

# راهنمای دوام بتن

گزارش کمیته ۱۴۰۲-۲۰۱۰-ICI  
از راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران

# زیبایم خُنیدانی که خاک آسید

## راهنمای دوام بتن

گزارش کمیته ۱۴۰۲ - ICI-۲۰۱۰

از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران

## راهنمای دوام بتن

گزارش کمیته ۱۴۰۲-۲۰۱۰-ICI  
از مجموعه‌ی راهنمای جامع بتن ساز انجمن بتن ایران

راهنمای دوام بتن

ناشر: اراده

نوبت چاپ: اول ۱۴۰۳

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

شابک

ISBN : 8-0

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیبا:

-۱

ویراستار: آیدین ریاضی

صفحه آرا: زهرا اسلامی نوکندی

پایگاه اینترنتی: [WWW.ICIJR](http://WWW.ICIJR)

۱۳	پیش گفتار محمد شکرچی زاده
۱۵	پیش گفتار محسن تدین / هرمز فامیلی
۱۶	پیش گفتار آرش ذوالفقارنسب
۱۷	پیش گفتار حسین فروتن مهر
۱۹	چکیده
۲۰	<b>فصل ۱- مقدمه و دامنه</b>
۲۱	۱-۱. مقدمه
۲۲	۲-۱. دامنه
۲۳	<b>فصل ۲- تعاریف</b>
۲۴	۱-۲. تعاریف
۲۵	<b>فصل ۳- انتقال جرم</b>
۲۶	۱-۳. مقدمه
۲۶	۲-۳. فرآیند انتقال در محیط‌های متخلخل غیرواکنش‌زا
۲۷	۱-۲-۳. انتقال با نفوذ
۲۹	۲-۲-۳. انتقال همرفتی
۲۹	۳-۲-۳. پراکنندگی هیدرودینامیکی
۲۹	۴-۲-۳. انتشار درون حفرات
۲۹	۵-۲-۳. انتقال به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک یا مهاجرت الکتریکی
۳۰	۳-۳. عوامل مؤثر بر انتقال جرم در بتن
۳۰	۱-۳-۳. تخلخل و توزیع اندازه حفرات
۳۳	۴-۳-۳. دمای عمل‌آوری
۳۳	۱-۳-۳-۳. در دمای معمول
۳۴	۲-۳-۳-۳. در دمای زیاد یا کم
۳۴	۴-۳-۳. سنگدانه‌ها
۳۵	۵-۳-۳. مواد مکمل سیمانی
۳۶	۴-۳. اندازه‌گیری خواص انتقال
۳۷	۱-۴-۳. یون‌ها
۳۷	۱-۱-۴-۳. آزمایش کولمب
۳۸	۲-۱-۴-۳. حوضچه‌سازی و انتشار حجمی
۴۰	۲-۴-۳. مایعات
۴۱	۵-۳. دستیابی به بتن بادوام

۴۲	<b>فصل ۴ - یخزدن و آب شدن بتن</b>
۴۳	۴-۱. مقدمه
۴۳	۴-۱-۱. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های با دوام
۴۳	۴-۱-۲. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مستعد به یخزدن
۴۴	۴-۲. حمله یخ‌بندان در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بادوام
۴۴	۴-۲-۱. شرح آسیب ناشی از یخ‌بندان
۴۴	۴-۲-۱-۱. آسیب در سنین اولیه
۴۴	۴-۲-۱-۲. آسیب در بتن عمل‌آوری شده
۴۴	۴-۲-۱-۲-۱. پوسته شدن سطح
۴۴	۴-۲-۱-۲-۲. آسیب داخلی
۴۴	۴-۲-۲. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان در بتن جدید (تازه)
۴۴	۴-۲-۲-۱. محافظت در برابر یخ‌بندان در سنین اولیه
۴۵	۴-۲-۲-۲. حداقل میزان عمل‌آوری پیش از یخ‌بندان
۴۵	۴-۲-۳. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان با طراحی مناسب
۴۵	۴-۲-۳-۱. کاهش آب قابل یخ‌زدن
۴۸	۴-۲-۳-۲. سامانه حفرات هوای ایجادشده
۴۸	۴-۲-۳-۲-۱. ضریب فاصله ( $L$ )
۴۸	۴-۲-۳-۲-۲. سطح ویژه ( $\alpha$ )
۴۹	۴-۲-۳-۲-۳. ضریب Philleo ( $F^p$ )
۴۹	۴-۲-۳-۲-۴. میزان هوا
۵۱	۴-۲-۳-۲-۴. جزئیات طراحی
۵۱	۴-۲-۴. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان با اجرای مناسب
۵۱	۴-۲-۴-۱. حمل و نقل و درجاریختن
۵۳	۴-۲-۴-۲. تراکم
۵۳	۴-۲-۴-۳. پرداخت سطح
۵۴	۴-۲-۴-۴. عمل‌آوری
۵۵	۴-۲-۵. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان در بتن‌های موجود فاقد سامانه حباب‌های هوای مناسب
۵۵	۴-۲-۵-۱. آب‌بندکننده‌ها
۵۵	۴-۲-۵-۲. زهکشی و دیگر روش‌ها
۵۵	۴-۲-۵-۲-۱. زهکشی
۵۶	۴-۲-۵-۲-۲. نگهداری

۵۶	۴-۲-۵-۳. تغییر جهت دادن جریان آب
۵۶	۴-۲-۶. تئوری‌های آسیب ناشی از یخبندان
۵۶	۴-۲-۶-۱. دفع رطوبت
۵۷	۴-۲-۶-۲. فشار اسمزی
۵۷	۴-۲-۶-۳. رشد عدسی‌های یخ
۵۸	۴-۲-۶-۴. پیامدهای سازوکارهای آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن
۵۸	۴-۳. یخبندان در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های کم‌دوام
۵۹	۴-۳-۱. شرح ترک‌خوردگی D شکل
۵۹	۴-۳-۱-۱. شرح کلی
۵۹	۴-۳-۱-۲. عملیات سطحی
۶۰	۴-۳-۱-۳. ساخت و ساز عمودی
۶۰	۴-۳-۲. پیشگیری از ترک‌خوردگی D شکل
۶۰	۴-۳-۲-۱. نقش نسبت‌های مخلوط
۶۰	۴-۳-۲-۲. اهمیت شناسایی سنگدانه
۶۱	۴-۳-۲-۳. اصلاح سنگدانه
۶۱	۴-۳-۳. کاهش دادن ترک‌خوردگی D شکل موجود
۶۲	۴-۳-۳-۱. کلیات
۶۲	۴-۳-۳-۲. پیشگیری از یخبندان
۶۲	۴-۳-۳-۳. کاهش رطوبت
۶۲	۴-۳-۴. تئوری‌ها و سازوکارهای ترک‌خوردگی D شکل
۶۲	۴-۳-۴-۱. اندازه و توزیع اندازه حفرات
۶۳	۴-۳-۴-۲. اثر نمک‌های یخ‌زدا
۶۴	<b>فصل ۵ - واکنش‌های سنگدانه</b>
۶۵	۵-۱. واکنش قلیایی سنگدانه
۶۶	۵-۱-۱. انواع واکنش‌ها
۶۸	۵-۱-۲. زمینه واکنش قلیایی کرناتی (ACR)
۶۸	۵-۱-۳. زمینه واکنش قلیایی سیلیسی (ASR)
۶۹	۵-۱-۳-۱. قلیاها
۷۰	۵-۱-۳-۲. سیلیس فعال
۷۰	۵-۱-۳-۳. رطوبت کافی
۷۰	۵-۱-۳-۴. سازوکار تشکیل ژل

- ۷۱ ۵-۳-۱-۵. نقش کلسیم
- ۷۱ ۴-۱-۵. سازوکار انبساط ژل
- ۷۳ ۵-۱-۵. ارزیابی سنگدانه‌ها برای استعداد واکنش زایی سنگدانه‌های قلیایی
- ۷۳ ۱-۵-۱-۵. عملکرد میدانی
- ۷۴ ۲-۵-۱-۵. بررسی سنگ‌نگاری (ASTM C295/C295M)
- ۷۴ ۳-۵-۱-۵. آزمایش‌های آزمایشگاهی برای شناسایی سنگدانه‌های واکنش‌زای قلیایی کرناتی
- ۷۴ ۱-۳-۵-۱-۵. روش استوانه سنگی (ASTM C586)
- ۷۵ ۲-۳-۵-۱-۵. ترکیب شیمیایی (CSA A23.2-26A)
- ۷۵ ۳-۳-۵-۱-۵. آزمایش منشور بتن (ASTM C1105)
- ۷۶ ۴-۳-۵-۱-۵. آزمایش میکروپار بتن (AAR-5)
- ۷۶ ۴-۵-۱-۵. آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تشخیص سنگدانه‌های واکنش‌زای قلیایی سیلیسی
- ۷۷ ۱-۴-۵-۱-۵. آزمایش میله منشوری ملات تسریع‌شده (ASTM C1260)
- ۷۷ ۲-۴-۵-۱-۵. آزمایش منشور بتنی (ASTM C1293)
- ۷۸ ۳-۴-۵-۱-۵. آزمایش منشور بتن مینیاتوری (AASHTO T 380)
- ۷۹ ۴-۴-۵-۱-۵. آزمایش منشور بتن تسریع‌شده (RILEM AAR-4)
- ۷۹ ۵-۴-۵-۱-۵. آزمایش میکروپار بتن (RILEM AAR-5)
- ۸۰ ۵-۵-۱-۵. آزمایش‌های رویارویی میدانی
- ۸۱ ۶-۱-۵. اقدامات پیش‌گیرانه
- ۸۱ ۱-۶-۱-۵. استفاده از سنگدانه‌های غیرواکنش‌زا
- ۸۱ ۲-۶-۱-۵. محدود کردن مقدار قلیایی بتن
- ۸۳ ۳-۶-۱-۵. استفاده از مواد مکمل سیمانی
- ۸۷ ۴-۶-۱-۵. استفاده از مواد افزودنی شیمیایی
- ۸۸ ۵-۶-۱-۵. نمک‌های لیتیوم
- ۸۸ ۶-۶-۱-۵. سایر مواد افزودنی شیمیایی
- ۸۹ ۷-۱-۵. آزمایش‌هایی برای ارزیابی اقدامات پیش‌گیرانه
- ۸۹ ۱-۷-۱-۵. آزمایش منشور ملات تسریع‌شده (ASTM C1567)
- ۸۹ ۲-۷-۱-۵. آزمایش منشور بتن (ASTM C1293)
- ۸۹ ۳-۷-۱-۵. آزمایش منشور بتن مینیاتوری (AASHTO T 380)
- ۹۰ ASTM C441/C441M. ۴-۷-۱-۵
- ۹۲ ۸-۱-۵. راهکارهایی برای به حداقل رساندن خطر واکنش قلیایی سنگدانه
- ۹۲ ۲-۵. اکسید شدن کانی آهن سولفید در بتن

۹۴	۱-۲-۵. مقدمه
۹۵	۲-۲-۵. پیدایش و شناسایی ماده معدنی
۹۶	۱-۲-۲-۵. پیریت
۹۶	۲-۲-۲-۵. پیروتیت
۹۷	۳-۲-۲-۵. شناسایی و کمی سازی پیروتیت در سنگدانه بتن
۹۸	۳-۲-۵. سازوکار واکنش اکسیده شدن و واکنش بالقوه مخرب در بتن
۹۸	۱-۳-۲-۵. اکسیده شدن پیریت
۹۹	۲-۳-۲-۵. اکسیده شدن پیروتیت و قابلیت حمله داخلی سولفات
۱۰۰	۴-۲-۵. عوامل موثر بر واکنش بالقوه مضر اکسیده شدن پیروتیت در بتن
	۵-۲-۵. استانداردها سازی و روش های آزمایش برای اکسیده شدن کانی بالقوه
۱۰۱	مضر سولفید آهن در سنگدانه های بتن
۱۰۳	<b>فصل ۶ - حمله سولفاتی</b>
۱۰۴	۱-۶. حمله سولفاتی بیرونی
۱۰۴	۱-۱-۶. وقوع
۱۰۵	۲-۱-۶. سابقه تاریخی
۱۰۷	۳-۱-۶. سازوکارها
۱۰۹	۱-۳-۱-۶. حمله سولفاتی منجر به تشکیل اترینگایت و سنگ گچ
۱۱۰	۲-۳-۱-۶. حمله فیزیکی نمک به وسیله نمک های سولفاتی
۱۱۲	۳-۳-۱-۶. تشکیل تومازایت
۱۱۲	۴-۱-۶. توصیه ها
۱۱۵	۱-۴-۱-۶. حمله سولفاتی منجر به تشکیل اترینگایت، مونوسولفات و سنگ گچ
۱۱۵	۲-۴-۱-۶. حمله فیزیکی نمک: حمله نمک به وسیله نمک های سولفاتی
۱۱۶	۳-۴-۱-۶. تشکیل تومازایت
۱۱۷	۵-۱-۶. نمونه برداری و آزمایش جهت تعیین شرایط مستعد رویارویی با سولفات ها
۱۱۷	۶-۱-۶. برقراری عملکرد معادل برای مخلوط های سیمانی با یا بدون مواد مکمل سیمانی
۱۱۷	۷-۱-۶. نسبت ها و یکتواختی پوزولان ها و سرباره ها
۱۱۹	۲-۶. حمله سولفاتی داخلی
۱۱۹	۱-۲-۶. مصالح بتنی
۱۲۰	۲-۲-۶. تشکیل اترینگایت تأخیری
۱۲۰	۱-۲-۲-۶. وقوع
۱۲۱	۲-۲-۲-۶. سازوکارها

۱۲۳	۳-۲-۲-۶. توصیه‌ها
۱۲۳	۳-۶. رویارویی با آب دریا و آب شور
۱۲۳	۱-۳-۶. وقوع
۱۲۳	۲-۳-۶. سازوکارها
۱۲۴	۳-۳-۶. توصیه‌هایی در خصوص آب دریا یا آب شور
۱۲۶	<b>فصل ۷- حمله شیمیایی</b>
۱۲۷	۱-۷. کلیات
۱۲۸	۲-۷. آب دریا
۱۲۸	۱-۲-۷. وقوع
۱۲۹	۲-۲-۷. سازوکار واکنش‌ها
۱۳۰	۳-۲-۷. کاهش اثر
۱۳۱	۳-۷. حمله اسیدی
۱۳۱	۱-۳-۷. وقوع
۱۳۱	۲-۳-۷. سازوکار واکنش‌ها
۱۳۳	۱-۲-۳-۷. حمله کربنیک اسید
۱۳۳	۳-۳-۷. کاهش اثر
۱۳۳	۴-۷. آب شیرین
۱۳۳	۱-۴-۷. وقوع
۱۳۳	۲-۴-۷. سازوکارهای واکنش
۱۳۴	۳-۴-۷. کاهش اثر
۱۳۴	۵-۷. کربناته شدن
۱۳۴	۱-۵-۷. وقوع
۱۳۴	۱-۱-۵-۷. کربناته شدن بتن تازه
۱۳۵	۲-۱-۵-۷. کربناته شدن بتن در سنین اولیه
۱۳۵	۳-۱-۵-۷. کربناته شدن بتن بالغ
۱۳۵	۲-۵-۷. سازوکارهای واکنش
۱۳۵	۱-۲-۵-۷. کربناته شدن اتمسفری
۱۳۵	۲-۲-۵-۷. کربناته شدن توسط ترکیبات کربنی موجود در آب
۱۳۶	۱-۲-۲-۵-۷. قلیائیت آب (بافر قلیائیت کربناتی)
۱۳۶	۶-۷. مواد شیمیایی صنعتی
۱۳۶	۱-۶-۷. وقوع

۱۳۷	۲-۶-۷. سازوکارهای واکنش
۱۳۷	۳-۶-۷. کاهش اثر
۱۳۸	۷-۷. مواد شیمیایی یخزدا و ضدیخ
۱۳۸	۱-۷-۷. وقوع
۱۳۹	۲-۷-۷. سازوکارهای واکنش
۱۴۰	۳-۷-۷. کاهش اثر
۱۴۱	۸-۷. سازه‌های زیست‌محیطی (آب و فاضلاب)
۱۴۱	۱-۸-۷. وقوع
۱۴۱	۲-۸-۷. سازوکارهای واکنش
۱۴۲	۳-۸-۷. کاهش اثر
۱۴۳	<b>فصل ۸ - حمله فیزیکی نمک</b>
۱۴۴	۱-۸. مقدمه
۱۴۶	۲-۸. وقوع
۱۴۶	۳-۸. پیشینه
۱۴۸	۴-۸. سازوکار
۱۴۹	۵-۸. آزمایش
۱۴۹	۱-۵-۸. آزمایش‌های غوطه‌وری کامل
۱۴۹	۲-۵-۸. آزمایش‌های تر و خشک شدن
۱۵۰	۳-۵-۸. آزمایش‌های نیمه غوطه‌ور
۱۵۱	۴-۵-۸. شاخص‌های آزمایش
۱۵۲	۶-۸. عوامل کلیدی
۱۵۳	۷-۸. محافظت
۱۵۴	۸-۸. توصیه‌ها
۱۵۶	<b>فصل ۹- خوردگی فلزات و تخریب سایر مصالح مدفون در بتن</b>
۱۵۷	۱-۹. مقدمه
۱۵۷	۲-۹. اصول کلی شروع خوردگی فولاد در بتن
۱۵۷	۱-۲-۹. کلیات
۱۵۷	۲-۲-۹. سازوکارهای محافظتی در بتن
۱۵۷	۱-۲-۲-۹. کلیات
۱۵۸	۲-۲-۲-۹. فرآیند خوردگی
۱۵۸	۳-۲-۲-۹. خرابی به دلیل تامین ناکافی اکسیژن

۱۵۹	۴-۲-۲-۹. کریناته شدن
۱۵۹	۵-۲-۲-۹. از بین رفتن موضعی ناشی از کلراید
۱۵۹	۳-۹. انتشار خوردگی
۱۵۹	۱-۳-۹. کلیات
۱۶۰	۲-۳-۹. کنترل آندی
۱۶۰	۳-۳-۹. کنترل کاتدی
۱۶۰	۴-۳-۹. کنترل مقاومت الکتریکی
۱۶۰	۴-۹. خواص وابسته به خوردگی در مصالح بتن
۱۶۰	۱-۴-۹. سیمان پرتلند
۱۶۱	۲-۴-۹. مواد مکمل سیمان
۱۶۲	۳-۴-۹. سنگدانه‌ها
۱۶۲	۴-۴-۹. آب اختلاط
۱۶۲	۵-۴-۹. افزودنی‌ها
۱۶۲	۱-۵-۴-۹. کلیات
۱۶۳	۲-۵-۴-۹. زودگیرکننده‌ها
۱۶۳	۳-۵-۴-۹. بازدارنده‌های خوردگی
۱۶۴	۵-۹. کاهش دادن خوردگی
۱۶۴	۱-۵-۹. کلیات
۱۶۴	۲-۵-۹. طراحی و فرآیند
۱۶۴	۱-۲-۵-۹. کیفیت بتن و پوشش روی فولاد
۱۶۴	۱-۱-۲-۵-۹. ضخامت پوشش
۱۶۵	۲-۱-۲-۵-۹. کیفیت بتن
۱۶۷	۲-۲-۵-۹. رسانایی بتن
۱۶۸	۳-۵-۹. جوانب اجرایی
۱۶۸	۱-۳-۵-۹. مهارت اجرایی
۱۶۸	۲-۳-۵-۹. جزئیات مسلح کننده‌ها
۱۶۸	۳-۳-۵-۹. عمل آوری
۱۶۹	۴-۳-۵-۹. قالب بندی
۱۶۹	۴-۵-۹. طراحی
۱۶۹	۱-۴-۵-۹. چیدمان کلی سازه
۱۶۹	۲-۴-۵-۹. زهکشی

۱۶۹	۹-۵-۳. اجزاء نمایان
۱۷۰	۹-۵-۵. سامانه‌های محافظتی خاص
۱۷۰	۹-۶. خوردگی آرماتورهای فولادی پیش‌تنیده
۱۷۱	۹-۷. خرابی سایر مواد به غیر از فولاد
۱۷۱	۹-۷-۱. مقدمه
۱۷۲	۹-۷-۲. آلومینیوم
۱۷۲	۹-۷-۳. سرب
۱۷۲	۹-۷-۴. مس و آلیاژهای مسی
۱۷۳	۹-۷-۵. روی
۱۷۳	۹-۷-۶. سایر فلزات
۱۷۳	۹-۷-۷. پلیمرها
۱۷۴	۹-۷-۸. چوب
۱۷۴	۹-۷-۹. خلاصه
۱۷۵	<b>فصل ۱۰- سایش</b>
۱۷۹	۱۰-۱. مقدمه
۱۷۹	۱۰-۲. آزمایش بتن برای مقاومت در برابر سایش
۱۸۰	۱۰-۳. عوامل موثر بر مقاومت سایشی بتن
۱۸۲	۱۰-۴. توصیه‌هایی برای سطوح بتنی مقاوم در برابر سایش
۱۸۲	۱۰-۴-۱. عوامل موثر بر استراتژی‌های افزایش مقاومت سایشی
۱۸۲	۱۰-۴-۲. کف‌های با بسترهای دولایه
۱۸۲	۱۰-۴-۳. سنگدانه‌های بتن ویژه
۱۸۳	۱۰-۴-۴. روش‌های پرداخت مناسب
۱۸۳	۱۰-۴-۵. آب‌زدائی با مکش
۱۸۳	۱۰-۴-۶. خشک‌پاش‌ها و روکش‌های ویژه
۱۸۳	۱۰-۴-۷. روش‌های عمل‌آوری مناسب
۱۸۴	۱۰-۵. سایش ساینده‌ها و لاستیک‌های میخ‌دار و زنجیر چرخ روی بتن
۱۸۵	۱۰-۶. مقاومت در برابر لغزش در روسازی‌ها
۱۸۶	۱۰-۷. فرسایش
۱۸۷	۱۰-۷-۱. سایش
۱۸۹	<b>فصل ۱۱- خلاصه</b>
۱۹۱	<b>فصل ۱۲- منابع</b>

## راهنمای دوام بتن

ریاست هیئت مدیره انجمن بتن ایران:

دکتر محمد شکرچی زاده

مدیر افتخاری:

مهندس حسین فروتن مهر

رئیس کمیته دوام بتن:

دکتر آرش ذوالفقارنسب

کمیته تهیه کنندگان:

فرناز بهمن زاده

محمدرضا پورابراهیمی

آرش ذوالفقارنسب

کمیته کار (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر فرناز بهمن زاده

دکتر محمدرضا پورابراهیمی

دکتر محسن تدین

دکتر آرش ذوالفقارنسب

مهندس آیدین ریاضی

دکتر هرمز فامیلی

اعضا پیوسته کمیته (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس فرهاد احمدقنداق ساز

دکتر فرناز بهمن زاده

دکتر محمدرضا پورابراهیمی

دکتر مهدی چینی

مهندس پریناز سلیمی

دکتر آرش ذوالفقارنسب

دکتر امیر محمد رمضانپور

دکتر موسی کلهری

دکتر فرامرز مودی

دکتر مهدی نعمتی چاری

## پیش گفتار

### به نام خدا

فرآیند صنعتی شدن در جهان از ابتدا با آسیب رساندن به محیط زیست همراه شد و متأسفانه توجه بشر به حفظ محیط زیست با تاخیر انجام پذیرفت. بهر حال در وضعیت فعلی در کشورهای توسعه یافته در همه عرصه ها موضوع محیط زیست در مرکز توجه است و به نظر می رسد مورد قبول همگان است که تمرکز اصلی در توسعه پایدار، حفظ محیط زیست می باشد.

نقش بتن به عنوان عنصر اصلی و پایه در صنعت ساخت و ساز انکار ناپذیر است. بنابر گزارشهای موجود تولید سالیانه بالغ بر چهار و نیم میلیارد تن سیمان در حال حاضر تا سال ۲۰۵۰ از مرز شش میلیارد تن خواهد گذشت و معنای این حرف این است در سال ۲۰۵۰ سالانه بالغ بر پنج میلیارد تن گاز گلخانه ای عمدتاً به دلیل احداث سازه های بتنی در اتمسفر منتشر خواهد شد.

پرواضح است راهکار مهم برای کاهش اثرات محیط زیستی بتن افزایش دوام سازه های بتنی می باشد و موضوع دوام بتن از دیرباز در مرکز توجه علم تکنولوژی بتن بوده است و تلاشهای موثری از بعد تحقیقاتی در سراسر جهان انجام پذیرفته است و راهکارهای حاصل از تحقیقات در عرصه های گوناگون به اجرا در آمده و نتایج موثری به همراه داشته است به عنوان مثال امروز در مناطق بسیار گزندبار، طراحی سازه های بتنی با عمر مفید بیش از دویست سال انجام می پذیرد.

در کشور ما موضوع دوام سازه های بتنی در نقاط مختلف جغرافیایی باید مورد توجه قرار گیرد. صدمات وارده به سازه ها و عناصر بتنی ناشی از چرخه های یخ زدن و آب شدن، واکنش های قلیایی سیلیسی سنگدانه ها، حملات سولفاتی و خصوصاً خوردگی آرماتورها ناشی از نفوذ کلراید در سواحل جنوبی کشور و و کرناتاسیون در محیط های شهری از خطرات بالقوه محسوب می شود. از سالهای قبل تا کنون تحقیقات متعددی در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه های کشور در زمینه دوام انجام پذیرفته است و در نشریات و مدارک فنی لازم الاجرا نظیر مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آئین نامه بتن ایران به الزامات دوام سازه های بتنی پرداخته شده است. با این وجود با توجه به اهمیت موضوع کماکان لازم است مدارک و نشریات فنی در زمینه دوام بیش از پیش انتشار یابد.

نشریه حاضر که ترجمه نشریه انجمن بتن آمریکا می باشد توسط آقای دکتر آرش ذوالفقارنسب، خانم دکتر فرناز بهمن زاده و آقای دکتر محمدرضا پورابراهیمی ترجمه شده است و حاوی مطالب ارزشمند و قابل توجهی می باشد که کاربرد آن ها می تواند در موضوع دوام سازه های بتنی کشور مفید و موثر باشد و به ارتقای دانش بتن کمک نماید. جا دارد از استادانی که برای ترجمه این اثر همت نهادند تشکر نمایم.

محمد شکرچی زاده

رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران

### به نام خدا

سالیان متعددی پذیرش بتن بر اساس مقاومت فشاری صورت گرفته است. در سازه‌های بسیار و در شرایط مختلف حاکم در محیط بهره‌برداری و اقلیم‌های متفاوت، ساختمان‌های بتنی که بر اساس مقاومت فشاری طراحی و پذیرفته شده بودند نتوانستند عمر مورد نظر در بهره‌برداری را دوام آوردند و خسارت سنگینی به کشورها وارد گردید.

در سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، مبحث نهم مقررات ملی و آئین‌نامه بتن ایران مورد تجدید نظر قرار گرفت و طراحی سازه‌های بتنی بر اساس دوام مطرح گردید و مشخص شد که سازه‌های بتنی نه تنها باید مقاومت مورد نظر را داشته باشند بلکه باید از دوام کافی نیز برخوردار باشند تا عمر مورد نظر را در هنگام بهره‌برداری بدون تحمیل نمودن هزینه‌های سنگین مرمت و بازسازی داشته باشند.

نشریات متعددی در مورد دوام بتن که هر کدام جنبه‌های مختلف بتن را بررسی نموده‌اند منتشر شده است. انجمن بتن ایران بر آن شد کمیته‌ای تحت عنوان دوام تشکیل دهد و گزارش این کمیته در مجموعه راهنمای جامع بتن ساز گنجانده شود و در اختیار علاقه‌مندان به دوام بتن قرار دهد. آنچه از نظر می‌گذرد گزارش کمیته دوام بتن به شماره ۱۴۰۲-۲۰۱۰-ICI می‌باشد. امید است این گزارش به دسترسی آسان‌تر دانشجویان، پژوهش‌گران و کارشناسان به منابع غنی علمی در زمینه دوام بتن که به زبان انگلیسی وجود دارد کمک نماید و در راستای اهداف انجمن بتن ایران که همانا توسعه و گسترش دانش بتن در کشور می‌باشد قرار گیرد.

علی‌رغم تلاش‌های زیادی که صورت گرفته تا متن تخصصی تهیه‌شده فاقد خطا باشد ولی امکان از بین بردن کلیه خطاهای احتمالی وجود ندارد و لذا از صاحب‌نظران و پژوهشگران ارجمند درخواست می‌شود با منت نهادن بر تهیه‌کنندگان این گزارش خطاهای موجود را یادآوری نمایند تا در چاپ‌های بعدی این گزارش برطرف شوند.

در پایان لازم می‌دانیم از حمایت‌های مادی و معنوی شرکت فهاب بتن به مدیریت جناب آقای مهندس فروتن مهر که در تهیه‌ی این گزارش همکاری نموده‌اند تشکر و قدردانی شود.

### به‌نام خدا

امروزه جمعیت جهان بصورت روز افزون به سوی شهرنشینی سوق پیدا می‌نماید و لازمه زیست شهری پایدار، ایجاد ابنیه و زیرساخت‌های با دوام و دارای عمر مفید خدمت‌رسانی طولانی است. دوام سازه‌ها نه تنها از منظر فنی و مهندسی بلکه از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز اهمیت فراوانی دارد و می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و ایمنی افراد و جوامع کمک شایانی نماید.

بتن به عنوان یکی از مهمترین مصالح ساختمانی، نقش بسیار کلیدی در ساخت سازه‌های مختلف، از ساختمان‌های مسکونی گرفته تا سدها، پل‌ها و تمامی زیرساخت‌های حیاتی، دارد. از آنجایی که سازه‌ها بطور مستمر با عوامل متفاوت محیطی و آسیب‌رسان در تماس هستند، دوام بتن در چنین شرایطی بعنوان یکی از ویژگی‌های اساسی این ماده بشمار می‌رود و پایایی سازه‌ها تاثیر زیادی از آن می‌پذیرد.

توصیه‌های موجود در خصوص دوام بتن بعنوان راهنمایی برای طراحان، مهندسان عمران و سازندگان در فرآیند ساخت و نگهداری سازه‌ها بکار می‌روند. این موارد با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی و محیطی مختلف، نکات کلیدی را در مورد انتخاب مواد، طراحی سازه و روش‌های تعمیر و نگهداری، ارائه می‌دهند. در این مجموعه تهیه‌کنندگان بصورت جامع به بررسی نشریه ACI 201.2 انجمن بتن آمریکا با عنوان "Guide to Durable Concrete" پرداخته‌اند. با مطالعه مجلد تهیه شده تحت عنوان «راهنمای دوام بتن» از مجموعه راهنمای بتن‌ساز، خوانندگان با مفاهیم دوام بتن، عوامل آسیب‌رسان، راهکارهای بهبود و تاثیر اجزای مختلف بتن بر دوام آن آشنا می‌شوند. بصورت کلی این کتاب نه تنها بعنوان یک منبع تخصصی برای جامعه مهندسی بشمار می‌رود، بلکه در سطح عمومی نیز عاملی ارزشمند در بهبود کیفیت و دوام سازه‌ها، خواهد بود.

آرش ذوالفقارنسب

رئیس کمیته دوام انجمن بتن ایران

## پیام مدیر عامل شرکت فهاب بتن

به نام خدا

با توسعه اقتصادی و صنعتی روزافزون در دنیا به ویژه در کشورهای در حال توسعه همچون ایران، نیاز به اجرای سازه‌های مختلف به وجود آمده است. در پی این رشد، بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی ساخته بشر، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. اولین کارخانه سیمان ایران در سال ۱۳۱۲ در شهر ری احداث شد و از آن زمان تاکنون، ساخت سازه‌های بتنی به طرز چشمگیری در کشور گسترده شده است. لکن، در این چند دهه که از متداول شدن بتن در صنعت ساخت و ساز کشور می‌گذرد، سیر پیشرفت کیفیت بتن به ویژه در صنعت بتن آماده بسیار کند بوده است. سال‌ها، در باور عمده دست‌اندرکاران صنعت ساختمان، تعریف بتن مخلوط سیمان، آب و سنگدانه بود و استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی جایگاهی در صنعت بتن کشور نداشت. متأسفانه هنوز هم در کشور مشاهده می‌شود که در مواردی، اصول اولیه دانش بتن رعایت نمی‌شود. در برخی از کارگاه‌ها هنوز عیار سیمان نشانه کیفیت بتن است و در بهترین حالت، تنها مقاومت فشاری و اسلامپ به عنوان معیارهای ارزیابی کیفیت بتن محسوب می‌شوند. هرچند در سال‌های اخیر، به واسطه گسترش دانش بتن و به کارگیری افزودنی‌های مختلف، ارتقای قابل توجهی در کیفیت بتن برخی از کارخانه‌های بتن آماده مشاهده می‌شود و تولید بتن‌های توانمند مانند بتن پرمقاومت، بتن خود تراکم، بتن الیافی و غیره در این کارخانه‌ها میسر شده است، نیاز به پیشرفتی بیشتر احساس می‌شود. امروزه در دنیا، تنها معیار مقاومت مکانیکی بتن در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه تولید بتن با دوام متناسب با شرایط محیطی و بهره‌برداری، یکی از ارکان اصلی طراحی مخلوط بتن به‌شمار می‌آید. بتن مسلح باید در برابر انواع پدیده‌های مخرب همچون کرناسیون، حملات سولفاتی و کلریدی، واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها، چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و غیره دارای دوام و عمر مفید قابل قبولی باشد. خلاصاً پرداختن به مقوله دوام در صنعت بتن آماده کشور به‌وضوح مشاهده می‌شود. کارخانه‌های بتن آماده به عنوان مهمترین تأمین‌کنندگان بتن، به‌ویژه در پروژه‌های شهری، نقش مهمی در بهبود دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی که سرمایه‌های کشور می‌باشند، دارند. لازم است که این صنعت با همکاری دانشگاه‌ها و مراجع

علمی کشور، به دانش دوام بتن مجهز شود و بتن‌های بادوامی مطابق با مقررات ملی ساختمان و آئین‌نامه بتن ایران و متناسب با شرایط اقلیمی گوناگون کشور تولید شود. گزارش حاضر با موضوع دوام بتن حاصل تلاش ارزشمند برجسته‌ترین اساتید بتن کشور می‌باشد که در اختیار جامعه مهندسی کشور با هدف ارتقای کیفی و عمر مفید سازه‌های بتنی قرار می‌گیرد.

حسین فروتن‌مهر

مدیر عامل شرکت فهاب بتن

## چکیده

این راهنما انواع خاصی از خرابی‌های بتن را شرح می‌دهد. هر فصل شامل توضیحاتی درباره ساز و کارهای درگیر و الزامات توصیه‌شده برای هر یک از اجزای بتن، ملاحظات کیفیت برای مخلوط‌های بتن، روش‌های ساخت و تأثیرات محیط رویارویی است که همه این موارد ملاحظات مهم برای اطمینان از دوام بتن می‌باشند. این راهنما برای بتن معمولی تهیه شده است، اما به‌طور کلی برای بتن‌های خاص نیز قابل استفاده است. اما، در مورد بتن‌های خاصی نظیر بتن غلتکی یا بتن متخلخل، ممکن است مسائل مربوط به دوام منحصر به فردی داشته باشند که نیاز به توجه بیشتری دارد که در اینجا به آن‌ها پرداخته نشده است.

# فصل ۱

مقدمه و دامنه

## ۱-۱. مقدمه

بتن، پر مصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان است. طراحی، جزئیات و اجرای بتن برای مقاومت در برابر عوامل جوی، حمله شیمیایی، سایش و سایر فرآیندهای خرابی در طول عمر مورد نظر، دوام آن را تعیین می‌نماید. بتن بادوام در صورت قرار گرفتن در معرض محیط، شکل اولیه، کیفیت و قابلیت بهره‌برداری خود را حفظ می‌کند. بتن با طراحی مناسب و نسبت‌های مناسب اجزا و جابجایی، درجا ریختن، پرداخت و عمل‌آوری مطلوب، می‌تواند چندین دهه بهره‌برداری را بدون تعمیر و نگهداری یا با کمترین هزینه تعمیر و نگهداری ارائه دهد، با این حال شرایط یا محیط‌های خاصی وجود دارند که می‌توانند منجر به ایجاد خرابی در بتن شوند. فرآیندهای خرابی ماهیتی شیمیایی یا فیزیکی دارند و ممکن است از داخل بتن نشأت گرفته یا در نتیجه رویارویی با محیط خارجی باشند. فرآیندهای حمله شیمیایی و فیزیکی اغلب به صورت همافزا عمل می‌کنند. بسته به ماهیت حمله، آسیب ممکن است در خمیر، سنگدانه یا اجزای مسلح‌کننده بتن ایجاد شود یا ترکیبی از آن‌ها باشد.

عوامل مختلف موثر بر دوام و فرآیند مشخص خرابی باید در خصوص رویارویی بتن در محیط در نظر گرفته شود. علاوه بر این، باید به ریزاقلیمی که عضو سازه‌ای مشخص در معرض آن قرار می‌گیرد، توجه نمود. نوع و شدت خرابی یک سازه ممکن است تحت تأثیر نزدیکی آن به منشأ عوامل خرابی یا عواملی که آسیب را تسهیل می‌نمایند، قرارگیری در معرض باد، بارش یا دما باشد. به عنوان مثال، تیرهای خارجی در ساختار پل ممکن است در معرض محیط تهاجمی تری نسبت به تیرهای داخلی قرار گیرند.

مفهوم عمر مفید به‌طور فزاینده‌ای برای طراحی سازه‌های جدید استفاده می‌شود. برای تولید بتن مناسب برای یک کاربرد خاص، عمر مفید مورد نیاز، الزامات طراحی و محیط‌های قرارگیری محتمل اعم از بزرگ و ریز مقیاس<sup>۱</sup>، باید قبل از تعیین مصالح مورد نیاز و نسبت‌های مخلوط مشخص گردند.

استفاده از مصالح خوب و نسبت‌های مخلوط مناسب به تنهایی تضمین‌کننده دوام بتن نخواهد بود. شیوه‌های مناسب بتن‌ریزی و مهارت اجرایی برای تولید بتن بادوام ضروری است. بتن تازه را می‌توان با توجه به هدف موردنظر در شکل دلخواه قالب‌گیری و متراکم نمود. در طی این مرحله، خواص متعددی که به‌طور قابل توجهی بر دوام بتن سخت شده تأثیر می‌گذارد، ایجاد می‌شود. توسعه ساختار حفرات، تشکیل ساختار حباب‌های هوا، یکنواختی مصالح و استعداد ایجاد ترک در سنین اولیه ایجاد شده، برای دوام نهایی بتن مهم است. بدین ترتیب، بتن بادوام نیاز به اعمال کنترل کیفیت خوب در طول ساخت دارد. بازرسی و آزمایش توسط نیروی انسانی آموزش دیده و دارای صلاحیت می‌تواند به اطمینان از استفاده از مخلوط‌های بادوام و شیوه‌های مناسب کمک نماید.

<sup>1</sup> Macro and micro

## ۱-۲. دامنه

این راهنما فرآیندهای مهم خرابی بتن را مورد بحث قرار می‌دهد و توصیه‌هایی در مورد چگونگی کاهش یا به حداقل رساندن چنین آسیب‌هایی ارائه می‌دهد. این راهنما همچنین با بحث در مورد اهمیت انتقال جرم و سپس پرداختن به حالت‌های خاص تهاجم در فصل‌های جداگانه به دوام می‌پردازد. این موارد شامل یخ‌زدن و آب‌شدن، واکنش قلیایی سنگدانه (AAR)، حمله سولفاتی، تهاجم شیمیایی، حمله فیزیکی نمک، خوردگی فلزات و سایر اقلام مدفون در بتن، سایش، یا ترکیبی از این‌ها هستند. مقاومت بتن در برابر آتش و ترک‌خوردن به‌طور مستقیم مورد توجه قرار نمی‌گیرد. مقاومت در برابر آتش در ACI 216.1 و بحث ترک‌خوردگی در ACI 224R و ACI 224.1R پوشش داده شده است. در حالی که ترک‌خوردگی بر دوام بتن در شرایط بهره‌برداری شدید تأثیر می‌گذارد، ولی علل مختلف ترک‌خوردگی و تأثیرات خاص آن‌ها مورد بحث قرار نگرفته است. ترک‌خوردگی فقط به صورت کلی در رابطه با تأثیر آن بر نفوذ سیال مورد بحث قرار گرفته است.

# فصل ۲

## تعاريف

## ۲-۱. تعاریف

لطفاً برای فهرست جامع تعاریف به آخرین نسخه اصطلاحات بتن ACI مراجعه کنید<sup>۳</sup>. تعاریف ارائه شده در اینجا مکمل آن منبع است.

انتقال فرارفتی<sup>۴</sup> - انتقال گرما یا ماده از طریق حرکت توده‌های یک سیال.  
بار قلیایی (یا مقدار) - مقدار کل قلیایی معادل (Na<sub>2</sub>Oe) در مخلوط بتن که به عنوان جرم در واحد حجم بیان می‌شود.

سیمان کلسیم سولفوآلومینات - محصولی که از پودر کردن کلینکر حاوی پلمایت<sup>۵</sup> [Ca<sub>4</sub>(AlO<sub>2</sub>)<sub>6</sub>SO<sub>4</sub>] به دست می‌آید که اغلب در سیمان‌های منبسط شونده و سیمان‌های با مقاومت اولیه بسیار زیاد استفاده می‌شود. انتشار - حرکت مواد مانند یون‌ها، گاز یا بخار، از ناحیه‌ای با غلظت زیادتر به ناحیه‌ای با غلظت کمتر، مستقل از حرکت توده‌ای سیال.

مهاجرت الکتریکی - انتقال الکترون‌ها یا یون‌ها به دلیل اختلاف پتانسیل الکتریکی.  
عدسی یخ - لایه‌ای از یخ، بطور کلی به موازات سطح نمایان بتن، که می‌تواند آسیب داخلی ایجاد کند و همچنین منجر به پوسته شدن یا لایه لایه شدگی گردد.

تراوش - انحلال و خارج شدن اجزای محلول مانند کلسیم هیدروکسید از بتن.  
نفوذپذیری - توانایی یک بتن مشخص برای اجازه عبور مایعات یا گازها از آن تحت فشار.  
نفوذ - جریان یک مایع، گاز یا بخار در یک جامد تحت اثر اختلاف فشار.  
حمله فیزیکی نمک - فرآیندی که در آن بتن یا ملات در نتیجه فشار تبلور نمک آسیب می‌بیند.  
سیلیس فعال - شکلی از سیلیس، اغلب بی‌شکل یا نهان بلور<sup>۵</sup>، که در تماس با مایع منفذی بتن دارای غلظت زیادی از یون‌های هیدروکسید حل می‌شود.

هوازگی نمکی - شکلی از خرابی که بیشتر در آب و هوای خشک مشاهده می‌شود که رویارویی نمک‌های محلول و تغییرات چرخ‌های دما و رطوبت نسبی می‌تواند منجر به تبلور نمک شود.  
تومازیت - کانی سیلیکاتی، بلورهای شش ضلعی منشوری بی‌رنگ تا سفید، معمولاً به صورت گروه‌های سوزنی شکل، با فرمول شیمیایی  $\{Ca_3Si(OH)_6 \cdot 12(H_2O)\}(SO_4)(CO_3)$ .

<sup>۳</sup> برای نسخه فارسی به نشریه واژگان سیمان و بتن انجمن بتن ایران مراجعه شود.

<sup>۳</sup> Advective transport

<sup>۴</sup> Ye'elinite

<sup>۵</sup> Crypto-crystalline

# فصل ۳

## انتقال جرم

## ۳-۱. مقدمه

بتن یک ماده متخلخل چند حالتی است که از یک خمیره سیمانی متخلخل چند قطبی دارای اجزای سنگدانه تشکیل شده است. مایع و گاز ممکن است در هر یک از منافذ و ریزترک‌ها وجود داشته باشد. به این ترتیب، مستعد ورود و حرکت مواد (مایعات یا یون‌ها) در درون محیط خود و از طریق سامانه حفرات است. این فصل به بحث انتقال گازها، مایعات و یون‌ها در مایع منفذی بتن می‌پردازد (Lichtner و همکاران، ۱۹۹۶؛ Baer؛ Hearn؛ ۱۹۸۸ و همکاران، ۲۰۰۶؛ Hall و Holf، ۲۰۱۲). روش‌های بهبود دوام بتن و برخی از روش‌های آزمایش رایج مورد استفاده برای اندازه‌گیری ویژگی‌های انتقال، همراه با مزایا و محدودیت‌های آن‌ها در ارزیابی دوام بتن نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند. مشخص شده است که سرعت نفوذ سیالات و یون‌ها با وجود ترک افزایش می‌یابد. اما اثرات مشخص هر یک از انواع مختلف ترک و عرض ترک در اینجا مورد بحث قرار نگرفته است. ورود گازها، مایعات یا یون‌ها به مایع منفذی بتن ممکن است باعث شروع فرآیندهای شیمیایی، فرآیندهای فیزیکی یا هر دو شود که بر دوام بتن تحت مجموعه‌ای از شرایط خاص بهره‌برداری تأثیر می‌گذارد. حتی آب به تنهایی نیز ممکن است به دلیل توانایی در حل نمودن و خروج کلسیم هیدروکسید از خمیر سیمان سخت شده و به دلیل ایجاد فشار اسمزی هنگامی که آب به نقاطی با قلیانیت زیادتر جریان می‌یابد، آسیرسان باشد (Powers و همکاران، ۱۹۵۴؛ Powers، ۱۹۷۵؛ Helmuth، ۱۹۶۰ b,c). علاوه بر این، آب ممکن است اسیدی باشد یا مواد شیمیایی محلول مضر مانند کلرایدها یا سولفات‌ها را وارد بتن کند. نفوذ گازهایی مانند اکسیژن و کربن دی‌اکسید از طریق منافذ بتن می‌تواند در خوردگی آرماتورهای فولادی نقش داشته باشد.

مواد مختلف ممکن است به طرق متفاوت با اجزای بتن، فعل و انفعال داشته باشند. بنابراین، انتقال یک ماده از میان بتن منحصر به آن ماده است. به عنوان مثال، آب می‌تواند منجر به هیدراته‌شدن ذرات هیدراته نشده سیمان شده یا موجب خروج کلسیم هیدروکسید گردد. یون‌های کلراید ممکن است با محلولات هیدراته‌شدن سیمان یا مواد مکمل سیمانی پیوند برقرار نمایند. اندازه مولکول‌ها یا یون‌هایی که از میان بتن عبور می‌کنند، گرانیوزی سیال، ظرفیت یون‌ها و سایر ذرات یونی موجود نیز بر خواص انتقال تأثیر می‌گذارند. بنابراین، نفوذپذیری و قابلیت انتشار باید بر حسب ماده‌ای که از میان بتن عبور می‌کند، بیان شود. به طور کلی، بتن با خواص انتقالی که روند نفوذ عوامل خارجی را محدود می‌کند، در برابر خرابی شیمیایی مصون نیست، اما اثرات آن عمدتاً در نزدیکی سطوح در معرض قرار گرفته است، بنابراین بتن تمایل به دوام بیشتری دارد.

## ۳-۲. فرآیند انتقال در محیط‌های متخلخل غیرواکنش‌زا

این بخش مروری مختصر از فرآیندهای انتقال سیالات (گازها و مایعات) و یون‌ها در محلول در یک محیط متخلخل غیرواکنش‌زا ارائه می‌کند. این یک فرض ساده‌کننده است زیرا بتن با گذشت زمان در پاسخ به محیط خود از نظر شیمیایی و فیزیکی تغییر می‌کند. تغییرات فیزیکی، تغییرات شیمیایی، یا هر دو، در ساختار داخلی محیط متخلخل ناشی از فعل و انفعالات با سیالات یا یون‌های مهاجر در اینجا مورد بحث

قرار نگرفته است. مسیرهای انتقال مشروح عبارتند از:

الف) انتقال با نفوذ

ب) انتقال همرفتی

پ) پراکندگی هیدرودینامیکی

ت) انتشار در حفرات

ث) انتقال به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک یا مهاجرت الکتریکی

Martín-Pérez و همکاران (۲۰۰۱) انتقال مربوط به خوردگی آرماتور در بتن را بر اساس انتقال کلراید، انتشار رطوبت، انتقال حرارت و انتقال اکسیژن با استفاده از یک مدل اجزای محدود دو بعدی مدل سازی کردند. آن‌ها از نسخه اصلاح شده قانون دوم فیک استفاده کردند.

Johannesson (۲۰۰۳) یک مدل نظری برای انتشار انواع مختلف یون در مایع منفذی بتن ارائه نمود. این مدل شامل انتشار ناشی از اختلاف غلظت یون‌ها (به عنوان مثال، بر اثر خشک شدن)، پتانسیل الکتریکی داخلی، همرفت، اثرات تغییرات رطوبتی و تبادل جرم یون‌ها بین فازهای جامد هیدراته شدن و محلول است. Consolazio و Chung (۲۰۰۵) یک مدل تفاضل محدود را برای شبیه سازی گرما و انتقال جرم در شرایط گرمایش سریع، مانند آتش سوزی در سازه های بتن مسلح ایجاد کردند. این مدل تداخل بین فازهای مایع و گاز، اثرات جریان لغزشی در جریان بخار و تداخل آرماتورهای فولادی در حرکت رطوبت در بتن را شامل می شود.

### ۳-۲-۱. انتقال با نفوذ

نفوذ جریان سیال تحت اثر اختلاف فشار است. نفوذپذیری خاصیتی است که سهولت عبور سیال در یک ماده متخلخل تحت اختلاف فشار را مشخص می کند. در یک جریان لایه ای در یک محیط متخلخل اشباع، جریان سیال با اختلاف فشار هیدرولیک مطابق قانون داریسی مرتبط است.

$$dq / dt = K_1 A \Delta h / l \quad (۱-۲-۳)$$

در این رابطه جریان (بصورت نرخ جریان)، ضریب نفوذپذیری، مساحت سطح مقطع، ارتفاع هیدرولیکی و طول نمونه است. ضریب نفوذپذیری روند تخلیه آب در شرایط جریان لایه ای از طریق سطح مقطع واحد از یک محیط متخلخل تحت یک شیب هیدرولیکی واحد و شرایط دمای استاندارد است. قانون داریسی نشان می دهد که برای یک سطح مقطع و ضریب نفوذپذیری معین، جریان متناسب با شیب هیدرولیکی می باشد. در شرایط بهره برداری، جریان سه بعدی است و بتن ممکن است اشباع نشده باشد. در بتن، ضریب نفوذپذیری ممکن است با پیشرفت هیدراته شدن، افزایش ترک خوردگی یا تغییر در ساختار منافذ به دلیل فرآیندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی تغییر کند.

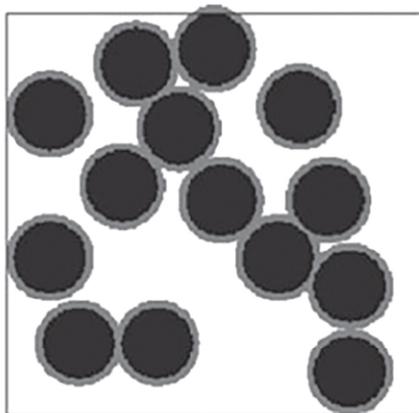
ضرایب نفوذپذیری در حالت خمیری برای خمیرهای سیمان پرتلند تهیه شده با چهار سیمان با ترکیب

شیمیایی متفاوت اما سطح ویژه یکسان (۱۸۰ مترمربع بر کیلوگرم، تعیین شده با کدر سنج واگنر<sup>۶</sup>) و با نسبت آب به سیمان (w/c) ۰/۵ که با اندازه گیری میزان آب انداختن محاسبه گشته‌اند، از  $5 \times 10^{-7}$  تا  $8 \times 10^{-7}$  متر بر ثانیه متغیر بوده است. ضریب نفوذپذیری خمیر به اصطلاح بالغ (مثلاً در سن بیش از ۲۸ روز) بین  $1 \times 10^{-6}$  و  $1 \times 10^{-7}$  مقدار آن ضریب در خمیر تازه است. محدوده آن از  $1 \times 10^{-15}$  تا  $1/2 \times 10^{-12}$  متر بر ثانیه برای آب به سیمان از ۰/۳ تا ۰/۷ می‌باشد (Powers و همکاران، ۱۹۵۴).

جهت درک اثرات ریزساختار بر نفوذپذیری بتن، Bentz و همکاران (۱۹۹۹) در موسسه ملی استاندارد و فناوری<sup>۷</sup> از نظریه تراوش<sup>۸</sup> استفاده کردند. یکی از کاربردهای مفید نظریه تراوش، بررسی زمان مورد نیاز برای پیشروی یک ماده در یک مارپیچ پیچیده است (Staufer و Aharony، ۱۹۹۲). این مارپیچ هم شامل نواحی می‌باشد که امکان حرکت آزاد در آن‌ها فراهم است و هم نواحی را که از انتقال مایع با درجات مختلف ممانعت می‌کنند، دربرمی‌گیرد. این مدل‌ها به صورت دو بعدی و سه بعدی ساخته می‌شوند و می‌توانند تأثیرات ترک را شامل شوند. Lu و همکاران (۲۰۱۲) توانستند از نسخه سه بعدی مدل موسسه ملی استاندارد و فناوری برای پیش بینی نفوذ کلراید به بتن ترک خورده استفاده کنند.

همچنین اقداماتی توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری انجام شده که تغییرات در ویژگی‌های این سامانه‌ها را با گذشت زمان مدل می‌کند. این امر موجب می‌شود تا تغییرات ریزساختار بتن با گذشت زمان مورد بررسی قرار گیرد و اثرات آن بر توانایی یک سیال، در حرکت درون ساختار مشاهده گردد.

یک بیان تصویری از یک مدل نظریه تراوش ساده توسط Bentz (۲۰۰۰) برای مدل‌سازی انتقال سیالات از میان بتن در حالت دو بعدی استفاده گشت، که در شکل ۳-۲-۱ نشان داده شده است. نواحی بسیار متراکم برای سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. از مواد نسبتاً متراکم برای خمیر سیمان و مواد با چگالی کم برای مدل‌سازی ناحیه انتقال استفاده می‌گردد (۳-۳-۴).



شکل ۳-۲-۱- بیان تصویری از یک مدل نظریه تراوش ساده جهت ارائه مدل نفوذپذیری بتن.

