

مروری بر روش‌های مختلف افزایش دوام بتن در محیط‌های اسیدی با تاکید بر شرایط فاضلابی

محمد زرین کوب^۱، علی دوستی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

m_zarrinkoub@yahoo.com

چکیده

بتن یکی از پرکاربردترین موادی است که در ساخت و ساز انواع تاسیسات صنعتی و شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی بتن زمانی که در معرض اسید قرار می‌گیرد دچار خوردگی و زوال می‌شود. یکی از موارد کاربرد بتن در ساخت تصفیه‌خانه‌ها و سایر تاسیسات فاضلابی است. در این تاسیسات با به وجود آمدن شرایط بی‌هوایی، بر اثر یک واکنش باکتریایی، اسید سولفوریک تولید می‌شود که در نتیجه این اسید موجب خرابی بتن به کار رفته در ساخت این تاسیسات شده و ضمن کاهش عمر مفید آن‌ها می‌تواند منجر به مشکلات ثانویه از قبیل اخلال در شبکه جمع‌آوری فاضلاب، آلودگی آب‌های زیرزمینی و نشست زمین شود.

در این تحقیق به بررسی واکنش بتن با اسید با محوریت اسید سولفوریک تولید شده در محیط‌های فاضلابی پرداخته شده است. همچنین ضمن ارائه راهکارهایی در زمان طراحی تاسیسات فاضلابی برای جلوگیری از به وجود آمدن شرایط تولید اسید سولفوریک، به مروری بر تحقیقات انجام شده برای یافتن روش‌های ممکن به منظور افزایش دوام بتن در برابر این اسید نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: محیط اسیدی، شرایط فاضلابی، اسید سولفوریک، دوام بتن

کد: D

A Review on Different Methods for Increasing Durability of Concrete in Acidic Environment Especially in Sewer Condition

Mohammad Zarrinkoub¹, Ali Dousti²

- 1- B.S. Student in Civil Engineering, University of Tehran
- 2- Faculty Member of Road, Housing and Development Research Center

m_zarrinkoub@yahoo.com

چکیده

Concrete is one of the materials commonly used in different industries and urban facilities. Moreover, deterioration of concrete is expected when it is exposed to acids. Sewage treatment plants and other sewage-related facilities are among the structures which are made by concrete. In these structures, under anaerobic conditions, Sulfuric Acid is produced due to a bacterial reactions. Consequently, the utilized concrete for these structures deteriorates and this phenomenon will not only shorten the service life of such facilities, but it will also may lead to further problems, such as troubles in sewerage system, contaminating the ground water, and subsidence.

In this paper, we concentrated on the reaction of concrete with acid, especially Sulfuric Acid created in sewage conditions. Additionally, some possible methods during the design of sewage network are presented in order to prevent the required conditions through which Sulfuric Acid is produced. This study also includes a review on the studies seeking techniques and alternatives to improve the durability of exposed-to-acid concrete.

Keywords: Acidic Environment, Sewer Conditions, Sulfuric Acid, Durability of Concrete

Code: D

1. مقدمه

لوله‌های فاضلاب، تصفیه‌خانه‌ها و دیگر تاسیسات در ارتباط با مواد فاضلابی از مهمترین سازه‌ها در محیط‌های شهری به شمار می‌آیند. از این رو دوام این تاسیسات به منظور تضمین طول عمر مفید آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بروز تخریب در تاسیسات فاضلابی مشکلات مختلفی از قبیل آلودگی محیط‌زیست و منابع آب‌های زیرزمینی و نشست بیش از حد خاک را به وجود می‌آورد. همچنین تعمیر و تعویض بخشی از سیستم فاضلاب، جدای از بحث هزینه‌های تعمیر، باعث اختلال در سیستم جمع‌آوری فاضلاب می‌شود. [1] لذا مواد به کار برده شده برای ساخت این تاسیسات باید برای این شرایط مناسب بوده تا عملکرد مناسبی را در اقتصادی‌ترین حالت عرضه کنند. بتن یکی از مصالحی است که به دلیل دارا بودن نسبت دوام به هزینه بالا، در جهان در ابعاد وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. [2]

سیمان پرتلند یکی از مواد به کار رفته در بتن به عنوان ماده چسبنده سنگدانه‌ها می‌باشد. این ماده در حال حاضر پرکاربردترین ماده در این زمینه است. اما خمیر به وجود آمده از سیمان پرتلند، در برخورد با عوامل شیمیایی عملکرد قابل قبولی از خود نشان نمی‌دهد که این مسئله برای سازه‌هایی که در تماس با حملات شیمیایی هستند، نگران‌کننده است. یکی از این مواردی که به دلیل خسارات گسترده به سازه‌های بتنی حائز اهمیت است، واکنش بتن در تماس با اسید می‌باشد. در این راستا واکنش اجزای خمیر سیمان و به خصوص انحلال کلسیم هیدروکسید در برخورد با اسید، عامل اصلی اضمحلال بتن عادی است. [3]

