

خرابی‌های شیمیایی، دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی در آنها

علی اکبر رمضانیاپور
استاد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی بسیار مهم ساهاست که در صنعت ساختمان و سازه‌های دیگر به کار رفته است. در صورتی که این ماده طبق اصول صحیح ساخته و نگهداری شود، پایداری و دوام بالایی خواهد داشت. اما در اثر انتخاب مصالح نامناسب، کیفیت ضعیف اجرا و عدم نگهداری، خرابی‌هایی به ویژه در مناطق سخت و خورنده برای بتن اتفاق می‌افتد. مقاله حاضر با توجه به اهمیت خرابی‌های مختلف چون شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی در بتن، نحوه شناخت، نحوه پیشگیری از خرابی‌ها و افزایش دوام بتن با استفاده از مواد مختلف مضاف و افزودنی، تهیه شده است تا مورد بهره‌برداری دست اندرکاران کارهای بتنی قرار گیرد. در بخشی از این مقاله کلیاتی پیرامون دوام بتن و عمر مفید آن و اثر عوامل مختلف بر این دوام آورده شده است. خرابی‌های شیمیایی ناشی از عوامل محیطی چون خرابی‌های سولفاتی، کلروی و کربناتی و واکنش قلیایی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور افزایش دوام بتن سیمان‌های پوزولانی نقش عمده‌ای داشته‌اند که بررسی عملکرد این سیمان‌ها و نقش آنها در دوام بتن در قسمت آخر مقاله آمده است.

The Role of Pozzolanic Cements on the Chemical Deteriorations and Durability of Concretes

A. A. Ramezaniapour
Professor

Civil Engineering , Amirkabir University of Technology

Abstract

Concrete as an important construction material has been widely used in the building industry for many years. If it is made and cured properly, it will be very durable. But with the selection of materials, poor workmanship, and lack of curing, deteriorations have occurred on concrete particularly in the severe and corrosive environments. In this paper the importance of various deteriorations such as chemical physical and mechanical, diagnosis and prevention of deteriorations of concrete, enhancement of durability with the application of admixtures and additives in concretes are discussed in order to be used for those who are involved in concrete works.

First part of this paper is devoted to the concrete durability, service life of the concretes, and the effect of different factors on the durability of concretes. In the second part chemical deteriorations such as sulphate, chloride, carbonate and alkali aggregate reaction are assessed. Due to the role of pozzolanic cements in enhancing the durability of concretes, the last part of the paper discusses the performance and the durability of concretes containing pozzolanic cements.

۱- عمر مفید بتن

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان به کار می‌رود. علی‌رغم این قدمت کاربرد، تا قبل از چند دهه اخیر، دوام بتن مورد توجه طراحان و سازندگان آن نبوده است. خرابی‌های زودرس به خصوص در ساختمان‌های با جدار نازک و ساختمانهایی که در محیط‌های مخرب برای بتن ساخته می‌شود، نظیر ساختمان‌های دریایی، نگرانی وسیعی را در اذهان طراحان بتن بوجود آورده است. لذا گسترش کاربرد بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح ساختمانی با دوام در سازه‌ها اعم از ساختمان‌های مسکونی و بناهای بزرگ صنعتی، جاده‌ها، پل‌ها و اسکله‌ها و... شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح آن را برای تأمین عمر مفید طراحی شده ضروری می‌سازد. منظور از عمر مفید مصالح ساختمانی یا اجزای ساختمان و یا ساختمان، مدت زمانی است که طی آن، بنا یا مصالح، خواص اصلی خود را برای برآوردن یک سری نیازهای تعیین شده بر حسب شرایط استفاده حفظ نمایند. بتن نیز به عنوان یکی از مصالح ساختمانی و اجزای تشکیل دهنده یک سازه، دارای عمر مفید مشخص و تعیین شده‌ای است که بر اثر آسیب دیدگی‌های ناشی از عوامل گوناگون ممکن است تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ای قرار گرفته و عملکرد مطلوبش را از دست بدهد. در حالی که سازه‌هایی همچون سدها و نیروگاه‌های آبی، پل‌ها، تونل‌ها، موج شکن‌ها، اسکله‌ها و دیگر سازه‌های بتنی یا بتنی مسلح با وجود قرار داشتن در معرض شرایط محیطی ویژه و حاد باید قرن‌ها عمر کنند، اما مواردی دیده شده است که بتن بر خلاف انتظار عملکرد خوبی نداشته و خیلی زودتر از عمر پیش بینی شده‌اش آسیب دیده و یا به کلی خراب شده است.

بنابراین نتیجه گرفت که نمک‌های منیزیم (سولفات منیزیم) آب دریا با هیدروکسید کلسیم و سیلیکات‌های هیدراته شده ترکیب شده و تشکیل هیدروکسید منیزیم و سولفات کلسیم داده است که می‌توانند مجدداً با دیگر اجزای سیمان سخت شده، ترکیب و موجب تخریب بیشتر گردند. مطالعه و یکات اولین کوشش علمی جهت تحلیل علل خرابی ناشی از آب دریا بر روی بتن ساخته شده با مواد سیمانی هیدرولیکی بود.

پس از ساخته شدن سیمان پرتلند، مطالعات و بررسی‌های مربوط به دوام بر روی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند و مخلوط‌های مختلف آن متمرکز شد. آسیب پذیری و پایایی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند و سخت شدن این نوع سیمان به طور مستمر مورد بررسی قرار گرفته است. اولین مطالعات مربوط به پایایی بتن، از عملکرد ساختمان‌های دریایی نظیر اسکله‌ها، موج شکن‌ها و غیره شروع شده است. زیرا این سازه‌ها بیشتر از سازه‌های معمولی در معرض حملات فیزیکی و شیمیایی محیط اطرافشان که موجب تخریب سریع آنها می‌شوند، قرار دارند.

بتن مسلح برای اولین بار بین سال‌های ۱۸۸۰ تا ۱۸۹۰ به عنوان مصالح ساختمانی در موارد صنعتی نیز مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، بررسی عملکرد و دوام آن را در شرایطی که در معرض مواد فعال شیمیایی و اتمسفر آلوده و نواحی صنعتی قرار می‌گرفت، الزام آور ساخت. گازهای اسیدی اتمسفرهای آلوده به خصوص اکسیدهای گوگرد و گاز کربنیک که بر اثر رطوبت هوا تبدیل به اسید شده‌اند، با آهک سیمان وارد واکنش شده، تولید گچ و کربنات می‌کنند و به تدریج قلیابیت بتن را پایین می‌آورند. در نتیجه قشر محافظی که فولاد را از خوردگی محافظت می‌کند، با افت PH

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان به کار می‌رود. علی‌رغم این قدمت کاربرد، تا قبل از چند دهه اخیر، دوام بتن مورد توجه طراحان و سازندگان آن نبوده است. خرابی‌های زودرس به خصوص در ساختمان‌های با جدار نازک و ساختمانهایی که در محیط‌های مخرب برای بتن ساخته می‌شود، نظیر ساختمان‌های دریایی، نگرانی وسیعی را در اذهان طراحان بتن بوجود آورده است. لذا گسترش کاربرد بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح ساختمانی با دوام در سازه‌ها اعم از ساختمان‌های مسکونی و بناهای بزرگ صنعتی، جاده‌ها، پل‌ها و اسکله‌ها و... شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح آن را برای تأمین عمر مفید طراحی شده ضروری می‌سازد. منظور از عمر مفید مصالح ساختمانی یا اجزای ساختمان و یا ساختمان، مدت زمانی است که طی آن، بنا یا مصالح، خواص اصلی خود را برای برآوردن یک سری نیازهای تعیین شده بر حسب شرایط استفاده حفظ نمایند. بتن نیز به عنوان یکی از مصالح ساختمانی و اجزای تشکیل دهنده یک سازه، دارای عمر مفید مشخص و تعیین شده‌ای است که بر اثر آسیب دیدگی‌های ناشی از عوامل گوناگون ممکن است تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ای قرار گرفته و عملکرد مطلوبش را از دست بدهد. در حالی که سازه‌هایی همچون سدها و نیروگاه‌های آبی، پل‌ها، تونل‌ها، موج شکن‌ها، اسکله‌ها و دیگر سازه‌های بتنی یا بتنی مسلح با وجود قرار داشتن در معرض شرایط محیطی ویژه و حاد باید قرن‌ها عمر کنند، اما مواردی دیده شده است که بتن بر خلاف انتظار عملکرد خوبی نداشته و خیلی زودتر از عمر پیش بینی شده‌اش آسیب دیده و یا به کلی خراب شده است.

۲- نگاهی کلی به تاریخچه دوام بتن

پیشرفت صنایع شیمیایی و دیگر تکنولوژی‌های وابسته و مواد خورنده فولاد و مضر برای بتن‌ها از یک سو، و گسترش عملیات ساختمانی با ابعاد بزرگ در نواحی دارای آب و هوای نامساعد با خاک شور و آب‌های حاوی مواد معدنی زیاد از سوی دیگر و بخصوص بنا کردن سازه‌های بتن مسلح مهم و حیاتی که باید دارای پایداری و دوام خاصی باشند، انجام دادن تحقیقات جامعی را در مورد دوام بتن مسلح و غیر مسلح ضروری ساخته است.

باعث ایجاد زمینه‌ای مساعد جهت خوردگی شده و یا زنگ زدگی فولاد ترک خوردن و متلاشی شدن بتن آغاز می‌گردد.

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های مهمی در درک مکانیزم‌های آسیب‌پذیری بتن، به خصوص مکانیزم خوردگی فولاد در بتن حاصل شده است. برای پی بردن به این مکانیزم‌ها بررسی‌های کامل آزمایشگاهی به موازات قرار دادن دراز مدت نمونه‌ها در معرض شرایط محیطی، ایجاد شده است. به عنوان مثال، می‌توان از مطالعه مجاورت دراز مدت بتن با خاک‌های سولفاته که میلر در سال ۱۹۲۵ در آمریکا انجام داد و نتایج ۲۵ و ۵۰ ساله آن موجود است، یا آزمایش مقاومت بتن در آب دریا که بین سال‌های ۱۹۳۴ تا ۱۹۶۴ توسط کمپوس در بلژیک انجام شده است، نام برد.

به هر حال، امروزه خرابی‌های بتن نظر اکثر کارشناسان و دست‌اندرکاران ساخت بتن را به خود معطوف داشته و نکته قابل ذکر این است که هزینه مرمت پاره‌ای از این خرابی‌ها حتی بالاتر از هزینه ساخت سازه برآورد شده است. متأسفانه آگاهی کامل از مکانیزم و روش‌های آزمایش و پیشگیری از این خرابی‌ها در کشور ما هنوز کاملاً فراهم نیامده است. در حالی که داشتن وسعت زیاد خاک و انواع مختلف آب و هوا عوامل مخرب محیطی، با ایجاد همه‌انواع خرابی‌ها در سازه‌های بتنی کشورمان گشته است.

۳- شرایط اقلیمی مناطق حاشیه خلیج فارس

سواحل و جزایر خلیج فارس از نظر آب و هوا، یکی از ویژه‌ترین مناطق جهان است. دما در این منطقه به علت نزدیکی به خط استوا نسبت به مناطق دیگر جهان، بالاست. تغییرات دما در شبانه روز و در طول سال نیز بسیار متغیر است. همچنین به علت آب خلیج فارس با وسعتی حدود ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع فقط از تنگه باریک هرمز به عرض ۳۵ کیلومتر با آب‌های آزاد در ارتباط است و دورترین منطقه خلیج فارس تا این تنگه حدود ۱۹۰۰ کیلومتر فاصله دارد، املاح موجود در این آب از دیگر آب‌های آزاد جهان بیشتر است. در جدول زیر مقدار نمک‌های اصلی موجود در آب خلیج فارس که از آزمایش‌های انجام یافته بر روی نمونه‌های برداشته شده از نزدیکی تنگه هرمز به دست آمده، با نمک‌های مشابه آن در آب‌های آزاد جهان که به عنوان یک معیار سنجش به کار می‌رود، مقایسه شده است. در این مقایسه نسبت

کلرور سدیم و سولفات سدیم که دو عامل عمده در اضمحلال بتن شناخته شده‌اند، در خلیج فارس به مقدار ۱۷ درصد بیشتر از بالاترین حد نمک‌های مشابه در آب‌های آزاد جهان است.

خلیج فارس (PPM)	آب دریا (PPM)	نمک
۴۸۰	۵۰-۴۸۰	کلسیم (Ca)
۱۶۰۰	۲۶۰-۱۴۱۰	منیزیم (Mg)
۱۲۶۰۰	۲۱۹۰-۱۲۲۰۰	سدیم (Na)
۴۷۰	۷۰-۵۵۰	پتاسیم (K)
۲۳۰۰	۵۸۰-۲۸۱۰	سولفات (So ₄)
۲۳۴۰۰	۳۹۶۰-۲۰۰۰۰	کلرور (Cl)

رطوبت و شرجی بودن هوا و تغییرات روزانه، فصلی و سالانه آن نیز نتیجه منطقی آب و هوای منطقه است. هوای شرجی منطقه که در خود، یون‌های فعال کلر را حمل می‌کند، ضمن آنکه بر روی سازه‌های بتنی تأثیر مخربی می‌گذارد به عنوان کاتالیزوری برای تشدید خوردگی با دیگر عوامل مضر همکاری می‌نماید.

