

پرسش و پاسخ - دوره آموزشی

"مشکلات اجرایی بتن در محیطهای خورنده خلیج فارس و دریای عمان"

بندرعباس ۳ و ۴ اسفند ماه ۱۳۹۸ (بخش دوم)

سوال ۱۲- آیا بالا بودن C_3A در سیمان می تواند به کاهش کلرید آزاد بتن منجر شود؟

آیا این امر می تواند شروع خوردگی را به تاخیر اندازد؟

همانگونه که در پاسخ قبلی بیان شد هر قدر مقدار C_3A سیمان و بتن بیشتر شود، کلرید مقید شیمیایی افزایش می یابد و از کلرید آزاد کاسته می شود. بهرحال مشخص است که در هر بتن یا خمیر سیمان، نسبت کلرید مقید به کلرید کل یا نسبت به کلرید آزاد در طول زمان تغییر می کند. هم چنین این نسبت ها برای بتن ها یا خمیرهای سیمان مختلف و هم چنین سیمانهای مختلف، ثابت نیست. مسلم است که در سیمانهای ضد سولفات که C_3A به شدت کمتر می باشد، قید شیمیایی به شدت کم می شود. به همین دلیل آنرا برای بتن مسلح در مناطق خورنده کلریدی، مناسب نمی دانند. قید شیمیایی کلرید ممکن است از ۱۰ درصد تا حتی بیش از ۳۰ درصد یون کلرید کل باشد. واضح است با دیرتر رسیدن به غلظت بحرانی کلرید، لایه محافظ دیرتر شکسته خواهد شد. در ادامه در مورد تعیین یون کلرید کل، یون کلرید مقید و آزاد در یک بتن توضیحاتی ارائه خواهد شد.

سوال ۱۳- آیا زیاد بودن C_3A در سیمان و بتن موجب افزایش تشکیل اترینگایت در اثر

وجود و حمله یون سولفات در محیط کلریدی یا آب دریا نمی شود؟ آیا این امر به

تخریب بتن منجر نمی گردد؟

بدیهی است که با وجود C_3A زیاد در سیمان و بتن، در صورت حمله سولفاتی (بویژه از نوع سولفاتهای کلسیم، سدیم و پتاسیم) اترینگایت بیشتری می گردد. مشکل اصلی اترینگایت، افزایش حجم آن می باشد هر چند مشکل دوم آن کاهش چسبندگی و مقاومت نیز هست. در آب غیر شور، این انبساط موجب ترک خوردگی و تخریب تدریجی بتن یا خمیر سیمان خواهد شد. در دهه ۸۰ میلادی روشن شد که در آبهای شور، عملاً این انبساط به شدت کاهش می یابد با اینکه اترینگایت تشکیل می گردد. این یافته بسیار مهم باعث شد که بتوان در آبهای شور و بویژه برای بتن مسلح از سیمانهایی با C_3A بیشتر استفاده نمود. زیرا گفته شد که C_3A بیشتر موجب تاخیر در شروع خوردگی میلگردها در محیط خورنده کلریدی می شود. برای بتن غیر مسلح نیز این امکان فراهم شد که در آبهای شور دریاها از آزاد از سیمانهایی غیر از سیمان پرتلند ضدسولفات نیز استفاده گردد. اما مسئله مهم در مورد بتن های مسلح این بود که مصرف سیمانهای پرتلند

ضدسولفات به تدریج در مناطق خورنده کلریدی حاوی سولفات ممنوع گردید. زیرا از C_3A کمی برخوردار بود و خوردگی زودتر آغاز می شد.

سوال ۱۴- مقدار بهینه C_3A در سیمان برای مناطق خورنده کلریدی چقدر است تا این مشکلات حل گردد؟

در واقع نمی توان یک عدد را به عنوان مقدار بهینه C_3A سیمان برای مناطق خورنده کلریدی و بتن مسلح مشخص کرد. از دید تاخیر در شروع خوردگی خوبست که C_3A بیشتر باشد و برخی از اعداد بالای ۱۰ درصد مانند ۱۲ درصد نام برده اند. از دید حمله سولفاتی، هر چند گفته شد که در این مناطق کلریدی چندان تخریبی ندارد، بهر حال کمتر بودن C_3A ترجیح دارد اما در اولویت دوم قرار دارد و برای بتن مسلح، مسئله خوردگی میلگردها از اهمیت و اولویت بیشتری برخوردار است و بنابراین کم بودن C_3A خوب نیست. موسسه CIRIA، مقدار C_3A سیمانهای پرتلند را در مناطق خورنده کلریدی بین ۶ تا ۱۰ درصد توصیه کرده است و در ایران نیز از این توصیه تبعیت شده است. به همین دلیل هر سیمانی که C_3A آن در این محدوده باشد مناسب است و بنابراین سیمان پرتلند نوع ۱ یا ۲ یا ۳ می تواند مناسب باشد مشروط بر اینکه دارای این مشخصه باشد. اما هر سیمان پرتلند ۱ یا ۲ یا ۳ مناسب نیست. یک غلط رایج آنست که سیمان پرتلند نوع ۲ را برای بتن مسلح در مناطق خورنده کلریدی مناسب می دانند در حالی که ممکن است C_3A آن کمتر از ۶ درصد باشد و به هیچوجه مناسب نباشد.

سوال ۱۵- چرا گفته شد که خوردگی میلگرد بتن در زیر آب دریا یا در زیر خاک یا آب شور زیرزمینی به کندی پیش می رود؟ مگر در این حالت خوردگی میلگردها به دلیل وجود یون کلرید زیاد و درون رفت سریع تر آن و رسیدن به غلظت کلرید بحرانی زودتر شروع نمی شود؟

مسلم است که وقتی بتن در زیر آب دریا یا زیر خاک یا آب زیرزمینی شور باشد با توجه به غلظت زیاد کلرید در محیط مزبور و وجود رطوبت، امکان درون رفت و رخنه زیادی از یون کلرید وجود دارد و سازوکارهای مختلف مانند انتشار یا جذب و مکش می تواند مقدار یون کلرید در بتن را به شدت افزایش دهد و غلظت بحرانی در سطح میلگرد در زمان کوتاه تری حاصل گردد و لایه محافظ از بین برود. در این حالت، خوردگی ممکن است در زمان کوتاه تری شروع گردد. اما نکته مهم آنست که در بحث پیشرفت خوردگی نیاز به رطوبت و اکسیژن وجود دارد که علیرغم وجود رطوبت کافی برای این امر، مقدار اکسیژن در چنین شرایط قرارگیری، خیلی کم یا ناچیزاست. بنابراین آهنگ یا نرخ یا شدت و یا سرعت خوردگی (*Rate of Corrosion*) بسیار کم خواهد شد و نگرانی در مورد پیشرفت جدی خوردگی میلگردهای بتن مسلح، کم خواهد بود. بدین دلیل نباید چنین اندیشید که هر جا یون کلرید فراوان وجود دارد، خوردگی نیز زیاد است، بلکه شروع خوردگی در زمان کوتاه تری وجود دارد. هر چه در عمق آب دریا برویم اکسیژن کمتر می شود. امواج دریا اکسیژن را در آب حل می کنند و در مواردی که حوضچه آرام برای ساخت اسکله ها

داریم مسلماً اکسیژن کمتری در سطح و در عمق آب وجود دارد و منطقه امن تری از نظر خوردگی ایجاد می شود.

