

بررسی مقاومت سطحی بتن در سیستم‌های فاضلابی

محمود نادری^۱، حسن روستایی^۲

پذیرش ۹۲/۹/۳

دریافت ۹۲/۱/۲۶

چکیده

شرایط موجود در سیستم‌های فاضلابی به گونه‌ای است که سازه‌های بتنی این تأسیسات را مورد حمله قرار داده و باعث آسیب جدی و در نتیجه تحمیل خسارت‌های سنگین می‌شود. در این پژوهش، نتایج مطالعات میدانی تأثیر شرایط محیطی و بهره‌برداری تأسیسات فاضلاب بر مقاومت بتن ارائه شد. این کار با به کارگیری بتن‌هایی با طرح اختلاط و مقاومت‌های متفاوت و روش تعیین مقاومت پیچش، در تصفیه‌خانه‌ای در شهر ملایر صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که در محیط اسیدی فضای بالای خط جریان درون لوله‌های انتقال فاضلاب همچنین با pH برابر با ۴ تا ۶، مقاومت نمونه‌های بتنی با کاهش pH، کاهش بیشتری از خود نشان دادند. مقاومت تمام نمونه‌هایی که به مدت ۱۳۵ روز در محیط‌های خنثی قرار گرفتند، روند رو به رشدی داشتند. به علاوه مشاهده شد که بعضی از نمونه‌های بتنی قرار داده شده در محیط‌های قلیایی مانند بتن فاقد مواد افزودنی و هوادار، کاهش مقاومت و برخی نیز مانند بتن دارای ده درصد میکروسیلیس، افزایش مقاومت داشتند.

واژه‌های کلیدی: روش پیچش، افزودنی‌ها، سیستم‌های فاضلاب، مقاومت بتن

Estimation of Concrete Strength in Sewer Systems

M. Naderi¹, H. Roostaei²

(Received Apr. 15, 2013)

Accepted Nov. 24, 2013)

Abstract

Environmental conditions in sewer systems are such that the concrete in the sewer structures are attacked and heavy losses are inflicted. In this paper, the results of an *in-situ* study of the effects of environmental and service conditions on the surface strength of concrete are presented. In these investigations, different concrete mixes with different strengths were examined in the sewer system in the city of Malayer where the ambient pH (inside the sewage pipe and above the passing sewage line) ranged from 4 to 6. The *in-situ*, twist-off method was used for measuring the surface strength of concrete samples. Results indicate that concrete strength decreased with reducing pH level. Under neutral conditions, however, the strength of almost all the concrete specimens increased after 135 days. Finally, the concrete specimens with no additives exhibited reduced strength while those containing 10 percent micro-silica showed an increase in strength.

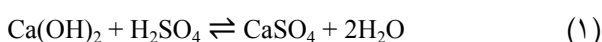
Keywords: Twist-Off Method, Additives, Sewage Systems, Concrete Strength.

1. Assoc. Prof., Imam Khomeini International University, Qazvin
(Corresponding Author) 09121811854 Naderi-m@ikiu.ac.ir
2. MSc Graduate of Structural Engineering, Takestan Islamic Azad
Universitv. Takestan

۱- دانشیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین (نویسنده مسئول)
Naderi-m@ikiu.ac.ir ۰۹۱۲۱۸۱۱۸۵۴
۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی تاکستان

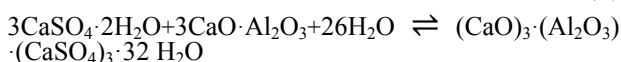
به وجود می‌آید، باکتری‌های کاهش‌دهنده سولفات، سولفات‌ها را به سولفیدها مانند گاز سولفید هیدروژن تبدیل می‌کنند. در شرایط مساعد، این گاز در اطراف پخش می‌شود و در حضور اکسیژن به مؤلفه‌های سولفور تبدیل می‌شود. در ادامه، این سولفورها به‌عنوان کاتالیست باکتری تیوباسیلوس، برای تولید اسید سولفوریک عمل می‌کنند. اسید سولفوریک تولید شده در عمل مرکب اسید-سولفات با یون هیدروژن واکنش نشان می‌دهد و با یون سولفات، باعث اضمحلال بتن می‌شود [۱۴-۱۱].

هنگامی که اسید سولفوریک با ترکیبات سیمان واکنش نشان می‌دهد، در مرحله اول، اسید با هیدروکسید کلسیم سیمان واکنش می‌دهد و سولفات کلسیم تولید می‌کند که در رابطه ۱ نشان داده شده است



این محصول هیدراته می‌شوند و تشکیل گچ یعنی $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ می‌دهند که به‌صورت ماده‌ای شبه پتیر و بدون چسبندگی کافی بر روی سطح بتنی ظاهر می‌شود. در ادامه حملات، گچ با هیدرات آلومینات کلسیم (C_3A) واکنش نشان داده و ماده اترینگایت^۴ را که یک ماده منبسط شونده است به وجود می‌آورد

(۲)



از این بررسی‌ها مشاهده می‌شود که بین تخریب‌های بتنی رخ داده در سازه‌های انتقال و دیگر تأسیسات بتنی مربوط به فاضلاب، رابطه تنگاتنگی وجود دارد.

باور این است که در شروع فرایند دخالت باکتری‌ها، سولفات‌های موجود در فاضلاب خام، توسط باکتری‌های غیرهوازی کاهش‌دهنده سولفات، دیسولفوویبریو^۵ به سولفیدها تبدیل می‌شوند [۲]. از جمله شرایط لازم برای به‌وجود آمدن این وضعیت، مقدار اکسیژن محلول است [۱۵]. بعضی از پژوهشگران بر این باورند که اگر اکسیژن محلول از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر بیشتر باشد، تجمع سولفید و خوردگی پدید نخواهد آمد [۱۶]. البته برخی محققان این مقدار را ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر عنوان کرده‌اند [۱۷]. معمولاً pH فاضلاب‌ها قدری اسیدی، یعنی ۵ تا ۶ است که طی جریان‌های شدید و پرتلاطم، این مقدار، کاهش می‌یابد و گاز سولفیدریک به فضای سطح بالای آب منتقل شده و در آنجا جمع می‌شود [۲، ۸ و ۱۷]. معمولاً pH سطح بتنی در این تأسیسات به‌دلیل قلیایی بودن بتن، بین ۱۱ تا ۱۳ است. بعضی از پژوهشگران

افزایش تراکم جمعیت و بزرگ شدن شهرها، فراهم آوردن سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های بیشتر و مجهزتری را الزامی می‌کند. این نوع تأسیسات که بیشتر بتنی هستند، در اثر فرایند بیولوژیکی تولید اسید سولفوریک و اسید فسفریک در فاضلاب در معرض فرسایش و خوردگی قرار می‌گیرند و آسیب وارده بسیار جدی است. علت اصلی این آسیب‌ها، فعالیت‌های میکروبی^۱ است که طی آن، اسید تولید شده توسط باکتری‌ها، در سطوح بالایی خط جریان تجمع می‌کنند و در نتیجه به بتن این قسمت‌ها حمله می‌کنند. به همین دلیل بخش‌هایی از ایستگاه‌های جمع‌آوری^۲ و تمامی ایستگاه‌های پمپاژ، در معرض تهدید این پدیده قرار دارند.

در رابطه با علت‌های خرابی حاصل شده، عملکرد سیمان‌های مختلف، نقش باکتری‌ها در آسیب‌دیدگی بتن و روش‌های تعیین میزان خرابی‌ها، اختلاف نظر بسیاری وجود دارد، به‌همین دلیل برای درک هرچه بهتر فرایند آسیب‌دیدگی بتن در این سازه‌ها، مطالعه واکنش‌های تداخلی تأثیرات شیمیایی و تأثیرات بیولوژیکی به‌طور هم‌زمان، پیشنهاد شده است. در سال‌های بسیار دور، پس از مطالعاتی که برای درک بهتر علت‌های آسیب‌دیدگی سازه‌های آب و فاضلاب انجام شد، علت‌های مختلفی برای وقوع آسیب‌دیدگی بتن شناسایی شده است که از جمله این علت‌ها می‌توان به مواردی از قبیل: سطح تقاضای اکسیژن بیولوژیکی، تمرکز بالای سولفات و سولفید محلول و دمای بالا، تمرکز بالای گاز سولفید هیدروژن، شدت جریان، زمان ماندگاری بالا، سطح کم اکسیژن محلول، سرعت پایین جریان آب و pH پایین فاضلاب، اشاره کرد [۱]. این عوامل تحت شرایط خاصی، آسیب‌دیدگی بتن لوله‌های انتقال، برکه‌های هوادهی، واحدهای دانه‌گیری، ایستگاه‌های پمپاژ و سطح زیرین سقف کانال‌های انتقال را سبب می‌شوند. در بعضی موارد برای بررسی میزان آسیب‌دیدگی بتن این سازه‌ها، از روش مغزه‌گیری استفاده شده است [۱۰-۲].