گسترش منابع اسیدی به علت توسعه نواحی صنعتی و شهری، مهم‌ترین علت شیوع حملات اسیدی است. یکی از عوامل مهم در سرعت حمله اسیدی، شرایط کنش محلول اسیدی است. در این خصوص دو حالت استاتیکی و دینامیکی ممکن است اتفاق بیافتد. در حالت استاتیکی، هیچ‌گونه جریانی در محلول ایجاد نمی‌شود اما در حالت دینامیکی، سطح یا میزان محلول تغییر می‌کند یا در محلول جریان ایجاد می‌شود. شرایط دینامیکی خود باعث افزایش شدت خوردگی می‌شود. در محیط‌های فاضلابی، شرایط حاکم عمدتاً دینامیکی است. [4]

از نظر مهندسی هر واکنش فیزیکی یا شیمیایی نمی‌تواند الزاماً به مفهوم تهاجم باشد و واکنشی که منجر به تخریب یا کاهش دوام نگردد، تهاجم نیست. البته شرایط محیط فاضلابی در زمره محیط‌های مخرب قرار می‌گیرد. لذا رفتارشناسی بتن در این شرایط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. [1] تبادل کاتیون بین محلول‌های اسیدی و مواد متشکله خمیر سیمان باعث به وجود آمدن نمک‌هایی قابل حل، از جمله کلراید کلسیم، استات کلسیم و بی کربنات کلسیم بسته به نوع اسید حمله‌کننده می‌شوند. [6]

خمیر سیمان دارای پایه کلسیم هیدروکسید است که در برخورد با اسید که به طور کلی دارای پایه HX است، به صورت زیر تجزیه می‌شود:



به عنوان مثال در صورت تهاجم اسید سولفوریک به بتن، واکنش‌های زیر انجام می‌شوند:



رابطه فوق نشان‌دهنده تشکیل اترینگایت (سولفوآلومینات) است که این ماده منجر به انبساط بتن و در نتیجه ترک خوردگی و تخریب آن خواهد شد. بنابراین با تخریب لایه‌های بیرونی از بتن، سطح رویی تخریب خواهد شد. بنابراین این بار بتن سالم لایه‌های زیرین در معرض حمله اسید قرار خواهد گرفت. [7]

ساختار بتن ناهمگن و پیچیده است. از این رو تعیین الگوهای ساختاری مشخص به منظور شناخت و پیش بینی رفتار بتن دشوار است. با این حال درک خواص اجزای تشکیل‌دهنده بتن برای کنترل خواص آن مفید است. [5] در این باب تحقیقات زیادی درخصوص روش‌های بهبود عملکرد بتن در محیط‌های اسیدی انجام شده است.

شی و استگمن¹ در سال ۲۰۰۰ مقاومت مصالح سیمانی مختلف در برابر خوردگی اسیدهای مختلف را بررسی کردند. میزان خوردگی در برابر اسیدها تابعی از محصولات هیدراسیون سیمان به کار رفته می‌باشد. محصول اصلی هیدراسیون سیمان پرتلند ژل C-S-H با نسبت بالای C/S و همچنین $Ca(OH)_2$ می‌باشد. در حالیکه ژل C-S-H با نسبت پایینی از C/S محصول اصلی هیدراسیون سیمان قلیا فعال و سیمان خاکستریادی-آهک است. [26]

¹ Shi & Stegemann

چانگ و همکاران¹ در سال ۲۰۰۵ نمونه های بتنی مختلف از سنگدانه های آهکی و سیلیسی و به همراه مواد سیمانی مختلف ساختند و مقاومت آن ها را در برابر حمله اسید سولفوریک با غلظت ۱ درصد سنجیدند. نتایج آنها نشان داد که از میان روباره کوره آهن گدازی، دوده سیلیس و خاکستر بادی، بتن ساخته شده از سنگدانه های آهکی که حاوی دوده سیلیس و خاکستر بادی بود، مقاومت بهتری در برابر حمله سولفاتی از خود نشان داد. [27] گیرانج² و همکارانش در سال 2010 با اندازه گیری انبساط و تغییر حجم نمونه های بتنی به مدت ۵ سال، مقاومت بتن های ساخته شده از سیمان های مختلف را در مقابل حمله سولفوریک اسید و سدیم سولفات بررسی کردند. نتایج آن ها حاکی از آن بود که کمترین انبساط مربوط به نمونه های ساخته شده از دوده سیلیس می باشد. [28] گیرانج² و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با آزمایش بر روی سیمان های مختلف و ترکیب آن ها با دو نوع سنگدانه آهکی و معمولی، مقاومت بتن در مقابل قرار گیری در معرض اسید را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که عملکرد بتن ساخته شده با سیمان آهکی از سیمان های پوزولانی مورد آزمایش که دارای سرباره و دوده سیلیس بودند، فارغ از نوع سنگدانه بهتر می باشد. [29] سز³ در سال ۲۰۱۲ با آزمایش بر روی ۱۲ نوع سیمان که از جایگزینی ترکیبات مقادیر مختلفی از آهک و دوده سیلیس با سیمان معمولی حاصل شده بودند، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سولفات برای ملات های ساخته شده از این سیمان ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده همزمان از آهک و دوده سیلیس منجر به عملکرد بهتر بتن در برابر حمله سولفاتی در محلول های منیزیم سولفات و سدیم سولفات می شود. [30]

۲. روش های پیشگیری از ایجاد شرایط بی هوازی در مرحله طراحی

در مرحله طراحی تاسیسات فاضلابی می توان روش هایی را پیاده کرد تا به میزان قابل قبولی از ایجاد شرایط برای تولید سولفید هیدروژن جلوگیری گردد. در نتیجه می توان از تخریب تاسیسات از طریق خوردگی جلوگیری به عمل آورد. در ذیل به برخی از این اقدامات اشاره شده است [8]:

