

بررسی راهکارهای اجرایی مقابله با حمله سولفاتی و کلرایدی در سگمنتهای پیش ساخته بتنی لاینینگ تونلهای بلند

مجید احمدخانیها

کارشناس تکنولوژی بتن شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

Email : m_ahmadkhaniha@yahoo.com

چکیده

امروزه با توجه به سرعت و دقت در اجرا، حفاری تونل‌های بلند به صورت ماشینی (با دستگاه TBM) متداول و مرسوم می‌باشد. در این روش حفاری، لاینینگ بتنی تونل از قطعات سگمنتهای پیش‌ساخته تشکیل می‌شود. در کارخانه سگمنت‌سازی جهت تسریع در روند تولید و کسب مقاومت‌های کوتاه‌مدت لازم، از عمل‌آوری تسریع شده با بخار آب استفاده می‌گردد. چنانچه این تونل‌ها به مانند تونل کنجانچم از طرح ویژه گرمسیری در سازندهای ژئوتکنیک حاوی یونهای مهاجم سولفات و کلراید واقع گردند، برای کنترل حمله این یونهای مهاجم به سگمنتهای بتنی می‌بایست تمهیداتی در نظر گرفته شود. یکی از مهمترین تمهیدات، جایگزین نمودن بخشی از سیمان در طرح اختلاط با مواد افزودنی معدنی از جمله سرباره کوره آهن‌گدازی، دوده سیلیسی، خاکستر بادی می‌باشد. در این تحقیق تلاش شده است که جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با مواد افزودنی معدنی از نظر پارامترهای اجرایی از جمله روند کسب مقاومت، حفظ کارایی، درصد هوا، عدم ترک خوردگی و ارزیابی اقتصادی بررسی گردد. در پایان به این نتیجه دست یافته شد که جایگزین نمودن بخشی از سیمان به ترتیب اولویت با ۳۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی، ۲۰ درصد خاکستر بادی کلاس F و ۷ درصد دوده سیلیسی بسیار مؤثر خواهد بود و هیچگونه مشکلی در سازگاری با عمل‌آوری تسریع شده سگمنتها نخواهد داشت.

کلمات کلیدی: حمله سولفاتی، حمله کلرایدی، سرباره، خاکستر بادی، دوده سیلیسی

۱. مقدمه

تونل کنجانچم یکی از پروژه‌های طرح ویژه گرمسیری با هدف مدیریت و انتقال آبهای مرزی غرب کشور می‌باشد. این تونل به طول ۱۲ کیلومتر در حوالی شهر ایلام واقع شده است. در مطالعات ژئوتکنیک این تونل ریسک وجود یونهای سولفات و کلراید در سازندهای پیرامون تونل (عوامل محیطی) مطرح گردید که با تدقیق این داده‌ها براساس آزمایشهای متعدد در یک دوره زمانی یکساله، از نظر حمله سولفاتی در شرایط شدید و از نظر حمله کلرایدی در شرایط فوق‌العاده شدید طبقه‌بندی گردید. بنابراین تلاش شد تا قبل از تولید سگمنتهای بتنی لاینینگ تونل، به منظور جلوگیری از حمله سولفاتی خارجی و حمله کلرایدی به بتن تمهیدات لازم در طرح اختلاط بتن بررسی شود. قابل ذکر است تمامی آزمایش‌ها در این بررسی به غیر از آزمایش‌های دوام (که در آزمایشگاه آزمون فولاد انجام شده است) در آزمایشگاه کارگاه خط ۷ متروی تهران انجام شده است.

۲. شناسایی مکانیسم حملات سولفاتی و کلرایدی

در حمله سولفاتی خارجی به بتن، یونهای مهاجم سولفات با Ca(OH)_2 و C-S-H حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهد و باعث از دست دادن مقاومت می‌شوند. همچنین یون سولفات با C_3A سیمان واکنش می‌دهد و تولید اترینگایت می‌نماید که تحت تاثیر انبساط حاصل از آن، به بتن صدمه وارد می‌شود. [۱]

در حمله کلرایدی، یون مهاجم کلر از سطح بتن به همراه آب به داخل محیط بتن نفوذ می‌نماید و با تشکیل اسید کلریدریک باعث کاهش pH محیط بتن می‌شود و این امر سبب از بین رفتن لایه محافظتی آرماتور شده، اکسید شدن آرماتورها و انبساط حاصل از آن به بتن صدمه وارد می‌نماید. [۲]