<sup>۶</sup> Wagner turbidimeter

<sup>۷</sup> National Institute of Standards and Technology (NIST)

<sup>۸</sup> Percolation theory

### ۳-۲-۲. انتقال همرفتی

انتقال همرفتی به حرکت مولکول‌ها و یون‌ها در قالب جریان حجمی از محلول اشاره دارد. این فرآیند انتقال بطور مستقیم با سرعت جریان سیال و غلظت یون‌ها در محلول مرتبط است. بسته به شرایط رویارویی و درجه اشباع، سرعت جریان سیال به موئینگی یا نفوذپذیری بتن، گرانیوزی فاز سیال و اختلاف فشار سیال نفوذکننده یا نرخ تبخیر در شرایط انتقال موئینه<sup>۹</sup> از سطح رویارو، بستگی دارد (Buenfeld و همکاران، ۱۹۹۵).

### ۳-۲-۳. پراکندگی هیدرودینامیکی

پراکندگی، پخش شدن غلظت یون در حین انتقال همرفتی به دلیل تغییرات در سرعت سیال منفذی است. این تغییرات می‌تواند نتیجه پیچ در پیچی ساختار حفرات، اتصال شبکه حفرات، یا تغییر در خواص سیال باشد.

### ۳-۲-۴. انتشار درون حفرات

این انتشار به فرآیندی از انتقال اشاره دارد که در آن یون‌ها یا گازها از نواحی با غلظت بیشتر به نواحی با غلظت کمتر مهاجرت می‌کنند. قانون دوم فیک، انتشار غیر پایدار یون‌ها در حفرات را در حالت یک‌بعدی

$$dc/dt = D_e \cdot d^2c/dx^2$$

کامل توصیف می‌نماید.  
(۳-۲-۴)

در این رابطه  $c$  غلظت یون‌ها در فاصله  $x$  از سطح در زمان می‌باشد و  $D_e$  ضریب مؤثر انتشار یا قابلیت انتشار مؤثر است. قابلیت انتشار مؤثر تابعی از تخلخل و پیچ در پیچی محیط متخلخل و انتشار مولکولی یون‌های مورد نظر می‌باشد. عوامل زیادی بر انتشار یون‌ها در بتن تأثیر می‌گذارد. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در شرایط کنترل شده در آزمایشگاه، ضریب انتشار با دما و نسبت آب به مواد سیمانی افزایش و با افزایش درجه هیدراته‌شدن کاهش می‌یابد. از آنجا که مایع منفذی بتن دارای قدرت یونی زیاد است، اثرات بار الکتریکی می‌تواند قابل توجه باشد. ضریب انتشار همچنین می‌تواند بسته به وجود سایر انواع یون‌ها در مایع منفذی متفاوت باشد. به این دلایل و دلایل دیگری که در بند ۳-۴-۲-۱ مورد بحث قرار خواهد گرفت، مقادیر بدست آمده بصورت تجربی با استفاده از قانون دوم فیک به‌طور کلی «ضریب انتشار ظاهری» نامیده می‌شود. ضریب انتشار برای  $Na^+$  در بتن در محدوده  $10^{-11}$  تا  $10^{-13}$  متر مربع بر ثانیه و برای  $Cl^-$  بین  $10^{-11}$  تا  $10^{-12}$  متر مربع بر ثانیه می‌باشد (Taylor, ۱۹۹۷).

### ۳-۲-۵. انتقال به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک یا مهاجرت الکتریکی

مهاجرت، فرآیند انتقال به دلیل ماهیت باردار یون‌ها می‌باشد و نتیجه اختلاف پتانسیل در طول آزمون است. مزدوج‌سازی الکتریکی<sup>۱۰</sup> بین یون‌ها در محلول‌های غلیظ توسط Snyder (۲۰۰۱) و Snyder و Marchand

<sup>۹</sup> Wick action

<sup>۱۰</sup> Electrical coupling

(۲۰۰۱) نشان داده شد. مهاجرت الکتریکی زمانی رخ می دهد که یک میدان الکتریکی خارجی مانند ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) به محیط اعمال شود (Buenfeld و همکاران، ۱۹۹۸). شار مهاجرت  $J_i$  توسط یون  $i$  مطابق رابطه ۳-۲-۵ بدست می آید.

$$J_i = -D_i C_i \frac{z_i F}{RT} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (۳-۲-۵)$$

در این رابطه  $\frac{\partial \phi}{\partial x}$  اختلاف پتانسیل،  $Z_i$  بار یون،  $F$  ثابت فارادی،  $T$  دما،  $D_i$  قابلیت انتشار یون،  $R$  ثابت گاز و  $C_i$  غلظت یون در محلول است.

اطلاعات بیشتر در مورد انتقال یونی در بتن را می توان در مقاله McGrath و Hooton (۱۹۹۶) و برای موارد پیچیده تر در خصوص انتقال چند گونه ای در مقاله Truc و همکاران (۲۰۰۰) و مقاله Samson و همکاران (۱۹۹۹) یافت.

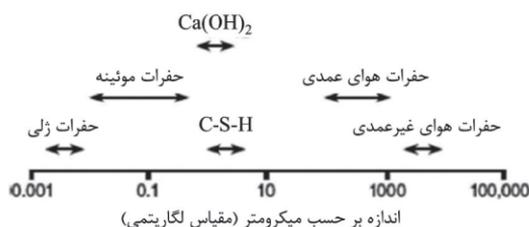
### ۳-۳. عوامل مؤثر بر انتقال جرم در بتن

#### ۱-۳-۳. تخلخل و توزیع اندازه حفرات

تخلخل به عنوان حجم فضاهای خالی که به صورت کسری تعریف می گردد و معمولاً به صورت درصدی از حجم کل بیان می شود.

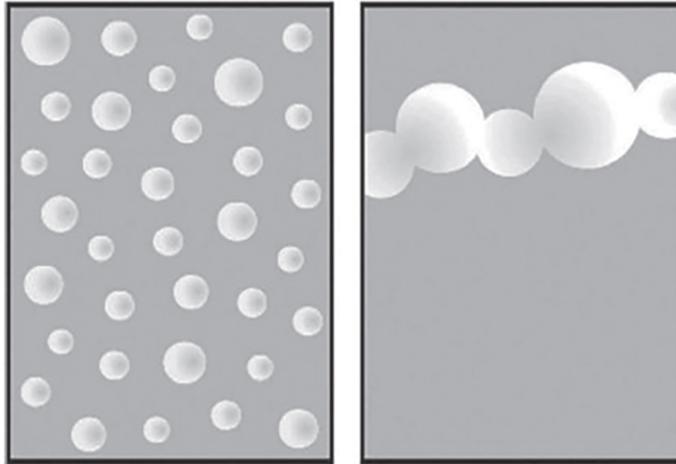
$$100\% \times (\text{حجم کل} / \text{حجم حفرات}) = \text{تخلخل} (\%) \quad (۳-۳-۱)$$

شکل ۳-۳-۱ الف محدوده اندازه برای انواع مختلف منافذ در بتن را نشان می دهد. اندازه منافذ بتن از نانومتر تا میلی متر متغیر است. منافذ موئینه، در اندازه های مختلف از ده ها نانومتر تا میلی متر، بیشترین تأثیر را بر خواص انتقال دارند. اما، خواص انتقال بیشتر از اینکه به تخلخل یا اندازه حفرات وابسته باشد به پیوستگی حفرات بستگی دارد.



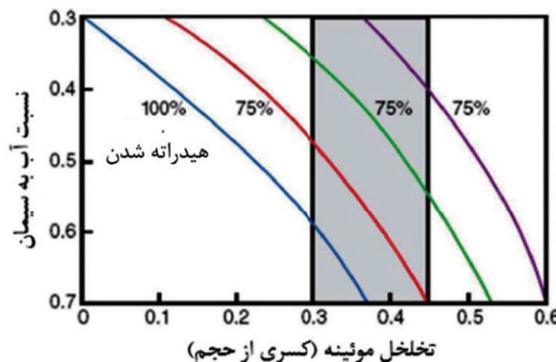
شکل ۳-۳-۱ الف- اندازه نسبی انواع مختلف منافذ و سایر ویژگی های ریزساختاری (برگرفته از Mehta، ۱۹۸۶).

شکل ۳-۳-۱ ب دو ماده متخلخل فرضی را با تخلخل تقریباً یکسان نشان می دهد. در یک ماده، منافذ ناپیوسته بوده و شرایط همانند حالتی است که برای حباب های ایجاد شده وجود دارد، درحالی که در ماده دیگر منافذ پیوسته هستند. ماده دوم امکان انتقال با نرخ سریع تری را نسبت به اولی فراهم می نماید.

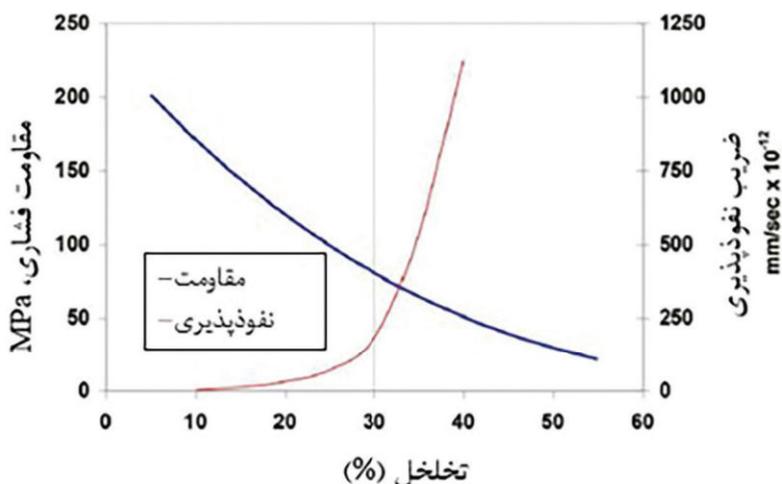


شکل ۳-۳-۱ ب- تخلخل و نفوذپذیری مرتبط اما متمایز هستند. دو ماده فرضی نشان داده شده دارای تخلخل تقریباً یکسان (حجم کل منافذ)، اما نفوذپذیری متفاوت هستند. منافذ گسسته، مانند منافذ ناشی از هوازایی، تقریباً هیچ تأثیری بر نفوذپذیری ندارند، ولیکن منافذ به هم پیوسته نفوذپذیری را افزایش می‌دهند.  
 ۳-۳-۲. نسبت آب به سیمان (w/c)

تخلخل اولیه خمیر سیمان توسط w/c تعیین می‌شود. با هیدراته شدن سیمان، محصولات هیدراته شدن مقداری از فضای خالی را که قبلاً توسط آب اشغال شده بود، پر می‌کنند. با گذشت زمان، این فرآیند منجر به کاهش مداوم تخلخل خمیر سیمان می‌شود. شکل ۳-۳-۲ الف (Mehta, ۱۹۸۶) رابطه بین w/c، درجه هیدراته شدن و تخلخل موئنه را نشان می‌دهد. برای w/c برابر ۰/۴۵، درجه هیدراته شدن باید تقریباً به ۷۰٪ برسد تا تخلخل به ۳۰٪ کاهش یابد. برای w/c برابر ۰/۶۰، درجه هیدراته شدن باید تقریباً به ۱۰۰٪ برسد تا به همان تخلخل برسد. درجه هیدراته شدنی که می‌توان برای شرایط عمل‌آوری خوب انتظار داشت - برای مثال، عمل‌آوری مرطوب به مدت ۵ تا ۷ روز - بسته به شیمی سیمان و نرمی آن و دمای هیدراته شدن، بین ۷۰ تا ۸۰ درصد متغیر است؛ در عمل درجه هیدراته شدن ۱۰۰ درصد امکان‌پذیر نیست. شکل ۳-۳-۲ ب رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری را نشان می‌دهد. در تخلخل تقریباً بیش از ۳۰ درصد، ضریب نفوذپذیری به شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۳-۲ الف - نسبت آب به سیمان (w/c) در مقابل تخلخل موئنه برای خمیر سیمان در درجات مختلف هیدراته شدن (Mehta, ۱۹۸۶) بر اساس معادلات ارائه شده توسط Powers و Brownnyard (۱۹۴۸).



شکل ۳-۲-ب- هر دو مولفه مقاومت فشاری و نفوذپذیری با تخلخل موئنه خمیر سیمان مرتبط است (بر گرفته از Powers، ۱۹۵۸).

براساس محاسبات Powers (۱۹۶۲، b) برای خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸، هنگامی که همه سیمان هیدراته شده تمام فضای منافذ موئنه تنها با ژل با چگالی حداکثر پر شده است. نمونه مهر و موم شده خمیرهای سیمان کاملاً هیدراته که با  $w/c$  بیش از ۰/۳۸ ساخته شده است، دارای فضای منافذ موئنه باقی مانده برابر با مازاد بر مقدار آب بیشتر از  $w/c$  برابر ۰/۳۸ هستند. مخلوط‌های نیمه هیدراته به نسبت، ژل کمتر و فضای موئنه بیشتری دارند. Powers و همکاران (۱۹۵۹) همان‌طور که در جدول ۳-۳-۲ نشان داده شده است، زمان لازم برای ناپیوسته شدن منافذ موئنه با افزایش درجه هیدراته شدن سیمان را محاسبه کردند. قابل توجه است که مخلوط‌هایی با  $w/c$  بیشتر از ۰/۷ همواره دارای منافذ پیوسته خواهند بود. حتی برای  $w/c$  از ۰/۴۰ تا ۰/۴۵، عمل آوری مرطوب طولانی یا سایر شرایط عمل آوری مطلوب برای دستیابی به نفوذپذیری کم مورد نظر ضروری است.

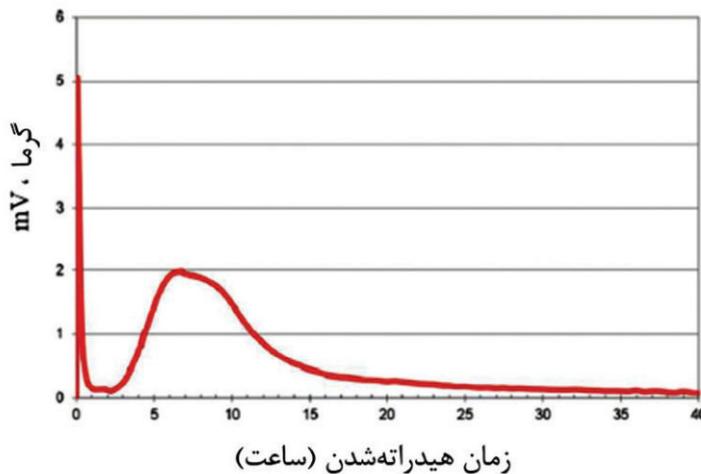
جدول ۳-۲-۳ - سن تقریبی مورد نیاز برای بتن‌هایی که دائماً در رطوبت عمل آوری شده‌اند جهت ایجاد بلوغ که در آن منافذ موئنه ناپیوسته می‌شوند (Powers و همکاران، ۱۹۵۹).

نسبت جرمی آب به سیمان (w/c)	مدت زمان لازم
۰/۴	۳ روز
۰/۴۵	۷ روز
۰/۵۰	۱۴ روز
۰/۶۰	۶ ماه
۰/۷۰	۱ سال
بیش از ۰/۷۰	غیرممکن

### ۳-۳-۳. دمای عمل آوری

#### ۳-۳-۳-۱ در دمای معمول

بلافاصله پس از اختلاط سیمان با آب، لایه‌ای از ژل بر روی سطوح دانه‌های سیمان تشکیل می‌شود (Taylor، ۱۹۹۷).، تقریباً ۳۰ درصد سیمان بین ۳ تا ۲۴ ساعت پس از اختلاط سیمان با آب واکنش نشان می‌دهد. تشکیل سریع کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و کلسیم هیدروکسید (CH) با آزاد کردن مقدار قابل توجهی گرما همراه است. CH لایه بلورهای ضخیمی را در فضای اولیه که قبلاً با آب پر شده بود، تشکیل می‌دهد. C-S-H به شکل یک لایه ضخیم در اطراف دانه‌های سیمان تشکیل می‌شود. با رشد پوسته‌های تشکیل یافته به سمت بیرون، ذرات پس از حدود ۱۲ ساعت شروع به بهم آمیخته شدن می‌کنند که این زمان با حداکثر سرعت گرمزائی مصادف و تقریباً با تکمیل گیرش همزمان است (Taylor، ۱۹۹۷). در شکل ۳-۳-۳-۱، اولین اوج گرمزائی با هیدرولیز اولیه  $C_3S$  و هیدراته شدن  $C_3A$  مرتبط می‌باشد. هنگامی که محصولات هیدراته شدن اولیه  $C_3A$  تشکیل می‌شود، دوره شتاب گیری با گرمزائی مجدد در آغاز اوج دوم شروع می‌گردد. گیرش اولیه مصادف با آغاز دوره شتاب است و گیرش نهایی درست قبل از نقطه حداکثر در اوج دوم رخ می‌دهد. شانه نقطه اوج دوم با تشکیل مجدد اترینگایت همراه است (Taylor، ۱۹۹۷). هیدراته شدن بیشتر سیمان با سرعت بسیار کمتری ادامه می‌یابد و مانند یک مجانب به ۱۰۰٪ نزدیک می‌شود (Mindess و Young، ۱۹۸۱). پس از آنکه فضاهای بین پوسته‌های هیدراته شده و دانه‌های سیمان با محصولات هیدراته شدن پر گردید، فرآیند هیدراته شدن آهسته ادامه می‌یابد (Taylor، ۱۹۹۷). اندازه منافذ موثقه باقی مانده در خمیر سیمان به بلوغ رسیده با افزایش W/C، افزایش می‌یابد و دارای قطرهای ۱۰ نانومتر و بیشتر خواهد بود (Mindess و Young، ۱۹۸۱).



شکل ۳-۳-۳-۱ - گرمزائی خمیر سیمان پرتلند نوع I/II که با کالریمتر اندازه گیری شده است (تصویر برگرفته از E. Shklonik).

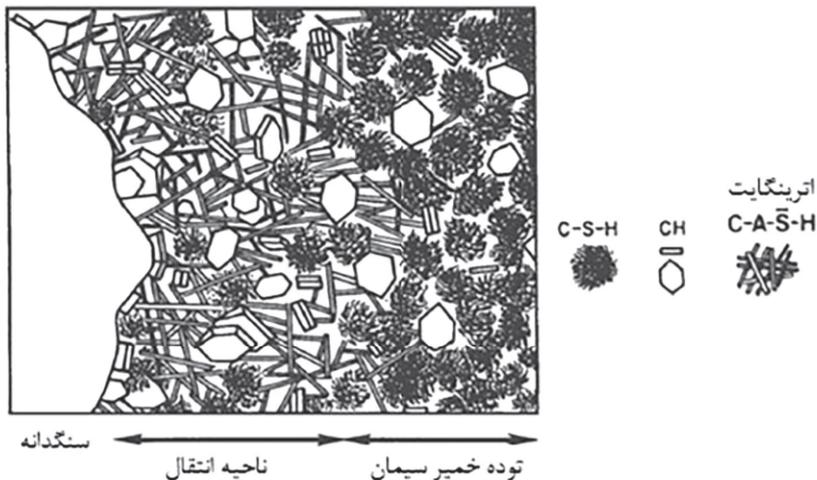
### ۳-۳-۲. در دماهای زیاد یا کم

همانند اکثر واکنش‌های شیمیایی، هیدراته‌شدن سیمان با افزایش دما سریع‌تر رخ می‌دهد. Hel- و Verbeck (۱۹۶۹) فرض کردند که در دماهای زیاد، محصولات هیدراته‌شدن سیمان زمان زیادی برای پخش شدن در فاصله قابل توجهی از دانه سیمان ندارند، بنابراین در جریان هیدراته‌شدن پوسته‌های نسبتاً متراکمی در اطراف دانه‌های سیمان تشکیل می‌دهند. نتیجه توزیع ناهمگن فازهای جامد، ساختار منفذی درشت‌تر است. Goto و Roy (۱۹۸۱) دریافتند که تخلخل کل در خمیرهای هیدراته‌شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس بیشتر از خمیرهای هیدراته‌شده در دمای ۲۷ درجه سلسیوس است. برای خمیرهای سیمانی که در دماهای کم هیدراته می‌شوند، در حدود ۱۰ درجه سلسیوس، محصولات هیدراته‌شدن به‌طور یکنواخت‌تری توزیع می‌شوند و منافذ، کوچک و ناپیوسته هستند. خمیرهای سیمانی که در دماهای زیاد هیدراته می‌شوند، منافذ، درشت‌تر و به هم پیوسته‌تر هستند (Kjellsen و همکاران، ۱۹۹۱). همان‌طور که در بند ۳-۳-۵ مورد بحث قرار گرفته است، خمیرهای سیمانی حاوی خاکستر بادی، سیمان سرباره‌ای یا هر دو، حساسیت کمتری نسبت به اثرات دماهای زیاد دارند.

### ۳-۳-۴. سنگدانه‌ها

سنگدانه‌ها به‌طور کلی خواص انتقالی کاملاً متفاوتی نسبت به خمیر سیمان دارند. به‌عنوان مثال، مقدار نفوذپذیری گرانیب به‌طور معمول دو تا سه مرتبه<sup>۱۱</sup> کمتر از خمیر سیمان است. وجود سنگدانه در خمیره سیمان یک ناهمگنی در ساختار بتن سخت‌شده ایجاد می‌کند که به نام ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه شناخته می‌شود. Mehta (۱۹۸۶) گزارش کرد که در مقایسه با توده خمیر سیمان، ناحیه انتقال دارای مقادیر حضرات بیشتر، مقدار CH و اترینگایت بیشتر، مقدار C-S-H کمتر و بلورهای بزرگ‌تر CH که به موازات سطح سنگدانه‌ها جهت‌گیری جدی داشته، می‌باشد (شکل ۳-۳-۴). عواملی که در ماهیت غیرمعمول ناحیه انتقال نقش دارند عبارتند از آب‌انداختن، که فضایی پر از آب را در زیر ذرات سنگدانه ایجاد می‌نماید، تراکم نامناسب ذرات سیمانی در مجاورت یک سطح که به آن اثر دیواره می‌گویند، و اثر رشد یک طرفه مواد سیمانی محلول و محصولات هیدراته‌شدن که از توده خمیر سیمان منتشر می‌شوند و منشأ سنگدانه ندارند. (Bentz و همکاران، ۱۹۹۵). هنگامی که مواد سیمانی هیدراته می‌شوند، ناحیه انتقال ترجیحاً با CH و اترینگایت پر می‌شود. بلورها به دلیل وجود فضای نسبتاً باز می‌توانند بزرگ شوند.

<sup>11</sup> Two or three orders,  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$



شکل ۳-۴- نمایش ناحیه انتقال در سطح مشترک خمیر و سنگدانه در بتن، که ساختار متخلخل و بلورهای درشت بیشتری را نسبت به توده خمیر سیمان نشان می‌دهد (Mehta, ۱۹۸۶).

بنابراین، در اکثر بتن‌ها، ناحیه انتقال ضعیف‌ترین ناحیه از منظر رفتار مکانیکی و خواص انتقال است. در مورد اخیر، ناحیه انتقال می‌تواند همانند یک راه ارتباطی نسبتاً باز برای سیالات و یون‌ها عمل کند و CH در برابر آب‌شستگی و حمله اسید آسیب‌پذیر باشد. برای یک  $w/c$  و درجه هیدراته‌شدن معین، نفوذپذیری آب در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های با نفوذپذیری کم به دلیل وجود ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان، تقریباً یک تا دو مرتبه بیشتر از خمیر سیمان است (Mehta, ۱۹۸۶). تحقیقات نشان داد میزان انتشار کلراید در ناحیه انتقال ۱۰ برابر بیشتر از توده خمیر سیمان است (Delagrave و همکاران، ۱۹۹۷). پیوستگی منافذ در ناحیه انتقال ممکن است زیاد باشد، که منجر به افزایش چشمگیر نرخ انتقال نسبت به آنچه که از نسبت‌های مخلوط آن‌ها به دست می‌آید، گردد. در محدوده وسیعی از  $w/c$  برای مخلوط‌هایی با مقادیر بیشتر سنگدانه درشت، مانند بتن‌های روسازی، جریان از میان ناحیه انتقال می‌تواند به‌طور کلی بر حرکت رطوبت در بتن چیره شود (Snyder و Janssen، ۱۹۹۴).

### ۳-۳-۵. مواد مکمل سیمانی

استفاده از مواد مکمل سیمانی می‌تواند نفوذپذیری و انتشار در بتن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این مواد ممکن است تخلخل کل را تا حد زیادی کاهش ندهند، اما در عوض ساختار منافذ را کوچک‌تر و آن‌ها را تقسیم می‌کند تا پیوستگی آن‌ها کمتر شود. برخی از مزایا با بهبود کارایی، به ویژه کاهش آب‌انداختگی، توسط این مواد حاصل می‌شود. همچنین بهره‌گیری از خاکستر بادی می‌تواند میزان آب مورد نیاز در برخی از مخلوط‌های بتنی را کاهش و در عین حفظ کارآیی معادل، نسبت آب به مواد سیمانی ( $w/cm$ ) را کاهش دهد. وزن مخصوص کمتر مواد مکمل سیمانی نسبت به سیمان منجر به افزایش حجم مواد جامد با افزایش مقدار مصرف این مواد، در یک  $w/cm$  معین، می‌شود. اما، بزرگ‌ترین مزیت از دیدگاه دوام است که از واکنش

پوزولانی مرتبط با بسیاری از مواد مکمل سیمانی نشأت می‌گیرد. در این واکنش، CH حاصل از هیدراته شدن سیمان با سیلیس غیربلوری موجود در مواد مکمل سیمانی و آب واکنش و C-S-H را تشکیل می‌دهد. از آنجایی که C-S-H حجم بیشتری نسبت به CH و پوزولانی که از آن تشکیل شده دارد، واکنش پوزولانی منجر به ایجاد ساختار ریزتری از نوع منافذ موثنه می‌شود.

سیمان سربارهای و پوزولان‌های حاوی آلومین یک مزیت اضافی دارند. چرا که محصولات هیدراته شدن این سیمان‌ها در مقیاس‌سازی یون‌های کلراید بسیار مؤثر است و از نفوذ بیشتر به داخل بتن جلوگیری می‌کنند (Thomas و همکاران، ۲۰۱۲). این اثر به ویژه در کاربردهایی مانند پارکینگ، عرشه پل و ساخت‌وساز دریایی، که در آن فولاد مسلح‌کننده در برابر خوردگی ناشی از کلراید آسیب‌پذیر است، اهمیت دارد.

استفاده بی‌حساب از مواد مکمل سیمانی همواره سودمند نیست چرا که واکنش‌های پوزولانی و هیدرولیکی این مواد زمان‌بر است و سیمان باید به اندازه کافی هیدراته شود تا CH لازم برای شرکت در این واکنش‌ها تولید گردد. همچنین، به این دلیل که مواد مکمل سیمانی ممکن است از نظر سرعت واکنش‌زایی به میزان قابل توجهی متفاوت باشند. بنابراین، مهندس باید خواص بتن را در سنین اولیه در نظر بگیرد. از آنجایی که واکنش‌های پوزولانی معمولاً کندتر از هیدراته شدن سیمان انجام می‌شود، برای دستیابی به بهترین نتایج، عمل‌آوری مرطوب طولانی‌تر ضروری است.

مواد مکمل سیمانی اغلب می‌توانند اثرات مضر عمل‌آوری در دمای زیاد را کاهش دهند. De- و Cao twiler (۱۹۹۵) دریافته‌اند که هم دوده سیلیس و هم سرباره در بهبود ساختار حفرات مؤثر هستند. Campbell و Detwiler (۱۹۹۳) گروهی از بتن‌های عمل‌آوری‌شده با بخار را آزمایش کردند که در آن‌ها نسبت مواد مختلف سیمانی متفاوت بود. آن‌ها دریافته‌اند که با استفاده از روش AASHTO T 277، کل شار الکتریکی عبوری طی ۶ ساعت برای سیمان پرتلند نوع 10 CSA (GU) با بدترین عملکرد و ترکیبات بهینه‌شده‌ی سیمان، سرباره و دوده سیلیس با بهترین عملکرد، در حدود ۲ برابر اختلاف داشته است. آن‌ها در مطالعه خود از خاکستر بادی استفاده نکردند.

Bentz و همکاران (۱۹۹۵) نشان داده‌اند که ذرات دوده سیلیس هم ضخامت اولیه ناحیه انتقال را کاهش و هم برای تبدیل CH به C-S-H واکنش نشان می‌دهند. خاکستر بادی به دلیل اندازه ذرات بزرگ‌تر و فعالیت پوزولانی کمتر، اثری مشابه، اما کمتر دارد.

### ۳-۴. اندازه‌گیری خواص انتقال

اندازه‌گیری خواص انتقالی بتن به علت فعل و انفعالات بین بتن و ماده‌ای که در آن حرکت می‌کند؛ تغییر خواص بتن با گذشت زمان؛ و حساسیت خواص انتقال به تغییرات رطوبت، دما و شرایط دیگر امری پیچیده است. از آنجایی که بسیاری از آزمایش‌ها، فرآیند انتقال سیال یا یون مورد نظر را تسریع می‌کنند، ممکن است فرآیندهای انتقال متفاوت یا اضافی را نسبت به آنچه در شرایط بهره‌برداری واقعی رخ می‌دهد، القا

<sup>۱۱</sup> این نام‌گذاری مربوط به استاندارد کانادایی است.

نمایند. این آزمایش‌ها اغلب دستیابی به شرایط حالت پایدار را که اساس معادلات مختلف مورد استفاده برای توصیف انتقال جرم را تشکیل می‌دهد، غیرممکن می‌کنند و ممکن است فرض جریان آرام مورد استفاده در بسیاری از محاسبات را بیاعتبار سازد (رابطه (۳-۲-۱)). علاوه بر این، انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه اغلب تحت شرایط بسیار کنترل شده صورت می‌گیرد که ممکن است نتواند به دقت شرایط بهره‌برداری واقعی را منعکس نماید. با این حال، هنگامی که به‌طور منطقی استفاده می‌شود؛ آزمایش‌های شرح داده شده در ادامه ممکن است برای مقایسه مناسب بودن مخلوط‌های مختلف بتن برای شرایط رویارویی مشخص، یا برای اهداف تضمین یا کنترل کیفیت در طول ساخت‌وساز مفید باشد (Puerto Rico DOT SP934). بخش‌های آورده شده در ادامه، آزمایش‌های موجود ASTM را که برای توصیف ویژگی‌های انتقال استفاده می‌شوند، همراه با تغییرات رایج مورد بحث قرار می‌دهند.

### ۳-۴-۱. یونها

#### ۳-۴-۱-۱. آزمایش کولمب (ASTM C1202/AASHTO T 277)

آزمایش‌های استاندارد انتقال یون، بر روی نفوذ یون‌های کلراید در بتن تمرکز دارند. متداول‌ترین آزمایش مورد استفاده برای این منظور ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) است که در آن یک نمونه استوانه‌ای با قطر حدود ۱۰۰ میلی‌متر و طول حدود ۵۰ میلی‌متر قبل از قرار دادن در محفظه آزمایش، با آب در خلأ اشباع شده است. محفظه حاوی محلول ۳٪ سدیم کلرید در یک سمت و محلول ۰/۳ نرمال سدیم هیدروکسید در سمت دیگر می‌باشد. پتانسیل الکتریکی ۶۰ ولت مستقیم یک طرفه به مدت ۶ ساعت اعمال می‌شود. کل شار الکتریکی عبوری در طول دوره آزمایش، به‌صورت غیرمستقیم نفوذپذیری یون‌های کلراید در بتن را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) از هدایت الکتریکی بتن به‌عنوان شاخص آزمایشی سریع یا جایگزینی برای انتشار استفاده می‌کند. ایرادات اصلی به استفاده از این روش آزمون از ماهیت غیرمستقیم اندازه‌گیری، ناشی می‌شود. در حالیکه انتشار یون در درجه اول به ریزساختار و ظرفیت مقیدسازی شیمیایی خمیره بستگی دارد، هدایت الکتریکی به ریزساختار و شیمی مایع منفذی وابسته است (Buenfeld و Newman، ۱۹۸۷). نسبت‌های مختلف مواد مکمل سیمانی می‌تواند شدیداً بر شیمی مایع منفذی تأثیر بگذارد. برای مثال، Page و Vennesland (۱۹۸۳) دریافتند که با جایگزینی ۱۰٪ دوده سیلیس، غلظت  $Na^+$  و  $K^+$  تقریباً ۵۰٪ و غلظت  $OH^-$  تقریباً ۷۵٪ در مایع منفذی کاهش می‌یابد. Detwiler و Fapohunda (۱۹۹۳) نتایج AASHTO T 277 را با نتایج یک اندازه‌گیری مستقیم مهاجرت یون کلراید برای بتن‌های حاوی سیمان پرتلند با یا بدون سرباره مقایسه کردند و دریافتند که نتایج بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی در AASHTO T 277 بهبودی بی‌جهت را نشان می‌دهد. آن‌ها تفاوت بین دو مجموعه از نتایج آزمایش را به تفاوت در هدایت الکتریکی به دلیل تفاوت در شیمی مایع منفذی نسبت دادند.

مواد بازدارنده خوردگی مانند کلسیم نیتريت، یون‌هایی را به مایع منفذی اضافه می‌کنند که رسانایی مایع

منفدی و شار الکتریکی عبوری را افزایش می‌دهد. شواهدی وجود دارد که کلسیم نیتريت باعث افزایش نفوذپذیری خمیره بتن می‌شود. یعنی افزایش مقادیر شار الکتریکی عبوری بر حسب کولمب ممکن است به دلیل اثرات ریزساختاری و همچنین تغییرات در شیمی مایع منفدی باشد (Ann و همکاران، ۲۰۰۶؛ Reou و Ann، ۲۰۰۸). اگر از ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) برای تأیید مخلوط‌های بتن برای استفاده در ساختوساز استفاده شود، معمولاً بتن بدون ماده بازدارنده خوردگی برای تأیید آن و سپس با ماده بازدارنده خوردگی برای ارائه یک مقدار پایه برای اهداف کنترل کیفیت آزمایش می‌شود. اندازه‌گیری دوم به‌طور قابل‌توجهی زیادتر خواهد بود.

رابطه بین هدایت الکتریکی و انتشار نیز ممکن است با فرآیند و نوع انتشار متفاوت باشد. انتشار از طریق حفره‌ها و ترک‌ها با انتشار حجمی متفاوت است؛ بنابراین وجود عیوب در بتن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر نتایج آزمایش تأثیر بگذارد. همچنین، اندازه‌گیری قبل از رسیدن به شرایط حالت پایدار انجام می‌شود (Zhang و Gjörv، ۱۹۹۱).

ارزیابی صحیح بتن‌های با کیفیت ضعیف امری دشوار است زیرا دمای آزمون‌ها با اعمال جریان افزایش و سرعت انتشار نیز افزایش می‌یابد. McGrath و Hooton (۱۹۹۹) اصلاحی را برای کاهش مدت زمان آزمایش به ۳۰ دقیقه برای رفع این مشکل پیشنهاد کردند. تشخیص بتن‌های با کیفیت از یکدیگر به دلیل اینکه کل شار الکتریکی عبوری بسیار کم است و نیز به دلیل متغیر بودن نتایج آزمایش، ممکن است دشوار باشد (Hooton، ۱۹۸۹).

ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) به دلیل بسیاری از اختلالات ذکر شده مورد انتقاد قرار گرفته است (Andrade، ۱۹۹۳؛ Feldman و همکاران، ۱۹۹۴؛ Streicher و Alexander، ۱۹۹۴؛ Shi، ۲۰۰۴).

با وجود این محدودیت‌ها، ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) سریع و آسان بوده و به گفته Hooton (۱۹۸۹)، هر خاصیتی را که اندازه‌گیری می‌کند احتمالاً با نفوذپذیری تطابق دارد. اگر به درستی تفسیر شود، می‌توان به‌طور موثر برای کنترل کیفیت در ساخت استفاده گردد (Bognacki و همکاران، ۲۰۱۰). اگرچه نباید برای نشان‌دادن تمایز دقیق بین بتن‌ها استفاده شود و نمی‌توان از آن برای مقایسه بتن‌های ساخته‌شده با مواد یا نسبت‌های مختلف مخلوط یا هر دو استفاده نمود (Shi، ۲۰۰۴).

### ۳-۱-۴-۲. حوضچه‌سازی (ASTM C1543؛ AASHTO T 259) و انتشار حجمی (ASTM C1556)

آزمایش استاندارد دیگری که گاهی اوقات مورد استفاده قرار می‌گیرد ASTM C1543 (یا AASHTO T 259) است که شامل حوضچه‌سازی بر روی سه دال بتنی با حداقل ضخامت ۷۵ میلی‌متر و سطح ۰/۳۰ مترمربع با محلول سدیم کلراید ۳ درصد به مدت ۹۰ روز است. کناره‌های دال آب‌بندی‌شده و قسمت زیرین آن در معرض محیط خشک با رطوبت نسبی ۵۰ درصد قرار دارد. در صورت تمایل، دوره‌ی قرارگیری را می‌توان تا ۶ ماه یا ۱ سال افزایش داد. در پایان دوره‌ی قرارگیری، محلول اضافی و بلورهای نمک برداشته می‌شود. آزمون‌های با ضخامت ۱۳ میلی‌متر از بتن را می‌توان در دو یا سه عمق برداشت و از نظر مقدار یون

کلراید ارزیابی کرد، که با مقدار پایه تعیین شده بر روی آزمون‌های بتنی که در معرض کلرایدهای بیرونی قرار ندارد، مقایسه می‌شود. متناوباً، دال بتنی را می‌توان بر اساس ASTM C1556 نمونه‌برداری و آزمایش کرد، که در آن یک مغزه از دال گرفته شده یا به صورت ورقه‌ای برش داده می‌شود تا نمونه‌هایی در هشت عمق به منظور تعیین ضریب انتشار کلراید ظاهری با استفاده از قانون دوم فیک به دست آید. این آزمایش را می‌توان با استفاده از نمک‌های مختلف در محلول حوضچه نیز انجام داد. توجه شود که نوع کاتیون(های) موجود بر سرعت ورود یون‌های کلراید تأثیر می‌گذارد، زیرا تعادل بار الکتریکی باید حفظ شود و انتشار کاتیون(های) مرتبط با سرعت کمتر، مانع حرکت یون‌های کلراید می‌شود.

یکی از رایج‌ترین انتقادات به استفاده از روش ASTM C1543، مدت زمان آن است. از آنجایی که آزمون‌ها باید به مدت ۱۴ روز عمل‌آوری شوند و سپس به مدت ۲۸ روز قبل از قرار گرفتن در حوضچه، خشک گردند، روش ۹۰ روزه آزمایش، ۱۱۸ روز یا بیشتر (در شرایط عمل‌آوری طولانی‌مدت) طول می‌کشد تا آزمون‌ها مورد آزمایش قرار گیرند و سپس نمونه‌ها تجزیه و تحلیل شوند. اکثر برنامه‌های آزمایش حوضچه‌سازی برای بتن‌های توانمند از یک دوره حداقل ۱۸۰ روزه استفاده می‌کنند.

اگرچه آزمایش حوضچه‌سازی یک پروفیل یک‌بعدی تقریبی از ورود یون کلراید را ارائه می‌دهد، اما این پروفیل به تنهایی بازتابی از انتشار کلراید نیست. در حالت اولیه ورود یون‌ها از طریق جذب سطحی در بتن خشک شده است. قرار گرفتن سطح زیرین در محیط رطوبت نسبی ۵۰٪ در طول آزمایش باعث انتقال بخار از جبهه مرطوب در سطح بالایی به سطح خشک زیرین می‌شود و یون‌های کلراید با انتقال موثنه نفوذ می‌کنند (Buenfeld و همکاران، ۱۹۹۵) و انتشار کلرایدها نیز صورت می‌گیرد. Hooton و McGrath (۱۹۹۹) مشاهده کردند که در حالی که هر سه فرآیند مذکور در عرشه‌های پل اتفاق می‌افتند، این آزمون در اهمیت جذب سطحی موثنه، اغراق‌آمیز است.

دوره خشک شدن ۲۸ روزه قبل از شروع حوضچه‌سازی، به ویژه برای بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی، به طور قابل توجهی ضریب انتشار ظاهری را افزایش می‌دهد (Page و Ngala، ۱۹۹۷). برای بتن‌های با کیفیت عالی، ممکن است تعیین پروفیل کلراید بر اساس یک دوره وجود حوضچه‌سازی به مدت ۹۰ روزه دشوار باشد، زیرا کلراید بسیار کمی در بتن نفوذ می‌کند. تمدید دوره وجود حوضچه‌سازی به ۱۸۰ روز و افزایش تعداد آزمون‌های گرفته شده به حل این مشکل کمک می‌کند (Hicks و Berke، ۱۹۹۲؛ Whit- and Sherman، ۱۹۹۶؛ و همکاران، ۱۹۹۶؛ Hooton و McGrath، ۱۹۹۹).

دقت نمونه‌گیری می‌تواند تفاوت قابل توجهی در نتیجه‌گیری حاصل از نتایج ایجاد نماید. McGrath و Hooton (۱۹۹۹) در تجزیه و تحلیل داده‌های خود از AASHTO T 259 (روش پیشین ASTM C1543) نشان دادند که نمونه‌برداری بی‌دقت تشخیص بین یک بتن با کیفیت مناسب که در آن غلظت زیادی از کلراید در نزدیکی سطح آن وجود دارد، و یک بتن بی‌کیفیت که در آن کلرایدها بسیار عمیق‌تر نفوذ می‌کنند را دشوار می‌سازد. دقت در نمونه‌برداری مشخص شده در ASTM C1556 از این مشکل پیشگیری می‌کند.

ASTM C1556 از برخی مشکلات مرتبط با ASTM C1543 پیشگیری می‌کند، زیرا آزمون بتن از همه طرف به جز سطح پرداخت شده آب‌بندی گردیده و قبل از قرار گرفتن در معرض محلول سدیم کلراید، با محلول آهک اشباع می‌شود. بنابراین، کلراید تنها از طریق انتشار و نه از طریق جذب سطحی به آزمون نفوذ می‌کند. سپس آزمون در محلول غلیظ (۱۶۵ گرم در لیتر) سدیم کلراید به مدت حداقل ۳۵ روز قرار می‌گیرد. زمان‌های قرارگیری طولانی‌تر برای بتن‌های بالغ، بتن‌های با نسبت  $w/cm$  کم یا بتن‌های توانمند حاوی مواد مکمل سیمانی توصیه می‌شود. در عمل، زمان قرارگیری در محلول را می‌توان تا ۹۰ روز یا بیشتر افزایش داد. همان‌طور که قبلاً بدان اشاره شد، نمونه‌برداری با استفاده از روش ASTM C1543 بسیار دقیق‌تر است. یک مغزه با قطر اسمی ۱۰۰ میلی‌متر از دال در آسیاب یا ماشین تراش قرار می‌گیرند و یک سری لایه‌های نازک آسیاب می‌شوند. پودر به دست آمده از هر لایه به‌طور جداگانه جمع‌آوری می‌شود و از نظر میزان کلراید محلول در اسید مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. ضریب انتشار ظاهری با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی برای تطبیق داده‌ها با قانون دوم فیک تعیین می‌شود.

استفاده از قانون دوم فیک برای کاهش داده‌ها روشی راحت اما بحث‌برانگیز است. Pettersson (۱۹۹۴) خاطر نشان کرد که کاربرد قانون دوم فیک، که ساده‌سازی یک معادله کلی‌تر برای توصیف انتقال یون است، به اعتبار سه فرض بستگی دارد:

(الف) مصالحی که در آن انتشار رخ می‌دهد نفوذپذیر و همگن است.

(ب) خواص مرتبط با انتشار در مصالح با زمان و تغییر غلظت ماده انتشاری تغییر پیدا نمی‌کند.

(ج) هیچ‌گونه واکنش شیمیایی و مقیدسازی فیزیکی برای ماده انتشاری مطرح نیست.

Pettersson (۱۹۹۴) علاوه بر این خاطر نشان کرد که هر سه این فرضیات در انتشار یون‌های کلراید در بتن نقض می‌شوند؛ یعنی بتن ناهمگن است، خواص انتشار آن با زمان و غلظت ماده انتشار یافته تغییر می‌کند و هر دو واکنش شیمیایی و مقیدسازی فیزیکی ممکن است رخ دهد. ASTM C1556 از عبارت «ضریب انتشار ظاهری کلراید» استفاده می‌کند تا روشن سازد که نتیجه به دست آمده یک ضریب انتشار واقعی نیست<sup>۱۳</sup>. اگرچه ASTM C1556 در برخی موارد ممکن است در زمان کمتری نسبت به ASTM C1543 انجام پذیرد، اما هنوز هم یک آزمایش طولانی بشمار می‌رود.

### ۳-۴-۲. مایعات

یک آزمایش برای سنجش جذب آب توسط بتن سخت‌شده روش مندرج در ASTM C642 است که در آن یک قطعه بتن با حجم حداقل ۳۵۰ میلی‌لیتر در گرم‌چال<sup>۱۴</sup> تا زمانی که جرم آن ثابت شود، خشک گردیده و سپس در آب غوطه‌ور می‌شود تا دوباره به جرم ثابت برسد. سپس آزمون به مدت ۵ ساعت جوشانده و اجازه داده می‌شود تا خشک گردد و دوباره جرم آن تعیین می‌شود. میزان جذب پس از غوطه‌وری و جذب

<sup>۱۳</sup> ضریب انتشار ظاهری همچنین ضریب انتشار متوسط غیر لحظه‌ای برای مدت آزمایش می‌باشد.

پس از غوطه‌وری و جوشیدن مشخص می‌گردد. این آزمایش اندازه‌گیری میزان جذب آب حجمی بتن است. باید توجه نمود که خشک کردن در گرم‌چال ممکن است باعث ایجاد ترک در آزمون شده و در نتیجه میزان جذب اندازه‌گیری شده افزایش یابد.

ASTM C1585 جذب موئینه که نرخ جذب یک سطح بتنی است را اندازه‌گیری می‌کند که اغلب بیشتر نسبت به توده بتن مورد توجه است. یک استوانه یا مغزه به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر به نحوی آماده‌سازی می‌شود تا رطوبت نسبی داخلی ۵۰ تا ۷۰ درصد داشته باشد و سپس تمام سطوح به جز یک سطح پوشش داده و آب‌بندی می‌شود. جرم آزمون ابتدا و پس از قرار گرفتن در معرض آب تعیین می‌شود. جرم در ابتدا در فواصل زمانی کوتاه و سپس در فواصل طولانی‌تر تا ۷ روز تعیین و پس از آن یک اندازه‌گیری اضافی انجام می‌شود. شیب اولیه منحنی جذب در مقابل زمان به‌عنوان نرخ جذب موئینه در نظر گرفته می‌شود.

Abbas و همکاران (۱۹۹۹) نفوذپذیری اکسیژن در بتن را که آسان‌تر از اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در بتن است اندازه‌گیری کردند. محاسبات آن‌ها بر اساس قانون داریسی بود که جریان آرام سیال را فرض می‌کند. این فرض ساده‌کننده کاملاً درست نیست، زیرا در منافذ بسیار کوچک جریان تا حدودی ماهیت مولکولی دارد. نفوذپذیری گاز با درجه اشباع بتن تغییر می‌کند بنحوی که ضریب نفوذپذیری بر اثر تفاوت رطوبت بیش از دو برابر تغییر خواهد کرد. محدودیت‌های قابل قبول در نفوذپذیری برای دوام بسته به شرایط رویارویی و الزامات عملکردی متفاوت است.<sup>۱۵</sup>

### ۳-۵. دستیابی به بتن بادوام

دستیابی به بتن بادوام برای شرایط معین رویارویی نیاز به خواص انتقال جرم مناسب برای مایعات و یون‌های مورد نظر دارد. توجه‌نمودن به تمام جنبه‌های مطلوب اجرائی بتن مهم است. با این حال، مهم‌ترین این عوامل استفاده از نسبت کم w/cm، استفاده خردمندان از مواد مکمل سیمانی، و اجرای خوب از جمله مخلوط کردن، درجاریختن، تراکم و عمل‌آوری می‌باشند. افزایش دمای عمل‌آوری می‌تواند نقش منفی در خواص انتقال در بتن داشته باشد، اما استفاده از ترکیب مناسبی از مواد سیمانی می‌تواند تا حد زیادی این اثر را کاهش دهد. بهینه‌سازی نسبت‌های مخلوط بتن باید با استفاده از فرآیند عمل‌آوری پیش‌بینی شده در اجرا و روش آزمایشی که تا حدی با شرایط رویارویی پیش‌بینی شده مرتبط باشد، انجام پذیرد. به‌ویژه، مقاومت فشاری جایگزینی برای دوام نیست. توجه مناسب به کنترل ترک‌ها نیز مهم است. از بتن یا نفوذپذیری کم مابین ترک‌ها نمی‌توان انتظار زیادی داشت. دانه‌بندی خوب سنگدانه‌ها برای به حداقل رساندن میزان خمیر، کنترل دما و شرایط رطوبت، طراحی سازه‌ای مناسب و جزئیات می‌توانند عرض ترک‌ها را به حداقل برسانند. راهنمایی‌های بیشتر از گروه تحقیقات حمل‌ونقل<sup>۱۶</sup> (۲۰۰۶) و Taylor و Detwiler (۲۰۰۳) در دسترس است.

<sup>۱۵</sup> توضیحات مترجم: آزمایش‌های هدایت الکتریکی، مقاومت الکتریکی، مهاجرت تسریع‌یافته یون‌های کلراید، جذب آب حجمی نیم ساعته و نفوذ آب تحت فشار و... نیز جهت سنجش نفوذپذیری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

# فصل ۴

یخ زدن و  
آب شدن بتن

#### ۴-۱. مقدمه

تخریب بتن در معرض یخزدگی زمانی رخ می‌دهد که بتن دارای رطوبت داخلی کافی باشد و در شرایط رویارویی محیطی مشخص یخ بزند. منبع رطوبت می‌تواند داخلی یا خارجی باشد. رطوبت داخلی آبی است که از قبل در منافذ بتن وجود داشته و توسط شرایط ترمودینامیکی، مجدداً توزیع گشته است تا درجه اشباع کافی در نقطه یخزدگی ایجاد و باعث آسیب شود. رطوبت خارجی از یک منبع بیرونی مانند بارندگی وارد بتن می‌شود. بتن خشک (معمولاً دارای رطوبت نسبی داخلی کمتر از ۷۵ تا ۸۰ درصد) معمولاً از آسیب ناشی از یخزدگی مصون است.

بتن در سنین اولیه (یا اصطلاحاً جوان) می‌تواند با یک یخزدن آسیب ببیند (بخش ۴-۲-۲). بتن به اصطلاح بالغ ممکن است قادر به تحمل چرخه‌های مکرر یخزدن و آب شدن بدون آسیب دیدن باشد. بنابراین، بتنی که به درستی عمل‌آوری شده و قبل از قرار گرفتن در معرض یخزدگی به بلوغ کافی می‌رسد، مانند بتن برای ستون‌ها یا دال‌های کف، ممکن است یخزدگی را در اثر رویارویی با یک فصل زمستان قبل از اینکه در برابر شرایط محیطی محافظت شود، تحمل کند. بتن مشابهی که به درستی عمل‌آوری نشده و در سنین اولیه در معرض شرایط یخزدگی قرار می‌گیرد، مانند پیاده‌روها و دیواره نمایان شالوده، پس از چند سال قرار گرفتن در معرض چرخه‌های مکرر یخزدن و آب شدن، امکان بروز خرابی را خواهد داشت.

شدت شرایط رویارویی باید با ترکیبی از شرایط یخ‌بندان، که شامل تعداد چرخه‌های سالیانه یخزدن به اضافه میانگین دمای پایین در طول هر چرخه است، و شرایط رطوبتی قبل از هر چرخه یخزدن، به صورت کمی بیان شود (۴-۲-۴-۴).

#### ۴-۱-۱. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های با دوام

بتن ساخته شده با سنگدانه‌ای که در برابر یخزدن و آب شدن مقاوم است، عمدتاً از طریق ایجاد هوا در مخلوط بتن، و همچنین با اقدامات حفاظتی ثانویه از طریق محدود کردن حجم نسبی آب قابل یخزدن درون بتن، در برابر آسیب محافظت می‌شود. شرح خسارت ناشی از یخزدن و آب شدن بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بادوام به همراه روش‌های محافظتی در بخش ۴-۲ آورده شده‌اند.

#### ۴-۱-۲. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مستعد به یخزدن

بتن با نسبت‌های مخلوط مناسب که عمل‌آوری کافی بر روی آن انجام شده باشد، در صورتی که حاوی سنگدانه‌ای (معمولاً سنگدانه درشت) باشد که در برابر یخزدن و آب شدن آسیب‌پذیر است، امکان آسیب دیدن بر اثر یخزدن و آب شدن را دارد. شرح آسیب در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مستعد آسیب در برابر یخزدن و آب شدن، همراه با شرح روش‌های شناسایی سنگدانه، در بخش ۴-۳ آورده شده‌اند.

## ۴-۲. حمله یخ‌بندان در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بادوام

### ۴-۲-۱. شرح آسیب ناشی از یخ‌بندان

#### ۴-۲-۱-۱. آسیب در سنین اولیه

بتن در مراحل اولیه هیدراته‌شدن معمولاً حاوی مقدار قابل توجهی آب قابل یخ‌زدن است و مقاومت کششی کمی برای تحمل فشارهای ناشی از یخ‌زدن دارد. در بتن‌هایی که در این شرایط دچار یخ‌زدگی می‌شوند، عدسی‌های یخ تقریباً موازی با سطح در معرض یخ‌زدن ایجاد می‌گردند. عدسی‌های یخی بیشتری می‌توانند در زیر سنگدانه‌های درشت ایجاد شوند. هنگامی که یخ در بتن، آب شده و هیدراته‌شدن از سر گرفته می‌شود، فضایی که قبلاً توسط عدسی‌های یخی اشغال شده بود صفحات ضعیفی را تشکیل می‌دهد که مستعد لایه‌لایه یا پوسته‌شدن سطح هستند.

### ۴-۲-۱-۲. آسیب در بتن عمل‌آوری شده

#### ۴-۲-۱-۲-۱. پوسته‌شدن سطح

رایج‌ترین شکل آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن در بتن سخت شده، پوسته‌شدن سطحی به معنی از بین رفتن خمیر و ملات در سطح بتن است. معمولاً لایه‌هایی با ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر از بین می‌روند، اما چرخه‌های مکرر یخ‌زدن و آب‌شدن می‌تواند منجر به جدا شدن مواد بیشتری شود. پوسته‌شدن سطح با استفاده از نمک‌های یخ‌زدا به میزان قابل توجهی تسریع می‌گردد. تردد خودرو یا سایر تماس‌های سطحی نیز می‌تواند با کمک به خارج شدن مواد سست شده، پوسته‌شدن را تسریع کند. پیامدهای پوسته‌شدن عبارتند از تغییر در ظاهر، تغییر در صافی سطح، و در موارد شدید، از بین رفتن پوشش بتنی روی آرماتورها.