مصالح به دست آمده از جزایر و سواحل که عموماً از بقایای سنگ‌های مرجانی بوده و می‌توان آنها را تحت عنوان سنگ‌های آهکی ارزیابی نمود، نیز یکی از عوامل تخریب به شمار می‌روند. این سنگ‌ها غالباً پوک بوده و بر اثر هوازگی به سهولت پودر شده و به مصالح ریزدانه تبدیل می‌شوند. مصالح ریزدانه نیز آب بتن را به خود جذب می‌کنند. در بسیاری موارد، مصالح دارای شکل‌های سوزنی و پولکی هستند. ماسه موجود در سواحل که نامناسب جهت استفاده در بتن می‌باشد، نیز دارای اندازه‌های ریز و سوزنی است. ذرات ریز کربنات در این ماسه‌ها به فراوانی موجود است. کربنات‌ها و سولفات‌های موجود در مصالح سنگی ریزدانه باعث کریستالیزه شدن موضعی در داخل بتن می‌شوند که به از هم یاشیدگی بتن و خوردگی فولاد می‌انجامد. در ضمن مضاف بر کلیه این اشکالات، اجرای نامناسب کار نیز یکی دیگر از عواملی است که روند تخریب بتن را تشدید می‌کند.

البته با گسترش فعالیت‌های عمرانی در نواحی

ساحلی جنوب کشور و سرمایه گذاری های بسیاری که در این زمینه صورت گرفته است، ضرورت احداث سازه های سنگین به منظور هدف های مختلف احساس گردیده و از آنجا که سازه های فولادی در شرایط محیطی جنوب دارای عمر و دوام کافی نیستند، سازه های بتنی مورد استفاده قرار گرفته اند و با در نظر گرفتن این پیش فرض که دوام بتن بالا بوده و قدرت عوامل مخرب در آن تأثیر اندکی، دارد به طور وسیعی کاربرد پیدا کرده است. لیکن متأسفانه شرایط خاص منطقه که ذکر شد بخصوص بدی اجرا و کیفیت پایین بتن، باعث تخریب وسیع بتن شده و کاربرد آن را در این منطقه خاص نمی توان همانند نواحی دیگر که دارای شرایط عادی هستند، بدون بررسی همه جانبه پذیرفت.

۴ - عوامل مؤثر در کاهش دوام بتن

به طور کلی، دوام بتن بستگی به محیطی که بتن در معرض آن قرار می گیرد، و یا به عوامل داخلی در خود بتن دارد. عوامل خارجی و محیطی عبارتند از:

- ۱ - عوامل فیزیکی، شامل: یخ زدن و آب شدن متواتر، تغییرات دما و درصد رطوبت.
- ۲ - عوامل شیمیایی، شامل: حمله سولفات ها و اسیدهای آلی، گازهای طبیعی و زنگ زدگی فولاد.
- ۳ - عوامل مکانیکی، شامل: سایش، فرسایش و خلاء زایی در سازه های هیدرولیکی.

و عوامل داخلی عبارتند از:

- ۱ - تغییرات حجمی بر اثر اختلاف بین خواص حرارتی مواد سنگی و خمیر سیمان.
- ۲ - واکنش قلیایی دانه های سنگی.
- ۳ - وجود املاح خارج از حد استاندارد در مواد اولیه تشکیل دهنده بتن، شامل: سیمان، آب، سنگدانه و مواد افزودنی (فساد مصالح).
- ۴ - نفوذپذیری بتن به عنوان عامل تعیین کننده میزان تأثیر عوامل خارجی.

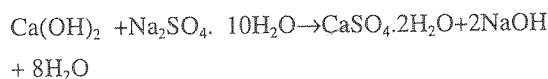
۵ - خرابی های بتن

بخشی از خرابی های بتن، ناشی از عدم ساخت صحیح و نگهداری آن در روزهای اول است. قسمتی دیگر، بر اثر نفوذ مایعات و گازهای مضر به درون بتن که اغلب باعث ترکیبات شیمیایی مخرب می شوند، در سازه ها ایجاد می گردد. اثر سولفات ها بر روی ترکیبات

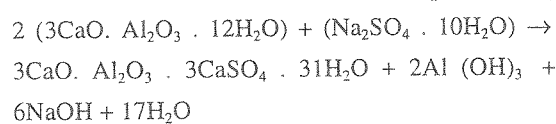
سیمان پرتلند را می توان یکی از عوامل شیمیایی مخرب دانست. بتن های در تماس با خاک و آب های سولفات دار، در معرض این نوع خرابی قرار می گیرند و نتیجه نهایی متورم شدن بتن، ترک و ریزش آن می باشد. از دیگر خرابی های مورد بحث، ترک و ریزش بتن بر اثر زنگ زدن آرماتورهاست. این پدیده سطحی بوده و قابل رؤیت است. یون کلر از عوامل اصلی این خرابی در بتن به شمار می رود. خرابی دیگری که به همراه خوردگی کلروری سبب زنگ زدگی آرماتورها می شود، خرابی کربناتی است که غالباً در بتن های با نفوذپذیری نسبتاً بالا و در پوشش های نازک بتن روی آرماتورها ایجاد می گردد.

خرابی سولفاتی مکانیزم حمله سولفات ها

بعضی از خاک های رس حاوی قلیایی ها، منیزیم و سولفات کلسیم اند و آب های زیرزمینی که در تماس با این خاک ها باشند، در عمل محلولی سولفات ها خواهند بود. سولفات ها ترکیبات مختلف سیمان هیدراته شده را مورد حمله قرار می دهند. سولفات های سدیم و پتاسیم، با هیدروکسید کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم ترکیب می شوند. فعل و انفعالات سولفات سدیم با هیدروکسید کلسیم را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:



و فعل و انفعالات سولفات سدیم با هیدروآلومینات کلسیم به صورت زیر است:



محصولات واکنش های فوق عبارتند از:

۱ - گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) که موجب سستی سطح بتن و کاهش مقاومت آن شده، به میزان ۱۲۴ درصد حجم مواد جامد را افزایش می دهد.

۲ - سولفوآلومینات کلسیم ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) که به نام اترینگایت خوانده می شود و باعث افزایش قابل ملاحظه در حجم بتن و در نتیجه ترک و ریزش آن می گردد. میزان افزایش حجم مواد بر اثر این ترکیب به ۲۲۷ درصد می رسد.

سولفات کلسیم فقط به هیدروآلومینات کلسیم حمله می کند و تشکیل سولفوآلومینات کلسیم یا اترینگایت

می‌دهد.

حمله سولفاتی سولفات منیزیم به مراتب شدیدتر از سایر سولفات‌ها بوده و علاوه بر هیدروکسید کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم، بر روی سایر ترکیبات هیدراته شده سیمان، نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته شده نیز تأثیر می‌گذارد.

شدت اثر سولفات بستگی به غلظت محلول سولفات دارد. همچنین تر و خشک شدن بتن این اثر را شدت می‌بخشد. بتن‌هایی که در معرض حمله سولفات‌ها قرار می‌گیرند، معمولاً با سطح سفید رنگ مشخص می‌شوند. خرابی بتن معمولاً از لبه‌ها و گوشه‌ها شروع شده و با پیشرفت خرابی سولفاتی ترک و ریزش در بتن پدید می‌آید.

همان‌طور که ذکر شد، روند حمله سولفات‌ها با افزایش قدرت محلول بیشتر می‌شود، اما غلظت بیش از حدود ۵/۰ درصد از سولفات منیزیم و یا یک درصد از سولفات سدیم، روند افزایش شدت حمله را کمتر خواهد کرد. محلول اشباع شده‌ای از سولفات منیزیم باعث گسیختگی شدید بتن می‌گردد، اگر چه با یک نسبت آب به سیمان کم این عمل پس از ۲ تا ۳ سال رخ خواهد داد. غلظت سولفات‌ها برحسب تعداد قسمت‌های وزنی SO_3 در میلیون (PPM) بیان می‌شود. غلظت ۱۰۰۰ PPM یک محلول به صورت نسبتاً شدید و ۲۰۰۰ PPM یک محلول به صورت خیلی شدید عنوان می‌شود. به خصوص در حالتی که سولفات منیزیم قسمت اعظم آن را تشکیل دهد. البته تنها در حالتی که املاح به صورت محلول باشند، بتن را مورد حمله قرار می‌دهند و شکل جامد آنها نمی‌تواند باعث تخریب گردد. در ضمن در تخمین خطر حمله سولفات‌ها، نحوه حرکت آب‌های زیرزمینی باید مشخص گردد. وقتی که یک طرف بتن، در معرض فشار آب حاوی سولفات‌ها قرار می‌گیرد، روند حمله بیشترین مقدار را خواهد داشت. به طریق مشابه همانگونه که ذکر شد اشباع شدن و خشک شدن متناوب منجر به گسیختگی سریع بتن خواهد شد. از طرف دیگر، وقتی که بتن کاملاً در زیر خاک قرار می‌گیرد و کانالی برای آب‌های زیرزمینی وجود نداشته باشد، شدت حمله خیلی کمتر خواهد شد.

روش‌های پیشگیری و مقابله

مطالعات زیادی در خصوص مکانیزم خرابی سولفاتی و آثار آن انجام شده است. حدود ۷۰ سال پیش

با مشاهده پایایی سیمان‌های با درصد پایین سه کلسیم آلومینات (C_3A) در مقابل سولفات‌ها، سیمان‌های ضد سولفات کشف گردید. در همین زمان بررسی پایایی و مقاومت سیمان‌های پوزولانی در مقابل حمله سولفات‌ها نشان داد که بهبود مقاومت سیمان در مقابل حمله سولفات را می‌توان با افزودن مواد پوزولانی به آن و یا حتی جایگزین نمودن بخشی از سیمان با مواد پوزولانی به دست آورد. چگونگی تأثیر این مواد در کاهش خرابی سولفاتی در قسمت بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد. اساساً همانگونه که ذکر شد آسیب‌پذیری بتن در برابر حمله سولفات‌ها را می‌توان با مصرف سیمانی که C_3A آن کم باشد کاهش داد. در عمل، این نتیجه حاصل شده که به لحاظ عملکرد در آب‌های سولفات‌ها که مقدار C_3A برابر با ۷ درصد مرز تقریبی بین سیمان‌های ضعیف و خوب است. ولی به نظر می‌رسد که هنوز عوامل ناشناخته دیگری وجود داشته باشند که بر مقاومت سیمان در برابر حمله سولفات‌ها اثر می‌گذارند. استاندارد BS ۴۰۲۷: ۱۹۸۰ مقدار C_3A در سیمان ضد سولفات را ۳/۵ درصد و حداقل نرمی آن را $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ مشخص نموده است. در استاندارد ASTM-C ۱۵۰ سیمان ضد سولفات به سیمان نوع ۵ معروف است و حداکثر مقدار C_3A را به ۵ درصد و همچنین کل مقدار C_4AF به علاوه دو برابر C_3A را به ۲۰ درصد محدود آمده است. تعداد منیزیم نیز به ۶ درصد محدود شده است. نقش C_4AF در خرابی سولفاتی کاملاً روشن نشده است، ولی انتظار می‌رود از نظر شیمیایی C_4AF سبب تشکیل سولفوآلومینات و همچنین سولفوریت کلسیم شده ولدا انبساط حجمی ایجاد نماید. لیکن چنین به نظر می‌رسد که هر چه نسبت $Fe_2O_3 : Al_2O_3$ کمتر باشد، عمل سولفات کلسیم بر سیمان هیدراته شده کمتر خواهد بود. ضمناً بر اثر به وجود آمدن ترکیبات جدید که مستعد حمله نسبتاً کمی هستند، نظیر تتراکلسیم فریت، ممکن است یک قشر محافظ بر روی آلومینات کلسیم موجود تشکیل شود.

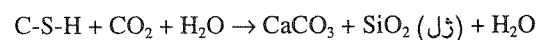
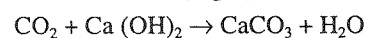
همانند کلیه خرابی‌های شیمیایی، به عنوان یکی از روش‌های اساسی جهت کند و یا متوقف ساختن حمله سولفات‌ها، باید بتن را غیرقابل نفوذ ساخت. انتخاب بتن با نسبت آب به سیمان پایین، تراکم بالا و نگهداری کافی، مقدار نفوذپذیری بتن را بسیار کاهش می‌دهد. به منظور افزایش وزن مخصوص بتن، لازم است که نسبت آب به سیمان پایین باشد، یعنی باید مخلوط تا حدی پر سیمان

خرابی کربناتی مکانیزم عمل کربناتاسیون

خوردگی میلگردهای فولادی از مسائل بسیار اساسی و مهمی است که بر روی دوام سازه های بتنی مسلح تأثیر می گذارد. خوردگی میلگردهای فولادی معمولاً باعث ترک در پوشش بتنی روی میلگرد شده و نهایتاً منجر به تخریب آن می گردد.

