خوردگی تأسیسات بتنی تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب*

ترجمه:

عبدا... مصطفایی* محمد طغرایی**

چکیده

شاید شما از پوشش دهی بتن متعجب شوید به نظر می‌رسد بتن خود سطحی کاملاً سخت دارد. در حقیقت هم اگر طراحی و ساخت بتن به خوبی انجام شده باشد می‌توان گفت که یکی از قوی‌ترین مواد ساختمانی موجود می‌باشد. اما باید توجه داشت که حتی پس از اختلاط سیمان و شن و هیدراته شدن (ترکیب شیمیایی با آب) نیز بتن قادر به تحمل بسیاری از محیط‌ها نمی‌باشد و همان طوری که پوشش‌دهی فولاد باعث افزایش عمر آن می‌گردد، پوشش‌دهی بتن نیز باعث عمر بیشتر آن خواهد گردید. در این مقاله اصول تهیه بتن و نیز مشخصات بتن فاقد پوشش که آن را مستعد آسیب‌پذیری در سازه‌های صنعتی می‌سازد بحث می‌شود. همچنین سه مکانیزم اصلی تخریب و خوردگی بتن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱- تهیه بتن

قابل ذکر است که با وجود انواع مختلف بتن، تمامی آنها از اجزاء زیر تشکیل شده‌اند:

- آب (ترجیحاً با کیفیت آب شرب)
- ذرات شن، ماسه یا سنگ
- سیمان (معمولاً سیمان پرتلند) که پس از اختلاط با آب، مواد را به صورت خمیری در کنار یکدیگر حفظ می‌کند.
- مواد افزودنی جهت ایجاد بعضی خواص ویژه مورد نظر در بتن (چه هنگام ریختن بتن و چه پس از آن).

چنانچه ترکیب و اختلاط مناسبی انجام شود، بتن به صورت یک ماده محکم در خواهد آمد. به علاوه اغلب بتن روی شبکه‌های سیمی یا فولادی ریخته می‌شود. این میله‌ها را اصطلاحاً میله‌های فولادی تقویت کننده گویند و به بتن مقاومت کششی داده و آن را برای مقاصد مورد نظر آماده می‌سازد. اگر شما به پایه یک پل بتنی قدیمی نگاه کنید، شاید بتوانید میله‌های فولادی را که در معرض آب قرار گرفته‌اند ببینید. با وجود مقاومت بالای بتن، تحت بعضی شرایط در آن خوردگی و تخریب اتفاق می‌افتد.

۲- تخریب و خوردگی بتن

خوردگی و تخریب بتن شامل دو موضوع است: الف - خوردگی میله‌های فولادی ب - تخریب بتن

از لحاظ تئوری از آنجایی که پتانسیل میله‌های فولادی مثبت است، تا زمانی که بتن روی این میله‌ها قرار دارد، این میله‌ها خورده نمی‌شوند. پتانسیل میله‌های فولادی داخل بتن حدود ۰/۱+ ولت است و pH تقریبی بتن نیز ۱۱/۶ می‌باشد. مکانیزم‌های تخریب و خوردگی بتن عبارتنداز: شیمیایی، فیزیکی و حرارتی. مکانیزم مهم دیگری که وجود دارد مکانیزم میکروبیولوژیکی است که طی آن جاندار از طریق یک یا چند

* کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست دانشگاه تهران

** کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست دانشگاه تهران

مکانیزم فوق‌الذکر به بتن حمله می‌کند. هرکدام از این مکانیزم‌ها (یا ترکیبی از آنها) می‌تواند به خمیر سیمان، ذرات شن و ماسه و یا میله‌های تقویت‌کننده آسیب برساند.