۳. تشریح راهکار مقابله با حملات سولفاتی و کلرایدی

برای مقابله با حملات یونهای مهاجم سولفات و کلراید راهکار موثر استفاده از جایگزینی بخشی از سیمان طرح اختلاط با مواد افزودنی معدنی از جمله سرباره کوره آهن‌گدازی، دوده سیلیسی و خاکستر بادی کلاس F می‌باشد. به این ترتیب این مواد افزودنی معدنی با Ca(OH)_2 واکنش داده و تولید C-S-H می‌نمایند. همچنین این مواد با C_3A واکنش داده و آن را تثبیت نموده که تعداد C_3A آزاد برای واکنش با سولفات را کم می‌نمایند. دیگر اثر این مواد افزودنی معدنی کاهش نفوذپذیری بتن می‌باشند تا ورود یونهای مهاجم سولفات و کلراید به داخل بتن را با مشکل روبرو کنند. از این رو حمله کلرایدی به آرماتورهای بتن مسلح و همچنین حمله سولفاتی خارجی به بتن، کاهش می‌یابد. [۳]

۳-۱. ارزیابی آزمایشگاهی راهکارها

برای مقابله با عوامل محیطی مهاجم در این پروژه (که ریسک توامان حمله سولفاتی شدید خارجی و حمله کلرایدی فوق‌العاده شدید به بتن مسلح وجود داشت) استفاده از جایگزینی بخشی از سیمان تیپ ۲ پرتلند معمولی با مواد افزودنی معدنی در نظر گرفته شد. خاطر نشان می‌شود که این مواد افزودنی معدنی به دلیل سخت‌تر بودن نسبت به کلینکر سیمان می‌بایست جدا از کلینکر آسیاب گردد تا نرم‌تر از ذرات سیمان شوند و شاخص فعالیت آنها افزایش یابد. بهترین گزینه‌های مواد افزودنی معدنی در دسترس پروژه، سرباره کوره آهن‌گدازی (تولیدی کارخانه ذوب آهن اصفهان)، خاکستر بادی کلاس F (وارداتی از کشور هند) و دوده سیلیسی (تولیدی کارخانه فرو سیلیس ازنا) بود که جزئیات آنالیز شیمیایی آنها در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

جدول شماره ۱- آنالیز شیمیایی مواد افزودنی معدنی

Item	OPC (II)	Slag	Fly Ash	Silica Fume
SiO ₂	20.4	33.7	46.5	94.8
Al ₂ O ₃	4.72	14.1	21.7	0.15
Fe ₂ O ₃	3.8	0.51	5.6	0.14
CaO	-	43.51	4.28	0.35
MgO	1.02	5.12	3.2	0.18
SO ₃	3.1	1.34	0.8	0.29
S	-	1.2	-	-
EA	0.4	-	-	-
LOI	0.95	0.2	0.1	2.5
IR	0.14	-	-	-
Moi. Con	-	0.14	0.11	1.2

به منظور بررسی راهکارهای تئوری مطروحه آزمایشهای نفوذپذیری بتن مسلح برای اعمال دوام در شرایط محیطی که شامل ۳ آزمایش ذیل می‌باشد [۴]، انجام گردید.