۱. اندازه صحیح ابعاد و شیب لوله ها که باعث سرعت کافی جریان می شود. در نتیجه شرایط بی هوازی به وجود نمی آید و از انباشت مواد جلوگیری می شود.
۲. حتی الامکان استفاده از سیفون ها، بازشوها و... محدود شود تا شرایط بی هوازی به وجود نیاید.
۳. دبی پساب واحدهای صنعتی از نظر سولفید، BOD بالا، دمای بالا، و سطح pH کنترل شوند.
۴. از زمان ماند بیش از اندازه در حوضچه ها و دیوارهای تر خودداری شود.
۵. در مکان های مناسب ایستگاه های تزریق هوا و یا افزودنی های شیمیایی در نظر گرفته شود.

۳. راهکارها به منظور افزایش دوام بتن

اما با وجود اقدامات پیشگیرانه در مرحله طراحی سیستم های فاضلابی، خوردگی به دلیل H_2S اجتناب ناپذیر است. در این شرایط به طور کلی در برخورد با محیط فاضلابی چهار راهکار زیر وجود دارند که در ادامه به آن ها پرداخته خواهد شد:

۱. افزودنی های شیمیایی
۲. اصلاح طرح مخلوط بتن

¹ Chang

² Girardi

³ Sezer

۳. استفاده از پوشش ها

۴. بتن های ویژه

۳-۱- افزودنی های شیمیایی

مشکل خوردگی در تاسیسات فاضلابی عمدتاً به دلیل H_2S است. به طور کلی دو راه حل عمده برای کنترل سولفید در جریان فاضلاب وجود دارد:

۱- بهبود تعادل اکسیژن با تزریق و یا وارد کردن هوا

۲- افزودنی های شیمیایی (اکسید کردن شیمیایی، جلوگیری از کاهش سولفات، ته نشینی و کنترل pH)

نمک های بسیاری از فلزات با سولفید محلول واکنش می دهند و تولید رسوب می کنند. سولفید فلزی تشکیل شده باید نامحلول باشد و لذا در نهایت از انتشار گاز H_2S در فضای بالای لوله ها جلوگیری شود. به عنوان مثال نمک های آهن در بسیاری از نقاط آمریکا به منظور کنترل سولفید به کار رفته اند. [8] برای کنترل سولفید، واکنش ترکیبات نمک های آهن با نسبت مولکولی یک قسمت فروس (Fe^{++}) و دو قسمت فریک (Fe^{+++}) بهتر از کاربرد جداگانه آن ها می باشد. [9] نمک های روی نیز برای کنترل سولفید به کار می روند. سولفید روی به دلیل آنکه از سولفید آهن نامحلول تر است، به لحاظ تنوری کاهش بیشتری را برای غلظت سولفید فراهم می کند. برخی مطالعات نشان داده اند که برای هر واحد سولفید، به ۱۰ تا ۱۵ واحد روی احتیاج است. [10] فلزات دیگر مانند مس و سرب نیز می توانند برای کنترل سولفیدها مفید باشند. هرچند که به دلیل مشکلاتی که در طی فرآیند تصفیه فاضلاب به وجود می آورند و همچنین به دلیل هزینه زیاد، استفاده از آن ها مورد توجه قرار نگرفته است.

۳-۲-۱- اصلاح طرح مخلوط بتن

موثرترین راه برای افزایش عمر تاسیسات فاضلابی در برابر محیط اسیدی به وجود آمده، از نظر اقتصادی، بهبود کیفیت بتن مورد استفاده است. از عوامل موثر بر کیفیت بتن در شرایط فاضلابی، می توان به نفوذپذیری، شرایط عمل آوری بتن، شکل و نوع سنگدانه، ویژگی های سیمان مصرفی و نوع مواد چسباننده اشاره کرد. در ذیل به بعضی از این عوامل موثر به طور مفصل تری اشاره شده است.

۳-۲-۱-۱- شرایط عمل آوری

میزان نفوذپذیری خمیر سیمان با افزایش درجه هیدراسیون کاهش می یابد. با کاهش نفوذپذیری، دوام بتن بهبود خواهد یافت. نرخ تخریب بتن شاهد (حاوی سیمان پرتلند) که به روش عمل آوری با بخار ساخته شده بود در برابر حمله سولفوریک اسید به نسبت این نرخ تخریب برای حالت عمل آوری استاندارد بیشتر بود. این موضوع می تواند به علت خاصیت نفوذپذیری بیشتر ریزساختار بتنی که تحت این شرایط عمل آوری شده است باشد. زیرا تشکیل ساختارهای CSH به سرعت صورت می گیرد. [11]

۲-۲-۳- شکل و نوع سنگدانه

ویژگی‌های سنگدانه مانند حداکثر اندازه، شکل و نوع آن در نفوذپذیری بتن کاملاً موثر است. با افزایش اندازه سنگدانه، فاز انتقالی در وجه مشترک خمیر سیمان و سنگدانه که ناحیه ضعیفی است (ITZ)، گسترش می‌یابد و در نتیجه در زمان جمع‌شدگی، ترک‌های این نواحی به سرعت به یکدیگر می‌پیوندند و لذا نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد. [12]