#### ۴-۲-۱-۲-۲. آسیب داخلی

اگرچه کمتر رایج است، اما تخریب داخلی بتن به دلیل از بین بردن یکپارچگی ساختاری آن می‌تواند عواقب شدیدتری نسبت به پوسته‌شدن سطحی داشته باشد. آسیب داخلی خود را به صورت از دست دادن مقاومت در خمیر بتن نشان می‌دهد. در اجرای بتن‌های امروزی، با ایجاد یک سامانه هوای مناسب و عمل‌آوری کافی قبل از اولین رویارویی با دماهای یخ‌زدن، این نوع آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن از بین می‌رود.

### ۴-۲-۲. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان در بتن جدید (تازه)

#### ۴-۲-۲-۱. محافظت در برابر یخ‌بندان در سنین اولیه

بتن جوان باید با رعایت اقدامات پیشنهادی و رعایت حداقل دماهای توصیه شده در ACI 306R از یخ‌زدگی محافظت شود. پس از تراکم و پرداخت سطح، باید با استفاده از قالب‌های عایق، پتوهای عمل‌آوری و سایر روش‌های شرح داده شده در ACI 306R، بتن باید از سرد شدن خیلی سریع محافظت شود. سرد شدن

خیلی سریع بتن نه تنها می تواند منجر به یخزدن زود هنگام، بلکه به ترک خوردگی حرارتی نیز بی انجامد (ACI 306R، ACI 308R).

#### ۲-۲-۲-۴. حداقل میزان عمل آوری پیش از یخ بندان

عمل آوری مناسب، از جمله جلوگیری از خشک شدن بیش از حد و حفظ دمای مناسب بتن، تضمین کننده هیدراته شدن آن به اندازه کافی است که منجر به کاهش قابل توجه آب قابل انجماد می گردد. توصیه می گردد که پیش از رسیدن دمای بتن به زیر نقطه یخزدن، بتن حداقل مقاومت فشاری ۳/۵ مگاپاسکال را به دست آورد (Powers، ۱۹۶۲). هنگامی که این مقاومت به دست آید، عموماً یک دوره یخ بندان آسیب دائمی به بتن وارد نمی نماید (ACI 308R). اگر چرخه های مکرر یخزدن و آب شدن پیش بینی شود، بتن باید تا مدت کافی گرم نگه داشته شود تا حداقل مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال و ۳۲ مگاپاسکال را به ترتیب برای شرایط عدم استفاده و کاربرد نمک های یخزدا کسب نماید. مقاومت های ۲۵ و ۳۲ مگاپاسکال مقاومت های متوسطی هستند که قبل از رویارویی بتن با چرخه های مکرر یخزدن و آب شدن مورد نیاز می باشد. جدول ۱۹-۳-۲-۱ در ACI 318-14 به مقاومت مشخصه طراحی اشاره نموده است. این دو مقاومت یکسان نیستند، زیرا بتن می تواند در سنی بسیار زودتر از سن مرتبط با مقاومت مشخصه طراحی در معرض چرخه های مکرر یخزدن و آب شدن قرار گیرد.

#### ۳-۲-۴. پیشگیری از آسیب یخ بندان با طراحی مناسب

بسیاری از بتن هایی که اکنون در حال بهره برداری هستند، برای سال های متمادی در برابر چرخه های مکرر یخزدن و آب شدن مقاومت کرده اند. در حالی که برخی از این بتن ها به دلیل عدم وجود آب قابل انجماد کافی برای ایجاد خسارت آسیب ندیده اند، بیشتر آن ها به دلیل در نظر گرفتن اقدامات احتیاطی مناسب برای جلوگیری از چنین آسیبی با دوام باقی مانده اند (Mather، ۱۹۹۰). سه اقدام احتیاطی مهم برای ایجاد مقاومت در برابر یخزدن و آب شدن در بخش های ۱-۳-۲-۴ تا ۳-۳-۲-۴ مورد بحث قرار گرفته اند.

#### ۱-۳-۲-۴. کاهش آب قابل یخزدن

با کاهش میزان آب قابل یخزدن در بتن، احتمال آسیب ناشی از یخزدن و آب شدن کاهش می یابد. برای مخلوط های متعارف، این امر معمولاً با کاهش نسبت  $w/cm$  انجام می شود که حداکثر این مقدار برای شرایط معتدل برابر ۰/۵ و برای رویارویی با شرایط شدید و بسیار شدید برابر ۰/۴۵ است (جدول ۱-۳-۲-۴ الف). همچنین همراه با عمل آوری کافی جهت حصول اطمینان از حداقل مقاومت فشاری تقریباً ۲۵ مگاپاسکال قبل از رویارویی با چرخه های مکرر یخزدن و آب شدن می باشد (در صورت وجود نمک های یخزدا حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز ۳۲ مگاپاسکال است). توجه شود در مواردی که نگرانی از خوردگی آرماتور باشد، در صورت استفاده از نمک های یخزدا احتمال نیاز به نسبت  $w/cm$  کمتری خواهد بود (ACI 318-14).

اعمال محدودیت برای نسبت  $w/cm$  به حداکثر مقدار مشخص شده، در ابتدا باعث کاهش مقدار آب قابل یخزدن در بتن عمل آورنده می گردد. کسب حداقل مقاومت قبل از یخزدن باعث حصول اطمینان از مقاومت کششی کافی در خمیر شده و همچنین بخشی از حجمی که می تواند با آب قابل یخزدن در بتن اشباع شده اشغال گردد، توسط محصولات هیدراته شدن تشکیل شده کاهش می یابد.

مخلوط های امروزی بتن ممکن است حاوی مواد افزودنی شیمیایی، معدنی و مواد مکمل سیمانی باشند که در این صورت امکان کاهش مقدار آب قابل یخزدن در بتن فراهم می شود. سرباره یا پوزولان ها می توانند ساختار منافذ را در یک نسبت  $w/cm$  مشخص اصلاح نمایند و در نتیجه نسبت کمتری از تخلخل حاوی آب قابل یخزدن خواهد بود. استفاده از سرباره یا پوزولان ها تأثیر مفید اضافی در کاهش نرخ نفوذ آب در بتن را دارند. این بدان معنی است که آبی که با تبخیر یا هیدراته شدن خارج می شود، زمانی که بتن در معرض آب قرار می گیرد، کندتر جایگزین می گردد. مشاهدات میدانی متعدد نشان داده است که بر خلاف شرایط پرداخت سطح بتن توسط ماشین آلات یا سطوح قالب بندی شده، وقتی سطوح پرداخت شده با دست، در معرض نمک های یخزدا قرار می گیرند (دسته بندی قرارگیری F3a در جدول ۴-۲-۳-۱ ب)، نیاز به اعمال محدودیت هایی در استفاده از مواد مکمل سیمانی به دلیل عوامل مختلفی شامل اصلاح سامانه هوای ایجاد شده (۴-۲-۳-۲) و همچنین تغییرات جزئی در نسبت  $w/cm$  باشد. جدول ۴-۲-۳-۱ ج محدودیت های توصیه شده برای مواد سیمانی در شرایط قرارگیری F3a را نشان می دهد (Thomas, 1997).

جدول ۴-۲-۳-۱ الف - طبقه بندی شرایط یخزدن و آب شدن

شرایط	شدت	طبقه بندی شرایط قرارگیری
عدم قرارگیری بتن در معرض شرایط یخزدن و آب شدن	-	F0
بتن در معرض شرایط یخزدن و آب شدن است اما در زمان قرارگیری در معرض شرایط یخندان، بتن با احتمال کمی دارای رطوبت نزدیک به اشباع خواهد بود.*	متوسط	F1
بتن در معرض شرایط یخزدن و آب شدن است و در زمان قرارگیری در معرض شرایط یخندان، بتن با احتمال زیاد دارای رطوبت نزدیک به اشباع بوده و در معرض مواد شیمیایی یخزدا نیز نمی باشد!.	شدید	F2
بتن در معرض شرایط یخزدن و آب شدن و همچنین مواد شیمیایی یخزدا نیز می باشد.†.	خیلی شدید	F3

\* به عنوان مثال، سطوح عمودی بالاتر از سطح تجمع برف یا سطوح افقی مرتفع در مناطق محافظت شده از قرارگیری در معرض مستقیم رطوبت.

† مصادیق آن ها عبارتند از: سطوح عمودی زیر سطح تجمع برف، سطوح عمودی با قرارگیری در معرض رطوبت کافی برای اینکه بتن قبل از یخزدن نزدیک به اشباع شود، دیوارهای حائل یا سایر عناصر عمودی دارای یک وجه در معرض رطوبت، و دال روی زمین که از یخزدگی محافظت نمی شود.

‡ مثال ها عبارتند از: سطوح عمودی که ممکن است برف های آلوده به مواد شیمیایی یخزدا روی آن ها انباشته شده باشد، پیاده روها یا روسازی هایی که مواد شیمیایی یخزدا بر روی آن ها استفاده می شود، و بتن هایی که در معرض مکرر آب دریا و همچنین شرایط یخزدن و آب شدن قرار می گیرد.

جدول ۴-۲-۳-۱ ب- الزامات برای طبقه بندی شرایط یخزدن و آب شدن

محدودیت برای مواد سیمانی	میزان هوا	حداکثر نسبت w/cm <sup>†</sup>	حداقل <sup>‡</sup> ، مگاپاسکال	طبقه بندی شرایط قرار گیری
بدون محدودیت	بدون محدودیت	بدون محدودیت	بدون محدودیت	F0
بدون محدودیت <sup>‡</sup>	جدول ۴-۲-۳-۲-۴	۰/۵	۲۵	F1
بدون محدودیت <sup>‡</sup>	جدول ۴-۲-۳-۲-۴	۰/۴۵	۲۵	F2
جدول ۴-۲-۳-۲-۴ ج <sup>‡</sup>	جدول ۴-۲-۳-۲-۴	**۰/۴۵	۲۲	F3a <sup>§</sup>
بدون محدودیت <sup>‡</sup>	جدول ۴-۲-۳-۲-۴	**۰/۴۵	۲۲	F3b <sup>#</sup>

\* حداقل میانگین مقاومت فشاری که باید قبل از قرار گرفتن در معرض یخزدن و آب شدن اولیه به دست آید.

† حداکثر نسبت w/cm در بتن جهت ایجاد محدودیت کافی برای آب قابل یخزدن در بتن عمل آوری شده.

‡ جایگزینی مقادیر زیاد سیمان پرتلند با مواد سیمانی اغلب منجر به روند کسب مقاومت کندتری می شود. باید مراقب بود که عمل آوری کافی (رطوبت، دما و زمان) فراهم شود تا حداقل<sup>‡</sup> آقبل از قرار گیری در معرض یخزدن و آب شدن اولیه به دست آید. § سطوح پرداخت شده با دست.

# سطوح قالب بندی شده و پرداخت شده با ماشین آلات.

\*\* در صورت نگرانی از بروز خوردگی، ممکن است نسبت w/cm کمتری نیاز باشد (ACI 318-14).

جدول ۴-۲-۳-۱ ج - محدودیت استفاده مواد سیمانی در شرایط قرار گیری رده F3b

حداکثر درصد از کل مواد سیمانی بر حسب وزن <sup>°</sup>	مواد سیمانی
۲۵	خاکستر بادی یا دیگر پوزولان های منطبق با ASTM C618
۵۰	سرباره منطبق با ASTM C989/C989M
۱۰	دوده سیلیس منطبق با ASTM C1240
۱۵۰	مجموع خاکستر بادی یا دیگر پوزولان ها، سرباره و دوده سیلیس
۲۳۵	مجموع خاکستر بادی یا دیگر پوزولان ها و دوده سیلیس

\* کل مواد سیمانی شامل سیمان های ASTM C845/C845M، ASTM C595/595M، ASTM C150/150M و ASTM C1157/C1157M نیز می شود. حداکثر درصد باید شامل این موارد باشد: الف) خاکستر بادی یا دیگر پوزولان ها در سیمان آمیخته نوع ASTM C595/595M، IP، یا ASTM C1157/C1157M؛ ب) سرباره بکار رفته در تولید سیمان آمیخته نوع ASTM C595/595M، IS، یا ASTM C1157/C1157M؛ ج) دوده سیلیس، مطابق با استاندارد ASTM C1240، در سیمان های آمیخته.

† خاکستر بادی یا دیگر پوزولان ها و دوده سیلیس به ترتیب نباید تشکیل دهنده ی بیش از ۲۵ و ۱۰ درصد از کل وزن مواد سیمانی باشند.

برخی از محققان این فرضیه را مطرح کرده اند که ممکن است بتوان بتنی با آب قابل یخزدن آنقدر کم تولید نمود که در هنگام یخ بستن دچار آسیب نشود. Hooton (۱۹۹۳) و Pigeon (۱۹۹۴) دریافتند که هزینه و دشواری در جاریختن و پرداخت چنین بتنی با نسبت w/cm آنقدر کم، استفاده از آن را غیر عملی می سازد.

#### ۲-۳-۲-۴. سامانه حفرات هوای ایجادشده

مقاومت در برابر یخزدن و آب شدن یک مخلوط بتن با ایجاد حفرات هوای داخل بتن به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. برای دستیابی به حداکثر اثربخشی، این فضاهای خالی هوا باید به طور یکنواخت در سراسر بخش خمیری بتن توزیع شوند. فاصله آن‌ها باید به اندازه کافی نزدیک باشد تا از ایجاد فشار لازم برای شکست بتن در هنگام یخزدن جلوگیری شود.

از آنجا که فضاهای خالی، مقاومت و سختی اکثر مخلوط‌های بتن را کاهش می‌دهند، تمایل ذاتی به محدود کردن حباب هوای ایجادشده در بتن وجود دارد. با این حال، یک سامانه هوای مناسب برای ایجاد مقاومت در برابر یخزدن و آب شدن لازم است. پارامترهای خاصی که معمولاً برای ارزیابی یک سامانه حفرات هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند به همراه مقادیر حداقل (یا حداکثر) پذیرفته شده برای این مولفه‌ها در ادامه شرح داده شده‌اند (بخش‌های ۲-۳-۲-۴ تا ۲-۳-۲-۴-۴).

#### ۲-۳-۲-۴-۱. ضریب فاصله ( $\bar{L}$ )

ضریب فاصله ( $\bar{L}$ ) تقریبی از میانگین فاصله هر نقطه در خمیر سیمان تا حباب خالی هوا است. مفروضات زیر برای این پارامتر در نظر گرفته شده‌اند: حباب کروی شکل، با اندازه مساوی و به طور یکنواخت در یک شبکه مکعبی ساده در سراسر خمیر توزیع شده باشند (Powers, ۱۹۴۹). روش تعیین این ضریب در ASTM C457/C457M توضیح داده شده است. محدوده ضرایب فاصله معمولاً از ۰/۱ میلی‌متر یا کمتر تا نزدیک به ۱ میلی‌متر برای مخلوط‌هایی که حاوی حباب هوای ایجاد شده نباشند، است. حداکثر مقدار ضریب فاصله پذیرفته شده برای بتن با مقاومت مناسب در برابر یخزدن و آب شدن تقریباً برابر با ۰/۲۰ میلی‌متر است (Powers, ۱۹۵۴؛ Backstrom و همکاران، ۱۹۵۴، ۱۹۵۸b). سایر محققین (Dubovoy و همکاران، ۲۰۰۲؛ Attiogbe و همکاران، ۱۹۹۲) نشان داده‌اند که بتن‌هایی با ضرایب فاصله بیشتر از ۰/۲۰ میلی‌متر نیز ممکن است در شرایط خاص آزمایشگاهی مقاومت رضایت‌بخشی در برابر یخزدن و آب شدن از خود نشان دهند. CSA A23.1-14/CSA A23.2 ضریب فاصله متوسط کمتر از ۰/۲۳ میلی‌متر که هیچ مقدار واحدی از ۰/۲۶ میلی‌متر بیشتر نباشد را الزامی می‌داند. این حد به مقدار متوسط ۰/۲۵ میلی‌متر برای بتن با مقاومت مشخصه بیشتر از ۷۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد.

#### ۲-۳-۲-۴-۲. سطح ویژه ( $\alpha$ )

سطح ویژه ( $\alpha$ ) شاخصی از سطح در واحد حجم حفرات می‌باشد. روش تعیین این پارامتر در ASTM C457/C457M توضیح داده شده است. یک فرض اساسی در مورد سطح ویژه این است که همه حفرات کروی شکل هستند، که در نتیجه این مولفه را تنها تابعی از طول متوسط وتر می‌سازد (Powers, ۱۹۴۹). بنابراین، سطح ویژه یک شاخص مناسب برای اندازه متوسط حفرات است. با افزایش متوسط اندازه حفرات، سطح ویژه کم می‌شود. حفرات کوچک‌تر الزامات را در میزان هوای کم فراهم می‌کنند. مقدار عمومی پذیرفته شده سطح ویژه برای مقاومت در برابر یخزدن و آب شدن حداقل ۲۵ میلی‌متر مربع بر میلی‌متر مکعب

است (Powers، ۱۹۴۹)، اگرچه سایر محققان نشان داده‌اند که بتن با سطح ویژه کمتر از ۲۵ میلی متر مربع بر میلی متر مکعب نیز ممکن است مقاومت رضایت بخشی در برابر یخزدن و آب شدن در شرایط آزمایشگاهی از خود نشان دهد (Dubovoy و همکاران، ۲۰۰۲؛ Attiogbe و همکاران، ۱۹۹۲).

#### ۴-۲-۳-۳-۲-۳. ضریب Philleo ( $F'$ )

Philleo (۱۹۵۵) یک پارامتر مرتبط با حباب هوا را به عنوان ابزاری برای حذف مفروضات در نظر گرفته شده برای ضریب فاصله ایجاد کرد؛ بدین صورت که همه حباب‌های دارای اندازه و فاصله یکسان هستند. معادله او بر این فرض استوار است که اندازه و توزیع حباب‌ها به طور تصادفی بوده و رابطه‌ای بین توزیع حباب‌های هوا و درصد خمیری که در فاصله معینی از حباب‌های هوا قرار دارد، برقرار نمود. Philleo از تحقیق Wilis و Lord (۱۹۵۱) برای برقراری رابطه بین طول وتر حباب‌های هوا و میزان حباب‌ها در واحد حجم استفاده کرد. این معادله یا برای تعیین درصد خمیر محافظت شده به دلیل قرار گرفتن در یک فاصله مشخص از حباب‌های هوا یا اینکه برای تعیین فاصله‌ای از حباب‌های هوا که با درصد مشخصی از خمیر ایجاد شده، استفاده می‌گردد. این فاصله که ضریب Philleo نامیده می‌شود، اغلب با ضریب فاصله مقایسه می‌گردد. با این حال، در واقع، ضریب Philleo نسبت به توزیع واقعی حباب‌های هوا حساسیت بیشتری دارد تا به پارامترهایی نظیر میزان هوا، حجم خمیر و تعداد حباب‌هایی که بر ضریب فاصله تأثیر می‌گذارند.

این پارامتر در درجه اول به دلیل دشواری در به دست آوردن به داده‌های لازم برای محاسبه، به طور گسترده‌ای به عنوان معیار مقاومت بتن در برابر یخزدن و آب شدن پذیرفته نشده است. این داده‌ها شامل سابقه از تمام طول‌های وتر است که در یک پیمایش خطی اندازه گیری شده است (ASTM C457/C457M). با این حال، اکثر سنگ‌نگارها<sup>۱۷</sup> از روش جایگزین شمارش نقاط اصلاح شده (ASTM C457/C457M) استفاده می‌کنند که داده‌های لازم برای محاسبه این مولفه را جمع آوری نمی‌کنند. در حالی که هیچ معیار خاصی برای حداکثر مقدار، فاصله برای درصد معینی از خمیر محافظت شده، تعیین نشده است، بررسی مقدار قابل توجهی از داده‌های پیمایش خطی (ASTM C457/C457M) برای تعدادی از نمونه‌های بتنی دارای ضریب فاصله‌های تقریباً ۰/۲۰ میلی متر و مقادیر سطح ویژه تقریباً ۲۵ میلی متر مربع بر میلی متر مکعب نشان می‌دهد که حداکثر فاصله قابل قبول بین حباب هوا و ۹۰ درصد خمیر ( $P_{90}$ ) باید تقریباً ۰/۰۴ میلی متر باشد (Synder و Janssen، ۱۹۹۳، ۱۹۹۴).

#### ۴-۲-۳-۲-۴. میزان هوا

پارامترهای حباب‌های هوا که در بالا ذکر شد، در حالی که نشان‌گرهایی عالی برای محافظت در برابر یخزدن و آب شدن توسط سامانه حباب‌های هوا بشمار می‌روند، اندازه گیری آن‌ها در کارگاه دشوار است. بنابراین به طور کلی میزان کل هوا مشخص و اندازه گیری می‌شود. میزان کل هوا هم شامل حباب‌های هوای ایجاد شده و هم حباب‌های هوای بزرگ‌تر که بر اثر تراکم خارج نشده‌اند، می‌باشد.

استفاده از یک افزودنی حباب هواساز مطابق با ASTM C260/C260M می‌تواند در صورت دستیابی به میزان هوای معینی در مخلوط بتن، سامانه مناسبی از حباب‌های هوای ایجاد شده را فراهم کند. میزان واقعی هوای لازم برای اطمینان از تولید سامانه حباب‌های هوای مورد نیاز تحت تأثیر عمل اختلاط، کارایی مخلوط، ترکیب سیمان، انواع و مقادیر دیگر افزودنی‌ها و موارد دیگر قرار می‌گیرد (Whiting و Stark، ۱۹۸۳). علاوه بر این، جابجایی بتن در حین حمل و نقل، بتن‌ریزی و پرداخت بتن می‌تواند بر سامانه حباب‌های هوا تأثیر بگذارد (بخش ۴-۲-۴). میزان هوای توصیه شده برای بتن تازه در جدول ۴-۲-۳-۲ آورده شده است. این توصیه‌ها نیاز به هوای بیشتر در مخلوط‌های بتن با میزان خمیر زیادتر و حداکثر اندازه اسمی کوچک‌تر سنگدانه‌ها را همان‌طور که توسط Klieger (۱۹۵۲، ۱۹۵۶) تعیین شده، و شدت شرایط رویارویی را در نظر می‌گیرند؛ شرایط رویارویی شدیدتر، احتمال آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن را افزایش می‌دهد و بنابراین محافظت بیشتری را میطلبد. مقادیر نشان داده شده توصیه‌های کلی هستند. شرایط محلی و تجربه در خصوص مخلوط‌های خاص، افزودنی‌ها و روش‌های ساخت می‌تواند شماری دیگر را دیکته نمایند.

دستیابی به میزان هوای کل مشخص شده در جدول ۴-۲-۳-۲-۴ همواره محافظت در برابر یخ‌بندان خمیر را تضمین نمی‌کند. در عوض، یک مخلوط باید حداقل و حداکثر مقادیر برای پارامترهای حباب‌های هوا که قبلاً بحث شد را دارا باشد. در بیشتر موارد، حداقل مقادیر میزان هوا از جدول ۴-۲-۳-۲-۴ به پارامترهای حباب‌های هوا مورد نیاز خواهد انجامید.

جدول ۴-۲-۳-۲-۴- میزان هوا پیشنهادی

میزان هوا، %		حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها، میلی‌متر
شرایط قرارگیری F3 و F2	شرایط قرارگیری F1	
۷/۵	۷	۹/۵
۷	۷	۱۲/۵
۷	۶/۵	۱۹
۶/۵	۶/۵	۲۵
۶/۵	۶	۳۷/۵
۶	۶	۵۰
۵/۵	۵	۷۵

\* بازه تغییرات میزان هوا در محل اجرا برابر ۱/۵٪ پیشنهاد شده است. توصیه‌های میزان هوا بر اساس ۱۸ درصد هوا در بخش خمیری بتن یا یک افزودنی حباب هواساز بر پایه رزین وینسول<sup>۱۸</sup> است (برگرفته از تجزیه و تحلیل تحقیق Klieger (۱۹۵۲)). نسبت‌های مخلوط استفاده شده برای تعیین این توصیه‌ها بر اساس راهنمایی ACI 211.1 برای سنگدانه‌های درشت شکسته همراه با حداکثر مقادیر w/cm از جدول ۴-۲-۳-۲-۴ ب برای تعیین میزان هوا، می‌باشند. مخلوط‌هایی که از سنگدانه‌های گرد گوشه استفاده می‌کنند، به دلیل میزان خمیر کمتر ناشی از سنگدانه‌های گرد، تقریباً ۱٪ هوای کمتری نیاز دارند<sup>۱۹</sup>.

<sup>18</sup> Vinsol resin

<sup>19</sup> توضیحات مترجم: بنابراین در بتن خودتراکم یا هر بتن دیگر که حجم خمیر بیشتری دارد، درصد هوای بیشتری مورد نیاز است و همچنین در بتن‌هایی با حجم خمیر کم، درصد هوای کمتری لازم است.

#### ۴-۲-۳-۳. جزئیات طراحی

از جزئیات فیزیکی که امکان خیس شدن مکرر یا خشک‌شدن محدود سطوح بتنی را فراهم می‌کند باید اجتناب شود. نمونه‌هایی از این موارد عبارتند از تخلیه ناودان‌های سقف در پیاده‌روها و اعضای سازه‌ای که مستقیماً در زیر اتصالات آب بندی نشده دال پل‌ها قرار دارند. باید مراقب بود که همیشه زهکشی مناسب رواناب از نواحی مسطح با روش‌هایی مانند سطوح شیبدار که شیب آن معمولاً ۲ درصد است، فراهم گردد. در صورت احتمال وجود نمک‌های یخزدا یا سایر مواد شیمیایی مهاجم در رواناب، برای جلوگیری از افزایش خطر آسیب به سطوح بتنی اقدامات احتیاطی ویژه‌ای باید انجام پذیرد.

همچنین باید به سازه‌هایی مانند مخازن آب توجه نمود که در آن‌ها امکان تماس آب با وجهی دور از یخزدن فراهم می‌باشد. در بسیاری از موارد، نرخ تبخیر در خارج از مخزن از سرعتی که آب می‌تواند از دیواره مخزن برای جبران نمودن تبخیر عبور کند، بیشتر می‌شود. در این موارد، مقدار آب قابل یخزدن در بخش‌هایی از بتن که یخ می‌زند، کمتر از درجه اشباع بحرانی خواهد بود. با این حال، در برخی موارد، مهاجرت آب به سطح یخزدن می‌تواند از نرخ تبخیر فراتر رود و منجر به آسیب احتمالی ناشی از یخزدن و آب‌شدن شود. در آب و هوای بسیار سرد، یخ‌بندان می‌تواند از میان دیوار بتنی گسترش یابد و منجر به آسیب شدید شود. سرعت کم انتقال رطوبت و در نظر گرفتن عمق یخزدن در طراحی این نوع سازه‌ها ضروری است (ACI 350).

#### ۴-۲-۴. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان با اجرای مناسب

اگر سامانه حباب‌های هوا یا مقدار آب قابل یخزدن در طول ساخت‌وساز تحت تأثیر عوامل نامطلوب قرار گیرند، بتن با نسبت‌های مخلوط مناسب همچنان می‌تواند در اثر یخزدن و آب‌شدن آسیب بیند. اثرات روش‌های اجرا بر حفظ کیفیت مخلوط بتن در بخش‌های ۴-۲-۴ تا ۴-۳-۴ شرح داده شده‌اند.

#### ۴-۲-۴-۱. حمل و نقل و درجاریختن

حباب‌های هوا که محافظت در برابر آسیب ناشی از یخزدن و آب‌شدن را فراهم می‌کنند در طول اختلاط ایجاد می‌شوند (Whiting و Stark، ۱۹۸۳). افزودنی‌های حباب‌هواساز حباب‌هایی را که در حین اختلاط تولید می‌شوند تثبیت می‌کنند، اما آن‌ها را تولید نمی‌کنند. بنابراین، اختلاط در تشکیل و توزیع حباب‌ها در سراسر مخلوط نقش مهمی دارد. پس از تحویل و تخلیه بتن، تعداد، حجم و توزیع اندازه حباب‌ها به عمل اختلاط و میزانی که ترکیب خاصی از مواد برای تولید، تثبیت و حفظ حباب‌ها عمل کرده است، بستگی دارد.

سامانه حباب‌های هوا در بتن تازه در هنگام بتن‌ریزی به عوامل بسیاری از جمله نوع و عملکرد مخلوط کن، مدت زمان اختلاط، سرعت اختلاط (rpm)، زمان حمل، حجم پیمانانه ساخت و وضعیت کلی تجهیزات اختلاط حساس خواهد بود. این عوامل بر زمان مورد نیاز برای تثبیت حباب‌ها برای مواد افزودنی حباب‌هواساز تأثیر می‌گذارند. افزودنی‌های حباب‌هواساز با عملکرد سریع ممکن است حتی با دوره‌های اختلاط

کوتاه یا زمان‌های حمل کوتاه عملکرد خوبی داشته باشند، در حالی که افزودنی‌های با عملکرد کند با اختلاط یا زمان حمل طولانی‌تر عملکرد بهتری خواهند داشت. میزان ایجاد هوا در بتن تازه حین اختلاط به تنش برشی، غلتیدن یا عمل درهم‌شکنی بتن در خود مخلوط‌کن بستگی دارد. این عمل به اسلامپ بتن و تمیزی و کارایی تیغه‌های مخلوط‌کن بستگی دارد. هوای موجود در بتن با اختلاط مداوم به حباب‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و توسط مواد افزودنی حباب‌هواساز تثبیت می‌شود، بنابراین از دست رفتن هوا به حداقل می‌رسد. بلافاصله قبل از تخلیه، بتن تازه مخلوط‌شده حاوی حباب‌های هوا با توزیع گسترده در اندازه‌ها و با اثرگذاری‌های متفاوت از نظر ایجاد مقاومت در برابر یخ‌زدگی است، که همگی ناشی از گیر کردن یا محبوس شدن هوا در حین اختلاط است (Mielenz و همکاران، ۱۹۸۵ a,b و Backstrom و همکاران، ۱۹۵۸ a,b).

بتن اغلب با پمپ کردن آن از کامیون مخلوط‌کن در قالب ریخته می‌شود. پیشرفت در فناوری پمپ کردن منجر به افزایش مسافت، ارتفاع بالا رفتن و نرخ تحویل شده است. این پیشرفت‌ها با افزایش ظرفیت فشار پمپ‌ها همراه بود که در این میان فشارهایی در محدوده ۲ تا ۳/۵ مگاپاسکال نسبتاً رایج است (Cooke، ۱۹۹۰). متأسفانه، زمانی که میزان هوای اندازه‌گیری شده پس از پمپ کردن با میزان هوای قبل از پمپ کردن یکسان نبود، نگرانی‌هایی ایجاد شد. در بیشتر موارد، میزان هوا پس از پمپ کردن کاهش یافته بود، اما در برخی موارد این مقدار افزایش یافت (Cooke، ۱۹۹۰؛ Dyer، ۱۹۹۱؛ Whiting و Nagi، ۱۹۹۸). از دست دادن احتمالی هوای ایجاد شده می‌تواند یک نگرانی عمده برای بتن در معرض شرایط یخ‌زدن و آب‌شدن شدید باشد.

پمپ کردن بتن شامل فعالیت‌های متعددی است که می‌توانند به تغییر در میزان هوای بتن بیانجامند. در حین پمپ کردن، بتن از طریق یک شبکه توری در قیف پمپ سقوط می‌کند، تحت فشار از طریق یک لوله با قطر نسبتاً کوچک عبور می‌نماید و از طریق یک سری خم‌ها حرکت می‌کند و تغییراتی در ارتفاع و جنس لوله، که عموماً از فولاد به لاستیک است، را تجربه می‌نماید. سپس هنگام خروج از لوله از زیر فشار خارج شده و اغلب تا فاصله‌ای به داخل قالب سقوط می‌کند. پمپ کردن ممکن است پیوسته یا در زمان‌های مختلف قطع شود. این توالی رویدادها، جداسازی فرآیندهایی که باعث از دست دادن یا افزایش هوا می‌شوند را مشکل می‌سازد.

سازوکارهای متعددی برای توضیح تغییر میزان هوا که گاهی اوقات هنگام پمپ کردن بتن رخ می‌دهد، پیشنهاد شده است. در حین پمپ کردن، در خط لوله امکان تشکیل خلاء، به خصوص در سرعت پمپ کردن کم که بخش طولانی پمپ کردن در سرازیری قرار دارد، وجود دارد که این امر باعث بزرگ شدن حباب‌ها و خارج شدن حفرات هوا می‌شود. همچنین حفرات هوا ممکن است زمانی که بتن از میان توری در قیف پمپ سقوط می‌کند یا زمانی که پس از خروج از خط لوله پمپ به داخل قالب می‌ریزد، از بین برود (Yin-gling و همکاران، ۱۹۹۲؛ Janssen و همکاران، ۱۹۹۵). در حالی که تغییرات در سامانه حباب‌های هوا در موارد متعدد ثبت شده است (Whiting و Nagi، ۱۹۹۸؛ Janssen و همکاران، ۱۹۹۵؛ Pleau و همکاران، ۱۹۹۵)، شواهدی از کاهش مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن شناسایی نشده است (Elkey و همکاران، ۱۹۹۳؛ Whiting و Nagi، ۱۹۹۸).

#### ۴-۲-۴-۲. تراکم

هنگام تخلیه بتن تازه، حباب‌های هوا در بتن محبوس می‌شوند. در حین پُر کردن قالب‌ها، تشکیل حباب‌های هوا عملاً اجتناب‌ناپذیر است. هنگامی که در حین اختلاط چنین حفرات بزرگ هوایی تشکیل شوند، اختلاط مداوم آن‌ها را به اندازه‌های کوچک‌تر شکسته و در مخلوط پخش می‌کند. پس از در قالب ریختن بتن چنین فرصتی وجود ندارد. به همین دلیل لازم است تعداد و اندازه این حفرات محبوس‌شده در مخلوط توسط لرزاندن (ویریه کردن) کاهش یابد.

با انجام عمل لرزاندن، دو هدف با توجه به خارج‌شدن حباب‌های هوا در بتن تازه دنبال می‌شود. اول، ارتعاش می‌تواند بتن را به همان روشی که زلزله انواع خاصی از خاک‌ها را روان‌گرا می‌کند، به‌صورت مایع در آورد. بسیاری از حباب‌های بزرگ و شناور هوا که در مخلوط نیمه مایع محبوس شده‌اند، می‌توانند از طریق مخلوط موقتاً مایع شده، به سطح برسند. ثانیاً، ارتعاش، فشار چرخ‌های را در بتن ایجاد می‌کند که این امر فشار آب اطراف حباب‌های هوا را به‌صورت موضعی افزایش و سپس کاهش می‌دهد. این امر باعث می‌شود که حباب‌ها در بسامد لرزاندن فشرده و آزادسازی شوند (Young، ۱۹۸۹). حباب‌های هوا وقتی مجبور به فشرده‌سازی و آزادسازی در بسامد بحرانی (که با اندازه حفرات تغییر می‌کند) شوند، می‌شکنند؛ هر چه حباب بزرگ‌تر باشد، بسامد بحرانی کمتری خواهد داشت. برعکس، هر چه بسامد ارتعاش بیشتر باشد، حباب کوچک‌تر می‌تواند شکسته شود. Simon و همکاران (۱۹۹۲) نشان دادند که لرزاندن با بسامد ۶۰۰۰ ارتعاش در دقیقه شروع به شکستن حباب‌هایی در محدوده اندازه هوای به اصطلاح هوازایی شده می‌کند. همچنین شواهد نشان می‌دهد که بخشی از هوای ناشی از حباب‌های شکسته‌شده از بتن خارج می‌شود، در حالی که باقی آن در سایر حباب‌های هوا در مخلوط گنجانده می‌شود.

زمان لازم است تا انرژی واردشده توسط لرزاندنده به مایع‌شدن بتن اطراف بیانجامد و فشار آب به نحوی افزایش یابد تا حباب‌های هوا فشرده شوند. همچنین طول می‌کشد تا حباب‌ها به سطح برسند، بشکنند یا هر دو رخ بدهد. به این دلایل، لرزش متناوب کوتاه ممکن است تأثیر کمی به‌طور کلی بر روی بتن یا سامانه حباب هوا داشته باشد. برای دستورالعمل‌های مربوط به روش‌های لرزاندن مناسب به ACI 309R مراجعه شود. به‌طور خلاصه، لرزاندن بتن تازه سامانه حباب‌های هوا را از طریق از بین بردن حباب‌های هوای بزرگ‌تر و حفظ حفرات کوچک‌تر، اصلاح می‌کند. تمایز دقیق بین اندازه حباب‌های خارج شده و حباب‌هایی که در جای خود باقی مانده‌اند به مخلوط بتن و بسامد، مدت و شدت ارتعاش بستگی دارد.

#### ۴-۲-۴-۳. پرداخت سطح

پس از ریختن بتن در جا و تراکم آن، هنوز در حین پرداخت سطح امکان اصلاح حباب‌های هوا در سطح بتن تازه و در نتیجه حباب‌های هوا در بتن سخت شده وجود دارد. اعمال مکرر یک ابزار پرداخت می‌تواند حباب‌ها را به هم متصل کند و در نتیجه تعداد حباب‌های کمتر اما اندازه بزرگ‌تر ایجاد شود. میزان هوای بتن در سطح می‌تواند با پرداخت بیش از حد کاهش یابد؛ این امر به این معنی است که دستکاری بیش از حد

سطح بتن می‌تواند مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن را کاهش دهد. این مورد مخصوصاً در مواردی مطرح است که سطح را در حالی که هنوز با آب ناشی از آب‌انداختن بتن پوشانده شده است، پرداخت نمود و یا برای آسان‌تر کردن پرداخت، از آب اضافی استفاده شده باشد. پرداخت به همراه آب اضافی آزاد روی سطح نه تنها با افزایش نسبت  $w/cm$  به صورت موضعی آن سطح را ضعیف می‌کند، بلکه تداخل را نیز افزایش می‌دهد. هنگامی که این امر با کاهش موضعی درصد هوا همراه شود، احتمالاً مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. Thomas (۱۹۹۷) دریافت که این امر به ویژه برای بتن پرداخت شده با دست که دارای مقادیر زیادی از مواد مکمل سیمانی (۵۰٪ خاکستر بادی نوع F) است، صادق می‌باشد. نواحی ریخته و پرداخت شده توسط ماشین آلات از همان نوع بتن آسیب پوسته شدن را نشان ندادند.

برای دال‌های بتنی، مشخص شده است که ماله کشی زیاد (لیسه‌ای) بتن هوازائی شده، پتانسیل ایجاد تاول یا لایه‌لایه شدن در سطح را بوجود می‌آورد (Tarr، ACI 302.1R، ACI 301، Famy و ۲۰۰۸). از این رو، طبق نشریه ACI 301، برای دال‌هایی که ماله کشی زیاد (لیسه‌ای) می‌شوند، بتن نباید حاوی مواد حباب‌هواساز یا دارای میزان هوای کل بیش از ۳ درصد باشند.

#### ۴-۲-۴. عمل آوری

عمل آوری تحت عنوان حفظ رطوبت و دمای رضایت‌بخش در بتن در مراحل اولیه آن به طوری که امکان ایجاد خواص مورد نظر فراهم شود، تعریف می‌گردد (ACI 308R). به طور کلی، با ادامه عمل آوری، مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن افزایش می‌یابد زیرا باعث بهبود ریزساختار، کاهش تداخل و انتقال هیدرولیکی در بتن می‌شود. در نتیجه، بتنی به دست می‌آید که کمتر به درجه اشباع بحرانی خواهد رسید. عمل آوری باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری و کششی بتن می‌شود که این به نوبه خود باعث افزایش مقاومت در برابر فشار ناشی از یخ‌بندان می‌گردد. این ویژگی‌ها با هم ترکیب می‌گردند و بتنی را تولید می‌کنند که کمتر مستعد آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن است. با این حال، زمانی که بتن در آب و هوایی که در آن خطر یخ‌زدگی وجود داشته ریخته می‌شود، موضوع پیچیده‌تر می‌گردد. در این شرایط، تلاش برای عمل آوری بتن برای بهبود کلی دوام آن می‌تواند با این واقعیت تضاد داشته باشد که عمل آوری می‌تواند خطر اشباع شدن بتن را در هنگام قرار گرفتن در معرض یخ‌زدن اولیه افزایش دهد. به طور کلی پذیرفته شده است که بتن با میزان هوای مناسب می‌تواند یک چرخه یخ‌بندان را زمانی که مقاومت فشاری برابر با  $\frac{3}{5}$  مگاپاسکال دارد، و چرخه های یخ‌زدن و آب‌شدن مکرر را هنگامی که مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال را کسب نماید، تحمل کند. این بدان معنی است که فرآیند عمل آوری برای حفظ رطوبت در جهت بهبود کیفیت بتن، و همچنین اقداماتی برای جلوگیری از یخ‌زدن زود هنگام، بایستی انجام پذیرد (ACI 308R، ACI 306R).

#### ۴-۲-۵. پیشگیری از آسیب یخ‌بندان در بتن‌های موجود فاقد سامانه

##### حباب‌های هوای مناسب

گاهی اوقات با بتنی که فاقد سامانه حباب‌های هوای مناسب برای محافظت در برابر شرایط رویارویی پیش‌بینی شده است، مواجه می‌شویم. محافظت از بتن در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدن و آب شدن مستلزم خشک نگه داشتن آن است. Powers و Brownyard (۱۹۴۷) محاسبات ترمودینامیکی را ارائه کردند تا نشان دهند بتن خشک شده در دمای اتاق و با رطوبت نسبی ۸۵ درصد، فاقد آب قابل یخ‌زدن در دمای ۱۸- درجه سلسیوس می‌باشد. بنابراین، بتن خشک شده با رطوبت نسبی داخلی کمتر از حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد، به ندرت، و یا هرگز، حاوی آب قابل یخ‌زدن خواهد بود.

#### ۴-۲-۵-۱. آب‌بندکننده‌ها

بتنی که به اندازه کافی خشک شده است را گاه می‌توان با آب‌بند نمودن سطح آن بوسیله نوعی سامانه مانعی محافظ جهت جلوگیری از ورود مجدد رطوبت، خشک نگه داشت. دال روی زمین و سازه‌های مشابه نیز به یک کندکننده بخار در زیر بتن نیاز دارد تا حرکت آب و ورود آن به داخل بتن به صورت مایع یا بخار را از سطح زیرین کاهش دهد. جزئیات سامانه‌های مانعی محافظ مختلف را می‌توان در ACI 515.2R یافت. کندکننده‌های بخار برای استفاده در زیر دال‌ها در ACI 302.1R مورد بحث قرار گرفته‌اند.

در بسیاری از موارد، همه طرف‌های یک عضو بتنی جهت اعمال آب‌بندی قابل دسترسی نیستند. باید مراقب بود که سطح آب‌بندی شده مانع از تبخیر رطوبتی که ممکن است از سطوح آب‌بندی نشده وارد شده باشد، نگردد. به عنوان مثال می‌توان به آب‌بندی سطح بالایی یک دال روی زمین اشاره کرد. آب‌بندکننده می‌تواند تبخیر رطوبت ورودی به دال از وجه پایینی را محدود نماید. بتن ممکن است به حالت مرطوبتر از زمانی برسد که آب‌بندی نشده بود. آب‌بندکننده‌های نفوذپذیر در برابر بخار، که نفوذ آب مایع را محدود می‌نمایند و اجازه تبخیر رطوبت از سطح آب‌بندی شده را می‌دهند، باید برای کاربرد در شرایط خاص ارزیابی شوند.

#### ۴-۲-۵-۲. زهکشی و دیگر روش‌ها

اگر به حذف آب از نواحی اطراف بتن توجه کافی شود، اغلب می‌توان رطوبت موجود در بتن را به اندازه مناسب محدود نمود تا احتمال آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب شدن در آن کاهش یابد. در حالی که روش‌های کاهش رطوبت عموماً برای کاربردهای خاص هستند، نمونه‌های موجود در بخش‌های ۴-۲-۵-۲ تا ۴-۲-۵-۳ ارائه شده‌اند.

#### ۴-۲-۵-۲-۱. زهکشی

آبی که بر روی سطح بتنی جمع می‌شود، می‌تواند به میزان قابل توجهی باعث افزایش رطوبت در بتن گردد. با ایجاد زهکشی مناسب برای جلوگیری از تجمع آب، آب جذب شده در بتن را می‌توان به حداقل رساند.

#### ۴-۲-۵-۲-۴. نگهداری

طراحی‌هایی که زهکشی سریع آب از سطوح بتنی را فراهم می‌آوردند، با نگهداری ضعیف شکست خواهند خورد. به‌عنوان مثال، تجمع آب روی یک دال بتنی به دلیل مسدودشدن زهکش که توسط برگ‌ها ایجاد می‌شود. طراحی مناسب باید با نگهداری کافی پشتیبانی شود. در مواقع دیگر، نگهداری نادرست یا سایر فعالیت‌ها می‌تواند منجر به تجمع غیرضروری آب شود. برف رانده‌شده از سطح یک پیاده‌رو به کنار یک دیوار بتنی می‌تواند منجر به تجمع رطوبت در دیوار شود. همان‌طور که برف در کناره دیوار ذوب می‌شود، توده برف باقی مانده می‌تواند به‌عنوان یک سد عمل نموده و آب را در مقابل دیوار نگه دارد. سطح این دیوار عمودی که معمولاً جذب رطوبت کمی دارد، می‌تواند به اندازه کافی برف ذوب‌شده را جذب کند تا منجر به آسیب ناشی از یخ‌زدگی بعدی شود.

#### ۴-۲-۵-۳-۲-۴. تغییر جهت دادن جریان آب

خروجی‌هایی که آب را از روی دال بتنی تخلیه می‌کنند، می‌توانند به گونه‌ای هدایت شوند که رواناب روی بتن جریان پیدا نکند. این امر می‌تواند رطوبت در معرض سطح را به اندازه کافی کاهش دهد تا آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن کاهش یابد.

#### ۴-۲-۶-۲-۴. تئوری‌های آسیب ناشی از یخ‌بندان

خرابی در بتن در اثر یخ‌زدن و آب‌شدن به‌صورت آسیب داخلی یا سطحی رخ می‌دهد (Cordon، ۱۹۶۶). از لحاظ تاریخی، سامانه منافذ موئینه خمیر سیمان، کانون توجه اکثر تحقیقات بوده است. در مورد سازوکارهای علت آسیب در خمیر سیمان، اتفاق نظر وجود ندارد. این آسیب به افزایش فشار هیدرولیکی ناشی از دورشدن آب از جبهه یخ‌زدن، اختلاف فشار اسمزی که آب را به سمت مراکز یخ‌زدن هدایت می‌کند، پتانسیل‌های فشار بخار و ترکیبی از این سازوکارها نسبت داده شده است (Powers، ۱۹۴۵، ۱۹۵۴، ۱۹۵۵، ۱۹۷۵؛ Powers و Helmuth، ۱۹۵۶؛ Litvan و Helmuth، ۱۹۷۲؛ Penttala، ۱۹۹۸؛ Setzer، ۱۹۹۹، ۲۰۰۲؛ Scherer و Velenza، ۲۰۰۵؛ Coussy و Monteiro، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹). این موارد با جزئیات بیشتر در بخش‌های بعدی توضیح داده شده‌اند.

#### ۴-۲-۱-۶-۲-۴. دفع رطوبت

Powers عنوان کرد که یخ هسته‌زایی می‌نماید، در منافذ موئینه رشد می‌کند و آب اضافی در این فضاها را از محل‌های یخ‌زدن پس می‌زند یا خارج می‌کند. بر اثر بیرون رانده‌شدن آب و به دلیل نفوذپذیری نسبتاً کم خمیر سیمان، تنش‌های هیدرولیکی ایجاد می‌شود و افزایش می‌یابد. فاصله از مرز حباب، درجه اشباع، و نرخ یخ‌زدن می‌تواند بر بزرگی تنش هیدرولیکی ایجاد شده تأثیر بگذارد (Cordon، ۱۹۶۶؛ Powers، ۱۹۴۵، ۱۹۵۴، ۱۹۵۵).

#### ۴-۲-۶-۲. فشار اسمزی

زمانی که آزمایش‌ها شواهد قابل توجهی مبنی بر اینکه که رطوبت به جای دورشدن از مراکز یخ‌زدگی، به سوی آن‌ها حرکت می‌کند را نشان دادند، مفهوم فشار هیدرولیک اصلاح شد (Powers و Helmuth، ۱۹۵۶؛ a Helmuth، ۱۹۶۰؛ Powers، ۱۹۷۵). Marchand و همکاران (۱۹۹۵) و Penttala (۱۹۹۸) بیان کردند که تمام آب موجود در منافذ موئینه به دلیل کشش سطحی و قطر کوچک منافذ حاوی آن قابل یخ‌زدن نیست. آب در بزرگ‌ترین منافذ پیش از منافذ کوچک‌تر منجمد می‌شود. هنگامی که آب در منافذ بزرگ‌تر یخ می‌زند، غلظت نمک‌های محلول به صورت موضعی افزایش می‌یابد و باعث ایجاد اختلاف غلظت در محلول منفذی می‌شود. تصور می‌شود که برای کاهش این اختلاف، آب از حفرات کوچک‌تر به سوی حفرات بزرگ‌تر حرکت کند. باور بر آن است که جریان تشکیل شده باعث ایجاد آسیب شود. Litvan (۱۹۷۲) نظریه مشابهی بر مبنای استدلال‌های ترمودینامیکی ارائه کرد، اما به جای اختلاف غلظت نمک، بر اختلاف‌های فشار بخار بین آب فوق سرد و یخ تاکید دارد. Penttala (۱۹۹۸)، Scherer و Valenza (۲۰۰۵)، Setzer (۱۹۹۹)، Coussy و Monteiro (۲۰۰۸، ۲۰۰۹) نظریه‌های دفع رطوبت و فشار اسمزی را برای در نظر گرفتن سرعت یخ‌زدن، درجه اشباع، پراکنندگی حباب‌های هوا و ریزساختار خمیر سیمان، ادغام نموده‌اند. این نظریه‌ها موافق آنند که نیروهایی ناشی از حرکت آب از منافذ کوچک به سمت منافذ بزرگ، به خمیر وارد می‌شود. Scherer و Valenza (۲۰۰۵) می‌افزایند که وقتی منافذ بزرگ‌تر با یخ پر می‌شوند، فشار محلی ناشی از تبلور یخ مورد انتظار است. این فشارها با شکل و انحنا منافذ افزایش خواهد یافت. ترکیبی از این عوامل منجر به آسیب اولیه می‌شود.

#### ۴-۲-۶-۳. رشد عدسی‌های یخ

در حالی که سازوکارهای قبلی آسیب در نمونه‌های کوچک و اشباع را که به سرعت و به صورت چرخ‌های در آزمایشگاه یخ‌زده شده‌اند را توصیف می‌کنند، تجمع تدریجی یخ در ترک‌ها در طول دوره‌هایی از دمای پایدار قدری کمتر از صفر درجه سلسیوس ممکن است به طور کلی به عنوان اثر غالب موجب خرابی بیشتر در بتن‌های بیشتر آسیدیده یا دارای ریزترک گردد (Litvan، ۱۹۷۸). یک مدل نظری برای پیش‌بینی آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن در سنگ توسعه یافت و به صورت موفقیت‌آمیز به اثبات رسید (Walder و Hallet، ۱۹۸۵؛ Hallet و همکاران، ۱۹۹۱). در این مدل، حمله یخ‌بندان در جامدات همگن و متخلخل، به صورت رخ‌دادن در یک سامانه باز در نظر گرفته می‌شود که در آن ریزترک‌ها از داخل توسط تجمع یخ تحت فشار قرار می‌گیرند و با مهاجرت رطوبت از طریق مایع یا بخار، تشدید می‌گردد که این مورد به نوبه خود توسط اختلاف‌های انرژی آزاد حرارتی القا می‌شود. این مدل انباشتگی یخ، که به عنوان مدل جداسازی یخ نیز شناخته می‌شود، با مطالعه Gilpin (۱۹۸۰) در مورد اثرات یخ‌زدن در محیط‌های متخلخل که در خاک کاربرد دارد، مطابقت می‌نماید.

#### ۴-۲-۶-۴. پیامدهای سازوکارهای آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن

عدم قطعیت و دیدگاه‌های مخالف در مورد سازوکارهای اساسی حاکم بر یخ‌بندان در بتن، تلاش‌ها برای توسعه آزمایش‌های مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن بتن را تضعیف می‌کند. چندین روش آزمایش مبتنی بر چرخه‌های نسبتاً سریع یخ‌زدن و آب‌شدن در محیط‌های اشباع و خشک، استفاده شده‌اند. در آمریکای شمالی، آزمایش چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، ASTM C666/C666M، برای تعیین دوام مخلوط‌های بتن در برابر آسیب‌های داخلی استفاده می‌شود. ASTM C672/C672M<sup>۱۰</sup> دوام در برابر پوسته‌شدن را ارزیابی می‌کند. آزمایش اخیر متکی بر طبقه‌بندی‌های بصری است که گاهی اوقات با اندازه‌گیری‌های کاهش جرم تکمیل می‌شود. این آزمایش‌ها، مانند برخی از آزمایش‌های پیش از خود، به دلیل عدم ایجاد شرایط مناسب واقعی مورد انتقاد قرار می‌گیرند. آزمایش‌ها چرخه‌هایی بین دماهای حدی را با سرعت بسیار زیاد اعمال می‌کنند. آزمایش (RILEM TC 117-FDC 1996) CDF تکرارپذیری بیشتری را فراهم ساخته و در رابطه با اندازه‌گیری‌های پوسته‌شدن، بیشتر به‌صورت کمی است. Hallett و همکاران (۱۹۹۱) پیشنهاد نمودند که آزمایش‌های مرسوم فقط راهنمایی‌های محدودی را برای درک فرآیندهای حاکم بر یخ‌بندان در محیط‌های کارگاهی واقعی که تغییرات حرارتی یا هیدرولیکی بسیار متفاوت از تغییرات آزمایشگاهی دارند، ارائه می‌دهد. برون‌یابی از آزمایش‌های یخ‌زدن و آب‌شدن روزانه یا مکرر به شرایط واقعی باید با احتیاط بیشتری انجام شود زیرا ممکن است فرآیندهای فیزیکی متفاوتی بر هر کدام حاکم باشد. این وضعیت مستلزم در نظر گرفتن آزمایش‌های تشخیصی یخ‌زدن و آب‌شدن است که در آن بتوان هر دو فرآیند را به‌طور سیستماتیک تشخیص داد و بررسی نمود. این امر همچنین بیانگر آن است که در برقراری ارتباط میان نتایج آزمایش‌های استاندارد آزمایشگاهی با ضرایب فاصله و سایر معیارهای طراحی برای مقاومت مؤثر در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن در زمان بهره‌برداری، به احتیاط بسیار بیشتری نیاز می‌باشد. برخی از مخلوط‌های بتن در آزمایش‌های آزمایشگاهی پذیرفته می‌شوند اما عملکرد خوبی در عمل ندارند، در حالی که برخی دیگر در آزمایش‌ها مردود می‌شوند ولی عملکرد کاملاً رضایت‌بخشی در عمل دارند. این امر احتمالاً به این دلیل است که آزمایش‌های آسیب داخلی و پوسته‌شدن ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن، همه متغیرهای مهم را بررسی نمی‌کنند. Stark (a1989) نشان داد که نقش بالقوه چندین عامل کلیدی در آسیب ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن در نظر گرفته نشده‌اند؛ این‌ها شامل بزرگی و مدت قرارگیری در معرض اختلاف‌های دما و رطوبت پایدار و زمان تجمعی رویارویی در محدوده دمایی مشخص می‌باشند.