اطلاعات منتشر شده نشان می‌دهد که باکتری تیوباسیلوس^۳، نقش عمده‌ای در خرابی‌های بتن دارد و متابولیسم آنها باعث تولید اسید سولفوریک می‌شود که به بتن‌های سیمانی حمله می‌کنند و باعث کاهش مقاومت و چسبندگی داخلی بتن می‌شوند [۱ و ۱۱]. با این حال باید توجه داشت که تیوباسیلوس، فقط قسمتی از نقش بسیار پیچیده فرایند آسیب‌دیدگی بتن در این نوع سازه‌ها را به عهده دارد. معمولاً در شرایط غیر هوازی که در مواد فاضلابی خام

¹ Microbial Induced Concrete Corrosion (MICC)

² Collection Interceptors

³ Thiobacillus

⁴ Ettringite

⁵ Desulfovibrio

اعتقاد دارند که به دلیل کربناسیون، این مقادیر pH کاهش می‌یابند [۵، ۶ و ۱۸]. احتمالاً تشکیل سولفور، مهم‌ترین عامل خوردگی بتن در شرایط حاکم بر سیستم‌های فاضلاب‌ها است.

همچنین طبیعت خورنده حملات اسید سولفوریک با مشاهدات میدانی و آزمایش‌های شیمیایی بر روی بتن، توسط بعضی از پژوهشگران انجام شده است [۲، ۳، ۱۴، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲]. باکتری‌ها، سولفات محیطی را به صورت بیولوژیکی احیاء می‌کنند که محصول نهایی این واکنش، سولفید است. البته اختلاف عقیده‌ای در مورد مکانیسم حملات شیمیایی و بیولوژیکی وجود دارد که نتیجه‌گیری نهایی را با مشکل مواجه می‌کند [۲، ۲۳ و ۲۴]. همچنین در ایتالیا، آسیب دیدگی بتن در پی یک ساختمان، که در معرض تماس با فاضلاب قرار داشت، به ایجاد کریستال‌های گچ بین خمیره سیمان و سنگدانه ربط داده شده است [۲۵].

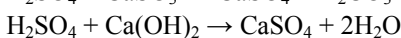
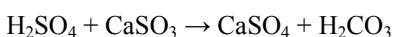
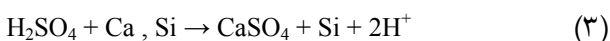
همچنین عملکرد بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های ضد سولفات، معمولی و خاکستر بادی در مقابل اسید سولفوریک، با ساخت نمونه‌های بتنی نیز مطالعه شده است [۲، ۲۰، ۲۴، ۲۶ و ۲۷]. این پژوهشگران در بررسی‌های خود، نمونه‌ها را در داخل محلول‌های اسیدی قرار داده و عملکرد آنها را ارزیابی کردند. با توجه به شرایط پیچیده محیطی و محتوایی حاکم بر سیستم‌های فاضلابی، اطلاعات به دست آمده دارای محدودیت‌های کاربردی فراوانی است. همچنین تأثیر سنگدانه‌های به کار گرفته شده در نمونه‌های بتنی، در داخل محلول‌های اسیدی نیز بررسی شده است. واضح است که مد نظر قرار دادن سنگدانه‌ها با توجه به تعداد متغیرهای تأثیر گذار، پیچیدگی نتیجه‌گیری مطالعات را بیشتر می‌کند [۲، ۲۰، ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹]. نکته درخور توجه در این پژوهش‌ها این است که نمونه‌های بتنی با اندازه‌های نسبتاً کوچک ساخته شده و در داخل ظرفی حاوی محلول اسیدی قرار داده شده و تغییرات ظاهری بتن‌ها با چشم بررسی شده‌اند [۳۰ و ۳۱]. نتایج حاصل شده بیانگر عملکرد پایین بتن دارای صد در صد سیمان ضد سولفات و حتی بتن دارای ۷۵ درصد سیمان پرتلند معمولی و ۲۵ درصد پودر خاکستر بادی بوده است [۲۶]. البته برخی پژوهشگران نتایجی مخالف این نتایج به دست آوردند [۲۷ و ۳۰]. در بعضی از تحقیقات نیز با به کارگیری نمونه‌های بتنی ۲ تا ۵ سانتی‌متری که در محلول سولفور دارای باکتری بودند، تغییرات وزن آنها بررسی شده است [۱۳].

با توجه به موارد بالا و این که اکثریت سازه‌های تصفیه‌خانه فاضلاب و بیش از نیمی از خطوط جمع‌آوری و انتقال فاضلاب‌ها بتنی هستند، اجرای سیستم‌های بتنی مقاوم در برابر عوامل مخرب یادشده، اهمیت زیادی دارد.

به همین دلیل در پژوهش‌هایی که منجر به ارائه این مقاله شد، از افزودنی‌های دوده سیلیس یا میکروسیلیس، روان‌کننده‌ها و هوازها استفاده شد. با اینکه میکروسیلیس قدری گران‌تر از سیمان است، ولی با در نظر گرفتن افزایش دوام و در نتیجه مدت زمان جایگزینی لوله‌های فاضلاب، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه و سودآور است. در این مطالعات، سعی بر به کارگیری بتن‌هایی با طرح اختلاط با قابلیت اجرایی بود تا بتوانند جوابگوی نیازهای کشور باشند. با توجه به اینکه در تأسیسات مورد نظر، بیشتر سطوح بتنی در معرض خرابی و آسیب دیدگی قرار دارند، در پژوهش حاضر برای اولین بار، با استفاده از روش جدید پیشش، مقاومت واقعی و در جای نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری و ارزیابی شد که این امر از تفاوت‌های اصلی این پژوهش با دیگر مطالعات است. با توجه به در حال توسعه بودن ایران و اینکه تمامی شهرهای بزرگ به سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری مجهز می‌شوند، به نظر می‌رسد نتایج ارائه شده در این مقاله بتواند هزینه‌های نگهداری، تعویض و تعمیر تأسیسات یادشده را کاهش دهد.

۲- شرایط حاکم بر سیستم‌های فاضلابی

قبل از شروع خوردگی، باید تبدیل سولفات موجود در فاضلاب به سولفید هیدروژن^۱ اتفاق بیفتد. این عمل به کمک باکتری‌های کاهش سولفات انجام می‌شود. باکتری‌های کاهش سولفات تقریباً در هر نمونه محیط زیستی یافت می‌شوند و انرژی لازم برای احیای سولفات را با اکسیداسیون مواد آلی یا هیدروژن به دست می‌آورند [۳۲ و ۳۳]. یون‌های سولفات در فاضلاب‌ها به وسیله باکتری‌های احیاکننده سولفات موجود در لایه‌های لجن کف لوله در شرایط بی‌هوازی به سولفید تبدیل می‌شود. همچنین در حضور اکسیژن، سولفید هیدروژن نیز توسط باکتری‌های تیوباسیلوس، به اسید سولفوریک تبدیل می‌شود [۳۴]. اسید سولفوریک حاصل شده به عوامل تشکیل دهنده بتن حمله می‌کند که معمولاً محصول به وجود آمده ترکیبی از ژل هیدراته سیلیکات کلسیم^۲، کربنات کلسیم سنگدانه‌ها (در صورت وجود) و هیدروکسید کلسیم و واکنش نداده است. محصولات واکنش یادشده پیچیده است و ترکیبات متفاوت زیادی را باعث می‌شود که از جمله آن واکنش‌های اسید سولفوریک با بتن آهکی است. محصول ابتدایی تخریب بتن توسط اسید سولفوریک، سولفات کلسیم است که معمولاً با نام معدنی آن، یعنی گچ شناخته می‌شود [۳۵]



^۱ Hydrogen Sulfide

^۲ CSHG

باکتری‌های تیوباسیلوس، هوازی هستند و برای زنده ماندن، به اکسیژن آزاد موجود در هوا نیاز دارند. بنابراین تنها می‌توانند روی پوشش بیرونی نازک سطوح زندگی کنند. این به این معنا است که اسید ایجاد شده روی سطوح، باید از خمیر گچ موجود عبور کند و به بتن سالم برسد. با شسته شدن این لایه محافظ گچی توسط جریان‌های پرسرعت و شرایط بارندگی، سطح تازه به وجود آمده در معرض حمله اسید قرار می‌گیرد که خود باعث سرعت بخشیدن فرایند می‌شود. لایه خورده شده در سطح بتن شامل گچ با مراحل مختلف هیدراسیون و رطوبت است [۳۶]. ضخامت این لایه با تولید هر چه بیشتر اسید برای واکنش با بتن، گسترش می‌یابد. تشکیل اترینگایت نیز باعث افزایش حجم شده و با ایجاد ترک‌های داخلی و حفره‌ها، منجر به ایجاد سطح وسیع‌تری برای انجام واکنش شیمیایی می‌شود و نفوذ اسید به داخل بتن بیشتر می‌شود. تبدیل بتن به گچ و اترینگایت، مجاری بتنی را تضعیف می‌کند و قابلیت تحمل تنش توسط بتن را کاهش می‌دهد، در نتیجه منجر به فروریختن بتن می‌شود [۳۷].