تأثیر نوع سنگدانه‌ها نیز بر دوام بتن در محیط اسیدی حائز اهمیت است. در برخی تحقیقات تأثیر استفاده از سنگدانه‌های آهکی بر دوام بتن مورد بررسی قرار گرفته و با بتن مشابه با سنگدانه‌های سیلیسی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج، با اینکه میزان کاهش وزن برای سنگدانه‌های آهکی به نسبت سنگدانه‌های سیلیسی در هفته دوم بیشتر بود، اما از هفته سوم این رویه تغییر کرده است و بتن با سنگدانه‌های سیلیسی بیشتر در معرض خوردگی و تخریب قرار گرفته است. دلیل این واقعیه این است که با پیشروی خوردگی در نمونه، سیمان اطراف سنگدانه از بین می‌رود و سنگدانه با وجود خورده نشدن، به دلیل عدم وجود ماده چسباننده، از نمونه جدا می‌شود. اما در نمونه‌های حاوی سنگدانه آهکی، سیمان و سنگدانه همزمان خورده می‌شوند. همچنین در تمام سطح این نمونه‌ها لایه سفید رنگی از جنس گچ تشکیل می‌شود که از نفوذ اسید به بتن جلوگیری می‌کند. [13]

۳-۲-۳- ویژگی‌ها و میزان سیمان

هرچه نرمی سیمان بیشتر باشد، نفوذپذیری بتن کمتر خواهد شد. [12] سیمان پرتلند نوع پنج که میزان C_rA کمی دارد برای استفاده در محیط‌های دارای یون سولفات توصیه شده است. برخی تحقیقات نشان می‌دهند که نمونه‌های ساخته شده با سیمان حاوی C_rA بیشتر، در محیط در معرض سولفات سدیم، خرابی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند نوع پنج داشته‌اند. [9]

حضور C_rA در ترکیب سیمان، به جز نقش اندک در مقاومت اولیه، نقش دیگری ندارد و بعد از سخت شدن سیمان در صورت حمله سولفاتی با تشکیل سولفوآلومینات کلسیم (اترینگایت) سبب خرابی می‌شود. بتنی که توسط سولفات‌ها مورد تهاجم قرار می‌گیرد دارای ظاهری سفید رنگ می‌باشد. علت این مسئله تشکیل سولفات کلسیم (گچ) و اترینگایت در اثر حمله سولفاتی می‌باشد. از آنجایی که C_rA توسط سولفات‌ها مورد حمله قرار می‌گیرد، یک راهکار که به ذهن می‌رسد استفاده از سیمان‌های ضد سولفات است؛ چرا که دارای C_rA کمی می‌باشند. البته صرف استفاده از این نوع سیمان‌ها کافی نیست زیرا تنها مشکل اترینگایت ثانویه را رفع می‌کند. [1]

باید توجه داشت که استفاده از سیمان پرتلند نوع پنج زمانی که بتن در معرض هجوم سولفات منیزیم و یا اسید سولفوریک باشد، مناسب نمی‌باشد. در این محیط‌ها به دلیل پایین بودن pH، H^+ و S^{2-} با سولفات واکنش می‌دهد که باعث کاهش کیفیت عملکرد بتن می‌شود. [14]

کاهش نسبت آب به سیمان می‌تواند با کاهش نفوذپذیری همراه باشد. با کاهش نفوذپذیری بتن، امکان تهاجم عوامل شیمیایی کاهش و در نتیجه دوام بتن افزایش می‌یابد. [6] در نسبت‌های آب به سیمان بالا، فضاهای خالی زیادی در بتن وجود دارد که در واقع نقاط ضعف بتن می‌باشند. [7] در یکی از تحقیقات صورت گرفته، نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰.۵۵، درصد در برابر تهاجم سولفید کمترین مقاومت را از خود نشان داده‌اند. [34] واسرمن و بنتور^۱ در سال ۲۰۱۱ با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان و تغییر در میزان سیمان برای سه طرح مخلوط مختلف، اقدام به بررسی میزان نفوذ این بتن‌ها کردند. نتایج و مشخصات فیزیکی بتن‌ها در خصوص نفوذپذیری هوا و جذب موئینه بتن‌های مورد آزمایش تقریباً یکسان و به میزان قابل توجهی کمتر از بتن معمولی بودند. این در حالی است که تمامی بتن‌ها دارای نسبت آب به سیمان و مقاومت یکسان بودند. اولین دلیلی که به ذهن می‌رسد این است که این تفاوت، در میزان سیمان بیشتر بتن معمولی ریشه دارد. از آنجایی که سنگدانه‌ها غیرقابل نفوذ تلقی می‌شوند، نفوذ صرفاً از راه خمیر سیمان اتفاق می‌افتد. بتن معمولی با داشتن مقدار سیمان بیشتر در نسبت آب به سیمان یکسان (خمیر سیمان بیشتر)، پتانسیل بیشتری برای در معرض نفوذ قرار گرفتن دارد. [15]

¹ Wasserman & Bentur

۴-۲-۳- تاثیر پوزولان ها

به طور کلی با استفاده از پوزولان در بتن واکنش پوزولانی رخ می دهد. به طوری که پوزولان که سرشار از سیلیس می باشد با CH ناشی از هیدراسیون خمیر سیمان واکنش داده و نهایتاً CSH تشکیل می گردد. از آنجایی که اسید در وهله اول به CH خمیر سیمان حمله می کند، با جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان، ماده دسترس که مورد حمله اسید قرار می گیرد کم می شود. در ادامه به تاثیر برخی پوزولان ها می پردازیم.