سوال ۱۶- آیا یون های کلرید مقید فیزیکی و شیمیایی در همه حالات مقید هستند و امکان آزاد شدن ندارند؟

گفته شد که برخی یون های کلرید که در بتن رخنه کرده اند می توانند بصورت فیزیکی یا شیمیایی مقید شوند. قید فیزیکی معمولاً با افزایش دما می تواند کاهش یابد. در مورد قید شیمیایی نیز بحث هایی وجود دارد که ممکن است نمک فریدل از بین رود. برخی معتقدند قید شیمیایی نیز می تواند تحت شرایط خاصی تضعیف شود. بهرحال در ارتباط با قید فیزیکی ممکن است وجود برخی یون ها بتواند بر آن تاثیر گذارد. در مورد قید شیمیایی، برخی، کربناته شدن بتن و کاهش pH را دلیلی بر تضعیف آن می دانند. برخی گفته اند که حملات سولفاتی می تواند به تخریب نمک فریدل منجر شود و کلرید مفید آزاد گردد. به این دلایل گاه دانشمندان، همه کلریدهای مقید را آزاد در نظر می گیرند که یک روش بدبینانه و محافظه کارانه در پیش بینی زمان شروع خوردگی است. در مطالعه بر روی برخی سازه های بتنی در محیط خلیج فارس که احتمالاً از سیمان های پرتلند ضد سولفات بهره برده اند، مقدار یون کلرید آزاد و کل خیلی نزدیک بهم بدست آمده اند. استفاده از سرباره و خاکستر بادی، کلرید مقید را افزایش می دهند. گفته می شود که مصرف میکروسیلیس، میزان کلرید مقید را کم می کند.

سوال ۱۷- آیا دمای بتن بر ضریب انتشار و هم چنین بر آهنگ خوردگی تاثیر دارد؟

دمای بیشتر بتن، تحرک یون کلرید را بیشتر می کند، بنابراین ضریب انتشار یون کلرید در بتن (مقدار یون کلرید درون رفت در هر زمان) را افزایش می دهد. برای ایجاد ارتباط بین این متغیر (دما) و تابع (ضریب انتشار) تلاش هایی انجام شده و روابطی ارائه شده است. محیط خلیج فارس و دریای عمان از دمای متوسط زیادی برخوردارند بنابراین انتظار می رود در ضریب انتشار یون کلرید افزایش چشمگیری داشته باشند. در مورد آهنگ خوردگی نیز دمای بتن به شدت موثر است. واکنش های شیمیایی معمولاً با افزایش دما، سرعت می گیرند. در مورد آهنگ خوردگی نیز دمای بتن به شدت موثر است. در این مورد نیز تلاش شده است تا روابطی پیشنهاد گردد تا میزان تاثیر دما بر آهنگ (شدت) خوردگی مشخص شود.

سوال ۱۸- آیا ضریب انتشار یون کلرید در طول زمان ثابت است؟ علل تغییر آن چه پارامترهایی می تواند باشد؟

با گذشت زمان معمولاً سیمان بیشتری هیدراته می شود و ژل حاوی $C-S-H$ بیشتری تولید می گردد و حفرات موئینه خمیر سیمان کمتر و تنگ تر می شود. بنابراین واضح است که ضریب انتشار یون کلرید آن کمتر می گردد.

سوال ۱۹ - در صورتی که بتن کاملاً خشک شود، آیا خوردگی انجام می شود؟

در صورتی که بتن بطور کامل خشک شود خوردگی تقریباً متوقف می‌گردد. علت آنکه توقف کامل نداریم آنست که رطوبت هوا وجود دارد و می‌تواند به درون بتن نفوذ کند و گرنه در صورت عدم وجود رطوبت، خوردگی حاصل نخواهد شد، زیرا یک پایه خوردگی، رطوبت است که در کنار اکسیژن و فولاد، زنگ هیدروکسید آهن (با ظرفیت‌های مختلف) را بوجود می‌آورد. به همین دلیل در زمانی که بدلیل تابش آفتاب، بتن خشک تر می‌شود، زنگ زدگی علیرغم بالارفتن دمای بتن کاهش می‌یابد. اگر هوا شرجی باشد و دما نیز بالا رود یا به علت مد یا پاشش، رطوبت لازم در اختیار قرار گیرد شدت زنگ زدگی (خوردگی) افزایش چشمگیری خواهد داشت.

سوال ۲۰ - پس از شروع خوردگی، نقش کیفیت بتن بر آهنگ خوردگی میلگرد چیست؟

آیا در شروع خوردگی نیز همین نقش وجود دارد؟

به نوعی می‌توان گفت که به این پرسش نیز قبلاً پاسخ درخوری داده شده است. کیفیت بتن در دو مرحله متفاوت، اثر زیادی دارد. مرحله اول که مرحله شروع و آغاز خوردگی یا از بین رفتن لایه محافظ (انفعالی) است. در این مرحله نقش ضریب انتشار بتن یا جذب و غیره مهم است که با خود، رطوبت و یون کلرید را به درون هدایت می‌کند و به زبان عامیانه، کیفیت بتن از نظر نفوذپذیری در برابر رطوبت و بویژه یون کلرید حائز اهمیت است. بهر حال در این مرحله اول نگرانی برای ورود و رسیدن یون کلرید به فولادها و بالارفتن غلظت آن تا حد غلظت بحرانی کلرید (آستانه یون کلرید) برای از بین رفتن لایه انفعالی و امکان شروع خوردگی است. پس از مرحله اول یعنی شروع خوردگی یا بهتر بگوئیم از بین رفتن لایه محافظ، مرحله پیشرفت خوردگی را شاهد هستیم که نیاز به اکسیژن و رطوبت دارد اما عواملی آن را کند یا تسریع می‌کنند، گفته شد که یکی از این عوامل، کیفیت بتن آنهم از نقطه نظر مقاومت الکتریکی است، هر چه مقاومت الکتریکی بتن زیادتر باشد طبق رابطه $I = \frac{V}{R}$ ، شدت جریان خوردگی در میلگردها کمتر است زیرا R بعنوان مخرج کسر قرار می‌گیرد.

ممکن است که گفته شود آیا این دو کیفیت یعنی نفوذپذیری و مقاومت (هدایت بعنوان معکوس مقاومت) الکتریکی از یک جنس نیستند. بویژه آبا نفوذپذیری مانند هدایت، و نفوذناپذیری مانند مقاومت الکتریکی نیستند؟ جواب این سوال هم آری است و هم خیر!! با توجه به فیزیک یک جسم از نظر تخلخل و بویژه حفرات به هم پیوسته، به نوعی می‌توان گفت که نفوذپذیری در برابر آب و مواد زیان آور از جنس هدایت الکتریکی است بویژه اگر این حفرات از آب اشباع باشند و یا از آب به همراه املاح یا یونهای کلرید اشباع گردند. بهر حال در این حالت همسویی خوبی با یکدیگر دارند. اما نباید انگاشت که همبستگی خوبی همواره در این موارد وجود دارد. برای مثال اگر در یک بتن از میکروسیلیس به میزان بیش از ۵ درصد وزن مواد چسباننده استفاده شود ممکن است نفوذپذیری آن در آزمایش‌های مرتبط تا حدودی بهبود یابد اما در آزمایش‌های مرتبط با هدایت یا مقاومت الکتریکی، تغییر چشمگیری را از خود به نمایش می‌گذارد. مثالی می‌تواند این موضوع

را نشان دهد. فرض کنید در آزمایش جذب آب نیم ساعته ممکن است بتنی با نسبت آب به سیمان ثابت، چنانچه از ۷/۵ درصد میکروسیلیس جایگزین مواد سیمانی بهره بریم، ممکن است جذب آب آن ۲۰ درصد کم شود یعنی مثلاً از ۲ درصد به ۱/۶ درصد برسد. در حالی که اگر آزمایش مقاومت الکتریکی را روی این دو بتن (در حالت اشباع از آب) انجام دهیم ناگهان با افزایش ۵ برابری برای بتن حاوی میکروسیلیس روبرو می شویم، مثلاً مقاومت الکتریکی ۸۰ اهم متر به ۴۰۰ اهم متر ممکن است برسد و تعجب برانگیز باشد. یا چنانچه بجای اشباع کردن با آب شرب، بتن را با آب حاوی نمک طعام مورد آزمایش مقاومت الکتریکی قرار دهیم، مقاومت الکتریکی آن بطور قابل توجهی کاهش می یابد (در هر دو بتن با یا بدون میکروسیلیس) در حالی که نفوذپذیری آن ها ظاهراً ثابت بوده است. بنابراین باید گفت نفوذپذیری به معنای عامیانه آن در مرحله دوم پیشرفت خوردگی عمدتاً از نظر تامین رطوبت و اکسیژن مهم است در حالیکه مقاومت الکتریکی یا هدایت الکتریکی، شدت خوردگی را (در دمای ثابت و با فرض وجود اکسیژن و رطوبت لازم) کنترل می کند.