اگرچه تشکیل گچ با افزایش حجم با ضریب ۱/۲ تا ۲/۲ همراه است، برخی از پژوهشگران خاطر نشان کرده‌اند که این واکنش در فرایند خوردگی نقش ثانویه دارد [۳۸، ۳۹ و ۴۰]. واکنش بین گچ و تری کلسیم آلومینات (C_3A) که منجر به تشکیل اترینگایت می‌شود خرابی بیشتری به بار می‌آورد؛ چون حجم ماده معدنی اترینگایت، چند برابر حجم مواد اولیه است. برخی از پژوهشگران افزایش حجم با ضریب ۲ را گزارش کرده‌اند، در حالی که دیگران این ضریب را گاهی تا ۷ هم گزارش داده‌اند [۳۸ و ۳۹]. بنابراین، تشکیل اترینگایت عامل اصلی در افزایش حجم است که منجر به افزایش تنش‌های داخلی و تجزیه عوامل تشکیل دهنده بتن و ترک خوردن آن می‌شود. سپس مواد تجزیه شده توسط جریان فاضلاب نیز شسته می‌شود و روند خوردگی شتاب می‌یابد.

۳- تأثیر محیط قلیایی بر بتن

از میان اجزای تشکیل دهنده بتن یعنی آب، سیمان و سنگدانه‌ها، سنگدانه‌ها بدون فعالیت شیمیایی یا خنثی تلقی می‌شوند؛ ولی انواع خاصی از سنگدانه‌ها وجود دارند که می‌توانند در شرایط مناسب محیطی، با قلیاهای موجود در سیمان (K_2O , Na_2O) واکنش نشان دهند. پدیده واکنش قلیایی سنگدانه‌ها^۱ که به سرطان بتن نیز موسوم است به دو صورت واکنش سیلیسی-قلیایی^۲ و واکنش کربناتی-قلیایی^۳ انجام می‌شود. در عمل، واکنش سیلیسی-قلیایی بیشتر رخ

می‌دهد و به این دلیل در پژوهش حاضر، بیشتر به این نوع خاص از واکنش قلیایی پرداخته شد.

آنچه به طور کلی در واکنش قلیایی سنگدانه‌ها اتفاق می‌افتد، ایجاد یک ژل با قابلیت تورم بالا است که انبساط آن باعث ایجاد ترک و خرابی در سازه می‌شود و این خرابی‌ها با نفوذ املاح و مواد مضر به بتن، دوام آن را به شدت کاهش می‌دهد.

در مورد ساز و کار واکنش قلیایی سنگدانه‌ها از سوی پژوهشگران، اظهار نظرهای متفاوتی شده است. شاید بهترین مدل، مدل ارائه شده توسط پاورز و استاینر باشد که بیشترین تطابق را با واقعیت داشته است. بر اساس این مدل در یک واکنش بی‌خطر، یون کلسیم که به مقدار کافی در محلول‌های داخل حفره‌ها وجود دارد، با قلیایی موجود، تورم محدود ایجاد می‌کند. البته هنگامی که یون کلسیم به میزان کافی موجود نباشد، محتوای قلیایی ژل تشکیل شده بیشتر است و در صورت جذب رطوبت، قابلیت بیشتری برای تورم پیدا می‌کند [۴۵-۴۱].

اعتقاد بر این است که شروع و ادامه این واکنش‌ها در صورتی بدون انبساط خواهد بود که غلظت قلیایی بیش از مقدار تولید شده توسط سیمان با قلیایی ۰/۶ درصد (برابر اکسید سدیم) و با هیدروکسید سدیم ۰/۴ نرمال، با نسبت آب به سیمان ۰/۵ نباشد. البته محدود کردن میزان قلیا به ۰/۶ درصد، تضمینی برای جلوگیری از بروز واکنش‌های مضر در بتن نیست. در صورتی که میزان قلیایی سیمان بیش از این مقدار باشد، غلظت یون کلسیم در محلول حفره‌ای کاهش می‌یابد و بنابراین ژلی با کلسیم کم و قلیایی زیاد و قابلیت تورم فراوان شکل می‌گیرد. در این حالت، رگه‌هایی از سنگدانه‌ها که واکنش در آنها صورت می‌گیرد، ضخیم‌تر می‌شوند و به دنبال آن انتقال یون کلسیم که به مقدار زیادی از یون‌های سدیم و پتاسیم هیدراته شده بزرگ‌تر است، با مشکل مواجه می‌شود و این مطلب چنانچه گفته شد می‌تواند زیانبار باشد. محصولات واکنش قلیایی-سیلیسی، یعنی ژل‌ها و کریستال‌ها در تمام خرابی‌های به وجود آمده، از جمله در گردآگرد سنگدانه‌ها، ترک‌ها یا حفره‌های سیمان، در رگه‌ها و شکاف‌ها، در داخل یا در سطح سنگدانه مشاهده شده‌اند. بر اساس پژوهش‌هایی که با میکروپورت الکترونی و اشعه ایکس، انجام شده است، پیشنهاد شده است که ژل حاصل شده به صورت ترکیبی از دو فاز در نظر گرفته شود. فاز قلیایی سیلیکاتی هیدراته که متورم می‌شود و فاز سیلیکات کلسیم قلیایی هیدراته که انبساط محدود دارد. محصولات ثانویه‌ای که می‌توانند به خرابی بیشتر مصالح کمک کنند عبارت‌اند از اترینگایت و توماسیت^۴ [۴۶].

¹ Alkali Aggregate Reaction (AAR)

² Alkali Silica Reaction (ASR)

³ Alkali Carbonate Reaction

⁴ Thaumascite

پژوهشگران دریافته‌اند که افزایش حجم نمونه‌هایی با سیمان پرتلند معمولی از نمونه‌هایی که از ترکیب با سرباره کوره آهن‌گدازی ساخته شده‌اند، بیشتر است [۴۷ و ۴۸]. این پژوهشگران گزارش داده‌اند که مقاومت بهتر سیمان‌های ترکیبی نسبت به سیمان پرتلند معمولی مربوط به مقدار کمتر هیدروکسید کلسیم است. نمونه‌های ملات سیمان خالص بدون مواد افزودنی، که در معرض محلول سولفات سدیم قرار داشتند، انبساطی در حدود ۰/۱۰ تا ۰/۱۱ درصد از خود نشان دادند که خیلی بیشتر از انبساط نمونه‌های ملات سیمان ترکیبی است که انبساطی در حدود ۰/۰۶ تا ۰/۰۹ درصد پس از ۳۶۰ روز غوطه‌وری در محلول سولفات سدیم داشتند. در بسیاری از آزمایش‌ها، سیمان پرتلند ضد سولفات قوی، مقاومت بهتری را نسبت به سیمان پرتلند معمولی در محلول سولفات سدیم از خود نشان داده‌اند که این مورد به مقدار کم کلسیم آلومینات (C_3A) موجود در سیمان ضد سولفات قوی، نسبت داده می‌شود [۴۹]. با این وجود، بعضی‌ها با مقایسه رفتار فرعی سیمان ضد سولفات قوی با سیمان پرتلند معمولی دریافته‌اند که امکان دارد این مورد مربوط به غلظت محلول سولفات مورد استفاده باشد [۵۰]. برخی محققان نیز محلول اسید سولفوریک یک و پنج درصد را به منظور بررسی نمونه‌های بتنی در سیکل‌های هفت روزه خوردگی به کار برده‌اند [۵۱]. پس از هر سیکل، نمونه‌ها برس زده و وزن شدند. آنها اثر افزودن دوده سیلیس را نیز روی مقاومت در برابر اسید سولفوریک بررسی کردند که نتیجه به دست آمده نشان داد که با افزایش مقدار دوده سیلیس از صفر تا ۳۰ درصد مقدار سیمان، مقاومت نمونه‌ها هم افزایش می‌یابد. وقتی که جایگزینی ۳۰ درصد استفاده شد، تعداد سیکل‌هایی که منجر به انهدام نمونه‌ها در اسید سولفوریک یک درصد می‌شد، تقریباً دو برابر شد. با این وجود در غلظت‌های بیشتر محلول اسید، مقدار افزایش قابل توجه کمتری در مقاومت به وجود آمد. تنها یک یا دو سیکل بیشتر تا انهدام کامل نمونه‌ها مشاهده شد. البته این اختلاف را به تجزیه سیلیکات کلسیم

هیدراته در محلول‌های با غلظت بالا، به جای واکنش با هیدروکسید کلسیم آزاد نسبت دادند. یاموتو و همکاران به این نتیجه رسیدند که افزودن ۳۰ درصدی دوده سیلیس، زمان انهدام کامل نمونه‌ها را تقریباً دو برابر می‌کند [۵۲]. حتی در محلول اسید سولفوریک ۵ درصد، آنها افزایش مقاومت نمونه‌های با دوده سیلیس را به کاهش نفوذپذیری بتن نسبت دادند.

همچنین فتوحی و هوگس آزمایش مشابهی با محلول‌های اسید سولفوریک یک و سه درصد را به کار بردند [۵۳]. آنها دریافته‌اند که تجزیه نمونه‌ها، که به روش کاهش وزن اندازه‌گیری می‌شد، متناظر با افزایش میزان سیمان، افزایش می‌یابد. بسته به غلظت اسیدی، افزایش درصد حجمی سیمان از ۱۰ به ۱۷ درصد باعث کاهش وزن بیشتر به دو برابر در اسید سولفوریک یک درصد و تقریباً سه برابر در محلول اسید سولفوریک سه درصد می‌شود. این پژوهشگران همچنین به تقلیل میزان کاهش وزن و کم کردن نسبت آب به سیمان پی بردند. وقتی نسبت آب به سیمان از چهار به سه درصد کاهش یافت، در محلول اسید سولفوریک یک درصد، میزان کاهش وزن تقریباً ۲۰ درصد کم شد. همچنین در پژوهش آنها کاهش نسبت آب به سیمان هیچ‌گونه تقلیلی در کاهش وزن را در مورد محلول اسید سولفوریک سه درصد موجب نشد.