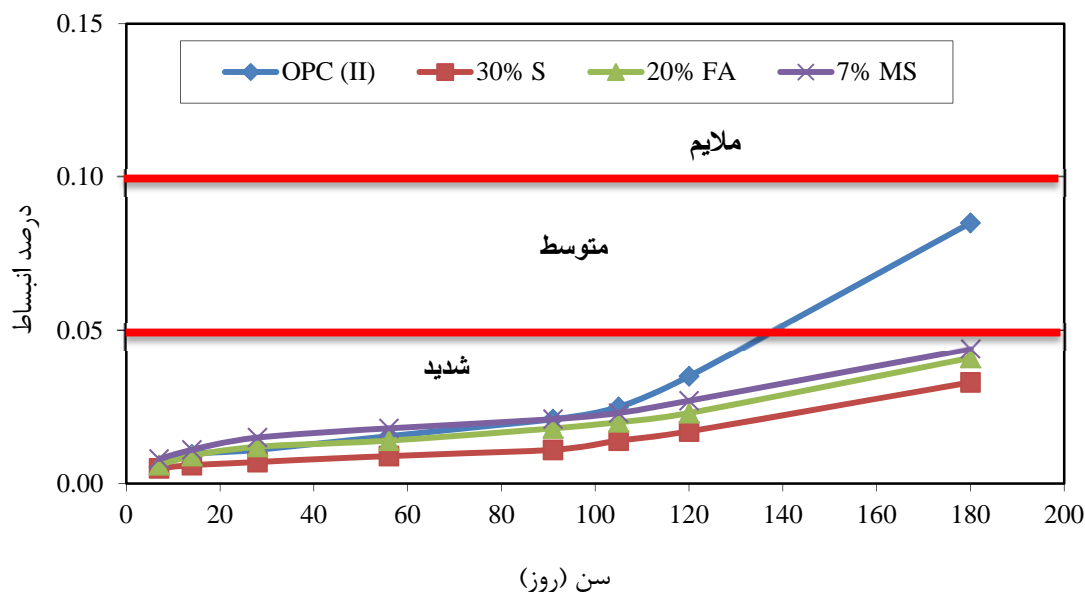
- جذب آب نیم ساعته (در سن ۲۸ روز) براساس استاندارد BS 1881, PART 122, 1983
- نفوذ آب (در سن ۲۸ روز) براساس استاندارد BS EN 12390-8: 2000
- نفوذ کلرید (در سن ۲۸ روز) براساس استاندارد ASTM 1202, 1994

به این صورت که نمونه‌هایی از بتن مطابق با استانداردهای مربوطه با جایگزینی سیمان تیپ ۲ پرتلند معمولی با سرباره، خاکستر بادی کلاس F و دوده سیلیسی به ترتیب با درصد‌های ۳۰ و ۲۰ و ۷ درصد ساخته شد. خاطر نشان می‌نماید درصد‌های مذکور براساس بررسی آزمایشگاهی دیگری تدقیق شده است که موضوع این مقاله نمی‌باشد و در مقاله دیگری تشریح خواهد شد. قابل ذکر است تمامی نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایشهای این بررسی مطابق با طرح اختلاط بتن سگمنتها یعنی ۹۷۷ کیلوگرم (۵۸٪ مصالح سنگی) ماسه ۵-۰، ۸۵ کیلوگرم (۵٪ مصالح سنگی) شن نخودی ۵-۹/۵، ۶۴۰ کیلوگرم (۳۷٪ درصد مصالح سنگی) شن بادامی ۱۹-۹/۵، ۵۰۰ کیلوگرم مواد سیمانی، نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و فوق‌روان کننده ۰/۱٪ وزن مواد سیمانی ساخته شد. بر روی این نمونه‌ها آزمایشهای تعیین دوام بتن در آزمایشگاه آزمون فولاد اصفهان انجام گرفت که نتایج آن در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول شماره ۲- نتایج آزمایش‌های دوام برای جایگزینی‌های مختلف بخشی از سیمان در بتن

آزمایش	حداکثر مجاز	سیمان تیپ ۲	سرباره ۳۰٪	خاکستر بادی ۲۰٪	دوده سیلیسی ۷٪
جذب آب نیم ساعته (درصد)	۲	۳/۵	۰/۹۴	۰/۹۸	۱/۱۰
نفوذ آب (میلیمتر)	۱۰	۱۳	۶	۸	۷
نفوذ کلرید (کلمب)	۲۰۰۰	۳۱۵۰	۱۲۷۵	۱۴۵۰	۱۰۵۰

همچنین براساس استاندارد ASTM C 1012 در آزمایشگاه کارگاه خط ۷ متروی تهران، نمونه‌های ملات سیمان از نوع اختلاط سیمان ساخته شد و در معرض محلول حاوی سولفات قرار داده شد. منحنی نتایج مربوطه در نمودار شماره ۱ به نمایش در آمده است.



نمودار شماره ۱- نتایج انبساط ملات سیمان در معرض محلول سولفات براساس استاندارد ASTM C1012

براساس این بررسی به ترتیب استفاده از ۳۰ درصد جایگزینی سرباره، ۲۰ درصد خاکستر بادی و ۷ درصد دوده سیلیسی در کنترل حمله سولفاتی به نسبت سیمان تیپ ۲ مفیدتر خواهد بود.