الف : مکانیزم شیمیایی – این مکانیزم با یک واکنش شیمیایی آغاز می‌گردد یعنی یک ماده شیمیایی در تماس با سازه بتنی قرارگرفته و این واکنش شیمیایی با خمیر سیمان رخ می‌دهد که این واکنش باعث تضعیف و انحلال و یا تغییر ترکیب خمیر سیمان در بتن می‌شود تا جایی که دیگر خمیر قادر به نگهداری اجزای بتن در کنار یکدیگر نیست. مواد شیمیایی مهاجم عبارتنداز: اسیدها، قلیاها، گازها، روغن‌ها و چربی‌ها و نیز قندها. حمله و تجاوز به خمیر سیمان باعث می‌شود که میله‌های تقویت کننده بدون محافظ شده و خوردگی رخ دهد. در ادامه مثال‌هایی از این تهاجم شیمیایی ذکر می‌گردند.

الف – ۱ : **حمله اسیدی** – اسیدها به صورت طبیعی و مصنوعی می‌باشند. اسیدهای طبیعی از تخریب و فسادگیاهان تولید می‌شوند و اسیدهای مصنوعی نیز عبارتنداز اسید سولفوریک، اسید کلریدریک و اسید نیتریک. اسید سولفوریک در بعضی شرایط طبیعی مثل فاضلابروهای شهری و صنعتی نیز تشکیل می‌شود. تنها روش مؤثر برای حفاظت بتن در مقابل این اسیدها، پوشش دهی بتن با روکش پلاستیکی یا لاستیکی یا رنگ است. واکنش اسید با بتن طی یک فرایند دو مرحله‌ای انجام می‌شود که در مرحله اول یک واکنش شیمیایی اسید و باز رخ می‌دهد. واکنش کننده‌های اولیه، محلول اسیدی موجود در محیط و ترکیبات هیدراته موجود در خمیر سیمان از جمله هیدروکسیدکلسیم می‌باشند. در این واکنش انحلال خمیر سیمان باعث تضعیف قدرت بتن می‌شود. مرحله دوم فرایند شامل حذف هیدروکسیدکلسیم و دیگر ترکیبات محلول از بتن می‌باشد (یعنی محصول واکنش مواد جامد و مایع است و مایع، ترکیبات جامد را می‌شوید). هدر رفتن پیوسته خمیر سیمان، ظاهر شدن ذرات شن و ماسه وگاهی میله‌های تقویت کننده در حال خوردگی، نشان دهنده حمله اسیدی است.

الف – ۲ : **حمله سولفاتی** – سولفاتها نیز مانند اسیدها دارای منبع طبیعی و صنعتی می‌باشند. سولفات فلزاتی مثل سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم را می‌توان به صورت طبیعی در خاک‌ها و یا آب‌های زیرزمینی یافت.

در صنایعی از قبیل صنایع پتروشیمی، پالایش نفت، تولید کاغذ و چوب، استخراج و تصفیه فلزات نیز می‌توان ترکیبات سولفاتی را یافت. سولفات‌ها در پساب‌های شهری و صنعتی نیز وجود دارند. سولفات‌ها با بعضی از اجزای خمیر سیمان از جمله آلومینات‌ها واکنش کرده و به داخل بتن نفوذ می‌کنند. در این واکنش علاوه بر انحلال خمیر، محصولاتی نیز تولید می‌گردد. حجم این مواد از سولفات‌ها و خمیر اولیه ۲/۵ برابر بیشتر بوده و باعث ایجاد نیروهای شدیدی در بتن می‌شوند. زمانی که این نیروها از مقاومت کششی بتن فراتر رود، بتن ترک برداشته و تخریب می‌گردد.

سولفات‌ها عموماً عامل اولیه تخریب بتن در سازه واحدهای تصفیه آب به شمار می‌رود. جهت اجتناب از این موضوع استفاده از سیمان غلیظ و مقاوم تیپ ۵ شدیداً توصیه شده است (زمانی که میزان سولفات بیش از ۱۰۰mg/L باشد).

در جدول ۱ اجزای اصلی انواع سیمان‌ها ذکر شده است.

