

پیش‌بینی تأثیر میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی بر مقاومت بتن در برابر سولفات با استفاده از نرم‌افزار LIFE365

حمیدرضا ربیعی فر^۱، محمدحسن فلاحی^۲

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۴/۲۷

چکیده

در این تحقیق، ۴۸ طرح اختلاط با روش شبیه‌سازی عددی و تحلیل نرم‌افزاری از نظر مقاومت در برابر سولفات مقایسه شده‌اند. سه نسبت آب به سیمان ۰،۳۵، ۰،۴ و ۰،۴۵ در نظر گرفته شده است و در این نسبت‌های آب به سیمان، از درصدهای وزنی مختلف سرباره، میکروسیلیس و خاکستر بادی استفاده شده است. سرباره از ۰ تا ۴۰ درصد، میکروسیلیس از ۰ تا ۱۵ درصد و خاکستر بادی از ۰ تا ۵۰ درصد استفاده شده است.

نتایج نشان داد که کاهش نسبت آب به سیمان از ۰،۴۵ به ۰،۳۵ باعث افزایش عمر بتن به میزان ۰،۸ سال شده است. در حالی که افزایش ۱۵ درصد میکروسیلیس بیشترین نقش را در افزایش عمر بتن دارد و باعث افزایش آن از ۲۱ سال به ۵۲،۲ سال شده است، این عدد برای سرباره و خاکستر بادی به ترتیب ۲۳،۲ و ۲۶،۹ سال به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: سولفات، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره، مقاومت بتن

۱- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب Rabiefar@yahoo.com

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی پدافند غیرعامل - گرایش سازه‌های امن - دانشگاه جامع امام حسین (ع) mh.falahi0@yahoo.com - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

هم‌اکنون و در عصر حاضر، مقادیر قابل توجهی از سرمایه‌ها در صنعت ساخت و ساز کشورها صرف تعمیر و مرمت بتن‌های گذشته می‌گردد و روش تعمیر و مرمت و هزینه‌های هر روش، خود به عنوان معضلی پیش روی دست اندرکاران این صنعت است. تکنولوژی و صنعت بتن در پی تدوین روش‌ها و توصیه‌هایی است تا بتن‌های ساخته شده امروزی در آینده دچار معضل دوام نگردد. این موضوع بقدری بحرانی شده که در پروژه‌های ساختمانی جدید، مهندسين ملزم به توجه به مسئله دوام شده اند [۱].

با توجه به اینکه عمده ساختمان‌ها و سازه‌هایی که کاربرد پدافند غیرعامل داشته و یا به نوعی برای استفاده پدافند غیرعامل احداث گردیده‌اند، به نحوی در تماس با شرایط خوردگی محیط (نظیر خاک‌های سولفاته و یا اسیدی و قلیایی و یا آبهای مضر) قرار دارند به طریقی که:

- سازه پدافند غیرعامل جزء سازه‌های زیرزمینی بوده و ممکن است بخش‌های مختلف سازه (نظیر لاینینگ) در تماس با خاک‌های سولفاته و شرایط خوردنده قرار داشته باشد.
- سازه پدافند غیرعامل ممکن است به ناچار در شرایط محیطی خوردنده و در تماس با عوامل خوردنده و مخرب (مانند سواحل جنوبی کشور) احداث گردد.

با توجه به اهمیت ویژه‌ای که سازه‌های احداث شده با کاربری پدافند غیرعامل دارند و از سوی دیگر میلیاردها ریال از بودجه‌های مربوطه، صرف احداث، نگهداری و بهره‌برداری از این سازه‌ها می‌گردد، لذا اتخاذ تدابیری در خصوص افزایش عمر مفید این سازه‌ها و کاهش آسیب‌های محیطی به این ساختمان‌ها و احداثات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در منابع مختلف اشاره شده است که در اثر واکنش سولفات با بتن سخت شده، محصولاتی به وجود می‌آید که دارای حجمی بیش از حجم اولیه مواد واکنش‌دهنده می‌باشند و این تغییر حجم باعث انبساط داخلی در خمیر سیمان و تمرکز تنش‌های کششی در بتن سخت‌شده می‌گردد و سرانجام حمله سولفاتی در ترک‌ها، ورقه ورقه شدن و کاهش وزن، خود را نشان می‌دهد و تمامی این موارد باعث خسارت و آسیب دیدگی قسمتی از سطح بتن و یا تخریب تمامی بتن می‌شود [۲].

طبعاً ممکن است این رخدادها به وسیله سولفات سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم که در خاک‌ها موجودند و یا محلول در آب‌های زیرزمینی هستند اتفاق بیفتد. در ضمن این سولفات‌ها همیشه در آب دریا وجود دارند [۳].

بیشترین باور و اعتقاد کارشناسان بر این است که عامل اصلی حمله

سولفات‌ها تشکیل اترینگایت^۱ در بتن سخت‌شده است. دیگر فرضیات در خصوص مکانیزم حمله سولفاتی مشتمل بر تخریب ژل C-S-H (هیدرات سیلیکات کلسیم) به وسیله یون‌های منیزیم (موجود در سولفات منیزیم) و تورم به واسطه تشکیل بلورها و تشکیل گچ می‌باشد [۴].

تشکیل اترینگایت به واسطه واکنش یکی از محصولات سیمان هیدراته شده (منوسولفات آلومینات) در مجاورت سولفات و تماس با یون‌های سولفات مازاد در بتن سخت‌شده می‌باشد. حجم اترینگایت تشکیل شده تقریباً دو برابر منوسولفات آلومینات اولیه می‌باشد.

چندین فاکتور بر مقاومت بتن در برابر سولفات‌ها مؤثرند. این فاکتورها مشتمل بر خواص شیمیایی مصالح سیمانی، نفوذپذیری بتن، غلظت و نوع منابع خارجی یون‌های سولفات و شدت تماس بتن با محیط سولفاتی (مقدار سطح تماس بتن با سولفات) هستند. دو فاکتور آخر (غلظت سولفات و شدت تماس) هنگامی که مکان و نوع کاربرد بتن انتخاب شده باشد قطعی و ثابت هستند. لذا مهندسين می‌بایست محیط‌ها را از لحاظ امکان و شدت حمله سولفاتی ارزیابی کنند [۵].