۲-۳. ارزیابی معیارهای اجرایی راهکارها

در سگمنت‌سازی پیش‌ساخته مهمترین معیارهای پذیرش طرح اختلاط بتن به شرح ذیل می‌باشد:

- مقاومت کوتاه‌مدت
- مقاومت بلندمدت
- کارایی و حفظ اسلامپ
- درصد هوا
- عدم ترک‌خوردگی

با توجه به اجرایی بودن پروژه لازم بود که تاثیرات اجرایی راهکارها به طور ویژه مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۲-۳. مقاومت کوتاه مدت

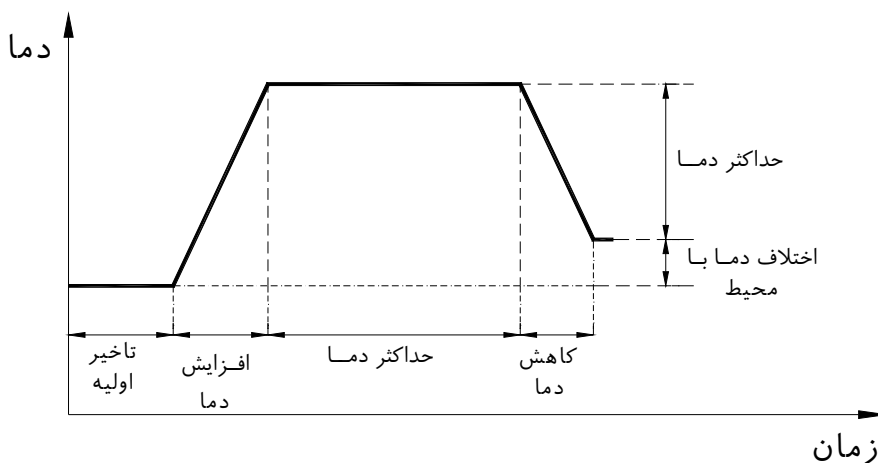
در سگمنت‌سازی پیش‌ساخته یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی و پذیرش طرح اختلاط بتن، مقاومت کوتاه‌مدت می‌باشد. این بدان دلیل است که در تولید قطعات پیش‌ساخته جهت تسریع در روند کسب مقاومت از عمل‌آوری تسریع شده با بخار استفاده می‌شود تا زمان کسب حداقل مقاومتی که قطعات بتوانند وزن خود را تحمل کنند، کاهش یابد. [5] در این پروژه با

توجه به شکل قالب سگمنتها لازم بود که قبل از بازنمودن قالبها و خارج نمودن سگمنتهای بتنی، سگمنتها مقاومت فشاری حداقل ۱۵ مگاپاسکالی (براساس نمونه‌های استوانه‌ای) کسب کنند. در اینجا لازم است عمل‌آوری تسریع شده تشریح گردد.

سیکل عمل‌آوری با بخار از چهار بخش ذیل تشکیل شده است :

- تاخیر زمانی اولیه پیش از اعمال گرما
- افزایش تدریجی دما
- نگهداری در دمای ثابت
- کاهش تدریجی دما

تمامی مراحل فوق به همراه بخاردهی و در محیط اشباع از بخار انجام می‌گیرد. [6] در نمودار شماره ۲ نمونه‌ای شماتیک از یک سیکل عمل‌آوری با بخار در حالت ایده‌آل آورده شده است.