در مخلوط بتن، اساساً فولاد توسط خود بتن، در مقابل خوردگی محافظت می گردد. زیرا در یک بتن تازه به علت بالا بودن درجه قلیایی آن، که ناشی از ایجاد هیدروکسید کلسیم و قلیایی های سدیم و پتاسیم در هیدراتاسیون سیمان است، لایه ای محافظ بر روی آرماتور تشکیل می شود. PH زیاد محیط اطراف فولاد (حدود ۱۳)، اجازه تشکیل یک لایه اکسید میکروسکوپی بر روی سطح فولاد می دهد که به صورت سدی در مقابل خوردگی و متلاشی شدن فولاد عمل می کند و از آن محافظت می نماید. این عمل، زنگ زدگی و خوردگی را غیرممکن می سازد، حتی اگر شرایط دیگر جهت تحقق این امر مانند رطوبت و اکسیژن وجود داشته باشد.

PH آب منفذی بتن توسط عمل کربناتاسیون یا نفوذ یون کلر کاهش می یابد. واژه کربناتاسیون برای شرح آثار دی اکسید کربن که معمولاً ناشی از آتمسفر است، روی بتن به کار می رود. بتنی که تحت اثر چنین پدیده ای واقع شده باشد، بتن کربناته نامیده می شود. در این پدیده دی اکسید کربن موجود در فضا به داخل بتن نفوذ کرده، هیدروکسید کلسیم به کربنات کلسیم تبدیل می شود و در نتیجه میزان PH کاهش می یابد. هنگامی که PH بتن احاطه کننده فولاد به مقداری کمتر از ۱۰ می رسد، یا مقدار کلر به حد بحرانی برسد، محافظت در مقابل خوردگی از بین رفته که در نهایت به تخریب و شکست منجر می شود، آغاز می گردد. فرآیند مذکور را می توان توسط واکنش های شیمیایی زیر خلاصه کرد:



حاصل واکنش های فوق معمولاً به تولید کلسیت و به ندرت آراگونیت ختم می شود. البته CO_2 روی ترکیبات دیگر نظیر C_3AH_6 و C_4AH_{12} نیز اثر کرده و ترکیباتی به صورت $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ایجاد می کند. این محصولات با ادامه عمل کربناتاسیون تجزیه شده و تشکیل کربنات کلسیم و هیدروکسید آلومینیوم می دهند. همچنین CO_2 بر روی ترکیبات سدیم و پتاسیم در محلول

باشد، برای مثال استفاده از بتن کم سیمان در بستر مجاری فاضلاب ها سبب آسیب پذیری آن قسمت هایی که در غیر این صورت با دوام می بودند، خواهد شد. عوامل متعددی در میزان نفوذپذیری بتن تأثیر دارند که در بخش های بعدی به تفصیل مورد بحث قرار خواهند گرفت. در صورت عدم رعایت این گونه مسائل، بتن متخلخل خواهد شد و به آسانی مورد حمله قرار خواهد گرفت.

با به عمل آوردن بتن در فشار بخار زیاد نیز مقاومت آن در برابر حمله سولفات ها بهبود می یابد. این موضوع هم در مورد بتن با سیمان پرتلند معمولی و هم با سیمان ضد سولفات صدق می کند. این بهبود بر اثر تغییر C_3AH_6 به یک ترکیب با فعالیت کمتر و همچنین خارج کردن هیدروکسید کلسیم بر اثر واکنش با سیلیس حاصل می گردد. از طرف دیگر، با هر نوع سیمانی که در بتن مصرف شود، باید به این مسئله توجه داشت که افزودن کلروکلسیم به مخلوط باعث کاستن مقاومت آن در برابر حمله سولفات ها خواهد شد.

لگر بتن قبل از آنکه در معرض سولفات ها قرار گیرد، خشک شود، مقاومت آن در برابر حمله سولفات ها افزایش می یابد. این عمل باعث تشکیل قشری از کربنات کلسیم (بر اثر واکنش اکسید کربن با آهک) می گردد که منافذ را پر نموده و نفوذپذیری لایه سطحی بتن را کاهش می دهد. چنین نتیجه می شود که معمولاً بتن پیش ساخته، کمتر از بتنی که در جا ریخته می شود، در برابر حمله سولفات ها آسیب پذیر است.

آیین نامه بتن ایران نیز طی جداول مفصلی به رده بندی سولفات ها در خاک و آب های زیرزمینی در شرایط گوناگون محیطی پرداخته و تدابیر احتیاطی لازم را برای انواع مختلف قطعات بتنی ارائه نموده است. توصیه های مذکور به طور عمده شامل انتخاب نوع سیمان، عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و تمهیدات اجرایی ویژه است. ضمناً آیین نامه بتن ایران مقرر می دارد که مقدار کل سولفات قابل حل در آب، در مخلوط بتن بر حسب SO_3 نباید از ۴ درصد بیشتر باشد و مقدار کل سولفات موجود نباید از ۵ درصد وزن سیمان در مخلوط تجاوز کند (مقدار سولفات موجود در بتن باید براساس مجموع مقادیر سولفات های موجود در مواد تشکیل دهنده بتن محاسبه شود).

سیمان هیدراته شده نیز اثر گذاشته و در نهایت سبب کاهش درجه قلیائیت محیط اطراف آرماتور و شروع خوردگی می شود.

اگرچه واکنش های شیمیایی کربناتاسیون ظاهراً ساده است، پیش بینی عملی فرآیند کربناتاسیون امر ساده ای نیست، زیرا این پدیده نه تنها به خواص خود بتن وابسته است، بلکه به شرایط محیطی که بتن در آن قرار گرفته نظیر رطوبت و دما نیز بستگی دارد که بر روی مشخصات منافذ داخلی و شکل ترکیبات هیدراته شده تأثیر می گذارد. نقش آب حفره ای نیز در پدیده کربناتاسیون بسیار پرمعناست. اساساً وجود یک مقدار حداقل آب حفره ای، شرط لازم برای حل شدن دی اکسید کربن و انجام روند کربناتاسیون است.

روش های پیشگیری

همانگونه که قبلاً ذکر شد، کربناته شدن و میزان پیشرفت آن بستگی به ساختار فیزیکی و شیمیایی بتن دارد. بتن با نفوذپذیری کم که از ساخت مخلوطی با نسبت آب به سیمان کم، تراکم مناسب و نگهداری کافی به دست آمده است، می تواند سال ها در مقابل این خرابی پایدار بماند.

با همه کندی عمل کربناتاسیون، گاز کربنیک از پوشش بتن روی میلگرد عبور کرده و خود را به میلگرد میرساند. بنابراین عامل مهم دیگر، ضخامت پوشش بتن روی آرماتورهاست. هر یک میلیمتر افزایش ضخامت بتن پوشش، ممکن است سال ها پیشرفت کربناتاسیون را به تأخیر بیندازد. از این رو در هنگام اجرا باید دقت کامل مبذول گردد تا پوشش لازم روی میلگرد در نظر گرفته شود. امروزه حتی با ساخت رنگ های مختلف و پوشش دادن سطح بتن با آنها، سعی در کند کردن و متوقف نمودن کربناتاسیون در بتن می شود. پاره ای از این پوشش ها عملکرد خوبی داشته و برخی دیگر، مراحل آزمایشی خود را می گذرانند و در صورت موفقیت می توان از آنها جهت پیشگیری استفاده نمود.

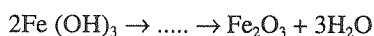
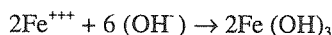
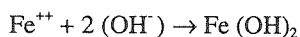
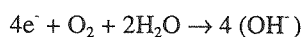
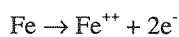
خرابی کلروری

مکانیزم نفوذ یون کلرور و عملکرد آن

خرابی عرشه بتنی پل ها و خوردگی فولاد در ساختمان های بتنی، به خصوص سازه های بتنی مجاور دریا از مهمترین مسائل بتن، در سال های اخیر بوده است. علاوه بر تأثیر کربناتاسیون، مهمترین عامل زنگ

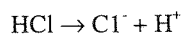
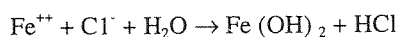
زدگی و خوردگی آرماتور در بتن، وجود یون کلرور در آن است. بتن به طور طبیعی محافظ آرماتور در مقابل خوردگی است که قبلاً در بخش کربناتاسیون علت آن به تفصیل ذکر شد. به علاوه، بتن های با نسبت آب به سیمان کم و عمل آوردن صحیح، بسیار کم نفوذ بوده و اثر عوامل مؤثر در تولید زنگ، یعنی آب، اکسیژن، گاز کربنیک، و یون کلرور را به حداقل می رساند. به هر حال تحقیقات نشان داده است که غلظت بالای یون کلرور در بتن سبب از بین رفتن لایه محافظ آرماتور می شود. با ایجاد یک پیل بر اثر اختلاف بین پتانسیل های الکتریکی نقاط مختلف فولاد، زنگ زدگی آرماتور آغاز می شود. تشکیل زنگ (اکسید فریک) سبب بالا رفتن فشار گشته و ایجاد تنش کششی بالاتر از تنش کششی بتن، سبب ترک، ریزش و خرابی بتن می شود.

به طور کلی، خوردگی فولاد به دلیل فرآیند الکتروشیمیایی رخ می دهد و معمولاً هنگامی با آن مواجه می شویم که دو فلز متفاوت در حضور رطوبت و اکسیژن، در تماس الکتریکی باشند، این فرآیند در فولاد نیز رخ می دهد، چون پتانسیل الکتروشیمیایی در سطح متفاوت بوده و نواحی آندی و کاتدی را که توسط الکتروولیتی به شکل محلول نمک در سیمان هیدراته شده به هم مرتبط اند، تشکیل می دهد. یون های آهن با بار مثبت (Fe^{++}) در آند به داخل محلول حرکت می کنند، در حالی که الکترون های با بار منفی (e^-) از داخل فولاد به طرف کاتد حرکت کرده و به وسیله اجزای الکتروولیت جذب شده و پس از ترکیب با آب و اکسیژن، یون های (OH^-) را تشکیل می دهند. این یون ها، سپس با یون های آهن ترکیب شده و هیدرواکسید فریک را تشکیل می دهند و سرانجام به زنگ تبدیل می شود (شکل ۱). بنابراین می توان نوشت:



البته باید توجه داشت که روابط فوق به صورت شماتیک، مبین واکنش ها هستند. ملاحظه می شود که اکسیژن، مصرف شده ولی آب، تولید می شود و تنها برای ادامه فرآیند ضروری است. بنابراین در یک فضای

کاملاً خشک و احتمالاً در رطوبت نسبی زیر ۴۰ درصد خوردگی وجود نخواهد داشت. همچنین در بتن‌های کاملاً غرق شده در آب خوردگی زیادی وجود ندارد، مگر اینکه هوا وارد آب شود. تحقیقات نشان داده که در رطوبت نسبی ۷۰ تا ۸۰ درصد، میزان خوردگی حداکثر است. در رطوبت‌های نسبی بالاتر، نفوذ اکسیژن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همچنین شرایط محیطی در طول فولاد دارای یکنواختی بیشتری است. یون‌های کلرور موجود در خمیر سیمانی که میگردها را احاطه کرده و با آب ترکیب شده‌اند، اسید کلروریدریک را تشکیل می‌دهند که باعث از بین رفتن لایه نازک محافظ روی فولاد می‌شود. به همین ترتیب تشکیل کربنات کلسیم از Ca(OH)_2 طی فرآیند کربناتاسیون، خاصیت قلیایی را کاهش می‌دهد و در نتیجه لایه محافظ از بین می‌رود. سپس سطح فولاد به صورت موضعی فعال در می‌آید و تشکیل آند می‌دهد و با تشکیل کاتد در سطح خنثی (قسمتهایی که لایه محافظ آن تخریب شده)، خوردگی نقطه‌ای و موضعی بوجود می‌آید (شکل ۱ - ب) این واکنش‌ها در حضور کلورهاها به طور شماتیک به صورت زیر است:



باید توجه نمود که گرچه در یک مرحله میانی، کلرور فریک تشکیل می‌شود، زنگ شامل هیچ کلروری نیست. به خاطر محیط اسیدی موجود در حفره (pit) حفره فعال باقی می‌ماند و عمق آن افزایش می‌یابد. خوردگی نقطه‌ای در پتانسیل خوردگی نقطه‌ای می‌گویند. در مقایسه با رطوبت‌های نسبی بالاتر، این پتانسیل در بتن‌های خشک بیشتر است. به محض اینکه یک حفره شروع به شکل‌گیری می‌کند، پتانسیل فولاد در مجاورت آن پایین می‌آید. بنابراین برای مدتی حفره جدیدی ایجاد نمی‌شود. سرانجام ممکن است خوردگی با گستردگی زیاد بوجود آید و این احتمال هست که خوردگی عمومی و همه جانبه در حضور مقادیر زیادی از کلرور اتفاق بیفتد.