در سال ۱۹۴۹، انجمن سیمان پرتلند آمریکا گزارشی منتشر کرد و در آن، مقدار سیمان و مقدار تری کلسیم آلومینات (C3A) را بعنوان دو فاکتور مؤثر بر مقاومت سولفاتی بتن ارزیابی کرد [۶]. این انجمن چنین درج کرد که برای مخلوط‌های بتن با مقادیر کم تا متوسط تری کلسیم آلومینات، محدودیت این جزء باعث بهبود مقاومت بتن در حمله سولفاتی می‌شود. این تحقیق نشان داد که بتن ساخته شده با سیمان با مقادیر تری کلسیم آلومینات بیش از ۷ درصد، عملکردی ضعیف در مقاومت سولفاتی ایفا می‌کنند؛ در حالی که بتن با سیمان محتوی تری کلسیم آلومینات کمتر از ۷ درصد، عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد.

مطالعات بعدی به خوبی وجه تمایز بین عملکرد خوب و عالی بتن را نشان داد. تحقیقات انجمن سیمان پرتلند آمریکا نشان داد که برای ساخت بتن، مخلوط با حداکثر ۵/۵ درصد تری کلسیم آلومینات، عملکرد بسیار خوبی در مقاومت سولفاتی دارد و این مطالعات، پایه‌گذار تعیین حریم و مرز در مقدار تری کلسیم آلومینات برای استفاده در سطوح مختلف تماس سولفات شدند.

هنگامی که برای اولین بار حمله سولفاتی توسط کمیته آبادسازی آمریکا USBR^۲ در سال ۱۹۰۸ مشاهده و شناسایی شد، تنها وسیله کنترل حمله، تولید بتن با نفوذپذیری پایین بود [۷]. در صنعت امروزی؛ بتن با نفوذپذیری پایین را به چندین روش می‌توان تولید کرد که این روش‌ها مشتمل بر کاهش نسبت آب به سیمان (که با کاهش مقدار آب یا افزایش مقدار سیمان انجام می‌شود)، انتخاب

1- Ettringite

2- United States Bureau of Reclamation

محاسبه زمان نفوذ ماده خورنده ناشی از پخش و انتشار مدل پیش‌بینی زمان اولیه فرض می‌کند که مکانیزم غالب، انتشار است. قانون دوم FICK شامل معادله (۱) است:

$$\frac{dC}{dt} = D \cdot \frac{d^2C}{dx^2} \quad (1)$$

که در آن،

C: میزان غلظت ماده خورنده محیط

D: ضریب انتشار ظاهری

x: عمق از سطح تماس

t: زمان می‌باشد.

ضریب انتشار، تابع دو عامل زمان و دما است. نرم‌افزار از معادلات (۲) و (۳) برای محاسبه تغییرات زمانی انتشار استفاده می‌کند:

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (2)$$

که در آن،

D(t): ضریب انتشار در زمان t

و D_{ref}: ضریب انتشار در واحد زمان است.

نرم‌افزار براساس مشخصات بتن مورد استفاده (مانند نسبت آب به سیمان و نوع مواد معدنی اضافه شونده) m، D_{ref} را محاسبه می‌کند و مشخصات مخلوط بتنی توسط کاربر تعیین می‌شود. برای اینکه ضریب انتشار به صورت پی‌درپی و بی‌نهایت کم نشود در معادله ۲ فرض بر این است که ماکزیمم زمان کاهش این ضریب ۲۵ سال است و مقدار D(t) پس از ۲۵ سال ثابت باقی می‌ماند. نرم‌افزار از رابطه (۳) برای محاسبه تغییرات دمایی ضریب انتشار استفاده می‌کند:

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp \left[\frac{u}{r} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن:

D(T): ضریب انتشار در دمای T و زمان t

D_{ref}: ضریب انتشار در زمان t_{ref} و در دمای T_{ref}

u: انرژی فعال‌سازی پدیده انتشار (3500 J/mol)

r: ثابت گازها

T: دمای مطلق است.

در معادله (۳)، t_{ref}، ۲۸ روز و T_{ref}، ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. دمای بتن بسته به مشخصات منطقه و توسط کاربر تعیین می‌شود. برای پیدا کردن زمان اولین خوردگی میلگرد با مشتق‌گیری از معادله (۱) که در آن در هر گام مقدار D با استفاده از معادلات (۲) و (۳) اصلاح می‌شود، حاصل می‌گردد.

مصلح مناسب و نسبت‌های اختلاط خوب، جایگزینی درصدی از سیمان با مواد افزودنی معدنی، استفاده از هوای وارد شده به بتن، تراکم مناسب بتن در هنگام بتن‌ریزی و عمل‌آوری مناسب و مؤثر بتن است.

پایین نگه داشتن غلظت یون‌های سولفات در بتن سخت شده، مانع آسیب رسیدن به بتن به واسطه تشکیل اترینگایت از منوسولفات آلومینات می‌شود. تحقیقات نیز صحت تأثیر نفوذپذیری بر دوام بتن در حمله سولفاتی را تأیید می‌کند [۸].

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- ترکیب مخلوط‌های بتن خود تراکم

جدول (۱) ترکیب مخلوط‌های در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است سه طرح مخلوط پایه با نسبت‌های آب به سیمان ۰،۴۵، ۰،۴ و ۰،۳۵ در نظر گرفته شده و در سایر مخلوط‌ها درصد استفاده از میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره تغییر داده شده است.

۲-۲- معرفی نرم‌افزار LIFE 365

نرم‌افزار life365 توسط M.D.A.Thomas, E.C.BENTZ و تحت نظارت ارگان SILICA FUME تهیه شده است. این نرم‌افزار شامل انواع سازه‌های بتنی با قابلیت اعمال انواع اختلاط‌های بتنی می‌باشد و برای پیش‌بینی حداکثر عمر اعضای بتنی تحت شرایط خورنده به کار می‌رود.