نمودار شماره ۲- الگوی تغییرات دما بر حسب زمان در عمل‌آوری بخار

- تاخیر اولیه پیش از اعمال بخار
با توجه به تبعات منفی دما در مراحل اولیه گیرش بر مقاومت بتن، باید از افزایش فوق‌العاده دما در مراحل اولیه گیرش به خصوص در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالا جلوگیری نمود. بنابراین مطابق با میزان مقاومت مورد نیاز، تاخیر اولیه در شروع عمل‌آوری بتن با بخار آب، در بالا بردن کیفیت سودمند می‌باشد. بنابراین در فرآیند تولید بایستی تاخیری در حدود ۶۰ تا ۹۰ دقیقه منظور گردد.
- افزایش دما
بروز تغییرات شدید دمای بتن ریسک ایجاد تنش‌های داخلی و ترک‌خوردگی بر اثر آن را افزایش می‌دهد (شوک حرارتی). بنابراین کاهش و افزایش دمای بتن باید بصورت تدریجی و با آهنگ ملایم انجام شود. نرخ افزایش دما در این مرحله باید ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد در ساعت انتخاب گردد. مدت زمان این مرحله بسته به شرایط آب و هوایی متفاوت و معمولاً بین ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود.
- درجه حرارت عمل‌آوری
پس از افزایش دما با نرخ تعیین شده، دما در یک درجه حرارت بین ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد تثبیت می‌شود و برای مدت حداقل ۳ ساعت بتن در این دما در معرض بخار و حرارت قرار می‌گیرد. افزایش دما در این مرحله بیش از مقادیر تعیین شده تاثیر نامطلوب بر مقاومت بتن داشته و مقاومت دراز مدت را کاهش می‌دهد. [7]

• کاهش دما

به منظور جلوگیری از شوک حرارتی، کاهش دما با نرخ کنترل شده‌ای بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد بر ساعت (همانند آهنگ افزایش دما) انجام می‌گیرد. این روند تا هنگامی ادامه می‌یابد که اختلاف دمای قطعات بتنی با محیط پیرامون به حدود ۲۰ درجه فارینهایت و یا حدود ۱۱ درجه سانتیگراد کاهش یابد. مدت زمان کاهش درجه حرارت بسته به شرایط آب و هوایی متغیر بوده و بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

در این پروژه با توجه به شرایط اجرایی و استفاده از قالبها در دو شیفت متوالی در یک شبانه‌روز کاری، دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و آهنگ افزایش و کاهش دما ۲۵ درجه سانتیگراد در ساعت و همچنین دمای حداکثر ۶۰ درجه اعمال شده بود. بنابراین با این اوصاف زمان تاخیر اولیه ۱ ساعت، افزایش دما ۱/۵ ساعت، ماند در حداکثر دما ۳/۵ ساعت و زمان کاهش دما ۱ ساعت در نظر گرفته شده بود.

همانطور که می‌دانیم روند کسب مقاومت کوتاه‌مدت بتن با جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی معدنی تغییر می‌یابد. نتایج مقاومت فشاری کوتاه‌مدت پس از پایان سیکل عمل‌آوری تسریع شده ۶ ساعته با شرایط فوق‌الذکر به شرح جدول ذیل می‌باشد:

جدول شماره ۳- نتایج مقاومت فشاری کوتاه‌مدت نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای بتن

آزمایش	دوده سیلیسی ٪۷	خاکستر بادی ٪۲۰	سرباره ٪۳۰	سیمان پرتلند تیپ ۲
مقاومت فشاری ۶ ساعته (مگاپاسکال)	۱۹	۱۴	۱۳	۲۰

با کسب نتایج جدول فوق مقاومت کوتاه مدت نمونه‌های با جایگزینی سرباره و خاکستر بادی مردود بود. بنابراین لازم بود که برای افزایش مقاومت‌های کوتاه‌مدت بررسی های جامعی انجام گردد. در ابتدا چندین ایده مطرح گردید از جمله:

- ✓ افزایش مدت زمان عمل‌آوری
- ✓ افزایش دمای حداکثر
- ✓ بهبود کیفیت مواد افزودنی معدنی

با افزایش ۲ ساعته سیکل عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌های سرباره و خاکستر بادی به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۷ مگاپاسکال رسید ولی از آنجا که به شیفتهای کاری و راندمان تولید کارخانه لطمه وارد نمود، این راهکار اجرایی نشد.

خاکستر بادی گزینه بومی نیست بنابراین بهبود کیفیت آن در دسترس نبود و به ناچار با افزایش دمای عمل‌آوری به ۷۰ درجه سانتیگراد، نمونه‌های دارای خاکستر بادی به مقاومت ۶ ساعته ۱۶/۵ مگاپاسکال رسید ولی درباره سرباره که گزینه بومی بود با افزایش بلین سرباره از ۳۸۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم به ۴۲۰۰ مشکل کسب مقاومت کوتاه‌مدت آن برطرف گردید و مقاومت فشاری نمونه های حاوی سرباره به ۱۷/۵ مگاپاسکال رسید.