الف – ۳ : **حمله کلریدی** – زمانی که بتن در معرض منبعی از کلریدها (حاصل از نمک‌های مختلف) قرار می‌گیرد مهمترین تخریب همانا خوردگی میله‌های تقویت‌کننده خواهد بود. در ابتدا زمانی که بتن داخل شبکه‌های فولادی ریخته می‌شود، خوردگی بسیارکمی در میله‌ها به وجود می‌آید و لایه نسبتاً چسبنده‌ای روی میله‌ها تشکیل می‌شود که از خوردگی بیشتر جلوگیری خواهد نمود و تا زمانی که این لایه وجود دارد، خوردگی پیشرفتی نخواهد داشت. در واقع این لایه از طریق حفاظت غیر فعال، فلز را حفاظت می‌کند. این حفاظت توسط محیط بازی ناشی از قلیاهای موجود در خمیر سیمان حفظ خواهد شد. پس از نفوذ رطوبت، اکسیژن و یون‌هایی مانند کلریدها (از طریق خلل و فرج) و رسیدن به میله فلزی و خوردگی آن، این لایه محافظ تخریب می‌شود. خوردگی این میله‌ها محصولاتی را ایجاد می‌نمایدکه حجم آنها از فلز خورده نشده بیشتر است و باعث ایجاد نیروهای داخلی خواهد گردید. زمانی که این نیروها از مقاومت کششی بتن فراتر روند، باعث ایجاد شکاف شده و به کلریدها، رطوبت و اکسیژن امکان‌نفوذ می‌دهندکه خوردگی را به پیش خواهند برد. از نشانه‌های اصلی خوردگی کلرید میله‌ها می‌توان به زنگ زدگی، ترک و شکست (تورق بتن روی میله‌ها) اشاره کرد. خوردگی میله‌های فولادی از مهمترین مشکلات موجود در پل‌های بتنی و دیگر سازه‌های بتنی در تماس با نمک‌ها است.

جدول ۱ – اجزای اصلی انواع سیمان‌های پرتلند

ترکیب (درصد)	تیپ ۱ مصارف عمومی	تیپ ۲ اصلاح شده	تیپ ۳	تیپ ۴ حرارت پایین	تیپ ۵ مقاوم در برابر سولفات
$3CaOSiO_2$	۵۳	۴۷	۵۸	۲۶	۳۸
$2CaOSiO_2$	۲۴	۳۲	۱۶	۵۴	۴۳
$3CaAl_2O_3$	۸	۳	۸	۲	۴
$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	۸	۱۲	۸	۱۲	۸
کل	۹۳	۹۴	۹۰	۹۴	۹۳

الف – ۴ : **حمله دی‌اکسید کربن** – CO_2 تأثیر کمی بر بتن‌دارد چون با آهک باقیمانده در سیمان به راحتی تبدیل به کربنات‌کلسیم می‌شود. با این وجود اگر سطح بتنی به طور مداوم در معرض آب حاوی CO_2 به میزان حداقل 15mg/L قرارگیرد، سطح آن تخریب می‌گردد. باید توجه داشت که در داخل یا اطراف شهرهای بزرگ، تخریب ناشی ازگازهای خروجی از اتومبیل‌ها و صنعت مشکل حادی می‌باشد.

الف – ۵ : **حمله آمونیاک** – نحوه تأثیر آمونیاک بدین صورت است که یون آمونیاک جانشین یون‌کلسیم موجود در بتن می‌گردد و فقدان یون‌کلسیم نیز باعث تخریب سریع بتن خواهد شد. در سالیان اخیر در تعداد زیادی از تصفیه‌خانه‌های آب، آمونیاک (به همراه کلر) به آب اضافه می‌شود. در این وضعیت اگر آب فاقد سختی بوده و قلیاییت آن نیز بسیارکم باشد، آمونیاک و نیز اسیدکلریدریک حاصل ازکلر قادرندکه به بتن آسیب برسانند ولی از آن جهت که مقدار تزریق آمونیاک بسیارکم می‌باشد، احتمالاً به جز محل تزریق آمونیاک، محل‌های دیگر آسیب زیادی نخواهند دید.