#### ۴-۳. یخ‌بندان در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های کم‌دوام

خرابی ناشی از یخ‌زدن و آب‌شدن بتن با نسبت‌های مخلوط مناسب و هوازایی شده، ساخته شده با سنگدانه‌های مستعد آسیب‌پذیری در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن اغلب به‌عنوان ترک‌خوردگی D شکل نامیده می‌شود.

<sup>۱۰</sup> توضیحات مترجم: این آزمایش باطل اعلام شده است. در EN 12390-9 آزمایش نسبتاً جدیدی ارائه شده است که بصری نیست و کمی می‌باشد و شبیه آن قبلاً در پیوسته‌های EN 1340 و EN 1339 و EN 1338 وجود داشته است.

بسیاری از انواع سنگدانه‌های درشت تحت عنوان حساس به ترک‌خوردگی D شکل شناسایی شده‌اند، در حالی که سایر منابع از همان نوع سنگ به این موضوع حساس نبودند. تصور می‌شود که ساختار منافذ سنگدانه درشت، عامل اصلی ایجاد حساسیت به ترک‌خوردگی D شکل باشد. توضیحات ظاهری و توسعه ترک‌خوردگی D شکل در بخش ۴-۳-۱ ارائه گردیده، در حالی که پیشگیری از ترک‌خوردگی D شکل در ساخت‌وساز جدید در بخش ۴-۳-۲ پوشش داده شده است. کاهش شدت ترک‌خوردگی D شکل در ساخت‌وسازهای موجود در بخش ۴-۳-۳ آورده شده است. نظریه‌ها و سازوکارهای ترک‌خوردگی D شکل به‌طور مفصل در بخش ۴-۳-۴ پوشش داده شده‌اند.

#### ۴-۳-۱. شرح ترک‌خوردگی D شکل

##### ۴-۳-۱-۱. شرح کلی

ترک‌خوردگی D شکل به‌صورت ترک‌هایی که از داخل سنگدانه درشت و ملات بتن عبور می‌کند، مشخص می‌شود. در نواحی دور از ترک‌ها، ملات و سنگدانه‌های درشت مستحکم بوده و هیچ نشانه‌ای از خرابی نشان نمی‌دهند. توسعه ترک‌خوردگی D شکل نیاز به رطوبت قابل توجه و چرخه‌های مکرر یخ‌زدن و آب‌شدن دارد. در نتیجه، ترک‌خوردگی D شکل معمولاً در نزدیکی درزها، ترک‌ها، لبه‌ها و گوشه‌هایی که در آن‌ها نفوذ رطوبت از بیش از یک سطح وارد می‌شود، ظاهر می‌گردد. ترک‌خوردگی D شکل عموماً به‌صورت مجموعه‌ای از ترک‌های تقریباً موازی با منبع رطوبت اولیه ظاهر می‌شود.

##### ۴-۳-۱-۲. عملیات سطحی<sup>۲۱</sup>

رایج‌ترین ظهور ترک‌خوردگی D شکل در سطوح صاف مانند روسازی بزرگراه‌ها، پارکینگ‌ها و پیاده‌روها است. این‌ها نواحی هستند که غالباً به راحتی دارای رطوبت ناشی از رواناب بارش، از جهت‌های مختلف در درزها و شکاف‌ها، و در زیر دال هستند؛ مگر اینکه یک کندکننده بخار موثر در زیر آن تعبیه شده باشد. اغلب، اولین ظهور ترک‌خوردگی D شکل در تقاطع درزهای عرضی و طولی در روسازی است. در این مکان‌ها، رطوبت اغلب در بالا و پایین وجه عمودی درز موجود است.

در آب و هوای سرد که به اندازه کافی برای یخ‌زدن کل ضخامت دال بتنی کافی است، ترک‌خوردگی D شکل معمولاً از زیر شروع می‌شود و تا سطح رویی پیشرفت می‌کند (Schwartz, ۱۹۸۷). این امر احتمالاً به دلیل در دسترس بودن بیشتر رطوبت در کف دال‌ها است. تا زمانی که ترک‌های آشکار روی سطح ظاهر شوند، خرابی می‌تواند ۰/۵ متر یا بیشتر به دور از محل درز گسترش یابد.

ظاهر ترک‌خوردگی D شکل در آب‌وهوای ملایم‌تر تا حدودی متفاوت است زیرا بتن هرگز در تمام ضخامت خود یخ نمی‌زند. ترک‌خوردگی D شکل در این موارد اغلب به‌صورت بیرون‌پریدن کم‌عمق در درزها ظاهر شده و بررسی دقیق‌تر، ترک‌های مشخص موازی با درز را نشان می‌دهد.

### ۴-۳-۱-۳. ساخت وساز عمودی

اگرچه بسیار کمتر رایج است، ترک خوردگی D شکل می‌تواند در ساخت وساز عمودی نیز ظاهر شود. اگر از سنگدانه‌های مستعد در ساخت وساز استفاده شود، جزئیات ساخت، روش‌های نگهداری یا هر دو مورد که اجازه تجمع رطوبت در گوشه‌های دیوارها یا ستون‌ها را می‌دهند، می‌توانند منجر به ترک خوردگی D شکل گردند. نمونه‌ای از این روش‌های نگهداری در یک ساختمان، پارو کردن برف پیاده‌رو و جمع کردن آن در کنار دیواره شالوده بتنی است.

### ۴-۳-۲. پیشگیری از ترک خوردگی D شکل

#### ۴-۳-۲-۱. نقش نسبت‌های مخلوط

عامل اولیه در یک مخلوط بتن که به ایجاد ترک خوردگی D شکل منجر می‌شود، مستعد بودن سنگدانه درشت است، در حالی که سامانه حباب‌های هوا و  $w/cm$  تأثیر کمی دارند یا بی‌تأثیرند (Schwartz, 1987؛ دپارتمان بزرگراه و حمل‌ونقل میسوری<sup>۲۲</sup>، ۱۹۹۰). اکثر سنگدانه‌های درشتی که تحت عنوان مستعد به ترک خوردگی D شکل شناسایی شده‌اند، سنگ‌های رسوبی هستند، اگرچه بسیاری از سنگ‌های رسوبی مستعد ترک خوردگی D نمی‌باشند. سنگ‌های آذرین معمولاً مستعد ترک خوردگی D شکل نیستند مگر اینکه سنگ‌ها دچار هوازدگی شده باشند. سنگ‌های هوازده احتمالاً به دلیل مقاومت کم و احتمال شکسته شدن در جابجایی، برای تولید بتن نامطلوب هستند. بیشتر سنگ‌های دگرگونی نسبت به ترک خوردگی D شکل حساس نمی‌باشند. با این حال، برخی از سنگ‌های رسوبی که تا حدی دگرگون شده‌اند، تحت عنوان مستعد شناسایی شده‌اند (Stark, 1976).

حداکثر اندازه سنگدانه نیز در توسعه ترک خوردگی D شکل مهم است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کاهش حداکثر اندازه اسمی سنگدانه باعث کاهش استعداد آن می‌شود (Klieger و Stark, 1973؛ Klieger و همکاران، 1974؛ Stark, 1976؛ دپارتمان بزرگراه و حمل‌ونقل میسوری، 1990؛ Almond و Janssen, 1991). متأسفانه، کاهش حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها می‌تواند عوارض جانبی نامطلوبی از جمله افزایش نیاز به خمیر برای حفظ کارایی در یک سطح مقاومت معین، افزایش استعداد جمع شدن ناشی از خشک شدن، و کاهش انتقال بار در درز در روسازی‌ها را به همراه داشته باشد.

#### ۴-۳-۲-۲. اهمیت شناسایی سنگدانه

توسعه کامل ترک خوردگی D شکل می‌تواند به سال‌های زیادی نیاز داشته باشد. در طی این مدت و قبل از شناسایی مشکل، حجم زیادی از بتن مستعد خرابی می‌تواند بکار برده شود. این امر، همراه با تنوع طبیعی منابع سنگدانه، منجر به نیاز به شناسایی سنگدانه‌های مستعد به ترک خوردگی D شکل قبل از استفاده در بتن و رویارویی با رطوبت و چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن می‌گردد.

<sup>22</sup> Missouri Highway and Transportation Department

ترک خوردگی D شکل از دهه ۱۹۳۰ شناخته شده است (Stark و Klieger، ۱۹۷۳). طیف گسترده‌ای از آزمایش‌ها برای شناسایی سنگدانه‌های مستعد توسعه یافته‌اند. رایج‌ترین روش برای شناسایی سنگدانه‌های مستعد، آزمایش ASTM C666/C666M است. نمونه‌های بتنی ساخته شده با سنگدانه مورد نظر در معرض چرخه‌های مکرر یخزدن و آب شدن در آزمایشگاه قرار گرفتند و از نظر افزایش طول یا کاهش ضریب ارتجاعی دینامیکی ارزیابی می‌شوند.

#### ۴-۳-۲-۳. اصلاح سنگدانه

روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد سنگدانه‌های مستعد پیشنهاد شده‌اند. محدود کردن حداکثر اندازه اسمی در بخش ۴,۳,۲,۱ مورد بحث قرار گرفت. Schwartz (۱۹۸۷) روش‌های دیگر را خلاصه کرده که از آن جمله می‌توان به پوشش دادن سنگدانه‌ها برای جلوگیری از جذب آب، جداسازی در محیط مایع پرچگال، و مخلوط کردن سنگدانه‌های بادوام با سنگدانه‌های کم‌دوام برای کاهش حساسیت به ترک خوردگی D شکل اشاره نمود. وی گزارش داد که کاهش اندازه سنگدانه موثرترین روش برای کاهش استعداد به ترک خوردگی D شکل است.

#### ۴-۳-۳. کاهش دادن ترک خوردگی D شکل موجود

مقدار قابل توجهی از بتن حاوی سنگدانه‌های مستعد به ترک خوردگی D شکل در جایی استفاده شده‌اند که در معرض رطوبت و چرخه‌های یخزدن و آب شدن قرار می‌گیرد. این امر به ویژه در مورد روسازی‌های بتنی صادق است. خرابی درز مرتبط با ترک خوردگی D شکل می‌تواند به طور قابل توجهی طول عمر چنین روسازی‌هایی را کاهش دهد. بتن با فاصله دورتر از ۰/۵ متر از درزها اغلب هیچ خرابی یا کاهش مقاومتی را نشان نمی‌دهد.

یک روسازی بتنی معمولی می‌تواند دارای درزهای عرضی با فاصله ۴ متر یا بیشتر باشد. با وقوع ترک خوردگی D شکل به میزان کمتر از ۰/۵ متر در هر انتهای یک دال بتنی، بیشتر بخش‌های روسازی بتنی در شرایط خوبی قرار دارند. در حالی که به نظر می‌رسد جایگزینی بتن فرسوده در نزدیکی درزها با یک وصله عمقی روشی مقرون به صرفه برای افزایش طول عمر باشد، ترک خوردگی D شکل اغلب در کمتر از ۵ سال مجدداً در درزهای تازه ایجاد شده در مجاورت وصله‌ها ظاهر می‌شود. بنابراین، ترک خوردگی D شکل مانند قبل، اما در تعداد درزهای دو برابر بیشتر، ادامه می‌یابد (Snyder و Janssen، ۱۹۹۴).

#### ۴-۳-۳-۱. کلیات

سه شرط برای ایجاد ترک خوردگی D شکل ضروری است: بتن ساخته شده با سنگدانه مستعد، رطوبت و چرخه‌های یخزدن و آب شدن. از آنجایی که تغییر و اصلاح سنگدانه‌ها در بتن موجود دشوار و عملاً غیرممکن است، برای کاهش ترک خوردگی D شکل باید از یخزدن و آب شدن جلوگیری یا منبع رطوبت حذف گردد.

#### ۴-۳-۳-۲. پیشگیری از یخ‌بندان

معمولاً در سطح روسازی‌های بتنی، روکش‌های آسفالتی جهت بهبود وضعیت روسازی و افزایش عمر آن اجرا می‌شود. در اقلیم‌هایی که در زمستان خیلی سرد نمی‌شوند، می‌توان از یخ‌زدگی در روسازی بتنی که حاوی سنگدانه‌های مستعد به ترک‌خوردگی D شکل است، با پوشاندن آن با ضخامت کافی از آسفالت جلوگیری نمود. Janssen و همکاران (۱۹۸۶) دریافتند که باید از یخ‌زدن در بتن تقریباً به‌طور کامل جلوگیری شود تا پیشرفت ترک‌خوردگی D شکل متوقف شود. در حالی که صرف کاهش تعداد چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن بوسیله روکش در واقع می‌تواند سرعت ترک‌خوردگی D شکل را به دلیل افزایش استعداد مهاجرت رطوبت در طول یخ‌زدن کندتر تسریع کند. برای جلوگیری از یخ‌زدگی در سطح روسازی بتنی برای عرض‌های جغرافیایی مرکزی ایالات متحده، بیش از ۱۵۰ میلی‌متر روکش آسفالتی مورد نیاز است. استفاده از روکش آسفالتی برای جلوگیری از یخ‌زدگی در بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مستعد به ترک‌خوردگی D شکل احتمالاً روش موثری برای کاهش این خرابی در این شرایط نخواهد بود (Janssen و همکاران، ۱۹۸۶؛ Snyder و Janssen، ۱۹۹۴).

#### ۴-۳-۳-۳. کاهش رطوبت

استفاده از آب‌بندکننده‌ها در انتهای برش‌خورده مقاطع روسازی‌های بتنی موجود (بخش ۴-۳-۳) قبل از قراردادن وصله‌ها می‌تواند حرکت جانبی رطوبت را به داخل بتن کاهش دهد. این امر می‌تواند زمان ظهور ترک‌خوردگی D شکل در بتن وصله‌شده را افزایش دهد. این روش در یک مقطع روسازی بتنی با ترک‌خوردگی D شکل در اوهایو در سال ۱۹۹۲ انجام شد (Snyder و Janssen، ۱۹۹۴). اگرچه بررسی‌های آزمایشگاهی اولیه نشان داد که اعمال آب‌بندها شروع مجدد ترک‌خوردگی D شکل را به تاخیر می‌اندازد، نظارت در محل نشان داد که ترک‌خوردگی D شکل پس از ۶ سال دوباره ظاهر گردید (Janssen، ۲۰۰۱).

#### ۴-۳-۴. تئوری‌ها و سازوکارهای ترک‌خوردگی D شکل

تئوری‌های آسیب به بتن در اثر یخ‌زدن و آب‌شدن بیشتر در بخش ۴-۲-۵ مورد بحث قرار گرفته است. به استثنای نقش جاب‌های هوا در محافظت از بتن در برابر خرابی، همین تئوری‌ها به‌طور کلی در مورد ترک‌خوردگی D شکل کاربرد دارند. بنابراین، این بخش بر ویژگی‌های خاصی از سنگدانه‌ها تمرکز می‌کند که آن‌ها را برخلاف سایر مصالح از همان نوع، مستعد می‌نماید.

#### ۴-۳-۴-۱. اندازه و توزیع اندازه حفرات

Kanecuji و همکاران (۱۹۸۰) همبستگی کیفی بین دوام بتن و توزیع اندازه حفرات سنگدانه‌ها را مشاهده کردند. در حجم ثابتی از کل حفرات، سنگدانه‌هایی با منافذ کوچک‌تر باعث مقاومت کمتر در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن می‌شوند. برای سنگدانه‌هایی با اندازه حفرات غالباً مشابه، حجم حفرات بیشتر باعث مقاومت کمتر در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن می‌گردد. با برقراری همبستگی میان داده‌های عملکرد کارگاهی سنگدانه‌ها

و نتایج مطالعات تخلخل سنجی جیوه، Marks و Dubberke (۱۹۸۲) دریافتند که به استثنای یک مورد، سنگدانه‌های مستعد به ترک خوردگی D شکل غالباً اندازه آن‌ها حفرات بین ۰/۴ تا ۰/۲ میکرومتر داشته در حالی که سنگدانه‌هایی با سوابق عملکردی خوب تا عالی اکثراً دارای منافذ بزرگ‌تر از این مقادیر بودند.

#### ۴-۳-۴-۲. اثر نمک‌های یخزدا

Dubberke و Marks (۱۹۸۵) به این نکته اشاره کرده‌اند که هنگامی که روسازی‌های حاوی سنگدانه‌های مستعد در معرض نمک یخزدا قرار می‌گیرند، کاهش مقاومت در برابر ترک خوردگی D شکل برای برخی سنگدانه‌ها مشاهده می‌شود. در خصوص سایر سنگدانه‌های مورد بررسی آن‌ها هیچ تأثیری مشاهده نمودند. توضیح احتمالی تغییر در ساختار منافذ به دلیل خراشاندن<sup>۲۳</sup> دیواره‌های منافذ توسط نمک است. چنین اقدامی برای سنگدانه‌های حاوی کلسیت شناسایی شده است (Gillott, ۱۹۷۸). این اثر احتمالی نمک یخزدا باید هنگام استفاده از داده‌های سوابق عملکردی برای ارزیابی استعداد ترک خوردگی D شکل یک سنگدانه مورد توجه قرار گیرد. عملکرد رضایت بخش در روسازی که هرگز نمک یخزدایی نداشته، ممکن است عملکردهای مشابهی را که در آن نمک‌های یخزدا استفاده می‌گردد را تضمین نکند.

# فصل ۵

واکنش‌های  
سنگدانه

این فصل به ارائه دستورالعمل هایی برای به حداقل رساندن خطر وقوع خرابی در ساخت و ساز بتنی ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه ها<sup>۲۴</sup> (AAR) در سنگدانه های واکنش زا قلیایی کربناتی<sup>۲۵</sup> و قلیایی سیلیسی<sup>۲۶</sup> و همچنین اکسید شدن معدنی آهن سولفید<sup>۲۷</sup> می پردازد. روش هایی برای ارزیابی سنگدانه ها و انتخاب معیارهایی مناسب برای کنترل انبساط مورد بحث قرار می گیرد. اطلاعات دقیق تر در مورد انواع واکنش، سازو کارهای واکنش، انواع سنگ های واکنش زا، روش های آزمایش سنگدانه ها و اقدامات پیش گیرانه در ACI 221.1R موجود می باشد.

### ۵-۱. واکنش قلیایی سنگدانه

واکنش قلیایی کربناتی (ACR) برای اولین بار در ایالت انتاریو کانادا در اواخر دهه ۱۹۵۰ مشاهده شد (Swenson, ۱۹۵۷). ACR بین هیدروکسیدهای قلیایی و برخی سنگ های آهک دولومیتی رسی<sup>۲۸</sup> (حاوی خاک رس) رخ می دهد. این واکنش با انبساط سریع و ترک خوردگی گسترده بتن آسیب دیده مشخص می شود. سازه هایی که تحت اثر ACR قرار دارند، عموماً در طول ۵ سال پس از ساخت اولیه، آثار مخربی از خود نشان می دهند. تنها راه برای جلوگیری از ACR استخراج گزینشی قرضه سنگدانه ها می باشد تا بدین طریق از ساخت و ساز با سنگدانه هایی که مستعد واکنش زایی قلیایی کربناتی می باشند، پیشگیری به عمل آید. این نوع واکنش به برخی از مناطق جغرافیایی محدود می شود.

واکنش قلیایی سیلیسی (ASR) اولین بار در اواخر دهه ۱۹۳۰ مورد شناسایی قرار گرفت و برای نخستین بار در سال ۱۹۴۰ توسط Thomas Stanton از دپارتمان بزرگراه کالیفرنیا<sup>۲۹</sup> گزارش شد (Stanton, a,b ۱۹۴۰). از زمان شناسایی اولیه، ASR به عنوان یک عامل اصلی خرابی زودرس بتن در سراسر جهان شناخته شده است. از زمان انجام اولین تحقیقات توسط Thomas Stanton تا کنون روش های آزمایش متعددی برای ارزیابی واکنش زایی سنگدانه ها توسعه یافته اند. اخیراً تلاش ها بر توسعه روش های دقیق آزمایش برای تعیین میزان اثربخشی اقدامات کاهش متمرکز شده اند. تمرکز زیادی بر روی کاربرد مواد جایگزین سیمان و همچنین مواد افزودنی شیمیایی (یعنی نمک های لیتیوم مانند LiNO<sub>3</sub>) قرار گرفته است. قابلیت اطمینان این روش ها متفاوت است و تا حدی به ماهیت سنگدانه مورد آزمایش، اندازه نمونه و محیط آزمایش بستگی دارد.

معیارهای تفسیر نتایج آزمون در استانداردهای ملی مختلف، متفاوت است. این معیارها همچنین با توجه به محدودیت های گوناگونی که توسط موسسات محلی و مقامات ایالتی، دولتی یا استانی مختلف اتخاذ می شوند، در بین ایالت ها یا استان ها و در داخل آن ها متفاوت می باشند. روش های رسیدگی به انبساط ناشی از واکنش قلیایی نیز برای مناطق مختلف، متفاوت است. بسیاری از مشخصات فنی اجازه استفاده از سنگدانه های واکنش زا را نمی دهند. هنگامی که سنگدانه های واکنش زا قلیایی سیلیسی در بتن استفاده می شوند، اقدامات

<sup>24</sup> Alkali-aggregate reaction

<sup>25</sup> Alkali- carbonate reactive aggregates

<sup>26</sup> Alkali-silica reactive aggregates

<sup>27</sup> Sulfide mineral oxidation

<sup>28</sup> Argillaceous

<sup>29</sup> California Highway Department

پیشگیران‌های شامل محدود کردن مقدار قلیایی در بتن، استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی، سرباره، دوده سیلیس، یا پوزولان‌های طبیعی، استفاده از لیتوم نیترات و یا ترکیب این روش‌ها توصیه شده است. همان‌طور که در بخش ۵-۱-۵-۱ اشاره شده است، سابقه عملکرد میدانی مطلوب یک سنگدانه می‌تواند موثرترین روش برای ارزیابی استعداد آن سنگدانه در ایجاد AAR باشد. در مواردی که بتوان چنین عملکرد میدانی مطلوبی را برای سنگدانه‌ها نشان داد، سنگدانه‌ها می‌توانند برای استفاده در بتن بدون آزمایش AAR پذیرفته شوند، مشروط بر اینکه مواد مشابه در فرآیند اختلاط گنجانده شوند (به‌عنوان مثال، بتن با مقدار قلیایی کمتر یا مساوی با مقدار قلیایی بتن مطلوب به کار برده شده). در صورتی که چنین داده‌هایی از عملکرد میدانی سنگدانه‌ها در اختیار نباشد، سنگدانه‌ها باید تحت آزمایش‌های آزمایشگاهی مناسب قرار گیرند تا درجه واکنش‌زایی آن‌ها مشخص شود. اگر نتایج چنین آزمایش‌های آزمایشگاهی استعداد واکنش‌زایی با قلیایی را برای سنگدانه‌ها نشان ندهد، سنگدانه‌ها می‌توانند بدون اقدامات احتیاطی مورد استفاده قرار گیرند. سنگدانه‌هایی که از خود استعداد ASR را نشان می‌دهند می‌توانند در بتن استفاده شوند، مشروط بر اینکه اقدامات مناسب برای کنترل خطر انبساط اجرا شود. از سنگدانه‌های مستعد ACR به‌طور کلی اجتناب می‌شود، زیرا هیچ اقدام کنترلی شناخته شده‌ای برای کنترل موثر انبساط در بتن با آن سنگدانه‌ها وجود ندارد.

#### ۵-۱-۱. انواع واکنش‌ها

تا کنون دو نوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها شناخته شده است: (۱) واکنش قلیایی کرناتی (ACR) و (۲) واکنش قلیایی سیلیسی ACR. (ASR) با استفاده از سنگ‌های آهک دولومیتی رسی خاص ایجاد می‌شود. موارد تایید شده ACR به چند مکان محدود در آمریکای شمالی محدود شده است<sup>۳۰</sup> به‌طور عمده در ویرجینیا<sup>۳۱</sup>، کنتاکی<sup>۳۲</sup>، ایندیانا<sup>۳۳</sup>، آیووا<sup>۳۴</sup>، ایلینوی<sup>۳۵</sup>، و در ایالت انتاریو کانادا. ACR شامل واکنش بین یک منبع قلیایی و سنگ‌های آهک دولومیتی رسی خاص می‌باشد. ASR مشخصاً متفاوت است و از واکنش بین هیدروکسیدهای قلیایی در مایع منفذی و اشکال خاصی از سیلیس فعال موجود در برخی از انواع سنگدانه‌های سیلیسی یا کرناتی، از جمله سنگدانه‌های آهکی که حاوی اجزای سیلیسی نیز هستند، به‌دست می‌آید. جدول ۵-۱-۱ فهرستی از چندین نوع سنگ واکنش‌زا متداول و اشکال معدنی که مستعد ASR هستند را ارائه می‌کند.

ASR بسیار متداولتر از ACR می‌باشد و در دو گروه طبقه‌بندی می‌شود: (۱) واکنش‌هایی که شامل مواد سیلیسی با بلور ضعیف یا ناپایدار هستند. (۲) واکنش‌های مربوط به انواع خاصی از کوارتز. از منظر مهندسی، تمایز اصلی بین این دو دسته ASR شامل زمان شروع انبساط و ترک‌خوردگی و مدت زمان واکنش مشاهده شده در عمل است. واکنش‌های مربوط به مواد سیلیسی بلوری ضعیف و ناپایدار، که گاهی اوقات به‌عنوان ASR کلاسیک شناخته می‌شوند، با زمان نسبتاً کوتاهی تا شروع ترک‌خوردگی مشخص می‌شوند (ترک‌خوردگی معمولاً در طول ۵ تا ۱۰ سال رخ می‌دهد)، در حالی که ظهور واکنش‌های حاوی مواد معدنی کوارتز معمولاً خیلی بیشتر طول می‌کشد، اگرچه ممکن است واکنش برای چندین دهه ادامه یابد.

جدول ۵-۱-۱- نمونه‌هایی از انواع سنگ‌ها و کانی‌های مستعد ASR.

سنگ واکنش‌زا	کانی‌های واکنش‌زا
شیست رسی	اوپال
ماسه سنگ	تریدیمیت <sup>۳۶</sup>
سنگ کربناته سیلیسی شده	کریستوبالیت <sup>۳۷</sup>
چرت <sup>۳۸</sup>	شیشه آتشفشانی
فلینت <sup>۳۹</sup>	کوارتز نهانبلور (یا ریز بلور) <sup>۴۰</sup>
کوارتزیت <sup>۴۱</sup>	کوارتز کرنش یافته <sup>۴۲</sup>
کوارتز آرنایت <sup>۴۳</sup>	
گنایس <sup>۴۴</sup>	
آرژیلیت <sup>۴۵</sup>	
گرانیت	
گری واک <sup>۴۶</sup>	
لای سنگ <sup>۴۷</sup>	
آرنایت	
آرکوز <sup>۴۸</sup>	
هورنفلس <sup>۴۹</sup>	

- 
- 36 Tridymite
  - 37 Cristobalite
  - 38 Chert
  - 39 Flint
  - 40 Flint Cryptocrystalline (or microcrystalline) quartz
  - 41 Quartzite
  - 42 Strained quartz
  - 43 Quartz-arenite
  - 44 Gneiss
  - 45 Argillite
  - 46 Greywacke
  - 47 Siltstone
  - 48 Arkose
  - 49 Hornfels

### ۲-۱-۵. زمینه واکنش قلیایی کربناتی (ACR)

ACR بین هیدروکسیدهای قلیایی و سنگ‌های آهک دولومیتی رسی خاص رخ می‌دهد که با زمین‌های از کانی‌های ریز کلسیت و رس همراه با لوزی‌های دولومیت پراکنده<sup>۵۰</sup> مشخص می‌شود. این واکنش به صورت انبساط سریع و ترک خوردگی گسترده در بتن آشکار می‌گردد و این ترک خوردگی در سازه‌های تحت تاثیر ACR معمولاً در طول ۵ سال پدیدار می‌شود. اگرچه در مورد سازوکارهای دقیق مورد بحث اتفاق نظر وجود ندارد، اما به طور کلی توافق شده است که این واکنش با دولومیت‌زدایی همراه است.



کربنات قلیایی + بروسیت + کلسیت → هیدروکسید قلیایی + دولومیت

در رابطه فوق R نشان‌دهنده سدیم (Na) یا پتاسیم (K) می‌باشد. اما از آنجایی که این واکنش منجر به کاهش حجم جامد می‌گردد، انبساط باید به یک سازوکار دیگری نسبت داده شود. چندین نظریه برای توضیح سازوکار انبساط ارائه شده است (Gillott و Swenson، ۱۹۶۴؛ Tang و همکاران، ۱۹۸۷؛ Fournier و Bérubé، ۲۰۰۰) که عبارتند از:

الف) فشارهای هیدرولیکی ناشی از مهاجرت مولکول‌های آب و یون‌های قلیایی به فضاهای محدود خمیره کلسیت یا رس در اطراف لوزی‌های دولومیت

ب) جذب یون‌های قلیایی و مولکول‌های آب بر روی سطوح کانی‌های رسی فعال پراکنده در اطراف دانه‌های دولومیت

ج) رشد و بازآرایی محصولات دولومیت‌زدایی (یعنی بروسیت و کلسیت) کربنات قلیایی تولید شده در واکنش دولومیت‌زدایی ممکن است با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان به شرح زیر واکنش دهد:



در نتیجه قلیایی‌ها برای واکنش بیشتر «دوباره تولید» می‌شوند. بنابراین، به شرطی که قلیایی کافی برای شروع واکنش وجود داشته باشد، فرآیند ممکن است مستقل از مقدار قلیایی موجود در بتن ادامه یابد. این موضوع می‌تواند توضیح دهد که چرا سیمان‌ها با مقدار قلیایی کم در کنترل واکنش مخرب موثر نیستند (Folliard و Thomas، ۲۰۰۷).

### ۳-۱-۵. زمینه واکنش قلیایی سیلیسی (ASR)

ASR یک عامل شناخته‌شده‌ی خرابی بتن برای بیش از ۷۰ سال بوده است. از زمان کشف آن در اواخر دهه ۱۹۳۰ (Stanton، a,b ۱۹۴۰)، ASR به‌عنوان یک عامل خرابی زودرس بتن در سراسر جهان شناخته شده است. اگرچه عواملی که منجر به واکنش مخرب قلیایی سیلیسی می‌شوند معمولاً مورد توافق هستند،

<sup>50</sup> Scattered dolomite rhombohedra

اما سازوکاری که توسط آن ژل قلیایی سیلیسی باعث انبساط و متعاقباً ترک خوردن در بتن می‌شود هنوز به صورت کامل شناخته نشده است.

ASR نتیجه یک واکنش شیمیایی است که در آن یون‌های هیدروکسیل به گونه‌های سیلیسی در سنگدانه‌های خاص حمله می‌کنند. این حمله سیلیس را آزاد می‌کند که سپس با مواد قلیایی ( $K^+$  و  $Na^+$ ) و با مقادیر کمتری از کلسیم ( $Ca^{++}$ ) که در مایع منفذی بتن وجود دارد ترکیب می‌شود تا تعادل بار الکتریکی را حفظ کند. سپس ژل قلیایی سیلیسی حاصل، آب را جذب می‌کند و منبسط می‌شود که ممکن است منجر به ترک خوردن سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و در نهایت خمیره بتن شود. به طور کلی پذیرفته شده است که برای ایجاد خرابی ناشی از ASR در بتن، سه جزء مورد نیاز است: قلیایی کافی، سیلیس واکنش‌زا و رطوبت کافی.

### ۵-۱-۳-۱. قلیاها

قلیاها ( $K^+$  و  $Na^+$ ) معمولاً توسط سیمان پرتلند تأمین می‌شوند. با این حال، مواد جایگزین سیمان؛ مواد افزودنی شیمیایی؛ و منابع خارجی مانند آب دریا، نمک‌های یخ‌زدا و مواد شیمیایی ضدیخ نیز می‌توانند به قلیائیت مایع منفذی کمک نمایند. گونه‌های خاصی از سنگدانه‌ها، به ویژه آن‌هایی که حاوی فلدسپات هستند، ممکن است قلیاها را در مایع منفذی منتشر کنند (Bérubé و همکاران، ۲۰۰۲). مقدار قلیایی در سیمان

معمولاً به صورت اکسید سدیم معادل بیان می‌شود که نوشته می‌شود:  $Na_2O_{eq}$

برای تعیین اکسید سدیم معادل در سیمان پرتلند از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658K_2O \quad (۵-۱-۳)$$

که در آن  $Na_2O_{eq}$  اکسید سدیم معادل کل بر حسب درصد جرمی،  $Na_2O$  میزان اکسید سدیم بر حسب درصد جرمی و  $K_2O$  میزان اکسید پتاسیم بر حسب درصد جرمی است.

غلظت قلیاها در سیمان پرتلند معمولاً بین ۰/۲ تا ۱/۳ درصد  $Na_2O_{eq}$  است که در مقایسه با سایر ترکیبات و اکسیدها نسبتاً کم است. تحقیقات اولیه بر روی ASR نشان داد که بعید است انبساط ناشی از ASR زمانی که درصد قلیاها در سیمان کمتر از ۰/۶ درصد  $Na_2O_{eq}$  باشد، اتفاق بیفتد (Stanton، ۱۹۴۰). این رویکرد از آن زمان به عنوان یک راهکار کاهش برای محدود کردن ASR در بتن جدید استفاده شده است. با این حال، مشخص شده است که کاهش درصد سهم قلیایی‌های سیمان پرتلند، ASR را برای همه انواع سنگدانه‌های واکنش‌زا به طور موثر کاهش نمی‌دهد، زیرا مقدار قلیایی کل بتن (یا بار قلیایی) را محدود نمی‌کند. این مورد به این دلیل است که در مایع منفذی بتن، قلیاها در محلول تفکیک می‌شوند و  $Na^+$  و  $K^+$  باقی می‌مانند که باید با غلظت معادل یون‌های هیدروکسیل ( $OH^-$ ) متعادل شوند تا تعادل بار الکتریکی حفظ شود. افزایش غلظت قلیاهای تفکیک شده در مایع منفذی بتن به طور موثر غلظت یون‌های هیدروکسیل را افزایش می‌دهد که به نوبه خود باعث افزایش pH در مایع منفذی می‌گردد. همان‌طور که در ۵-۱-۳-۴ اشاره شده است، این افزایش pH ناشی از افزایش یون‌های  $OH^-$  اگر به اندازه کافی زیاد باشد، منجر به تجزیه اولیه سیلیس فعال در سنگدانه می‌شود و در نتیجه ژل قلیایی سیلیسی تشکیل می‌گردد. Diamond (۱۹۸۳) گزارش می‌دهد که

غلظت آستانه یون  $\text{OH}^-$  برای ASR بعید است کمتر از ۰/۲۵ مولارته باشد، و Kollek و همکاران (۱۹۸۶) آستانه ۰/۲۰ مولارته را پیشنهاد می کنند. این معادل با آستانه pH ۱۳/۲ تا ۱۳/۳ برای وقوع ASR است. آستانه قلیایی ممکن است بسته به ماهیت یک منبع سنگدانه خاص متفاوت باشد (Liu و Mukhopadhyay، ۲۰۱۴).

### ۵-۱-۳-۲. سیلیس فعال

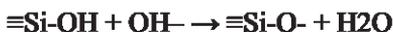
درجه واکنش زایی سنگدانه‌ها به عوامل متعددی از جمله کانی‌شناسی سنگدانه‌ها و میزان تبلور و قابلیت انحلال سیلیس بستگی دارد. سیلیس فعال، سیلیسی بی‌شکل یا نامنظم است که در سنگدانه‌های خاص یافت می‌شود. این سیلیس با خوب بلوری نشده در pH زیاد مایع منفذی بتن راحتتر از شکل‌های سیلیسی آن که به خوبی تبلور شده یا متراکم هستند حل می‌شود. به دلیل انحلالپذیری زیاد، سیلیس بی‌شکل بیشتر مستعد ASR است. کانی‌های فعال متداول مستعد ASR عبارتند از: کوارتز ریز بلور<sup>۵۱</sup>، کوارتز نهران بلور<sup>۵۲</sup> و کوارتز کرنش یافته؛ کریستوبالیت؛ تریدمیت؛ اوپال؛ چرت؛ و شیشه‌های آتشفشانی (مانند اُسیدین<sup>۵۳</sup>).

### ۵-۱-۳-۳. رطوبت کافی

سومین و آخرین جزء ضروری برای ایجاد ASR، رطوبت کافی است که یکی از اجزای کلیدی در انبساط ژل می‌باشد. آب در مایع منفذی بتن یافت می‌شود و همچنین از منابع خارجی وارد می‌گردد. حداقل رطوبت نسبی داخلی مورد نیاز بتن برابر با ۸۰٪ است تا رطوبت کافی برای ایجاد انبساط ژل قلیایی سیلیسی و حفظ واکنش تأمین گردد (Pedneault، ۱۹۹۶).

### ۵-۱-۳-۴. سازوکار تشکیل ژل

اصطلاح «واکنش قلیایی سیلیسی» تا حدودی همراه کننده است، زیرا واکنش اولیه بین سنگدانه‌های سیلیسی فعال و یون‌های هیدروکسیل ( $\text{OH}^-$ ) (نه قلیاها) مایع منفذی رخ می‌دهد. غلظت زیاد یون‌های هیدروکسیل در مایع منفذی برابر با غلظت کاتیون‌های قلیایی برای حفظ تعادل بار الکتریکی است. این غلظت زیاد  $\text{OH}^-$  است که منجر به PH زیاد می‌شود که به نوبه خود منجر به تجزیه اولیه سیلیس فعال در سنگدانه می‌گردد. هنگامی که سیلیس آبدار با بلور ضعیف در معرض محلول قلیایی قوی قرار می‌گیرد، یک واکنش اسید باز بین یون‌های هیدروکسیل موجود در محلول و گروه‌های سیلاتول اسیدی ( $\text{Si-OH}$ ) به وجود می‌آید (Dent Glasser و Kataoka، ۱۹۸۱) که به شرح زیر است:



<sup>51</sup> Microcrystalline

<sup>52</sup> Cryptocrystalline

<sup>53</sup> Obsidian

همان‌طور که یون‌های هیدروکسیل بیشتر به ساختار نفوذ می‌کنند، برخی از پیوندهای سیلوکسان (Si-O-Si) نیز به شرح زیر مورد حمله قرار می‌گیرند (Dent Glasser و Kataoka، ۱۹۸۱):



بارهای منفی روی اتم‌های اکسیژن انتهایی توسط کاتیون‌های قلیایی ( $\text{K}^+$  و  $\text{Na}^+$ ) متعادل می‌شوند که به‌طور هم‌زمان در ساختار پخش می‌گردند. اختلال در پل‌های سیلوکسان ساختار را تضعیف می‌کند و در صورتی که ذخایر کافی از هیدروکسید قلیایی در دسترس باشد، فرآیند تولید محلول سیلیکات قلیایی ادامه می‌یابد. میزان یا نرخ انحلال توسط قلیائیت محلول و ساختار سیلیس کنترل می‌شود.

### ۵-۱-۳-۵. نقش کلسیم

تحقیقات (Bleszynski و Thomas، ۱۹۹۸؛ Thomas، ۲۰۰۶) به این نتیجه رسیده‌اند که انبساط قابل توجه، تنها زمانی رخ می‌دهد که منبع کافی از کلسیم به‌صورت هیدروکسید کلسیم در دسترس باشد. در سامانه‌هایی با هیدروکسیدهای قلیایی فراوان و سیلیس فعال که فاقد هیدروکسید کلسیم هستند، سیلیس حل شده و در محلول باقی می‌ماند. اگرچه نقش دقیقی که کلسیم در انبساط ژل ایفا می‌کند نامشخص است، اما مجموعه سازوکارهایی مطرح شده‌اند که به شرح زیر می‌باشند:

الف) کلسیم ممکن است جایگزین قلیاها در محصول واکنش شود و قلیاها را برای واکنش بیشتر بازسازی کند (باز یافت قلیایی) (Thomas، Hansen؛ b2۰۰۶، ۱۹۹۴)

ب) CH ممکن است به‌عنوان یک بافر عمل کند و سطح بالایی از OH را در محلول حفظ نماید (Wang و Gillott، ۱۹۹۱)

ج) غلظت زیاد کلسیم در مایع منفذی از انتشار سیلیس به دور از سنگدانه‌های واکنش‌زا جلوگیری می‌کند (Bleszynski و Thomas، ۱۹۹۸؛ Chatterji، ۱۹۷۹؛ Chatterji و Clausson-Kass، ۱۹۸۴).

د) اگر کلسیم در دسترس نباشد، ممکن است سیلیس فعال صرفاً در محلول هیدروکسید قلیایی بدون ایجاد آسیب حل شود (Thomas، Diamond؛ ۲۰۰۶، ۱۹۸۹)

ه) تشکیل ژلهای غنی از کلسیم برای ایجاد انبساط به‌صورت مستقیم یا از طریق تشکیل یک غشای نیمه تراوا در اطراف سنگدانه‌های واکنش‌زا ضروری است (Thomas، Thomas؛ ۲۰۰۶ و همکاران، ۱۹۹۱؛ Bleszynski و Thomas، ۱۹۹۸).

این فرضیه‌ها بیان می‌کنند که توسعه تشکیل C-S-H به قیمت مصرف هیدروکسید کلسیم (به‌عنوان مثال، از طریق استفاده از پوزولان‌ها) ممکن است منجر به کاهش موفقیت‌آمیز انبساط ناشی از ASR شود.

### ۵-۱-۴. سازوکار انبساط ژل

اگرچه سازوکارهای مربوط به تشکیل ژل به خوبی شناخته شده است، اما سازوکار واقعی برای گسترش ژل نامشخص مانده است. چهار نظریه اصلی علت در طول ۷۰ سال گذشته برای توضیح سازوکار انبساط ژل

مطرح گردیده است، که همه آن‌ها معتقدند آب جزء اصلی این فرآیند می‌باشد. چهار نظریه انبساط شامل فشار اسمزی<sup>۵۴</sup>؛ غشای CSH<sup>۵۵</sup>؛ تبادل کلسیم/قلیایی<sup>۵۶</sup>؛ و لایه دوگانه<sup>۵۷</sup> می‌باشند.

نظریه فشار اسمزی در نظر می‌گیرد که خمیر سیمان احاطه کننده سنگدانه‌های واکنش‌زا به‌عنوان یک غشای نیمه‌تراوا عمل می‌کند و از حضور یون‌های سیلیکات بزرگ جلوگیری می‌نماید و در عین حال اجازه می‌دهد آب و هیدروکسیدهای قلیایی از میان سنگدانه عبور کرده و به سطح آن می‌رسد. تحت این شرایط، سیلیکات قلیایی تشکیل شده بر روی سطح سنگدانه، محلول را از خمیر سیمان به سمت خود می‌کشد و در نتیجه تشکیل ژل قلیایی سیلیسی ادامه می‌یابد. با ادامه تورم ژل، یک سلول فشار اسمزی<sup>۵۸</sup> تشکیل می‌شود و فشار هیدرواستاتیک فزاینده‌ای به خمیر سیمان اعمال می‌شود و در نهایت منجر به ترک می‌گردد (Hansen, 1944). نظریه غشای C-S-H تأثیر کلسیم را بر دوام بتن در نظر می‌گیرد. این نظریه فرض می‌کند که در حضور هیدروکسید کلسیم، یون‌های قلیایی از نمک‌های قلیایی و یون‌های هیدروکسید از  $\text{Ca(OH)}_2$  وارد سنگدانه‌های سیلیسی فعال شده و کلسیم و آنیون‌ها را در مایع منفذی رها می‌کنند. نفوذ یون‌های قلیایی و هیدروکسید حل شده باعث می‌شود پیوندهای Si-O-Si سنگدانه‌های فعال از هم جدا شوند و در دانه‌ها بازشویی برای نفوذ بیشتر یون‌ها ایجاد گردد و اجازه آزادسازی مقداری  $\text{SiO}_2$  در مایع منفذی داده شود. همان‌طور که یون‌های قلیایی و هیدروکسید حل شده به داخل سنگدانه نفوذ می‌کنند، مولکول‌های کلسیم، هیدروکسید و آب نیز به داخل مواد سیلیسی واکنش‌زا مهاجرت می‌کنند. هنگامی که غلظت‌های زیاد  $\text{Ca(OH)}_2$  و نمک‌های قلیایی در مایع منفذی وجود داشته باشند، تنها مقدار محدودی از  $\text{SiO}_2$  می‌تواند به بیرون نشت پیدا کند، در حالی که مواد اضافی به ساختار سنگدانه نفوذ می‌کنند. این عدم تعادل موجب نیروی انبساطی در سنگدانه می‌شود. با این حال، اگر غلظت‌های  $\text{Ca(OH)}_2$  و نمک قلیایی کم باشد، نرخ نفوذ یون‌های قلیایی و هیدروکسید نیز کم خواهد بود، در حالی که مهاجرت  $\text{SiO}_2$  افزایش می‌یابد، در نتیجه نیروی انبساطی کمتری ایجاد می‌شود (Chatterji و همکاران، 1987).

نظریه تبادل کلسیم و قلیایی همچنین کلسیم را به‌عنوان یک جزء ضروری در گسترش ژل قلیایی سیلیسی در نظر می‌گیرد. این نظریه فرض بر آن دارد که ژل، یون‌های  $\text{Ca}^{2+}$  را جذب می‌نماید و به نوبه خود، آن‌ها را با یون‌های قلیایی مبادله می‌کند، که سپس با مایع منفذی واکنش می‌دهند تا ژل قلیایی سیلیسی اضافی ایجاد کنند. با تشکیل ژل اضافی، فضای بیشتری پر می‌شود و در نهایت باعث ترک خوردگی می‌گردد. جذب یون و آب با شرایط دمایی و رطوبتی ماده کنترل می‌شوند و بنابراین با انتقال فیزیکی همراه می‌باشند (Rotter, 1995). برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که گرانیروی ژل ممکن است با افزایش مقدار کلسیم در ژل تغییر کند و توانایی آن در آسیب رساندن به سامانه اطراف در حین متورم شدن افزایش یابد، اما ظرفیت تورم آن کاهش یابد (Urhan, 1987؛ Rajabipour و همکاران، 2015).

54 Osmotic pressure

55 CSH-shell

56 Calcium/alkali exchange

57 Double-layer.

58 Osmotic pressure cell

نظریه لایه دوگانه پیشنهاد می‌کند که انبساط ژل در اثر تورم ناشی از نیروهای دافعه دو لایه الکتریکی ایجاد می‌شود. هنگامی که یک مایع و یک جامد با هم تماس پیدا می‌کنند، سطح جامد بار اضافی را حمل می‌کند که باعث ایجاد الکتریسیته در سطح مشترک می‌شود. این بار اضافی خواص مواد جامد و مایع را تغییر می‌دهد. ASR شامل برهم‌کنش سطح سنگدانه سیلیسی با بار زیاد و مایع منفذی قلیایی بتن می‌باشد. این واکنشی است که منجر به تجزیه سیلیس و تشکیل ژل قلیایی سیلیسی می‌گردد. در داخل ژل، ذرات سیلیس جامد با بار منفی، کاتیون‌ها با بار مثبت را جذب می‌کنند که به این ترتیب مقید می‌شوند که یک لایه سخت در اطراف ذره جامد تشکیل بدهند. در اطراف این لایه سخت، یک لایه پراکنده شده تشکیل می‌شود که شامل مقدار بیشتری از کاتیون‌ها و آنیون‌هایی است که در ژل یافت می‌شوند. بنابراین، لایه دوگانه الکتریکی از یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم تشکیل شده است که سطح سیلیس با بار منفی را احاطه کرده‌اند. هنگامی که این لایه دوگانه ایجاد شود، آب را جذب می‌کند و متورم می‌گردد. همان‌طور که آب به لایه وارد می‌شود، نیروهای الکترواستاتیکی غالب می‌شوند و با انبساط ژل، ذرات به دور از هم رانده می‌شوند (Prezzi و همکاران، ۱۹۹۷).

در حالی که معمولاً مشاهده می‌شود که آب نیروی محرکه اولیه برای انبساط ژل قلیایی سیلیسی است، هیچ نظریه واحدی در مورد سازوکار انبساط ژل به‌طور کامل مورد توافق قرار نگرفته است و به نظر می‌رسد هیچ یک به‌طور کامل و دقیق سازوکار را توضیح نمی‌دهند. به‌عنوان مثال، هیچ یک از چهار نظریه اصلی که قبلاً مورد بحث قرار گرفتند، نقش بالقوه بسیار مهمی را که نیروهای کوتاه برد (مانند جایگزینی اتمی  $Ca^{2+}$ ) می‌توانند در انبساط ایفا کنند، در نظر نمی‌گیرند. نه نظریه فشار اسمزی و نه نظریه لایه دوگانه تأثیر بالقوه کلسیم بر انبساط را در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این، هنوز نیاز است برای درک اینکه چگونه گرانروی ژل ممکن است بر اساس دما، شرایط نسبی عمل‌آوری و ساختار ژل تغییر کند و چگونه گرانروی ژل ممکن است بر توانایی آن برای اعمال فشار و ایجاد آسیب در سامانه اطراف تأثیر بگذارد، تحقیقاتی صورت پذیرد. اگرچه در حال حاضر نحوه دقیق انبساط ژل قلیایی سیلیسی در بتن ناشناخته باقی مانده است، اما بخش‌هایی از نظریه‌های مذکور ممکن است با یکدیگر سازوکار را توضیح دهند یا به یک توضیح کامل‌تری منجر شوند.

## ۵-۱-۵. ارزیابی سنگدانه‌ها برای استعداد واکنش‌زایی سنگدانه‌های قلیایی

### ۵-۱-۵-۱. عملکرد میدانی

پیشینه عملکرد میدانی رضایت‌بخش می‌تواند بهترین روش برای ارزیابی استعداد یک سنگدانه برای ایجاد واکنش قلیایی سنگدانه باشد. هنگام تجزیه و تحلیل داده‌های عملکرد میدانی باید عوامل متعددی در نظر گرفته شوند که عبارتند از:

(الف) مقدار سیمان در بتن و مقدار قلیایی در سیمان باید در بتن میدانی مورد بررسی برابر و یا بیشتر از مقادیر پیشنهادی برای سازه جدید باشد.

(ب) بتن مورد بررسی باید حداقل ۱۵ سال سن داشته باشد.

(ج) شرایط محیطی بتن میدانی مورد بررسی باید حداقل به اندازه شرایط محیطی سازه پیشنهادی، شدید باشد.

د) در غیاب اسنادی که به طور قطعی نشان دهد که سنگدانه مورد استفاده در سازه پیشنهادی به اندازه کافی شبیه سنگدانه در سازه میدانی مورد بررسی است، باید یک بررسی سنگ‌نگاری<sup>۵۹</sup> برای تأیید آن انجام پذیرد. ه) این احتمال که مواد جایگزین سیمان، افزودنی‌ها بر پایه لیتیوم، یا هر دو در سازه میدانی مورد بررسی استفاده شده‌اند، باید ارزیابی شود.

به شرطی که بتوان عملکرد میدانی رضایت‌بخشی را نشان دهد، می‌توان بدون آزمایش بیشتر برای AAR، می‌توان آن را در بتن (با توجه به راهنمایی‌های فوق) مورد استفاده قرار داد.

### ۰-۱-۵-۲. بررسی سنگ‌نگاری (ASTM C295/C295M)

بررسی سنگ‌نگاری باید اولین قدم در ارزیابی مناسب بودن یک منبع سنگدانه خاص برای استفاده در ساخت‌وساز بتن باشد. سنگ‌نگاری ابزار قدرتمندی است که طیف وسیعی از اطلاعات را در مورد ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی سنگدانه‌ها، از جمله وجود سنگ‌ها یا کانی‌هایی که باعث واکنش‌های مخرب در بتن می‌شوند، ارائه می‌کند. در برخی موارد، بررسی سنگ‌نگاری ممکن است شواهد کافی برای رد یک سنگدانه بر اساس استعداد واکنش‌زایی قلیایی را فراهم نماید یا نیاز به بررسی و اجرای اقدامات پیش‌گیرانه مناسب را ارائه کند. به طور کلی، بررسی سنگ‌نگاری نمی‌تواند پیش‌بینی کند که آیا نوع و توزیع مواد معدنی فعال موجود باعث انبساط مخرب در بتن می‌شود یا خیر، و معمولاً آزمایش‌های آزمایشگاهی بیشتری مورد نیاز است. نتایج بررسی سنگ‌نگاری می‌تواند مبنایی برای هدایت برنامه آزمایش‌های آزمایشگاهی از نظر انتخاب نوع و ترتیب آزمایش‌ها و هر معیار ارزیابی مناسبی باشد. قابلیت اطمینان بررسی سنگ‌نگاری در غربالگری سنگدانه‌ها از منظر استعداد واکنش‌زایی به شدت به مهارت و تجربه شخص سنگ‌نگار بستگی دارد. مواردی وجود داشته است که سنگدانه‌هایی که بر اساس نتایج بررسی سنگ‌نگاری برای استفاده پذیرفته شده‌اند، بعداً در واکنش قلیایی سنگدانه گرفتار شده‌اند. این امر لزوماً نتیجه طبقه‌بندی نادرست مواد نبوده، بلکه به احتمال زیاد به دلیل عدم موفقیت در تشخیص کانی‌های خاص با استعداد واکنش‌زایی می‌باشد (Hooton و Rogers، ۱۹۹۱). علاوه بر این ممکن است اجزای فعال برخی از سنگ‌ها به آسانی توسط میکروسکوپ نوری شناسایی نشوند.