آنالیز در نرم‌افزار life 365 به پنج قسمت مجزا تقسیم شده است:

- پیش‌بینی زمان اولین خوردگی میلگرد - که به زمان اولیه t_i مشهور است -
- پیش‌بینی زمانی که خوردگی میلگرد به یک سطح غیر قابل قبول می‌رسد که به زمان انتشار مشهور است. زمان تعمیر و بازسازی، مجموع این دو زمان است.
- تعیین جدول زمانی تعمیر پس از اولین تعمیر
- پیش‌بینی هزینه‌های نگهداری براساس قیمت اولیه بتن و هزینه تعمیراتی آینده
- پیش‌بینی زمان اولیه زمان اولیه به زمانی گفته می‌شود که خوردگی در بتن نفوذ کرده و در سطح میلگرد به حدی برسد که باعث شروع خوردگی شود؛ یا به عبارتی، مدت زمانی که طول می‌کشد تا ماده خورنده از پوشش بتنی عبور کرده و میزان آن در سطح میلگرد به حد کافی برای خوردگی برسد.
- نرم‌افزار از روش ساده شده انتشار FUCHIUN (به صورت خطی) که نیاز به پارامترهای ساده برای محاسبه داشته استفاده می‌کند.

رابطه فوق در شکل (۱) نشان داده شده است. مقدار m براساس داده‌های حاصل از دانشگاه تورنتو و سایر داده‌های منتشره می‌باشد و ضریب انتشار را تا ۲۵ سال کاهش می‌دهد. پس از ۲۵ سال، نرم‌افزار مقدار D را ثابت نگه می‌دارد و فرض می‌کند که هیدراسیون کامل شده است. مقادیر Ct برای پیش‌بینی عمر مورد استفاده قرار می‌گیرد. (مقدار این پارامتر حدود ۰/۴٪ ماده خورنده محیط - بسته به جرم مصالح سیمانی - می‌باشد).

قابل توجه است که این روابط برای بتن با سنگدانه با چگالی معمولی قابل استفاده است و برای بتن سبک قابل استفاده نیست.

۲-۲-۴- تأثیر میکروسیلیس

اضافه کردن میکروسیلیس باعث کاهش ضریب انتشار و نفوذپذیری بتن می‌شود. نرم‌افزار ضریب کاهش محاسبه شده برای سیمان پرتلند را براساس میزان میکروسیلیس به بتن اعمال می‌کند. معادله زیر که براساس تئوری انتشار بالک است مورد استفاده قرار می‌گیرد:

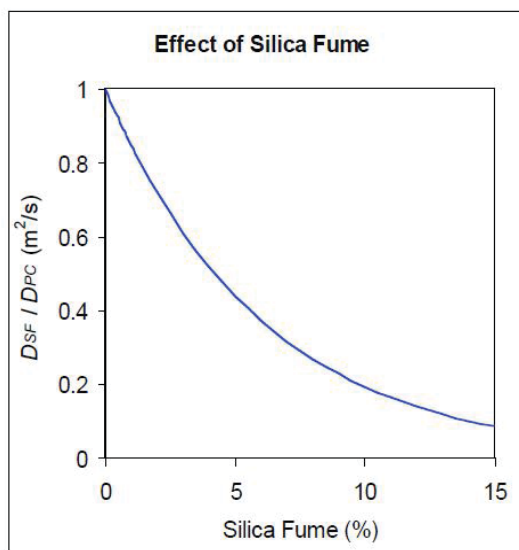
$$DSF = DPC * e^{(-0.165-SF)} \quad (۴)$$

DSF: (ضریب انتشار با میکروسیلیس)

DPC: (ضریب انتشار در حالت عادی)

نتایج تا جایی مناسب است که درصد میکروسیلیس ۱۵٪ باشد. برنامه برای مقادیر بیش از ۱۵٪ مقادیر ضریب انتشار را محاسبه نمی‌کند (شکل ۲).

فرض نرم‌افزار بر این است که میکروسیلیس Ct و m را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.



شکل ۲- تأثیر میکروسیلیس بر DSF

۲-۲-۱- پارامترهای ورودی برای پیش‌بینی اولین خوردگی پارامترهای زیر برای پیش‌بینی اولین زمان خوردگی میلگرد لازم است:

- مشخصات جغرافیایی
 - نوع سازه و ماهیت سطح تماس
 - میزان پوشش بتن روی میلگرد
 - مشخصات طرح اختلاط بتن مانند نسبت آب به سیمان و مقدار و نوع مواد معدنی و نوع فولاد و پوشش‌های آن
- با استفاده از این پارامترها، نرم‌افزار، ضرایب ثابت را برای پیش‌بینی اولین زمان خوردگی در نظر می‌گیرد.

۲-۲-۲- پروفیل دمایی

مدل پروفیل سالیانه دمای محیط را بسته به مشخصات جغرافیایی منطقه تعیین می‌کند. برای مثال اگر کاربر منطقه Moline را انتخاب کند، مدل از پروفیل دمایی این منطقه استفاده خواهد کرد. همچنین کاربر می‌تواند پروفیل دمایی دلخواه خود را در نرم‌افزار وارد کند.

۲-۲-۳- طرح اختلاط بتن پایه

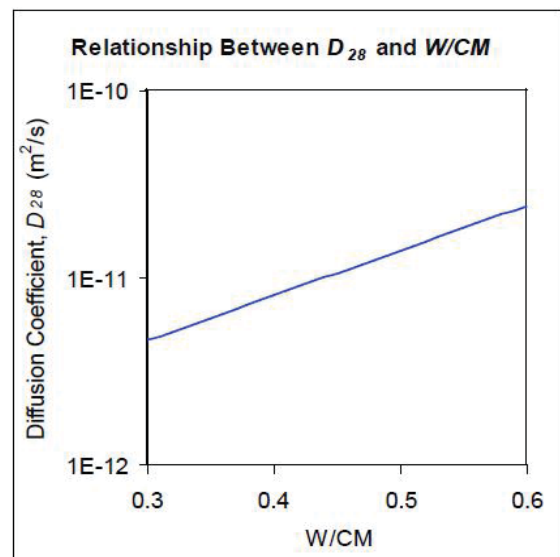
طرح اختلاط پایه انتخابی توسط نرم‌افزار شامل سیمان پرتلند بدون هیچ‌گونه افزودنی برای جلوگیری از خوردگی است. برای حالت پایه، مقادیر زیر فرض شده است:

$$D_{28} = 1 * 10^{(-12.06 + 2.4(w/cm))} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{ضریب انتشار محاسباتی در } 28 \text{ روز})$$

$$m = 0.2$$

$$Ct = 0.05 \% \text{ (wt\% بتن (سطح آستانه خوردگی))}$$

رابطه بین D_{28} و نسبت آب به سیمان براساس تئوری انتشار بالک است.