۴-۲-۳-۱- دوده سیلیس

توری و کاوامورا^۱ در سال ۱۹۹۴ تاثیر جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس و خاکستربادی را بر روی حمله اسید سولفوریک به بتن مورد آزمایش قرار دادند. طبق نتایج تحقیق انجام شده دوده سیلیس تاثیر کمتری به نسبت جایگزینی خاکستربادی دارد و نمونه های خاکستربادی که با درصد جایگزینی ۳۰ درصد ساخته شده بودند، عملکرد بهتری در برخورد با محیط اسیدی دارند. [31] دازکو^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۷ اظهار داشتند که جایگزینی هشت درصد سیمان با دوده سیلیس می تواند افت وزن نمونه های بتنی در معرض اسید سولفوریک با $pH=1$ را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. همچنین این تحقیق نشان داد که جایگزینی ۸ درصد متاکائولن با سیمان تاثیر اندکی بر مقاومت نمونه ها در برابر اسید سولفوریک دارد. [32] و همکاران در سال ۲۰۰۱ با ساخت نمونه های بتنی مختلف به بررسی تاثیر جایگزینی دوده سیلیس، متاکائولن و خاکستربادی کم کلسیم در محیط اسیدی پرداختند. در این تحقیق نمونه ها در معرض هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید، نیتریک اسید، استیک اسید و فسفریک اسید قرار داده شدند. آن ها بهترین عملکرد در این محیط ها را به نمونه حاوی دوده سیلیس نسبت دادند. [2]

۴-۲-۳-۲- خاکستربادی

خاکستربادی یک ماده پوزولانی است که استفاده از آن به طور کلی مقاومت اولیه بتن را کاهش می دهد. البته مقاومت و دوام بتن را با گذشت زمان بهبود می دهد. [16]

فتوحی و هلگه^۴ در سال ۱۹۸۸ بعد از قرار دادن سه نوع بتن با سیمان های مختلف در معرض اسید سولفوریک سه درصد، به این نتیجه رسیدند که عملکرد سیمان معمولی و دوده سیلیس بهترین عملکرد از میان این سه طرح مخلوط را داشته است. بعد از آن سیمان معمولی و خاکستربادی عملکرد بهتری نسبت به سیمان ضد سولفات از خود نشان داده اند. [33] آیلز^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۷ با مقایسه نرخ تخریب بتن شاهد و بتن دارای خاکستربادی به این نتیجه رسیدند که این نرخ برای بتن شاهد بسیار بیشتر است. [11] تمج^۶ در سال ۱۹۹۷ با سنجش مدت زمان مورد نیاز برای بتن های مختلف به منظور از دست دادن ۲۰ درصد وزن خود در معرض اسید سولفوریک و هیدروکلریک اسید ۱ درصد، درصدهای جایگزینی متفاوتی از خاکستربادی به همراه ۱۰ درصد دوده سیلیس را مورد آزمایش قرار دادند. نتیجه این تحقیق حاکی از آن بود که بتن حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس و ۶۰ درصد خاکستربادی آسیاب شده (به عنوان جایگزین سیمان) بهترین نتیجه را در محیط های اسیدی به دست داد. آن ها معتقدند که دوده سیلیس با کلسیم هیدروکسید وارد واکنش شده و $C-S-H$ می سازد. در واقع با این کار تشکیل مواد چسباننده افزایش و در نتیجه نفوذپذیری و میزان آهک آزاد کاهش می یابد. [17]

¹ Torii & Kawamura

² Dazko

³ Roy

⁴ Fattuhi & Hughest

⁵ Aydın

⁶ Tamimi

۳-۳- استفاده از پوشش‌ها

یکی از راهکارهای بسیار مناسب جهت حفاظت از بتن در محیط‌های اسیدی همچون محیط‌های فاضلابی استفاده از پوشش مناسب بر روی سطح بتن است. استفاده از پوشش مناسب موجب افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی خواهد شد. برخی از تحقیقات نیز نشان می‌دهند که استفاده از پوشش محافظ مناسب در قیاس با مواد افزودنی به منظور کاهش نفوذپذیری بتن، عملکردی بهتری دارند. [19] مواد به کار رفته برای پوشش‌ها در سیستم‌های فاضلابی بیشتر شامل اورتان، اپوکسی، پلی استر ها، سیمان پرآلومین، آسفالت و... می باشد. به هنگام استفاده از پوشش‌ها، نکته حائز اهمیت ضمن در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی پوشش، توجه به سازگاری و چسبندگی آن با سطح بتن می باشد. چرا که پوشش‌های بدون چسبندگی کافی نمی توانند در برابر بروز اختشاش یا فشار آب مقاومت کنند. به عنوان مثال اپوکسی‌ها با وجود دارا بودن چسبندگی خوب و مقاومت شیمیایی بالا، شکننده اند و به راحتی تغییر شکل نمی دهند. پوشش‌ها را می توان به دو دسته کلی پوشش‌های آلی و غیرآلی تقسیم بندی کرد. پوشش‌های آلی شامل اپوکسی‌ها، اورتان‌ها، قطران ذغال سنگ و... می باشد. باید توجه کرد که همه پوشش‌های آلی برای استفاده در تاسیسات فاضلابی مناسب نیستند و عملکرد برخی از آن‌ها در برابر عوامل شیمیایی از جمله اسید قابل قبول نمی باشد. در خصوص پوشش‌های غیر آلی نیز می توان به مواردی چون سرامیک‌ها، سیلیکات‌ها و شیشه اشاره کرد. تمام موارد فوق دارای معایب و مزایا خاص خود هستند که باید با توجه به ویژگی‌های آن‌ها، ضمن مد نظر قرار دادن برآورد‌های اقتصادی، امکان سنجی استفاده از آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. [9] به طور کلی کارایی استفاده از پوشش‌ها برای محافظت از بتن در برابر خوردگی متغیر است و در مواردی چسبندگی بتن و پوشش از بین رفته و سپس بتن نیز دچار خوردگی شده است. [8]