به این دلایل است که دانشمندان علم خوردگی گاه هر دو دسته از آزمایش ها را برای تعیین کیفیت بتن در امر خوردگی لازم می دانند و یک دسته جای دسته دیگر را معمولاً نمی تواند بگیرد.

سوال ۲۱— نقش مواد پوششی روی بتن یا مواد نفوذگر یا کریستال ساز در شروع خوردگی و آهنگ خوردگی چیست؟

بهرحال هر ماده ای که سطح بتن را بپوشاند یا در سطح بتن نفوذ کند یا در منافذ بتن کریستال هایی تولید نماید که در نهایت بتواند نفوذپذیری بتن (در سطح) را در برابر یون کلرید کاهش دهد، بطور طبیعی شروع خوردگی را به تاخیر می اندازد زیرا غلظت بحرانی کلرید در زمان طولانی تری حاصل می گردد.

کاهش نفوذ رطوبت و کاهش ورود اکسیژن، می تواند آهنگ خوردگی را نیز کاهش دهد، بویژه اگر رطوبت بتن بتواند براحتی از پوشش خارج شود. مواد پوششی روی بتن معمولاً به چند دسته اصلی تقسیم می گردد. این مواد را سامانه محافظ سطحی بتن نیز می نامند.

الف: مواد پوشاننده نازک پلیمری *Coating M.*

ب: مواد مسدودکننده و پرکننده سطحی حفرات *Blocking M.*

پ: مواد نفوذگر آبگریز (پوشش جداره داخلی حفرات) *Hydrophobic Impregnation penetrating M.*

ت: اندودها (پوشش ضخیم پایه سیمانی) اصلاح شده با پلیمر

گاه تقسیم بندی صرفاً براساس عملکرد مواد بصورت زیر انجام می شود. بهر حال در این پاسخ عمداً به تقسیم بندی و تعاریف اروپایی پرداخته شده است.

(۱) مواد محافظ در برابر نفوذ مواد زیان آور مهاجم *Protection Against Ingress (PI)*

(۲) مواد کنترل کننده رطوبت سطحی بتن *Moisture Control (MC)*

Impregnation (I)

۳- مواد اشباع سازی سطح بتن

Hdrophobic (Impregnation) H

۴- مواد آب گریز و اشباع ساز

Coating (C)

۵- اندودها یا پوشش ها

Increasing Resistivity (IR)

۶- مواد افزایش دهنده مقاومت الکتریکی

گاه تقسیم بندی ها براساس جنس مواد صورت می گیرد و ممکن است توجهی به عملکرد آنها نشود مانند مواد آلی پلیمری شامل مواد اکریلیکی، رزین اپوکسی، رزین پلی استر، پلی یورتان، مواد بوتادین کوپلیمر، مواد رابر (لاستیکی) کلرینه شده، مواد اولئوزرین و مواد وینیلی یا مواد سیلیکاتی، و سیلیکوفلوراید، مواد سیلان و مواد سیلوکسان (مواد سیلیکونی)، مواد استئاراتی، مواد اگزالاتی، مواد قطرانی و مواد قیری اصلاح شده، مواد پایه سیمانی، مواد پایه سیمانی اصلاح شده با لاتکس. طبیعی است که رفتار همه مواد در برابر نفوذ رطوبت و کلراید، یکسان نیست. هم چنین، اثر مواد مختلف ممکن است دارای محدودیت زمانی باشد. برخی از این مواد را نباید قبل از یک ماه روی بتن جدید اعمال نمود در حالی که برخی دیگر را می توان یا باید هر چه زودتر استفاده کرد. برخی از این مواد در برابر هوازدگی یا پرتوهای بنفش (*UV*) بسیار ضعیف عمل می کنند و خاصیت خود را از دست می دهند. برخی برای جلوگیری از ورود رطوبت موثرتر هستند و برخی برای ممانعت از ورود یون کلراید بهتر عمل می کنند. برخی از مواد عملکرد بهتری برای به تاخیر انداختن شروع خوردگی دارند و برخی در آهنگ خوردگی موثرتر عمل می نمایند. رفتار هر یک از این مواد از نظر سازگاری با بتن متفاوت است و به عملکرد آنها مرتبط می شود. بهر حال روشن است که بحث سامانه های حفاظت سطحی بتن از پیچیدگی عجیبی برخوردار است و هنوز باید تحقیقات گسترده ای بر روی آنها انجام شود. در خلیج فارس و دریای عمان، یخبندان و آلودگی پی در پی وجود ندارد، در مواردی که این پدیده نیز وجود داشته باشد پیچیدگی موضوع بیشتر می شود.

برخی تصور می کنند که مثلاً اگر مواد قیری در کوتاه مدت جلوی نفوذ آب را می گیرند برای جلوگیری از نفوذ کلرید نیز موثر هستند در حالی که چنین تصوراتی ممکن است صحیح نباشد و یا کاملاً غلط از آب در آید.

سوال ۲۲- پوشش های حفاظتی روی میلگردها چه تاثیری بر خوردگی آنها دارند؟

از زمانهای قدیم، بشر نگران آن بوده است که با ایجاد پوشش بر روی فولادهای لخت، خوردگی و زنگ زدگی آن را کم کنند یا از بین ببرند. بکارگیری زنگ های مختلف و مواد ضد زنگ در گذر تاریخ وجود داشته است. با استفاده از فولاد بعنوان تسلیح کننده بتن، به این موضوع نگاهی نو باید معطوف می شد. بدیهی است در نظر اول سعی شد از همان پوشش هایی استفاده گردد که برای میلگردها یا فولادهای لخت بکار می رفت. بسیاری از مواد و رنگهای معمولی در بتن و در محیطی یا قلیائیت زیاد عملکرد مناسبی نداشتند. از روشهای موثر، روی اندود کردن (گالوانیزه کردن) فولادها بود. گالوانیزه کردن با روش الکتریکی از راه حلهاست. روش مرسوم تر غرقاب یا غوطه ور کردن میلگردهای اسیدشویی شده در فلز روی مذاب ۴۵۰ درجه سانتی گراد است تا یک لایه