شکل ۱- رابطه D_{28} و نسبت آب به سیمان

۲-۵- تأثیر سرباره یا خاکستر بادی

فرض بر این است که سرباره یا خاکستر بادی ضریب انتشار D_{28} و یا سطح آستانه خوردگی CT را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین هر دو مصالح نرخ کاهش انتشار را تحت تأثیر قرار می‌دهند (m). بر اساس میزان خاکستر بادی یا سرباره در مخلوط، میزان m اصلاح می‌شود.

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70)$$

نتایج تا جایی معتبر است که میزان خاکستر بادی ۵۰٪ وزنی یا میزان سرباره ۷۰٪ وزنی باشد و مقدار m نیز نمی‌تواند بیش از ۰.۶ باشد. هنگامی که مقدار خاکستر بادی و سرباره به اندازه ماکزیمم استفاده شوند، این حالت رخ می‌دهد.

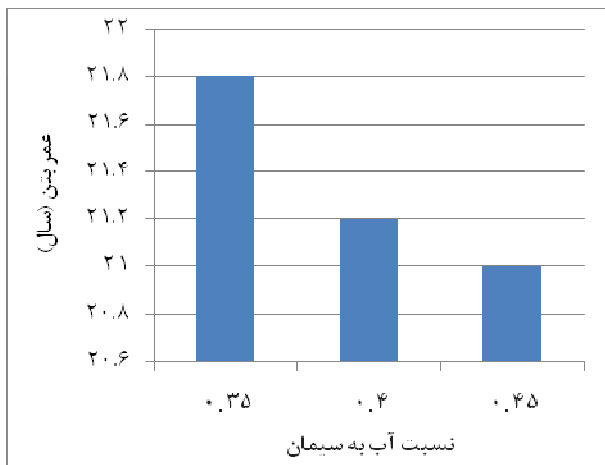
شکل (۳)، تغییرات m برای سه مخلوط با $w/cm = 0.4$ ، با سیمان پرتلند ساده، ۳۰٪ سرباره و ۴۰٪ خاکستر بادی را نشان می‌دهد. جدول (۱)، این مخلوط‌های بتنی و میزان ضریب انتشار محاسباتی را برای ۲۸ روز، ۱۰ سال و ۲۵ سال را نشان می‌دهد. برای زمان‌های بزرگ‌تر از ۲۵ سال، نرم‌افزار از مقادیر محاسباتی برای ۲۵ سال استفاده می‌کند.

۳- نتایج و تفسیر

تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت بتن در برابر سولفات

۳-۱-۱- تأثیر نسبت آب به سیمان بر عمر بتن

شکل (۴) تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر عمر بتن مرجع را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۴۵ به ۰.۳۵، شاهد افزایش جزیی عمر بتن می‌باشیم که این به دلیل کاهش خلل و فرج بتن به دلیل کاهش مقدار آب مصرفی است.



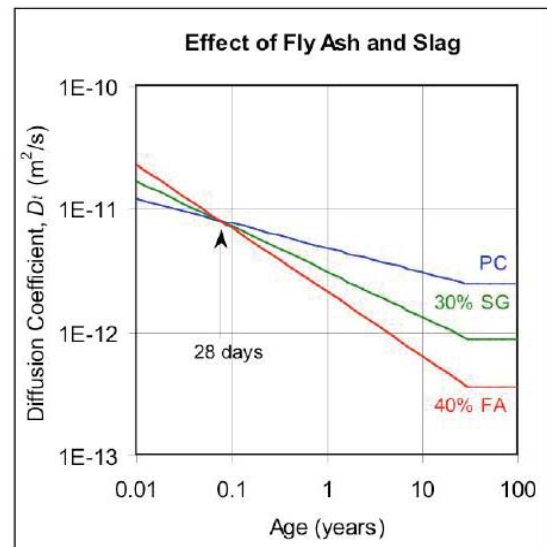
شکل ۴- تأثیر نسبت آب به سیمان بر عمر بتن مرجع

همانطور که در شکل نیز مشخص است با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۴۵ به ۰.۳۵، عمر بتن از ۲۱ سال به ۲۱.۸ سال افزایش یافته است.

شکل (۵) تأثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر زمان وقوع اولین خوردگی را نشان می‌دهد. در این حالت نیز روند تقریباً مشابه شکل (۴) است و با کاهش نسبت آب به سیمان، زمان وقوع اولین خوردگی کمی افزایش پیدا کرده است.

۳-۱-۲- تأثیر نسبت آب به سیمان بر ضریب انتشار

شکل (۶) روند تغییرات ضریب انتشار سولفات در برابر تغییر نسبت آب به سیمان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با کاهش نسبت آب به سیمان ضریب انتشار سولفات در بتن کاهش می‌یابد. این ضریب در نسبت آب به سیمان ۰.۴۵ تقریباً ۱.۷۴ برابر نسبت آب به سیمان ۰.۳۵ است. این کاهش به دلیل کاهش خلل و فرج ناشی از کاهش مقدار آب مصرفی است.