۳-۴- بتن‌های ویژه

به کارگیری بتن‌های فاقد سیمان مانند بتن گوگردی، بتن قلیا فعال (واکنش یک ماده قلیایی با یک ماده جامد آلومینا-سیلیکاتی به قصد تولید یک ماده جامد قابل مقایسه با سیمان پرتلند، مقدمه ای بر شکل‌گیری نوع جدیدی از سیمان و بتنی به نام بتن قلیا فعال شد [20]) و بتن ژئوپلیمری نیز در دسته بتن‌های ویژه به عنوان راهکارهایی در برخورد با محیط‌های اسیدی می‌باشند. [6]

یکی از منابع آلومینا-سیلیکاتی در کشور ما سرباره است. سرباره یکی از محصولات جانبی صنایع تولید فولاد است. هنگامی که سرباره به تنهایی با آب ترکیب می‌شود، به صورت ذرات ریز تجزیه می‌شود. اما یک لایه محافظ ناکارآمد از جنس Ca^{2+} تشکیل می‌شود که مانع ادامه واکنش‌های بعدی می‌شود. اگر pH مخلوط به اندازه کافی بالا نگه داشته شود، این لایه محافظ شکسته شده و واکنش‌ها ادامه پیدا می‌کند. در حقیقت نقش سرباره قلیا فعال، بالا نگه داشتن یون‌های OH^- در مخلوط است. پوشش ایجاد شده بر روی سطح ذرات سرباره که پس از ترکیب با آب تشکیل می‌شود، مانع انجام هیدراسیون در مراحل بعدی می‌گردد. در نتیجه یک محیط قلیایی برای شکستن این پوشش لازم است. در سیمان سرباره‌ای این محیط قلیایی به وسیله $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان ایجاد می‌شود. اما هنگامی که مقدار جایگزینی سیمان با سرباره افزایش پیدا می‌کند، میزان کلسیم هیدروکسید محیط به اندازه کافی نبوده و در نتیجه یک منبع قلیایی خارجی مورد نیاز است. محصول نهایی واکنش، مشابه هیدراسیون سیمان پرتلند، $C-S-H$ می‌باشد. تفاوت اصلی در سرعت و شدت واکنش است. $C-S-H$ عمده‌ترین محصول ایجاد شده در سرباره قلیا فعال سخت شده می‌باشد. اما نسبت Ca به Si در این حالت خیلی کمتر از $C-S-H$ تولید شده در هیدراسیون سیمان پرتلند است. [20]

در سال 2005 کورلی و جانسن¹ با مقایسه بتن ساخته شده با سیمان پرتلند و بتن قلیا فعال، به این نتیجه رسیدند که بتن معمولی پس از ۸۰ سیکل قرارگیری در معرض اسید سولفوریک با $pH=1$ ، ۲۵ درصد از وزن خود را از دست می‌دهد. درحالی که این مقدار کاهش وزن پس از ۱۴۰۰ سیکل برای بتن قلیا فعال اتفاق افتاده است. [21] تحقیقات بخاو² و همکارانش در سال ۲۰۰۳ نیز نشان داد که بتن‌های سرباره‌ای فعال به دلیل مقدار کم کلسیم در سرباره به نسبت بتن‌های ساخته شده با سیمان معمولی، دوام بیشتری در برابر حملات سولفاتی دارند. [22] با توجه به آن که بتن‌های ژئوپلیمری بیشتر به بنیان‌های آلومینو سیلیکاتی تکیه می‌کنند تا به بنیان‌های کلسیم سیلیکات هیدرات، در برابر اسید سولفوریک طول عمر بیشتری از خود نشان می‌دهند.