۳-۲-۲. مقاومت بلند مدت

به طور کلی به دلیل کسب مقاومت‌های کوتاه‌مدت در سگمنت سازی‌های بتنی، به ناچار می‌بایست از عبارهای بالای سیمان در بتن سگمنتها استفاده شود و همین امر سبب می‌شود تا در سنین ۲۸ روزه، بتن مقاومت‌های بیشتر از نیاز را کسب نماید. برای این پروژه مقاومت فشاری مشخصه نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روز ۴۰ مگاپاسکال تعیین گردیده بود که خوشبختانه جایگزین نمودن سیمان با مواد افزودنی معدنی علیرغم تغییر در روند کسب مقاومت به دلیل فوق‌الذکر خللی در کسب مقاومت‌های موردنیاز ایجاد نمود و از این لحاظ تمامی نتایج قابل قبول بود.

۳-۲-۳. کارایی و حفظ اسلامپ

به دلیل شکل قالبهای سگمنت و شرایط اجرایی کارخانه، یکی از معیارهای مهم اجرایی در تولید سگمنتهای بتنی کارایی و حفظ اسلامپ حداقل ۱۷ سانتیمتر در ۳۰ دقیقه پس از بتن‌ریزی می‌باشد که لزوم استفاده از فوق روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات را ایجاد می‌نماید. خوشبختانه در حال حاضر فوق روان‌کننده‌های موجود در بازار پاسخگوی این نیاز بود و با کمی اصلاح و طولانی نمودن زنجیره پلی‌کربوکسیلاتها این مهم نیز به انجام رسید.

۳-۲-۴. درصد هوا

به دلیل شکل خاص و انحنای قالب سگمنتها لازم است که درصد هوا موجود در بتن تازه به دقت بررسی گردد و حباب‌های ناخواسته تولید شده از برخی فوق روان‌کننده‌ها کنترل گردد. عدم توجه به این موضوع سبب وقوع حبابهای هوا در سطح خارجی سگمنتها می‌گردد و هزینه‌های اجرایی در نصب سگمنتها (مقدار گریس‌خور پشت سگمنتها در حین نصب) را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر با کاهش کاور بتنی سبب نفوذ بیشتر یونهای مهاجم کلراید از پشت سگمنتها می‌گردد. در این پروژه حداکثر مجاز درصد هوای بتن تازه ۱/۵ درصد تعیین گردید که لازم بود تا ۳۰ دقیقه از این حد مجاز، تجاوز ننماید. قابل ذکر است که تمامی راهکارها از این لحاظ مورد قبول واقع گردید.

۳-۲-۵. عدم ترک خوردگی

به طور کلی در صورت استفاده از ذرات ریزتر (مانند سرباره، خاکستر بادی و دوده سیلیسی) در طرح اختلاط بتن، سطح مخصوص ذرات افزایش می‌یابد و این امر سبب جذب آب بیشتری می‌گردد. این آب اضافی که مازاد بر نیاز واکنش هیدراتاسیون می‌باشد توسط تبخیر سطحی و یا تحت بارگذاری از جسم بتن خارج شده و سبب جمع‌شدگی و وقوع ترک می‌شود و نفوذپذیری بتن را افزایش می‌دهد. [۱] کنترل ترک‌خوردگی و اعمال عمل‌آوری کافی و مناسب سگمنتهای بتنی پس از بازکردن قالبها الزامی می‌باشد. این ترک‌خوردگی‌ها در دپوی موقت و دائم با بازرسی چشمی کاملاً قابل رویت خواهد بود. در این پروژه سگمنتها به صورت معمول ۷ روز پس از بازکردن قالبها عمل‌آوری صحرائی می‌شدند ولی پس از تولید آزمایشی سگمنتهای حاوی مواد افزودنی معدنی مشاهده گردید که سگمنتهایی که دارای دوده سیلیسی بودند دچار ترک‌خوردگی‌های شدیدی گشته و لازم بود به طور دقت این پدیده آسیب‌شناسی گردد. پس از بررسی گسترده این پدیده، برای جلوگیری از بروز آن دو راهکار اجرایی ارائه گردید. اولین راهکار آنکه با توجه به کسب مقاومت‌های کوتاه‌مدت بیشتر از نیاز در سگمنتهای حاوی دوده سیلیسی، می‌توان دمای حداکثر عمل‌آوری تسریع شده را به ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش داد و دیگری آن است که عمل‌آوری صحرائی از ۷ روز به ۲۱ روز افزایش یابد. با توجه به شرایط کارگاهی دومین راهکار موثرتر بود و افزایش عمل‌آوری صحرائی وقوع ترک‌خوردگی را به صورت چشمگیری کاهش داد.