لازم است مجدداً تأکید شود که در حضور کلورها، درست مانند هنگامی که یون کلرور وجود ندارد، فرآیند خوردگی الکتروشیمیایی فقط وقتی انجام می‌شود که آب و اکسیژن وجود داشته باشند و تنها اکسیژن است که

طی این فرآیند مصرف می‌شود. حتی با حضور مقادیر زیادی کلرور در بتن خشک، هیچ خوردگی ایجاد نمی‌گردد.

به طور کلی، عوامل زیر در شدت بخشیدن به خوردگی فوق مؤثرند:

الف) استفاده از تسریع کننده‌های کلروری و ضد یخ (کلرور سدیم و کلرور کلسیم) با درصد بالا در بتن، غلظت یون کلرور اطراف آرماتور را افزایش می‌دهد.

ب - نفوذپذیری زیاد بتن در مقابل آب و یون کلرور ج - پایین بودن درجه قلیایی بتن به علت مصرف سیمان با ترکیبات قلیایی کم و یا ایجاد پدیده کربناتاسیون.

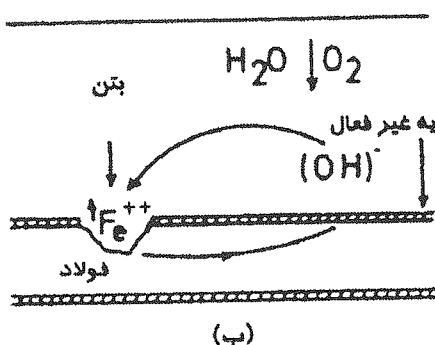
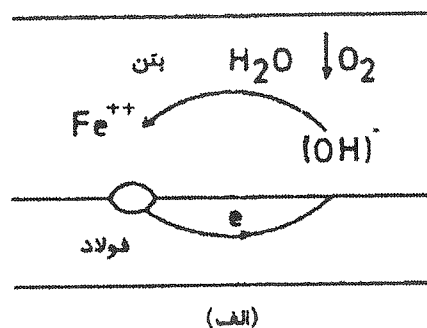
د - پوشش نازک بتن روی آرماتور.

ه - وجود ترک در بتن به علت انقباض و یا مقاومت کم در مقابل یخ زدگی.

و - کربناتی شدن بتن.

ی - کاهش میزان C_3A در سیمان.

شکل (۲) تأثیر قلیائیت بر میزان نفوذ یون کلرور و شکل (۳) تأثیر سن بتن و مقدار C_3A سیمان بر مقدار نفوذ یون کلرور را نشان می‌دهند.



شکل (۱) نمایش شماتیک خوردگی الکتروشیمیایی.

الف - فرآیند الکتروشیمیایی.

ب - خوردگی الکتروشیمیایی در حضور کلورها.

درصد وزنی سیمان باشد، در بتن های ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی (نوع I) خوردگی آرماتورها توسط کلورها کم خواهد بود. براساس توصیه های آیین نامه بتن ایران، به منظور محافظت از میلگردها در مقابل خوردگی، حداکثر کلور قابل حل در آب مصرف شده در بتن سخت شده ۲۸ روزه ناشی از مواد تشکیل دهنده بتن، یعنی آب، سنگدانه ها و مواد افزودنی نباید از مقادیر حداکثر مجاز داده شده در جدول (۱) تجاوز کند.

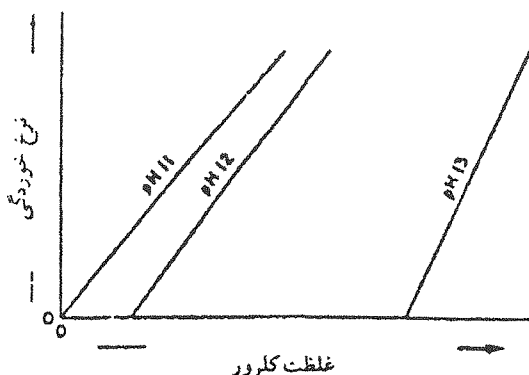
جدول (۱) حداکثر مجاز یون کلرید از نظر خوردگی.

نوع قطعه بتنی	حداکثر کلرید قابل حل در آب در بتن، درصد نسبت به وزن سیمان
بتن پیش تنیده	۰/۰۶
بتن مسلحی که در زمان بهره برداری در معرض رطوبت و کلریدها قرار گیرد.	۰/۱۵
بتن مسلحی که در زمان بهره برداری در حالت خشک باشد یا از رطوبت محافظت شود.	۱/۰۰
سایر سازه های بتن مسلح	۰/۳۰

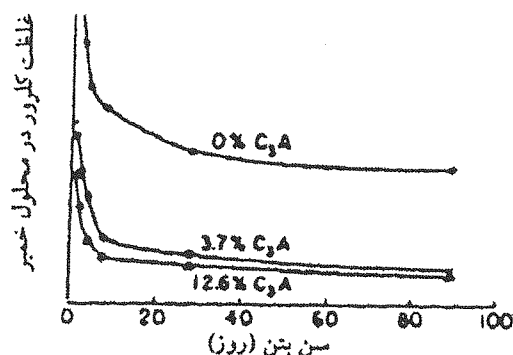
از آنجا که آب دریا حاوی کلورهای مختلف است، استفاده از آب دریا به عنوان آب مخلوط یا برای نگهداری بتن توصیه نمی گردد. در بتن پیش تنیده به دلیل خطر خوردگی کابل های پیش تنیدگی، که معمولاً دارای قطر کوچکی هستند، تأثیر استفاده از آب دریا به عنوان آب مخلوط جدی تر است.

اهمیت پوشش میلگردها در افزایش مقاومت میلگردها در مقابل خوردگی، امری بدیهی است. در ضمن به نظر می رسد که استفاده از سیمان های روباره ای و سیمان پرتلند - پوزولان در محدود نمودن سهولت حرکت و بی ثباتی یون های کلور در داخل خمیر سیمان هیدراته شده مفید باشد.

در ارتباط با ایجاد مانع در آرماتور، روش های مختلفی در جهان پیشنهاد شده است که بعضی به علت گرانی هنوز کاربرد ندارند. با گالوانیزه کردن آرماتور فولادی می توان مانع و پوششی روی آن ایجاد کرده، لیکن با خراش سطح، خوردگی آغاز خواهد شد. امروزه



شکل (۲) حد غلظت کلور لازم برای شروع خوردگی بر حسب میزان قلیانیت خمیر سیمان.



شکل (۳) نسبت غلظت یون کلور در محلول خمیر بر حسب سن هیدراتاسیون و با توجه به میزان C_3A .

روش های پیشگیری

به طور کلی، جهت حل مشکل خوردگی کلروری لازم است که با ایجاد موانعی میزان نفوذ یون کلور در بتن را متوقف نموده، یا به میزان زیادی کاهش داد. این موانع ممکن است در خود بتن ایجاد شوند و یا بر روی آرماتور بوجود آیند. برای خود بتن باید سعی کرد که آن را تا حد امکان غیرقابل نفوذ ساخت. بتنی که با نسبت آب به سیمان کم و تراکم بالا و نگهداری مناسب ساخته شود، می تواند به میزان بسیار زیادی از این نفوذ جلوگیری کند. علاوه بر این می توان با اضافه کردن موادی به بتن نفوذپذیری آن را کم نمود. به عنوان مثال، افزودن مواد پوزولانی و جایگزین کردن آنها با سیمان در بتن، نفوذپذیری را تقلیل می دهد. همچنین می توان با استفاده از پلیمرهای مختلف و شیوه های اصلاح شده در مخلوط بتن، نفوذپذیری آن را کاهش داد. هنگامی که مجموع یون های کلور کمتر از ۰/۴

پاره‌ای از کانی‌ها و سنگ‌ها یافت می‌شود. شکل‌های فعال سیلیس، عبارتند از: اوپال (غیربلوری)، کلسه دون (بلورهای تاری) و تری دیمیت (بلوری). این مواد واکنش‌زا در چرت‌های اوپالینی یا چرت‌های کلسدونی، سنگ آهک سیلیسی ریولیت و توف‌های ریولیتی، داسیت و توف‌های داسیتی، آندزیت و فیلیت‌ها وجود دارند. سنگدانه‌های دولومیتی نیز دارای ترکیب کربناتی بوده و با قلیایی‌های سیمان ایجاد واکنش انبساط‌زا می‌کنند که در موارد نادری اتفاق می‌افتد. این واکنش تقریباً همیشه با حضور خاک رس صورت می‌گیرد.



شکل (۴) نمونه سطح بتنی ترک خورده بر اثر ترکیب قلیایی‌های سیمان و سیلیس دانه‌های سنگی.

همان‌طور که ذکر شد با حمله هیدروکسیدهایی قلیایی بر کانی‌های سیلیسی موجود در سنگدانه‌ها، یک ژل قلیایی سیلیکاتی تشکیل می‌گردد و تغییراتی در مرز بین سنگدانه‌ها و سیمان بوجود می‌آورد. ژل حاصل از نوع «ورم‌کننده نامحدود» است که آب را به خود راه داده و در نتیجه تمایل به افزایش حجم دارد. از آنجا که این ژل توسط خمیر سیمان اطراف خود احاطه شده است لذا فشارهای داخلی بوجود می‌آیند که سرانجام منتهی به انبساط، ترک خوردن و از هم پاشیدن خمیر سیمان می‌گردند. البته چنین به نظر می‌رسد که انبساط ناشی از فشار هیدرولیک توسط خاصیت اسمزی تولید شده باشد. اما انبساط همچنین می‌تواند به علت فشار تورم‌زای محصولات واکنش قلیایی سیلیسی که هنوز جامدند، باشد. بدین دلیل عقیده بر آن است که ورم کردن ذرات سخت سنگدانه‌ها بیشترین خسارت را به بتن وارد می‌کند. به دنبال آن مقداری از ژل نسبتاً سست توسط آب به خارج راه می‌یابد و در ترک‌هایی که قبلاً به علت تورم سنگدانه‌ها ایجاد گردیده‌اند، رسوب می‌نماید. اندازه ذرات سیلیسی سرعت ایجاد واکنش را کنترل

با استفاده از پوشش‌های مختلف اپوکسی توانسته‌اند تا حدودی آرماتورهای ضد زنگ تهیه نمایند. البته کاربرد این نوع آرماتورها دقت به خصوصی در اجرا لازم دارد. در روش دیگر، که به نام حفاظت کاتدیک موسوم است با ایجاد یک جریان مخالف جریان تولید زنگ با استفاده از یک پیل، از خوردگی آرماتور جلوگیری به عمل می‌آورند. این روش خصوصاً در دال‌های بتنی و عرشه پل‌ها استفاده شده است. اساساً با اعمال حفاظت کاتدی متوسط یا با محدود نمودن دسترسی به اکسیژن می‌توان از خوردگی موضعی آرماتورها در بتن‌های کربناته نشده جلوگیری نمود. حفاظت کاتدی شامل متصل نمودن جریان ضعیف الکتریکی به میلگردها، استفاده از یک آند غیرفعال و عبور دادن جریانی در جهت عکس جریان ایجاد شده، در خوردگی الکتروشیمیایی است، که براین اساس از خوردگی جلوگیری می‌شود.

واکنش‌های قلیایی دانه‌ها مکانیزم خرابی و عوامل مؤثر

برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ با مشاهده ترک و انبساط‌های غیر طبیعی در سازه‌های بتنی در کالیفرنیا، نوعی خرابی موسوم به فعل و انفعال قلیایی‌های سیمان و سیلیس مواد سنگی کشف شد.

در حقیقت، این نوع خرابی از ترکیب هیدروکسیدهای سدیم و پتاسیم در آب حفره‌ای بتن، با نوعی سیلیس سنگدانه‌ها که به عنوان سیلیس فعال در بعضی از دانه‌های سنگی موجودند، و یا کربنات موجود در آنها، بوجود می‌آید. نتیجه این فعل و انفعالات تولید ژل مخصوصی است که انبساط یافته و با ایجاد تنش در بتن، سبب ترک در آن می‌شود. این ترک‌ها معمولاً به صورت چند ضلعی‌هایی نامنظم در سطح بتن ظاهر می‌شوند (شکل ۴). ژل تولید شده معمولاً سفید رنگ و یا بی‌رنگ بوده که در سطح دانه‌های فعال ظاهر و بعد از ترک به سطح بتن منتقل می‌شود.

هیدروکسیدهای سدیم و پتاسیم عمدتاً از قلیایی‌های ترکیبات سیمان ناشی می‌شوند. قلیایی‌های مواد معدنی تشکیل دهنده سیمان که معمولاً به صورت معادل اکسید کلسیم، یعنی $(Na_2O + 0.65K_2O)$ مشخص می‌شوند، ممکن است در سیمان معمولی بین ۰/۳ تا ۱/۱ درصد وزن سیمان متغیر باشند. البته گاه از مواد سنگی و مواد مضاف و آب مخلوط نیز مقداری از این مواد داخل بتن می‌شوند. منبع دیگر، یعنی سیلیس از نوع فعال در

می نماید، ذرات بسیار ریز با اندازه حدود ۲۰ تا ۳۰ میکرون در ظرف یک یا دو ماه انبساط ایجاد می کنند، ولی ذرات درشت تر فقط پس از چندین سال موجب انبساط می شوند.