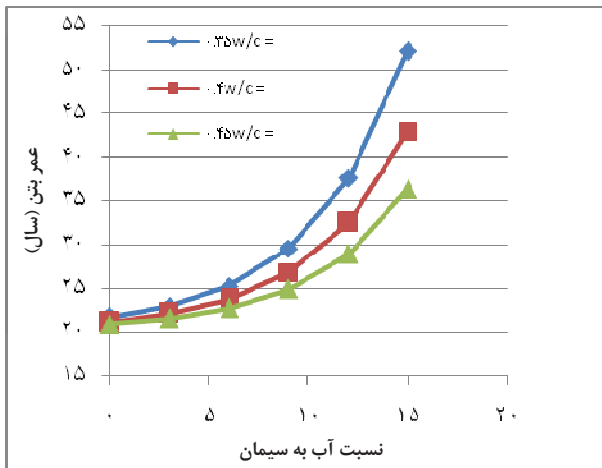
شکل ۳- تأثیر سرباره و خاکستر بادی روی Dt

جدول ۱- تأثیر سرباره و خاکستر بادی روی ضریب انتشار

	m	D_{28}	D_{10y}	D_{25y}
	(<0.60)	($\times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)	($\times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)	($\times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)
PC	0.20	79	30	25
30 percent SG	0.37	79	13	9.3
40 percent FA	0.52	79	6.3	3.9

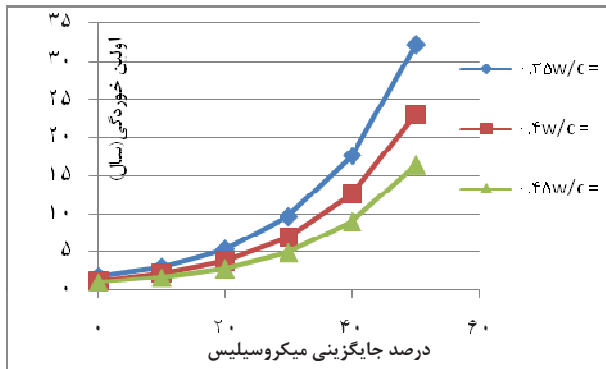
جدول ۲- ترکیب مخلوط انواع بتن خودتراکم ساخته شده

سنگدانه‌ها (kg/m ³)	W/C	آب (kg/m ³)	مواد سیمانی				شناسه مخلوط	ردیف
			خاکستر بادی (kg/m ³)	سرپاره (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)		
1727.2	0.45	171	-	-	-	380	W171	1
1727.2	0.4	152	-	-	-	380	W152	2
1727.2	0.35	133	-	-	-	380	W133	3
1727.2	0.45	171	-	-	11.4	368.6	W171 SI 3	4
1727.2	0.45	171	-	-	22.8	357.2	W171 SI6	5
1727.2	0.45	171	-	-	34.2	345.8	W171 SI 9	6
1727.2	0.45	171	-	-	45.6	334.4	W171 SI 12	7
1727.2	0.45	171	-	-	57	323	W171 SI 15	8
1727.2	0.4	152	-	-	11.4	311.6	W152 SI 3	9
1727.2	0.4	152	-	-	22.8	357.2	W152 SI6	10
1727.2	0.4	152	-	-	34.2	345.8	W152 SI 9	11
1727.2	0.4	152	-	-	45.6	334.4	W152 SI 12	12
1727.2	0.4	152	-	-	57	323	W152 SI 15	13
1727.2	0.35	133	-	-	11.4	311.6	W133 SI 3	14
1727.2	0.35	133	-	-	22.8	357.2	W133 SI6	15
1727.2	0.35	133	-	-	34.2	345.8	W133 SI 9	16
1727.2	0.35	133	-	-	45.6	334.4	W133 SI 12	17
1727.2	0.35	133	-	-	57	323	W133 SI 15	18
1727.2	0.45	171	-	30.4	-	349.6	W171 S 8	19
1727.2	0.45	171	-	60.8	-	319.2	W171 S 16	20
1727.2	0.45	171	-	91.2	-	288.8	W171 S 24	21
1727.2	0.45	171	-	121.6	-	258.4	W171 S 32	22
1727.2	0.45	171	-	152	-	228	W171 S 40	23
1727.2	0.4	152	-	۳۰,۴	-	292.6	W152 S 8	24
1727.2	0.4	152	-	۶۰,۸	-	319.2	W152 S 16	25
1727.2	0.4	152	-	91.2	-	288.8	W152 S 24	26
1727.2	0.4	152	-	121.6	-	258.4	W152 S 32	27
1727.2	0.4	152	-	152	-	228	W152 S 40	28
1727.2	0.35	133	-	30.4	-	292.6	W133 S 8	29
1727.2	0.35	133	-	60.8	-	319.2	W133 S 16	30
1727.2	0.35	133	-	91.2	-	288.8	W133 S 24	31
1727.2	0.35	133	-	121.6	-	258.4	W133 S 32	32
1727.2	0.35	133	-	152	-	228	W133 S 40	33
1727.2	0.45	171	38	-	-	342	W171 F 10	34
1727.2	0.45	171	76	-	-	304	W171 F 20	35
1727.2	0.45	171	114	-	-	266	W171 F 30	36
1727.2	0.45	171	152	-	-	228	W171 F 40	37
1727.2	0.45	171	190	-	-	190	W171 F 50	38
1727.2	0.4	152	32.3	-	-	347.7	W152 F10	39
1727.2	0.4	152	64.6	-	-	315.4	W152 F 20	40
1727.2	0.4	152	96.9	-	-	283.1	W152 F30	41
1727.2	0.4	152	129.2	-	-	250.8	W152 F40	42
1727.2	0.4	152	161.5	-	-	218.5	W152 F50	43
1727.2	0.35	133	32.3	-	-	347.7	W133 F 10	44
1727.2	0.35	133	64.6	-	-	315.4	W133 F 20	45
1727.2	0.35	133	96.9	-	-	283.1	W133 F 30	46
1727.2	0.35	133	129.2	-	-	250.8	W133 F 40	47
1727.2	0.35	133	161.5	-	-	218.5	W133 F 50	48



شکل ۷- تأثیر استفاده از میکروسیلیس بر عمر بتن

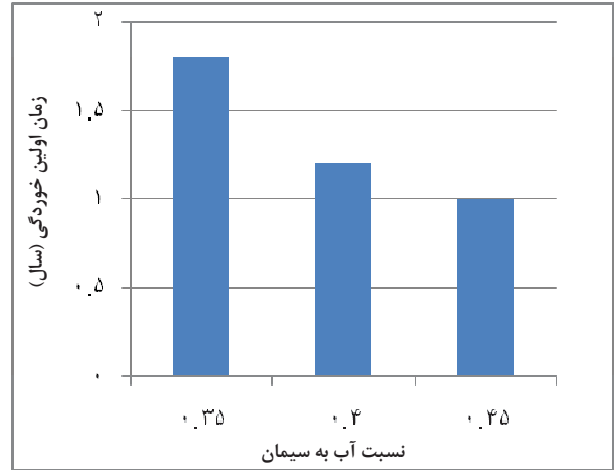
شکل (۸)، اثر استفاده از میکروسیلیس بر زمان وقوع اولین خوردگی در نسبت‌های متفاوت آب به سیمان را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است میکروسیلیس تأثیر چشمگیری در افزایش زمان وقوع اولین خوردگی نیز دارد.