۴- کارهای آزمایشگاهی انجام شده

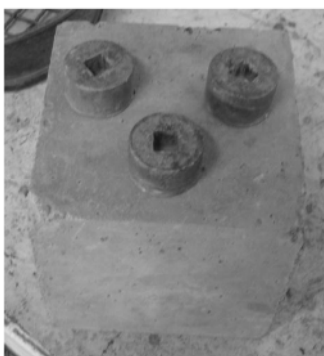
۴-۱- مصالح مصرفی

برای انجام این پژوهش، نمونه‌های بتنی باید در محیط واقعی فاضلاب قرار می‌گرفتند. به همین دلیل از مصالح و مواد افزودنی که در ساخت تصفیه‌خانه شهر همدان به کار رفته بود، استفاده شد. سیمان مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از نوع سیمان تیپ ۲ شرکت سیمان هگمتانه همدان بود که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان مصرفی در پژوهش‌های مربوط به این مقاله

ردیف	مشخصات	مقدار	محدوده قابل قبول استاندارد ملی ۳۴۳۲ ایران
۱	انبساط با آزمون اتوکلاو (حداکثر درصد)	۲ درصد	۸ درصد
۲	انقباض با آزمون اتوکلاو (حداکثر درصد)	-	۲ درصد
۳	گیرش با آزمون ویکات	اولیه (حداقل به دقیقه) ۱۴۰	۶۰
		نهایی (حداکثر به ساعت) $3 \frac{1}{3}$	۷
۴	تاب فشاری، کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (حداقل)	۳ روز ۲۳۴	۱۰۰
		۷ روز ۳۴۹	۱۷۵
		۲۸ روز ۵۳۶	۳۰۰
۵	اکسید منیزیم (Mgo) (حداکثر درصد وزنی)	۱/۲۱	۵
۶	سولفیت SO_3^- (حداکثر درصد وزنی)	۲/۳۵	۴
۷	افت حرارتی (حداکثر درصد وزنی)	۲/۴۸	۵
۸	یون کلراید (Cl) (حداکثر درصد وزنی)	۰/۰۶	۱ درصد

هر رده مقاومتی سه نمونه مکعبی ۱۵ سانتی متری تهیه شد. این نمونه‌ها در شرایط استاندارد نگهداری شدند. با توجه به اینکه در تهیه مخلوط‌های بتنی از سیمان تیپ ۲ استفاده شده بود، در ۴۲ روزگی، آزمایش‌هایی به شرح زیر بر روی آنها انجام گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، قبل و بعد از قرار گرفتن نمونه‌های بتنی در محیط‌های فاضلابی تصفیه‌خانه ملایر، مقاومت آنها با به‌کارگیری روش پیچش، اندازه‌گیری شد [۵۴]. در هر وجه نمونه‌های بتنی سه آزمون پیچش انجام شد و متوسط قرائت‌ها در نتایج استفاده شد.



شکل ۱- انجام آزمایش پیچش

میکروسیلیس، پودری است به‌رنگ خاکستری روشن یا تیره که حاوی حدود ۹۴ تا ۹۶ درصد دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) است که از فرایند تولید فرو سیلیسیم در کوره‌های قوس الکتریکی به‌دست می‌آید و برای ارتقای بعضی از خواص بتن در زمان ساخت، به بتن افزوده می‌شود. میکروسیلیس سوپر پوزولانیست که در صورت کاربرد صحیح، تأثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت بتن خواهد داشت. بازدهی واکنش میکروسیلیس در بتن بستگی به درصد استفاده از این ماده و سایر مشخصات طرح اختلاط، نظیر نسبت‌های آب به مواد چسباننده و غیره دارد [۴۶].

روان‌کننده، ماده افزودنی با صرفه اقتصادی برای کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش روانی بتن است که در بالا بردن مقاومت فشاری نیز مؤثر است. این افزودنی، علاوه بر آسانی اجرای بتن، باعث تسریع حصول مقاومت در سنین مورد نظر و افزایش مقاومت‌های اولیه و نهایی بتن می‌شود.

هوازای بتن، افزودنی حباب‌زایی است که برای کاهش نفوذپذیری و افزایش طول بتن در برابر سیکل‌های تکراری یخبندان و ذوب به بتن افزوده می‌شود. این ماده با ایجاد حباب‌های ریز هوا به اندازه‌های معین و شکل زنجیره‌ای، خواص بالا را ایجاد می‌کند.

طرح اختلاط‌های بتنی استفاده شده در ساخت نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مواد روان‌کننده، دوده سیلیس و هوازای بتن مورد استفاده، از محصول شرکت نامیکاران بود.

۴-۲- تهیه نمونه‌ها و تعیین مقاومت آنها

پس از تعیین طرح اختلاط بتن، نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر ساخته شدند. یک روز پس از بتن‌ریزی، نمونه‌ها به‌مدت ۴۲ روز در درون مخزن‌های آب با دمای ۲۲ درجه سلسیوس نگهداری شدند. ۱۳ نوع بتن با مقاومت فشاری متفاوت تهیه و از

جدول ۲- طرح‌های اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی

نمونه	ماسه	نخود	بادامی	سیمان	آب	w/c	میکروسیلیس	فوق روان‌کننده	هوازا
SBO1 SBT1 SPO1 SPT1	۶۳۹	۵۹۰	۴۰۸	۴۴۴	۱۹۵	۰/۴۴	-	-	-
SBO2 SBT2 SPO2 SPT2	۷۲۳	۳۵۴	۵۳۰	۴۲۴	۱۸۶	۰/۴۴	-	۱۰۰ سی‌سی Micro air	-
SBO3 SBT3 SPO3 SPT3	۸۶۲	۲۳۱	۷۵۷	۳۷۵	۱۵۰	۰/۴	-	۱۴۰۰ سی‌سی G51	-
SBO4 SBT4 SPO4 SPT4	۷۹۵	۳۵۹	۴۹۸	۳۶۰	۱۴۸	۰/۳۷	۳۶	۸۰۰ سی‌سی G51	-
SBO5 SBT5 SPO5 SPT5	۷۹۵	۳۵۹	۴۹۸	۳۱۰	۱۶۰	۰/۴۳	۶۲	۷۰۰ سی‌سی G51	-

۱۳۵ روز در محل مورد نظر در حوضچه‌ها و لوله‌های تصفیه‌خانه قرار گرفت.



شکل ۲- نمایی از تصفیه‌خانه ملایر، محل انجام پژوهش‌ها



شکل ۳- قرار دادن نمونه‌های بتنی در فضای بالای خط جریان در مجاری انتقال فاضلاب

نمونه‌های بتنی در دو حوضچه و دو مجرای انتقال فاضلاب قرار داده شدند که در هر محل پنج نمونه و جمعاً بیست نمونه آزمایش شدند. نمونه‌ها بر حسب محل قرارگیری و مواد افزودنی به شرح زیر نام‌گذاری شدند:

Sboi - نمونه‌هایی که در حوضچه اولی با pH برابر ۶/۹ تا ۷/۵ قرار گرفتند؛

SbTi - نمونه‌هایی که در حوضچه دومی با pH برابر ۹ تا ۹/۲ قرار گرفتند؛

Spoi - نمونه‌هایی که در لوله انتقال با pH برابر ۵/۱ تا ۶ قرار گرفتند؛

SpTi - نمونه‌هایی که در لوله انتقال با pH برابر ۴/۲ تا ۵ قرار گرفتند.

i اشاره به شماره نمونه دارد که عددی بین ۱ تا ۵ است و در آن:

۱- نمونه‌های فاقد مواد افزودنی، ۲- نمونه‌های دارای ماده افزودنی هوازا، ۳- نمونه‌های دارای فوق روان کننده و هوازا، ۴- نمونه‌های

در این روش استوانه‌های آلومینیومی با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر مطابق شکل ۱ در سه نقطه از نمونه، پس از سمباده زدن سطح بتن و تمیز کردن آن، با چسب اپوکسی چسبانده شده و بعد از گذشت ۲۴ ساعت به وسیله ترک‌متر، گشتاور پیچشی به استوانه یادشده به‌طور پیوسته و با سرعت یکنواخت تا لحظه شکست بتن زیر استوانه وارد و گشتاور پیچشی شکست یادداشت شد.