گرچه با مصالح معین می توان احتمال وقوع واکنش قلیایی سنگدانه ها را پیش بینی نمود، معمولاً نمی توان میزان خسارت را فقط از معلومات مقادیر مواد واکنش زا تخمین زد. برای مثال، واکنش زایی واقعی سنگدانه ها تحت تأثیر اندازه ذرات و تخلخل آنها قرار می گیرد، زیرا این عوامل بر سطحی که روی آن امکان بروز واکنش هست، اثر می گذارد. از آنجا که مقدار قلیایی ها فقط بستگی به سیمان دارد، لذا تمرکز آنها در سطح واکنش زای سنگدانه ها توسط وسعت این سطح کنترل خواهد شد. حداقل مقدار قلیایی سیمان که ممکن است واکنش انبساط را ایجاد نماید، معادل $0/6$ درصد از سود سوزآور است. این عامل را همانگونه که قبلاً ذکر شد، با روش شیمی تحلیلی به صورت مقدار واقعی Na_2O به علاوه $0/65$ برابر مقدار K_2O موجود در کلینکر سیمان محاسبه می نمایند، لیکن موارد استثنایی مشاهده شده است که سیمان های دارای مقداری کمتر قلیایی نیز ایجاد انبساط می نمایند. در محدوده معین، هر چه مقدار قلیایی سیمان بیشتر باشد و برای ترکیب معینی از سیمان هر چه ذرات سیمان ریزتر باشد، انبساط بتن ساخته شده با سنگدانه های واکنش زا بیشتر خواهد بود. عوامل دیگری که بر توسعه واکنش قلیایی سنگدانه ها اثر می گذارند، موجود بودن آب غیرقابل تبخیر در خمیر و نفوذپذیری آن است.

برای وقوع این نوع واکنش، وجود رطوبت لازم است و در شرایط تر و خشک شدن متناوب، میزان آن شدت می یابد. حداقل در دامنه ۱۰ تا ۲۸ درجه سانتیگراد، حرارت باعث شدت بخشیدن به واکنش می گردد. بنابر این مشاهده می شود که عوامل فیزیکی و شیمیایی مختلف، مسئله واکنش قلیایی سنگدانه ها را بسیار پیچیده می سازند. به خصوص ممکن است بر اثر جذب آب، ترکیبات ژل تغییر یابد و فشار قابل ملاحظه ای را اعمال نماید و یا در مواقع دیگر، پخش ژل از محیطی که در آن محدود شده است، رخ دهد. قابل ذکر است که با پیشرفت هیدراتاسیون سیمان، قسمت عمده قلیایی ها در حالت مایع متمرکز می شوند و در نتیجه PH افزایش می یابد و کلیه کانی های سیلیسی به صورت محلول در می آیند.

بنابراین جای تعجب نیست که گفته شود، اگر چه می دانیم بعضی از سنگدانه ها تمایل به واکنش زایی دارند، هیچ راه ساده ای برای تعیین اینکه آیا نوع معینی از سنگدانه ها بر اثر واکنش با قلیایی های سیمان سبب انبساط زیاد می گردند یا خیر، وجود ندارد. معمولاً برای یافتن این جواب باید به سوابق عملکرد سنگدانه ها اتکاء نمود. اگر چنانچه هیچ سابقه ای در دست نباشد، امکان دارد که فقط استعداد واکنش زایی سنگدانه ها را تعیین نمود، اما نمی توان ثابت کرد که واکنش قطعاً رخ خواهد داد.

روش های پیشگیری

در صورتی که موارد زیر برقرار باشند، هیچگونه پیشگیری برای جلوگیری از بروز خرابی فوق لازم نیست.

الف - مواد سنگی از منبع شناخته شده ای تهیه می شوند و در طول سال های زیادی هیچ گونه خرابی حتی با سیمان های با میزان قلیایی بالا ایجاد نکرده باشند.

ب - بتن در محیط خشک قرار بگیرد (عدم وجود رطوبت فعل و انفعالات را متوقف می سازد).

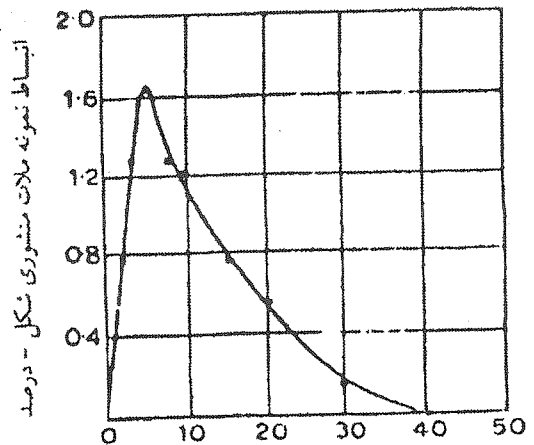
ج - مواد سنگی فاقد سیلیس و کربنات فعال باشند.

اما در صورتی که مواد سنگی بتن از نظر بروز پدیده مشکوک باشند، بایستی آزمایش مربوط به فعل و انفعالات آنها و قلیایی های سیمان انجام و حساسیتشان مشخص گردد. در چنین شرایطی به منظور پیشگیری، اغلب توصیه می شود که سیمان های با میزان اکسیدهای قلیایی کم و حداکثر به میزان $0/6$ درصد وزن سیمان مصرف شود. همچنین گاه لازم است منبع شن و ماسه مصرفی تغییر یابد. به هر حال خشک نگهداشتن بتن نیز سبب توقف فعل و انفعال می شود. اخیراً استفاده از مواد پوزولانی در جایگزینی با سیمان، نتایج مطلوبی داده است. به عنوان مثال، مصرف دوده سیلیس به جای قسمتی از سیمان مصرفی نه تنها باعث کم شدن سیمان و در نتیجه کم شدن درصد اکسیدهای قلیایی در مخلوط می شود، بلکه با ایجاد فعل و انفعال یا قلیایی ها، خطر ترکیب قلیایی ها و سیلیس مواد سنگی را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد، چگونگی مقابله پوزولان ها با واکنش قلیایی دانه ها در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

تحقیقات نشان داده است که انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه را می توان با افزودن پودر بسیار نرم سیلیس فعال به مخلوط کاهش داد و یا به طور کلی از

بین برد. این امر به ظاهر متناقض را می توان با مراجعه به شکل (۵) تشریح کرد. در این شکل، رابطه ای بین انبساط نمونه های ملات منشوری و مقدار سیلیس فعال که اندازه آنها بین ۳۰۰ و ۸۵۰ میکرون است (یعنی به صورت پودر نیستند) نشان داده شده است. در محدوده مقادیر کم سیلیس برای مقدار معینی از قلیایی ها، هر چه میزان سیلیس بیشتر باشد، انبساط زیادتری ایجاد می کند، ولی در مقادیر زیاد سیلیس وضعیت معکوس خواهد شد. هر چه مساحت سطح سنگدانه های واکنش زا بیشتر باشد، مقدار کمتری از قلیایی ها برای واحد این مساحت موجود خواهد بود و ژل قلیایی سیلیسی کمتری می تواند تشکیل گردد.

از طرف دیگر، به علت قدرت تحرک بی اندازه کم هیدروکسید کلسیم، تنها مقداری از آن که مجاور سطح سنگدانه ها قرار می گیرد، جهت انجام دادن واکنش در دسترس خواهد بود و لذا مقدار هیدروکسید کلسیم بر واحد سطح سنگدانه ها مستقل از کل مقدار مساحت سنگدانه ها است. بنابراین، افزایش مساحت سطح سبب ازدیاد نسبت هیدروکسید کلسیم به قلیایی های مجاور سنگدانه ها خواهد شد. تحت این شرایط یک محصول قلیایی سیلیسی کلسیم خنثی (بدون انبساط) به دست می آید.



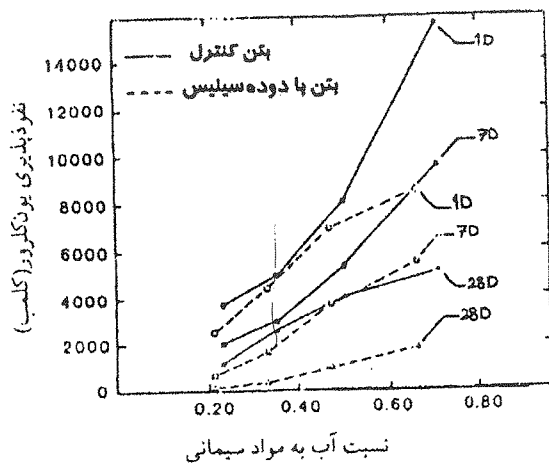
شکل (۵) رابطه بین انبساط پس از ۲۴ روز و مقدار سیلیس فعال در سنگدانه ها.

۶- تأثیر پوزولان ها بر دوام بتن اثر دوده سیلیس بر دوام بتن الف- تأثیر دوده سیلیس بر نفوذپذیری

اثر دوده سیلیس شبیه سایر پوزولان ها بر روی

بتن، منجر به ایجاد ساختاری با حفره های ریزتر و تغییرات روی فصل مشترک سنگدانه و سیمان شده که در کل باعث کاهش نفوذپذیری می گردد. این تأثیر بدان علت است که فعالیت پوزولانی دوده سیلیس از تمامی پوزولان ها بیشتر است. ذرات بسیار ریز و فعالیت پوزولانی دوده سیلیس و حذف پدیده آب افتادگی سبب پیوستگی بهتر در ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه می شود.

در یک آزمایش بر روی میزان خشک شدن و از دست دادن آب برای قرص هایی از خمیر سیمان با و بدون دوده سیلیس و به ضخامت ۳ میلیمتر، ضریب نفوذ از میزان ۱ برای خمیر شاهد و بدون دوده سیلیس به حدود ۰/۲۵ برای نمونه با ۲۰٪ دوده سیلیس کاهش یافته است. در تحقیق دیگری که انجام گرفته، نفوذ پذیری با آب برای بتن های دارای ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بررسی شده است. در بعضی مخلوط ها از جمله مخلوط با 100 kg/m^3 سیمان، اضافه نمودن ۱۰٪ دوده سیلیس سبب کاهش نفوذپذیری از 10^{-7} تا 10^{-6} به 10^{-10} متر در ثانیه شده است. نفوذپذیری بتن دارای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن و اضافه نمودن ۲۰٪ دوده سیلیس برابر بتنی شده که معادل ۲۵۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بدون دوده سیلیس داشته است. بتن های دارای ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب، نفوذپذیری در حدود 10^{-14} تا 10^{-15} متر در ثانیه بدون دوده سیلیس نشان داده اند که مبین این مطلب است که تأثیر دوده سیلیس بر نفوذپذیری بتن در مخلوط های با سیمان بالا چندان قابل ملاحظه نیست.



شکل (۶) تأثیر دوده سیلیس بر روی نفوذپذیری یون کلرور در بتن.

اثر دوده سیلیس بر نفوذ یون کلرید به داخل بتن که منجر به خوردگی فولاد می‌شود، نیز قابل ملاحظه است. اضافه نمودن ۸٪ دوده سیلیس سبب کاهش نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلرید می‌شود. با افزایش مواد پوزولانی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی می‌توان نفوذپذیری در مقابل یون کلرید را حتی کمتر نمود. همان طوری که در شکل (۶) مشهود است با کاربرد ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب سیمان و 40 kg/m^3 دوده سیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی معادل ۰/۲۱، نفوذ یون کلرید در بتن شاهد از ۱۲۴۶ کلمب به ۱۹۶ کلمب در ۲۸ روز برای بتن دوده سیلیسی کاهش یافته است (آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلرید براساس استاندارد (AASHTO T277-83).

بر روی میزان نفوذ کلرید در بتن‌های دارای مقادیر مختلف دوده سیلیس به صورت‌های متراکم و غیر متراکم نیز مطالعه شده است. مخلوط‌های بتنی با ۲۷۱ کیلوگرم در مترمکعب سیمان و با ۱۰ درصد جایگزینی دوده سیلیس با سیمان و با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ۰/۲۵، آزمایش شده‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن شاهد 42 MPa و بتن‌های دارای دوده سیلیس 70 MPa بدست آمده است. میزان نفوذ یون کلرید در سن ۲۸ روزه برای بتن شاهد ۱۷۹۰ کلمب بوده، در حالی که در بتن‌های دارای دوده سیلیس، این نفوذ تنها معادل ۳۰۰-۴۰۰ کلمب به دست آمده است.