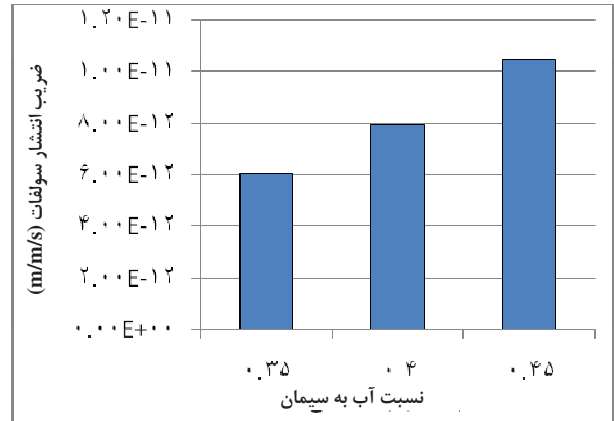
شکل ۸- تأثیر استفاده از میکروسیلیس بر زمان اولین خوردگی

۳-۳- تأثیر سرپاره بر مقاومت بتن در برابر سولفات

شکل (۹)، تأثیر استفاده از سرپاره در سه نسبت مختلف آب به سیمان را بر عمر بتن تحت حمله سولفاتی نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل برمی‌آید استفاده از سرپاره باعث افزایش عمر بتن شده است. البته این افزایش عمر در مقایسه با استفاده از میکروسیلیس بسیار کمتر است و این به دلیل تفاوت در ساختار ریز این دو افزودنی و تفاوت نرمی آنهاست. با افزایش ۸ تا ۴۰ درصد وزنی سرپاره به بتن با نسبت آب به سیمان ۰،۴۵، عمر بتن از ۲۱ به ۲۱،۵ سال افزایش یافته است در حالی که در نسبت آب به سیمان ۰،۴، این افزایش عمر از ۲۱،۴ به ۲۲،۲ بوده است.



شکل ۵- تأثیر نسبت آب به سیمان بر زمان وقوع اولین خوردگی بتن مرجع



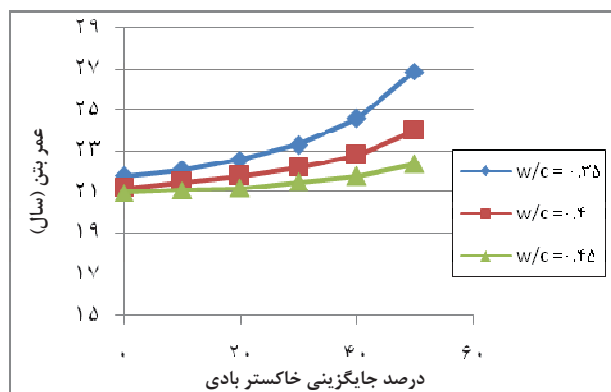
شکل ۶- تأثیر نسبت آب به سیمان بر ضریب انتشار سولفات

۳-۲- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت بتن در برابر سولفات

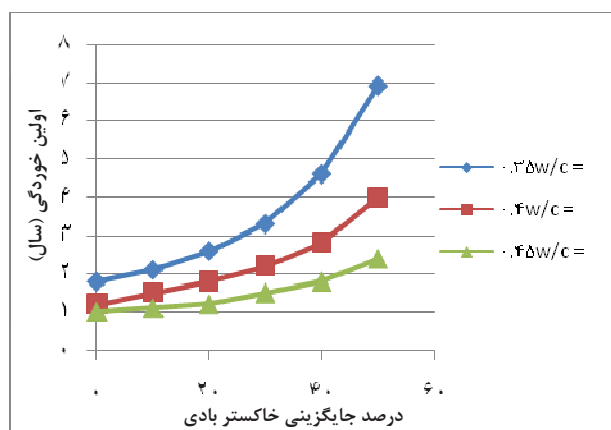
همان‌طور که انتظار می‌رفت میکروسیلیس یکی از عوامل بسیار مهم در افزایش مقاومت بتن در برابر سولفات بوده و این، به دلیل خواص بسیار مطلوب میکروسیلیس در کاهش تخلخل بتن و نفوذپذیری آن می‌باشد. به‌علاوه، میکروسیلیس بر خواص منطقه انتقالی بتن تأثیر چشمگیری دارد که باعث افزایش خواص مکانیکی بتن نیز می‌شود. شکل (۷)، تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف میکروسیلیس در افزایش عمر بتن تحت حمله سولفاتی را در سه نسبت متفاوت آب به سیمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل برمی‌آید با افزایش ۳ تا ۱۵ درصد میکروسیلیس به بتن با نسبت آب به سیمان ۰،۴۵ عمر بتن به ترتیب از ۲۱،۶ سال به ۳۱،۴ سال افزایش یافته است. این افزایش عمر بتن در نسبت آب به سیمان ۰،۴ از ۲۲،۲ تا ۴۳ سال است و در نسبت آب به سیمان ۰،۳۵ این اعداد به ترتیب ۲۳ و ۵۲،۲ سال به‌دست آمده‌اند.

به دست آمده‌اند.

شکل (۱۲)، اثر استفاده از خاکستر بادی بر زمان وقوع اولین خوردگی در نسبت‌های متفاوت آب به سیمان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است خاکستر بادی تأثیر چشمگیری در افزایش زمان وقوع اولین خوردگی نیز دارد.