در این پژوهش‌ها، برای بررسی روند کاهش مقاومت بتن ابتدا نسبت به تعیین منحنی کالیبراسیون روش نیمه‌مخرب (با خرابی جزئی) پیچش اقدام شد. در ادامه ۱۵ نمونه $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر بتنی بدون مواد افزودنی و همچنین دارای مواد افزودنی هوازا، روان‌کننده و میکروسیلیس (۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین سیمان) تهیه و در درون لوله‌های انتقال و تصفیه‌خانه فاضلاب قرار داده شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۳۵ روز در محیط‌های آزمایش قرار داشتند که پس از گذشت هر ۴۵ روز، با به‌کارگیری روش پیچش، مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد. به دلیل کم بودن تغییرات دما در لوله‌های انتقال فاضلاب در طول دوره آزمایش، عملاً بررسی تأثیر دما بر مقاومت نمونه‌ها در محیط‌های مورد نظر امکان‌پذیر نبود.

۵- انجام آزمایش‌های میدانی

محل انجام آزمایش‌های میدانی این پژوهش، تصفیه‌خانه‌ای در شهر ملایر بود که نمایی از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر فاضلاب بر روی نمونه‌های بتنی تعداد کافی از نمونه‌های بتنی دارای مواد افزودنی و بدون مواد افزودنی ساخته شدند. مواد افزودنی به‌کار گرفته شده عبارت‌اند از هوازا، فوق روان‌کننده و میکروسیلیس. پس از عمل‌آوری و اندازه‌گیری مقاومت این نمونه‌ها، آنها در مکان‌های مختلفی از تصفیه‌خانه مانند واحد دانه‌گیر، واحد هوادهی و قسمت‌های بالایی مجاری انتقال فاضلاب قرار داده شدند. پس از گذشت ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز، مقاومت آنها اندازه‌گیری شد. در این بررسی‌ها دما و pH محیط نیز اندازه‌گیری شد.

از بیست نمونه بتنی ساخته شده، پنج نمونه در واحد دانه‌گیری، پنج نمونه در حوضچه هوادهی شماره ۴ و ۵ نمونه در فضای خالی بالای مجرای انتقال فاضلاب به تصفیه‌خانه قرار داده شدند (شکل ۳). لازم به توضیح است که بعد از عمل‌آوری، نمونه‌ها به محل‌های مورد نظر منتقل شدند و به مدت ۴۵ روز در داخل محیط مورد نظر قرار گرفتند. در پایان مدت ۴۵ روز، نمونه‌ها مورد آزمایش پیچش قرار گرفتند و سپس به محل قبلی برگردانده شدند. این پروسه برای هر نمونه سه بار تکرار شد. جمعاً هر نمونه به مدت

دارای میکروسیلیس (ده درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان) است. اطلاعات یادشده در جدول ۳ به صورت خلاصه آورده شده‌اند.

جدول ۳- خلاصه‌ای از اطلاعات نمونه‌های آزمایش

نمونه مورد نظر	محل قرارگیری نمونه	مدت زمان آزمایش (روز)	تعداد نمونه	pH محیط
Sboi	واحد دانه‌گیری	۴۵ × ۳	۵	۶/۹ تا ۷/۵
SbTi	برکه هوادهی شماره ۴	۴۵ × ۳	۵	۹/۲ تا ۹
Spoi	فضای بالای لوله انتقال ۱	۴۵ × ۳	۵	۶ تا ۵/۱
SpTi	فضای بالای لوله انتقال ۲	۴۵ × ۳	۵	۵ تا ۴/۲

نمونه‌ها هر ۴۵ روز یکبار از محیط فاضلابی خارج و پس از خشک شدن و جلبک‌زدایی، آماده برای آزمون پپچس می‌شدند. با سه بار تکرار مراحل یادشده، هر نمونه در مجموع به مدت ۱۳۵ روز در محیط آزمایش قرار گرفت.

۱-۵- اندازه‌گیری pH

pH، اندازه یون‌های هیدروژن را در آب، یا در یک محلول آبی، نشان می‌دهد (رابطه ۳)

$$pH = -\log(H^+) = \log\left(\frac{1}{H^+}\right) \quad (4)$$

با اندازه‌گیری pH، تلاش یون‌های هیدروژن در آب یا محلول آبی روشن می‌شود. اگر pH برابر با ۷ باشد، آب یا محلول آبی خنثی است. هرگاه pH بیش از ۷ باشد، آب یا محلول آبی قلیایی و هرگاه pH کمتر از ۷ باشد، آب یا محلول آبی اسیدی است. ابتدا pH آب در مکان‌های مختلف تصفیه‌خانه برای مشخص کردن اسیدی یا قلیایی بودن فاضلاب توسط کاغذ تورنسل اندازه‌گیری شد. برای کنترل و بررسی دقیق pH در چندین نوبت، نمونه‌هایی از

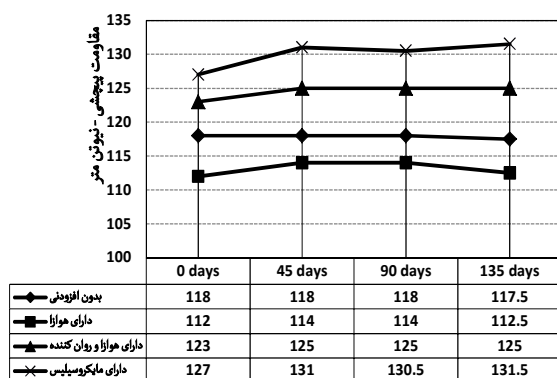
آب گرفته شد و pH فاضلاب در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب ملایر توسط pH متر دیجیتالی، اندازه‌گیری شد.

۲-۵- اندازه‌گیری دما

برای یافتن تأثیر دما بر روند آسیب‌دیدگی بتن، هر روز دمای محیط لوله‌ها اندازه‌گیری می‌شد. به این منظور دماسنجی در محیط لوله‌ها نصب شد و بیشینه و کمینه دمای محیط در هر روز قرائت و یادداشت شد. با این روش میانگین دمایی برای هر روز و هر دوره محاسبه شد.

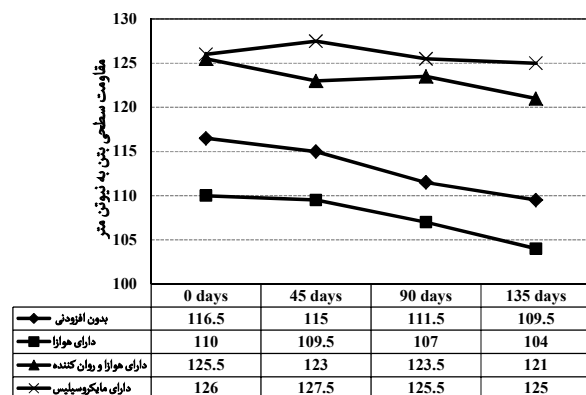
۶- نتایج و بحث

در این پژوهش pH محیط، دمای داخل مجاری انتقال و مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد. دما در محیط‌های آزمایش توسط یک دماسنج که قابلیت ثبت دمای بیشینه و کمینه را داشت اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که دما هر سه روز یکبار اندازه‌گیری می‌شد. میانگین دمای اندازه‌گیری شده در محیط‌های بررسی، بین ۱۷/۲ تا ۴۲/۲ درجه سلسیوس بود. به دلیل اینکه در مدت زمان نگهداری نمونه‌ها در داخل سیستم‌های فاضلابی، دما پیوسته متغیر بود، امکان تعیین دقیق تأثیر تغییرات دما بر مقاومت‌های اندازه‌گیری شده وجود نداشت. یعنی ممکن نبود تأثیر چند درجه دما در چند روز، بر مقاومت اندازه‌گیری شده مشخص شود. البته برای اینکه محیط کاملاً عملی و دارای شرایط بهره‌برداری باشد، لازم بود این موارد رعایت شوند. pH در هر محیط آزمایش توسط دستگاه pH متر دیجیتالی اندازه‌گیری شد و به این ترتیب pH فاضلاب در هر دوره آزمایش، سه مرتبه یعنی هر ۱۵ روز یکبار و هر مرتبه در دو نوبت صبح و عصر اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از مطالعه تأثیر محیط‌های فاضلابی با pH مختلف بر مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی، در دوره‌های زمانی متفاوت، در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است.



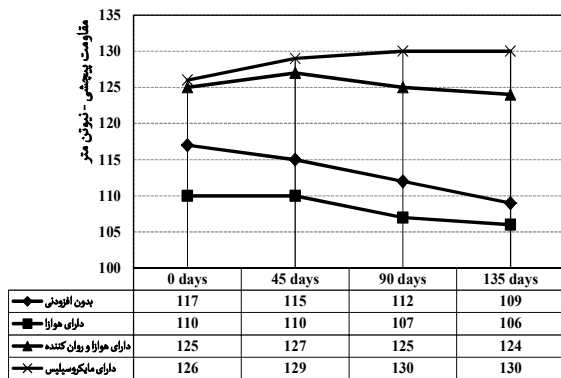
شکل ۵- تغییرات در مقاومت نمونه‌های بتنی مختلف

قرار داده شده در برکه هوادهی با pH بین ۹ تا ۹/۲



شکل ۴- تغییرات در مقاومت نمونه‌های بتنی مختلف قرار داده

شده در واحد دانه‌گیری با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵



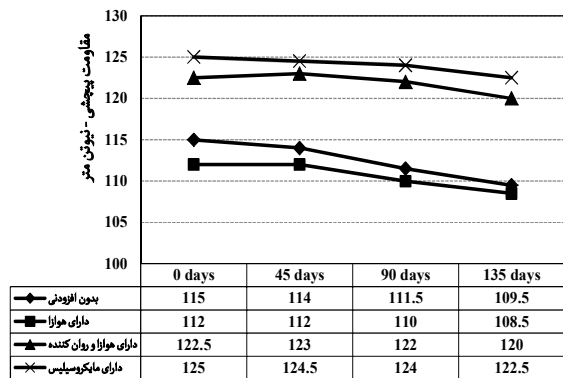
شکل ۷- تغییرات در مقاومت نمونه‌های بتنی مختلف

قرار داده شده در فضای بالای لوله انتقال با pH ۲ تا ۴/۲ تا ۵

فوق روان کننده استفاده شده است، به مدت ۱۳۵ روز، مقاومت آن را به میزان ۱ نیوتن-متر کاهش داده است. همچنین مقاومت‌های اندازه‌گیری شده که در این شکل نشان داده شده‌اند، بیانگر آن هستند که مقاومت بتن دارای فوق روان کننده پس از ۱۳۵ روز ماندگاری در این شرایط، به میزان ۱/۴ درصد کاهش یافته است.