### ۰-۱-۵-۳. آزمایش‌های آزمایشگاهی برای شناسایی سنگدانه‌های واکنش‌زای

#### قلیایی کربناتی

#### ۰-۱-۵-۳-۱. روش استوانه سنگی<sup>۶۰</sup> (ASTM C586)

در این روش، استوانه‌های (یا منشورهای) بریده شده از سنگ در محلول NaOH با غلظت ۱ نرمال در دمای اتاق غوطه‌ور می‌شوند (پس از رسیدن به ثبات ابعادی در آب مقطر) و حداقل به مدت ۱ ماه انبساط نمونه

<sup>59</sup> Petrography

<sup>60</sup> Rock cylinder method

مورد پایش قرار می‌گیرد. انبساط بیش از ۰/۱۰ درصد در ۱ ماه به‌طور کلی نشان از استعداد واکنش شیمیایی مخرب بین قلیاها و سنگ دارد. این آزمایش، استعداد انبساط در بتن را ارائه نمی‌دهد و در صورتی که انبساط استوانه سنگی بیش از ۰/۱۰ درصد باشد، آزمایش سنگدانه در بتن (ASTM C1105) توصیه می‌گردد.

#### ۰-۱-۰-۳-۲. ترکیب شیمیایی (CSA A23.2-26A)

تعیین استعداد واکنش‌زایی قلیایی کربناتی توسط ترکیب شیمیایی (CSA A23.2-26A) شامل تجزیه و تحلیل برای  $\text{CaO}$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  می‌باشد. دولومیتها یا سنگ‌های آهک نسبتاً خالص به راحتی با ترکیب مشخص می‌شوند و تمایل به ACR ندارند. این سنگدانه‌ها ممکن است نیاز به آزمایش بیشتری برای ASR داشته باشند. تفسیر نتایج این روش توسط ASTM C1778 ارائه شده است، که متذکر می‌شود برای سنگدانه‌هایی که در آزمایش ترکیب شیمیایی مشخص گردد که استعداد انبساط دارند، نیاز به آزمایش بیشتر با استفاده از روش ASTM C1105 می‌باشد. این آزمایش به رفع برخی از دشواری‌های شناسایی سنگ‌های آهک دولومیتی واکنش‌زا در بررسی سنگ‌نگاری کمک کرده است.

#### ۰.۱.۰.۳.۳. آزمایش منشور بتن<sup>۱۱</sup> (ASTM C1105)

این آزمایش به جز تفاوت در دمای نگاهداری و مقدار قلیایی بتن، مشابه ASTM C1293 است که برای ارزیابی ASR استفاده می‌شود. در آزمایش ASTM C1105 مشخص گردیده که با استفاده از مخلوط بتن خاص، با نمونه‌هایی در دمای ۲۳ درجه سلسیوس انجام شود. در صورتی که انبساط در ۳ ماه از ۰/۱۵ درصد، در ۶ ماه از ۰/۲۵ درصد یا در ۱ سال از ۰/۳۰ درصد تجاوز نماید، نشان از استعداد واکنش‌زایی مخرب خواهد داشت.

کاربران این آزمایش باید بدانند که این آزمایش اطلاعاتی در مورد ترکیب خاص از سیمان و سنگدانه که آزمایش شده ارائه می‌کند و عدم انبساط قابل توجه در این آزمایش لزوماً نشان‌دهنده غیرواکنش‌زا بودن سنگدانه نمی‌باشد. به‌عنوان مثال، اگر سنگدانه در بتن با مقدار قلیایی زیادتر استفاده شود، ممکن است انبساط مخرب رخ دهد. انجمن استانداردهای کانادا (CSA A23.2-1 4A) مشخص نموده سنگ‌های با استعداد واکنش‌زایی قلیایی کربناتی باید با منشورهای بتنی تحت شرایط مشابهی که برای ASR استفاده می‌شود (یعنی ۵/۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب  $\text{Na}_2\text{O}$  و نگاهداری شده در دمای ۲۸ درجه سلسیوس) مورد آزمایش قرار گیرند. همان معیارهای پذیرش انبساط به کار برده می‌شوند؛ اگر انبساط از ۰/۴۰ درصد در ۱۲ ماه بیشتر شود، بدون در نظر گرفتن هیچ معیاری برای نتایج آزمایش قبلی، سنگدانه‌ها واکنش‌زا تلقی می‌شوند. هدف آزمایش کانادایی تعیین واکنش‌زایی سنگ بوده و ارزیابی عملکرد ترکیبی خاص از سیمان و سنگدانه نمی‌باشد.

### ۵-۱-۳-۴. آزمایش میکروبار بتن<sup>۳۳</sup> (AAR-5)

آزمایش میکروبار بتن (که قبلاً به عنوان آزمایش تسریع شده میکروبار بتن چینی شناخته می شد) توسط Xu و همکاران (۱۹۹۸، ۲۰۰۰) برای مشخص نمودن واکنش‌زایی سنگ‌های قلیایی کربناتی معرفی گردید. در سال ۲۰۰۵، این روش به عنوان پیش‌نویس روش آزمایش تحت عنوان AAR-5 (Sommer و همکاران، ۲۰۰۵) توسط RILEM معرفی شد و در ادامه در سال ۲۰۱۶ به عنوان یک روش آزمایش توصیه شده توسط RILEM (AAR-5) منتشر گردید (RILEM Technical Committee 219-ACS، ۲۰۱۶). تحقیقات انجام شده توسط Lu و همکاران (۲۰۰۸) توانایی این آزمایش را برای تشخیص سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی کربناتی در بازه‌های از دانه‌بندی‌ها (دانه‌های ۵/۰ تا ۱۰/۰ میلی‌متر و دانه‌های ۲/۵ تا ۵/۰ میلی‌متر) نشان داده است. مزیت استفاده از اندازه ذرات ۲/۵ تا ۵/۰ میلی‌متر این است که می‌توان واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی و واکنش‌زایی قلیایی کربناتی را بر روی یک نمونه واحد سنگدانه مورد آزمایش قرار داد. تحقیقات بیشتر (به عنوان مثال، بررسی سنگ‌نگاری) برای تشخیص نوع واکنش موجود مورد نیاز است تا بتوان اقدامات کاهشی مناسب را دنبال کرد. این آزمایش نویدی را برای تشخیص سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی کربناتی در یک زمان نسبتاً کوتاه (۴ هفته) نشان می‌دهد، در حالی که نتایج قابل اعتمادتری نسبت به آزمایش میکروبار بتن تسریع شده ارائه می‌کند. این آزمایش جایگزین جذابی برای آزمایش زمان‌بر ASTM C1105 در تشخیص واکنش‌زایی قلیایی کربناتی می‌باشد؛ با این حال، توصیه‌های RILEM برای استفاده از این آزمایش بر این است که در هنگام وجود تضاد بین آزمایش منشور بتن و AAR-5، نتایج آزمایش منشور بتن باید در اولویت قرار گیرد (RILEM Technical Committee 219-ACS، ۲۰۱۶).

### ۵-۱-۳-۵. آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تشخیص سنگدانه‌های واکنش‌زا

#### قلیایی سیلیسی

روش‌های آزمایش متعددی برای تشخیص سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی سیلیسی توسعه یافته‌اند، و این روش‌ها از نظر محیط آزمایش، مدت زمان آزمایش و قابلیت اطمینان نتایج متفاوت هستند. یک بررسی جامع توسط Thomas و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است؛ به‌طور کلی، آزمایش‌های طولانی مدت‌تر مانند آزمایش منشور بتن نتایج قابل اعتمادتری نسبت به آزمایش‌های کوتاه‌مدت‌تر و بسیار تهاجمی مانند آزمایش میله منشوری ملات تسریع شده<sup>۳۳</sup> ارائه می‌کنند. در این بخش، شرح مختصری از روش‌های آزمایش برای تشخیص واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی در سنگدانه‌ها آورده شده است.

### 0.1.0.4.1. آزمایش میله منشوری ملات تسریع شده (ASTM C1260)

این آزمون اساساً همان آزمایشی است که در موسسه ملی تحقیقات ساختمان (NBRI) توسط Oberholster و Davies (۱۹۸۶) ایجاد شده است. در این روش تغییر طول میله منشوری ملات (با اندازه‌های اسمی  $25 \times 25 \times 285$  میلی‌متر) که در محلول ۱ نرمال NaOH در دمای ۸۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شود، به مدت ۱۴ روز مورد پایش قرار می‌گیرد (Oberholster و Davies، ۱۹۸۶؛ Hooton و Rogers، ۱۹۸۹). برخی سازمان‌ها اندازه‌گیری تغییرات طول به مدت ۲۸ روز در محلول ۱ نرمال NaOH را تعیین می‌کنند. با این وجود، ASTM C1260 تعیین واکنش‌زایی بر اساس انبساط در ۱۴ روز پس از غوطه‌ور شدن در محلول ۱ نرمال NaOH را توصیه می‌کند. این آزمایش برای شناسایی سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی سیلیسی در سراسر کانادا (Grattan-Bellew، ۱۹۸۹؛ Hooton و Rogers، ۱۹۸۹، Bérubé و Fournier، ۱۹۹۲؛ Durand و همکاران، ۱۹۹۰؛ Hooton، ۱۹۹۱) و ایالات متحده آمریکا (Stark و همکاران، ۱۹۹۳؛ Folliard و همکاران، ۲۰۰۶ a) با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است، اما برای ارزیابی سنگ‌های قلیایی کربناتی واکنش‌زا، مناسب در نظر گرفته نمی‌شود.

تفسیر نتایج ساده نیست و معیارهای متفاوتی برای انبساط پیشنهاد شده است (Thomas و همکاران، ۲۰۰۷). Bérubé و Fournier (۱۹۹۲) حد ۰/۱۰ درصد انبساط را برای سیلیکات استخراج شده و سنگدانه‌های کربناتی سیلیسی و حد ۰/۲۰ درصد انبساط را برای شن و ماسه طبیعی پس از ۱۴ روز قرارگیری در محلول ۱ نرمال NaOH پیشنهاد کردند. با این حال، بسیاری از سنگدانه‌ها با عملکرد میدانی مطلوب، انبساط بیش از ۰/۲۵ درصد را در این آزمایش نشان می‌دهند (Fournier، Bérubé و ۱۹۹۲). در نتیجه سنگدانه‌ها نباید بر اساس این آزمایش رد شوند، مگر اینکه بررسی سنگ‌نگاری تایید کند که این ماده مشابه سنگدانه‌های واکنش‌زا مخرب شناخته شده است.

تحقیقات نشان داده است که انواع خاصی از سنگدانه‌ها ممکن است در این آزمایش با انبساط کمتر از ۰/۱۰ درصد در ۱۴ روز پذیرفته شوند، اما در ASTM C1293 و در میدان باعث انبساط مخرب شوند (Folliard و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ideker و همکاران، ۲۰۱۲). به‌طور خلاصه، با توجه به اختلافات احتمالی زیادی که بین عملکرد سنگدانه‌ها در این آزمایش و در میدان وجود دارد، این آزمایش باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد (Thomas و همکاران، ۲۰۰۷). ASTM C1778 و AASHTO R80 (بحث شده در ۵-۱-۸) راهنمایی بیشتری در مورد تفسیر نتایج ASTM C1260 ارائه می‌کنند.

### 0-1-0-4-2. آزمایش منشور بتنی (ASTM C1293)

این آزمایش قابل اطمینان‌ترین آزمون برای تشخیص صحیح سنگدانه‌های مستعد ASR در نظر گرفته می‌شود (Thomas و همکاران، ۲۰۰۶). یک مخلوط بتنی با میزان سیمان برابر با  $420 \pm 10$  کیلوگرم بر مترمکعب با استفاده از سیمان با مقدار قلیایی معادل  $(Na_2O_{eq}) 0.90 \pm 0.10$  درصد ساخته می‌شود. سپس سدیم هیدروکسید به آب اختلاط اضافه می‌شود تا بدین ترتیب بار قلیایی کل بتن برابر با  $5/25$  کیلوگرم بر

مترمکعب گردد. این بار قلیایی شدید برای ایجاد انبساط سنگ‌ها با واکنش‌زایی آهسته مانند گریواک و آرژیلیت‌ها ضروری است (Magni و همکاران، ۱۹۸۷). منشورها در بالای آب در دمای ۲۸ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند و حداقل به مدت ۱ سال انبساط مورد پایش قرار می‌گیرد.

در حال حاضر در کانادا حد اکثر انبساط در ۱ سال برابر با ۰/۰۴ درصد تعیین شده است (CSA A23.2-27A) و حد انبساط ۰/۰۴ درصد در ASTM C1778 توصیه شده است. این انبساط تقریباً به نقطه‌ای مربوط می‌شود که ترک‌خوردگی و نشانه‌هایی از خرابی برای اولین بار روی منشورها مشاهده شود. این آزمایش همچنین با عملکرد میدانی ارتباط خوبی دارد. استاندارد کانادایی (CSA A23.2-27A و A23.2-28A) هشدار می‌دهد مبنی بر اینکه حد انبساط کوچک‌تر می‌تواند برای ارزیابی سنگدانه‌ها برای استفاده در سازه‌های بحرانی، مانند سازه مهار هسته‌ای<sup>۶۴</sup> یا سازه‌های حساس از منظر ابعادی مانند سدهای هیدرولیکی مناسب باشد، جایی که انبساط‌های کوچک می‌تواند منجر به حرکات نسبتاً بزرگ شود، ارائه نموده است.

این روش آزمایش امتیاز متمایزی بر آزمایش میله منشوری تسریع شده (ASTM C1260) دارد؛ به دلیل آنکه سنگدانه‌های درشت را می‌توان بدون خرد کردن به اندازه‌های ماسه، مورد آزمایش قرار داد. بعلاوه، اندازه بزرگ‌تر نمونه‌ها اثر نشت قلیایی را کاهش می‌دهد. مدت ۱۲ ماه لازم خواهد بود مگر آنکه دما افزایش یابد یا شرایط دیگری تغییر داده شوند تا انبساط تسریع یابد. با این حال، تسریع بیشتر ممکن است اثرات نامطلوب جانبی داشته باشد (Ideker و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۵-۱-۰-۴. آزمایش منشور بتن مینیاتوری (AASHTO T 380)

AASHTO T 380، یا آزمایش منشور بتن مینیاتوری توسط Latifec و Rangaraju (۲۰۱۵) توسعه داده شد تا بر بعضی از محدودیت‌های ASTM C1567، ASTM C1260 و ASTM C1293 غلبه کنند. مشابه ASTM C1293، این آزمایش به میزان سیمان برابر با  $420 \pm 10$  کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار قلیایی معادل  $(Na_2O_{eq}) 10 \pm 0.90$  درصد نیاز دارد. هیدروکسید سدیم به آب اختلاط اضافه می‌شود تا مقدار قلیایی  $(Na_2O_{eq})$  مخلوط را به ۱/۲۵ درصد وزن سیمان افزایش دهد و از نسبت وزنی آب به مواد سیمانی (w/cm) برابر با ۰/۴۵ استفاده می‌گردد. الزامات دانه‌بندی درشتدانه برای این آزمایش ۵۷/۵ درصد سنگ باقی مانده روی الک ۹/۵ میلی‌متر و عبوری از الک ۱۲/۵ میلی‌متر و ۴۲/۵ درصد سنگ باقی مانده روی الک شماره ۴ (الک ۴/۷۵ میلی‌متر) و عبوری از الک ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد. منشورها در محلول ۱ نرمال NaOH در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۵۶ تا ۸۴ روز نگهداری می‌شوند.

برای ارزیابی واکنش‌زایی سنگدانه‌ها، اگر انبساط ۵۶ روزه بیشتر از ۰/۰۴۰ درصد باشد، سنگدانه مستعد واکنش‌زایی قلیایی در نظر گرفته می‌شود. در مورد سنگدانه‌ها با واکنش‌زایی کم یا آهسته، ممکن است ۲۸ روز اضافی برای آزمایش مورد نیاز باشد. اگر انبساط ۵۶ روزه کمتر یا مساوی ۰/۰۳۰ درصد باشد، سنگدانه غیرواکنش‌زا در نظر گرفته می‌شود. مشخص شده است که این روش آزمایش دارای قابلیت اطمینان مشابهی

<sup>64</sup> Nuclear containment structure

با روش ASTM C1293 در تعیین واکنش‌زایی سنگدانه است، با این تفاوت که مدت زمان این آزمایش به ویژه برای ارزیابی واکنش‌زایی سنگدانه‌های درشت کمتر (۵۶ تا ۸۴ روز در مقایسه با ۱ سال برای ASTM C1293) است (Rangaraju و همکاران، ۲۰۱۶). علی‌رغم نشانه‌هایی مبنی بر قابل اعتماد بودن این روش آزمایش، مهم است که به منظور تعیین قابلیت اطمینان بیشتر آن برای ارزیابی اثربخشی اقدامات پیشگیری از ASR، به ویژه برای بتن‌هایی با سنگدانه‌هایی با واکنش‌زایی متوسط و کم، این روش آزمایش با نتایج سایر بلوک‌های در معرض میدان واقعی محک زده شود.

#### 0-1-0-4-5. آزمایش منشور بتن تسریع شده (RILEM AAR-4)

با توجه به طول مدت آزمایش منشور بتن، از اوایل دهه ۱۹۹۰ فشارهایی برای تسریع نمودن آزمایش با افزایش دما از ۲۸ درجه سلسیوس به ۶۰ درجه سلسیوس وجود داشته است (Murdock و Debray، ۱۹۹۲؛ Ranc و Fontaine، ۱۹۹۴؛ Touma و همکاران، ۲۰۰۰). در مقایسه با آزمایش منشور استاندارد بتن که به مدت ۱ سال اجرامی شود، آزمایش منشور بتن تسریع شده به مدت ۳ ماه اجرامی گردد. متأسفانه، فقط افزایش دما و شناسایی محدودیت‌های انبساط برای تولید یک روش آزمایشی پایدار و قابل اعتماد کافی نبود. Fournier و همکاران (۲۰۰۴) عواملی را که منجر به تغییرپذیری در آزمایش تسریع شده، از جمله افزایش برون‌رفت قلیایی‌ها، کاهش PH مایع منفذی، افزایش از دست دادن جرم و نگرانی بالقوه مربوط به انتخاب سنگدانه‌های ریز غیرواکنش‌زا را شناسایی کردند؛ آن‌ها همچنین محدودیت‌هایی برای انبساط پیشنهاد کردند. کارهای بیشتر توسط Ideker و همکاران (۲۰۱۰) تاثیر عمیق انتخاب سنگدانه ریز غیرواکنش‌زا را بر روی میزان انبساط در آزمایش تسریع شده روشن کرد؛ در مقایسه با انبساط یک ساله به دست آمده با سنگدانه درشت Spratt، بسته به منبع سنگدانه‌های ریز غیرواکنش‌زا مورد استفاده در آزمون، انبساط‌ها تا ۵۰ درصد کاهش یافت.

نتایج روش تسریع شده آزمایش منشور بتن در کاهش انبساط در ۳ ماه در مقایسه با انبساط ۱ ساله به دست آمده در ASTM C1293 (Ideker و همکاران، ۲۰۱۰)، که نشان می‌دهد آزمایش منشور بتن تسریع شده واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی یک سنگدانه را در چارچوب آزمایش ۳ ماهه تعیین شده توسط روش آزمایش به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمی‌کند. بنابراین، آزمایش منشور بتن تسریع شده برای ارزیابی واکنش‌زایی سنگدانه‌ها یا برای تعیین اثربخشی اقدامات کاهشی توصیه نمی‌گردد.

#### 0-1-0-5-0. آزمایش میکروبار بتن (RILEM AAR-5)

یک روش آزمایش، که امروزه معمولاً به‌عنوان آزمایش میکروبار بتن از آن یاد می‌شود (قبلاً به‌عنوان روش میله ملات تسریع شده چینی شناخته می‌شد)، توسط Xu و همکاران (۱۹۹۸، ۲۰۰۰) برای پیردن به واکنش‌زایی سنگ‌های فعال قلیایی کرناتی معرفی شد و به‌عنوان AAR-5 منتشر گردید؛ آزمایش غربالگری اولیه سریع برای سنگدانه‌های کرناتی (Sommer و همکاران، ۲۰۰۵). آزمایش میکروبار بتن از شرایط

نگهداری مشابه با آزمایش میله ملات تسریع شده بهره می‌برد، اما از سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۴ تا ۸ میلی‌متر و میله‌های کوتاه‌تر و ضخیم‌تر ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر استفاده می‌کند.

از زمانی که این روش معرفی شد، نتایج امیدوارکننده‌ای برای تشخیص واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی در طیف وسیع‌تری از انواع سنگ‌ها به دست آمده است (Lu و همکاران، ۲۰۰۸؛ East، ۲۰۰۷) که به‌عنوان بخشی در گزارش RILEM (۲۰۱۶) در مورد «توصیه‌هایی برای جلوگیری از آسیب ناشی از واکنش‌های سنگدانه قلیایی در سازه‌های بتنی جدید» به‌صورت یک روش آزمایشی برای تعیین واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی در کنار استفاده از نسخه RILEM روش آزمایش تسریع یافته ملات میله (AAR-2) گنجانده شده است. توانایی این آزمایش برای تشخیص ASR مخرب به ویژه در سنگدانه‌های درشت‌زمانی که فازهای فعال به دلیل خرد شدن و پردازش در سایر روش‌های تسریع یافته حذف می‌شوند (ASTM C1260)، سودمند است. در روش ASTM C1260 نیاز به خرد نمودن سنگدانه‌های درشت می‌باشد که می‌تواند منجر به از دست رفتن فازهای واکنش‌زا در سنگدانه‌ها و منفی شدن کاذب<sup>۶۵</sup> نتایج گردد. این روش ممکن است به‌عنوان یک روش آزمایش مکمل به کار برده شود، به خصوص زمانی که ASTM C1260 جواب منفی کاذب تولید می‌کند. Lu و همکاران (۲۰۰۸) آن را به‌عنوان یک آزمایش تسریع شده جهانی برای واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه توصیه کرده‌اند.

#### ۵-۵-۱-۵. آزمایش‌های رویارویی میدانی

چندین محل برای رویارویی با ASR در مکان‌های مختلف در آمریکای شمالی و در سراسر جهان ساخته شده‌اند (Hooton و همکاران، ۲۰۱۳؛ Fournier و همکاران، ۲۰۱۸). محل‌های رویارویی میدان‌های واقعی که در سراسر جهان توسعه یافته‌اند، ابزار مهمی جهت توسعه و درک روش‌های آزمایش تسریع یافته برای ASR و عملکرد بلندمدت روش‌های کاهش ASR بوده‌اند. داده‌های به‌دست‌آمده از محل‌های رویارویی میدانی برای کمک به توسعه معیارها، استانداردها و اسناد راهنمایی در مورد ASR استفاده شده‌اند. آزمایش‌های آزمایشگاهی تسریع شده عملکرد بلوک‌های در فضای باز را در این محل‌ها بررسی نموده‌اند که منجر به توصیه‌هایی برای حداقل مقدار استفاده از مواد جایگزین سیمان و حداکثر مقادیر قلیایی برای واکنش‌های مختلف سنگدانه در مخلوط‌های بتن می‌شود. مطالعات همبستگی آزمایش‌های آزمایشگاهی تسریع شده و بلوک‌های قرار گرفته در میدان را نشان داده‌اند؛ این‌ها برای بررسی کاربرد روش‌های آزمون فوق‌الذکر پیشنهاد می‌شوند (Folliard و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ideker و همکاران، ۲۰۱۲؛ b، ۲۰۱۶؛ Drimalas و همکاران، ۲۰۱۲؛ Lute و همکاران، ۲۰۱۶؛ Fournier و همکاران، ۲۰۱۸). پروژه همکاران اروپایی شامل ۲۴ همکار مستقر در ۱۴ کشور مختلف بود که طیف گسترده‌ای از سنگدانه‌ها (۲۲ نوع) را بررسی کردند. این تحقیقات نشان داد که آزمایش‌های آزمایشگاهی، مانند آزمایش میله منشوری ملات تسریع شده، برای سنگدانه‌هایی که در طول ۵ الی ۲۰ سال در میدان واکنش نشان می‌دهند قابل اعتماد هستند، اما برای سنگدانه‌هایی با واکنش کندتر، کمتر قابل اعتماد می‌باشند (Lindgård و همکاران، ۲۰۱۰؛ Fournier و همکاران، ۲۰۱۸). (b، ۲۰۱۸).

<sup>65</sup> False negative

### ۵-۱-۶. اقدامات پیش‌گیرانه

اقدامات پیش‌گیرانه متعددی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای به حداقل رساندن خطر خرابی ناشی از ASR استفاده کرد که عبارتند از:

الف) استفاده از سنگدانه‌های غیرواکنش‌زا

ب) محدود کردن مقدار قلیایی بتن

ج) بکارگیری مواد جایگزین سیمان

د) استفاده از مواد افزودنی شیمیایی - عمدتاً ترکیبات لیتوم

این رویکردها در بخش زیر مورد بحث قرار می‌گیرند. برای سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی کربناتی، اجتناب یا کاهش در نسبت فازهای واکنش‌زا تنها عمل توصیه شده است. اگرچه مؤثر بودن روش‌های دیگر فهرست شده برای سنگدانه‌های واکنش‌زا قلیایی سیلیسی ثابت شده است، اما معمولاً برای ACR فایده‌های ندارند (Rogers و Hooton، ۱۹۹۲).

### ۵-۱-۶-۱. استفاده از سنگدانه‌های غیرواکنش‌زا

این رویکرد شاید واضحترین و مطمئنترین راه برای جلوگیری از واکنش مخرب در سازه‌های بتنی باشد. سنگدانه‌های غیرواکنش‌زا در بسیاری از مکان‌ها در دسترس نیستند و واردات مواد غیرواکنش‌زا ممکن است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. علاوه بر این، واکنش قلیایی سنگدانه در موارد متعددی رخ داده است که آزمایش‌های قبلی سنگدانه‌ها نشان داده بودند آن‌ها به‌طور مخرب واکنش‌زا نیستند. شدت روش‌های آزمایش سنگدانه‌ها برای واکنش‌زایی افزایش یافته‌اند و معیارهای پذیرش سخت‌گیرانه‌تر شده‌اند، که افزایش تعداد سنگدانه‌های دخیل در واکنش قلیایی سنگدانه را در موارد میدانی منعکس نمایند. با این حال، بکارگیری روش‌های آزمایشی موجود، تضمین نمی‌کند که سنگدانه‌ها در هر شرایطی عملکرد رضایت‌بخشی داشته باشند. در نتیجه، حتی اگر مشخص شود که سنگدانه‌ها به‌طور مخربی واکنش‌زا نیستند، اغلب اقدامات احتیاطی بیشتری بسته به نیاز شرایط انجام می‌شود. چنین شرایطی ممکن است شامل سازه‌های معتبر (یا بحرانی)، محیط‌های تهاجمی (منبع خارجی قلیایی‌ها مانند آب دریا یا نمک‌های یخ‌زدا)، میزان زیاد سیمان، یا عمر بهره‌برداری طولانی باشد.

### ۵-۱-۶-۲. محدود کردن مقدار قلیایی بتن

تحقیقات Stanton (a,b ۱۹۴۰) بر روی واکنش قلیایی سنگدانه نشان داد که بعید است زمانی که مقدار قلیایی سیمان کمتر از  $0.76\% \text{Na}_2\text{O}_{eq}$  باشد، واکنش انبساط‌زا رخ دهد. با این حال، این معیار، میزان سیمان در بتن را در نظر نمی‌گیرد، که همراه با مقدار قلیایی سیمان، مقدار قلیایی کل بتن را تعیین می‌نماید و شاخص دقیق‌تری از پتانسیل واکنش‌زایی در نظر گرفته می‌شود. در استانداردها کل مقدار قلیایی بتن در نظر

گرفته شده و به عنوان «بار قلیایی»<sup>۶۶</sup> پذیرفته شده است، که به عنوان سهم مقدار قلیایی توسط سیمان پرتلند در مخلوط بتن تعریف می‌گردد و بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود. این مقدار با ضرب مقدار سیمان پرتلند (یا نسبت سیمان پرتلند از سیمان آمیخته) در مقدار معادل قلیایی سیمان پرتلند تقسیم بر ۱۰۰ محاسبه می‌شود. در محاسبه بار قلیایی، سهم قلیایی مواد جایگزین سیمان را در نظر نمی‌گیرد؛ و در صورت استفاده از مواد جایگزین سیمان به صورت «کیلوگرم قلیایی»، خلاصه می‌شود. محدودیت‌های بار قلیایی (حداکثر مقدار قلیایی در بتن) به صورت کلی در نظر گرفته شده و در محدوده ۲/۵ تا ۴/۵ کیلوگرم بر مترمکعب  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  گزارش گردیدند (Nixon و Sims، ۱۹۹۲). در بسیاری از استانداردها و معیارهای محدودیت ممکن است بسته به واکنش‌زایی سنگدانه متفاوت باشد (Oberholster، ۱۹۹۴). در ACI 301، بار قلیایی در بتن، به استثنای قلیایی‌های موجود در مواد جایگزین سیمان، برای سنگدانه با انبساط ASTM C1293 بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۰۴ درصد و کوچک‌تر از ۰/۱۲ درصد در ۱ سال نباید از ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب و برای سنگدانه با انبساط در آزمایش ASTM C1293 بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۱۲ درصد و کوچک‌تر از ۰/۲۴ درصد در ۱ سال نباید از ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب تجاوز نماید. این محدودیت‌ها نباید با پوزولان طبیعی یا خاکستر بادی که دارای مقدار CaO بیشتر از ۱۸ درصد هستند یا برای سنگدانه با انبساط در آزمایش ASTM C1293 بیشتر از ۰/۲۴ درصد در ۱ سال استفاده گردند. محدوده‌های کانادایی (CSA A23.2-27A) بین ۱/۸ تا ۳/۰ کیلوگرم بر مترمکعب  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  می‌باشند. محدوده مشابهی در دستورالعمل‌های FHWA اتخاذ شده است (Thomas و همکاران، ۲۰۰۸ a، ASTM C1778، و AASHTO R 80).

استفاده از سیمان با قلیایی کم و محدودیت بار قلیایی یک حفاظت کافی در همه موارد نیست و میزان قلیایی مورد نیاز برای شروع ASR بسته به مخلوط بتن و شرایط می‌تواند متفاوت باشد. Stark (۱۹۸۰) خرابی واکنش قلیایی سنگدانه را در سازه‌های بزرگ‌گراهی که با استفاده از سیمان با مواد قلیایی در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۵۷ درصد  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  ساخته شده‌اند، گزارش کرد؛ واکنش‌زایی سنگدانه‌های خاص با سیمان‌های کم قلیا در آزمایش‌های انبساط میله ملات<sup>۶۷</sup> آزمایشگاهی تأیید شد. Thomas (۱۹۹۶) شواهدی از ASR را در سازه‌های هیدرولیکی متعددی با محتویات قلیایی کمتر از ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  گزارش نموده است. سنگدانه‌هایی که به‌طور معمول هنگام استفاده در بتن با سیمان کم قلیا واکنش‌زا نیستند، ممکن است در بتن با مقدار قلیایی زیادتر به شکل مخربی واکنش‌زا باشند. این امر ممکن است به دلیل غلظت قلیایی ناشی از اختلاف خشک‌شدن، آزادسازی قلیایی از سنگدانه‌ها، یا ورود قلیاها از منابع خارجی (نمک‌های یخ‌زدا یا آب دریا) رخ دهد. Stark (۱۹۷۸) افزایش در قلیایی محلول از ۱/۱ به ۳/۶ کیلوگرم بر مترمکعب  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  را نزدیک به سطح برخی از سازه‌های بزرگ‌گراهی گزارش داد. مهاجرت قلیایی‌ها به دلیل رطوبت، دما و اختلاف‌های الکتریکی نیز در مطالعات آزمایشگاهی نشان داده شده است (Nixon و همکاران، ۱۹۷۹؛ Xu و Hooton، ۱۹۹۳).

تحقیقات نشان داده است که بسیاری از سنگدانه‌ها حاوی مواد قلیایی هستند که ممکن است به درون مایع منفذی بتن نشت نمایند و در نتیجه خطر ایجاد واکنش قلیایی سنگدانه را افزایش دهند (Stark، ۱۹۸۰؛ Stark

<sup>۶۶</sup> Alkali loading

<sup>۶۷</sup> Mortar bar expansion tests

و Bhatti، ۱۹۸۶؛ Way و Cole، ۱۹۸۲؛ Van Aardt و Visser، ۱۹۷۷؛ Thomas و همکاران، ۱۹۹۱؛ Bérubé و همکاران، ۲۰۰۲). Stark و Bhatti (۱۹۸۶) گزارش کردند که در شرایط شدید، برخی از سنگدانه‌ها قلیایی می‌تواند تا ۱ کیلوگرم بر مترمکعب باشد (Bérubé و همکاران، ۲۰۰۲؛ Grattan Bellew، ۱۹۹۵).

قلیایی‌ها ممکن است از منابع خارجی مانند آب لب‌شور، آب‌های زیرزمینی حاوی سولفات، آب دریا، یا نمک‌های ضدیخ یا یخ‌زدا به بتن نفوذ کنند. Nixon و همکاران (۱۹۸۷) نشان دادند که آب دریا (یا محلول‌های NaCl) موجود در آب اختلاط، غلظت یون هیدروکسیل را افزایش و میزان انبساط بتن را افزایش می‌دهد. Oberholster (۱۹۹۲) نشان داد که انبساط بلوک‌های بتنی بزرگ در معرض پاشش آب شور ممکن است در مقایسه با بلوک‌های مشابهی که در معرض پاشش آب لوله‌کشی قرار دارند دو برابر شود. علاوه بر این، مطالعات در دانمارک (Chatterji و همکاران، ۱۹۸۷) نشان داده است که قرار گرفتن در معرض محلول NaCl (و سایر نمک‌های قلیایی) می‌تواند منجر به انبساط و ترک قابل توجه در بتن گردد.

### ۵-۱-۶-۳. استفاده از مواد مکمل سیمانی

Stanton (b1۹۴۰) گزارش داد که انبساط ناشی از واکنش‌زایی سنگدانه‌ها با قلیایی‌ها می‌تواند با استفاده از سیمان پوزولانی حاوی شیل ریز آسیاب‌شده<sup>۶۸</sup> یا از طریق جایگزینی ۲۵ درصد سیمان پرتلند با قلیایت زیاد با پومیسیت<sup>۶۹</sup> کاهش یابد. آزمایش‌های بعدی توسط Stanton (۱۹۵۰) اثر مفید طیف وسیعی از پوزولان‌های طبیعی را تایید کرد و نشان داد که جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با مقدار کافی پوزولان (پومیسیت یا شیل کلیسینه‌شده<sup>۷۰</sup>) انبساط مخرب را از بین می‌برد، در حالی که جایگزینی با مقدار مشابه ماسه کوارتز (اتاوا) آسیاب‌شده چنین نتیجه‌ای در بر نداشت، که نشان می‌دهد اثر مفید پوزولان فراتر از کاهش قلیایی‌های سیمان است. اولین استفاده عمده از پوزولان طبیعی برای کنترل ASR به دهه ۱۹۴۰ برمی‌گردد، زمانی که شیل سیلیسی کلیسینه‌شده (شیل Puente) همراه با سیمان کم قلیا در سد Davis مورد استفاده قرار گرفت (Moran و Gilliland، ۱۹۴۹). در دهه ۱۹۵۰ مطالعات مختلف (Cox و همکاران، ۱۹۵۰؛ Barona، ۱۹۵۱؛ Pepper و Mather، ۱۹۵۹) نشان دادند که سایر مواد مکمل سیمان (یعنی خاکستر بادی و سرباره) نیز در کاهش انبساط موثر بودند. تحقیقات بعدی نشان دادند که دوده‌سیلیس در کنترل ASR بسیار مؤثر بود، و با مقادیر جایگزینی ۱۰ درصد یا کمتر برای کنترل انبساط مخرب در منشورهای ملات با سنگدانه‌های واکنش‌زا از ایسلند (Asgeirsson و Gudmundsson، ۱۹۷۹) و آفریقای جنوبی (Westra و Oberholster، ۱۹۸۱) کافی است<sup>۷۱</sup>.

<sup>۶۸</sup> Finely ground shale

<sup>۶۹</sup> Pumicite

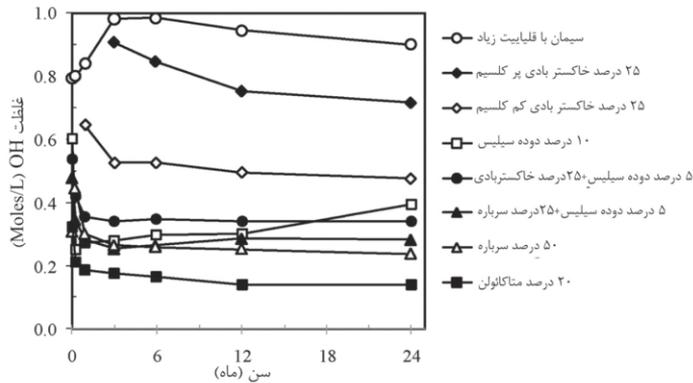
<sup>۷۰</sup> Calcined shale

<sup>۷۱</sup> توضیحات مترجم: زیرا سنگدانه‌های این مناطق به واکنش‌زایی زیاد با قلیایی‌ها معروف هستند.

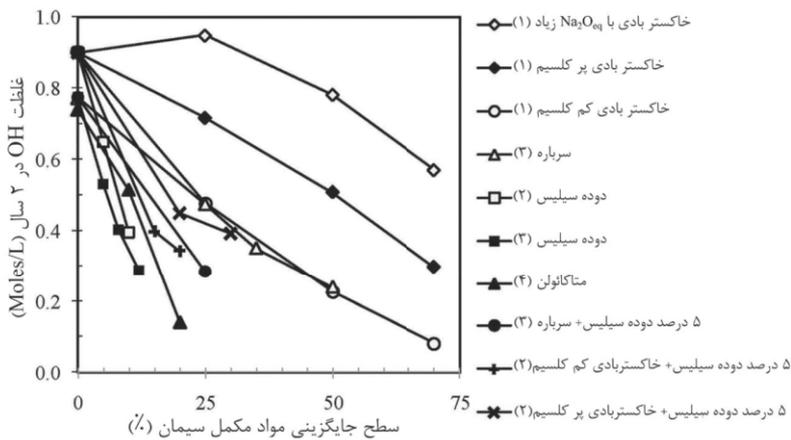
همه مواد مکمل سیمان حاوی مواد قلیایی هستند و برخی (به عنوان مثال خاکستر بادی) ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای بیش تر از سیمان پرتلندی که جایگزین آن می‌شوند، حاوی این مواد باشند. این امر منجر به بحث‌های قابل توجهی در گذشته در مورد اینکه آیا قلیایی‌های مواد مکمل سیمان به طور بالقوه برای واکنش در دسترس هستند و اینکه چگونه باید هنگام محاسبه بار قلیایی بتن با آن‌ها برخورد کرد، شده است. با این وجود، اکنون به طور کلی پذیرفته شده که سازوکار اصلی که توسط آن مواد مکمل سیمان استعداد واکنش مخرب را کاهش می‌دهند، از طریق کاهش قلیایی‌های موجود در مایع منفذی بتن است. قلیاهای آزاد شده توسط سیمان پرتلند و مواد مکمل سیمان ممکن است به یکی از این سه شکل موجود باشند: محلول در مایع منفذی، مقید شده توسط محصولات هیدراته‌شدن، یا تثبیت شده توسط محصولات ژل قلیایی سیلیسی. در سامانه‌های فاقد سنگدانه‌های واکنش‌زا، تقسیم قلیاها بین مایع منفذی و هیدرات‌ها عمدتاً تابعی از ترکیب مواد سیمانی می‌باشد (Thomas, ۲۰۱۱).

حجم زیادی از داده‌ها در ادبیات فنی وجود دارد که نشان‌دهنده چگونگی اثر مواد مختلف جایگزین سیمان بر ترکیب مایع منفذی استخراج شده از خمیرهای سیمان هیدراته شده است (Longuet, ۱۹۷۶؛ Diamond و همکاران، ۱۹۸۷؛ Canham و همکاران، ۱۹۸۱؛ Lopez-Flores، ۱۹۸۱؛ Diamond، ۱۹۸۱؛ Glasser، a,b، ۱۹۸۳؛ Marr و Glasser، ۱۹۸۵؛ Canham، ۱۹۸۷؛ Kawamura و همکاران، ۱۹۸۷؛ Kollek و همکاران، ۱۹۸۶؛ Duchesne، ۱۹۹۲؛ Bérubé، ۱۹۹۲؛ Kawamura، ۱۹۹۴؛ Andersson و همکاران، ۱۹۸۹؛ Page و Vennesland، ۱۹۸۳؛ Kawamura و همکاران، ۱۹۸۷؛ Durand و همکاران، ۱۹۹۰؛ Yilmaz و Glasser، ۱۹۹۰؛ Rasheeduzzafar و Hussain، ۱۹۹۱؛ Shehata و همکاران، ۱۹۹۵؛ Wu و Nagataki، ۱۹۹۵؛ Shehata و همکاران، ۱۹۹۹؛ Boddy و همکاران، ۲۰۰۲؛ Thomas، ۲۰۰۲؛ Bleszynski، ۲۰۰۲؛ Shehata و Thomas، ۲۰۰۲). مطالعات انجام شده بر روی اثر خاکستر بادی و سرپاره بر مایع منفذی خمیرها توسط Thomas (۱۹۹۶) و تحقیقات مربوط به دوده‌سیلیس توسط Thomas و Bleszynski (۲۰۰۱) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که اختلاط اکثر مواد مکمل سیمانی منجر به کاهش غلظت هیدروکسیدهای قلیایی در مایع منفذی خمیرها، ملات‌ها و بتن‌ها می‌گردد و این میزان کاهش با افزایش میزان مواد مکمل سیمان تشدید می‌گردد. شکل ۱-۵-۳ تغییرات غلظت یون هیدروکسید در مایع منفذی استخراج شده از نمونه‌های خمیر مهر و موم شده با نسبت  $w/cm$  برابر با ۰/۵، و شکل ۱-۵-۳ ب غلظت OH<sup>-</sup> را به عنوان تابعی از مقدار مواد مکمل سیمانی در ۲ سال نشان می‌دهند (بر گرفته از Thomas (۲۰۰۱) با استفاده از داده‌های Shehata و همکاران (۱۹۹۹)، Ramlochan و همکاران (۲۰۰۰)، Bleszynski (۲۰۰۲)، و Thomas و Shehata (۲۰۰۲)). کارآمدترین ماده‌ی مکمل سیمان از نظر کاهش قلیائیت مایع منفذی دوده‌سیلیس بود و متاکاژولن و خاکستر بادی کم کلسیم پس از آن قرار می‌گیرند. سرپاره و خاکستر بادی پر کلسیم اثر گذاری کمتری داشتند و باید در مقادیر زیادتر جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گیرند. Thomas (۲۰۱۱) نشان داد که غلظت قلیایی در مایع منفذی تابعی از ترکیب مواد سیمانی (سیمان و مواد مکمل سیمان) به ویژه مقدار قلیایی (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>)، کلسیم (CaO) و سیلیس است. شکل ۱-۵-۳ ج، یک همبستگی قوی بین غلظت یون هیدروکسید در مایع منفذی و پارامتر شیمیایی  $(Na_2O_{eq}/CaO)/(SiO_2)^2$  محاسبه شده بر اساس ترکیب شیمیایی مواد سیمانی (سیمان و مواد مکمل سیمان) را نشان می‌دهد. بنابراین، مواد مکمل سیمان با مقادیر

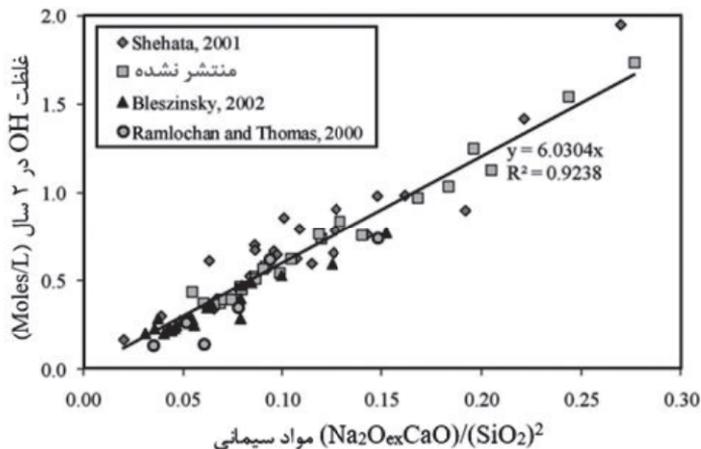
سیلیس زیادتر و مقادیر کلسیم و قلیایی کمتر از نظر کنترل قلیایی در دسترس برای واکنش کارآمدتر خواهند بود.



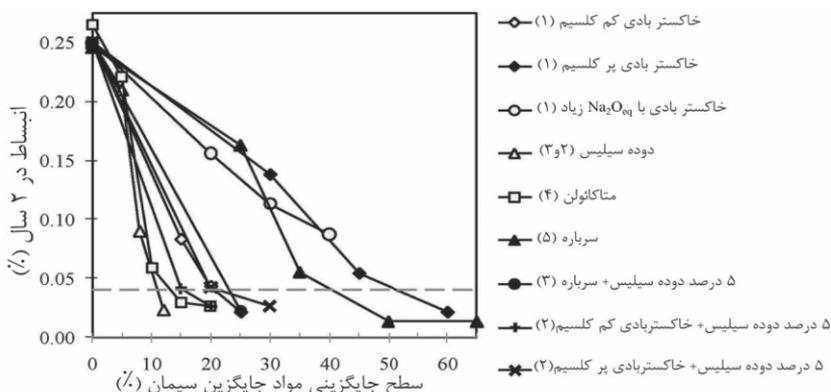
شکل ۵-۱-۶-۳ الف- تغییرات مایع منفذی خمیر شامل مواد مکمل سیمان (Shehata و همکاران، ۱۹۹۹؛ Ramlochan و همکاران، ۲۰۰۰؛ Bleszynski، ۲۰۰۲؛ Thomas و Shehata، ۲۰۰۲).



شکل ۵-۱-۶-۳ ب- اثر نوع مواد مکمل سیمان و سطح جایگزینی بر غلظت یون هیدروکسیل مایع منفذی در ۲ سال ((۱)- Shehata و Thomas، ۲۰۰۲؛ (۲)- Shehata و همکاران، ۱۹۹۹؛ (۳)- Bleszynski، ۲۰۰۲؛ (۴)- Ramlochan و همکاران، ۲۰۰۰).



شکل ۵-۱-۶-۳ ج- رابطه بین ترکیب مایع منفذی و ترکیب شیمیایی مواد سیمانی.



شکل ۵-۱-۶-۳-د اثر مواد مکمل سیمان بر انبساط ۲ ساله بتن حاوی سنگ آهک سیلیسی (۱) Shehata و همکاران (۱۹۹۹)؛ (۲) Shehata و Thomas (۲۰۰۲)؛ (۳) Bleszynski (۲۰۰۲)؛ (۴) Ramlochan و Thomas (۲۰۰۰)؛ و (۵) Thomas و Innis (۱۹۹۸).

توانایی مواد مکمل سیمان برای کاهش قلیائیت مایع منفذی به تأثیر آن‌ها بر ترکیب و ظرفیت مقیدسازی قلیایی در هیدرات‌ها مرتبط است. استفاده از مواد مکمل سیمانی نسبت  $Ca/Si$  هیدرات‌ها را کاهش می‌دهد که منجر به مقیدشدن قلیایی بیش‌تری می‌گردد (Bhatty و Greening، ۱۹۷۸؛ Rayment، ۱۹۸۲؛ Uchi-kawa و همکاران، ۱۹۸۹؛ Thomas و همکاران، ۱۹۹۱). Glasser و Marr (۱۹۸۵) تفاوت‌های جذب قلیایی را بر اساس بار سطحی C-S-H که به نسبت  $Ca/Si$  وابسته است، توضیح می‌دهند. در نسبت‌های زیاد  $Ca/Si$ ، بار مثبت است و C-S-H تمایل به دفع کاتیون‌ها دارد. با کاهش نسبت  $Ca/Si$ ، بار مثبت کاهش یافته و در نسبت‌های  $Ca/Si$  کمتر از ۱/۳، منفی می‌گردد (Glasser، ۱۹۹۲). C-S-H با بار منفی ظرفیت افزایش‌یافته‌ای برای جذب کاتیون‌ها، به ویژه قلیایی‌ها دارد. Glasser و Hong (۱۹۹۹) اهمیت نسبت  $Ca/Si$  در ظرفیت مقیدسازی قلیایی توسط C-S-H تک‌فاز ساخته‌شده در آزمایشگاه را تأیید کردند، اما در پی آن نشان دادند که ظرفیت مقیدسازی می‌تواند با واردشدن آلومین به C-S-H برای تشکیل C-A-S-H به میزان زیادی افزایش یابد (Glasser و Hong، ۲۰۰۲).

مواد مکمل سیمان که در مقیدسازی قلیاها و کاهش غلظت قلیایی مایع منفذی بسیار کارآمد هستند، در کنترل انبساط بتن حاوی سنگدانه‌های واکنش‌زا نیز بسیار مؤثر می‌باشند. شکل ۵-۱-۶-۳ د انبساط ۲ ساله منشورهای بتنی (در روش ASTM C1293) را به‌صورت تابعی از نوع و مقدار مواد مکمل سیمان مورد استفاده، نشان می‌دهد (Thomas، ۲۰۱۱). یک بار دیگر مشخص شد که مواد مکمل سیمان با بیش‌ترین سیلیس و کمترین نسبت  $Ca/Si$  (دوده‌سیلیس، متاکائولن و خاکستر کم کلسیم) دارای بیش‌ترین تأثیرگذاری است و باید با درصد جایگزینی ۱۰ تا ۳۰ درصد استفاده شوند، در حالی که سرپاره و خاکستر بادی پر کلسیم باید در سطوح جایگزینی زیادتر مورد استفاده قرار گیرند. به غیر از مواد با مقدار قلیایی بسیار زیاد، همه مواد مکمل سیمان مشروط بر اینکه در مقدار مناسبی از جایگزینی استفاده گردند، می‌توانند برای کنترل ASR مورد استفاده قرار گیرند. ASTM C1778 خاکستر بادی با قلیائیت زیاد را به عنوان خاکستر بادی با بیش

از ۴/۰ درصد  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  و سرباره و دوده سیلس با قلیابیت زیاد را دارای بیش از ۱/۰ درصد  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  معرفی می‌کند. ACI 301 به عنوان یک اقدام پیشگیرانه میزان قلیایی خاکستر بادی مورد استفاده را به ۴/۰ درصد محدود می‌کند، مگر اینکه با استفاده از آزمایش ASTM C1293، غیرمخرب بودن انبساط نشان داده شود. مقدار مواد مکمل سیمان مورد نیاز برای کنترل ASR به موارد زیر بستگی دارد (Thomas، ۲۰۱۱):

الف) ترکیب مواد مکمل سیمانی: با افزایش مقدار قلیایی یا کلسیم و یا با کاهش مقدار سیلیس در مواد مکمل سیمان، افزایش مقادیر مصرف مورد نیاز است.

ب) سهم قلیایی تأمین‌شده توسط سیمان پرتلند: معمولاً با افزایش قلیایی تأمین‌شده توسط سیمان، مقادیر بیش‌تری از مواد مکمل سیمان مورد نیاز است.

ج) واکنش‌زایی سنگدانه: با افزایش واکنش‌زایی سنگدانه مقدار مواد مکمل سیمان مورد نیاز باید افزایش یابد. در اکثر شرایط، معمولاً مقادیر جایگزینی زیر برای کنترل انبساط ناشی از ASR کافی می‌باشند (Thomas، ۲۰۰۱):

دوده‌سیلیس - ۱۰ تا ۱۵ درصد<sup>۳</sup>

متاکاتولن - ۱۵ تا ۲۰ درصد

خاکستر بادی کم کلسیم - ۲۰ تا ۳۰ درصد

سرباره - ۳۵ تا ۵۰ درصد

خاکستر بادی پر کلسیم -  $\geq 40$  درصد

با این حال، همان‌طور که قبلاً بحث شد، مقدار مواد مکمل سیمان مورد نیاز باید به‌صورت موردی با آزمایش عملکردی مناسب یا با ارجاع به دستورالعمل‌های تجویزی تدوین‌شده بر اساس داده‌های تجربی تعیین گردد. ASTM C1778 و AASHTO R 80، که در بخش ۵-۱-۸ مورد بحث قرار گرفتند، روش‌هایی را هم بر اساس عملکرد و هم بر اساس تجویز برای تعیین مقدار مواد جایگزین مورد نیاز ارائه می‌دهند.

### ۵-۱-۶-۴. استفاده از مواد افزودنی شیمیایی

مواد افزودنی شیمیایی برای مهار ASR مخرب به‌طور گسترده در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. این مواد شامل نمک‌های لیتیوم، نمک‌های باریم، سدیم سیلیکا فلوراید و آلکیل آلکوکسی سیلان<sup>۳</sup> هستند. علاقه به استفاده از ترکیبات لیتیوم، به ویژه لیتیوم نترات، منجر به تحقیقات و آزمایش‌های قابل ملاحظه‌ای در محیط‌های آزمایشگاهی و میدانی شده است. این مطالعات توانایی ترکیبات لیتیوم را برای کنترل ASR در ساخت‌وسازهای بتنی جدید و همچنین قابلیت لیتیوم برای کاهش ASR در حال پیشرفت در اعضای بتنی موجود که تحت تاثیر ASR قرار گرفته‌اند (به عنوان مثال، روسازی‌ها، موانع بزرگراه‌ها و اعضای پل‌ها)، بررسی کرده‌اند. بحث مختصری در مورد یافته‌های مربوط به نمک‌های لیتیوم در ادامه آورده شده است.