ب- تأثیر دوده سیلیس در مقابل حمله سولفاتی و کربناتاسیون

اثر سولفات‌ها بر هیدروکسیدکلسیم آزاد شده از ترکیبات سیمان نیز به خرابی سولفاتی تعبیر شده است. دوده سیلیس به علت واکنش‌های پوزولانی با هیدروکسید کلسیم سبب کاهش این ترکیب در مخلوط شده و خطر حمله سولفاتی را کاهش می‌دهد. به علاوه با کاهش نفوذپذیری بتن خرابی در مقابل یون‌های سولفات را تقلیل می‌دهد. در مخلوط‌هایی که ۲۵ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان گشته، پس از ۲۸ روز میزان هیدروکسید کلسیم باقیمانده بسیار کم بوده است. اولین بار اثر سولفات‌ها در بتن‌های دارای دوده سیلیس توسط برن هارت بررسی شده است. نتیجه به دست آمده حاکی از آن بود که جایگزین نمودن ۱۰-۱۵ درصد دوده سیلیس با سیمان تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کنترل خرابی سولفاتی داشته است. تحقیقات وسیعی نیز

در نروژ بر روی بتن‌های دارای نسبت‌های آب به سیمان و درصد‌های مختلف دوده سیلیس تا مدت ۲۰ سال در معرض آب‌های زیرزمینی (آب دارای ۴۴۴ گرم در لیتر SO_3 با PH بین ۷ تا ۵/۲) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بتن‌های دارای ۱۵ درصد دوده سیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۶۳ در مقابل سولفات مقاومت بیشتری نسبت به بتن‌های دارای سیمان ضد سولفات نوع ۵ با آب به سیمان ۰/۵ داشته‌اند.

در پژوهشی دیگر، مقاومت در مقابل محلول‌های شیمیایی شامل ۱٪ اسید کلریدریک، ۱٪ اسید سولفوریک، ۱٪ اسید لاکتیک، ۵٪ اسید استیک، ۵٪ سولفات آمونیوم و ۵٪ سولفات سدیم برای بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، با و بدون دوده سیلیس بررسی شده‌اند (درصد جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان معادل ۱۵ درصد). افت وزنی نمونه‌ها تا حداکثر ۲۵٪ اندازه‌گیری شده و نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر بتن‌های دارای دوده سیلیس در مقایسه با سایر بتن‌ها بوده است. تنها مورد استثناء عملکرد نسبتاً ضعیف بتن‌های دارای دوده سیلیس در مقابل سولفات آمونیوم بوده است که این ضعف به تجزیه سیلیکات کلسیم هیدراته شده در خمیر سیمان بر اثر نمک‌های آمونیوم نسبت داده می‌شود.

دوده سیلیس نیز همانند سایر پوزولان‌ها سبب کاهش هیدروکسید کلسیم در بتن گشته و در نتیجه ممکن است سبب افزایش شدت کربناتاسیون شود. از طرف دیگر، کاربرد دوده سیلیس سبب کاهش نفوذپذیری بتن شده که این خود نفوذ گاز CO_2 به داخل بتن را کند می‌کند. نتیجه این دو اثر به هر حال عوامل زیادی همچون مقدار دوده سیلیس در مخلوط، نسبت آب به مواد سیمانی و شرایط عمل‌آوری وابسته بوده که این عوامل بر روی میزان نهایی هیدروکسید کلسیم و نفوذپذیری بتن تأثیر می‌گذارند.

در تحقیقی که روی نمونه‌های بتنی با ۲۰ درصد دوده سیلیس و اضافه کردن روان‌کننده که مدت ۷ روز عمل آمده و سپس در رطوبت نسبی ۶۰ درصد قرار گرفته بودند انجام شده، میزان کربناتاسیون آنها کمتر از بتن‌های شاهد به دست آمده است.

در مطالعاتی که با روش کربناتاسیون تسریع شده بر روی مخلوط‌های مختلف توسط مؤلف انجام گرفته است، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در میزان عمق کربناتاسیون نمونه‌های با و بدون دوده سیلیس در شرایطی که همه عوامل در مخلوط‌ها یکسان نگهداشته

شوند، مشاهده نگردید.

در یک بررسی دیگر پس از سه سال و شش ماه، تفاوت قابل ملاحظه ای بین نمونه های دارای دوده سیلیس و نمونه های کنترل و با سیمان پرتلند معمولی در آب به سیمان های بین ۰/۲۵ تا ۰/۴ مشاهده نشده است. به طور کلی می توان بیان نمود: در صورتی که بتن های با کیفیت بالا و نسبت آب به سیمان پایین و عمل آوری مناسب ساخته شوند، بین مخلوط های دارای دوده سیلیس و بدون آن تفاوتی از نظر عمق کربناتاسیون وجود نخواهد داشت.

ج- اثر دوده سیلیس در پدیده واکنش قلیایی

در بررسی های انجام شده عملکرد دوده سیلیس در کنترل انبساط ناشی از پدیده واکنش قلیایی سنگدانه های بتن مشخص شده است. به هر حال، درصد دوده سیلیس لازم در بتن به عوامل زیادی چون نوع سنگدانه فعال، شرایط نگهداری و محیطی، میزان قلیایی ها و سیلیس موجود، نوع دوده سیلیس مصرفی، نوع سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی بستگی دارد. نتایج به دست آمده خاطر نشان می سازد که میزان جایگزینی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی دوده سیلیس با سیمان در کنترل این پدیده مؤثر بوده است (شکل ۷).

دوده سیلیس فقط کنترل کننده انبساط در پدیده واکنش قلیایی - سیلیسی بوده و در پدیده واکنش قلیایی - کربناتی تأثیری ندارد. مکانیزم کنترل انبساط واکنش قلیایی - سیلیسی توسط دوده سیلیس به صورت زیر تفسیر شده است:

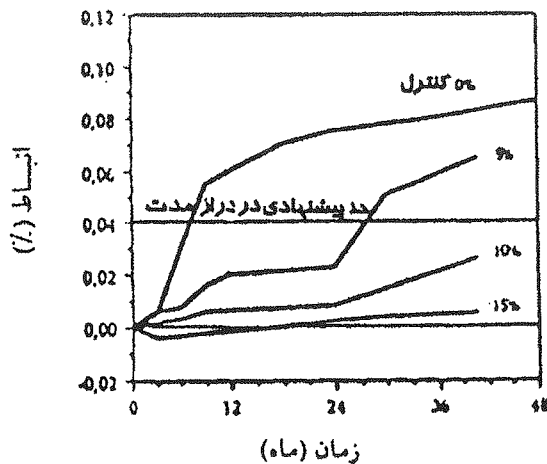
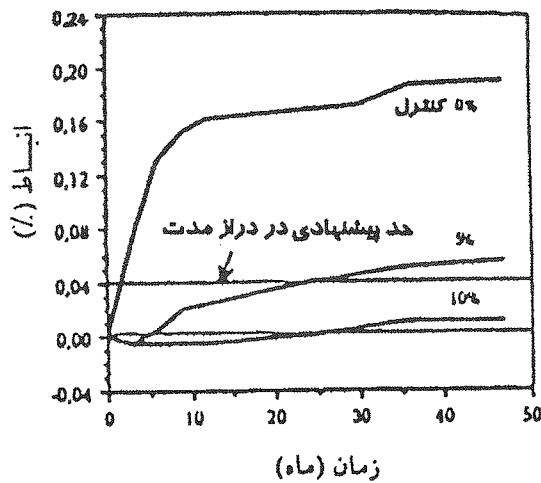
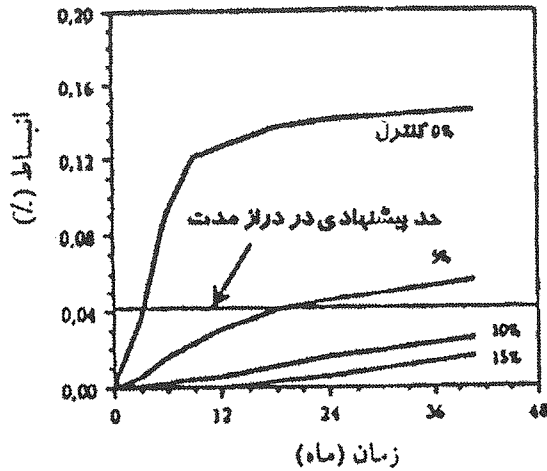
- کم شدن غلظت قلیایی ها با جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس.

- انجام پذیرفتن واکنش های پوزولانی و تشکیل ژل C-S-H با نسبت پایین $\frac{CaO}{SiO_2}$ که ظرفیت نگهداری K_2O و Na_2O را در داخل ساختار آن افزایش داده است، سبب کاهش غلظت هیدروکسید کلسیم می شود.

- کاهش نفوذپذیری منجر به کاهش نفوذ یون کلرید می گردد.

- ایجاد ریز ساختار متراکم تر در مخلوط بتن.

در حال حاضر هنوز نتایج دراز مدت عملکرد دوده سیلیس در کنترل پدیده واکنش قلیایی - سیلیسی سازه های مختلف در محیط به دست نیامده است.



شکل (۷) نتایج آزمایش های انبساط نمونه های منشوری ساخته شده با سه نوع سنگدانه فعال و سیمان دوده سیلیسی با سیلیس بالا و قلیائیت کم.

اثر خاکستر بادی در دوام بتن

عمل آوری با تقلیل دوره عمل آوری به صورت افزایش نفوذپذیری در نتایج ظاهر شده است. بتن های ساخته شده با خاکستر بادی حتی با یک روز عمل آوری مرطوب نسبت به بتن های معمولی، نفوذپذیری کمتر نشان داده اند.

با افزایش طول دوران عمل آوری نفوذپذیری بتن های دارای خاکستر بادی به مراتب کمتر از بتن های معمولی است. بنابراین نتایج می توان ادعا نمود که تحت عمل آوری یکسان (در استانداردها اغلب طول عمل آوری بیشتری برای بتن های با خاکستر بادی توصیه شده است) دوام بتن های دارای خاکستر بادی کمتر از بتن های معمول نخواهد بود.

ب- تأثیر خاکستر بادی بر کربناتاسیون بتن

در خصوص اثر خاکستر بادی بر روند کربناتاسیون بتن، نقطه نظرات متفاوتی وجود دارد. تحقیقات سال های دهه ۷۰ در ژاپن نشان داده است که بتن های ساخته شده از سیمان های مخلوط اغلب بیش از سایر بتن ها در مقابل کربناتاسیون حساسیت دارند و به خصوص در آزمایش های تسریع شده عمق نفوذی اکسید کربن در آنها بیشتر بوده است. اما نتایج بسیار خاطر نشان می سازد، در صورتی که نمونه های با سیمان آمیخته مقاومتی برابر با نمونه های ساخته شده

صرف نظر از جنبه اقتصادی مخلوط های بتنی با استفاده از خاکستر بادی، عملکرد این ماده در بهبود کیفیت بتن و افزایش دوام آن در مقابل محیط های خورنده سبب کاربرد بیشتر آن در محیط هایی که خرابی و خوردگی در بتن وجود دارد، گشته است. تأثیر استفاده از این ماده بر نفوذپذیری و مقابله با انواع خرابی های بتن، به طور خلاصه بیان می گردد.

الف- تأثیر خاکستر بادی بر نفوذپذیری

نفوذپذیری بتن عامل اصلی نشان دهنده روند حرکت مایعات و گازهای مضر مستعد واکنش با سیمان است. برای افزایش دوام بتن بخصوص در مقابل حمله شیمیایی مواد خورنده لازم است نفوذپذیری بتن کاهش یابد. خاکستر بادی از جمله موادی است که در نفوذپذیری بتن، تأثیر گذار است.

بررسی های زیادی بر روی نفوذپذیری بتن های ساخته شده با خاکستر بادی با نسبت های مختلف جایگزینی با سیمان در مقایسه با بتن های معمولی انجام شده است. در یک بررسی تأثیر عمل آوری و درصد استفاده از خاکستر بادی بر روی نفوذپذیری بتن با روش آب برای بتن های با کارآیی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه یکسان مطالعه شده است. نتایج حاصله با این روش در جدول (۲) نشان داده شده است. نقش

جدول (۲) ضریب نفوذپذیری آب برای مخلوط های بتن پس از ۲۸ روز نگهداری (m/s) $\times 10^{-13}$

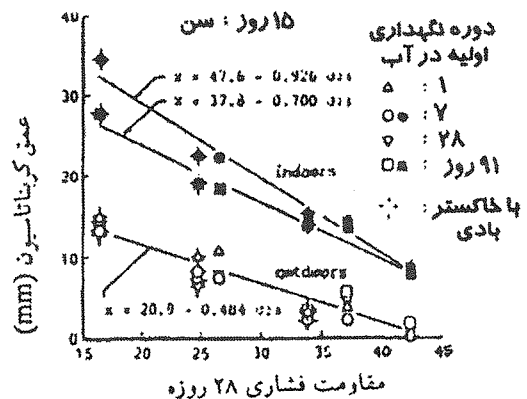
نگهداری در آب	مدت عمل آوری	مدت عمل آوری (روز)
۲۸ روز	۲۰ °C ، ۴۰ Rh ^a	۲۰ °C ، ۶۵ Rh ^a

مخلوط	خاکستر بادی	۱ d	۳ d	۷ d	۱ d	۳ d	۷ d	
A	%	۲۸۰۰	۵۰۰	۲۲۰	۲۲۰۰	۹۱۰	۲۸۰	۱/۷۹
B	%۱۵ M۲۶۷	۳۱۰۰	۲۷۰	۲۳	۱۸۰۰	۶۶	۶۰	۰/۸۰
C	%۳۰ M۲۶۷	۳۸۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰	۲۳۰۰	۱۲۰۰	۱۳۰	۰/۷۰
D	%۵۰ M۲۶۷	۳۸۰۰	۲۱۰۰	۱۳۰	۷۰۰۰	۱۹۰۰	۱۶۰	۰/۸۹
E	%۳۰ M ۲۶۸	۱۸۰۰	۴۵	۳۶	۱۰۲۱	۶۲	۵/۶	۰/۶۳
F	%۳۰ M۲۶۹	۲۴۰۰	۱۹۰	۵۲	۲۰۰۰	۷۹۰	۹/۵	۰/۶۰

(a) شرایط نگهداری پس از عمل آوری اولیه

از سیمان‌های معمولی داشته باشند، میزان عمق کربناتاسیون در آنها تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارد.