الف – ۶ : **حمله قلیایی** – قلیاهای قوی از قبیل سود سوزآور، هیدروکسید پتاسیم و کربنات سدیم نیز می‌توانند با اکسیدهای آلومینیوم موجود در سیمان واکنش نمایند. توصیه مهندسین برای جلوگیری از این موضوع نیز استفاده از سیمان‌های دارای آلومینیوم پایین (تیپ ۲ یا ۴) و یا پوشش‌دهی بتن یا یک رنگ مناسب می‌باشد. در صورتی که pH مایع بیش از ۱۲ باشد و از سیمان عمومی تیپ ۱ استفاده شود، حتماً بایستی یک لایه PVC روی بتن تعبیه شود.

ب : مکانیزم فیزیکی – این نوع مکانیزم با حمله فیزیکی یک جسم یا دستگاه خارجی آغاز می‌گردد. برای عنوان مثال‌هایی از این نوع می‌توان به تخریب سایشی بتن توسط یک دستگاه فیزیکی و فرسایش ناشی از اجسام شناور در آب جاری روی سازه بتنی و یا تخریب ناشی از یخ زدن آب نفوذ کرده در بتن اشاره داشت.

ب – ۱ : **تخریب سایشی** – حرکت ماشین‌آلات سنگین روی‌کف ساختمان‌های صنعتی و یا خیابان‌های بتنی عمده‌ترین علت این نوع تخریب می‌باشد. در این وضعیت نیز ابتدا خمیر سیمان از بین رفته و سپس ذرات شن و ماسه در معرض تخریب قرار می‌گیرند. با ادامه سایش و از بین رفتن خمیر اطراف شن و ماسه ذرات بیشتری از جای خود بیرون می‌آیند.

ب – ۲ : **تخریب فرسایشی** – نوع اول این تخریب بیشتر به دلیل مواد معلقی است که در محلول‌های عبوری از روی بتن (با سرعت بیش از ۴/۵متر در ثانیه) وجود دارد و باعث فرسایش می‌گردند. زمانی که این مواد معلق در تماس با سطح بتن قرار می‌گیرند، ابتدا خمیر سیمان را ساییده و سپس به ذرات شن و ماسه می‌پردازند. عموماً این نوع فرسایش نیمرخ هموار از سطح ساییده شده بر جای می‌گذارد. زمانی که آب با سرعت بالایی بر روی بتن جریان یابد، می‌توان دید که حتی اگر میزان مواد معلق آب‌کم باشد نیز طی چند سال چندین سانتی‌متر از بتن خورده خواهد شد.

نوع دوم از این نوع فرسایش، فرسایش شیمیایی است که پس از حمله اسیدی واقع می‌شود. بدین صورت که اگر پس از یک واکنش اسیدی، مایعی بر روی بتن جریان یابد، باعث خواهد شد تا محصولات جانبی واکنش را با خود حمل کرده و

باعث ساییده شدن بتن گردد. نوع سومی نیز وجود دارد که به آن کاویتاسیون گویند و زمانی رخ می‌دهد که مایعات دارای حباب هوا و سرعت بالا با بتن تماس یافته و باعث ساییدگی آن شوند.

ب - ۳: **یخ‌زدن - ذوب شدن** - سیکل‌های یخ زدن - ذوب شدن نیز می‌تواند موجب تخریب بتن گردد. اساساً تخریب اصلی هنگام مرحله یخ زدن رخ می‌دهد چون آب درون سوراخ‌های موجود در خمیر یخ زده و منبسط می‌گردند که این انبساط باعث ایجاد تنش در خمیر سیمان می‌شود. زمانی که فشار ناشی از یخ از مقاومت خمیر فراتر رود، خمیر شکسته شده و بتن تضعیف می‌گردد. اگر بتن بیش از حد نفوذپذیر باشد، روند تخریب بتن تشدید می‌گردد. نفوذپذیری بتن ناشی از انتخاب نامناسب اندازه ذرات شن، اختلاط نامناسب سیمان، سنگ و شن و نیز ضعف در روش‌های قالب‌گیری بتن می‌باشد. بتن ضعیف بتنی است که دارای ترک و حفره بوده و یا بتن روی میله‌ها دارای ضخامت کافی نبوده و یا این که اتصالات انبساطی، نامناسب بوده و باعث نفوذ آب می‌گردند.