شکل ۱۱- تأثیر استفاده از خاکستر بادی بر عمر بتن



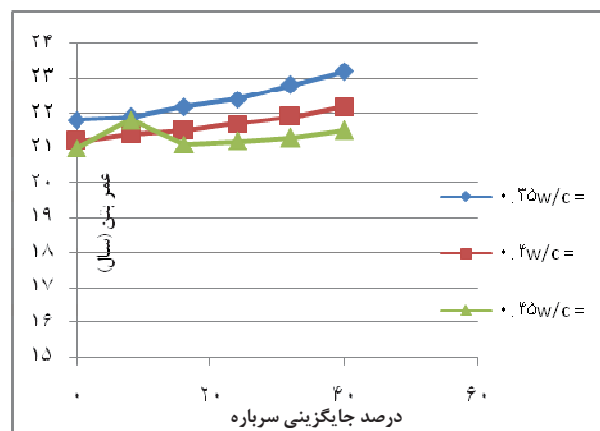
شکل ۱۲- تأثیر استفاده از خاکستر بادی بر زمان اولین خوردگی

۳-۵- تأثیر استفاده از میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی بر ضریب انتشار سولفات

شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، تأثیر استفاده از میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی بر ضریب انتشار سولفات در بتن را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است با افزایش درصد استفاده از میکروسیلیس، ضریب انتشار به شدت کاهش می‌یابد که این یکی از دلایل افزایش مقاومت در برابر سولفات بتن است. میکروسیلیس به دلیل اندازه بسیار ریزی که دارد باعث پر کردن خلل و فرج بتن شده و نفوذپذیری را به شدت کاهش می‌دهد.

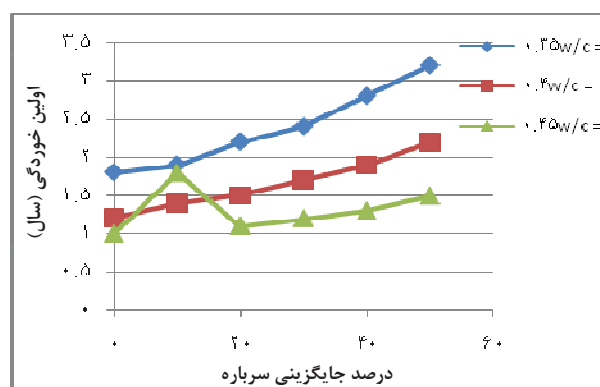
این ضریب در حالتی که از ۳ درصد میکروسیلیس استفاده شده است برابر $6.38E-12$ متر بر ثانیه است و در حالتی که استفاده از میکروسیلیس به ۱۵ درصد می‌رسد این ضریب برابر $8.81E-13$

و نهایتاً در نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ با افزایش سرباره از ۸ تا ۴۰ درصد، عمر بتن از ۲۱,۹ به ۲۳,۲ سال افزایش یافته است.



شکل ۹- تأثیر استفاده از سرباره بر عمر بتن

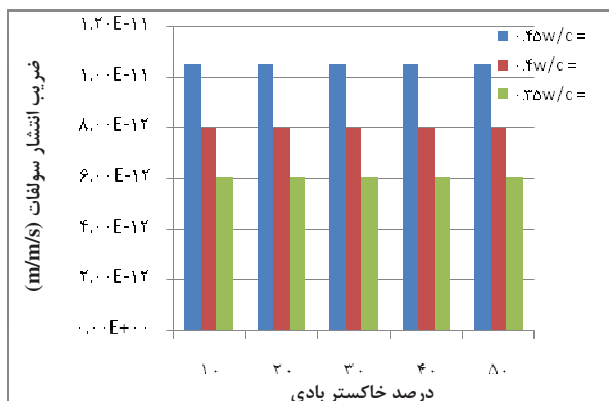
شکل (۱۰)، اثر استفاده از درصد‌های مختلف سرباره بر زمان وقوع اولین خوردگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل آمده است استفاده از سرباره باعث افزایش ناچیزی در زمان وقوع اولین خوردگی شده است.



شکل ۱۰- تأثیر استفاده از سرباره بر زمان اولین خوردگی

۳-۴- تأثیر خاکستر بادی بر مقاومت بتن در برابر سولفات

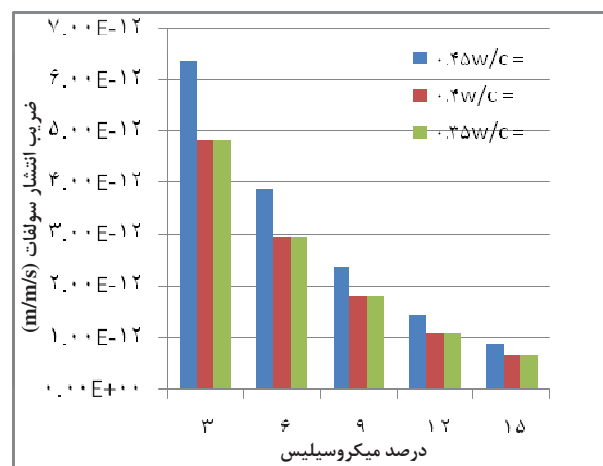
همانطور که انتظار می‌رفت خاکستر بادی نیز یکی از عوامل بسیار مهم در افزایش مقاومت در برابر سولفات بتن است. شکل (۱۱) تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف خاکستر بادی در افزایش عمر بتن تحت حمله سولفاتی در سه نسبت متفاوت آب به سیمان را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل برمی‌آید با افزایش ۱۰ تا ۵۰ درصد خاکستر بادی به بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۴۵، عمر بتن به ترتیب از ۲۱,۱ سال به ۲۲,۴ سال افزایش یافته است. این افزایش عمر بتن در نسبت آب به سیمان ۰,۴ از ۲۱,۵ تا ۲۴ سال است و در نسبت آب به سیمان ۰,۳۵، این اعداد به ترتیب ۲۲,۱ و ۲۶,۹ سال