روی (گاه مخلوط روی و فولاد) به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون بر روی آن ایجاد شود و پس از سرد شدن در یک فرآیند خاص بر روی آن تثبیت گردد. این روش برای میلگردها قدمتی در حدود ۶۰ سال دارد. در این حالت صورت قرارگرفتن آن در بتن، لایه آهن و روی زیرین بصورت غیرفعال (انفعالی) می شود و روی می تواند قربانی مناسبی باشد. pH بیش از ۱۲ در بتن، فلز روی نیز غیر فعال شده و سرعت یا آهنگ خوردگی بسیار کم می شود و تا pH برابر ۱۳/۳ بهر حال یک لایه محافظ روی بر سطح فولاد، مانع خوردگی فولاد می شود. گاه توصیه می شود در صورت کاربرد این نوع میلگردها از نمکهای کروماتی در بتن تازه استفاده شود تا از تولید هیدروژن و خوردگی مربوطه پرهیز شود. هر چند لایه روی، می تواند به کاهش پیوستگی منجر شود اما برای میلگردهای آجدار این تفاوت چندان تاثیر گذار نیست. غلظت بحرانی این پوشش ها، معمولاً ۲ تا ۳ برابر غلظت بحرانی برای شروع خوردگی فولاد است. سرعت یا نرخ خوردگی پس از شروع نیز برای این میلگردها کمتر است. از جمله پوشش هایی که بر روی میلگردها بطور وسیع بکار رفته است پوشش از نوع رزین اپوکسی می باشد. این پوشش ها در دهه ۷۰ میلادی استفاده شده و بعدها در ابتدای دهه ۸۰ برای میلگردهای با پوشش اپوکسی استاندارد تحت شماره *ASTMA775* تدوین گردید. ضخامت این پوشش اپوکسی معمولاً کمتر از ۳۰۰ میکرون و بیشتر از ۱۳۰ میکرون است و بخوبی باید به میلگرد بچسبد و انعطاف پذیری لازم را دارا باشد. پیوستگی این میلگردها با بتن اندکی کمتر از میلگرد معمولی بدون پوشش است. بهر حال هر نوع ماده ای مانند اپوکسی بطور کامل در برابر آب، کلراید و اکسیژن نفوذناپذیر نیست و هر چه ضخامت آن کمتر باشد نفوذپذیرتر هست. وجود خراش یا خالی ماندن بخشی از سطوح (حتی کوچک) می تواند موجب خوردگی کلریدی بسیار شدید در آن ناحیه شود. هم چنین مصرف این نوع میلگرد پوشش دار در کنار میلگردهای بدون پوشش می تواند خطر خوردگی ماکروپیلی را بوجود آورد (بویژه در تعمیر بخشی از سطوح بتنی) و در نتیجه خوردگی با شدت زیادی در میلگردهای بدون پوشش رخ خواهد داد. بنابراین طبق دستورالعملهایی که بعداً تدوین شد الزام جدی برای ترمیم محل های خراش خورده یا معیوب در اثر خم کردن و بستن میلگردها ارائه شد و از ایجاد حالت هایی که منجر به ایجاد ماکروپیلی (ماکروسل) می شود به شدت پرهیز داده شد. شدت این خرابی ها بویژه در مناطق خورنده و گرم آنقدر جدی شد که امروزه سعی می شود بجای پوشش هایی که صرفاً با رزین اپوکسی بوجود می آید از رزین اپوکسی های غنی شده با روی استفاده گردد.

رزین اپوکسی های غنی شده با روی (*Zinc Rich Epoxy Resin*) در حالت اولیه (تازه خمیری) دارای پودر بسیار ریز روی به میزان ۷۰ تا ۸۰ درصد وزن مجموعه (رزین، سخت کننده و روی) می باشد و در حالت خشک و سخت شده ۸۵ تا ۹۵ درصد وزن پوشش خشک شده را روی تشکیل می دهد. وجود روی باعث می شود که هدایت الکتریکی در این نوع پوشش داشته باشیم. ایجاد خراش یا نقص جزئی در پوشش نمی تواند مشکل جدی بوجود آورد. هم چنین حالت ماکروپیلی ایجاد نخواهد شد و در تعمیر بخشی از عضو نیز می توان از میلگردهایی با پوشش مزبور

استفاده نمود. بنابراین اقبال عمومی به سمت این پوشش‌ها وجود دارد و هر روز بر دامنه مصرف آن در جهان افزوده می‌شود. این نوع پوشش برای بتن حدود ۳۰ سال قدمت دارد. از جمله پوشش‌های دیگر، دوغاب سیمان حاوی لاتکس است. مواد لاتکس از نوع آکرلیک یا SBR یا PVA در دوغاب غلیظ سیمان مخلوط می‌شود و درصد این مواد لاتکس معمولاً ۱۰ تا ۲۰ درصد وزن سیمان است. در گذشته از پوشش‌های دیگری نیز بر روی میلگردها استفاده می‌شد که علیرغم ذکر آنها در منابع مختلف، امروزه کاربرد چندانی ندارد و بنظر می‌رسد برخی از آنها بعنوان مواد بازدارنده خوردگی کاربرد داشته باشند.

سوال ۲۳— نقش ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها بر شروع خوردگی و آهنگ خوردگی میلگردها چیست؟

ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد از دو دیدگاه می‌تواند در بحث خوردگی میلگردها مورد توجه قرار گیرد. دیدگاه اول در مورد شروع خوردگی یعنی نفوذ یون کلرید و از بین رفتن لایه محافظ فولاد، و دیدگاه دوم از نظر پیشرفت خوردگی یا آهنگ و نرخ خوردگی است. از نظر شروع خوردگی، ضخامت پوشش بتنی بر روی میلگرد، اولین سنگر در برابر نفوذ کلرید به داخل بتن است. اگر پدیده انتشار و قانون فیک در نظر گرفته شود واضح است که این ضخامت به شدت اهمیت دارد. در یک حساب سرانگشتی و غیر دقیق می‌توان گفت که دو برابر شدن ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد، در یک شرایط قرار گیری خاص و یا یک ضریب انتشار معین، زمان از بین رفتن لایه انفعالی و شروع خوردگی را در حدود چهار برابر می‌کند. بنابراین دیده می‌شود که تامین این ضخامت از چه اهمیتی برخوردار است.

در بحث پیشرفت خوردگی نیز ضخامت بتن بر مقاومت الکتریکی تاثیر گذار است و افزایش آن، شدت خوردگی را کاهش می‌دهد. هم‌چنین هر چه به داخل بتن برویم، اکسیژن موجود کم می‌شود.

در مورد زمان شروع به خرابی و ریختن بتن پس از شروع خوردگی میلگردها باید گفت این زمان تابع نسبت ضخامت پوشش بتنی به قطر میلگرد است، هر چند فاصله میلگردها و کیفیت مقاومتی بتن نیز در این رابطه موثر می‌باشد. در یک پژوهش دریافته‌اند که افزایش ضخامت پوشش بتنی از ۳ به ۴ سانتی متر در یک شرایط موجب شد که سرعت خوردگی ۹۰ درصد کاهش یابد. بنابراین از دو منظر فوق، افزایش ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها نقش جدی در به تعویق انداختن شروع خوردگی و پیشرفت آن و شروع خرابی این پوشش بتنی دارد. افزایش ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها به افزایش ضخامت قطعه و هزینه اجرا و در قطعات خمشی و حتی غیر خمشی به بالا رفتن سطح مقطع میلگردها منجر می‌شود که مطلوب نیست. گاه توصیه می‌شود با بالا بردن کیفیت بتن مصرفی و کاهش ضریب انتشار آن و افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن، نسبت به کاهش این ضخامت پوشش و در نتیجه کاهش ابعاد مبادرت کنیم یا از پوشش‌های حفاظتی روی میلگرد یا روی بتن برای کاهش این ضخامت بهره بگیریم. راه حل استفاده از

فولادهای زنگ نزن نیز برای این منظور توصیه شده است. استفاده از موارد بازدارنده خوردگی نیز راه حل دیگری است که گاه بکار می رود. بهر حال افزایش شدید ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها گاه باعث بروز مشکلاتی در ارتباط با ترک خوردگی بتن قطعه می شود. در اجرا باید به رعایت این ضخامت توجه شود که معمولاً در ایران اینگونه نیست.

سوال ۲۴- چرا برخی مواد در سطح میلگرد مانند زنگ زیاد، گل و لای، رنگهای معمولی، چربی و حتی قیر، نامطلوب هستند؟

وجود برخی مواد مزاحم در سطح میلگرد دو مشکل اساسی را بوجود می آورد. مشکل اول، کاهش پیوستگی بتن و میلگرد است که از نظر سازه ای دارای اهمیت زیادی است. مشکل دوم آنست که مانع تشکیل لایه انفعالی (محافظ) در سطح فولاد می شود زیرا فولاد نمی تواند با محلول منفذی بتن که دارای pH مناسب برای تشکیل این لایه غیرفعال است در تماس قرار گیرد. بنابراین خوردگی می تواند با وجود رطوبت و اکسیژن شروع شود. حتی رنگهای معمولی، چربی ها و قیر در محیط بتن به تدریج از بین می روند و راه را برای تماس با رطوبت و اکسیژن باز می کنند.