البته یخ زدن نیز موجب شکست ذرات شن و ماسه نیز خواهد شد به خصوص در مورد ذراتی که در نزدیکی سطح تماس قرار دارند، یخ زدن باعث ترک خوردن می‌شود یعنی یک سری شیارهای کوچک و مرتبط با هم تشکیل می‌شود و هنگام آب شدن یخ‌ها، آب درون شیارها می‌رود و با یخ‌زدن مجدد، سیکل کامل شده و یخ‌های جدید باعث شکاف بیشتر در شیارها خواهند شد. تخریب ناشی از یخ‌زدن و ذوب را می‌توان بیشتر در پارکینگ منازل و یا پایه‌های پل مشاهده نمود.

ج: **مکانیزم حرارتی** - با افزایش و یا کاهش دما، بتن منبسط و منقبض می‌گردد. برای مثال زمانی که طی یک عملیات، بتن در معرض دمای بالا قرار داشته و سپس منبع حرارت حذف گردد، دمای سطح بتن نیز طی چند ساعت کاهش خواهد یافت. این نوع انبساط و انقباض باعث ایجاد یک سری ترک می‌گردد. حال اگر طی ساعت اولیه سردشدن، آب سرد نیز روی بتن جریان یابد، پدیده ایجاد ترک تشدید خواهد شد.

پدیده دیگری که در این مکانیزم وجود دارد بدین صورت مطرح می‌گردد که هدایت حرارتی میله‌های تقویت‌کننده و بتن اطراف آن اختلاف دارند یعنی زمانی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند دارای سرعت انتقال حرارت متفاوتی می‌باشند. واضح است که فولاد سریع‌تر از بتن، حرارت را انتقال می‌دهد و اگر هر دو در معرض افزایش سریع حرارت قرار گیرند، انبساط حرارتی متفاوتی که دارند باعث پدیده شکست خواهد شد. البته در این شکست مکانیزم‌های پیچیده‌تری نیز سهیم هستند.

د: **مکانیزم میکروبیولوژیکی** - برای مثالی از این فعالیت می‌توان به خوردگی تاج لوله‌های بتنی فاضلاب اشاره نمود. در این حالت باکتری بی‌هوازی تولید اسید سولفوریک نموده و این اسید نیز باعث تخریب خواهد شد. البته این موضوع به ندرت در تأسیسات تصفیه آب رخ می‌دهد. میکروارگانیزم‌هایی از قبیل باکتری و یا ارگانیزم‌های کوچک دریایی (نرم‌تنان) قادر به تخریب بتن می‌باشند.

اغلب باکتری‌ها مستقیماً به بتن حمله نمی‌کنند بلکه تخریب ناشی از واکنش باکتری با مواد شیمیایی موجود در محیط در معرض بتن می‌باشد. معمول‌ترین خوردگی باکتریایی بتن در سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری رخ می‌دهد. از واکنش باکتری و ترکیبات فاضلاب، اسید سولفوریک تولید می‌شود و این اسید نیز همان طوری که بیان شد خمیر سیمان را در خود حل کرده و باعث سستی ذرات خواهد شد. در مناطق ساحلی استوایی و گرم نیز نوعی نرم‌تن دریایی سوراخ کننده سنگ وجود دارد که از طریق سطح نفوذکرده و در میله‌ها خوردگی ایجاد می‌کنند. محصولات واکنش نیز مانند گذشته باعث ایجاد فضای اضافی و خردشدن بتن خواهد گردید.

۳- نتیجه گیری

در تأسیسات مرتبط با آب و فاضلاب، بتن در معرض انواع مکانیزم‌های شیمیایی، فیزیکی، حرارتی و بیولوژیکی قرار دارد که باعث تخریب سریع و شکست‌های ساختمانی خواهد شد. این تخریب باعث هدر رفتن پول و عدم کارایی تأسیسات می‌گردد. برای جلوگیری از تخریب و شکست سازه‌های بتنی قدم اول تشخیص مکانیزم یا مکانیزم‌های دخیل در تخریب یا شکست بتن است.

★ J. of Protecive Coatings & Linings, (1997).