همان‌گونه که در بخش تهیه نمونه‌ها اشاره شد، استفاده از روان‌کننده‌ها باعث می‌شود تا روانی یا کارایی بتن افزایش یابد و در نتیجه با به‌کارگیری روان‌کننده می‌توان از مقدار آب مخلوط بتن کاست. این کاهش مقدار آب بتن باعث می‌شود تا پس از سفت و سخت شدن بتن، آب کمتری از بتن تبخیر شود که در نتیجه از میزان حفره‌های خالی در داخل بتن کاسته می‌شود. کاهش حفره‌های داخلی بتن، باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود که در نتیجه مقدار مقاومت آن در مواجهه با عوامل مخرب موجود در شرایط حاکم بر سیستم‌های فاضلابی افزایش می‌یابد.

همچنین شکل ۴ نشان می‌دهد که مقاومت بتنی که در آن از پودر سیلیس استفاده شده است، پس از قرار گرفتن در واحد دانه‌گیری با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵ افزایش می‌یابد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که قرار گرفتن بتنی که در آن از پودر سیلیس استفاده شده است به مدت ۱۳۵ روز، مقاومت آن را به میزان ۴ نیوتن-متر افزایش داده است. به علاوه پودر سیلیس موجود در این بتن، مقاومت آن را در همان شرایط افزایش داده است و این افزایش ۵/۸ درصد بوده است. لازم به ذکر است، بتنی که در ساخت آن از پودر سیلیس استفاده شده است، به دلیل منافذ بسیار کمتری که نسبت به بتن معمولی بدون مواد افزودنی دارد، نفوذ عوامل مخرب موجود در سیستم‌های فاضلابی، به درون این نوع بتن بسیار دشوارتر بوده و در نتیجه مقاومت این بتن در شرایط فاضلابی افزایش می‌یابد. با توجه به مطلب یاد شده به نظر می‌رسد که چون عوامل مخرب نتوانسته‌اند به درون بتن نفوذ نمایند، عمل هیدراسیون سیمان داخل نمونه‌ها ادامه یافته و باعث افزایش



شکل ۶- تغییرات در مقاومت نمونه‌های بتنی مختلف

قرار داده شده در فضای بالای لوله انتقال با pH ۱ تا ۵/۱ تا ۶

۱-۶ تأثیر محیط نسبتاً خنثی

همان‌گونه که از شکل ۴ پیداست، مقاومت بتنی که در آن از مواد افزودنی استفاده نشده است، پس از قرار گرفتن در محیط فاضلابی با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵ به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. این شکل نشان می‌دهد که قرار گرفتن بتن بدون مواد افزودنی به مدت ۱۳۵ روز در واحد دانه‌گیری، مقاومت آن را به میزان ۸ نیوتن-متر یعنی ۷ درصد کاهش داده است. باید توجه داشت که در بتن فاقد مواد افزودنی، به دلیل رسیدن به روانی و کارایی لازم برای فشردگی با وسایل موجود (لرزاننده)، مقدار آب بتن بیش از زمانی است که از روان‌کننده استفاده می‌شود. به همین دلیل پس از سفت و سخت شدن بتن، حفره‌های حاصل از تبخیر آب اضافه بتن در درون بتن به وجود آمده که منجر به افزایش نفوذپذیری بتن و در نتیجه نفوذ راحت‌تر عوامل مخرب به درون آن می‌شود و خرابی بتن افزایش می‌یابد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که مقاومت بتنی که در آن از مواد هوازا استفاده شده است، پس از قرار گرفتن در واحد دانه‌گیری با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵ به مدت ۱۳۵ روز، به میزان ۴ نیوتن-متر کاهش یافته است. بررسی نتایج در شکل ۴ بیانگر آن است که هوادار بودن بتن، مقاومت آن در شرایط فاضلابی را کمتر کاهش می‌دهد. نکته قابل توجه این است که افزایش مواد هوازا به بتن باعث ایجاد حباب‌های هوای بسته و ریز در داخل بتن می‌شود که با افزایش روانی یعنی کارایی بتن، بهبود فشردگی آن را سبب می‌شود. چون با این عمل مقدار آب مصرفی مخلوط بتن کاهش می‌یابد، همین امر باعث کاهش نفوذپذیری بتن و در نتیجه افزایش مقاومت نسبی این نوع بتن در مقابل عوامل مهاجم شرایط فاضلابی می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقاومت بتنی که در آن از مواد هوازا و فوق روان کننده استفاده شده است، نیز پس از قرار گرفتن در واحد دانه‌گیری با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵، کاهش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که قرار گرفتن بتنی که در آن از مواد هوازا و

مقاومت آن می‌شود. بررسی مقایسه‌ای نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که در مدت ۱۳۵ روز نگهداری در شرایط با pH بین ۶/۹ تا ۷/۵، بتن معمولی بدون افزودنی به میزان ۷ نیوتن‌متر، بتن دارای هوزا به میزان ۶ نیوتن‌متر، بتن دارای هوزا و روان‌کننده به میزان ۵/۵ نیوتن‌متر و بتن دارای پودر سیلیس به میزان ۱ نیوتن‌متر کاهش مقاومت داشته‌اند.

۶-۲- تأثیر محیط قلیایی

در شکل ۵ بیانگر آن است که مقاومت بتنی که بدون مواد افزودنی ساخته شده است، پس از قرار گرفتن به مدت ۱۳۵ روز در برکه هوادهی با pH بین ۹ تا ۹/۲، دو درصد کاهش مقاومت داشته‌اند. بررسی این شکل نشان می‌دهد که بتن یاد شده تا زمان ماندگاری ۹۰ روز در این محیط، ۲/۳ درصد افزایش مقاومت و پس از آن کاهش مقاومت داشته است. نکته قابل توجه این است که سیمان در هنگام تماس با آب، هیدراته می‌شود و باعث کسب مقاومت بتن می‌شود. در سنین کمتر بتن، سرعت عمل هیدراته شدن سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت بتن بسیار بالا است. با افزایش سن بتن، سرعت هیدراته شدن سیمان به سرعت کاهش می‌یابد. شاید بتوان گفت که در محیط یاد شده، در ابتدا هیدراته شدن سیمان ادامه یافته و باعث افزایش مقاومت آن شده و سپس با تأثیر عوامل مخرب بتن، از مقاومت این نمونه‌های بتنی کاسته شده است.

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که مقاومت بتن دارای مواد هوزا و فوق روان‌کننده که به مدت ۱۳۵ روز در محیط فاضلابی برکه هوادهی با pH بین ۹ تا ۹/۲ قرار گرفته‌اند، ۳ درصد افزایش داشته است. مقاومت بتن دارای ۱۰ درصد پودر سیلیس که به مدت ۱۳۵ روز در شرایط فاضلابی قرار گرفت، نه تنها کاهش نداشت، بلکه مقاومتش نسبت به مقاومت اولیه به میزان ۶/۵ درصد افزایش داشت. این افزایش مقاومت را می‌توان به کاهش نفوذپذیری بتن دارای مواد هوزا و روان‌کننده و ادامه عمل هیدراسیون سیمان نسبت داد که در بالا به آن اشاره شد. بررسی مقایسه‌ای نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که در مدت ۱۳۵ روز نگهداری در شرایط با pH بین ۹ تا ۹/۲، بتن معمولی بدون افزودنی به میزان ۰/۵ نیوتن‌متر کاهش، بتن دارای هوزا به میزان ۰/۵ نیوتن‌متر افزایش، بتن دارای هوزا و روان‌کننده به میزان ۲ نیوتن‌متر افزایش و بتن دارای پودر سیلیس به میزان ۴/۵ نیوتن‌متر افزایش مقاومت داشته‌اند.