زنگ زیاد بصورت پوسته شده یا نزدیک به پوسته شدن، وجود گل و لای چسبیده به سطح میلگرد نیز از جمله پوشش های نامطلوب و زیانبار سطح فولادهای مدفون در بتن محسوب می شوند.

سوال ۲۵- آیا ترک خوردگی می تواند در شروع خوردگی و آهنگ آن موثر باشد؟

اگر ترک زودهنگام یا ترک هایی که قبل از شروع خوردگی در بتن ایجاد شده باشند و ضخامت (عرض) آنها از ۰/۱۵ میلی متر بیشتر باشد می تواند یون کلرید و رطوبت و اکسیژن را از خود براحتی عبور دهد حتی اگر این ترک تنها سطح میلگرد ادامه نداشته باشد. در صورتی که ترک عمیق و تا سطح میلگرد وجود داشته باشد نیاز به کلرید نفوذی وجود ندارد و از همان ابتدا، خوردگی با حضور رطوبت و اکسیژن (که وجود دارد) آغاز می شود. در آهنگ خوردگی نیز ترک می تواند موثر باشد و آن را تشدید کند. در ترک های بتن های زیر آب دریا، اغلب موادی مانند هیدروکسید منیزیم و کربنات کلسیم (بروسیت و آراگونیت) در زمان کوتاهی، ترک را پر می کنند و مشکل جدی پیش نمی آید، ضمن اینکه بدلیل کمبود اکسیژن، شدت خوردگی نیز بسیار کمتر است

سوال ۲۶- درزهای سرد چه تاثیری بر خوردگی میلگردها دارد؟

درز سرد یا *Cold Joint* که می تواند بصورت افقی یا قائم یا حتی شیبدار در اثر ایجاد فاصله زمانی بتن ریزی بر روی یا در کنار بتن ریخته شده قبلی و فرو رفتن وسیله تراکمی در بتن قبلی و یا عدم اتصال کافی در هنگام تراکم یا لرزش برای بتن های کناره هم بوجود می آید، قابلیت نفوذ یون کلرید، اکسیژن و رطوبت را افزایش می دهد. علاوه بر آن درز سرد از نظر سازه ای نیز پدیده نامطلوبی محسوب می شود.

بنابراین زمان شروع خوردگی با وجود درز سرد جلو می افتد و زودتر آغاز می شود. هم چنین شدت خوردگی را نیز بیشتر می کند. متأسفانه در اجرای بسیاری از قطعات در جنوب کشور به

دلیل گرما و دمای زیاد هوا و بتن و عدم توانایی تولید و رسانیدن بتن کافی، درز یا درزهای سرد بوجود می آید که به آن اهمیتی نمی دهند و در عمل گرفتاری فراوانی بویژه در مناطق خورنده را شاهد هستیم.

سوال ۲۷- چرا مقدار مجاز یون کلرید بتن در هنگام ساخت به مراتب کمتر از غلظت کلرید بحرانی است؟ مقدار این اختلاف به چه عواملی بستگی دارد؟

مقدار مجاز یون کلرید بتن در هنگام ساخت اولیه یک سازه توسط آئین نامه مشخص می گردد. غلظت بحرانی کلرید یک پدیده یا مقدار طبیعی است که به عوامل مختلفی همچون pH یا نسبت

$\frac{CL^-}{OH^-}$ بستگی دارد که آنهم به وجود مقدار و نوع سیمان و جنس آن، نوع پوزولانها و سرباره های مصرفی و مقدار جایگزینی آنها بستگی شدید دارد.

مسلماً مقدار مجاز یون کلرید بتن همواره به مراتب کمتر از غلظت بحرانی کلرید است. آئین نامه های مختلف بسته به نوع سازه (پیش تنیده یا مسلح) ، شرایط قرارگیری آن، نوع منطقه از نظر وجود یون کلرید، و از همه مهم تر، عمر پیش فرض سازه ها، سعی می کنند این اختلاف را مشخص کنند. مواردی مانند دما نیز به شدت در این موضوع موثر است که آئین نامه ها چندان توجهی به آن نمی کنند. هم چنین موضوع وجود مواد پوزولانی یا سرباره ای و مقدار آن و نوع و جنس سیمان نیز توجهی نشده است. مثلاً در آئین نامه ACI که غلظت بحرانی کلرید خوردگی میلگردهای بتن مسلح در حدود $0/35$ درصد وزن سیمان منظور شده است بدون ذکر عمر فرض شده برای سازه ها و شرایط قرارگیری (مغروق، جزر و مد، پاشش، در هوا یا در خاک) و صرفاً با توجه به شرایط منطقه از نظر خوردگی کلریدی و رطوبت، مقدار کلرید محلول در آب (آزاد) بتن مسلح را از $0/08$ درصد تا $0/15$ درصد وزن سیمان و مقدار کلرید محلول در اسید برای بتن مسلح را از $0/1$ تا $0/2$ درصد وزن سیمان داده است. در این شرایط فرض شده از حداقل ضخامت پوشش بتنی توصیه شده، تبعیت شده باشد. در آبای جدید با فرض عمر ۲۵ ساله شروع خوردگی و بسته به شرایط قرارگیری و خوردگی و رطوبت منطقه، مقدار کلرید محلول در آب برای بتن مسلح $0/08$ درصد تا $0/3$ درصد و مقدار کلرید محلول در اسید از $0/1$ تا $0/4$ درصد وزن سیمان داده شده است که به نظر می رسد منطقی تر باشد. با این حال در مورد نوع و مقدار جایگزینی پوزولانها و نقش آن در کلرید مجاز بتن اولیه بحثی به میان نیامده است، زیرا اطلاعات کافی وجود نداشت. بهر حال در اینجا نیز حداقل ضخامت پوشش بتنی باید رعایت شده باشد. اگر آئین نامه قرار بود، به عمر شروع خوردگی را کمتر یا بیشتر فرض کند، این مقادیر یون کلرید اولیه بتن بیشتر یا کمتر در نظر گرفته می شد. بدیهی است چنانچه طراحی براساس عمر توسط طراح پروژه انجام شود با توجه به ضخامت پوشش بتنی، نوع بتن و کیفیت آن و پارامترهای دیگر ممکن است توجهی به این مقادیر آئین نامه ای لازم نباشد. کاهش مقدار کلرید اولیه بتن ممکن است نتواند اجرایی شود زیرا بهر حال در سنگدانه ، آب و سیمان مصرفی بویژه در مناطق جنوبی ایران، کلرید

وجود دارد و دستیابی به عدد کلرید محلول در آب ۰/۰۸ درصد وزن سیمان در بتن مسلح اولیه نیز چندان ساده بنظر نمی رسد.

سوال ۲۸— با وجودیکه پوزولانها با هیدروکسید کلسیم ترکیب می شوند و قلیائیت (*PH*) بتن و خمیر سیمان را کم می کنند، چرا برای مصرف آنها در محیط خورنده کلریدی و حتی در معرض کربناته شدن، اصرار وجود دارد و توصیه می شود؟ مگر گفته نشد که کاهش (*PH*) به کاهش غلظت بحرانی کلرید و کاهش زمان شروع خوردگی کلریدی و هم چنین کاهش زمان شروع خوردگی ناشی از کربناته شدن منجر می شود؟ این دوگانگی چگونه حل می شود؟

پرسش موجود حاصل توجه به مطالب گفته شده است که ظاهراً ناشی از یک دوگانگی جدی در مطالب ارائه شده است. واقعاً باید گفت این دوگانگی وجود دارد و ظاهری نیست. خاصیت پوزولانها، ترکیب با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان است که موجب تشکیل مواد چسباننده جدید و کاهش *CH* خمیر (بتن) می شود. مسلماً در این حالت *pH* خمیر سیمان کم می گردد. همانطور که گفته شد این کاهش *pH* موجب کاهش غلظت بحرانی (آستانه خوردگی) کلرید و شروع زود هنگام تر در ارتباط با از بین رفتن لایه انفعالی در خوردگی کلریدی می شود. هم چنین کمک می کند تا در شروع خوردگی ناشی از کربناته شدن نیز تسریع بعمل آید.