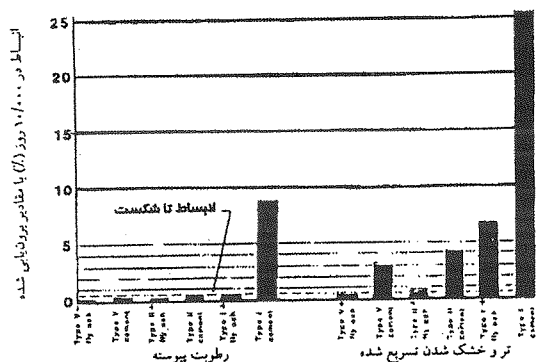
تحقیقات وسیعی در مورد کربناتاسیون بتن‌های دارای خاکستر بادی انجام شده است. نتایج به دست آمده تأثیر عمل آوری مرطوب در سنین اولیه را در عمق نفوذپذیری دی اکسیدکربن بخصوص برای بتن‌های دارای خاکستر بادی خاطر نشان می‌سازد. همچنین بدون توجه به استفاده از خاکستر بادی در مخلوطها، بین عمق کربناتاسیون و مقاومت فشاری نمونه‌ها رابطه خطی که در شکل (۸) نشان داده شده به دست آمده است. البته رابطه فوق در همه حالات‌ها صادق نیست و با تغییر شرایط محیطی و به ویژه مدت عمل آوری اولیه در آب تغییر می‌کند.



شکل (۸) رابطه بین مقاومت فشاری و عمق کربناتاسیون.

ج- مقاومت بتن‌های دارای خاکستر بادی در مقابل سولفات

نخستین بار در سال ۱۹۳۷ دیویس با انجام دادن آزمایش‌هایی خاطر نشان ساخت که از انواع خاکسترهای بادی به کار رفته، گروهی از آنها مقاومت بتن در مقابل سولفات‌ها را افزایش می‌دهند. حال آنکه گروهی بدون تأثیر و برخی حتی اثر خرابی سولفاتی را تشدید می‌کنند. در سال ۱۹۶۷ نتایج عملکرد ۳۰ نوع بتن را که با و بدون خاکستر بادی ساخته شده بودند، در مقابل حمله سولفاتی نشان داد که تمامی ۱۲ نوع خاکستر بادی استفاده شده در طرح‌های اختلاط، مقاومت بتن در مقابل سولفات را افزایش داده و انبساط کمتری در محلول سولفات از خود نشان دادند. شکل شماره (۹) نتایج انبساط این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۹) انبساط سولفاتی بتن‌های ساخته شده با ۳۰٪ خاکستر بادی (در محیط با ۲/۱ درصد سولفات سدیم)

در کارهای انجام شده دیگر در سال ۱۹۸۰ نتایج ۵ سال آزمایش بر روی بتن‌های دارای سیمان خاکستر بادی در مقابل سولفات‌ها ارائه و چنین عنوان شده است که اکسیدهای CaO و Fe_2O_3 موجود در خاکستر بادی عوامل اصلی مقاومت و حساسیت در مقابل سولفات‌های بتن‌های دارای خاکستر بادی اند و هر چه میزان اکسید کلسیم موجود در خاکستر بادی از حد پایین ۵ درصد فراتر می‌رود یا هر چه اکسید آهن در آن کم می‌شود، مقاومت این ماده در مقابل سولفات کاهش می‌یابد.

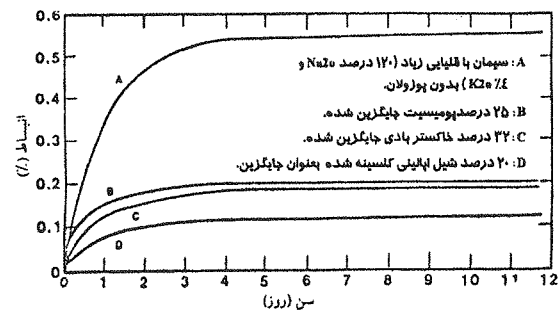
د- تأثیر خاکستر بادی در واکنش قلیایی بتن

مدت کوتاهی پس از اینکه مشخص گردید واکنش قلیایی سنگدانه‌ها سبب انبساط در بتن و ایجاد ترک و خسارت می‌گردد، برخی محققین دریافتند که با اضافه

مؤلف آزمایش‌های گسترده‌ای را با استفاده از روش تسریع شده کربناتاسیون بر روی ملات‌های دارای پوزولان‌های طبیعی و چند پوزولان مصنوعی از جمله خاکستر بادی انجام داده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که تحت شرایط یکسان مخلوط‌ها و عمل آوری، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین عمق کربناتاسیون ملات با سیمان پرتلند معمولی و سیمان با خاکستر بادی وجود ندارد. در تحقیقات دیگر که با میزان جایگزینی‌های متفاوت خاکستر بادی و تحت شرایط عمل آوری اولیه متفاوت انجام شده، این نتایج به دست آمده است که با افزایش میزان خاکستر بادی در مخلوط و کاهش طول دوره عمل آوری اولیه، میزان عمق کربناتاسیون افزایش می‌یابد. رابطه معروف عمق کربناتاسیون و جذر زمان ($x = a\sqrt{t}$) در آزمایش‌های تسریع شده نیز به دست آمده است.

نمودن مواد ریزدانه فعال به مخلوط‌های بتن، می‌تواند این اثر مخرب را به میزان زیادی کاهش داد. پس از آن طبق تحقیقات زیادی مشخص گردید که اکثر پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی از جمله خاکستر بادی قادرند مقاومت بتن را در مقابل این پدیده افزایش داده و ترک‌های ناشی از واکنش‌های فوق را کنترل نمایند. البته باید خاطر نشان ساخت که تأثیر مثبت خاکستر بادی و سایر پوزولان‌ها در تقلیل انبساط ناشی از واکنش قلیایی محدود به سنگدانه‌هایی است که ایجاد واکنش سیلیسی قلیایی می‌کنند. از آنجا که سنگدانه‌های با واکنش قلیایی کربناتی نیز وجود دارند و نتیجه این واکنش نیز ترک خوردن و خرابی است، کار با سیمان‌های دارای خاکستر بادی و این قبیل سنگدانه‌ها نیز برای یافتن اثر واکنش قلیایی انجام شده است. نتایج به دست آمده تاکنون که با آزمایش‌های محدودی انجام شده است، تأثیر قابل ملاحظه‌ای را نشان نداده و تفاوتی بین این نوع سیمان معمولی در کنترل واکنش قلیایی کربناتی مشاهده نشده است.

در تحقیقات وسیعی که انجام شده است نتایج به دست آمده مبین این است که نقش کاهش دهنده‌ی پوزولان‌ها، به ویژه خاکستر بادی در انبساط تا میزان $\frac{1}{5}$ حتی است. این نتایج در شکل ۱۰ برای ملات‌های مختلف نشان داده شده است. بایستی توجه داشت که خاکستر بادی به دست آمده از منابع مختلف در مقابل پدیده واکنش قلیایی عملکرد متفاوتی ممکن است نشان دهد. به عنوان مثال، پاره‌ای از خاکسترهای بادی با اکسید کلسیم بالا در مقابل این پدیده بی‌اثر و گاهی نیز اثر تشدید کننده خرابی نیز داشته‌اند.



شکل (۱۰) تأثیر پوزولان‌ها بر روی کاهش انبساط ملات‌های ساخته شده با سیمان با قلیانیت زیاد و سنگدانه‌های مستعد واکنش.

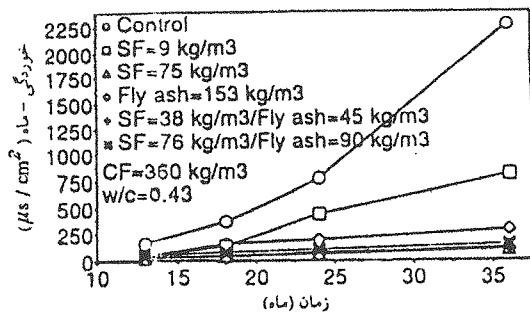
تأثیر خاکستر بادی در تقلیل یا افزایش پدیده واکنش

قلیایی به میزان قلیایی موجود در خود خاکستر بادی و به ریزی دانه‌های آن بستگی دارد. میزان قلیایی‌های محلول در اسید در ملات‌های سیمان‌های پرتلند که به $\frac{3}{5}$ کیلوگرم در متر مکعب محدود می‌شود. در ملات‌های ساخته شده با مخلوط سیمان پرتلند و خاکستر بادی که بر حسب معادل Na_2O محاسبه می‌شود به $\frac{2}{85}$ کیلوگرم در متر مکعب محدود می‌گردد. در کارهایی که در سال‌های اخیر بر روی ملات‌های دارای خاکستر بادی گروه‌های C و F با میزان قلیایی در دسترس بین $\frac{0}{57}$ تا $\frac{4}{25}$ درصد انجام شده است نتایج زیر حاصل آمده است:

به طور کلی در مخلوط‌های دارای خاکستر بادی و بدون آن با افزایش میزان قلیایی مخلوط سیمانی انبساط نمونه‌ها بر اثر واکنش قلیایی افزایش یافته است. در مخلوط‌هایی که به میزان کافی خاکستر بادی جایگزین سیمان شده است، بدون در نظر گرفتن فعالیت سنگدانه و ترکیبات شیمیایی سیمان، میزان انبساط ملات‌ها کاهش یافته است. در ضمن با افزایش میزان قلیایی‌ها در خاکستر بادی، انبساط ملات‌ها افزایش نشان داده است. در این نتایج میزان CaO موجود در خاکستر بادی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در روند واکنش‌های قلیایی نداشته است. در مخلوط‌هایی که میزان قلیایی‌های در دسترس خاکستر بادی کمتر از $\frac{1}{5}$ درصد بوده است، افزایش جایگزینی خاکستر بادی با سیمان سبب کاهش میزان انبساط ملات گشته و نقش مثبت این افزایش را نشان می‌دهد. در حالی که اگر خاکستر بادی دارای قلیایی‌های در دسترس بیش از $\frac{1}{5}$ درصد باشد، تنها برای یک میزان حداقل جایگزینی است که در کمتر از آن، خاکستر بادی سبب افزایش انبساط نسبت به مخلوط بدون خاکستر بادی می‌شود و از این حد بیشتر، خاکستر بادی انبساط کمتری را ایجاد می‌نماید. در مقایسه بکارگیری میزان حداقل سیمان جایگزین با خاکستر بادی به جای در نظر گرفتن حداکثر قلیایی در دسترس از طریق خاکستر بادی، می‌تواند روش مناسبی برای مصرف خاکستر بادی به منظور کنترل پدیده واکنش قلیایی در بتن باشد.

۵- تأثیر خاکستر بادی در خوردگی آرماتور در بتن

در سال‌های اخیر توجه خاصی به عملکرد سیمان‌های دارای خاکستر بادی در بتن‌هایی که تحت اثر تهاجم یون کلرید از طریق نمک‌های بکاربرده شده برای



شکل (۱۱) کل خوردگی بر حسب زمان برای میلگردهای فولادی در بتن های با $w/c = 0.43$ در معرض ۳٪ ترکیب NaCl با تغییر میزان مصرف مواد پوزولانی، SF: دوده سیلیس CF: سیمان

از نتایج فوق می توان مشاهده نمود که آرماتورها در بتن کنترل و در بتن دارای 9 kg/m^3 دوده سیلیس پس از سه سال در حال زنگ زدگی و خوردگی اند. به هر حال، بتن های دارای خاکستر بادی قادر بوده اند شدت خوردگی را کاهش دهند. اما با افزایش نسبت آب به سیمان ($w/c = 0.52$). بتن دارای خاکستر بادی، شدت خوردگی بالاتری نسبت به سایر بتن ها نشان داده است.