<sup>۳</sup> توضیحات مترجم: در ACI 221.2R مقدار دوده‌سیلیس بیش از ۵ درصد ذکر شده است و در عمل نیز این امر تأیید می‌شود.  
<sup>73</sup> Alkyl alkoxy silane

### ۵-۶-۱-۵. نمک‌های لیتیوم

McCoy و Caldwell (۱۹۵۱) در مورد توانایی ترکیبات لیتیوم ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$  و  $\text{LiF}$ ،  $\text{LiCl}$ ،  $\text{LiNO}_3$ ) در کنترل ASR گزارش دادند. با این حال، بسیاری از محققان از اواخر دهه ۱۹۸۰ به استفاده از لیتیوم علاقه نشان داده‌اند؛ یک پروژه تحقیقاتی بزرگ (شامل آزمایش‌های میدانی) تحت حمایت برنامه تحقیقات استراتژیک بزرگراه‌ها<sup>۷۴</sup> به انجام رسید (Stark و همکاران، ۱۹۹۳).

تحقیق اولیه McCoy و Caldwell (۱۹۵۱) و Lawrence و Vivian (۱۹۶۱) نشان داد که نسبت مولی  $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{K}]$  برابر با ۰/۷۴ برای کنترل ASR ضروری است. با این وجود، Tremblay و همکاران (۲۰۰۷) و Feng و همکاران (۲۰۰۸) نشان داده‌اند که مقدار لیتیوم مورد نیاز برای کنترل ASR بسیار متفاوت است و تا حد زیادی به نوع سنگدانه بستگی دارد. چندین محقق نشان داده‌اند که نسبت مولی  $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{K}]$  در محدوده ۰/۶۰ تا ۱/۱ برای جلوگیری از انبساط بسیاری از انواع سنگدانه‌ها کافی می‌باشد (Sakaguchi و همکاران، ۱۹۸۹؛ Stark و همکاران، ۱۹۹۳؛ Tremblay و همکاران، ۲۰۰۷). اما Tremblay و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که برای انواع سنگدانه‌ها (گنایس گرانیتی<sup>۷۵</sup>، گری واک<sup>۷۶</sup>) مقادیر  $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{K}]$  کمتر از ۱/۱ ممکن است کافی نباشد. توصیه می‌شود احتیاط بیش‌تری در نظر گرفته شود زیرا لیتیوم ناکافی ممکن است در واقع باعث افزایش انبساط شود (Stark و همکاران، ۱۹۹۳). سایر محققان نشان داده‌اند که نمک‌های لیتیوم مانند  $\text{LiOH}$  و  $\text{LiCO}_3$  نسبت به  $\text{LiNO}_3$  در کاهش یا حذف ASR از اثرگذاری کمتری برخوردارند (Collins، ۲۰۰۴). چندین سند، مطالب مروری و راهنمای دقیق‌تری را برای استفاده از افزودنی‌های بر پایه لیتیوم برای کنترل ASR ارائه می‌کنند (AASHTO، ۲۰۰۰؛ Folliard و همکاران، ۲۰۰۶a).

### ۵-۶-۱-۶. سایر مواد افزودنی شیمیایی

ترکیبات شیمیایی دیگری برای کاهش انبساط ناشی از ASR یافت شده‌اند؛ این مواد شامل نمک‌های باریم مختلف (Hansen، ۱۹۶۰)، سدیم سیلیکا فلوراید و آلکیل آلکوکسی سیلان (Ohama و همکاران، ۱۹۸۹) می‌باشند. طیف وسیعی از ترکیبات توسط Hudc و Larbi (۱۹۸۹) مورد مطالعه قرار گرفتند، اما نتایج تا حد زیادی غیرقطعی بودند. قبل از آنکه چنین مواد افزودنی برای کاربردهای تجاری توصیه شوند، تحقیقات بیش‌تری برای تایید کارآمدی آن‌ها و روشن کردن نقش آن‌ها در کنترل ASR مورد نیاز است.

<sup>74</sup> Strategic Highway Research Program

<sup>75</sup> Granitic gneisses

<sup>76</sup> Greywacke

### ۵-۱-۷. آزمایش‌هایی برای ارزیابی اقدامات پیشگیرانه

#### ۵-۱-۷-۱. آزمایش منشور ملات تسریع شده (ASTM C1567)

ASTM C1567 در سال ۲۰۰۴ برای ارزیابی توانایی مواد مکمل سیمان در کنترل ASR در منشورهای ملات پذیرفته شد. روش آزمایش اساساً با ASTM C1260 یکسان است، با این تفاوت که بخشی از سیمان با مواد جایگزین مورد ارزیابی، جایگزین می‌گردد. بر اساس برآزش با عملکرد میدانی بتن، حد انبساط ۰/۱۰ درصد در ۱۴ روز در ASTM C1567 مشخص شده است (Thomas و همکاران، ۲۰۰۶). در حالی که چندین موسسه معیارهای انبساط متفاوتی را برحسب درصد انبساط و سن اندازه‌گیری (۱۴ روز در مقابل ۲۸ روز) مشخص می‌کنند، هیچ اطلاعات اضافی که نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر این محدودیت‌ها با روش قابل اعتمادتر ASTM C1293 یا تجربیات میدانی از ترکیبات مشابه سنگدانه‌ها و مواد مکمل سیمانی داشته باشند، منتشر نشده است. ASTM C1567 برای ارزیابی کارآمدی لیتیوم نیترات مناسب نیست، زیرا مقدار قابل توجهی از  $\text{LiNO}_3$  استفاده شده در ابتدا به داخل محلول مهاجم موجود NaOH با غلظت ۱ نرمال نشت نماید. نسخه‌های اصلاح شده ASTM C1567 برای ارزیابی لیتیوم پیشنهاد شده‌اند (Tremblay و همکاران، ۲۰۱۰؛ AASHTO R 80؛ CRD-C 662).

#### ۵-۱-۷-۲. آزمایش منشور بتن (ASTM C1293)

استاندارد ASTM C1293 می‌تواند برای ارزیابی کارآمدی مواد مکمل سیمان، افزودنی‌های شیمیایی یا هر دو، مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات CANMET در اتاوا نشان داد که آزمایش منشور بتن در پیش‌بینی کارآمدی مواد مکمل سیمان برای جلوگیری از انبساط قطعات در معرض به مدت تا ۱۰ سال مؤثر بود، اما پیش‌بینی‌ها برای رویارویی طولانی مدت‌تر به آن اندازه دقیق نبودند (Fourmier و همکاران، ۲۰۱۶، a, b). در این آزمایش، بخشی از سیمان با مواد جایگزین مورد ارزیابی، جایگزین می‌گردد. اگر قرار است یک ترکیب شیمیایی مانند لیتیوم نیترات بررسی شود، ممکن است بازهای از مقادیر مصرف در جهت تعیین مقدار مناسب برای کنترل ASR لازم باشد (بخش ۵-۱-۶). باقی روش آزمایش از ASTM C1293 پیروی می‌کند، با این تفاوت که مدت زمان آن به ۲ سال افزایش می‌یابد. بر اساس توصیه استاندارد برای آزمایش منشور بتن، اندازه‌گیری‌ها معمولاً در فواصل ۳ ماهه یا ۶ ماهه پس از اولین سال آزمایش انجام می‌شوند. حد انبساط ۰/۰۴۰ درصد در ۲ سال توسط CSA A23.2-27A مشخص شده و حد انبساط ۰/۰۴ درصد در ASTM C1778 توصیه گردیده است. این حد انبساط یک همبستگی قوی با سازه‌های میدانی که در آن‌ها اقدامات پیشگیرانه مشابه بکار برده شده بود، نشان داده است. این روش همچنین می‌تواند به گونه‌ای مؤثر برای تعیین مقدار مصرف مورد نیاز نمک‌های لیتیوم (از جمله لیتیوم نیترات) جهت کاهش ASR مخرب مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵-۱-۷-۳. آزمایش منشور بتن مینیا توری (AASHTO T 380)

AASHTO T 380 نیز می‌تواند برای ارزیابی اثربخشی اقدامات پیشگیرانه ASR، مشابه فرآیندی که در بخش ۵-۱-۴ شرح داده شد، استفاده گردد. برای ارزیابی اقدامات پیشگیرانه ASR (مانند استفاده از مواد

مکمل سیمان)، انبساط ۵۶ روزه بیش تر از ۰/۰۲۵ درصد نشان دهنده‌ی بی‌اثربودن اقدام پیشگیرانه بود در حالی که انبساط ۵۶ روزه کمتر از ۰/۰۲۰ درصد نشان دهنده‌ی موثر بودن اقدام پیشگیرانه است. در نظرگیری اقدامات پیشگیرانه بیش تر برای انبساط ۵۶ روزه در بازه ۰/۰۲۰ درصد تا ۰/۰۲۵ درصد توصیه می‌گردد. آزمایش‌های اولیه و مقایسه با نتایج قطعات قرار گرفته در معرض شرایط محیطی در آستین تگزاس<sup>۷۷</sup> نشان داده است که این روش آزمایش از قابلیت اطمینان بیش تری (در مقایسه با ASTM C1293) از نظر تعیین اثربخشی مواد مکمل سیمان در بتن‌های حاوی سنگدانه‌ها با واکنش‌زایی زیاد یا بسیار زیاد جهت جلوگیری از ASR برخوردار است. با این حال، برای تایید قابلیت اطمینان این روش برای مجموعه گسترده‌تری از سنگدانه‌ها، آزمایش‌های بیش تری لازم می‌باشد (Tanesi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Chopperla و همکاران، ۲۰۲۲).

#### ASTM C441/C441M. ۵-۷-۱-۰

استاندارد ASTM C441/C441M (که معمولاً به دلیل استفاده از شیشه بوروسیلیکات<sup>۷۸</sup> به عنوان آزمایش منشور ملات پیرکس<sup>۷۹</sup> نامیده می‌شود) عمدتاً برای ارزیابی کارآمدی پوزولان‌ها و سرباره در کنترل انبساط ناشی از ASR مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش آزمایش در دهه ۱۹۴۰ به عنوان روشی برای ارزیابی مناسب بودن پوزولان‌ها جهت استفاده در بتن حاوی سنگدانه‌های واکنش‌زا، از جمله در ارتباط با مشخصات افزودنی‌های سیلیسی برای سد Davis، تدوین شد (Moran و Gilliland، ۱۹۴۹). آزمایش‌های اولیه توسط گروه مهندسان ارتش ایالات متحده<sup>۸۰</sup> و اداره احیای اراضی ایالات متحده<sup>۸۱</sup> نشان دادند که خاکستر بادی و سرباره نسبت به پوزولان‌های طبیعی با سیلیس زیاد از تاثیرگذاری کمتری برخوردارند، و برای اثرگذاری طبق تعریف ASTM C441/C441M باید در مقادیری بیش از ۴۰ درصد استفاده شوند (Mather و Pepper، ۱۹۵۹؛ Pepper، ۱۹۶۳؛ Blanks، ۱۹۵۰). از آن زمان، افراد بیش تر دیگری از این آزمایش برای ارزیابی عملکرد پوزولان‌ها و سرباره، استفاده کرده‌اند.

در استاندارد ASTM C441/C441M، انبساط ۱۴ روزه برای منشورهای ملات ساخته شده با سیمان پر قلیا (۰/۹۵ تا ۱/۰۵ درصد  $\text{Na}_2\text{O}_{eq}$ ) و ۲۵ درصد (حجمی) خاکستر بادی یا ۵۰ درصد سرباره که در دمای ۲۸ درجه سلسیوس نگهداری شده‌اند، با منشورهای شاهد (شامل تنها سیمان) مورد مقایسه قرار می‌گیرد و درصد کاهش انبساط ناشی از مصرف پوزولان یا سرباره محاسبه می‌شود. یا اینکه، مواد و نسبت‌های مخلوطی که در پروژه واقعی استفاده می‌شوند، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. ASTM C989/C989M (مشخصات سرباره) الزامات مربوط به ASR را شامل نمی‌شود، اما یک پیوست غیر اجباری، استفاده از ASTM C441/C441M را با میزان کاهش انبساط ۱۴ روزه به مقدار ۷۵ درصد مخلوط شاهد یا کمتر از ۰/۰۲۰ درصد را با استفاده از مصالح مصرفی در پروژه، پیشنهاد می‌کند. نسخه‌های اولیه آزمایش نیاز به استفاده از سرباره

<sup>77</sup> Austin, TX

<sup>78</sup> Borosilicate glass

<sup>79</sup> Pyrex mortar-bar test

<sup>80</sup> U.S. Army Corps of Engineers

<sup>81</sup> U.S. Bureau of Reclamation

با جایگزینی ۲۰ درصد حجمی داشتند. معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی پوزولان‌ها یا سرباره در این آزمایش به دلیل محافظه‌کاری بیش از حد مورد انتقاد قرار گرفته‌اند (Kennerley و Gebler، ۱۹۸۷؛ Kennerley، ۱۹۸۸؛ Sturup و همکاران، ۱۹۸۱؛ همکاران، ۱۹۸۳).

استعداد دوده‌سیلیس برای کاهش انبساط ASR در صورت استفاده به مقدار جایگزینی معین برابر با ۲۵ درصد حجمی در ASTM C441/441M، به همراه جمع‌شدگی که اغلب پس از یک دوره‌ی آزمایش معمول ۱۴ روزه مشاهده می‌شود، واضح است (Popovic و همکاران، ۱۹۸۴). Gillott و Perry (۱۹۸۵) از مقادیر مختلف دوده‌سیلیس استفاده کرده و دریافتند میزان ۱۰ درصد جایگزینی در کاهش انبساط ۱۴ روزه تا بیش از ۷۵ درصد در مقایسه با مخلوط شاهد موثر بود (این مقدار، معیار پذیرش در آن زمان بود). دیگران توانایی ۱۰ درصد دوده‌سیلیس (Hussain و Rasheeduzzafar، ۱۹۹۱؛ Hooton، ۱۹۹۳) یا مقادیر کمتر (Bérubé و Duchesne، ۱۹۹۲) را برای برآوردن این معیار تأیید کردند. با این وجود، Gillott و Perry (۱۹۸۵) انبساط ادامه‌دار نمونه‌های دوده‌سیلیس بعد از ۱۴ روز را مشاهده نمودند و قابلیت اطمینان آزمایش کوتاه مدت با این روش را زیر سوال بردند.

نتایج حاصل از آزمایش‌های با شیشه بوروسیلیکات (ASTM C441/C441M) نشان داده است که اثرات خاکستر بادی و سرباره به میزان قابل توجهی بین مطالعات متفاوت است. نشان داده شده است که اثر خاکستر بادی به مقدار قلبی‌ها، مقدار کلسیم، درصد پوزولانی بودن و نرمی آن بستگی دارد. تنها اتفاق نظر موجود در پیشینه تحقیقات این است که اثربخشی خاکستر بادی و سرباره با افزایش مقدار جایگزینی بیش‌تر شده، و اینکه کلیه خاکسترهای بادی و سرباره‌ها، مشروط بر اینکه به مقدار کافی مورد استفاده قرار گیرند، می‌توانند برای کنترل واکنش استفاده شوند.

شیشه بوروسیلیکات به شرایط آزمایش (سطح ویژه، مقدار قلبی و دما) بسیار حساس بوده و حاوی مقادیر قابل توجهی قلبی است که امکان ورود به مایع منفذی را دارند. علاوه بر این، شیشه بوروسیلیکات تنها در چند روز واکنش مخرب ایجاد می‌کند. در نتیجه، تعیین نقش پوزولان‌ها و سرباره، به ویژه سهم قلبی آن‌ها، با استفاده از شیشه بوروسیلیکات پیچیده است. نگرانی در مورد اعتبار ASTM C441/441M افزایش یافته است (Hobbs، ۱۹۸۹)، زیرا نتایج با داده‌های آزمایش‌های بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی همبستگی خوبی ندارد (Duchesne و Bérubé، ۱۹۹۲). تلاش‌هایی برای رفع نگرانی‌ها در خصوص این آزمون صورت گرفته اما هیچ تغییر قابل توجهی در روش آزمایش بر اساس تحقیقات حاصل نشده است (Brockman و Struble، ۱۹۸۹؛ Figg، ۱۹۸۱). علی‌رغم نگرانی‌ها، این روش آزمایش به‌عنوان یک استاندارد فعال باقی مانده است و هنوز در حال استفاده می‌باشد. به‌طور کلی، مقدار جایگزینی مورد نیاز برای محدود کردن انبساط در ASTM C441/441M به میزان قابل توجهی زیادتر از مقدار مورد نیاز برای محدود کردن انبساط در بتن حاوی سنگدانه‌های واکنش‌زای طبیعی است. تعداد کمی از سنگدانه‌های تجاری به اندازه شیشه بوروسیلیکات واکنش‌زا هستند.

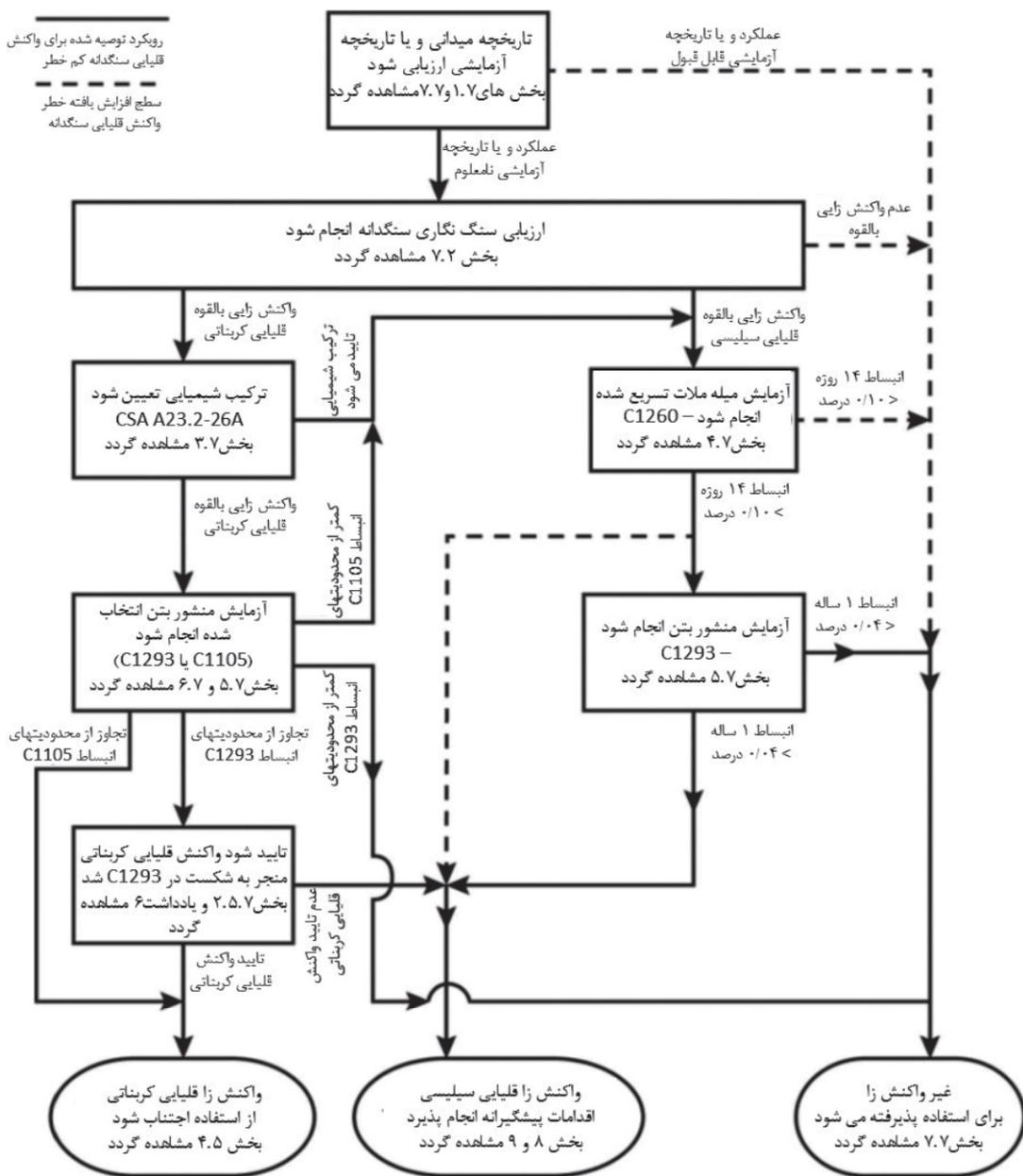
ASTM C441/C441M برای تعیین کارآمدی لیتوم نترات یا سایر ترکیبات لیتوم جهت کنترل ASR توصیه نمی‌شود، زیرا واکنش‌زایی سنگدانه را که برای تعیین مقدار مصرف صحیح لیتوم حیاتی است،

در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، نشت بیش از حد در جریان آزمایش، توانایی آن در پیش‌بینی قابل اعتماد کارآمدی لیتیوم نیترات یا سایر ترکیبات لیتیوم را به شدت محدود می‌کند.

### ۸-۱-۵ راهکارهایی برای به حداقل رساندن خطر واکنش قلیایی سنگدانه

راهکارهای متعددی برای به حداقل رساندن خطر واکنش قلیایی سنگدانه در بتن تدوین شده‌اند. بسیاری از این روش‌ها اساساً رویکردی دو مرحله‌ای دارند. اول، سنگدانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا تعیین شود که آیا قابلیت واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی یا قلیایی کربناتی را دارد؛ دوم، اگر سنگدانه واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی داشته باشد، اقدامات مناسب انتخاب می‌گردند. اگر مشخص شود که سنگدانه دارای واکنش‌زایی قلیایی کربناتی است، معمولاً برای استفاده در بتن رد می‌شود. در کانادا، هر دو رویکرد تجویزی (CSA A23.2-27A) و عملکردی (CSA A23.2-28A) برای انتخاب اقدامات پیشگیرانه در دسترس هستند. در سال ۲۰۱۰، راهکار کانادایی اصلاح و توسط AASHTO به عنوان PP 65 (۲۰۱۰) تصویب گردید (که تدوین آن توسط Thomas و همکاران (۲۰۰۸a) شرح داده شده است) و در سال ۲۰۱۷ با AASHTO R 80 جایگزین شد. در سال ۲۰۱۴، AASHTO PP 65 مورد اصلاح قرار گرفت و توسط ASTM تحت عنوان ASTM C1778 به تصویب رسید. یک روندها<sup>۸۲</sup> از ASTM C1778 که دستورالعمل تعیین واکنش‌زایی سنگدانه را توصیف می‌کند، در شکل ۸-۱-۵ ارائه شده است. سنگدانه‌ها را می‌توان صرفاً بر اساس عملکرد میدانی مطلوب و یا بررسی سنگ‌نگاری پذیرفت، اما دستورالعمل هشدار می‌دهد که سطح معینی از خطر را کارفرما باید بپذیرد زیرا هر یک از این رویکردها ممکن است در شناسایی یک سنگدانه واکنش‌زا ناکام باشد. توصیه بر انجام آزمایش انبساط وجود دارد و در این میان، ارجحیت بر انجام آزمایش ASTM C1293 که به باور محققین قابل اعتمادترین آزمایش برای شناسایی واکنش‌زایی سنگدانه است، می‌باشد. با این حال، از آنجایی که مدت ۱ ساله آن، این آزمایش را در بسیاری از مواقع غیر عملی می‌کند، این دستورالعمل اجازه می‌دهد تا واکنش‌زایی سنگدانه با استفاده از ASTM C1260 تعیین شود و به این نکته اشاره دارد که این روش اغلب منجر به نتیجه‌گیری مثبت کاذب (یعنی برخی از سنگدانه‌های غیر واکنش‌زا را به عنوان واکنش‌زا شناسایی می‌کند) و گاهی اوقات منجر به نتیجه‌گیری منفی کاذب می‌شود؛ یعنی نمی‌تواند به درستی برخی از سنگدانه‌های واکنش‌زا را شناسایی کند. سنگ‌های کربناتی استخراج‌شده بر اساس ترکیب شیمیایی آن‌ها (MgO و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، CaO) برای تعیین استعداد ACR آن‌ها ارزیابی می‌شوند (CSA A23.2-26A). اگر مشخص شود که سنگ استعداد واکنش‌زایی قلیایی کربناتی می‌باشد، باید در بتن آزمایش شود، زیرا آزمایش منشور ملات تسریع‌شده برای تعیین خطر ACR مناسب نمی‌باشد. سه نتیجه حاصل از دستورالعمل وجود دارد که در شکل ۸-۱-۵ نشان داده شده است و توصیه‌ها برای هر نتیجه به شرح زیر می‌باشند:

نتیجه آزمایش	اقدام توصیه شده
سنگدانه به طور مخرب واکنش زا نیست.	پذیرش سنگدانه برای استفاده - هیچ پیشگیری نیاز نمی باشد.
سنگدانه واکنش زا قلیایی کرناتی است.	از مواد واکنش زا اجتناب شود.
سنگدانه واکنش زا قلیایی سیلیسی است.	سنگدانه رد شود یا اقدامات پیشگیرانه مناسب انتخاب گردد.



شکل ۵-۱-۸- برنامه آزمایش برای تعیین واکنش ژایی سنگدانه (توجه: این شکل از ASTM C1778 برداشت شده و به بخش های داخل آن سند اشاره می کند).

اقدامات پیشگیرانه مجاز عبارتند از: ۱) محدود کردن مقدار قلیایی‌ها در بتن؛ ۲) استفاده از مواد مکمل سیمانی؛ ۳) استفاده از افزودنی بر پایه لیتیوم. میزان مواد مکمل سیمانی مورد نیاز می‌تواند با استفاده از ASTM C1293 یا ASTM C1567 تعیین شود. مقدار مصرف لیتیوم نیز می‌تواند با استفاده از ASTM C1293 یا نسخه اصلاح شده ASTM C1567 مشخص گردد. ASTM C1293 ارجح است، اما به دلیل مدت زمان ۲ ساله آن، اجازه استفاده از ASTM C1567 داده می‌شود.

این روش همچنین حاوی دستورالعملی برای تعیین محدودیت مناسب بار قلیایی یا مقدار مواد مکمل سیمان با استفاده از رویکردی تجویزی است که بر مبنای داده‌های تجربی ایجاد شده است. محدودیت‌ها (حداکثر مقدار قلیایی و حداقل مقدار مواد مکمل سیمان) بر اساس معیارهای زیر می‌باشند:

الف) واکنش‌زایی سنگدانه، بر اساس میزان انبساط در آزمایش منشور بتن یا آزمایش منشور ملات تسریع شده

ب) شرایط رویارویی (در دسترس بودن رطوبت و قلیایی‌های خارجی) و اندازه قطعه

ج) طبقه‌بندی سازه بر اساس طول عمر بهره‌برداری مورد نیاز و عواقب ناشی از ASR، و نوع و ترکیب مواد مکمل سیمانی

حداکثر بار قلیایی بتن بسته به خطر ASR و سطح پیشگیری مورد نیاز در محدوده ۱/۸ تا ۳/۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب  $Na_2O_{eq}$  متغیر است. به‌طور مشابه، حداقل مقدار مواد مکمل سیمان از ۱۵ درصد خاکستر بادی یا ۲۵ درصد سرباره در جایی که خطر ASR کم و فقط اقدامات کاهشی خفیف مورد نیاز است، تا ۳۵ درصد خاکستر بادی یا ۶۵ درصد سرباره در محل‌هایی که خطر ASR زیاد و اقدامات سخت‌گیرانه‌تری لازم می‌باشد، متغیر است. در موارد بسیار شدید، به عنوان مثال، در محل‌هایی که یک سازه بسیار مهم با عمر ۱۰۰ سال باید با سنگدانه‌ای بسیار واکنش‌زا ساخته شود و در حین بهره‌برداری در معرض قلیاها قرار می‌گیرد، لازم است هم مقدار قلیایی بتن محدود شود و هم از مقدار زیاد مواد مکمل سیمان استفاده گردد.

## ۵-۲. اکسید شدن کانی آهن سولفید در بتن

### ۵-۲-۱. مقدمه

اصطلاح آهن سولفید به تعدادی از مواد معدنی متشکل از آهن و گوگرد با فرمول شیمیایی FeS اشاره دارد. فراوان‌ترین آن‌ها کانی‌های آهن دوظرفیتی دیسولفید پیریت<sup>۸۳</sup> ( $FeS_2$ ) به شکل مکعبی، همراه با ساختار چند ریخته آن<sup>۸۴</sup>، مارکازیت، به شکل اورتورومیک<sup>۸۵</sup> است. پیروتیت<sup>۸۶</sup> با فرمول  $Fe_{1-x}S$ ، با محدوده x از صفر ( $FeS$ ) تا ۰/۱۲۵ ( $Fe_7S_8$ ) دومین نوع رایج می‌باشد. کانی‌های کالکوپیریت<sup>۸۷</sup> ( $CuFeS_2$ )، پنتلاندیت<sup>۸۸</sup>

<sup>۸۳</sup> Disulfide minerals pyrite

<sup>۸۴</sup> Polymorph

<sup>۸۵</sup> Orthorhombic

<sup>۸۶</sup> Pyrrhotite

<sup>۸۷</sup> Chalcopyrite

<sup>۸۸</sup> Pentlandite

( $(Fe, Ni)_9S_8$ ) و اسفالریت<sup>۸۹</sup> ( $Zn, Fe$ )S کمتر رایج هستند. این کانی ها اغلب در کنار یکدیگر یافت می شود و ممکن است در انواع مختلف سنگ ها، معمولاً به عنوان کانی های فرعی جزئی در غلظت های کم، وجود داشته باشند. کانی آهن سولفید در حضور اکسیژن و رطوبت مستعد اکسید شدن هستند. هنگامی که در سنگدانه های بتن وجود داشته باشند، واکنش اکسید شدن این قابلیت را دارد که منجر به نیروهای انبساطی با پیامدهای مخرب از لکه گذاری نامطلوب در خصوص پیریت تا تخریب شدید سازه ناشی از حمله سولفاتی داخلی بتن در موارد مرتبط با پیرویت گردد.

آسیب به بتن به دلیل اکسید شدن پیرویت موجود در سنگدانه های بتن در تعداد کمی از موارد شناخته شده است که قدمت آن ها به دهه ۱۹۵۰ و استفاده از شیل های خاص در شهر اسلو از کشور نروژ برمی گردد (Moum و Rosenquist, ۱۹۵۹). بین سال های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۸ مشاهده شد که استفاده از سنگدانه های حاوی پیرویت از یک توده سنگ آذرین خاص در منطقه Saint-Boniface حاوی گابرو آنورتوزیتی<sup>۹۰</sup> با درجات دگرگونی مختلف در پی های بتنی، انسجام سازه ای ساختمان ها مسکونی و تجاری در منطقه Trois Riv-ières در کبک کانادا را پس از ۵ سال از زمان ساخت، مختل نمود (Rodrigues و همکاران، ۲۰۱۲). در شالوده های بتنی ساختمان ها مسکونی در بخش شمال شرقی ایالت کانکتیکت در ایالات متحده که بین سال های ۱۹۸۳ و ۲۰۱۵ ساخته شده اند، نشانه هایی از وقوع خرابی حاصل از اکسید شدن پیرویت موجود در یک منبع خاص سنگ دگرگونی گنایس و شستی<sup>۹۱</sup> از معدن Beckers در ولینگتون پس از ۱۰ تا ۲۰ سال از زمان ساخت یافته شده است (Wille و Zhong, ۲۰۱۸). در حالی که این سه مورد غالباً در ساخت شالوده بتنی یافت شد، اکسید شدن پیرویت از سنگ شست<sup>۹۲</sup> استفاده شده در سدها در منطقه Pyrenees اسپانیا نیز مستند شده است (Ayora و همکاران، ۱۹۹۸).

این بخش در مورد اثرات مخرب بالقوه واکنش اکسید شدن کانی های آهن دی سولفید پیریت/مارکازیت و به ویژه پیرویت بحث خواهد کرد. سایر آهن سولفیدها نسبتاً کمیاب می باشد و در حال حاضر مشخص نیست که واکنش های مخربی در بتن داشته باشند.

## ۵-۲-۲. پیدایش و شناسایی ماده معدنی

آهن سولفیدها گروه مهمی از مواد معدنی سنگ ساز هستند که به طور گسترده به عنوان کانی های فرعی اما مهم در انواع سنگ ها که هر سه نوع سنگ اصلی آذرین، رسوبی و دگرگونی را در بر می گیرند، وجود دارند (Bowles و همکاران، ۲۰۱۱). پیریت بیشترین فراوانی را داشته است و پس از آن پیرویت قرار دارد.

<sup>۸۹</sup> Sphalerite

<sup>۹۰</sup> Anorthositic gabbro

<sup>۹۱</sup> Schistose

<sup>۹۲</sup> Schist

### ۰-۲-۲-۱. پیریت

پیریت با فرمول شیمیایی  $FeS_2$  به دلیل شباهت رنگ و شکل آن به طلا معمولاً به عنوان «طلای ابلهان» شناخته می‌شود. این ماده رایج‌ترین و فراوان‌ترین ماده معدنی سولفیدی است. سنگدانه‌های حاوی مقادیر کم پیریت، در انواع شرایط محیطی در سراسر جهان وجود دارند. پیریت یک ماده معدنی جانبی رایج در سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی است و به عنوان یک منبع سنگ معدن اصلی برای سولفوریک اسید استخراج می‌شود. پیریت دارای ساختار بلوری ایزومتریک<sup>۹۳</sup> با رنگ زرد برنجی و درخشش فلز مانند می‌باشد. این مواد اغلب به شکل‌های مکعبی، دوازده وجهی و هشت وجهی مشاهده می‌شوند، اما در بسیاری از شکل‌های تجمع یافته نیز یافت می‌گردند و معمولاً به صورت فرامبوئیدها<sup>۹۴</sup> در شیل یا سنگ آهک دیده می‌شوند. پیریت فرامبوئیدی دارای سطح ویژه بزرگ است و بنابراین از استعداد زیادی برای اکسید شدن برخوردار می‌باشد (Pugh و همکاران، ۱۹۸۴). پیریت یک کانی کدر با سختی ۶ تا ۶/۵، شکستگی مخروطی<sup>۹۵</sup> و یک رگه سیاه سایه رنگ سبز کم رنگ است. مارکازیت دارای ترکیب شیمیایی و سختی مشابه پیریت است، اما راست لوزی با رنگ زرد کم‌رنگ می‌باشد. در نمونه‌های جلا داده شده، پیریت را می‌توان از طریق انعکاس نور آن تشخیص داد. این کانی به رنگ سفید مایل به زرد با ناهمسان‌گردی ضعیف ظاهر می‌شود.

### ۰-۲-۲-۲. پروتیت

پروتیت دومین ماده معدنی فراوان آهن سولفید و بسیار کمتر از پیریت متداول است. پروتیت به عنوان یک فاز جانبی در طیف گسترده‌ای از ذخایر سنگ معدن، سنگ‌های مادر و وضعیت زمین شناسی یافت می‌شود. این ماده عمدتاً یک ماده معدنی تشکیل شده در دما و فشار زیاد است، اما برخی از انواع آن می‌توانند در دماهای کمتر نیز تشکیل شوند. بیش‌تر در سنگ‌های آذرین مافیک<sup>۹۶</sup>، سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های دگرگونی و معمولاً با سایر آهن سولفیدها، به ویژه پنتلانیدیت  $(Fe,Ni)_9S_8$  و کالکوپیریت  $(CuFeS_2)$  که به ترتیب کانی‌های معدنی مهمی برای نیکل و مس هستند، یافت می‌گردد. پروتیت معمولاً با پیریت، مارکازیت و مگنتیت همراه است (Howie و همکاران، ۱۹۹۲). این کانی‌های مختلف می‌توانند همگی در یک دانه پروتیت یا در تماس با دانه وجود داشته باشند (Burke و Uytendogaardt، ۱۹۷۱).

پروتیت یک محلول جامد<sup>۹۷</sup> از سولفید آهن با طیفی از ترکیبات می‌باشد که مقدار آهن متغیر با فرمول شیمیایی  $Fe(1-x)S$  که در آن  $x > 0$  است، دارا می‌باشد. ساختار اشکال معدنی مبتنی بر نوع ساختار  $NiAs$  (نیکولیت<sup>۹۸</sup>) با ساختاری انباشته است و اجازه می‌دهد ظرفیت فلزی، که ساختار بلوری را دیکته می‌کند و بسته به تعداد مکان‌های کاتیونی خالی، خاصیت خفیف تا شدید مغناطیسی به آن می‌دهد،

<sup>۹۳</sup> Isometric crystal form

<sup>۹۴</sup> Frambooids

<sup>۹۵</sup> Conchoidal fracture

<sup>۹۶</sup> Mafic igneous rocks : سنگ‌های معدنی پر منیزیم، پر آهن و کم سیلیس

<sup>۹۷</sup> Solid solution

<sup>۹۸</sup> Niccolite

وجود داشته باشد.  $Fe_7S_8$  کم آهن ترین عضو انتهایی دارای روستخت مونوکلینیک<sup>۹۹</sup> و بیش ترین خاصیت مغناطیسی است در حالی که  $Fe_{11}S_{12}$  پر آهن ترین عضو انتهایی به صورت شش ضلعی و غیر مغناطیسی است. شکل های بلوری گونه های موجود در این بین می تواند شبه شش ضلعی<sup>۱۰۰</sup>، بشکله ای شکل منشوری انباشته<sup>۱۰۱</sup>، صفحه ای<sup>۱۰۲</sup> یا مسطح<sup>۱۰۳</sup>، تیغه دار یا گل رز شش ضلعی<sup>۱۰۴</sup> باشد. پیرویت به ندرت به عنوان یک فاز خالص وجود دارد و با اشکال مختلف معدنی اغلب در یک دانه رشد می کنند. این بدان معنی است که انواع غیر مغناطیسی و مغناطیسی می توانند به طور همزمان ایجاد شوند.

پیرویت یک کانی کدر با سختی ۳/۵ تا ۴/۵، شکستگی ناهموار و رگه خاکستری تیره تا سیاه است. این ماده دارای رنگ برنزی مایل به زرد یا قرمز با درخشش فلز مانند است و سطوح در معرض معمولاً به رنگ قرمز ملایم یا آبی رنگین کمانی کدر می شوند. در نمونه های صیقلی، پیرویت به شدت ناهمسانگرد است و دارای رنگ کرم مایل به صورتی-قهوه ای با ضریب انعکاس نسبتاً زیاد و پلئوکروئیسم<sup>۱۰۵</sup> (چندرنگی) از کرم قهوه ای تا مایل به قرمز است.

### ۳-۲-۲-۵. شناسایی و کمی سازی پیرویت در سنگدانه بتن

پیرویت می تواند با استفاده از روش های سنگ نگاری با توجه به سختی یا خاصیت مغناطیسی آن از پیریت متمایز گردد، اما به دلیل اندازه بسیار کوچک دانه های معدنی در سنگدانه ها، عدم وجود خاصیت مغناطیسی یا خاصیت مغناطیسی بسیار ضعیف در برخی اشکال، و این واقعیت که مواد معدنی آهن سولفید اغلب در کنار هم و به صورت رشد یافته با یکدیگر یافت می شوند، تشخیص آن می تواند چالش برانگیز و حتی کمی سازی آن سخت تر باشد. مقطع صیقلی پیرویت، نسبت به پیریت بازتابنده تر (درخشان تر)، به شدت ناهمسانگرد، دارای دوشکستگی و پلئوکروئیسم متمایز از قهوه ای مایل به کرم تا قهوه ای مایل به قرمز است، و برخلاف پیریت با رنگ سفید مایل به زرد و با ناهمسانگردی ضعیف و کالکوپیریت زرد طلایی و صورتی-کرم به رنگ پوست می باشد. مواد معدنی را می توان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس (SEM/EDS) در حالت تصویربرداری الکترون برگشتی (BSE) متمایز نمود که در این مورد، افزایش مقدار آهن در پیرویت در طیف های EDS و سطح شدت بازگشت دیده می شود. کمی سازی نظری را می توان با استفاده از نسبت درصد حجمی تخمینی هر نوع کانی، که می تواند با میزان گوگرد کل مرتبط باشد، انجام داد.

<sup>99</sup> Monoclinic

<sup>100</sup> Pseudo-hexagonal

<sup>101</sup> Stacked prismatic barrel-shaped

<sup>102</sup> Tabular

<sup>103</sup> Platy

<sup>104</sup> Bladed or hexagonal rosettes

<sup>105</sup> Pleochroism

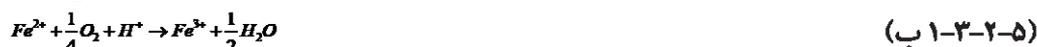
روش پراش اشعه ایکس (XRD) نیز می‌تواند برای شناسایی و تمایز دو نوع کانی مورد استفاده قرار گیرد، اما تشخیص مواد معدنی با غلظت کم می‌تواند چالش برانگیز باشد و ممکن است نیاز به تجزیه و تحلیل‌های تخصصی و هدفمند داشته باشد. کمی‌سازی با استفاده از XRD می‌تواند با بهره بردن از اصلاح Rietveld تعیین گردد. روش‌های تحلیل ترمومغناطیسی در کنار غلظت کل گوگرد نیز به عنوان شاخصی نیمه کمی و سریع برای پیرویت استفاده شده‌اند (Geiss و Gourley، ۲۰۱۹).

### ۵-۲-۳. سازوکار واکنش اکسیدشدن و واکنش بالقوه مخرب در بتن

مواد معدنی آهن سولفید در حضور اکسیژن و رطوبت، اکسید می‌شوند. این پدیده به دلیل تمایل به تشکیل زهکش اسیدی معدن<sup>۱۰۶</sup> در محیط‌های باطله معادن، ده‌ها سال است که در صنعت معدن شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. Jambor و Blowes (۱۹۹۸) در بررسی خود در مورد زباله‌های حاوی سولفید اظهار داشتند که پیریت و پیرویت مسئول بیش‌تر زهکش اسیدی معادن در جهان هستند. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پیرویت به دلیل واکنش اکسیدشدن، بیش‌تر از پیریت مستعد آسیب است (Chinchón-Payá و همکاران، ۲۰۱۲). اکسیژن و آب نیروی محرکه اکسیدشدن مواد معدنی هستند که در نهایت از طریق آزادسازی اولیه آهن سه‌ظرفیتی و سولفات منجر به آهن اکسیدشده و سولفوریک اسید می‌شوند. اکسیژن عامل اصلی اکسیدکننده در pH بیش‌تر از ۴ است که در بتن چنین خواهد بود.

### ۵-۲-۳-۱. اکسیدشدن پیرویت

وجود پیریت در سنگدانه یکی از عوامل شناخته شده لکه‌های نامطلوب در سطح پیاده‌روها و نماها است. پیریت به‌طور کلی به عنوان پایدارترین شکل آهن سولفید در نظر گرفته می‌شود. انحلال پیریت می‌تواند به‌صورت واکنش مستقیم با عامل اصلی اکسیدشدن یعنی اکسیژن محلول در آب به همراه یون‌های آهن که به عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند، به‌صورت معادلات زیر رخ دهد (Moses و همکاران، ۱۹۸۷).



محصولات واکنش اکسیدشدن به شکل مواد معدنی آهن هیدروکسید یا فری‌هیدریت<sup>۱۰۷</sup> که بزرگ‌تر از کانی اصلی هستند رسوب کرده و در نتیجه انبساط موضعی ایجاد می‌نمایند. در بتن، سولفوریک اسید آزادشده می‌تواند با خمیر سیمان، به ویژه پرتلندایت (Ca(OH)<sub>۲</sub>)، واکنش داده و سنگ گچ<sup>۱۰۸</sup> (CaSO<sub>۴</sub>·2H<sub>2</sub>O) تشکیل دهد که این امر موجب انبساط موضعی خواهد شد. واکنش معمولاً به پیریت موجود در سنگدانه‌های

<sup>106</sup> Acid mine drainage

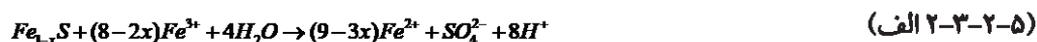
<sup>107</sup> Ferrihydrite

<sup>108</sup> Gypsum

نزدیک سطح، با دسترسی به اکسیژن به دلیل تخلخل در خمیر و تخلخل بالقوه و ترک خوردگی در سنگدانه، محدود می گردد. در قطعات بتن متراکم معماری، وقوع چنین مشکلات ناخوشایند دوام سطحی ممکن است چندین دهه طول بکشد، در حالی که در مواد متخلخل مانند اتنودهای سیمانی، امکان ظهور لکه های زنگ زدگی و قلوه کن شدگی ها در کمتر از یک سال نیز وجود دارد. زمانی که زیبایی سطح اهمیت ندارد، سنگدانه های حاوی مقادیر کم پیریت می توانند بدون مشکل خاصی در بتن فاقد معضلات دوام استفاده شوند. انبساط معمولاً در نزدیکی ذرات پیریت موضعی پدید می آید. در نتیجه قلوه کن شدگی ها، پیریت را در معرض هوا قرار می دهد، باعث تخریب بیش تر ماده معدنی می گردد و موجب ایجاد لکه های زنگ زدگی در سطح بتن به همراه تشکیل محدود سولفوریک اسید و واکنش با خمیر سیمان می شود.

### ۲-۳-۲-۵. اکسید شدن پیروتیت و قابلیت حمله داخلی سولفات

پیروتیت به عنوان ماده ای معدنی و واکنش زای قوی در حضور اکسیژن شناخته می شود. سرعت اکسید شدن پیروتیت در اکسیژن استاندارد اتمسفری و دمای ۲۵ درجه سلسیوس می تواند ۲۰ تا ۱۰۰ برابر سریع تر از پیریت باشد (Blowes و همکاران، ۲۰۰۳). مشخص شده که اکسید شدن پیروتیت مقدار بیش تری از آهن دوظرفیتی و سولفات فعال را نسبت به پیریت تولید می نماید (Chinchón-Payá، ۲۰۱۲). واکنش پیروتیت نیز با  $O_2$  محلول و  $Fe^{3+}$  که به عنوان یک اکسید کننده عمل می نماید و واکنش چرخ های را حفظ می کند، آغاز می شود (Belzile، ۲۰۰۴). بررسی Belzile (۲۰۰۴) در مورد اکسید شدن پیروتیت به تحقیقاتی اشاره دارد که نشان دهنده محصولات غالب اکسید شدن پیروتیت شامل گوتیت<sup>۱۰۹</sup> و گوگرد عنصری است و یک واکنش چرخ های مصرف کننده اسید را که منجر به آزاد شدن بیش تر سولفیدهای فاقد آهن و احتمالاً پلی سولفیدها از طریق گوگرد عنصری می شود، پدید می آورند.



اکسید شدن آهن دوظرفیتی ( $Fe^{2+}$ ) یون آهن سه ظرفیتی ( $Fe^{3+}$ ) تولید می کند که می تواند به صورت رسوب هیدروکسید آهن از محلول خارج شود.  $Fe^{2+}$  اکسید شده و به صورت آهن اکسی هیدروکسید<sup>۱۱۰</sup>، عمدتاً فری هیدریت، یک اکسید با ساختار بلوری ناقص ( $Fe_2O_3 \cdot 0.5(H_2O)$ ) و گوتیت ( $FeO(OH)$ ) رسوب می کند.



کمیاب اتم آهن در پیروتیت اجازه می دهد تا اکسید شدن از طریق یک لایه سطحی غنی از گوگرد ادامه یابد که در مقایسه با لایه های سطحی غنی از آهن در پیریت، که یک اکسی هیدروکسید آهن را در واکنش اولیه بوجود می آورد، تشکیل می گردد و واکنش بیش تری نشان می دهد.

<sup>109</sup> Goethite

<sup>110</sup> Oxyhydroxide

با توجه گفته‌های Grattan-Bellew و Eden (۱۹۷۵) و Shayan و همکاران (۱۹۸۸)، سولفوریک اسید تولید شده می‌تواند با پرتلندایت موجود در خمیر سیمان واکنش دهد و طبق واکنش‌های زیر سنگ گچ و اترینگایت تولید نماید.



همان‌طور که این فرآیند ادامه می‌یابد، و واکنش چرخ‌های اکسیده‌شدن پیرویت موجب آزادشدن مقادیر بیش‌تری از سولفوریک اسید بیش‌تری در خمیر سیمان می‌شود، این امر در نهایت می‌تواند منجر به آسیب ناشی از حمله سولفاتی داخلی در بتن گردد. کانی‌های اترینگایت و سنگ گچ ابتدا در حفرات، منافذ و شکاف‌های موجود متبلور می‌شوند. پرکردن فضاهای خالی موجود و رشد مداوم مواد معدنی باعث ایجاد فشار می‌شود که منجر به انبساط می‌گردد. نتیجه این واکنش‌های انبساطی (تشکیل هیدروکسیدهای آهن و مواد معدنی ثانویه) بر روی سطح بتن به‌صورت قلوه‌کن‌شدگی و لکه‌هایی که در مورد آن بحث شد، همراه با واکنش‌های موضعی پیریت و نیز تشکیل رسوبات سفید و ترک بروز می‌یابد. در موارد پیشرفته، ترک خوردگی الگوهای نقشه‌ای را پدید می‌آورد که ترک‌ها بر روی سنگدانه‌های زن‌گزرده و واکن‌شده، پل می‌زنند.

با ادامه این روند، خمیر سیمان می‌تواند از کلسیم تهی گردد، در نتیجه pH کاهش می‌یابد و اجازه تشکیل تومازایت  $(Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4) \cdot 12H_2O)$  را می‌دهد. تومازایت می‌تواند جایگزین C-S-H شود و منجر به کاهش قابل توجه مقاومت گردد. این واکنش دلیل تخریب شدید شالوده‌ها در خصوص مطالعه‌ی موردی Trois Rivières است (Rodrigues و همکاران، ۲۰۱۲).

## ۵-۲-۴. عوامل موثر بر واکنش بالقوه مضر اکسیده‌شدن پیرویت در بتن

سرعت و شدت اکسیده‌شدن پیرویت و قابلیت آن در ایجاد اثرات مضر در بتن پیچیده است و به عوامل مختلفی بستگی دارد. عوامل اولیه مربوط به خود کانی، شرایط رویارویی، سنگ مادر و ساختار کانی‌شناسی آن و در نهایت کیفیت و شرایط رویارویی بتن می‌باشد.

به دلیل تسریع اکسیده‌شدن با قرار گرفتن در معرض اکسیژن می‌توان استنباط کرد که سطح ویژه کانی آهن سولفید بر نرخ خوردگی تأثیر می‌گذارد و به عنوان یکی از عوامل کنترل‌کننده در سرعت واکنش پیرویت (Belzile و همکاران، ۲۰۰۴) و پیریت (Du و همکاران، ۲۰۲۱) گزارش شده است. تأثیر ساختار بلوری و جای خالی آهن کمتر شناخته شده و با نتیجه‌گیری‌های متناقض در مورد تأثیر آن‌ها بر سرعت اکسیده‌شدن همراه است. نشانه‌هایی وجود دارد که مقدار کمی فلز (Co، Cu، Mn، Ni) در کانی، واکنش‌زایی را کاهش می‌دهد، اما هیچ داده آماری معنی‌داری برای ایجاد رابطه ارائه نشده است (Belzile، ۲۰۰۴). به‌طور مشابه، Janzen و همکاران (۲۰۰۰) ۱۲ نمونه پیرویت با سطح ویژه و ساختار بلوری متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نرخ اکسیده‌شدن به‌طور سیستماتیک تحت تأثیر ساختار بلوری یا مقادیر کم فلزات قرار نمی‌گیرد. برخی دیگر روند کلی مبتنی بر واکنش‌زایی بیش‌تر پیرویت مغناطیسی در مقایسه با

پیرویت غیر مغناطیسی به دلیل جای خالی فلزات و نیز حضور غالب حالت مغناطیسی در کنار پیریت و در نتیجه وقوع واکنش‌های گالوانیکی، را مشاهده نموده‌اند (Multani, ۲۰۱۸). سایر کانی‌های موجود در سنگ می‌توانند بر تشکیل کانی‌های ثانویه مضر در بتن تأثیر گذارد و هرگونه ترک یا تخلخل در سنگدانه به دلیل فرآوری یا کیفیت آن قبل یا بعد از استفاده در بتن، پیرویت را بیش‌تر در معرض اکسیژن و رطوبت قرار دهد و شرایط را برای واکنش‌های مضر فراهم آورد.

دما، رطوبت و pH محیط نه تنها در سرعت اکسیدشدن پیرویت، بلکه بر سرعت واکنش‌های ثانویه و تشکیل مواد معدنی از محصولات واکنش در بتن، نقش مهمی ایفا می‌کنند. این اثرات محیطی تحت تأثیر کیفیت بتن و شرایط رویارویی، می‌باشند. نفوذ رطوبت و در دسترس بودن اکسیژن در بتن برای رسیدن به ذرات پیرویت در اعماق سازه با نسبت آب به مواد سیمانی زیادتر (w/cm) افزایش می‌یابد. سرعت اکسیدشدن پیرویت با افزایش دما و رطوبت بیش‌تر می‌شود (Belzile, ۲۰۰۴). اثر pH برای سرعت اکسیدشدن به خوبی مشخص نیست، اما بر توسعه پیشرفت حمله سولفاتی به‌صورت موضعی در نزدیکی محل هسته‌زایی و به‌طور گسترده‌تر بر پیشرفت واکنش و پخش سولفوریک اسید تأثیر می‌گذارد. pH کم، فرصتی را برای تشکیل تومازایت فراهم می‌نماید که به‌صورت خاص در دمای کم افزایش می‌یابد.

## ۵-۲-۵. استانداردسازی و روش‌های آزمایش برای اکسیدشدن کانی بالقوه

### مضر سولفید آهن در سنگدانه‌های بتن

ماهیت پیچیده‌ی واکنش اکسیدشدن آهن سولفیدها تاکنون مانع از اجماع نظر در جامعه علمی در خصوص حدود مناسب در سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن شده است. تا تاریخ انتشار این نشریه (سال ۲۰۲۳)، ممنوعیت یا محدودیتی بر روی مقدار این مواد معدنی در استانداردهای سنگدانه بتن در آمریکای شمالی وجود ندارد. استاندارد اروپایی NF EN 12620 111 با عنوان سنگدانه‌ها برای بتن، محدودیت‌هایی را برای کل میزان گوگرد معادل ۱٪ جرم سنگدانه‌ها و پرکننده‌ها (به استثنای سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی خنک‌شده در هوا) تعیین نموده است. اگر پیرویت در سنگدانه وجود داشته باشد، این حد به مقدار گوگرد برابر با ۰/۱٪ جرم کاهش می‌یابد. برخی از مطالعات اولیه در مورد تجزیه این کانی‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که سطح ۰/۱٪ اغراق‌آمیز می‌باشد و به‌طور غیرضروری سنگدانه‌های مناسب را رد می‌کند (Chinchón-Payá و همکاران، ۲۰۱۲؛ Marcelino, ۲۰۱۶).