۶-۳- تأثیر محیط اسیدی

تأثیر شرایط فاضلابی بر مقاومت نمونه‌های بتنی هوادار که به مدت ۱۳۵ روز در محیط فاضلابی فضای بالای لوله شماره ۱ با pH بین ۵/۱ تا ۶ نگهداری شدند، در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که مقاومت بتن یاد شده در مدت ۱۳۵ روز

به میزان ۳/۵ نیوتن‌متر کاهش یافته است. همچنین بر اثر تأثیر این شرایط بر مقاومت نمونه‌های بتنی دارای هوا و فوق روان‌کننده، پس از ۱۳۵ روز، مقاومت به میزان ۲/۵ نیوتن‌متر کاهش یافته است. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که محیط با pH بین ۵/۱ تا ۶، مقاومت نمونه‌های بتنی دارای پودر سیلیس که به مدت ۱۳۵ روز در این محیط قرار گرفتند را به میزان ۲/۵ نیوتن‌متر کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که حتی بتن دارای پودر سیلیس در محیط‌های اسیدی، از حملات عوامل مخرب سیستم‌های فاضلابی در امان نیست. البته مقایسه نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که افزودنی هوزا و فوق روان‌کننده به بتن، به دلیل مقاومتش در مقابل عوامل مخرب موجود در سیستم‌های فاضلابی، به بتن‌های دارای پودر سیلیس ارجحیت دارد. زیرا خود سیلیس ممکن است تحت شرایط رطوبت و دمای بالا، مشکل واکنش قلیایی-سیلیس را نیز همراه داشته باشد. بررسی مقایسه‌ای نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که در مدت ۱۳۵ روز نگهداری در شرایط با pH بین ۵/۱ تا ۶، بتن معمولی بدون افزودنی به میزان ۵/۵ نیوتن‌متر، بتن دارای هوزا به میزان ۳/۵ نیوتن‌متر، بتن دارای هوزا و روان‌کننده به میزان ۲/۵ نیوتن‌متر و بتن دارای پودر سیلیس به میزان ۲/۵ نیوتن‌متر کاهش مقاومت داشته‌اند.

شکل ۷ تأثیر شرایط فاضلابی فضای بالای لوله شماره ۲ با pH بین ۴/۲ تا ۵ را بر مقاومت نمونه‌های بتنی بدون مواد افزودنی است، نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که مقاومت نمونه‌ها پس از ۱۳۵ روز قرارگیری در این محیط، به میزان ۸ نیوتن‌متر کاهش یافته است. همچنین مقاومت نمونه‌های بتنی دارای هوا که به مدت ۱۳۵ روز در این محیط نگه داشته شدند، به میزان ۶ نیوتن‌متر، یعنی حدود ۱۳ درصد کاهش یافته است. این کاهش مقاومت برای نمونه‌های بتنی دارای هوا و فوق روان‌کننده که به مدت ۱۳۵ روز در این محیط قرار گرفتند، به میزان ۴/۵ نیوتن‌متر، یعنی حدود ۸ درصد است. بررسی تغییر در مقاومت نمونه‌های بتنی دارای ده درصد پودر سیلیس که مدت ۱۳۵ روز در همین محیط قرار گرفتند، نشان می‌دهد که مقاومت آنها به مقدار ۱ نیوتن‌متر یعنی ۴ درصد کاهش یافته است (شکل ۷). بررسی مقایسه‌ای نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که در مدت ۱۳۵ روز نگهداری در شرایط با pH بین ۴/۲ تا ۵، بتن معمولی بدون افزودنی به میزان ۸ نیوتن‌متر کاهش، بتن دارای هوزا و روان‌کننده به میزان ۱ نیوتن‌متر کاهش و بتن دارای پودر سیلیس به میزان ۴ نیوتن‌متر افزایش مقاومت داشته‌اند.

با بررسی نتایج بالا به نظر می‌رسد که وجود میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین سیمان، باعث پر شدن سوراخ‌ها و منافذ بتن و

مقاومت فشاری بتن با نتایج متناظر به دست آمده از اعمال روش پیچش در شکل ۸ ارائه شده است. تا در صورت علاقه و برای درک بهتر نتایج، آنها به یکدیگر تبدیل شوند.

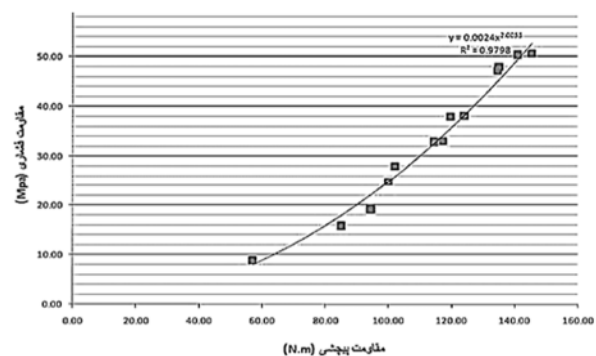
۷- نتیجه گیری

می توان نتیجه گرفت که در محیط فضای بالای خط جریان در درون لوله های انتقال فاضلاب با pH برابر با ۴ تا ۶ که محیط های اسیدی محسوب می شود، با کاهش pH، مقاومت نمونه های بتنی کاهش بیشتری از خود نشان می دهند؛ یعنی کاهش مقاومت نمونه های بتنی قرار گرفته در محیط های فاضلابی با pH محیط رابطه عکس دارند. همچنین نتایج بررسی های به عمل آمده نشان داد که در شرایط محیطی مختلف فاضلابی مورد نظر، مقاومت تمام نمونه ها، به جز نمونه های دارای پودر سیلیس که در محیط نسبتاً خنثی قرار گرفتند، کاهش یافتند. همچنین مشاهده شد که در محیط های قلیایی فاضلابی مورد مطالعه، نمونه های بتنی فاقد مواد افزودنی از خود کاهش مقاومت و نمونه های بتنی دارای ده درصد میکروسیلیس، افزایش مقاومت نشان دادند و مقاومت نمونه های بتنی دارای فوق روان کننده و میکروسیلیس که در محیط های فاضلابی قرار گرفته بودند، تقریباً ثابت ماندند. با بررسی اجمالی نتایج مربوط به میزان دمای حاکم بر شرایط تعیین مقاومت سطحی نمونه های بتنی، می توان بیان داشت که با افزایش دما، مقاومت بتن در سیستم های فاضلابی، کاهش بیشتری دارد.

۸- قدردانی

نویسندگان این مقاله، از همکاری تمامی مسئولان محترم تصفیه خانه ها و مراکزی که در انجام این پژوهش ها یاری رساندند، سپاسگزاری می کنند.

همچنین کاهش نفوذپذیری و کاهش آسیب پذیری مقاومتی آن می شود. برای بتنی که در برابر حملات اسیدی مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد، در این آزمایش ها با افزایش میکروسیلیس به میزان ۲۰ درصد نتیجه ای عکس حاصل شد. این احتمال وجود دارد که استفاده از ۲۰ درصد میکروسیلیس در نمونه ها، باعث پر کردن سوراخ ها و منافذ بتن می شود که یک عامل مثبت به حساب می آید، اما استفاده از همین مقدار میکروسیلیس، باعث ایجاد واکنش با Na_2O و K_2O سیمان می شود که نتایج منفی به بار می آورد؛ زیرا ترکیب میکروسیلیس با Na_2O و K_2O سیمان و تولید محصولات جانبی که نسبت به مواد اولیه حجم و استحکام کمتری دارند، باعث ترک خوردن و ناپایداری نمونه در برابر افزایش آسیب دیدگی می شود و اثر همزمان این دو عامل باعث می شود که آسیب دیدگی بتن دارای ۲۰ درصد میکروسیلیس بیشتر از آسیب متناظر نمونه های دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس باشد.



شکل ۸- رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی بتن و نتایج متناظر به دست آمده از روش پیچش

با اینکه تأثیرات مخرب صورت گرفته در سطح نمونه ها رخ می دهد و نباید آن را به درون نمونه نسبت داد، منحنی ربط بین

۹- مراجع

1. Parker, C.D. (1945). "The isolation of a species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide." *Aust. J. of Exp. Biol. Med. Sci.*, 23, 81-90.
2. Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., and Verstraete W. (2000). "Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete." *J. of Cem. Concr. Res.*, 30(4), 623-634.
3. Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., and Noda, S. (1992). "Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes." *J. of Water Res.*, 26(1), 29-37.
4. Fan, C.Y., Field, R., Pisano, W.C., Barsanti, J., Joyce, J.J., and Sorenson, H. (2001). "Sewer and tank flushing for sediment, corrosion, and pollution control." *J. of Water Res. Pl. and Manag.*, 127, 194-196.
5. Jana, D., and Lewis, R.A. (2005). "Acid attack in a concrete sewer pipe-a petrographic and chemical investigation." *In: Proc 27th Int. Conf on Cement Microscopy*, Victoria, Canada.
6. Roberts, D.J., Nica, D., Zuo, G., and Davis, J.L. (2002). "Quantifying microbially induced deterioration of concrete: Initial studies." *Int. J. of Biodeter and Biodegr*, 49(4), 227-234.