باید توجه داشت که در این رابطه صرفاً به ذکر تغییر کیفیت پرداخته شده است و از موارد کمی غفلت ورزیده ایم. دانشمندان کاهش غلظت بحرانی را با توجه به مصرف ۱۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان در حدود ۴۰ درصد ذکر کرده اند. این کاهش برای مصرف سرباره با ۳۵ درصد تا ۵۰ درصد جایگزینی در حدود ۱۵ درصد ذکر شده است. لازم است گفته شود سرباره یک پوزولان محسوب نمی شود هر چند خواص پوزولانی از آن دیده می شود. نفوذ ناپذیری بتن در مقابل نفوذ یون کلرید یا *CO2* معمولاً بیش از مقدار ذکر شده خواهد بود. بنابراین همواره توصیه به مصرف پوزولانها و سرباره ها در ارتباط با خوردگی کلریدی و تا حدودی خوردگی کربناته شدن وجود دارد اما نباید در این رابطه یعنی مصرف میکروسیلیس (پوزولانها) و سرباره ها در رابطه با خوردگی کلریدی و کربناته شدن افراط نمود و گاه حداکثر آن نیز محدود می شود هر چند در مورد حداقل مصرف آن نیز محدودیت وجود دارد تا تاثیر مثبت خود را به نمایش گذارد.

در ارتباط با شدت خوردگی، اهمیت مصرف موادی مانند میکروسیلیس جدی تر است با مصرف ۵ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس می توان مقاومت الکتریکی بتن را ۳ تا ۶ برابر نمود. مصرف کمتر از ۴ درصد ممکن است تاثیر چندانی نداشته باشد. با مصرف سرباره (۳۵ تا ۵۰ درصد) ممکن است مقاومت الکتریکی را ۶۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش داد یعنی حداکثر ۲ برابر نمود. بنابراین دیده می شود که اثر مصرف این مواد بر شدت خوردگی بسیار قابل توجه است و قابل اغماض نیست. بنابراین همواره در مناطق خورنده کلریدی و در شرایط قرارگیری حاد مانند پاشش و جزر و مد توصیه اکید به مصرف مواد پوزولانی و سرباره ای وجود دارد.

سوال ۲۹- چرا در بین پوزولانها و سرباره ها، توصیه بیشتری برای مصرف میکروسیلیس وجود دارد؟

این توصیه اغلب در ایران وجود دارد. در سایر کشورها بر مصرف خاکستر بادی و سرباره تاکید می شود زیرا حجم زیادی از تولید این مواد را دارند. در ایران خاکستر بادی وجود ندارد و حجم سرباره تولیدی نیز کم است و کیفیت آن نیز چندان مناسب نیست و پائین ترین رده در استاندارد *ASTM C989* یعنی رده ۸۰ را دارا می باشد. از طرفی در کشور ما سالانه حدود ۳۵ تا ۵۰ هزارتن میکروسیلیس تولید می شود که در مقایسه با تولید جهانی آن (به نسبت جمعیت) مقدار مناسبی است و از کیفیت متوسط به بالا نیز برخوردار است (طبق استاندارد *ASTM C1240*). هم چنین گفته شد که کاهش ضریب انتشار و بویژه افزایش شدید مقاومت الکتریکی بتن، حاصل مصرف میکروسیلیس به میزان ۵ تا ۱۰ درصد (جایگزینی) است. بنابراین علت توصیه به مصرف آن مشخص می باشد. لازم به ذکر است که با مصرف ۶ تا ۸ درصد میکروسیلیس بهینه ترین حالت اتفاق می افتد و معمولاً از آثار نامطلوب احتمالی آن نیز جلوگیری می شود. کاهش شدید آب انداختن بتن، افت اسلامپ و بالا رفتن احتمال ترک خوردگی خمیری اولیه و تا حدودی افزایش جمع شدگی ناشی خشک شدگی بتن سخت شده از جمله این موارد است که با میزان مصرف توصیه شده تعدیل می گردد.

سوال ۳۰- چرا زنگ کم بر روی میلگردها مانع مصرف آنها نمی شود و مرز زنگ کم و زیاد کجاست؟ آیا هر نوع زنگ زدگی دارای یک حکم مشخص است؟

زنگ کم و سراسری و یکنواخت بر روی میلگردها مانع ایجاد لایه محافظ یا انفعالی بر روی سطح فولاد نمی شود و گاه آنرا مفید تر نیز تلقی کرده اند. زنگ زدگی زیاد که موجب سستی و پوسته شدن زنگ شود نامطلوب است و باید قبل از مصرف، زنگ زیاد را از روی میلگردها برداشت. زنگ هایی که بصورت آبله رو یا حفره ای (*PITTING*) هستند بسیار نامناسب می باشند و لازم است از مصرف این نوع میلگردها خودداری نمود. حتی با زدودن زنگ روی این میلگردها، بهتر است آنرا بعنوان میلگردهای طولی و عرضی در بتن استفاده نکرد. بدین دلیل توصیه می شود از انبار کردن میلگردها به مدت طولانی در مناطق خورنده کلریدی خودداری شود. هم چنین از تماس این میلگردها در هنگام انبار کردن با خاک یا آب جاری سطحی یا پاشش آب شور دریا جلوگیری شود.

سوال ۳۱- آیا خوردگی با رطوبت و اکسیژن انجام می شود؟ پس نقش بقیه عوامل چیست؟

در پاسخ های قبلی به کرات گفته شد که عامل اصلی خوردگی فولادهای مصرفی در بتن، رطوبت و اکسیژن می باشد و به نقش سایر عوامل نیز اشاره شد که مجدداً برای بهتر شدن مطلب به آنها می پردازیم. نقش یون کلرید صرفاً از بین بردن لایه محافظ روی میلگرد یا فولاد مدفون در بتن است. ضمناً ذکر شد که هر غلظتی از یون کلرید برای این منظور کافی نیست. کربناته شدن بتن مجاور میلگرد یعنی کاهش *pH* به کمتر از ۹ (گاه ۸/۵ نیز گفته می شود) نیز عامل از بین رفتن لایه انفعالی یا محافظ است. بنابراین چنین عواملی باعث خوردگی نیستند و زمینه ساز خوردگی تلقی می شوند.

عواملی مانند دمای زیاد نیز صرفاً تسریع کننده نفوذ و انتشار یون کلرید و کربناته شدن هستند و یا به تسریع پیشرفت خوردگی کمک می کند و به تنهایی عامل خوردگی نیست. با این توضیح، امیدوارم درک بهتری در این رابطه حاصل شده باشد.

سوال ۳۲- گفته شد که ایجاد فاصله بین بتن و میلگرد می تواند به عدم تشکیل یا از بین رفتن لایه انفعالی (محافظ) آن منجر شود. این امر چگونه ممکن است وقتی که بتن تازه ریخته و بخوبی دور میلگرد را پر کند و متراکم شود؟

به خوبی روشن است که ایجاد فاصله ای حتی اندک، بین بتن و میلگرد می تواند باعث شود لایه انفعالی از بین رود یا اگر از همان ابتدا این فاصله موجود باشد. لایه محافظ تشکیل نشود. اما در پرسش موجود فرض شده است که بتن بخوبی دور میلگرد را پر کرده است و تراکم نیز بطور کامل انجام شده است. معمولاً دو دلیل برای ایجاد این پدیده وجود دارد که در زیر بدانها اشاره می شود:

دلیل اول برای ایجاد این فاصله، آب انداختن زیاد بتن و به تبع آن نشست خمیری زیاد بتن و ایجاد فاصله بین بتن و میلگردهای فوقانی تیر یا دال یا حتی دیوار ستون می باشد. چنانچه تراکم مجدد در بخش فوقانی این قطعات انجام نشود، زیر میلگردها خالی باقی می ماند. البته نتیجه دیگر آن ترک خوردگی عمیق از سطح بتن تا سطح میلگردهای فوقانی است که ممکن است ادامه نیز یابد.