۳-۳. ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی راهکارها

سرباره کوره آهن‌گدازی جز دورریز صنعت ذوب‌آهن می‌باشد و باتوجه به بومی بودن صنعت ذوب‌آهن، از دیدگاه اقتصادی نسبت به خاکستر بادی که یک گزینه غیر بومی می‌باشد و سبب خروج ارز از کشور می‌گردد، در اولویت قرار دارد. همچنین استفاده از سرباره نسبت به دوده سیلیسی که تولید و استفاده از آن با معیارهای زیست محیطی در تعارض می‌باشد نیز ترجیح دارد.

تنها تمهید اجرایی در آماده‌سازی سرباره آن است که این سرباره‌ها می‌بایست در کارخانه ذوب‌آهن به صورت آبی (با استفاده از پاشش آب) سرد گردد تا ساختار سیلیسی آن آمورف (بی‌شکل و غیر کریستالی) باشد و واکنش‌پذیری آن افزایش یابد. [8]

۴. نتیجه‌گیری

تولید سگمنتهای بتنی لاینینگ تونل‌های بلند، به دلیل اهمیت تسریع در کسب مقاومت‌های کوتاه‌مدت از عمل‌آوری تسریع شده با بخار استفاده می‌گردد. در مناطقی که شرایط برای وقوع توامان حمله سولفاتی خارجی و حمله کلرایدی وجود دارد، سازگاری راهکارهای مقابله با این حملات و شرایط تولید سگمنتهای بسیار با اهمیت می‌باشد. در این بررسی جایگزینی بخشی از سیمان با ۳ ماده افزودنی معدنی سربراه کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی کلاس F و دوده سیلیسی از نظر اجرایی مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس تمامی داده‌های اجرایی به مانند کسب مقاومت، حفظ کارایی، درصد هوا و عدم ترک‌خوردگی بدست آمده در این بررسی، جهت مقابله با حملات یونهای مهاجم سولفات و کلراید به ترتیب اولویت استفاده از ۳۰ درصد جایگزینی سربراه کوره آهن‌گدازی، ۲۰ درصد خاکستر بادی کلاس F و ۷ درصد دوده سیلیسی به جای بخشی از سیمان طرح اختلاط مفید خواهد بود.

۵. مراجع:

- [۱] رضایانپور، ع. ا. (۱۳۹۵). "مواد جایگزین سیمان (پوزولان‌ها) خواص، دوام و توسعه پایدار". چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۲] رضایانپور، ع. ا.، مودی، ف. (۱۳۷۵). "نفوذ یون کلرید و خرابی شازه های بتنی بندری در جنوب کشور". مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین المللی سواحل و بنادر و سازه های دریایی، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۳] رضایانپور، ع. ا.، پیدایش، م. (۱۳۷۶). "دوام بتن و نقش سیمانهای پوزولانی". نشریه شماره ۲۷۴، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- [۴] رضایانپور، ع. ا.، پورخورشیدی، ع. (۱۳۸۴). "آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان". نشریه شماره ض ۴۲۸، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.

[5] Turkel, S., Alabas, V. (2005). "The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete". Cement and Concrete Research. 35: 405.

[6] Erdem, T. (2003). "Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete". Cement and Concrete Research. 33: 741-050.

[7] Paya, J., Monzo, J., Perismora, E., Borrachero, M., Tercero, R., Pinillos, C. (1995). "Early-strength development of portland cement mortars containing air classified fly ashes". Cement and Concrete Research. 25: 449.

[8] Miyamoto, T., Torii, K., Akahane, K., Hayashiguchi, S. (2015). "Production and use of blast furnace slag aggregate for concrete". Nippon steel & sumitomo metal technical report No.109.