گوپال و کانا³ در تحقیقی روی بتن ژئوپلیمری که بر اساس خاکستر بادی ساخته شده بود، به بررسی رفتار این بتن در شرایطی که در معرض اسیدهای HCL و H_2SO_4 و $MgSO_4$ به غلظت ۵ درصد به مدت ۴ هفته قرار داشت، پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، این بتن در برابر اسیدهای HCL و H_2SO_4 نسبت به بتن معمولی از دوام بیشتری برخوردار است. [23]

در دهه‌های اخیر تولید گوگرد بر مصرف آن پیشی گرفته است. حتی در مواردی تولید گوگرد در پالایشگاه‌ها باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی شده است. در این شرایط، پیدا کردن مصارف جدیدی برای گوگرد می‌تواند مفید باشد. یکی از مهم‌ترین محصولات تولید شده در کشورهای کانادا و روسیه، بتن گوگردی می‌باشد. همچنین آزمایشات نشان داده اند که بتن گوگردی ویژگی‌های منحصر به فردی در مقایسه با بتن معمولی دارد. بتن گوگردی در برابر اسید بسیار خوب عمل می‌کند. به گونه ای که بعد از ۴ هفته غوطه وری در اسید سولفوریک ۶,۶ مولار تقریباً هیچ گونه آثاری از خوردگی در بتن گوگردی مشاهده نشده است. [24]

مولایی و همکاران نیز در تحقیقی نشان دادند در حالیکه نمونه‌های ساخته شده با سیمان معمولی بعد از گذشت ۲۱ روز مواجهه با اسید، کاهش جرم بالای ۱۱,۶۴ درصد از خود نشان دادند، نمونه‌های بتن گوگردی کاهش جرم ناچیزی در حدود ۰,۵۴ درصد بعد از ۱۸۰ روز قرارگیری در معرض اسید از خود نشان دادند. [25]

۴. نتیجه‌گیری

بتن در معرض اسید سولفوریک دچار خرابی می‌شود و به مرور از بین می‌رود. این مسئله عمر مفید بسیاری از سازه‌ها را بالاخص سازه‌هایی که در ارتباط با محیط‌های فاضلابی هستند، کم می‌کند. یکی از راهکارهای جلوگیری از این شرایط این است که در زمان طراحی تاسیسات فاضلابی تمهیداتی بیاندیشیم که به واسطه آن‌ها تا جای ممکن شرایط بی‌هوازی و در نتیجه اسیدسولفوریک تولید نشود. با وجود عملی بودن این روش‌ها، به هر حال بروز شرایط مذکور و تولید اسیدسولفوریک اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از افزودنی‌های شیمیایی به فاضلاب به منظور رسوب‌گذاری سولفید محلول یکی از راهکارهایی است که می‌تواند با جلوگیری از تولید اسید سولفوریک، به افزایش دوام بتن کمک کند. همچنین با اصلاح طرح اختلاط بتن به عنوان مثال با جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌ها، اصلاح دانه بندی و جنس سنگدانه‌ها، استفاده از سیمان‌های ضد سولفات و... می‌توان با بهبود مشخصات بتن، مقاومت آن را در برابر اسید افزایش داد. پوشاندن سطح بتن با استفاده از پوشش‌ها نیز یکی دیگر از راهکارهای مناسب می‌باشد چرا که با این روش بتن مستقیماً در معرض اسید قرار نخواهد گرفت. علاوه بر موارد ذکر شده، پیشرفت تکنولوژی بتن سبب ظهور اقسام جدیدی از بتن‌ها از قبیل بتن گوگردی، بتن قلیا فعال و بتن ژئوپلیمری شده است که در برابر اسید عملکردی به مراتب بهتر نسبت به بتن معمولی از خود نشان می‌دهند، این موارد می‌توانند جایگزین مناسبی برای بتن معمولی برای استفاده در محیط‌های فاضلابی باشند.