شکل ۱۵- تأثیر خاکستر بادی بر ضریب انتشار سولفات

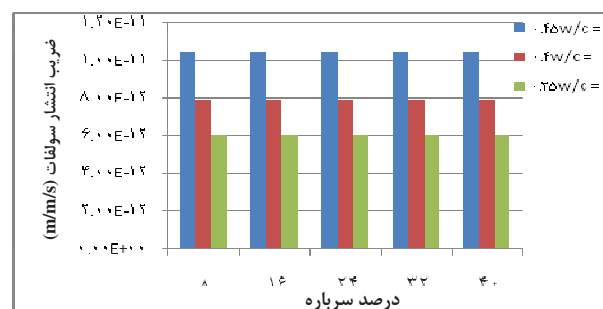
- کاهش نسبت آب به سیمان باعث افزایش عمر بتن تحت حمله سولفاتی می‌شود، البته تأثیر آن خیلی زیاد نیست.
- کاهش نسبت آب به سیمان، زمان وقوع اولین خوردگی را نیز به تأخیر می‌اندازد و با کاهش این نسبت از ۰,۴۵ به ۰,۳۵، زمان وقوع اولین خوردگی ۰,۸ سال افزایش یافته است.
- با کاهش نسبت آب به سیمان، ضریب انتشار سولفات در بتن کاهش می‌یابد. این ضریب در نسبت آب به سیمان ۰,۴۵ تقریباً ۱,۷۴ برابر نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ است. این کاهش به دلیل کاهش خلل و فرج ناشی از کاهش مقدار آب مصرفی است.
- میکروسیلیس باعث بهبود بسیار زیاد مقاومت در برابر سولفات می‌شود. افزایش ۳ تا ۱۵ درصد میکروسیلیس به بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵، عمر بتن به ترتیب از ۲۳ سال به ۵۲,۲ سال افزایش یافته است.
- افزایش ۸ تا ۴۰ درصد سرباره به بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵، عمر بتن از ۲۱,۴ به ۲۲,۲ سال افزایش یافته است.
- خاکستر بادی نیز بر مقاومت سولفاتی بتن تأثیرگذار است. با افزایش ۱۰ تا ۵۰ درصد خاکستر بادی به بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵، عمر بتن به ترتیب از ۲۲,۱ سال به ۲۶,۹ سال افزایش یافته است.

می‌شود؛ به عبارتی ضریب انتشار مخلوط دارای ۳ درصد میکروسیلیس تقریباً ۷,۲۴ برابر مخلوط دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس است که این نشان‌دهنده تأثیر بالای میکروسیلیس در کاهش نفوذپذیری است.



شکل ۱۳- تأثیر میکروسیلیس بر ضریب انتشار سولفات

در مقابل سرباره و خاکستر بادی همان‌طور که شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهند تأثیری بر ضریب انتشار سولفات و نفوذپذیری بتن ندارد و هرچند نسبت به بتن مرجع، ضریب انتشار پایین‌تری دارند ولی افزایش درصد استفاده از آن‌ها تغییری در ضریب انتشار نمی‌دهد.



شکل ۱۴- تأثیر سرباره بر ضریب انتشار سولفات

مراجع

- American society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Length change of Hydraulic-cement Mortars Exposed to sulfate solution," C1012-97, Philadelphia, PA.
- American Concrete institute, "Guide to Durable Concrete," ACI 201,2R-92, ACI Committee 201, Detroit, ML (1995).
- American Society for Testing and Materials, "Standard test method for potential Expansion of Portland-cement Mortars Exposed to sulfate," C452-95, Philadelphia, PA.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج و یافته‌های به‌دست آمده در این تحقیق می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت.

- با توجه به اهمیت پدافند غیرعامل و بودجه‌هایی که در این رابطه هزینه می‌گردد، اتخاذ تدابیر اشاره شده در این پژوهش، باعث کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری، مرمت و بازسازی این سازه‌ها خواهد گردید. همچنین باعث افزایش زمان سرویس‌دهی و استفاده مفید از سازه‌های زیرزمینی و پدافند غیرعامل خواهد شد.

4. Bellport, B, p, "Combating sulfate Attack on concrete on bureau of Reclamation projects," Performance of concrete: Resistance of concreteto sulfate and other Environmental conditions, E.G.Swenson (ed), university of torento press, Canada,pp.77-92.
5. Freeman, R. B, and carrasquille, R. L, Optimization of the physical and compositional characteristics of fly Ash cement for the production of sulfate resistant concrete, Research Report 481-8F, Center for Transportation Research, The university of Texas at Austin,August (1992).
6. Patzias, T, "Evaluation of sulfate Resistance of Hydraulic-Cement Mortars by ASTM C1012 Test Methode," Concrete Durability-The Katherine and Bryant Mather international Concrete institute, Detroit,MI, (1987).
7. Skalny, Marchand. "Sulfate Attack on concrete", Modern concrete Technology series, spoon press, no.1, January (2001), pp.43-114.
8. Lohn,B. stephens and Ramn, L. Carrasquillo "Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete" center for transportation Research The university of Texas,Research Report 1706-3, Revised Decebber (2000).

Prediction of the Effect of Silica Foam, Slag and Fly Ash on Concrete Resistance Against Sulphate Using The LIFE365 Software

H. R. Rabiei Far¹

M.H. Falahi²

Abstract

In this research for consideration of concrete durability against sulphate attack, 48 various concrete mixtures were compared. Three various water-cement ratios -0.35, 0.4, 0.45- have been used.in these mixtures from various percentage of slag , fly ash and silica foam .

In which , the water cement ratio for 0% to 40% , silica foam from 0% to 15% and fly ash from 0% to 50%.

Results show that reduction of water-cement ratio from 0.45 to 0.35 increases concrete life about 0.8 year. While an Addition of 15% of silica foam has the most important effect on increasing the concrete life from 21 to 52.2 years , While this effect is 23.2 and 26.9 years for slag and fly ash in turn.

Key Words: *Sulphate, Silica Foam, Fly Ash, Slag, Concrete Resistance*

1- Assistant Professor and Academic Member of Islamic Azad University, Tehran South Branch (Email: Rabiefar@yahoo.com)

2- MS in Passive Defense Engineering, Safe Structures Major- Imam Hossein Comprehensive University (Pbh) - Writer in Charge (Email: mh.falahi0@yahoo.com)