روش‌های آزمایش برای ارزیابی مناسب بودن سنگدانه‌ها برای استفاده در بتن، مانند ASTM C295 یا CSA A23.1-19/A23.2، وجود و یا حدود مقادیر مناسب یا قابل قبول این مواد معدنی در سنگدانه‌ها را بیان نمی‌دارند. با این حال، ضمیمه غیراجباری P از CSA A23.1-19/A23.2-19 یک دستورالعمل ارزیابی با محدودیت‌های توصیه شده اما مشروط بر اساس یک دستورالعمل ارزیابی نوین جهت ارزیابی اثرات بالقوه و مضر سنگدانه‌های حاوی آهن سولفید برای استفاده در بتن را ارائه کرده‌اند که در حال ارزیابی

است (Rodrigues و همکاران، ۲۰۱۶). روش مشروح در ضمیمه P با ارزیابی میدانی منبع سنگدانه همراه با سابقه عملکرد استفاده از آن در بتن، از جمله بررسی سازه‌ها یا اعضای بتنی موجود، آغاز می‌شود. سپس ارزیابی‌های آزمایشگاهی سنگدانه‌ها انجام می‌شود که شامل اندازه‌گیری میزان گوگرد و سولفید موجود در سنگ، آزمایش واکنش‌زایی جهت تعیین استعداد اکسیدشدن سنگدانه و در نهایت، آزمایش انبساط سنگدانه در ملات است. دستورالعمل پیشنهادی و روش‌های آزمایش با محدودیت‌های مشروط که پیش از اجباری شدن در حال ارزیابی هستند، در راهنمای تصمیم‌گیری گنجانده شده‌اند.

تا تاریخ انتشار این نشریه (سال ۲۰۲۳)، فقدان داده‌های دقیق برای ایجاد رابطه بین مقدار آهن سولفید و استعداد اکسیدشدن مواد معدنی در طیف‌های وسیعی از انواع سنگدانه‌ها با اثرات مضر در بتن و نیز شرایط رویارویی محیطی، وجود دارد. به‌علاوه این موضوع از نظر ایجاد دستورالعمل‌ها و محدودیت‌های آزمایش برای جامعه بتن آنجایی پیچیده‌تر می‌شود که توزیع آهن سولفیدها، و به‌ویژه پیرویت، در یک سازند سنگ یا معدن معمولاً بسیار ناهمگن است به‌طوری‌که در یک محل، مصالح برخی قسمت‌ها دارای مقادیر زیاد از این مواد بوده و سایر بخش‌ها فاقد آن‌ها می‌باشند. این امر چالشی برای نمونه برداری و نظارت است. پیچیدگی کانی پیرویت از نظر ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری و عدم درک مشخص در مورد چگونگی تأثیر آن بر استعداد اکسیدشدن و متعاقباً استعداد واکنش‌های مضر در بتن (به همراه پیچیدگی در شناسایی و کمی‌سازی کانی در یک منبع سنگدانه) چالش مهمی را برای ایجاد سندهای راهنما و محدودیت‌های استفاده ایجاد می‌نماید.

# فصل ۶

## حمله سولفاتی

حمله سولفاتی می تواند شکل های مختلفی داشته باشد ولی اغلب در بتن در معرض منابع بیرونی سولفات ها رخ می دهد (بخش ۶,۱). معمولاً، منابع داخلی سولفات که به ندرت اتفاق می افتد، نیز می توانند منجر به آسیب شوند، به ویژه هنگامی که انواع خاصی از بتن در سنین اولیه در معرض دمای بسیار زیاد قرار گیرند (بخش ۶,۲,۲). حمله سولفاتی می تواند به صورت حمله شیمیایی به خمیر سیمان یا حمله فیزیکی به دلیل تبلور نمک های سولفاتی باشد (فصل ۸).

## ۶-۱. حمله سولفاتی بیرونی

### ۶-۱-۱. وقوع

سولفات های طبیعی سدیم، پتاسیم، کلسیم یا منیزیم که می توانند به بتن سخت شده حمله کنند، گاه در خاک یافت می شود و یا به صورت محلول در آب های زیرزمینی در تماس با سازه های بتنی وجود دارند (جدول ۶-۱-۱). این سولفات ها ممکن است منشأیی در رسوبات قدیمی بستر دریا، تجزیه سولفیدها یا مواد معدنی سولفات دار داشته باشند. پساب های صنعتی و کشاورزی و همچنین فاضلاب شهری نیز می توانند منشأ تامین سولفات ها به شمار روند. منابع دیگر سولفات ها، آب مورد استفاده در برج های خنک کننده بتنی<sup>۱۱۱</sup> است که در آن یون های سولفات به تدریج در اثر تبخیر افزایش میابند. سولفات می تواند از خاک های محل دفع مواد زائد صنعتی، مانند سرباره حاصل از فرآوری آهن، تراوش کند.

جدول ۶-۱-۱. نام و ترکیب جامع مواد معدنی که اغلب در گزارش حمله سولفاتی استفاده می شود.

$\text{Na}_2\text{SO}_4$	تناردیت <sup>۱۱۴</sup>	$\text{CaSO}_4$	آنیدریت <sup>۱۱۳</sup>
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	میرابلیت <sup>۱۱۶</sup>	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	باسانیت <sup>۱۱۵</sup>
$\text{K}_2\text{SO}_4$	آرکانیت <sup>۱۱۷</sup>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	سنگ گچ
$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	گلاوبریت <sup>۱۱۹</sup>	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	کیسریت <sup>۱۱۸</sup>
$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$	لانگبینیت <sup>۱۲۱</sup>	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	اپسومیت <sup>۱۲۰</sup>

<sup>۱۱۱</sup> توضیحات مترجم: در اینجا مقصود برج های خنک کننده باز (open cooling tower) هستند و گرنه در برج های خنک کننده بسته (closed cooling tower) مشکلی بوجود نمی آید. عدم تمایز این دو نوع موجب بروز اشتباهات فراوان می شود که ناشی از عدم تفکیک آن ها در متن ACI است.

<sup>۱۱۳</sup> Anhydrite

<sup>۱۱۴</sup> Thenardite

<sup>۱۱۵</sup> Bassanite

<sup>۱۱۶</sup> Mirabilite

<sup>۱۱۷</sup> Arcanite

<sup>۱۱۸</sup> Kieserite

<sup>۱۱۹</sup> Glauberite

<sup>۱۲۰</sup> Epsomite

<sup>۱۲۱</sup> Langbeinite

محیط‌های دیگری نیز که سازوکارهای خرابی متعدد ممکن است در آن دیده شود، وجود دارند. آب دریا، آب شور و خاک‌های ساحلی انواع خاصی از شرایط رویارویی را تشکیل می‌دهند. توصیه‌هایی برای این محیط‌ها در بخش ۶-۳ بیان شده است. بتن حاوی سیمان پرتلند همچنین می‌تواند توسط محلول‌های سولفوریک اسید که در نتیجه اکسید شدن مواد معدنی حاوی گوگرد یا در نتیجه تجزیه مواد آلی توسط باکتری‌ها ایجاد شود، مورد حمله قرار گیرد (فصل ۷).

هنگامی که آب از سطح بتن تبخیر می‌شود، به ویژه در مناطق خشک، امکان تجمع نمک‌های سولفاتی وجود داشته و در نتیجه حمله فیزیکی نمک ایجاد می‌شود. کلیات موضوع حمله فیزیکی یا هوازدگی ناشی از نمک‌ها در فصل ۸ مورد بررسی قرار گرفته است.

حمله سولفاتی در نقاط مختلف جهان رخ می‌دهد و مشکلی خاص در مناطق خشک و نیمه خشک به‌شمار می‌رود. با این حال، در مناطق دیگر مانند دشت‌های بزرگ شمالی و بخش‌هایی از غرب ایالات متحده (Bell-Port، ۱۹۶۸؛ Harboe، ۱۹۸۲؛ Reading، ۱۹۷۵، ۱۹۸۲؛ دفتر احیای اراضی ایالات متحده، ۱۹۷۵؛ Verbeck، ۱۹۶۸)، استان‌های دشتی کانادا (Hamilton و Handegord، ۱۹۶۸؛ Hurst، ۱۹۶۸؛ Price و Peterson، ۱۹۶۸)، خاورمیانه (French و Poole، ۱۹۷۶) نیز می‌تواند رخ دهد. سایر کشورهای غیر خشک، مانند انگلستان (Bessey و Lea، ۱۹۵۳) و نروژ (Bastiensen و همکاران، ۱۹۵۷) نیز حمله سولفاتی به بتن را تجربه کرده‌اند.

### ۶-۱-۲. سابقه تاریخی

حمله سولفاتی بیش از ۲۵۰ سال است که شناخته شده است. Smeaton (۱۷۹۱)، به ماده‌ای نیاز داشت که در زیر آب سخت شود و اولین ترکیب آهک هیدرولیکی عصر صنعتی، یکی از پیشینیان سیمان‌های پرتلند امروزی را توسعه داد. Smeaton در سال ۱۷۵۶، طی توسعه ترکیب سیمان برای استفاده در ساخت فانوس دریایی Eddystone، حمله به سیمان را از سوی محلول‌های حاوی سولفات توصیف نمود. در طول قرن نوزدهم و بیستم، جنبه‌های مختلفی از حمله سولفات‌ها به بتن مورد مطالعه قرار گرفت (Bogue، ۱۹۵۵). به‌طور سنتی، تصور شده است که حمله سولفاتی در نتیجه ورود یک محلول حاوی سولفات به ساختار منفذی بتن و واکنش با ترکیبات سیمان هیدراته شده مانند سه کلسیم آلومینات (C<sub>3</sub>A) برای تشکیل فازهای مختلف حاوی سولفات رخ می‌دهد و بر دوام بتن تأثیر منفی می‌گذارد. Bates و همکاران (۱۹۱۳) بیان میدارند که «تقریباً اعتقاد جامع بر این است که واکنش سولفات منیزیم آب دریا با آهک سیمان و آلومین موجود در آلومینات‌های سیمان است که منجر به تشکیل منیزیم و کلسیم سولفو آلومینات هیدراته که به همراه تعداد زیادی مولکول آب متبلور می‌شود، می‌گردد».

این درک، مبنایی برای توسعه سیمان‌های مقاوم در برابر سولفات و نسبت‌های مخلوط برای بتن‌ها در محیط‌های سولفاتی می‌باشد.

در حالی که شناخت از ترکیبی که در حمله سولفاتی نقش دارد اولین بار توسط Candlot در ۱۸۸۰ توصیف شد، ترکیبات دقیق هیدرات‌های کلسیم سولفوآلومینات تا سال ۱۹۲۹ مشخص نشد. Lerch و همکاران (۱۹۲۹) ترکیبات اترینگایت، معروف به نمک Candlot را به صورت  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  و مونو سولفات را به صورت  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  بیان نمودند. Lerch و همکاران (۱۹۲۹) علاوه بر بیان ترکیبات این نمک‌ها، نشان دادند که وقتی منبع بیرونی سولفات وجود داشته باشد، مونوسولفات به اترینگایت تبدیل می‌گردد. به نظر می‌رسد این اولین نقل قول در ادبیات فنی است که این سازوکار شیمیایی حمله سولفاتی را توصیف می‌نماید. اگرچه تا قبل از تحقیق Lerch و همکاران (۱۹۲۹) ترکیب دقیق اترینگایت مشخص نبود، ولی بیشتر نقش  $\text{C}_3\text{A}$  در حمله سولفاتی شناخته شده بود. نگرانی در مورد مقدار  $\text{C}_3\text{A}$  سیمان، مطالعات مختلفی را در مورد ترکیبات سیمان در طی یک دوره ۲۰ ساله یا بیش تر به همراه آورد. Bates و Klein (۱۹۱۷) با مطالعه خواص کلسیم سیلیکات‌ها و  $\text{C}_3\text{A}$  به این نتیجه رسیدند که به دلیل دمای پخت زیاد، تولید تجاری سیمان پرتلند حاوی کمتر از ۱٪ آلومین غیر ممکن است. با این حال، تحقیقات Thorvaldsen در کانادا، روش‌هایی برای کاهش مقدار  $\text{C}_3\text{A}$  با تغییر نسبت  $\text{C}_3\text{A}$  و  $\text{C}_4\text{AF}$  و در عین حال اجتناب از دمای بیش از حد زیاد کوره را شناسایی کرد. Thorvaldsen مشاهده کرد که سیمان‌هایی با مقدار آهن زیاد نیز مقاومت سولفاتی را بهبود بخشیدند. این امر نهایتاً منجر به توسعه سیمان پرتلند نوع V شد (Fleming, ۱۹۳۳). امروزه، در دسترس بودن سیمان پرتلند نوع V استاندارد ASTM C150 ( $\text{C}_3\text{A} > 5\%$ ) به برخی از مناطق جغرافیایی و بازار خاص با نیاز به مقادیر زیادی از مقاومت در برابر سولفات محدود شده است. با این حال، به‌طور کلی سیمان پرتلند نوع II استاندارد ASTM C150 ( $\text{C}_3\text{A} > 8\%$ ) فراگیرتر است اما لزوماً در همه مناطق جغرافیایی تولید نمی‌شود. با این وجود، حمله سولفاتی علاوه بر تشکیل اترینگایت، شامل پدیده‌هایی دیگر نیز می‌گردد. در نتیجه، حتی سیمان‌های به اصطلاح با مقادیر  $\text{C}_3\text{A}$  برابر با صفر نیز ممکن است در برابر حمله سولفاتی ایمن نباشند زیرا  $\text{C}_4\text{AF}$ ، CH و C-S-H نیز ممکن است در معرض حمله سولفاتی قرار گیرند.

پایه متداولترین روش مورد استفاده برای تعیین مقاومت سولفاتی سیمان با اندازه‌گیری انبساط نیز باید به Thorvaldsen و همکارانش نسبت داده شود (۱۹۲۷، ۱۹۲۹). بر اساس مشاهدات خرابی‌های ناشی از تاب برداشتن و انبساط مواد حاوی سیمان مانند کاشی، ملات و بتن، آن‌ها یک آزمایش انبساط که اساس استاندارد ASTM C1012/C1012M است را ایجاد نمودند.

مقاومت در برابر حمله سولفاتی با کنترل ترکیبات سیمان و کاهش نفوذپذیری، بتن افزایش می‌یابد. اهمیت این امر در مطالعات Verbeck (۱۹۶۸) و Stark (b1989) نشان داده شده است که کاهش نفوذپذیری در محدود نمودن حمله سولفاتی اهمیت بیش تری نسبت به استفاده از ترکیبات سیمان مقاوم به سولفات دارد. در یک خلاصه ۴۰ ساله از داده‌های اداره احیای اراضی ایالات متحده، مشخص شد که نسبت  $w/cm$  برابر ۰/۴۵ یا کمتر به جلوگیری از آسیب ناشی از حمله سدیم سولفات به سیمان‌های پرتلند با مقادیر  $\text{C}_3\text{A}$  کمتر از ۸٪ کمک می‌کند (Monteiro و Kurtis, ۲۰۰۳). در برخی موارد، با نسبت  $w/cm$  تا ۰/۵۳ از خرابی کامل جلوگیری بعمل آمد، اما آسیب قابل توجهی می‌تواند در محدوده‌ی نسبت‌های  $w/cm$  از ۰/۴۵ تا ۰/۵۳ رخ دهد.

درک این نکته که محدودیت‌های مقادیر  $C_3A$  و نسبت  $w/cm$  هر دو برای تولید بتن مقاوم در برابر سولفات مورد نیازند، در آئین‌نامه‌ها و استانداردهای مختلف ناظر بر انتخاب بتن برای استفاده در محیط‌های سولفاتی گنجانده شده است. اداره احیای اراضی ایالات متحده (۱۹۷۵) به‌طور رسمی این الزامات را از سال ۱۹۴۹ به رسمیت شناخت.

استفاده از پوزولان‌ها در بتن برای بهبود مقاومت در برابر سولفات‌ها نیز توسط اداره احیای اراضی ایالات متحده شناخته شده است (Tuthill، ۱۹۳۶). پیش از سال ۱۹۴۹، اداره احیای اراضی ایالات متحده از تأثیر مفید خاکستر بادی زغالسنگ قیری و سایر پوزولان‌ها در بهبود مقاومت سولفاتی بتن اطلاع داشت. در اوایل سال ۱۹۰۸، Dikeou (۱۹۷۵) گزارش داد که یکی از روش‌هایی که توسط مقامات مختلف برای کاهش حمله سولفاتی به رسمیت شناخته شده است، استفاده از پوزولان برای واکنش با آهک آزاد بوده‌است که در غیر این صورت می‌تواند از بتن نشت پیدا کند. به‌طور کلی، پوزولان‌ها به بهبود ترکیب مواد سیمانی کمک کردند اما مهمتر از آن، مشابه با کاهش نسبت  $w/cm$ ، استفاده از پوزولان‌ها باعث کمتر شدن نفوذپذیری بتن و بنابراین بهبود مقاومت آن در برابر حمله سولفاتی می‌گردد.

### ۶-۱-۳. سازوکارها

پدیده‌هایی که مشخصاً تحت عنوان حمله سولفاتی بیرونی طبقه‌بندی می‌شوند، به روش‌های مختلفی که شامل تشکیل انواع ترکیبات است، رخ می‌دهند. منشاء سولفات‌ها می‌تواند هم بیرونی و هم داخلی و شامل اکسید شدن پیریتها و تولید آن‌ها توسط باکتری‌ها باشد.

این شکل‌ها از حمله سولفاتی بیرونی توسط Brown (۲۰۰۲) شناسایی شده است:

الف) تشکیل اترینگایت (Aft)، مونوسولفات (AFm) و سنگ گچ.

ب) تشکیل نمک‌های حاوی سولفات بر روی یا نزدیک سطوح تبخیر.

ج) تشکیل تومازیت.

سازوکارهای این سه شکل از حمله سولفاتی بیرونی در بخش‌های زیر توضیح داده شده‌اند. مقالات و نشریاتی که به تفصیل درباره آن‌ها بحث می‌کنند عبارتند از Lea (۱۹۷۱)، Mehta (۱۹۷۶)، Mehta (۱۹۹۲)، Monteiro (۲۰۰۶)، DePuy (۱۹۹۴)، Taylor (۱۹۹۷)، Hewlett (۱۹۹۸)، و Skalny و همکاران (۱۹۹۸). نشریاتی با تأکید ویژه بر نفوذپذیری و توانایی بتن در مقاومت در برابر نفوذ و حرکت آب عبارتند از: Re-inhardt (۱۹۹۷)، Hearn و همکاران (۲۰۰۶) و Diamond (۱۹۹۸).

### ۶-۱-۳-۱. حمله سولفاتی منجر به تشکیل اترینگایت و سنگ گچ

این شکل‌های حمله سولفاتی زمانی رخ می‌دهند که محلول‌های حاوی سولفات بیرونی در منافذ بتن نفوذ کنند. این امر باعث افزایش غلظت سولفات‌های موجود در محلول منفذی بتن می‌شود تا با منابع کلسیم و آلومین تشکیل اترینگایت و با منابع کلسیم تشکیل سنگ گچ دهد. این واکنش‌ها همچنین تحت تأثیر pH قرار دارند

زیرا اترینگایت در pH کمتر از تقریباً ۱۰ و سنگ گچ در pH بیش از تقریباً ۱۰/۵ پایدار نیست (Taylor ۱۹۹۷). در هر دو مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، مشاهدات حاکی از تشکیل سنگ گچ در نزدیکی سطوح نمایان بتن (که در آن کرناته شدن باعث کاهش pH شده است) و تشکیل اترینگایت در داخل رسوبات سنگ گچ می دهند. در بتن بالغ، اترینگایت معمولاً مستقیماً از مونوسولفات که در طول هیدراته شدن سیمان تشکیل گشته است، نشأت می گیرد. برخی از مواد مکمل سیمانی به عنوان منابع اضافی آلومین واکنش زا عمل می کنند و بنابراین ممکن است قابلیت تشکیل اترینگایت را افزایش دهند. با این حال، مخلوط های بتن با نسبت w/cm کم حاوی مواد مکمل سیمانی معمولاً به دلیل کاهش سرعت نفوذ محلول سولفاتی و کاهش مقدار CH، در برابر حمله سولفات ها مقاوم تر هستند.

اترینگایت تأخیری که در بتن سخت شده در سنین بعدی ایجاد می شود، مسئول ایجاد ترک و انبساط داخلی می باشد. این سازوکار آسیب در مطالعات اولیه در خصوص حمله سولفاتی توصیف شده است. با این حال، اترینگایت ممکن است به عنوان رسوبات ثانویه در حفرات و ترک ها در بتن بالغ قرار گیرد و در محل نیز تشکیل شود. در نتیجه، وجود اترینگایت در بتن لزوماً نشان دهنده حمله سولفاتی نیست (ASTM C856). حمله سولفاتی بیرونی باعث ایجاد دو سازوکار آسیب در بتن می شود. ترک خوردگی ناشی از انبساط احتمالاً گسترده ترین شکل آسیب گزارش شده در بتن است که حمله سولفاتی را نشان می دهد. به دلیل حجم بیش تر اترینگایت از مواد تشکیل دهنده آن و انبساط پدید آمده، ترک ها ایجاد می شوند. افزایش حجم فاز جامد در خمیره سیمانی سخت شده منجر به تنش های کششی ناشی از فشارهای تبلور می گردد و هنگامی که به صورت موضعی از مقاومت کششی خمیر فراتر رود، ترک ایجاد خواهد شد. دومین شکل آسیب مرتبط با حمله سولفاتی بیرونی شامل نرم شدن و از دست دادن انسجام است. این سازوکار آسیب شامل تغییرات شیمیایی است که C-S-H را بی ثبات می نماید و می تواند منجر به از دست دادن قابل توجه مقاومت شود. در مراحل پیشرفته حمله، بتن مقاومت و یکپارچگی خود را از دست می دهد.

آسیب ناشی از حمله سولفاتی بیرونی همچنین به نوع کاتیون نمک سولفاتی نیز بستگی دارد. متداول ترین سولفات هایی که به طور طبیعی به بتن حمله می کنند، کلسیم، سدیم و منیزیم سولفات هستند که به ترتیب افزایش قابلیت تهاجم فهرست شده اند. کلسیم سولفات آبدار (سنگ گچ،  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) به طور کلی کمتر مهاجم می باشد زیرا حلالیت آن به طور قابل توجهی کمتر از سدیم و منیزیم سولفات است<sup>۱۳۳</sup>. با این حال، محلول های کلسیم سولفات می توانند به بتن حمله کنند (Thorvaldson، ۱۹۵۴؛ Taylor، ۱۹۹۷؛ Drimalas، ۲۰۰۷). علاوه بر این، پس از ورود یون های کلسیم و سولفات به منافذ بتن، قلیائیت زیاد محلول منفذی حلالیت آن ها را در مقایسه با آب های طبیعی افزایش می دهد (Hansen و Pressler، ۱۹۶۷)، لذا امکان ایجاد غلظت های بیش تر سولفات فراهم می آید که این موضوع می تواند شدت حمله را افزایش دهد. سازوکار آسیب ناشی از حمله کلسیم سولفات در برگیرنده ی انبساط داخلی و ترک خوردگی ناشی از تشکیل اترینگایت است.

<sup>۱۳۳</sup> توضیحات مترجم: سنگ گچ صرفاً حدود ۲/۵ گرم در هر لیتر آب حل می شود (۲۵۰۰ ppm)، در حالی که سدیم سولفات و منیزیم سولفات بودن آب در حدود ۲۸۱ و ۳۵۷ گرم در هر لیتر آب (۲۸۱۰۰۰ و ۳۵۷۰۰۰ ppm) در دمای حدود ۲۲ درجه سلسیوس حل می گردند که بسیار فراتر از سنگ گچ است (منبع: Haynes, W.M. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95th Edition. CRC Press LLC)

محلول سدیم سولفات تهاجمی تر از کلسیم سولفات است زیرا سدیم سولفات حلالیت بیش تری دارد. در نتیجه، بتن در معرض غلظت زیادتری از سولفات قرار می گیرد. حمله سدیم سولفات می تواند منجر به تشکیل سنگ گچ و اترینگایت در داخل خمیر سیمان در ازای واکنش با محصولات هیدراته شدن سیمان معمولی شامل CH، مونوسولفات،  $C_3A$  های هیدراته شده و در موارد شدید،  $C-S-H$  شود. در حمله سدیم سولفات هم ترک خوردگی و هم نرم شدن رخ می دهد. علاوه بر این، رسوبات نمکی می توانند بر روی سطوح تبخیر اعضای بتنی که در معرض حمله سدیم سولفات قرار دارند، تشکیل گردد و باعث پوسته شدن (حمله فیزیکی نمک) شوند. فصل ۸ سازوکارهای تبلور نمک و آسیب مرتبط با آن را با جزئیات بیش تری مورد بحث قرار می دهد؛ با این حال، وجود رسوبات نمک در سطوح تبخیر پوسته شده می تواند نشان دهنده وقوع حمله شیمیایی سولفاتی بیرونی، حمله فیزیکی نمک یا هر دو مورد باشد.

اگرچه منیزیم سولفات و سدیم سولفات قابلیت انحلال مشابهی دارند، حمله منیزیم سولفات می تواند آسیب رسان تر باشد زیرا هم یون های منیزیم و هم سولفات در حمله شرکت می کنند. محصولات واکنش حمله منیزیم سولفات شامل اترینگایت، سنگ گچ، منیزیم هیدروکسید و یک ژل سیلیس باشد و ممکن است خمیرهای با قدرت یا ظرفیت چسبانندگی بسیار کم تولید کند (Taylor و Gollop، ۱۹۹۵؛ Tay-dor ۱۹۹۷). یون منیزیم تحت یک فرآیند تبادل قلیا با CH یا  $C-S-H$  قرار می گیرد و بروسیت (منیزیم هیدروکسید) را تشکیل می دهد. این امر باعث کاهش pH محللول منفذی بتن می شود و منبعی از کلسیم برای واکنش با سولفات و تولید سنگ گچ فراهم می آورد. واکنش ها تا زمانی خمیر را از CH و  $C-S-H$  تهی کنند، ادامه خواهند داشت. در نتیجه، نرم شدن و از دست دادن انسجام، سازوکار آسیب حالت نهایی مرتبط با حمله منیزیم سولفات است.

### ۶-۱-۳-۲. حمله فیزیکی نمک به وسیله نمک های سولفاتی

فصل ۸ حمله فیزیکی نمک را با جزئیات بیش تری مورد بحث قرار می دهد. اگرچه حمله فیزیکی نمک معمولاً توسط سدیم سولفات ایجاد می شود، این تهاجم می تواند توسط چندین نوع نمک پدید آید. تخریب ناشی از حمله فیزیکی نمک از سطح بتن شروع می گردد. در ابتدا، خرابی ظاهری شیبه پوسته شدن ناشی از یخ زدن و آب شدن (و گاهی اوقات سفیدک زنی) دارد. آسیب ناشی از فشار تبلور ناشی از رشد بلورها در ساختار منفذی بتن است. حمله فیزیکی نمک یک حالت فیزیکی تهاجم در نظر گرفته می شود زیرا آسیب به برهم کنش شیمیایی بین یون های سولفات و فازهای هیدراته سیمان پرتلند مربوط نمی باشد. حمله فیزیکی نمک می تواند همراه با حمله شیمیایی سولفات نیز رخ دهد.

اگر یون های سولفات در خاک، آب های زیرزمینی یا به عنوان بخشی از سفیدک زنی روی سطوح بتنی شناسایی شوند، هر گونه آسیب به بتن در اثر حمله فیزیکی نمک، از جمله آسیب به سطوح معماری، نیاز به بررسی و ارزیابی جدی حمله شیمیایی دارد.

### ۳-۳-۱-۶. تشکیل تومازیت

تومازیت ساختار بلوری مشابه اترینگایت دارد. در حالی که متداول است اترینگایت را با ترکیب اکسیدی آن به صورت  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  نشان دهند، نمایش مناسب ساختار مولکولی اترینگایت  $(\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}^{3+})_2(\text{SO}_4^{2-})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6$  است؛ هر واحد سلول از چهار واحد ستونی به شدت هیدراته شده تشکیل شده است. همچنین چهار فاصله بین ستونها در هر واحد سلول وجود دارد. سه عدد از اینها توسط آنیون‌های سولفات و چهارمی توسط دو مولکول آب اشغال شده است. این ساختار طیف وسیعی از جایگزینی‌ها را امکان پذیر می‌کند: کاتیون‌های دو ظرفیتی می‌توانند جایگزین کلسیم شوند؛ کاتیون‌های سه ظرفیتی، مانند یون‌های فلزات واسطه می‌توانند جایگزین آلومینیوم شوند؛ یون‌های چهار ظرفیتی مانند  $\text{Si}^{4+}$  نیز می‌توانند جایگزین  $\text{Al}^{3+}$  شوند. یکی از این ترکیبات بر پایه سیلیس، تومازیت است  $(\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$  یا  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ).

تومازیت برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط Erlin و Stark (۱۹۶۶) و بعداً توسط Bickley و همکاران (۱۹۹۴) در بتن آسیب دیده یافت شده و به‌طور گسترده توسط Matthews (۱۹۹۴)، گروه متخصص تومازیت<sup>۱۲۳</sup> در انگلستان، و Crammond (a,b2002) بررسی شده است. اترینگایت و تومازیت اغلب با هم در بتن آسیب دیده یافت می‌شوند. این که آیا آن‌ها در زمان تشکیل به‌صورت مخلوط موجود هستند یا رفتار محلول جامد هنگام تشکیل بتن تحت این شرایط دارند، مورد بحث بوده است. Stark و Erlin (۱۹۶۶) بلورهای صفحه‌ای شکل<sup>۱۲۴</sup> را یافتند که در آن رشد گلبرگشکل تومازیت بر روی اترینگایت، بلورهای نواری شکل متناوب از اترینگایت و تومازیت، و بلورهای صفحه‌ای شکل پیوسته که نیمی از آن اترینگایت و نیمی دیگر تومازیت بود، تشکیل شده بود.

اگرچه تومازیت می‌تواند در غیاب سولفات بیرونی به دلیل کرناته شدن که می‌تواند هم اترینگایت (آزاد شدن سولفات) و هم خمیر کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) را تجزیه کند (آزاد شدن سیلیس آبدار)، تشکیل شود، اما این امر بعید است. سولفات بیرونی یا مقادیر ناخواسته و بیش از حد سولفات داخلی نیز می‌تواند در تشکیل تومازیت نقش داشته باشد و تقریباً منحصراً با تشکیل آن مرتبط است. به‌طور مشابه، اگر منبعی از  $\text{CaCO}_3$  قابل انحلال در بتن وجود داشته باشد، تشکیل تومازیت رخ می‌دهد. بنابراین، تومازیت می‌تواند در نتیجه ورود سولفات، کرناته شدن یا هر دو تشکیل شود. در حالی که در ابتدا تصور می‌شد که تومازیت فقط در بتن‌هایی که در معرض هوای سرد هستند تشکیل می‌شود، این ماده در آب و هوای معتدل نیز در بتن مشاهده شده است (Crammond، a2002).

تومازیت ترجیحاً در شرایط هوای سرد، مرطوب و قلیایی که معمولاً در سازه‌های بتنی مدفون فراهم می‌شود، تشکیل می‌گردد. تشکیل تومازیت در مصالح ساختمانی آسیب دیده در کشورهای متعددی در سراسر جهان از جمله انگلستان، ایالات متحده، کانادا، آفریقای جنوبی، فرانسه، آلمان، نروژ، دانمارک، سوئیس، ایتالیا، اسلوانی و اتریش شناسایی شده است (Mittermayr و همکاران، ۲۰۱۳). احتمالاً شدیدترین مورد بتن آسیب دیده توسط تومازیت که تاکنون شناسایی شده، در قطب شمال کانادا بوده است (Bickley و همکاران، ۱۹۹۴).

<sup>123</sup> Thaumacite Expert Group

<sup>124</sup> Lath-shaped crystals

استفاده از بتن مقاوم در برابر سولفات لزوماً از تشکیل تومازایت جلوگیری نمی‌کند، زیرا این فازهای C-S-H و نه آلومینات هستند که توسط سولفات‌های بیرونی مورد حمله قرار می‌گیرند. جایگزینی C-S-H توسط تومازایت، خمیره سیمان را به یک توده سفید، نرم و غیر منسجم تبدیل می‌نماید. از فرمول تومازایت، مشخص است که یون‌های کرنات از ضروریات می‌باشند. Schmidt و همکاران (۲۰۰۸) به این نتیجه رسیدند که تومازایت تنها پس از مصرف تمام آلومینات برای تشکیل اترینگایت تشکیل می‌شود؛ علاوه بر این، تشکیل تومازایت تنها در سامانه‌هایی با نسبت سولفات به آلومین ( $SO_3/Al_2O_3$ ) بیش‌تر از ۳/۱ رخ می‌دهد.

شناسایی تومازایت در مصالح ساختمانی پایه سیمانی به خودی خود بیانگر رخ‌دادن مشکل به‌وسیله تومازایت و یا در صورت بروز آسیب، ناشی از تشکیل تومازایت نمی‌باشد. دو روش متمایز تشکیل رسوب تومازایت به‌عنوان یک محصول واکنش در داخل بتن‌ها و ملات‌ها وجود داشته است (گروه متخصص تومازایت، ۱۹۹۹) و در هنگام تشخیص، ویژگی‌های زیر باید در نظر گرفته شوند.

۱-۳-۳-۱-۶. شکل حمله سولفاتی تومازایتی از نظر ظاهری بسیار متمایز است و با آسیب قابل توجهی به خمیره سیمان در بتن یا ملات مشخص می‌شود. مشخصه اصلی حمله سولفاتی تومازایتی این است که خمیر سیمان سخت‌شده به‌طور جزئی یا کامل با تومازایت جایگزین می‌گردد. از آنجایی که تومازایت هیچ‌گونه توانایی چسبندگی ندارد، خمیر سیمان آسیب‌دیده در نهایت به یک توده غیر منسجم تبدیل خواهد شد که ذرات سنگدانه را آزادانه در کنار هم نگه می‌دارد. سایر ویژگی‌های متمایز شامل ترک‌های موازی پر شده با تومازایت و هاله‌های سفید تومازایت که در اطراف ذرات سنگدانه ایجاد می‌شود، است. حمله سولفاتی تومازایتی که باعث نرم‌شدن تدریجی خمیره سیمان مدفون می‌گردد، از سطح مشترک بتن و زمین شروع می‌شود، به سمت داخل پیش می‌رود و گاهی اوقات با انبساط همراه است.

۲-۳-۳-۱-۶. تومازایت به مانند اترینگایت می‌تواند به‌طور بی‌ضرر در حفرات و شکاف‌ها رسوب کند. این پدیده تشکیل تومازایت، نامیده می‌شود و می‌توان آن را در بتن‌ها یا ملات‌هایی که هیچ نشانه‌ی ظاهری آشکار از حمله سولفاتی را نشان نمی‌دهند، یافت. همچنین تشکیل تومازایت، گاه می‌تواند در بتن‌هایی که قبلاً توسط سازوکارهای تخریب دیگر مانند ASR آسیب دیده‌اند، رخ دهد (Regourd, French, ۱۹۸۶؛ Homain, ۱۹۸۶). اگرچه وجود تومازایت به‌طور معمول بی‌ضرر است اما به‌طور بالقوه می‌تواند زمینساز حمله سولفاتی تومازایتی باشد.

حمله سولفاتی تومازایتی معمولاً با ورود سولفات‌های بیرونی مرتبط است. یون‌های کرنات لازم برای حمله سولفاتی تومازایتی می‌توانند از سنگدانه‌های آهکی یا سنگ آهک موجود در سیمان، یا از خارج توسط یون‌های کرنات یا بی‌کرنات حل‌شده در آب حاوی سولفات تامین گردند. با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار به عنوان ردیاب مشخص شد که یون‌های کرنات یا بی‌کرنات بیرونی محلول در آب‌های زیرزمینی حاوی سولفات (کمتر از ۵۵۰ ppm یون سولفات) منبع کرنات در گیر در حمله سولفاتی تومازایتی در یک تونل اتریشی است (Mittermayr, ۲۰۱۲؛ Mittermayr و همکاران، ۲۰۱۰).

Thomas و Hooton (۲۰۰۲) افزودن ۵ درصد سنگ آهک به سیمان را خطرزا نمی‌دانند و آزمایش‌های

طولانی مدت اخیر بر روی بتن نشان داده است که سیمان‌های نوع II استاندارد ASTM C595 با حداکثر ۱۵ درصد سنگ آهک در حمله سولفاتی تومازایتی نقشی ندارند (Hooton و Thomas، ۲۰۱۶). در همان مطالعه، بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های نوع II همراه با مقادیر کافی مواد مکمل سیمانی نسبت به بتن ساخته شده با سیمان‌های پرتلند مقاوم در برابر سولفات در نسبت  $0.40/w/cm$  و  $0.50$ ، در برابر حمله سولفاتی در مواجهه با دمای کم مقاوم‌تر بودند. نتایج مشابهی توسط Hossack و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از سیمان پرتلند با مقدار سنگ آهک تا ۱۵٪ به دست آمد؛ بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند آهکی در ترکیب با خاکستر بادی و یا دوده سیلیس نسبت به سیمان‌های پرتلند مقاوم در برابر سولفات در برابر حمله سولفاتی مقاوم‌تر بودند. تومازایت ترجیحاً در دمای کمتر از ۱۵ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود. اگرچه این ماده می‌تواند تا دمای ۲۵ درجه سلسیوس نیز تشکیل شود، اما سرعت تشکیل آن بسیار کندتر است (گروه متخصص تومازایت، ۱۹۹۹؛ Alksnis و Alsnc، ۱۹۸۶).

#### ۶-۱-۴. توصیه‌ها

##### ۶-۱-۴-۱. حمله سولفاتی منجر به تشکیل اترینگایت، مونوسولفات و سنگ گچ

حفاظت در برابر شکل‌های مختلف حمله سولفاتی با تعیین نسبت‌های مخلوط بتن برای به حداقل رساندن ورود و حرکت آب با استفاده از مواد مناسب که نفوذپذیری بتن را کاهش دهند، به دست می‌آید. مقاومت سولفاتی سیمان پرتلند به‌طور کلی با افزایش مقدار سه کلسیم آلومینات ( $C_3A$ ) کاهش می‌یابد (Mather، ۱۹۶۸؛ Stark، ۲۰۰۲). بر این اساس، ASTM C150/C150M شامل سیمان مقاوم در برابر سولفات نوع V (ضد سولفات) است که حداکثر  $C_3A$  محاسبه شده مجاز برای آن ۵٪ بوده و و سیمان پرتلند نوع II با مقاومت متوسط در برابر سولفات‌ها که  $C_3A$  محاسبه شده برای آن حداکثر به ۸٪ محدود شده است. همچنین شواهدی وجود دارد که آلومین در فاز آلومینوفریت سیمان پرتلند می‌تواند در حمله سولفاتی شرکت کند (Brown و همکاران، ۱۹۸۶). بنابراین، ASTM C150/C150M این نکته را پیش‌بینی می‌نماید که برای سیمان پرتلند نوع V، مقدار  $C_4AF + 2C_3A$  نباید از ۲۵٪ تجاوز کند، مگر اینکه الزامات آزمون عملکردی (ASTM C452) را فراهم آورد. در مورد سیمان پرتلند نوع V، آزمون اختیاری انبساط سولفات (ASTM C452) می‌تواند به جای الزامات شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد (Mather، ۱۹۷۸). در CSA A3000، از محدودیت‌های انبساط ASTM C452 برای واجد شرایط بودن سیمان‌های پرتلند با مقاومت متوسط و زیاد در برابر سولفات استفاده می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهند که ASTM C150/C150M نیاز به بازنگری دارد تا محدودیت‌های انبساط ASTM C452 را نیز شامل شود (Hooton و Gagatek، ۲۰۱۹). استفاده از ASTM C1012/C1012M توسط Patzias (۱۹۹۱) مورد بحث قرار گرفته است. سیمان‌های مخلوط ASTM C595/C595M، ASTM C1157/C1157M و CSA A3000 نیز از محدودیت‌های انبساط ASTM C1012/C1012M برای واجد شرایط بودن مقاومت سولفاتی متوسط (MS) یا زیاد (HS) استفاده می‌کنند. هر دو نشریه ACI 318 و CSA A23.1-19/CSAA23.2 استفاده از سایر ترکیبات مواد سیمانی را در شرایط

رویارویی با سولفات مجاز می‌دانند، مشروط بر اینکه آزمایش عملکردی آن با استفاده از ASTM C1012/ C1012M بیانگر عدم وجود انبساط بیش‌تر از حد در شرایط رویارویی مربوطه (جدول ۶-۱-۴-الف) باشد. توجه شود که در جدول ۶-۱-۴-ب، اگر سیمان پرتلند نوع II استاندارد ASTM C150/C150M برای رویارویی در شرایط S1 با نسبت w/cm برابر ۰/۵ و سیمان پرتلند نوع V با نسبت w/cm برابر با ۰/۴۵ برای رویارویی در شرایط S2 انتخاب شده باشند، آزمایش عملکرد مورد نیاز نیست.

جدول ۶-۱-۴-الف - شدت شرایط رویارویی بر اساس میزان سولفات در خاک یا آب

سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) <sup>*</sup> در آب، ppm	سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) <sup>*</sup> محلول در آب موجود در خاک، %	طبقه‌بندی شرایط رویارویی
$SO_4^{2-} > 150$	$SO_4^{2-} > 10/0$	S0
$150 > SO_4^{2-} > 1500$ یا آب دریا	$SO_4^{2-} > 10/0 > 20/0$	S1 (متوسط)
$SO_4^{2-} > 1500 > 10000$	$SO_4^{2-} > 20/0 > 00/2$	S2 (شدید)
$SO_4^{2-} < 10000$	$SO_4^{2-} < 00/2$	S3 (بسیار شدید)

\* سولفات بیاننده به صورت  $SO_4$  با مقدار سولفات بیاننده به صورت  $SO_3$  (همان‌طور که در آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند بیان می‌شود) ارتباط دارد:  $SO_3 \times 1.2 = SO_4$

جدول ۶-۱-۴-ب - الزامات محافظت از بتن در برابر آسیب بر اثر حمله سولفاتی از منبع سولفات بیرونی

سیمان پرتلند، سیمان پرتلند آهکی، یا سیمان هیدرولیکی به تنهایی یا در ترکیب با مواد مکمل سیمانی (باید تعریف سیمان یا الزامات عملکرد را برآورده کنند)*			حداقل MPa	حداکثر w/cm	رده رویارویی	
الزامات عملکردی انبساط در ASTM C1012 (حداکثر %)						
۱۸ ماه	۱۲ ماه	۶ ماه	تعریف سیمان			
فائق الزامات						
-	-	۱۰/۰	پرتلند نوع II یا نوع MS در سیمان‌های آمیخته	۲۸	۵/۰	S1
-	-	-	بدون محدودیت	۳۲	۴۵/۰	
۱۰/۰*	۰۵/۰	-	تنها الزامات عملکرد	۲۸	۵/۰	S2
-	۱۰/۰**	۰۵/۰	پرتلند نوع V یا نوع HS در سیمان‌های آمیخته	۳۲	۴۵/۰	
-	-	۱۰/۰	پرتلند نوع II یا نوع MS	۳۵	۴/۰	
۱۰/۰*	۰۵/۰	-	تنها الزامات عملکرد	۳۲	۴۵/۰	S3
-	۱۰/۰**	۰۵/۰	پرتلند نوع II <sup>†</sup> یا نوع HS در سیمان‌های آمیخته	۳۵	۴/۰	

\* نوع مواد سیمانی مورد استفاده باید یا با عنوان ذکر شده در ستون «تعریف سیمان» مطابقت داشته باشد یا الزامات انبساط ذکر شده در ستون «الزامات عملکردی» را طی آزمایش ASTM C1012 برآورده سازد.

† سیمان پرتلند نوع II (مقاومت سولفاتی متوسط) و نوع V (ضد سولفات) بر اساس سیمان‌های استاندارد ASTM C150 است. ‡ نوع MS به سیمان‌های هیدرولیکی اطلاق می‌شود که الزامات نوع MS در ASTM C1157 یا سیمان‌های آمیخته که الزامات تعریف MS در ASTM C595 را برآورده می‌کنند.

§ نوع HS به سیمان‌های هیدرولیکی اطلاق می‌شود که الزامات نوع HS در ASTM C1157 یا سیمان‌های آمیخته که الزامات تعریف HS در ASTM C595 را برآورده می‌کنند.

|| در جایی که سیمان پرتلند یا سیمان پرتلند آهکی و مواد مکمل سیمانی در کارخانه بتن ترکیب می‌شوند، باید نشان داده شود که این ترکیب با الزامات عملکردی ذکر شده در ASTM C1012 مطابقت دارد.

# انطباق با محدودیت انبساط ۱۸ ماهه فقط در صورت عدم رعایت محدودیت ۱۲ ماهه الزامی است و در صورت رعایت محدودیت ۱۲ ماهه، الزامی نیست.

\*\* انطباق با محدودیت انبساط ۱۲ ماهه فقط در صورت عدم رعایت محدودیت ۶ ماهه الزامی است و در صورت رعایت محدودیت ۶ ماهه، الزامی نیست.

†† اگر سیمان پرتلند نوع V به عنوان تنها ماده سیمانی در شرایط رویارویی S3 استفاده شود، الزامات مقاومت سولفاتی اختیاری حداکثر انبساط برابر با ۰/۰۴۰٪ در ASTM C150 (بر اساس آزمایش ASTM C452)، باید مشخص شود.

یک راهکار برای کاهش ورود و حرکت سولفات‌های محلول و آب در بتن، کاهش نسبت w/cm است. استفاده از مواد مکمل سیمانی قابل قبول یکی دیگر از راهبردهای تکمیلی برای کاهش ورود و حرکت آب به داخل بتن است (به فصل ۳ در مورد محدود کردن نفوذ مایعات رجوع شود). باید دقت شود که بتن برای حداقل میزان ترک خوردگی حرارتی و جمع شدگی، طراحی و ساخته شده است. تعیین صحیح الزامات بتن و طراحی درزها و جزئیات آرماتورها برای کنترل و کاهش ترک خوردگی به همان اندازه اهمیت دارد که اعمال صحیح روش‌های ساخت جهت در جا ریختن، تراکم، پرداخت و عمل آوری بتن در راستای به حداقل

رساندن ترک خوردگی و کاهش نفوذ و حرکت مایعات حاوی نمک‌های مهاجم در داخل بتن، ضروری است. روش‌های توصیه شده برای این موارد در ACI 224R، ACI 304R، ACI 302.1R، ACI 308R، ACI 305R، ACI 306R، و فصل ۳ این راهنما یافت می‌شوند.

توصیه‌هایی برای حداکثر نسبت w/cm و نوع مواد سیمانی در بتن در معرض سولفات‌ها در خاک یا آب‌های زیرزمینی، در جدول ۱-۴-۱-۶ ب برای شرایط رویارویی تعریف شده در جدول ۱-۴-۱-۶ الف آورده شده‌اند. هر دو توصیه مهم هستند، زیرا تعیین نوع سیمان برای مقاومت مطلوب در برابر حمله سولفاتی کافی نیست (Kalousek و همکاران، ۱۹۷۶؛ Stark، ۲۰۰۲؛ Monterio و Kurtis، ۲۰۰۳).

جدول ۱-۴-۱-۶ ب، پیشنهادهایی برای درجات مختلف شرایط رویارویی محتمل را ارائه می‌دارد. این توصیه‌ها برای محافظت بتن در برابر منابع سولفاتی بیرونی مانند خاک مجاور، آب‌های زیرزمینی، و پساب‌هایی که در لوله‌های بتنی حمل می‌شوند، طراحی شده‌اند.

شرایط میدانی بتن در معرض سولفات‌ها متعدد و متغیر است. تهاجمی بودن شرایط به مواردی از جمله درجه اشباع خاک، حرکت آب، دما و رطوبت محیط، غلظت، نوع یا ترکیب سولفات‌های درگیر بستگی دارد. جدول ۱-۴-۱-۶ ب، معیارهایی را ارائه می‌کند که می‌تواند طول عمر بتن تحت شرایط رویارویی با سولفات مهاجم را به حداکثر برساند.

### ۱-۴-۱-۶. حمله فیزیکی نمک: حمله نمک به وسیله نمک‌های سولفاتی

فصل ۸ توصیه‌هایی را برای مورد جامع‌تر حمله فیزیکی نمک ارائه می‌کند. با این حال، در حضور سولفات‌ها، الزامات برای جلوگیری از حمله شیمیایی سولفات باید رعایت شود (جدول ۱-۴-۱-۶ الف و جدول ۱-۴-۱-۶ ب).

### ۱-۴-۱-۶. تشکیل تومازایت

استفاده از سیمان‌های پرتلند مقاوم در برابر سولفات نوع II یا V از حمله سولفاتی تومازایتی جلوگیری نمی‌نماید، زیرا تومازایت فازهای آلومینات را مصرف نمی‌کند. حمله تومازایتی گاهی اوقات ناشی از موارد زیر است: (۱) مواد ریز کرناتی اضافی در سنگدانه‌ها یا سیمانی که در آن‌ها بسیار زیادتر از غلظت مجاز ارائه شده توسط استاندارد ASTM C150/C150M بوده است و (۲) کرناته شدن در معرض هوا یا آب. شرایطی که تحت آن حمله تومازایتی رخ می‌دهد، به‌طور کامل شناخته نشده است و هنوز هیچ استاندارد دیگری که به‌طور خاص به مشخصات برای پیشگیری از آن پردازد، وجود ندارد. با این حال، به نظر می‌رسد که در شرایط رویارویی بسیار مرطوب، حمله سولفات تومازایتی رایج است و بنابراین در نظر گرفتن بتن‌های با نسبت w/cm کم باعث کاهش ورود یون‌های سولفات و کرنات شده و همچنین کاهش نرخ کرناته شدن می‌گردد (Hooton، ۲۰۰۷). در ابتدا تصور می‌شد که اگر استاندارد ASTM C1012/C1012M به گونه ای اصلاح شود که منشورهای ملات در دمای ۵ درجه سلسیوس در معرض محلول سولفات قرار گیرند، امکان تعیین اینکه آیا چسباننده‌های سیمانی

در برابر حمله سولفاتی تومازایتی مقاوم هستند یا خیر، فراهم گردد (Hooton و Brown، ۲۰۰۹؛ Hooton و همکاران، ۲۰۱۰؛ Barcelo و همکاران، ۲۰۱۴). با این حال، مشخص شد که شرایط این آزمایش خیلی شدید است و عملکرد منشورهای بتنی قرار داده شده در محلول ۱۵۰۰۰ میلی گرم بر لیتر  $SO_4^{2-}$  (سدیم سولفات) در دمای مشابه (۵ درجه سلسیوس) و دماهای متغیر بین ۳ تا ۱۶ درجه سلسیوس به مدت ۵/۵ سال را به درستی پیش بینی نمی کند. در نتیجه، نسخه‌ی دمای کم استاندارد ASTM C1012/C1012M که در سال ۲۰۱۰ توسط CSA A3000 پذیرفته شده بود، در سال ۲۰۱۸ حذف شد. مشاهده گردید که چسباننده‌هایی که توسط روش ASTM C1012/C1012M در دمای ۲۳ درجه سلسیوس به عنوان مقاوم در برابر سولفات شناسایی شدند، همچنین در بتن قرار داده شده در دمای کم به مدت ۵/۵ سال نیز مقاوم بودند.

به نظر می رسد استفاده از سرباره در بتن به مقاومت در برابر حمله سولفات تومازایتی کمک کند (Hill و همکاران، ۲۰۰۳). Stark و Nobst (۲۰۰۳) دریافتند که بتن با سیمان حاوی حداقل ۶۶ درصد سرباره در برابر تومازایت مقاوم است. این مورد توسط Stark و Bellmann (۲۰۰۸) تأیید شد که در آن تحقیق منشورهای ملات ساخته شده با سیمان CEM III B استاندارد اروپایی با ۶۵ درصد سرباره پس از قرارگیری در معرض محلول‌های سولفاتی در دمای ۸ درجه سلسیوس، در برابر تومازایت مقاوم بودند. آن‌ها مقاومت خوب را به کاهش مقدار CH در خمیره نسبت دادند و هنگامی که CH به منشورهای ملات ساخته شده با سیمان مشابه اضافه شد، آسیب ناشی از حمله سولفاتی تومازایتی رخ داد. سیمان حاوی ۵۰ درصد سرباره در منشورهای ملات نگهداری شده در دمای ۵ درجه سلسیوس (Hooton و همکاران، ۲۰۱۰) و در بتن‌های نگهداری شده در محلول ۱۵۰۰۰ میلی گرم بر لیتر  $SO_4^{2-}$  (سدیم سولفات) در دماهای مشابه (Hooton و Thomas، ۲۰۱۶)، در برابر تشکیل تومازایت مقاوم می کند. همچنین Stark و Bellmann (۲۰۰۷) دریافتند که وقتی سیمان CEM III-L، که سیمان پرتلند با حداکثر ۲۰ درصد سنگ آهک با سایش همزمان است، با خاکستر بادی نوع F به میزان ۲۰ یا ۴۰ درصد جایگزین شد، نمونه‌ها پس از ۴/۵ سال نگهداری در محلول ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر  $SO_4^{2-}$  (سدیم سولفات) در ۸ درجه سلسیوس، هیچ آسیبی ندیدند. پس از ۴۵ ماه قرارگیری در دمای ۵ درجه سلسیوس در محلول سدیم سولفات (۳۳۸۰۰ میلی گرم در لیتر  $SO_4^{2-}$ )، Thomas (۲۰۱۵) آسیب‌های کم تا ناچیزی (معادل تغییر طول کوچکتر از ۰/۱۰٪) در منشورهای ملات ساخته شده با سیمان پرتلند دارای مقاومت متوسط در برابر سولفات ( $C_3A$  بین ۵ تا ۸٪) به همراه حداکثر ۲۲٪ سنگ آهک و با جایگزینی بخشی از سیمان توسط ۲۰٪ خاکستری بادی + ۵٪ دوده سیلیس، ۶۰٪ سرباره، ۲۵٪ سرباره + ۵٪ دوده سیلیس، مشاهده نمودند.