¹ Courley & Johnson

² Bakharev

³ Gopal & Kiran

۵. مراجع

1. زارع، م. (۱۳۹۲). "بررسی تاثیر استفاده از پوزولان ها بر خوردگی بتن در محیط های فاضلاب های شهری". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران-آب.
2. Roy, D. M., P. Arjunan, and M. R. Silsbee. (۲۰۰۱). "Effect of Silica Fume , Metakaolin , and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete." ۳۱:۱۸۰۹-۱۳.
3. Ariffin, M. A. M., M. A. R. Bhutta, M. W. Hussin, M. Mohd Tahir, and Nor Aziah. (2013). "Sulfuric Acid Resistance of Blended Ash Geopolymer Concrete." Construction and Building Materials ۴۳:۸۰-۸۶.
4. Zivica, V., Bajza, A., (2001). "Acidic Attack of Cement Based Materials -a Review . Part ۱ . Principle of Acidic Attack."
۵. رمضانپور، ع.ا. و همکاران. (۱۳۹۷). "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن". چاپ هشتم، انتشارات امیرکبیر.
۶. تیموری موگویی، م. (۱۳۹۵). "بررسی دوام بتن قلیا فعال سرباره ای در محیط های اسیدی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران.
۷. رمضانپور، ع.ا.، رحمانی، پ.، گنجیان، ا. (۱۳۸۳). "آسیب دیدگی های بتن در محیط های اسیدی و ارائه راه حل مناسب جهت کاهش خرابی ها". کنفرانس ملی شریف.
8. EPA. (1991). "Hydrogen sulfide Corrosion in Wastewater Collection and Treatment System." Report to Congress, EPA/۰۹-۹۱-۰۱۰/September.
۹. مرادیان، م. (۱۳۸۹). "عملکرد بتن در محیط اسیدی و فاضلابی و ارائه راهکارهای ترمیم". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی، دانشکده مهندسی عمران.
10. ASCE. (1994). "Manual of Practice on Sulfide in Wastewater Collection and Treatment System." ASCE, 69, Sacramento, CA, USA.
11. Ā, Serdar Aydın and Halit Yazıcı. (۲۰۰۷). "Sulfuric Acid Resistance of High-Volume Fly Ash Concrete." 42:717-21.
۱۲. باغشاهی، م. (۱۳۸۶). "عملکرد بتن های با سیمان پوزولانی در محیط های فاضلابی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست.
۱۳. مفیدی، م.ا.، رشیدی مهرآبادی، ع. (۱۳۹۴). "کاهش خوردگی اسیدی با استفاده همزمان از سنگدانه های آهکی و طرح اختلاط بهینه به منظور دستیابی به حداقل نفوذپذیری". دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران.
14. Santhanam, Manu, Menashi D. Cohen, and Jan Olek. (۲۰۰۱). "Sulfate Attack Research Whither Now ?" 31:845-51.
15. Wasserman, R. and A. Bentur. (۲۰۱۱). "Effect of Concrete Composition on Durability in Natural Acidic Environment." ۷۶۰۵(۴):۱۳۵-۴۳.
16. Chindaprasirt, P., S. Homwuttiwong, and V. Sirivivatnanon. (۲۰۰۴). "Influence of Fly Ash Fineness on Strength , Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar." ۳۴:۱۰۸۷-۹۲.
17. Tamimi, A. K. (۱۹۹۷). "High-Performance Concrete Mix for an Optimum Protection in Acidic Conditions." Materials and Structures ۳۰(۳):۱۸۸-۹۱.
18. Emmanuel, K., Attiogbe, and Rizkalla, S.H. (۱۹۸۹). "Response of Concrete to Sulfuric Acid Attack." ACI Materials Journal (۸۵):۴۸۱-۸۸.
19. Fattuhi, N. I., Hughest, B.P. (۱۹۸۶). "Resistance to Acid attack of concrete with different admixtures or coatings." ۲۲۳-۳۰ (November).
۲۰. بهفرنیا، ک.، تیموری موگویی، م. (۱۳۹۴). "بررسی دوام بتن قلیا فعال سرباره ای در محسوط اسیدی". هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران.
21. Courley, J.T., Johnson, G.B. (2005). "Developments in geopolymer precast concrete." Proc og Geopolymer 2005 World Congress, 139-143, geopolymer green chemistry and sustainable development solutions, France.
22. Bakharev, T., J. G. Sanjayan, and Y. Cheng. (۲۰۰۳). "Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Acid Attack." ۳۳:۱۶۰۷-۱۱.
23. Gopal, K. Madhan and B. Naga Kiran. (۲۰۱۳). "Investigation on Behaviour of Fly Ash Based Geopolymer Concrete in Acidic Environment." ۳(۱):۵۸۰-۸۶.
۲۴. بهفرنیا، ک.، بکایی، م.ب. (۱۳۸۹). "مطالعه آزمایشگاهی بتن گوگردی و ویژگی های آن". پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی

مشهد، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت.

۲۵. مولایی، م.، تیمورتاشلو، ا.ا.، دهستانی، م. (۱۳۹۷). "مقایسه دوام بتن گوگردی و بتن سیمان پرتلندی در محیط های خورنده اسیدی با استفاده از تحلیل تصویری". دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست.

26. Shi, Caijun and J. A. Stegemann. (۲۰۰۰). "Acid Corrosion Resistance of Different Cementing Materials." Cement and Concrete Research ۳۰(۵):۸۰۳-۸.
27. Chang, Zhen Tian, Xiu Jiang Song, Robert Munn, and Marton Marosszeky. (۲۰۰۵). "Using Limestone Aggregates and Different Cements for Enhancing Resistance of Concrete to Sulphuric Acid Attack." Cement and Concrete Research ۳۵(۸):۹۴-۱۴۸.
28. Girardi, F., W. Vaona, and R. Di Maggio. (2010). "Resistance of Different Types of Concretes to Cyclic Sulfuric Acid and Sodium Sulfate Attack." Cement and Concrete Composites ۳۲(۸):۵۹۵-۶۰۲.
29. Girardi, F. and R. Di Maggio. (۲۰۱۱). "Resistance of Concrete Mixtures to Cyclic Sulfuric Acid Exposure and Mixed Sulfates: Effect of the Type of Aggregate." Cement and Concrete Composites ۳۳(۲):۸۵-۲۷۶.
30. Inan Sezer, Gözde. (۲۰۱۲). "Compressive Strength and Sulfate Resistance of Limestone and/or Silica Fume Mortars." Construction and Building Materials ۲۶(۱):۱۸-۶۱۳.
31. Torri, K., Kawamura, M. (1994). "Effect of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack." Cem. Concr. Res., ۲۴(۲), ۳۶۱-۷۰.
32. Daczko, A., Johnson, D., Arney, S. (1997). "Decreasing Concrete Sewer Pipe Degradation Using Admixtures." Materials and Performance Journal, pp. ۵۱-۵۶.
33. Fattuhi, N.R., Hughes, B.P. (1988). "Ordinary Portland Cement Mixes with Selected Admixtures Subjected to Sulfuric Acid Attack." ACI Materials Journal, ۸۵(۶), pp. ۵۱۲-۱۸.
34. Idriss, A.F., Negi, S.C., Jofriet, J.C., Hayward, G.L. (2001). "Effect of Hydrogen Sulfide Emissions on Cement Mortar Specimens." Canadian Biosystems Engineering, Vol ۴۳, ۵, ۲۳-۵.28