دلیل دوم آنست که روی میلگردهای تیر یا دال حرکت کنیم در حالی که مشغول بتن ریزی روی آن هستیم به نحوی که لرزش و حرکت میلگردها به بخشی که بتن آن ریخته و متراکم و یا تا حدی سفت شده است منتقل گردد که در این حالت محلی که میلگرد در آن قرار دارد در داخل بتن گشاد می شود و بین بتن و میلگرد فاصله می افتد. هم چنین لرزاندن شدید میلگردها با لرزاندن خرطومی نیز ممکن است چنین مشکلی را بوجود آورد. در این موارد لازم است با انداختن الوار روی میلگردها، بتن ریزی انجام شود و به آرامی روی الوار حرکت کنیم. ضمناً نباید لرزاندن را بطور عمدی و طولانی به میلگردها بچسبانیم.

سوال ۳۳- علاوه بر کربناته شدن بتن و یا نفوذ مواد اسیدی، چگونه ممکن است قلیائیت آن بویژه پس از سخت شدن کاهش یابد؟ مگر نه این است که هیدروکسید کلسیم آن باید خارج شود و تا چنین امری محقق شود؟

در این پرسش مقصود از بین رفتن بتن روی میلگرد که باعث از بین رفتن لایه انفعالی می شود نمی باشد بلکه مقصود، کاهش قلیائیت یا pH بتن پس از سخت شدن و کسب مقاومت کافی و رسیدن به pH حدود ۱۳ تا ۱۳/۵ است که ربطی به کربناته شدن یا نفوذ مواد اسیدی به بتن ندارد. خروج هیدروکسید کلسیم یا CH از بتن به واسطه نشست آب از درون بتن و حل کردن تدریجی CH بتن در آن می باشد که به آرامی و کاملاً تدریجی ممکنست pH بتن را کمتر کند. نفوذ آب در دیواره یا کف مخزن آب یا یک دیوار حائل یا مشابه آن از جمله این موارد است. البته

در عمل آوری بتن جوان با روش حوضچه سازی بر روی بتن در دالها یا شالوده ها نیز ممکنست چنین موردی پیش آید که معمولاً مقدار قابل توجهی از CH را به بیرون هدایت می کند. در بتن سخت شده و دارای عمر بیشتر از یکی دوماه، نفوذپذیری بتن کمتر است و خروج CH حل شده در آب به مراتب کمتر می باشد. کاهش pH به کاهش غلظت بحرانی کلرید منجر می گردد و خوردگی می تواند به دلیل تسریع در از بین رفتن لایه محافظ زودتر آغاز شود. بهرحال در آئین نامه جدید بتن ایران به این موضوع اشاره شده است که این نوع عمل آوری در مناطق خورنده کلریدی انجام نشود. گذاشتن برخی قطعات بتنی در آب تازه تعویض شده استخرهای نگهداری بتن نیز این مشکل را بوجود می آورد و بهتر است پس از تعویض آب استخر عمل آوری بتن، مقداری آهک شکفته به آب اضافه شود تا اشباع از آهک گردد. در مواردی که خوردگی ناشی از کربناته شدن وجود دارد نیز این مشکل کاهش pH بتن، آزاردهنده است و باید به نحو مقتضی از آن پرهیز نمود. گاه در عمل آوری در محیطی که به دلیل سوزاندن مواد، گاز دی اکسید کربن در مجاورت بتن های جوان قرار می گیرد نیز کربناته شدن در بتن اتفاق می افتد و موجب کاهش PH میگردد.

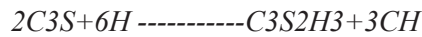
سوال ۳۴- اگر از ابتدا یون کلرید زیادی در بتن موجود باشد به نحوی که خوردگی آغاز شود چه اقدامی می تواند برای کاهش شدت خوردگی مفید واقع شود؟

وجود کلرید در آب، سنگدانه یا حتی سیمان مصرفی و افزودنی ها می تواند از ابتدا یون کلرید زیادی را در بتن بوجود آورد. بویژه در جنوب ایران غالباً سنگدانه های مصرفی می توانند حاوی کلرید قابل توجهی باشند و گاه غلظت بحرانی کلرید از همان ابتدای کار حاصل می شود و لایه انفعالی از بین می رود و فولاد بتن، آماده خوردگی شود. کاهش شدت خوردگی (بافرض شروع خوردگی) چندان ربطی به کاهش یون کلرید ندارد و چندان موثر واقع نمی شود. در این موارد گاه از حفاظت کاتدیک استفاده می شود تا شدت خوردگی کم شود. کاهش دسترسی به رطوبت یا اکسیژن نیز از عوامل موثر است که همواره امکان این امر وجود ندارد. ضمناً وجود یون کلرید زیاد می تواند رطوبت را جذب کند و مشکل آفرین باشد. بهرحال روش های خروج یون کلرید نیز بکار می رود اما باید دانست که پس از انهدام لایه انفعالی، بعید است که بتوان این لایه را دو باره در بتن بوجود آورد. بنابراین یکی از مهم ترین اقدامات، پیشگیری از بروز این امر و بکارگیری سنگدانه و آب کم کلرید است. چنین مشکلی در سواحل جنوبی و جزایر خلیج فارس به وفور دیده شده است.

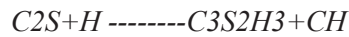
سوال ۳۵- آیا pH همه بتن ها یا خمیرهای سیمان پس از چند ماه یکسان خواهد شد؟ اصولاً این امر به چه عواملی بستگی دارد؟

در برخی پاسخ ها به این نکته نیز اشاره شد که pH همه بتن ها و حتی همه خمیر سیمانها پس از مدتی طولانی نیز یکسان نخواهند شد. گفته شد که عامل ایجاد pH در ابتدا K_2O و Na_2O است و در ادامه هیدراته شدن CaO آزاد و Mgo در کنار هیدراته شدن C_3S و C_2S است که این دو علاوه بر ایجاد عامل چسباننده $C-S-H$ ، مقدار قابل توجهی CH نیز تولید می کند. مقدار

$C2S$ و $C3S$ در همه سیمانها یکسان نیست ضمن اینکه $K2O$ و $Na2O$ و حتی CaO و MgO سیمانها، همانند یکدیگر نیستند. برای اطلاع بیشتر بد نیست به روابط تقریبی هیدراته شدن $C2S$ و $C3S$ نگاهی بیندازیم و مقدار مواد هیدراته شده را بررسی کنیم.



$$۱۰۰+۲۴ \text{ ----- } ۷۵+۴۹$$



$$۱۰۰+۲۱ \text{ ----- } ۹۹+۲۲$$

اعداد ذکر شده بر حسب گرم هستند و فرض شده است که از هیدراته شدن کامل ۱۰۰ گرم از این ترکیبات (فازهای اصلی) سیمان چه مقدار از $C-S-H$ (با رابطه تقریبی $C3S2H3$) و CH تولید می شود.

امروزه مقدار $C3S$ در سیمانها افزایش چشمگیری نسبت به گذشته پیدا کرده است و انتظار می رود آهک هیدراته بیشتری در خمیر سیمان های امروزی تولید گردد. مقدار $C3S$ سیمانهای امروزی بین ۴۵ تا ۶۵ درصد و مقدار $C2S$ بین ۲۵ تا ۱۵ درصد می باشد.

