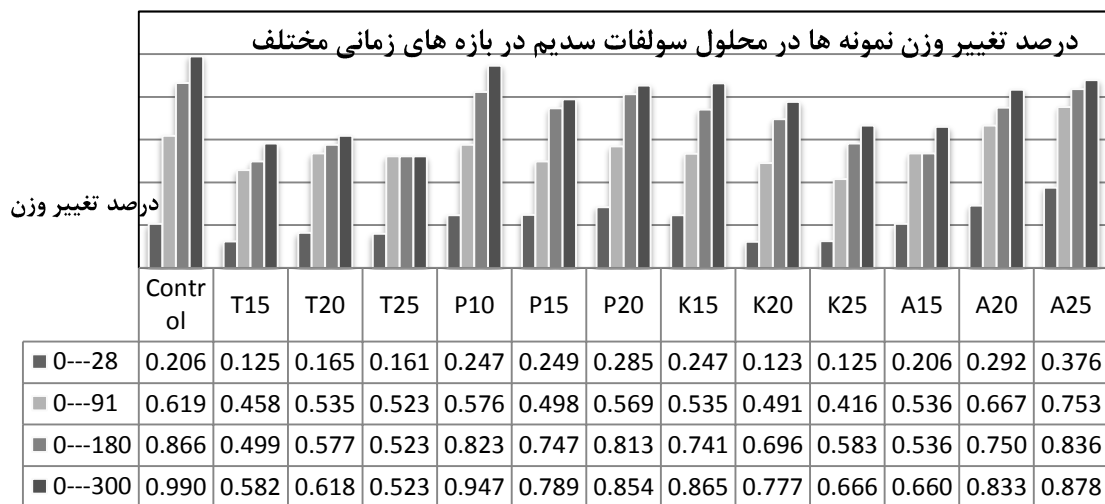
۳- در بررسی تغییر طول نمونه های ملات در حمله سولفات سدیم و منیزیم بطور کلی نمونه های پوزولانی (بجز نمونه های حاوی توف آبیگ) عملکرد بهتری داشته اند. در حمله سولفات سدیم تمامی نمونه ها بجز نمونه حاوی ۲۰ درصد تراس جاجرود در رده نمونه های ضد سولفات ویژه قرار می گیرند. همچنین در حمله سولفات منیزیم نمونه های حاوی پومیس خاش و اسکندان و نمونه حاوی ۲۵ درصد تراس جاجرود در رده نمونه های ضد سولفات ویژه قرار می گیرند.

ترتیب می توان گفت که در حمله سولفات منیزیم تمامی نمونه های حاوی پومیس اسکندان و خاش و نمونه حاوی ۲۵

جدول (۴): درصد تغییر طول ملات در محلول سولفات سدیم و منیزیم تا شش ماه

	سولفات سدیم		سولفات منیزیم	
	هفته ۱۳	هفته ۲۶	هفته ۱۳	هفته ۲۶
Control	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶
T15	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۷
T20	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶
T25	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵
P10	-۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵
P15	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
P20	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵
K15	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵
K20	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۵
K25	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳
A15	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۹
A20	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۶
A25	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۹

درصد تراس جاجرود



نمودار (۴): درصد تغییر وزن نمونه های بتنی قرار گرفته در محلول سولفات سدیم

۵- مراجع

- [۱] رضانیانپور، علی اکبر؛ پرهیزکار، طیبه؛ قدوسی، پرویز؛ پورخورشیدی، علیرضا، "توصیه هایی برای پایایی بتن در سواحل جنوبی کشور (نشریه شماره ۳۹۶)"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ۱۳۸۳، ایران.
- [۲] ASTM Standard C150, "Standard specification for Portland cement", vol 04.01 ASTM Publication, United States, 1995.
- [۳] Irassar, F.; Gonzalez, M.; Rahhal, V.; "Sulfate resistance of type V cements with limestone filler and Natural Pozzolan", Cement and Concrete Composites, pp. 361- 802, 2000.
- [۴] محمدی منش، مجتبی، "بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن های ساخته شده با پوزولان طبیعی پومیس"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۳، ایران.