تأثیر سرباره بر دوام بتن

الف- مقاومت در مقابل سولفات ها و آب دریا

از آنجا که یک نقش بسیار اساسی که برای پوزولان ها قائل شده اند، تأثیر شگرف آنها در دوام بتن و مقابله با خرابی هایی است که در فصول گذشته تشریح شد، لذا در این بخش، آثار سرباره کوره ذوب آهن بر روی دوام بتن را مورد بحث قرار می دهیم. ثابت شده است که بتن های حاوی سرباره دانه آسیاب شده دارای مقاومت بیشتری در مقابل حملات سولفات ها و آب دریا نسبت به بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی است. در این خصوص اطلاعات و مدارک زیادی وجود دارد که البته نسبت سیمان سرباره ای متناسب با درصد سرباره موجود در آن است.

برخی پژوهشگران معتقدند که مقاومت در مقابل سولفات ها زمانی آغاز می شود که نسبت سرباره بیش از ۶۵ درصد باشد. آنها سعی کرده اند علت مقاومت در مقابل سولفات ها بر اثر مصرف درصد زیاد سرباره را تشریح نمایند. یک علت عمده آن است که جذب و ایجاد فعل و انفعال به هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراتاسیون سیمان باعث تراکم بسیار زیاد خمیر

ذوب یخ و یا آب دریا و محیط های ساحلی قرار دارند، معطوف گشته است.

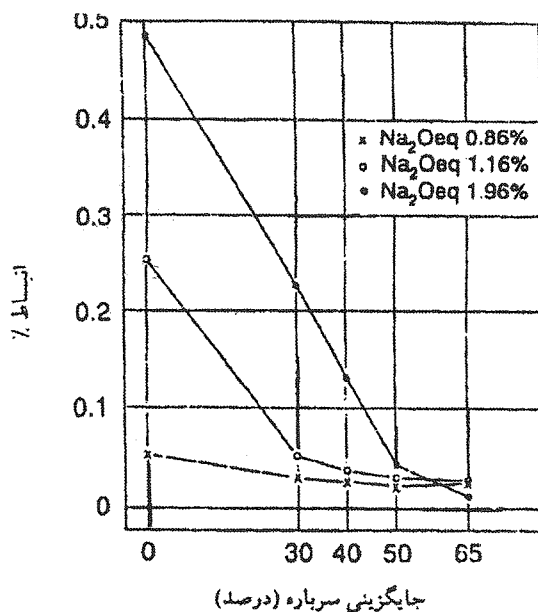
در قسمت های قبلی به نفوذپذیری بتن های دارای خاکستر بادی و پدیده کربناتاسیون این بتن ها اشاره گردید. در اینجا باید یادآور شد که انتخاب میزان مناسب خاکستر بادی در ساخت بتن و عمل آوری مناسب این بتن ها ممکن است منجر به تشکیل بتن هایی شود که نفوذپذیری آنها کمتر از بتن های ساخته شده با سیمان پرتلند خالص باشد، اما باید توجه داشت که نفوذپذیری بتن های دارای خاکستر بادی نیز ممکن است تحت تأثیر عواملی چون قرار گرفتن سریع این بتن ها در محیط های مهاجم و خورنده قبل از عمل آوری کامل، عدم انتخاب مناسب میزان خاکستر بادی، کیفیت پایین خاکستر بادی و عمل آوری نامناسب به مخاطره بیفتد. این طور تصور می شود که به علت فعالیت پوزولانی خاکستر بادی، میزان زیادی از هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط این پوزولان مصرف شده و در نتیجه آن PH آب حفره ای در خمیر سیمان دارای خاکستر بادی کاهش می یابد. برخی معتقدند که قلیائیت و PH زیاد خمیر سیمان هیدراته شده و آب داخل حفره ها بیشتر به دلیل وجود یون های سدیم و پتاسیم در مقایسه با هیدروکسید کلسیم است، آنها در مطالعاتشان بر روی دو نوع خاکستر بادی و بررسی وضعیت PH مخلوط های سیمانی نتیجه گرفتند که تقریباً تمامی قلیائیت محلول بر اثر انحلال یون های سدیم و پتاسیم داخل سیمان است و در سنین اولیه میزان هیدروکسید کلسیم به سطح پایینی نزول می نماید. در نمونه های آزمایش شده، در آب های حفره ای میزان PH در مخلوط های دارای خاکستر بادی به $13/55$ کاهش یافت. (نسبت به نمونه شاهد بدون خاکستر بادی دارای PH برابر $13/75$).

مطالعات گسترده ای نیز برای بررسی اثر دراز مدت مخلوط های دارای خاکستر بادی و دوده سیلیس در نفوذ یون کلرید، مقاومت الکتریکی، ریز ساختار و خوردگی فولاد در بتن انجام گرفته است. نتایج خوردگی آرماتور در بتن با نسبت آب به مواد سیمانی 0.43 پس از سه سال قرار گرفتن در محلول ۳ درصد کلرور سدیم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

نشود، میزان عمق کربناتاسیون بیشتری نسبت به بتن معمولی خواهیم داشت که خود مقدمه ای برای خوردگی فولاد است.

ج- مقاومت در مقابل واکنش قلیایی

تحقیقات انجام شده خاطر نشان می سازد که با اضافه نمودن سرباره به سیمان، میزان انبساط به علت واکنش قلیایی کاهش می یابد. البته باید توجه داشت که میزان قلیایی که از طریق سرباره وارد سیستم می شود بایستی کنترل شود، چون ممکن است بعضی از سرباره ها این امر را تشدید نمایند. آزمایش ها با ۵۰ درصد جایگزینی سیمان با سرباره نشان دهنده کاهش انبساط بر اثر پدیده واکنش قلیایی در سرباره های مصرفی در اروپا بوده است. در حال حاضر استاندارد BS ۸۱۱۰ مصرف جایگزینی ۵۰ درصد سرباره را با سیمان برای کنترل و کاهش اثر واکنش قلیایی سنگدانه ها توصیه می کند. نتیجه جدیدترین تحقیقات در خصوص اثر کاهش دهنده انبساط سرباره با درصد های مختلف، اثر کاهش دهنده انبساط های با درصد های مختلف قلیایی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود تأثیر درصد های بالاتر سرباره در درصد های بالاتر قلیایی، در مخلوط ها بیشتر بوده است.



شکل (۱۲) ارتباط بین میزان جایگزینی سرباره و میزان انبساط ناشی از پدیده واکنش قلیایی.

سیمان می گردد، به طوری که نفوذپذیری به شدت کاهش یافته و فعل و انفعالات شیمیایی خطرناک از سوی عوامل مهاجم نمی تواند صورت گیرد. چون چنین سیمانی به شدت ضد سولفات است و حتی از سیمان ضد سولفات نوع ۵ در مقابل حمله سولفات ها مقاومتر است. مزیت دیگر آن بر سیمان ضد سولفات آن است که، سیمان نوع ۵ به دلیل پایین بودن مقدار سه کلسیم آلومینات (C₃A) در مقابل سولفات ها مقاوم است، ولی در مقابل کلروها مقاومتی ندارد. زیرا دارای ظرفیت کم برای تشکیل ترکیب پیچیده کلرور آلومینیوم است.

ب- مقاومت در مقابل نفوذ یون کلرید و خوردگی آرماتورها

غالباً خرابی سازه های بتن مسلح در نواحی گرمسیر به واسطه نفوذ کلروها و خوردگی فولاد رخ می دهد. تأثیر نوع سیمان به سرعت انتشار یون کلرور در خمیر سیمان سخت شده و ملات سیمان توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است.

برخی مطالعات نشان داده است که سرعت انتشار یون های مخرب در درون خمیر سیمان سخت شده با افزایش درصد سرباره به میزان زیادی کاهش می یابد. نمونه های مختلفی که از سیمان معمولی، سیمان ضد سولفات و سیمان سرباره ساخته شده بودند، در سنن مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج حاکی از این بوده است که سرعت انتشار یون کلرور در خمیر سیمان معمولی از سیمان پرتلند سرباره ای به مراتب بیشتر است. قابل توجه اینکه سرعت انتشار یون های مخرب کلرور در سیمان های پرتلند ضد سولفات به میزان قابل ملاحظه ای بیشتر از سیمان پرتلند معمولی است. بررسی های انجام شده در نواحی گرم و مرطوب مشخص ساخت که بتن ساخته شده با سیمان سرباره ای (با ۷۰ درصد سرباره آهنگدازی) دارای مقاومت بیشتری در مقابل نفوذ یون های کلرور است.

تجربیات علمی و آزمایشگاهی نشان داده است که، استفاده از سیمان سرباره تا حد زیادی بهبود دوام بتن در نواحی گرمسیر و مجاورت آب دریا را به همراه دارد. بتن ساخته شده با سیمان پرتلند سرباره ای در مراحل اولیه سخت شدن نسبت به عوامل خوردنده خارجی از سیمان پرتلند معمولی حساس تر است. بنابراین مسئله عمل آوری بتن های یاد شده از اهمیت به سزایی برخوردار است. در صورتی که این امر به خوبی انجام

۷- نتیجه گیری

بتن اتفاق افتاده و دوام آن را به مخاطره می اندازد. علاوه بر رعایت نکات فوق مصرف سیمان های پوزولانی طبیعی و مصنوعی نیز توانسته است نقش عمده ای در افزایش دوام بتن ها به ویژه در شرایط محیطی سخت داشته باشد.

بتن به عنوان یکی از مصالح پرمصرف در صنعت ساخت و ساز در جهان به عنوان یک ماده با دوام نیز شناخته شده است. در صورت انتخاب مصالح نامناسب در ساخت بتن، اجرای ضعیف و عدم نگهداری خرابی های عمده ای به ویژه در مناطق بسیار خورنده در

مراجع

- [1] "Fly Ash in concrete", V. M. Malhotra, A. A. Ramezaniapour, CANMET, National Resources Canada, September 1994.
- [2] V. M. Mathotra, "Advances in concrete technology", Proceedings of the CANMET/ACI International Conferences, 1993, 1995, 1997.
- [3] V. M. Malhotra, "Durability of concrete", Proceedings of the CANMET/ACI International Conferences, 1988, 1991, 1994, 1997.
- [4] V. M. Malhotra, "The use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete", proceedings of the CANMET/ACI International Conferences, 1983, 1986, 1992, 1995.
- [5] V. M. Malhotra, "Advances in concrete technology, CANMET publication, 1992.
- [6] R. N. Swamy, "Cement replacement materials", Surrey University Press, Vol. 3, 1986.
- [7] f. M. Lea, "The chemistry of cement and concrete", Edward Arnold, 3rd edition, 1983.
- [8] V. M. Malhotra, "Concrete technology, past, present and future", ACI publication, SP144, 1993.
- [9] P. K. Meha, "Concrete, Structure, Properties, and Materials", Prentice Hall, 2nd edition, 1993.
- [10] A. A. Ramezaniapour. "Engineering properties of mortars and concrete made with OPC & Trass-OPC", Amirkabir Journal of Sceince and Technology . Vol2. No. 8, winter 1987.
- [11] A. A. Ramezaniapour" Durability of mortars and concrete made with OPC and trass", Amir-kabir Journal of Science and Technology. Vol. 3, No 9, Summer 1988.
- [12] A. A. Ramezaniapour," The use of cements to improve durability of concrete in hot climates", 1st International conference on reinforced concrete materials in hot climate, Dec. 1994. U. A. E.
- [13] A. A. Ramezaniapour, "Application of pozzolanic cements to enhance durability in hot areas", International conference on the advances in concrete technology, ACI/CANMET, June 1995, Las vegas, U.S.A.
- [14] A. A. Ramezaniapour, "The effect of accelerated tests on AAR", 10th International Conference on AAR in Concrete, Aug. 1996, Melbourne, Australia.
- [15] J. G. Cabrera, A. A. Ramezaniapour, "Performance of mortars and concretes made with OPC and Trass-OPC", 4th International conference on concrete in developing countries, Nov. 1996, Cyprus.
- [۱۶] آئین نام بتن ایران (آبا)، بخش اول، سازمان برنامه و بودجه، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، ۱۳۷۲.
- [۱۷] «بتن شناسی» ترجمه هرمز فامیلی، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۷۳.
- [۱۸] علی اکبر رمضانپور، محسن صارمی، «بررسی علل کاهش عمر مفید سازه های بتنی مسلح» انتشارات مرکز تحقیقات و مطالعات راه و ترابری، پاییز ۱۳۷۵.
- [۱۹] علی اکبر رمضانپور «کربناتاسیون کوتاه مدت و دراز مدت ملات ها و بتن های ساخته شده با خاکستر بادی، دوده سیلیس و تراس» سمینار ملی و کاربرد بتن در ساختمان، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، مهر ماه ۱۳۶۶، تهران - ایران.
- [۲۰] علی اکبر رمضانپور، منصور پیدایش، «ضریب بازدهی بتن دارای دوده سیلیس»، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد دوده سیلیس در بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، اردیبهشت ۱۳۷۶، تهران - ایران.
- [۲۱] علی اکبر رمضانپور، موسی مظلوم، «اثر دوده سیلیس در جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن»، چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۷۶، دانشگاه صنعتی شریف، تهران - ایران.