7. Barbosa, V.L., Burgess, J.E., Darke, K., and Stuetz, R.M. (2002). "Activated sludge biotreatment of sulphurous waste emissions." *J. of Rev. Env. Sci. Biotech.*, 1(4), 345-362.
8. Saricimen, H., Shameem, M., Barry, M.S., Ibrahim, M., and Abbasi, T.A. (2003). "Durability of proprietary cementitious materials for use in wastewater transport systems." *J. of Cem. Concr. Comp.*, 25(4), 421-427.
9. Stufflebean, J. (2007). *Report on bids and award of contract for the San José/Santa Clara water pollution control plant, FY 2007/2008 CIP*, East Primary Influent Channel Repair Project, San José, California.
10. Weritz, F., Taffe, A., Schaurich, D., and Wilsch, G. (2009). "Detailed depth profiles of sulfate ingress into concrete measured with laser induced breakdown spectroscopy." *J. of Constr. Build. Mater.*, 23(1), 275-283.
11. Attiogbe, E.K., and Rizkalla, S.H. (1988). "Response of concrete to sulfuric acid attack." *ACI Mater. Journal*, 84(6), 481-488.
12. Idriss, A.F., Negi, S.C., Jofriet, J.C., and Hayward, G.L. (2001). "Corrosion of steel reinforcement in mortar specimens exposed to hydrogen sulfide, Part 1: Impressed voltage and electrochemical potential tests." *J. of Agr. Eng. Res.*, 79(3), 223-230.
13. Vincke, E., Verstichel, S., Monteny, J., and Verstraete, W. (1999). "A new test procedure for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete." *J. of Biodegradation*, 10(6), 421-428.
14. Skalny, J., Marchand, J., and Odler, I. (2002). *Sulfate attack on concrete*, Spon Press, London.
15. Mohan, S.V., Rao, N.C., Prasad, K.K., and Sarma, P.N. (2005). "Bioaugmentation of an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBBR) with immobilized sulphate reducing bacteria (SRB) for the treatment of sulphate bearing chemical wastewater." *J. of Process Biochem.*, 40(8), 2849-2857.
16. Ayoub, G.M., Azar, N., El Fadel, M., and Hamad, B. (2004). "Assessment of hydrogen sulfide corrosion of cementitious sewer pipes: a case study." *Urban Water Journal*, 1(1), 39-53.
17. Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E., and Nakhla, G. (2006) "Effect of geopolymer cement on microstructure, compressive strength and sulfuric acid resistance of concrete." *J. of Mag. Concr. Res.*, 58(5), 321-331.
18. Davis, J.L., Nica, D., Shields, K., and Roberts, D.J. (1988). "Analysis of concrete from corroded sewer pipe." *Int. J. of Biodeter Biodegr*, 42(1), 75-84.
19. Chang, Z.T., Song, X.J., Munn, R., and Marosszeky, M. (2005). "Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack." *J. of Cem. Concr. Res.*, 35(8), 1486-1494.
20. Bassuoni, M.T., and Nehdi, M.L. (2007). "Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction." *J. of Cem. Concr. Res.*, 37(7), 1070-1084.
21. Building Research Establishment. (2003). *BRE special digest 1, concrete in aggressive ground, Part 2: Specifying the concrete and additional protective measures*, 2nd Ed., UK.
22. Hill, J., Byars, E.A., Sharp, J.H., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C., and Zhou, Q. (2003). "An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete." *J. of Cem. Concr. Comp.*, 25(8), 997-1003.
23. De Belie, N., Monteny, J., Beeldens, A., Vincke, E., Van Gemert, D., and Verstraete, W. (2004). "Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes." *J. of Cem. Concr. Res.*, 34(12), 2223-2236.
24. Vincke, E., Wanseele, E.V., Monteny, J., Beeldens, A., Belie, N.D., Taerwe, L., and Gemert, D.V. (2002). "Verstraete W. Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete." *Int. J. of Biodeter Biodeg*, 49(4), 283-292.
25. Tulliani, J.M., Montanaro, L., and Negro, A. (2002). "Colleparidi M. Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters." *J. of Cem. Concr. Res.*, 32(6), 843-849.

26. McNally, C., Richardson, M.G., Evans, C., and Callanan, T. (2005). "Determination of chloride diffusion coefficients for use with performance-based specifications." Dhir, R.K., Newlands, M.D., Whyte, A. (Eds.) *Proc 6th Int. Congress Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, Application of Codes, Designs and Regulations*. Dundee, 321-327.
27. Building Research Establishment. (1991). *BRE Digest 363, Sulfate and acid resistance of concrete in the ground*, 2nd Ed., UK.
28. Building Research Establishment. (2003). *BRE Special Digest 1, concrete in aggressive ground: part 1: assessing the aggressive chemical environment*, 2nd Ed., UK.
29. Osborne, G.J. (1999). "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete." *J. of Cem. Concr. Comp.*, 21(1), 11-21.
30. Yamanaka, T., Aso, I., Togashi, S., Tanigawa, M., Shoji, K., Watanabe, T., Watanabe, N., Maki, K., and Suzuki, H. (2002). "Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth." *J. of Water Res.*, 36(10), 2636-2642.
31. Waksman, S.A., and Joffe, J.S. (1922). "Microorganisms concerned in the oxidation of sulfur in the soil II. Thiobacillus thiooxidans, a new sulfur-oxidizing organism isolated from the soil." *J. of Bacteriol*, 7, 239-256.
32. Gu, J.D., Ford, T.E., Berke, N.S., and Mitchell, R. (1988). "Biodeterioration of concrete by the fungus fusarium." *Int. J. of Biodeterioratio and Biodegradation*, 41, 101-109.
33. Kitagawa, M., Ochi, T., and Tanaka, S. (1988). "Study on hydrogen sulfide generation rate in pressure mains." *J. of Water Sci. Technol.*, 37, 77-85.
34. Djuric, M., Raniogajec, J., Omrjan, R., and Miletic, S. (1996). "Sulfate corrosion of portland cement pure and blended with 30% of fly ash." *J. of Cem. Concr. Res.*, 26(9), 1295-1300.
35. Ismail, N., Nonaka, T., Noda, S., and Mori, T. (1993). "Effect of carbonation of microbial corrosion of concrete." *J. of Constraction Management and Engineering*, 20, 133-138.
36. Mori, T., Nonaka Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., and Nodas, S. (1992). "Interactions of nutrients, moisture and pH on microvial corrosion of concrete sewer pipes." *J. of Water Res.*, 26(1), 29-37.
37. Taylor, H.W.F. (1997). *Cement chemistry*, 2nd Ed., Thomas Telford, London.
38. ASTM C1012-95a. (1995). "Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution." Annual book of ASTM standard, section 4, Construction, Vol.O4.O1, cement; Lime gypsum, pp. 450-456.
39. Bell and Norris (1996). *Proceedings of the 4th materials Engineering Conference*, Washington D.C., pages 949-957. November 10-14.
40. Cho, K.S., and Mori, T. (2003). "A newly isolated fungus participates in the corrosion of concreter sewer pipes." *J. of Water Science and Technology*, 31, 263-271.
41. Swamy, R.N. (2000). "Alkali-aggregate reaction in concrete: Material and structural implications." Malhotra, V.M. (Ed.), *Advances in concrete technology*, Thapar Institute, Patiala.
42. Perkins, P.H. (1997). *Repair protection and waterproofing of concrete structures*, 3rd Ed., E and FN Spon, London.
43. REMR Technical Note CS-ES-I.13. (1996). *Site inspection and sampling concrete damaged by alkali-silica reaction*, USA.
44. Malvar, L.J., Cline, G.D., Burke, D.F., Rollings, R., Sherman, T.W., and Greene, J.L. (2002). "Alkali-Silica Reaction Mitigation: State of Art and Recommendations." *ACI Materials Journal*, 99(5), 480-489.
45. Berube, M.A., and Fournier, B. (2000). "Accelerated test methods for alkali-aggregate reactivity." Malhotra, V.M. (Ed.), *Advances in concrete technology*, Thapar Institute, Patiala.

46. Lachemi, M., Tagnit-Hamou, A.E., and AËtcin, C. (1998). "Long-term performance of silica fume concretes." *Int. J. of Concr.*, 20(1), 59-65.
47. Al-amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., and Saadi, M.M. (1995). "Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements." *ACI Mater. Journal.*, 92, 1, 15-24.
48. Gollop, R.S., and Tylor, H.F.W. (1996). "Microstructural and microanalytical studies of sulfate solutions." *J. of Cem. Concr. Res.*, 26(7), 1013-1028.
49. Gollop, R.S., and Taylor, H.F.W. (1994). "Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack: II. Sulfate resisting Portland cements: Ferrite composition and hydration chemistry." *J. of Cem. Concr. Res.*, 24(7), 1347-1358.
50. Scherer, J., and Fidjesto, P. (1995). "Microsilica-Betone unter sulfatangriff." *J. of Schweiz. Ing. Archit. March.*, 10(2), 7-12.
51. Durning, T.A., and Hicks, C. (1991). "Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals concrete." 13(3), 42-48.
52. Yamoto, T., Soeda, M., and Emoto, Y., (1989). *Chemical resistance of concrete containing condensed silica fumes*, SP114 American Concrete Institute, Detroit.
53. Fattuhi, N.I., and Hughes, B.P. (1998). "Ordinary Portland cement mixes with selected admixtures subjected to sulfuric acid attack." *ACI Mater. Journal.*, 85(6), 512-518.
54. Naderi, M. (2011). "Using twist-off method for measuring surface strength of concretes cured under different environments." *J. of Mater. in Civil Eng.*, 23(4), 385-392.