در یک خمیر سیمان سخت شده با سن زیاد، ظاهراً ۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی آن از $C-S-H$ ، حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم آن از CH و بقیه از سیمان هیدراته نشده (در مغز بخش هیدراته شده) و سایر محصولات ناشی از هیدراته شدن یا اکسید های فرعی تشکیل شده است. اگر بخواهیم این موارد را وزنی در نظر بگیریم نیز برای سیمانهای ریز امروزی و برای نسبت آب به سیمان کم نیز دارای ۵۰ تا ۶۰ درصد وزنی $C-S-H$ و حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد CH است. ارزش مواد مختلف در تغییر pH خمیر سیمان نیز یکسان نیست مسلماً $NaOH$ و KOH بمراتب قوی تر از $Ca(OH)2$ و سپس $Mg(OH)2$ است در حالی که مقدار $Ca(OH)2$ یا همان CH بمراتب از بقیه بیشتر است. به دنبال آن ممکن است $Mg(OH)2$ و در مرحله بعد $K(OH)$ و $Na(OH)$ باشد.

در بتن تازه نیز با توجه به عیار سیمان آن و هم چنین pH آب و سنگدانه و در نهایت افزودنیها، در مجموع pH آن به حدود ۹ میرسد و پس از چند ماه در بتن هایی با عیار سیمان ۳۵۰ تا ۴۲۵ کیلو، این مقدار به ۱۳ تا ۱۳/۵ خواهد رسید (درمورد سیمانهای امروزی با $C3S$ زیاد). بنابراین یکسان بودن pH خمیرهای سیمان یا بتن ها موضوعیت ندارد.

سوال ۳۶- آیا در مناطق مرطوب دریایی در جنوب و شمال ایران خوردگی ناشی از کربناته شدن، متحمل است؟ چرا؟

وجود $CO2$ در هوا حتمی است. در سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ مقدار این گاز در جو کره زمین به طور متوسط به حدود 400 ppm می رسد در حالی که مقدار آن در ۱۹۶۰ برابر 315 ppm بوده است.

وجود این مقدار دی اکسید کربن در کنار نیتروژن و اکسیژن که اکثريت وزن هوا را تشکیل می دهند هر چند ناچیز بنظر می رسد اما می تواند به تدریج وارد بتن (خمیر سیمان) شود و با حضور رطوبت با $Ca(OH)2$ موجود در خمیر سیمان ترکیب گردد و $CaCO3$ بوجود آورد که خنثی

است و باعث می شود که هیدروکسید کلسیم به تدریج کاهش یابد به نحوی که PH بتن یا خمیرسیمان به کمتر از ۹ (در مجاورت میلگرد) برسد. در این حالت یعنی کربناته شدن بتن (خمیرسیمان) در مجاورت میلگردها، لایه انفعالی از بین می رود و میلگرد، مستعد خوردگی می گردد. این امر سالها بطول می انجامد و هر چه ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد نسبت آب به سیمان بتن کمتر و عیار سیمان بتن بیشتر باشد، این زمان بیشتر خواهد بود.

در برخی مناطق در کره زمین، مقدار دی اکسید کربن به طور موضعی بیشتر است. مثلاً در شهرهای بزرگ و پرتراфик بویژه در محل های پرتردد، در محیط کارخانه های سیمان و آهک پزی، نیروگاههای ذغال سنگی یا نیروگاههایی که مواد سوختی فسیلی را می سوزانند، پالایشگاههای نفت و گاز، تونلهای خودرو یا راه آهن غیر برقی این گاز دارای غلظت بیشتری است.

در شمال یا جنوب ایران بطور کلی تفاوت خاصی در دی اکسید کربن موجود در هوا دیده نمی شود. این مناطق بمراتب مرطوب تر از سایر نقاط ایران (به عبارتی فلات ایران) می باشد. مناطق خارج از فلات ایران حاشیه دریای خزر و خلیج فارس و دریای عمان از رطوبت بیشتری نسبت به نقاط دیگر ایران که اغلب خشک است برخوردار می باشند. در منابع معتبر گفته می شود که بهترین رطوبت برای کربناته شدن، ۵۰ تا ۷۰ درصد است و در رطوبت های کمتر یا بیشتر بدلیل کمبود رطوبت یا دی اکسید کربن عمل کربناته شدن با کندی همراه خواهد بود. در نزدیکی ساحل و در بسیاری از ایام یا ساعات شبانه روز رطوبت ممکن است بیش از ۷۰ درصد شود. در پروژه هایی مثل اسکله در منطقه جزرومد اصولاً کربناته شدن دیده نمی شود اما در سایر سازه ها، کربناته شدن می تواند رخ دهد و شاید از شدت زیادی برخوردار باشد. اینجانب در بتن اسکله ها و سازه های بندری عملاً کربناته شدن را در عمق بیش از ۱ یا ۲ میلیمتر ندیده ام.

سوال ۳۷- آیا پس از شروع خوردگی، یون کلرید موجود در بتن بر آهنگ خوردگی میلگردها موثر است؟

پس از شروع خوردگی، پارامتر مهم در شدت خوردگی، مقاومت الکتریکی بتن است. وجود یون کلرید در بتن در کنار وجود رطوبت کافی (درصد اشباع) می تواند به شدت موجب کاهش مقاومت الکتریکی بتن شود. بنابراین نقش کلرید بتن در همین حد خواهد بود و نقش خاص دیگری را ایفا نمی کند.

سوال ۳۸- آیا انتشار، جذب، مهاجرت یون کلرید فقط از حفرات و لوله های موئینه بهم پیوسته انجام می شود؟

قطعاً انتشار، جذب و مهاجرت یون کلرید در کنار جذب موئینه از حفرات و لوله های موئینه بهم پیوسته انجام می شود اما منحصر به آن نیست. درون رفت رطوبت و مواد زیان آور مانند کلرید از ناحیه انتقالی (وجه مشترک) نیز انجام می شود. ناحیه مزبور که ITZ هم نامیده می شود، در اطراف سنگدانه ها به میزان ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون بوجود می آید. ضخامت این ناحیه عمدتاً به اندازه سنگدانه مربوط می شود. اهمیت اصلی و مهم این ناحیه ضعیف بودن از نظر مقاومتی و چسبندگی و نفوذپذیری بیشتر آن نسبت به خمیر سیمان در سایر نقاط است. علت این ضعف،

وجود بلورهای بیشتر CH نسبت به خمیر سیمان سایر نقاط و کم بودن $C-S-H$ آن می باشد. برخی برای مدل کردن این ناحیه در مجموعه بتن، آنرا خمیر سیمانی با نسبت آب به سیمان بیشتر در نظر می گیرند تا به نحوی با واقعیت تطابق پیدا کند. برای مثال اگر نسبت آب به سیمان بتن (خمیر سیمان) برابر $0/4$ باشد، نسبت آب به سیمان ناحیه انتقالی را $0/7$ می گیرند تا ضعف نفوذپذیری آن به تصویر کشیده شود. بنابراین، یک ناحیه مهم و نفوذ پذیر تلقی می شود که نقش مهمی در نفوذپذیری بتن و ملات ایفا می کند.

افزایش حداکثر اندازه سنگدانه یا درشت بافت شدن دانه بندی سنگدانه بتن باعث افزایش ضخامت و حجم این ناحیه می شود. کم شدن خمیر سیمان باعث می شود که نسبت حجم این ناحیه به حجم کل خمیر سیمان افزایش جدی پیدا کند و حتی ممکنست این نواحی با یکدیگر تداخل کنند که افزایش شدید نفوذ را بهمراه می آورد. یکی از راهکارهای مهم رفع این ضعف و نفوذپذیری، بکار بردن پوزولان بویژه پوزولانهای ریزی مانند میکروسیلیس است که می تواند بخوبی در این ناحیه جای گیرد و پس از ترکیب با CH و تشکیل چسبی شبیه به $C-S-H$ ، اولاً" به کاهش CH منجر و ثانیاً" چسب مقاوم و نفوذ ناپذیری را در این ناحیه بوجود می آورد که در مجموع، این ضعف به قوت تبدیل می شود. سنگدانه ها نیز دارای خلل و فرج و حفراتی هستند که می تواند به جذب یا جذب موئینه منجر شود اما پژوهش ها نشان می دهد در انتشار و مهاجرت یون کلرید چندان تاثیری باقی نمی گذارد.