### ۶-۱-۵. نمونه برداری و آزمایش جهت تعیین شرایط مستعد رویارویی با سولفات‌ها

برای ارزیابی شدت مواجهه بالقوه بتن با مقادیر مضر سولفات، نمونه‌های معرف باید از سیال و همچنین از ترکیب (های) سولفاتی که ممکن است به بتن برسد یا خاکی که می تواند بر اثر حرکت آب تراوش نماید و به بتن برسد، تهیه شود. روش ارائه شده در ASTM C1580 برای تهیه عصاره‌ای بر پایه آب از نمونه‌های خاک برای بررسی مقدار سولفات توصیه می گردد (Hayes، ۲۰۰۷). هنگامی که سولفات کلسیم وجود

دارد، روش های مختلف آزمایش، به ویژه نسبت های مختلف عصاره گیری، نتایج متفاوتی را به همراه خواهد داشت (Rebel و همکاران، ۲۰۰۵).

## ۶-۱-۶. برقراری عملکرد معادل برای مخلوط های سیمانی با یا بدون مواد

### مکمل سیمانی

استفاده از سیمان های پرتلند، سیمان های پرتلند سنگ آهکی، سیمان های هیدرولیکی، یا سایر ترکیبات جایگزین مواد سیمانی با موارد ذکر شده در جدول ۶-۱-۴ ب برای هر درجه از رویارویی مجاز است، مشروط بر اینکه هر یک از الزامات ترکیب شیمیایی قابل استفاده را بر اساس آزمایش ASTM C1012/ C1012M برآورده سازند. هر گونه مخلوط دوجزئی یا سه جزئی با سیمان پرتلند از هر نوع مطابق استاندارد ASTM C150/C150M، سیمان پرتلند سنگ آهکی مطابق استاندارد ASTM C595/C595M، یا هر نوع طبقه بندی از سیمان هیدرولیکی مطابق استاندارد ASTM C1157/C1157M که با خاکستر بادی یا پوزولان طبیعی مطابق ASTM C618، یا دوده سیلیس مطابق ASTM C1240، یا سرباره مطابق ASTM C989/C989M در صورتی مجاز است که این مخلوط محدودیت های انبساط در جدول ۶-۱-۴ ب هنگامی که با روش ارائه شده در ASTM C1012/C1012M آزمایش شده را در برگیرد. مقدار  $C_3A$  محاسبه شده براساس روابط بوگ باید توسط تولید کننده برای سیمان پرتلند، سیمان پرتلند سنگ آهکی، یا سیمان هیدرولیکی استفاده شده در مخلوط های آزمایش تأیید کیفیت همراه با درصد ماده ی مکمل سیمانی یا ترکیبی از مواد مکمل سیمانی مورد استفاده در مخلوط های آزمایش تأیید کیفیت گزارش شود؛ برای خاکستر بادی، مقدار CaO و برای سرباره، مقدار  $Al_2O_3$  باید گزارش شود. بنابراین، آزمایش های تأیید کیفیت در مورد هر سیمان به شرطی در یک پروژه معتبر است، مقدار  $C_3A$  کمتر یا مساوی مقداری باشد که در مخلوط های آزمایشی استفاده شده است و مقدار مواد مکمل سیمانی برابر یا بیش تر از مقدار مورد استفاده در مخلوط های آزمایشی باشد.

آزمایش های تأیید کیفیت مواد با استفاده از محدودیت های انبساط در جدول ۶-۱-۴ ب باید بر اساس نتایج مورد قبول برای سیمان یا ماده ی مکمل سیمانی باشد و به مدت ۱ سال از تاریخ تکمیل آزمایش معتبر خواهد بود، مشروط بر اینکه خواص شیمیایی ماده ی مکمل سیمانی پیشنهادی در محدوده های مذکور در بخش ۶-۱-۶ باشد.

## ۶-۱-۷. نسبت ها و یکنواختی پوزولان ها و سرباره ها

درصد خاکستر بادی، پوزولان طبیعی، دوده سیلیس یا سرباره مورد استفاده در مخلوط بتن پروژه (نسبت به مقدار کل ماده چسباننده) باید برابر یا بیش تر از مقدار استفاده شده در مخلوط آزمایشی تهیه شده برای برآورده کردن توصیه های جدول ۶-۱-۴ ب و بخش ۶-۱-۶ باشد. بسته به شدت شرایط رویارویی با سولفات در ترکیبات یا مخلوط های حاوی سیمان پرتلند، سیمان پرتلند سنگ آهکی، یا سیمان هیدرولیکی شامل فقط یک ماده ی مکمل سیمانی، محدوده رایج برای ماده ی مکمل سیمانی به عنوان درصدی از کل مقدار ماده چسباننده می تواند به شرح زیر باشد: خاکستر بادی یا پوزولان طبیعی، ۱۵ تا ۵۰٪؛ دوده سیلیس،

۵ تا ۱۲٪؛ سرباره، ۳۵ تا ۷۰٪. هنگامی که بیش از یک ماده‌ی مکمل سیمانی استفاده گردد، نسبت هر یک از این مواد ممکن است کمتر از این مقادیر باشد.

یکنواختی خاکستر بادی یا سرباره‌ی مورد استفاده در پروژه در مقایسه با آنچه که در مخلوط‌های آزمایش شده برای برآورده کردن توصیه‌های جدول ۱-۴-۱-۶ ب و بخش ۶-۱-۶ استفاده شد، باید در محدوده‌های زیر باشد:

الف) خاکستر بادی: مقدار کلسیم اکسید گزارش شده (ارزیابی شده با روش ASTM C114) بیش از ۷/۰ درصد بیش‌تر از خاکستر بادی مورد استفاده در مخلوط آزمایشی نباشد.

ب) سرباره: مقدار آلومینیوم اکسید گزارش شده (ارزیابی شده با روش ASTM C114) بیش از ۷/۰ درصد بیش‌تر از سرباره‌ی مورد استفاده در مخلوط آزمایشی نباشد.

سیمان پرتلند، سیمان پرتلند سنگ آهکی یا سیمان هیدرولیکی مورد استفاده در پروژه باید براساس محاسبات بوگ مقدار  $C_3A$  کمتر یا مساوی با مقدار مورد استفاده در مخلوط‌های مورد آزمایش برای برآورده کردن توصیه‌های جدول ۱-۴-۱-۶ ب و بخش ۶-۱-۶ داشته باشد.

مطالعات نشان داده است که برخی از پوزولان‌ها و سرباره‌های مورد استفاده چه در سیمان آمیخته و چه در شرایطی که به‌صورت جداگانه به بتن در مخلوط‌کن اضافه می‌شوند، طول عمر مورد انتظار بتن را به میزان قابل توجهی در مواجهه با سولفات افزایش می‌دهند. بسیاری از سرباره‌ها و پوزولان‌ها به‌طور قابل‌توجهی نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهند (Mehta, ۱۹۸۱؛ Bakker, ۱۹۸۰). آن‌ها همچنین با قلیایی‌ها و CH آزاد شده در طول هیدراته‌شدن سیمان ترکیب می‌گردند (Vanden Bosch, ۱۹۸۰؛ Roy و Idorn, ۱۹۸۲؛ Roy و Mehta, ۱۹۸۶)، و استعداد تشکیل گچ را کاهش می‌دهند (Lea, ۱۹۷۱؛ Biczok, ۱۹۷۲؛ Kalousek و همکاران, ۱۹۷۲؛ Mehta, ۱۹۷۶).

تحقیقات نشان می‌دهد که اکثر پوزولان‌ها و سرباره‌ها در بهبود مقاومت سولفاتی بتن موثر هستند که این موضوع به‌دلیل بهبود ترکیب سیمانی و کاهش نفوذپذیری می‌باشد. هنگام ارزیابی عملکرد ترکیبات مختلف مواد سیمانی، ترکیبات در صورتی قابل قبول هستند که حد انبساط ۱۸ ماهه ASTM C1012/C1012M در جدول ۱-۴-۱-۶ ب رعایت شود. اما، خاکستر بادی نوع C ممکن است مقاومت در برابر سولفات را کاهش دهد (Mather, ۱۹۸۱؛ Mather, ۱۹۸۲). هنگامی که پوزولان مورد استفاده خاکستری بادی است که الزامات نوع F در ASTM C618 را برآورده می‌نماید، نتایج مطلوبی حاصل گردید (Dikeou, ۱۹۷۵؛ Dunstan, ۱۹۷۶). سیمان سرباره‌ای باید مطابق با ASTM C989/C989M و دوده‌سیلیس باید مطابق با ASTM C1240 باشد. سایر ترکیبات مواد مکمل یا جایگزین سیمانی باید براساس حد انبساط ۱۸ ماهه ASTM C1012/C1012M در جدول ۱-۴-۱-۶ ب ارزیابی شوند.

در بتن‌هایی که با سیمان‌های غیرمقاوم در برابر سولفات ساخته می‌شوند، کلسیم کلراید مقاومت در برابر حمله سولفاتی را کاهش می‌دهد (اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۱۹۷۵) و بنابراین، استفاده از آن در بتن در معرض سولفات (S1 یا شرایط شدیدتر رویارویی) باید ممنوع شود. اما، چنانچه از سیمان پرتلند نوع

۷ استفاده می‌شود، استفاده از کلسیم کلراید در مقادیر معمولی قابل قبول به عنوان یک افزودنی تسریع کننده مضر نمی‌باشد (Mather, ۱۹۹۲). به هر حال، کلسیم کلراید می‌تواند باعث ایجاد و تسریع خوردگی مسلح کننده‌های فولادی و غلاف‌های آلومینیومی شود. بنابراین، به طور کلی توصیه می‌شود که کلسیم کلراید به بتن مسلح اضافه نگردد.

## ۶-۲. حمله سولفاتی داخلی

### ۶-۲-۱. مصالح بتنی

مواد سیمانی مطابق با مشخصات فعلی ASTM دارای مقادیر سولفات مضر برای بتن نیستند. مقادیر مجاز سولفات در سیمان‌ها مطابق استاندارد ASTM C150/C150M با توجه به تغییرات ترکیبات و ریزی سیمان‌ها در راستای بهینه‌نمودن مقدار سولفات مجاز، از سال ۱۹۴۱ تا ۱۹۷۱ چندین بار افزایش یافته‌است (Hooton, ۲۰۰۸)، چرا که ترکیبات و ریزی سیمان تغییر کرده است تا امکان بهینه‌سازی بهتر مقادیر سولفات فراهم گردد. ASTM C150/C150M اکنون اجازه می‌دهد که اگر بتوان نشان داد که مقدار بهینه  $SO_3$  زیادتر از حد اعلام شده است (معمولاً با استفاده از ASTM C563)، مقادیر محدوده  $SO_3$  می‌تواند بیش تر شود. در این حالت، ASTM C1038/C1038M باید نشان دهد که مقدار  $SO_3$  سیمان منجر به انبساط نامطلوب نخواهد شد. این نتایج زمانی رضایت‌بخش است که حد انبساط ۱۴ روزه،  $0.020\%$  مشخص شده باشد. این آزمایش و محدودیت انبساط در ASTM C1157/C1157M نیز پذیرفته شده است و برای سیمان‌های پرتلند کاتادا، سیمان‌های آمیخته و ترکیبی از مواد سیمانی در CSA A3001 استفاده می‌گردد (Brown و Hooton, ۲۰۰۹). این آزمایش و محدودیت انبساط در ASTM C595/C595M پذیرفته نشده است زیرا هنوز بر ASTM C265 متکی است.

اگرچه ASTM C33/C33M مقدار سولفات موجود در سنگدانه‌ها را برای استفاده در بتن محدود نمی‌کند، ولی سنگدانه‌ها نباید حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد معدنی حاوی سولفات، مانند ترکیبات کلسیم سولفات یا آلوده به سولفات‌ها یا سولفیدهایی مانند پیریت باشند. محدودیت‌هایی برای سولفیدها در سنگدانه‌های سرباره‌ی کوره‌ی بلند که با هوا خنک می‌شوند، وجود دارد. سولفیدهای موجود در سنگدانه‌های سرباره‌ی شامل آهن سولفید و کلسیم سولفید است. نمونه‌برداری و آزمایش برای تعیین مقدار سولفات باید پیش از مصرف کامل شود. غلظت سولفات در آب اختلاط معمولاً برای بتن مضر نیست و باید محدودیت‌های ASTM C1602/C1602M را برآورده کند. سولفات‌های موجود در افزودنی‌های شیمیایی منطبق با ASTM C494/C494M، ASTM C260/C260M و ASTM C1017/C1017M برای بتن مضر نیستند. فصل ۵ اطلاعات بیش تری در مورد سنگدانه‌های حاوی مواد معدنی حاوی آهن سولفید ارائه می‌دهد.

۶-۲-۲. تشکیل اترینگایت تأخیری<sup>۱۲۵</sup>

## ۶-۲-۲-۱. وقوع

در دماهای خاص بتن، شرایط خاص رویارویی و بسته به شیمی مواد سیمانی، اعضای بتنی عمل آوری شده با حرارت و بتن‌های حجیم، می‌توانند در مواجهه مجدد با رطوبت، دچار انبساط و ترک شوند. این حالت از خرابی عموماً با عنوان تشکیل اترینگایت تأخیری نامیده می‌شود. تشکیل معمولی اولیه اترینگایت که در بتن عمل آورنده در دمای محیط رخ می‌دهد، می‌تواند در نتیجه رویارویی با دماهای بیش از حد در طول ساخت به تأخیر یفتد. سپس در سنین بعدی که بتن در معرض رطوبت قرار می‌گیرد، اترینگایت تشکیل می‌شود. این تشکیل اترینگایت تأخیری می‌تواند منجر به انبساط داخلی و آسیب در بتن سخت‌شده گردد. در دهه ۱۹۹۰، با توجه به مواردی که در آلمان، فنلاند، چکسلواکی سابق، کانادا، ایالات متحده، آفریقای جنوبی و استرالیا گزارش گردید، به نظر می‌رسید که تراورس‌های راه آهن که با حرارت عمل آوری شده‌اند، به مقدار زیادی در معرض این حالت از خرابی قرار دارند (Heinz و Ludwig، ۱۹۸۷؛ Eriks- و Tepponen و Shayan، ۱۹۸۷؛ Vitousova، ۱۹۹۱؛ Mielenz و همکاران، ۱۹۹۵؛ Oberholster و همکاران، ۱۹۹۲؛ Shayan و Quick، ۱۹۹۲). در بیش‌تر موارد (البته نه در همه موارد)، در جاهایی که ادعای تشکیل اترینگایت تأخیری وجود دارد، سایر فرآیندهای خرابی به ویژه ASR و آسیب‌های ناشی از یخ زدن و آب شدن، نیز می‌توانند دخیل باشند که این امر شناسایی نقش دقیق تشکیل اترینگایت تأخیری را دشوار می‌کند.

وقوع این مشکلات و نقش آشکار دمای بیش از حد بتن در مرحله عمل آوری آن، بسیاری از کشورها را بر آن داشته است که محدودیت‌هایی را برای عمل آوری حرارتی بتن پیش‌ساخته اعمال نمایند. این موارد شامل محدودیت‌هایی برای زمان‌های پیش از گیرش، نرخ گرمایش و سرمایش و حداکثر دما می‌باشد. شواهدی وجود دارد مبنی بر اینکه این اقدامات و عملیات مشابه در اروپا در از بین بردن آسیب ناشی از تشکیل اترینگایت تأخیری موفق بوده است (Locher و Skalny، ۱۹۹۷؛ Stark و Bollmann، ۱۹۹۹).

توجه داشته باشید که خطر آسیب ناشی از تشکیل اترینگایت تأخیری به عناصر بتنی پیش‌ساخته عمل آوری شده با حرارت محدود نمی‌گردد. دمای داخلی بتن ممکن است به دلیل گرمای آزاد شده در جریان هیدراته شدن اجزای مواد سیمانی، در بتن پیش‌ساخته بدون عمل آوری حرارتی یا در عناصر بتنی حجیم درجا ریخته شده به اندازه‌های افزایش یابد که منجر به تشکیل اترینگایت تأخیری شود (Thomas و همکاران، ۲۰۰۸b). قبل از سال ۲۰۰۰، مستندات اندکی در خصوص تشکیل اترینگایت تأخیری در بتن حجیم به دلیل افزایش دما وجود داشت. اما، Thomas و همکاران (۲۰۰۸b) گزارش داده‌اند که تشکیل اترینگایت تأخیری در سازه‌ی پلی یافت شد که ترک خوردگی قابل توجهی را پس از گذشت درست ۱۵ سال پس از بهره‌برداری داشته است. این مطالعه اینگونه نتیجه‌گیری نموده است که تشکیل اترینگایت تأخیری (در صورت عدم وجود ASR) تنها علت ایجاد انبساط در بتن می‌باشد. در این تحقیق (Thomas و همکاران، ۲۰۰۸b) همچنین استفاده از مخلوط‌های بتنی با مقدار زیاد مواد سیمانی را گزارش نمودند و مشخص شد که مخلوط‌های بتنی مشابه حاوی سیمان پرتلند نوع

<sup>125</sup> Delayed ettringite formation (DEF)

III برای روسازه پیش ساخته و زیرسازه پسکشیده در جا ریخته شده استفاده گردیده‌اند. هیچ شواهدی مبنی بر بهینه‌سازی حرارتی مخلوط‌های بتن یا یک برنامه کنترل حرارت با هدف کاهش دما جهت مدیریت و نظارت بر دمای بتن در محل، در جریان ساخت وجود نداشته است.

در مقایسه با بتن پیش ساخته، بتن حجیم معمولاً مدت زمان طولانیتری در معرض دماهای زیاد قرار دارد که این امر شروع انبساط مضر در ملات و بتن را تسریع می‌نماید (Ferraro, ۲۰۱۸). استفاده از مخلوط‌های بتن با بهینه‌سازی مناسب جهت کاهش مقدار کل مواد سیمانی و استفاده از پوزولان یا سربراره برای کاهش افزایش دما، همراه با برنامه‌های کنترل حرارت جهت مدیریت و نظارت بر دمای بتن، می‌تواند به کاهش دمای بتن در جریان ساخت و جلوگیری از تشکیل اترینگایت تأخیری کمک نماید. در واقع، استانداردهای اروپا و آمریکای شمالی محدودیت‌های مشابهی را برای حداکثر دمای داخلی بتن برای هر دو بتن پیش ساخته و بتن درجاریز اعمال می‌کنند.

#### ۶-۲-۲-۲. سازوکارها

همان‌طور که Thomas و Skalny (۲۰۰۶) بررسی کرده‌اند، حلالیت اترینگایت با دما و pH افزایش می‌یابد و دماهای زیاد غلظت سولفات و آلومین را در مایع منفذی بتن افزایش می‌دهد. بیش تر این سولفات و آلومین توسط هیدرات‌های کلسیم سیلیکات (C-S-H) که به سرعت تشکیل می‌شوند جذب می‌شود. بلافاصله پس از رویارویی اولیه با دمای زیاد، هیچ اترینگایتی در بتن نبوده‌است یا به مقدار اندکی در بتن شناسایی می‌شود و به نظر می‌رسد که مونوسولفات با ساختار بلوری ضعیف، فاز اصلی سولفات‌دار باشد (Taylor و همکاران، ۲۰۰۱). در جریان رویارویی بعدی با رطوبت در دمای محیط، اکثر سولفات توسط C-S-H آزاد می‌شود، اما تنها مقدار کمی از آلومین آزاد می‌گردد. افزایش دسترسی به سولفات منجر به تبدیل مونوسولفات به اترینگایت می‌گردد که می‌تواند چندین ماه یا سال پس از رویارویی با دماهای زیاد رخ دهد. تشکیل دیر هنگام اترینگایت ممکن است تحت برخی شرایط موجب انبساط خمیر و در نتیجه ترک خوردن بتن شود. به‌طور کلی اعتقاد بر این است که انبساط خمیر سیمان نتیجه رشد بلورهای اترینگایت در منافذ بسیار کوچک خمیر سیمان (تقریباً ۱۰۰ نانومتر) می‌باشد (Taylor و همکاران، ۲۰۰۱؛ Lawrence, ۱۹۹۵). انبساط خمیر سیمان منجر به ایجاد فاصله در اطراف ذرات سنگدانه و ترک خوردن خمیر سیمان می‌شود (Johansen و همکاران، ۱۹۹۳). در نهایت مجدداً اترینگایت در این فاصله‌ها و ترک‌ها رسوب می‌کند، ولی این امر علت خرابی به‌شمار نمی‌رود (Johansen و همکاران، ۱۹۹۳).

بررسی مطالعات آزمایشگاهی (Day, ۱۹۹۲؛ Thomas, ۲۰۰۱) و داده‌های اخیر (Thomas و همکاران، ۲۰۰۸؛ Ferraro, ۲۰۱۸) نشان می‌دهد که وقوع انبساط ناشی از تشکیل اترینگایت تأخیری رخ نخواهد داد مگر اینکه نمونه‌های ملات یا بتن در معرض دمای بیش از ۷۰ درجه سلسیوس قرار گیرند و با افزایش زمان و دما به حد بیش تر از این مقدار آستانه، خطر انبساط افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که برای ملات یا بتن‌هایی که در معرض دماهای زیادتر قرار گرفته‌اند، خطر انبساط تابعی از عوامل زیادی از جمله ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چسباننده‌های سیمانی می‌باشد (Shimada, ۲۰۰۵؛ Shimada و همکاران، ۲۰۰۷). بررسی نتایج منتشر

شده (Thomas، ۲۰۰۱) نشان می‌دهد که سیمان‌های با ریزی زیاد از کلینکر با مقادیر زیاد  $C_3A$ ،  $C_3S$  و  $Na_2O_{eq}$  تولید می‌شود و در نتیجه داشتن مقدار زیاد  $SO_3$  بیش‌ترین حساسیت را در برابر انبساط ناشی از تشکیل اترینگایت تأخیری در هنگام عمل‌آوری با حرارت دارند. Kelham (۱۹۹۶) همبستگی مشخصی بین مقاومت فشاری دو روزه ملات و انبساط همان ملات پس از عمل‌آوری حرارتی در ۹۰ درجه سلسیوس نشان داد. اگرچه مطالعات روابط بین انبساط ناشی از تشکیل اترینگایت تأخیری و مؤلفه‌های مختلف مرتبط با ترکیب سیمان را نشان داده‌اند، اما هیچ مؤلفه واحدی وجود ندارد که بتواند به‌طور قابل اعتماد، عملکرد یک سیمان خاص را پیش‌بینی نماید. بنابراین، نمی‌توان یک محدودیت واحد برای ترکیب شیمیایی سیمان جهت از بین بردن خطر انبساط در بتنی که ممکن است در هنگام عمل‌آوری در معرض دمای بسیار زیاد قرار گیرد، اعمال نمود. ولی براساس مطالعات آزمایشگاهی مشهود است هنگامی که سیمان‌های پرتلند با مقادیر زیاد  $Na_2O_{eq}$ ،  $C_3S$ ،  $C_3A$  و  $SO_3$  در دماهای زیاد عمل‌آوری می‌شوند، عموماً بیش‌ترین تمایل برای انبساط را دارند. سیمان‌هایی که رشد مقاومت کمتری را در سنین اولیه نشان می‌دهند، عموماً خطر انبساط کمتری دارند (Kelham، ۱۹۹۶؛ Ramlochan، ۲۰۰۲).

با به‌کارگیری مواد مکمل سیمانی مناسب به مقدار کافی، می‌توان به‌طور مؤثری خطر انبساط ملات و بتن عمل‌آوری شده با حرارت را از بین برد (Ghorab و همکاران، ۱۹۸۰؛ Ramlochan و همکاران، ۲۰۰۳؛ Ferraro، ۲۰۱۸). ظاهراً به‌دلیل کمبود آلومینات در هیدرات‌ها، هنگامی که دوده‌سیلیس به‌عنوان تنها ماده‌ی مکمل سیمانی استفاده می‌شود، تشکیل اترینگایت تأخیری کاهش می‌یابد اما به‌طور کامل حذف نمی‌شود (Ramlochan و همکاران، ۲۰۰۳). به همین دلیل توصیه‌های نشان داده شده در جدول ۶، ۲، ۲، ۲ مستلزم استفاده از دوده‌سیلیس در یک سامانه سه‌جزئی به همراه خاکسترآبدی یا سرباره است.

جدول ۶-۲-۲ اقدامات توصیه شده برای کاهش خطر تشکیل اترینگایت تأخیری در بتن در روبرویی با دماهای زیاد در سنین اولیه\*

اقدامات پیشگیرانه	بیشینه دمای بتن (T)
انجام اقدام پیشگیرانه نیاز نیست.	$C^{\circ}70 \geq T$
یکی از راهکارهای زیر به منظور به حداقل رساندن خطر انبساط انجام شود: هرگونه از سیمان پرتلند در استاندارد ASTM C150/C150M در ترکیب با پوزولان یا سرباره با نسبت‌های زیر: الف) برای خاکسترآبدی نوع F، بیش‌تر یا مساوی ۲۵٪ مطابق با الزامات ASTM C618 ب) برای خاکسترآبدی نوع C، بیش‌تر یا مساوی ۳۵٪ مطابق با الزامات ASTM C618 پ) بیش‌تر یا مساوی ۲۵٪ سرباره مطابق با الزامات ASTM C989/C989M ت) بیش‌تر یا مساوی ۵٪ دوده‌سیلیس (مطابق با الزامات ASTM C1240) در ترکیب با حداقل ۲۵٪ سرباره ث) بیش‌تر یا مساوی ۵٪ دوده‌سیلیس (مطابق با الزامات ASTM C1240) در ترکیب با حداقل ۲۰٪ خاکسترآبدی نوع F ج) بیش‌تر یا مساوی ۱۰٪ متاکائولن مطابق با الزامات ASTM C618 ۲- سیمان هیدرولیکی آمیخته در استاندارد ASTM C595/C595M یا ASTM C1157/C1157M با مقدار پوزولان یا سرباره مشابه که در مورد ۱ فهرست شده است.	$C^{\circ}85 \geq T > C^{\circ}70$
تحت هیچ شرایطی دمای داخلی بتن نباید به بیش از $85^{\circ}C$ برسد.	$C^{\circ}85 > T$

\*برگرفته شده از Ghorab و همکاران (۱۹۸۰)، Ramlochan و همکاران (۲۰۰۳)، Thomas (۲۰۰۱) و Thomas و همکاران (۲۰۰۸b).

### ۶-۲-۳. توصیه‌ها

برای به حداقل رساندن خطر کاهش دوام ناشی از واکنش‌های مضر ناشی از دمای زیاد در سنین اولیه مرتبط با تشکیل اترینگایت تأخیری، حداکثر دمای داخلی بتن باید به گونه‌ای کنترل شود که در هیچ زمانی از ۷۰ درجه سلسیوس تجاوز نکند. اگر رویارویی با دما در محدوده ۷۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس اجتناب‌ناپذیر است، اقدامات جدول ۶،۲،۲ باید اتخاذ گردند.

### ۶-۳. رویارویی با آب دریا و آب شور

#### ۶-۳-۱. وقوع

غلظت کل نمک‌های آب دریا متفاوت است. ولی، نسبت ترکیبات تشکیل دهنده نمک‌های آب دریا اساساً ثابت است. در برخی از آب‌های محصور در خشکی مانند دریاچه بزرگ نمک ایالات متحده<sup>۱۲۶</sup> و بحر المیت<sup>۱۲۷</sup> آب‌های شور غلیظتری وجود دارد<sup>۱۲۸</sup>. آب شور نیز به‌عنوان عاملی مهاجم برای بتن مسلح شناخته می‌شود. غلظت در مناطق سردتر و معتدل کمتر از دریا‌های گرم می‌باشد و به‌طور ویژه در مناطق کم‌عمق ساحلی با نرخ تبخیر زیاد، بیش‌تر است. غلظت نمک در دریا‌های محصور در خشکی نیز به میزان آب شیرین رودخانه‌هایی جاری که به داخل آن می‌ریزد، بستگی دارد (Hewlett, ۱۹۹۸).

در نقاطی که سازه‌های بتنی در مناطق ساحلی استحصال‌شده با شالوده‌هایی که زیر سطح آب‌های زیرزمینی شور قرار می‌گیرند، موئنگی و تبخیر ممکن است باعث فوق‌اشباع‌شدن و تبلور نمک‌ها در بتن در بالای سطح زمین گردد که در نتیجه موجب حمله سولفاتی شیمیایی و فیزیکی به بتن می‌گردد و همچنین سبب تشدید خوردگی فولاد مدفون در بتن ناشی از حضور یون‌های کلراید می‌شود. در سازه‌های بتنی که بخشی از آن‌ها در آب دریا غوطه‌ور می‌شوند، قسمت‌های بالای آب معمولاً بیش‌ترین تأثیر را از حمله سولفاتی، چه فیزیکی و چه شیمیایی، می‌گیرند، در حالی که بخش‌هایی که کاملاً غوطه‌ور هستند، اغلب آسیب کمتری را متحمل می‌شوند (Hewlett, ۱۹۹۸).

چنین اثرات مخرب توأمی، به ویژه در آب‌وهوای گرمسیری که درجه حرارت زیاد سرعت تخریب را افزایش می‌دهد، می‌توانند در طی چند سال باعث ایجاد آسیب شدید در بتن شوند. این بخش بر روی تأثیر سولفات‌ها در آب دریا تمرکز دارد. بخش ۷-۲ تأثیر یون‌های کلراید و منیزیم در آب دریا را شرح می‌دهد.

#### ۶-۳-۲. سازوکارها

واکنش بتن به اصطلاح بالغ با یون‌های سولفات در آب دریا مشابه واکنش یون‌های سولفات موجود در آب شیرین یا تراوش شده از خاک است، اما اثرات آن متفاوت است (Mather, ۱۹۶۶).

<sup>126</sup> Great Salt Lake

<sup>127</sup> Dead Sea

<sup>128</sup> توضیحات مترجم: دریاچه ارومیه از جمله این موارد است.

بتن در آب دریا اغلب سایش، سست شدن یا از دست دادن جرم در نتیجه حمله سولفاتی را در مقابل انبساط نشان می‌دهد که ممکن است در محیط‌های سولفاتی غیر شور نیز رخ دهد.

با وجود حضور یون‌های کلراید، گستره و ماهیت واکنش شیمیایی را تغییر می‌دهد، به طوری که در چنین شرایطی انبساط کمتری توسط سیمانی با یک مقدار مشخص  $C_3A$  (محاسبه شده توسط روابط بوگگ)، نسبت به آنچه که از همان سیمان در مواجهه با آب شیرین با مقدار سولفات مشابه انتظار می‌رود، تولید می‌شود. این امر را می‌توان تا حدی با توانایی یون‌های کلراید در برقراری پیوند با  $C_3A$  موجود در سیمان جهت تشکیل کلروآلومینات‌ها، مانند نمک فریدل ۱۲۹ مرتبط دانست (Verbeck, ۱۹۷۵). تشکیل کلروآلومینات‌ها منجر به انبساط نامطلوب نمی‌شود و همچنین مقدار  $C_3A$  موجود برای واکنش را کمتر می‌کند و آسیب ناشی از حمله سولفاتی را کاهش می‌دهد. امادر نواحی جزر و مدی و پاششی، غلظت یون‌های سولفات و کلرید در بتن تحت اثر موئینگی و تبخیر افزایش می‌یابد.

پیشنهاد شده است که منیزیم سولفات موجود در آب دریا در مرحله اول مسئول ایجاد واکنش‌های شیمیایی در بتن است. از آنجا که CH و کلسیم سولفات هر دو در آب دریا بیش‌تر از آب شیرین محلول هستند، به راحتی در اثر تراوش حذف می‌شوند، در حالیکه منیزیم سولفات، سنگ گچ، ژل سیلیس و منیزیم هیدروکسید را تشکیل می‌دهد (Hewlett, ۱۹۹۸). حمله سولفاتی در آب دریا همچنین می‌تواند منجر به کلسیم‌زدایی از C-S-H شود. تشکیل منیزیم هیدروکسید در منافذ بتن می‌تواند به‌عنوان سدی در برابر نفوذ یون‌های سولفات عمل نماید، اما این اثر در بتن نفوذپذیرتر، آنچنان محسوس نمی‌باشد (Hewlett, ۱۹۹۸؛ Santhanam و همکاران، ۲۰۰۶).

### ۶-۳-۳. توصیه‌هایی در خصوص آب دریا یا آب شور

نرخ خرابی به غلظت یون‌های مهاجم، مدت زمان رویارویی و نفوذپذیری و مقاومت شیمیایی بتن بستگی دارد. نفوذپذیری کم، نقش مهمی در جلوگیری از نفوذ یون‌های مهاجم در آب دریا یا آب شور دارد. همانند حمله معمول سولفاتی، نفوذپذیری مهم‌تر از ترکیب شیمیایی سیمان جهت جلوگیری از آسیب ناشی از رویارویی با آب دریا می‌باشد. انواع سیمان و  $w/cm$  توصیه شده برای رویارویی با آب دریا در جدول ۶-۱-۴-۱ ب تحت شرایط رویارویی SI ارائه شده است.

عملکرد بتن‌های ساخته شده در دریا با سیمان‌های ASTM C150/C150M و دارای مقدار  $C_3A$  به بزرگی تا ۱۰٪ که به‌طور مداوم در آب غوطه ور شده‌اند، مشروط بر اینکه نفوذپذیری بتن کم باشد، رضایت بخش بوده است (Browne, ۱۹۸۰). گروه مهندسان ارتش ایالات متحده و انجمن سیمان پرتلند ۱۳۰ مقدار  $C_3A$  محاسبه شده با استفاده از روابط بوگگ برای بتنی که به‌طور دائم در آب دریا غوطه‌ور است را چنانچه  $w/cm$  کمتر از ۰/۴۵ باشد را تا ۱۰٪ توصیه می‌کنند.

<sup>129</sup> Friedel's salt

<sup>130</sup> Portland Cement Association

CSA A23.1 / CSA A23.2 w/cm را تا ۰/۵۰ مجاز میداند و مقدار  $C_3A$  را حداکثر ۸٪ توصیه می‌کند. هرچند در سازه بتن مسلح در شرایط رویارویی با آب دریا، حداکثر w/cm به دلیل قرارگیری همزمان در معرض کلراید به ۰/۴۰ محدود می‌شود. علاوه بر این، مقدار کم  $C_3A$  مقاومت در برابر نفوذ کلراید را کاهش می‌دهد. بنابراین، CSA A23.1 / CSA A23.2 پیشنهاد می‌کند که مقدار  $C_3A$  سیمان پرتلند بین ۴ تا ۸ درصد نگهداشته شود تا با افزایش مقیدسازی یون‌های کلراید، از آرماتور مسلح‌کننده محافظت شود.

اما Verbeck (۱۹۶۸) و Regourd و همکاران (۱۹۸۰) نشان داده‌اند که ممکن است تفاوت قابل توجهی بین ترکیب فاز محاسباتی و اندازه‌گیری شده سیمان به‌ویژه در خصوص  $C_3A$  و  $C_4AF$  وجود داشته باشد. بنابراین، رابطه مرتبط بین مقدار اندازه‌گیری شده  $C_3A$  و مقاومت در برابر آب دریا ممکن است به همان اندازه، نامشخص باشد.

الزام به نفوذپذیری کم نه تنها برای به تأخیرانداختن اثرات حمله سولفاتی ضروری می‌باشد، بلکه برای ایجاد حفاظت کافی از آرماتورها با حداقل ضخامت پوشش بتن همانند توصیه ACI 357.1R جهت رویارویی با آب دریا، ضروری است. نفوذپذیری کم مورد نیاز در بتن با w/cm کم، وجود مواد مکمل سیمانی، با تراکم کافی و عمل‌آوری مناسب حاصل می‌شود. ACI 357.1R حداکثر w/cm را ۰/۴۵ برای ناحیه مستغرق و ۰/۴۰ برای ناحیه پاششی و جزر و مد توصیه می‌کند<sup>۱۳</sup>.

نفوذپذیری بتن ساخته شده با مقادیر مناسب سرباره یا پوزولان می‌تواند به اندازه یک دهم یا یک صدم بتنی با مقاومت برابر که تنها با سیمان پرتلند ساخته شده، باشد (Bakker، ۱۹۸۰). عملکرد رضایت بخش بتن‌های حاوی سرباره در یک محیط دریایی تشریح شده است (Lea، ۱۹۷۱؛ Vanden Bosch، ۱۹۸۰؛ Mather، ۱۹۸۱a).

بتن باید طوری طراحی و ساخته شود که عرض ترک را به حداقل برساند، بنابراین نفوذ کلراید را به آرماتور محدود می‌نماید و از تجمع سولفات‌ها جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، بتن در شرایط رویارویی کامل با آب دریا باید به مقاومت معادل حداقل ۳۵ مگاپاسکال در ۲۸ روز برسد.

<sup>۱۳</sup> توضیحات مترجم: در تجدید نظر دوم آئین نامه بتن ایران (آبا)، برای ناحیه پاششی و جزر و مد عدد ۰/۳۷ در نظر گرفته شده است.

# فصل ۷

## حمله شیمیایی

## ۱-۷. کلیات

بتن به ندرت مورد حمله مواد شیمیایی جامد قرار می‌گیرد. برای ایجاد یک حمله قابل توجه به بتن، مواد شیمیایی مهاجم باید در حالت محلول و بیش تر از حداقل غلظت آستانه باشند تا واکنش‌های شیمیایی که خواص مهندسی بتن را کاهش می‌دهند، انجام پذیرد. اگرچه بتن ممکن است در شرایط مختلف رویارویی که مواد شیمیایی مهاجم وجود دارد، عملکرد رضایت‌بخشی داشته باشد، اما حتی عمر بهره‌برادری بهترین بتن‌ها نیز در برخی از انواع محیط‌های شیمیایی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، مگر اینکه اقدامات خاصی انجام شود. درک این شرایط رویارویی، امکان اتخاذ تدابیری جهت جلوگیری یا کند کردن روند خرابی را فراهم می‌آورد. نفوذپذیری کمتر مانع از نفوذ مواد شیمیایی مهاجم می‌شود. خمیر با واکنش‌زایی کمتر می‌تواند در کاهش خرابی موثر باشد. اعضای بتنی در شرایط رویارویی با محلول‌های مهاجم که از یک سمت تحت فشار هیدرولیک می‌باشند، ممکن است آسیب‌پذیرتر باشند، چرا که اختلاف فشار هیدرولیکی می‌تواند نفوذ محلول مهاجم به بتن را تسریع نماید. این فصل در مورد شرایط رویارویی مواد شیمیایی مهاجم، از جمله: آب دریا، اسیدها، آب شیرین، کربناته‌شدن، مواد شیمیایی صنعتی، مواد شیمیایی یخ‌زدا و سازه‌های محیطی بحث می‌کند. برخی از خلاصه‌های مفید از اثرات بالقوه رویارویی با مواد شیمیایی عبارتند از: Lea (۱۹۷۱)، Biczok (۱۹۶۷)، Young و Scrivener (۱۹۹۷)، Hewlett (۱۹۹۸)، Eglinton (۱۹۹۸)، انجمن سیمان پرتلند (۲۰۰۱)، ACI 515.2R و ACI 350.1. جدول ۱-۷ الف خلاصه‌ای از اثرات مواد شیمیایی رایج‌تری که منجر به خرابی بتن می‌شوند را ارائه می‌دهد. جدول ۱-۷ ب عواملی که ممکن است بر سرعت حمله شیمیایی تأثیر بگذارد را خلاصه می‌کند.

جدول ۱-۷ الف تأثیر مواد شیمیایی رایج بر بتن\*

نرخ حمله در دما محیط	اسیدهای غیر آلی	اسیدهای آلی	مطوهای قلیایی	مطوهای نمکی	سایر
سریع	هیدروکلریک نیتریک سولفوریک	استیک فرمیک لاکتیک	-	آلومینوم کلراید	-
متوسط	فسفریک	تانیک	سدیم آهیدروکسید بیش تر از ۲۰٪	آمونیم نترات آمونیم سولفات سدیم سولفات منیزیم سولفات کلسیم سولفات	برم (گاز) نوشیدنی سولفیت
آهسته	کربنیک	-	سدیم آهیدروکسید ۱۰٪ تا ۲۰٪ سدیم هیپوکلریت	آمونیم کلراید منیزیم کلراید سدیم سیانید	کلر (گاز) آب دریا آب سبک
ناجیز -		اگزالیک تارتاریک	سدیم هیدروکسید کمتر از ۱۰٪ سدیم هیپوکلریت آمونیم هیدروکسید	کلسیم کلراید سدیم کلراید روی نترات سدیم کرومات	آمونیاک (مایع)

\* برای فهرست کامل‌تری از مواد شیمیایی و تأثیر بالقوه آنها بر بتن به انجمن سیمان پرتلند (۲۰۰۱) مراجعه شود.  
 † تأثیر پتاسیم هیدروکسید مشابه سدیم هیدروکسید است.

جدول ۷،۱) عوامل مؤثر بر حمله شیمیایی در بتن

عواملی که موجب تسریع یا تشدید حمله می شوند	عواملی که حمله را کاهش می دهند یا به تأخیر میاندازند
<p>۱- نفوذپذیری زیاد بر اثر: الف) جذب آب زیاد ب) w/cm زیاد پ) تراکم ضعیف ت) عمل آوری ضعیف ث) ریزترک و ترک خوردگی</p>	<p>۱- بتن های با نفوذپذیری کم* بر اثر: الف) نسبت های مناسب مخلوط<sup>۱</sup> ب) کاهش مقدار آب پ) افزایش مقدار مواد سیمانی ت) به کارگیری مناسب مواد مکمل سیمانی ث) هوازایی ج) تراکم کافی چ) عمل آوری مؤثر<sup>۲</sup></p>
<p>۲- ترک ها و جداسدگیها بر اثر: الف) بارگذاری / تمرکز تنش ب) تنش های حرارتی پ) جمع شدگی</p>	<p>۲- کاهش تنش کششی در بتن توسط:<sup>۳</sup> الف) استفاده از مسلح کننده های کششی با اندازه مناسب و قرارگیری صحیح ب) استفاده از پوزولان برای کاهش افزایش دما پ) تأمین درزهای انقطاع کافی ث) عمل آوری مؤثر</p>
<p>۳- تراوش و نفوذ مایع بر اثر: الف) مایع جاری<sup>۴</sup> ب) تجمع مایع پ) فشار هیدرولیکی</p>	<p>۳- طراحی سازه ای: الف) کاهش سطوح تماس و آشفته گی جریان ب) تأمین غشاهای و سامانه (های) مانع حفاظتی<sup>۵</sup> پ) تأمین زهکشی و جریان عبوری کافی</p>

\* عواملی که بر نفوذپذیری تأثیر می گذارند در فصل ۳ بیش تر مورد بحث قرار گرفته اند.  
<sup>۱</sup> نسبت های مخلوط و اختلاط اولیه و فرآوری بتن تازه، همگنی و چگالی آن را تعیین می کند.  
<sup>۲</sup> روش های ضعیف عمل آوری منجر به ایجاد نقایص و ترک ها می شوند.  
<sup>۳</sup> مقاومت در برابر ترک خوردگی به مقاومت و ظرفیت کرنشی بستگی دارد.  
<sup>۴</sup> حرکت آب حامل مواد مضر واکنش ها را افزایش داده که به هر دو عامل کمیت و سرعت جریان بستگی دارد.  
<sup>۵</sup> یبتهی که به طور مکرر با مواد شیمیایی که خرابی سریع در بتن ایجاد می کنند، رویارو می شود باید با یک سامانه مانع حفاظتی مقاوم در برابر مواد شیمیایی محافظت گردد.

## ۲-۷. آب دریا

### ۲-۷-۱. وقوع

آب دریا حاوی نمک های محلول است که به طور بالقوه برای بتن مهاجم به حساب می آیند. اجزای اصلی مواد شیمیایی با ترتیب تقریبی کاهش غلظت عبارتند از: کلراید، سدیم، سولفات، منیزیم، کلسیم و پتاسیم. غلظت کل نمک ها در آب دریا متفاوت است و در آب و هوای گرم تر معمولاً غلظت بیش تری دارند. در یک سازه بتنی مشخص، شدت رویارویی با آب دریا می تواند بسیار متفاوت باشد. به طور کلی، غوطه وری مداوم حالت رویارویی کمتهاجمتری می باشد. نواحی که جذب مؤثنه و تبخیر در آن ها متداول است، بیش ترین مهاجم را دارند. زیرا این فرآیندها موجب افزایش غلظت نمک می شوند. به عنوان نمونه هایی از چنین شرایط رویارویی، می توان از مناطق ساحلی استحصال شده با شالوده هایی زیر سطح آب های زیرزمینی شور، مناطق جزر و مدی و مناطق پاششی نام برد. این بخش عمدتاً بر تأثیر یون های کلراید و منیزیم در آب دریا تمرکز دارد. بخش ۶-۳ تأثیر سولفات ها در آب دریا را شرح می دهد.

## ۲-۲-۷. سازوکار واکنش‌ها

واکنش‌های شیمیایی که بر بتن در مواجهه با آب دریا تأثیر می‌گذارد، می‌تواند پیچیده باشد. مهمترین گونه‌های مهاجم شامل منیزیم، سولفات و کلراید است. یون‌های منیزیم ممکن است با کلسیم هیدروکسید (CH) واکنش دهند و منیزیم هیدروکسید یا بروسیت را تشکیل دهند (Lea, ۱۹۷۱). این فاز بسیار نامحلول است و ممکن است منافذ سطح بیرونی بتن را پر نماید که این امر می‌تواند منجر به کاهش نفوذپذیری و محدود نمودن نفوذ بیش‌تر آب‌های مهاجم شود. اما بروسیت همیشه در شرایط رویارویی با آب دریا مشاهده نمی‌گردد. منیزیم می‌تواند با هر هیدراتی که به‌طور معمول در بتن وجود دارد، از جمله کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H)، واکنش نشان دهد و فازهای منیزیم سیلیکات هیدراته (M-S-H) مانند هیدروتالسیت<sup>۱۳۲</sup>، تشکیل گردد. چنین فازهایی می‌توانند برای بتن مضر باشند، زیرا می‌توانند ظرفیت مقیدسازی خمیر سیمان را کاهش دهند. سولفات‌ها در آب دریا ممکن است منجر به تشکیل محصولات واکنش ثانویه مرتبط با حمله سولفاتی مانند اترینگایت، سنگ گچ و تومازیت شوند. کلرایدها ممکن است با فازهای کلسیم آلومینات واکنش دهند و فازهای کلروآلومینات مانند نمک کوزل<sup>۱۳۳</sup> و نمک فریدل را تشکیل دهند. حضور کلرایدها همچنین به دلیل استعدادی که در خوردگی فولاد مدفون دارند یک نگرانی مهم محسوب می‌شود.

Mather (۱۹۶۶) به این موضوع اشاره کرده است که واکنش بتن به اصطلاح بالغ با سولفات‌ها در آب دریا مشابه واکنش سولفات‌ها در آب شیرین یا در حالت تراوش شده از خاک است ولی اثرات متفاوت دارد. زیرا وجود یون‌های کلراید، گستره و ماهیت واکنش شیمیایی را تغییر می‌دهد. انبساط کمتری از سیمانی با مقدار مشخص  $C_3A$  نسبت به همان سیمان در شرایط غیردریایی که در آن آب دارای مقدار یون سولفات یکسان است اما غلظت کلراید قابل توجهی ندارد، انتظار می‌رود. بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند با مقدار زیاد  $C_3A$  تا ۱۰٪ و در شرایط غوطه‌وری مداوم در آب دریا، مشروط بر اینکه نفوذپذیری کمی داشته باشند، عملکرد رضایت بخشی نشان داده‌اند (Brown, ۱۹۸۰). USACE EM 1110-2-2000:1994 و انجمن سیمان پرتلند مقدار  $C_3A$  محاسبه شده برای بتن را، چنانچه نسبت وزنی  $w/cm$  برابر ۰/۴۵ بوده و بتن به‌طور دائم در آب دریا مستغرق باشد، ۱۰٪ توصیه می‌کنند. Verbeck (۱۹۶۸) و Regourd و همکاران (۱۹۸۰) نشان داده‌اند که ممکن است تفاوت قابل توجهی بین ترکیبات محاسباتی و اندازه‌گیری شده کلینکر سیمان، به‌ویژه در خصوص نسبت‌های  $C_3A$  و  $C_4AF$  وجود داشته باشد. بنابراین، رابطه مرتبط بین مقدار اندازه‌گیری شده  $C_3A$  و مقاومت در برابر آب دریا ممکن است نامشخص باشد. CSA A23.1-14/CSA A23.2 استفاده از سیمان‌هایی با ۴ تا ۸ درصد  $C_3A$  را توصیه می‌کند، مگر اینکه از سرپاره یا پوزولان استفاده شود<sup>۱۳۴</sup>.

<sup>132</sup> Hydrotalcite

<sup>133</sup> Kuzel's salt

<sup>134</sup> توضیحات مترجم: در تجدید نظر دوم آئین نامه بتن ایران (آبا)، محدوده ۶ تا ۱۰ درصد  $C_3A$  توصیه شده است.

### ۷-۲-۳. کاهش اثر

کاهش اثر مواجهه با آب دریا مستلزم استفاده از نسبت‌های مخلوطی که نفوذپذیری را کاهش دهد و تمایل به تشکیل ریزترک را به حداقل برساند، بهره‌گیری از طراحی‌های سازه‌ای که تعداد و عرض ترک‌ها را به حالت کمینه برساند، و در صورت امکان استفاده از پوشش‌هایی که حفاظت کاتدی را فراهم نماید یا نفوذپذیری را کاهش دهند، می‌باشد. نیاز به نفوذپذیری کم نه تنها برای به تأخیرانداختن اثرات حمله شیمیایی روی فازهای سیمانی در بتن لازم است، بلکه برای فراهم نمودن حفاظت کافی از آرماتور با حداقل ضخامت پوشش بتنی که توسط ACI 357.1R برای شرایط رویارویی با آب دریا توصیه شده، ضروری است. گام‌های دستیابی به بتن با نفوذپذیری کم با جزئیات بیش‌تر در فصل ۳ مورد بحث قرار گرفته است. عواملی مانند  $w/cm$ ، نوع مواد سیمانی، به کارگیری مناسب پوزولان‌ها و سرباره، دانه‌بندی سنگدانه‌ها، تراکم خوب و عمل‌آوری کافی برای دستیابی به عملکرد رضایت‌بخش مهم به‌شمار می‌روند.

استفاده از سرباره و دوده‌سیلیس ممکن است نفوذپذیری را کاهش دهد و عملکرد بتن را در یک محیط دریایی افزایش دهد (Lea, ۱۹۷۱؛ Fidjestøl و Frearson، ۱۹۹۴؛ Mather، ۱۹۸۱a؛ Vanden Bosch، ۱۹۸۰). نفوذپذیری بتن ساخته شده با مقادیر مناسب از سرباره یا پوزولان مطلوب را می‌توان در مقایسه با بتن با مقاومت برابر که تنها با سیمان پرتلند ساخته شده است، کاهش داد (Bakker، ۱۹۸۰). بتن‌های ساخته شده با ترکیب سیمان و دوده‌سیلیس و با ترکیب سیمان، سرباره و دوده‌سیلیس نیز دارای نفوذپذیری کمتر و عملکرد خوبی در مواجهه با آب دریا هستند.

بتن باید طوری طراحی و ساخته شود که طول، عرض و تعداد ترک‌ها را به حداقل برساند تا دسترسی آب دریا به آرماتور محدود گردد. به‌علاوه، بتن‌ها باید پیش از رویارویی با آب دریا، به مقاومت میدانی حداقل  $27/5$  مگاپاسکال برسند. سازه‌های دریایی اغلب دارای مقاطع ضخیم و مقادیر سیمانی نسبتاً زیادی هستند. ممکن است نیاز باشد که با چنین بتنی همانند بتن حجیم که در آن اثر گرمای هیدراته‌شدن در نظر گرفته می‌شود، رفتار گردد. در این صورت، توصیه‌های ACI 207.2R، ACI PRC-207.1 و ACI 224R اعمال می‌شود.

پوشش‌های رسانایی که در زمان ساخت به‌عنوان بخشی از سامانه حفاظت کاتدی اعمال می‌شود ممکن است حفاظت بیش‌تری را برای بتن در معرض آب‌های زیرزمینی شور ایجاد کند. پوشش‌هایی که تبخیر آب آزاد از داخل بتن را به میزان قابل توجهی محدود می‌کنند، می‌توانند مقاومت در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن را کاهش دهند.

### ۷-۳. حمله اسیدی

به‌طور کلی، بتن حاوی سیمان پرتلند مقاومت خوبی در برابر اسیدها ندارد. اگرچه بتن می‌تواند در برابر برخی اسیدهای ضعیف، به‌ویژه چنانچه رویارویی با آن‌ها هر از چندگاهی رخ دهد، دوام بیاورد.

## ۷-۳-۱. وقوع

محصولات حاصل از احتراق بسیاری از سوخت‌های فسیلی حاوی گازهایی هستند که می‌توانند با رطوبت ترکیب شده و اسید تشکیل دهند. فاضلابی که به اندازه کافی هوادهی نشده باشد، می‌تواند سولفوریک اسید تشکیل دهد (Flemming، ۱۹۹۵؛ Sydney و همکاران، ۱۹۹۶). اسیدها ممکن است در رواناب برخی از معادن و در بعضی از آب‌های صنعتی وجود داشته باشند. خاک‌های کود گیاهی، خاک‌های رسی و شیل‌های آلومی ممکن است شامل مواد معدنی حاوی سولفید مانند پیریت باشند که در اثر اکسیده شدن، سولفوریک اسید تولید می‌کنند. واکنش‌های بیش‌تر می‌تواند نمک‌های سولفاتی تولید نموده که ممکن است منجر به حمله سولفاتی شود (Hagerman و Roosaar، ۱۹۵۵؛ Bastiensen و همکاران، ۱۹۵۷؛ Moum و Rosenquist، ۱۹۵۹؛ Lossing، ۱۹۶۶). برخی از آب‌های معدنی ممکن است حاوی کربن دی‌اکسید و هیدروژن سولفید محلول با غلظت‌های زیاد باشند؛ چنین محلول‌هایی می‌توانند اسیدی باشند و برای بتن بسیار تهاجمی به حساب آیند (RILEM، ۱۹۶۲؛ Thornton، ۱۹۷۸). اسیدهای آلی ممکن است از سیلوهای مزرعه یا از تأسیسات تولید و فرآوری موادی مانند آبجوسازی، لبنیات، کارخانه‌های کنسروسازی و کارخانه‌های خمیر چوب حاصل گردند. خوراک دام و کودهای کشاورزی نیز ممکن است حاوی اسیدهایی باشد که سبب خوردگی بتن شود (De Belie و همکاران، ۱۹۹۶). این امر در مورد کف‌ها، حتی در جایی که یکپارچگی ساختاری مختل نگردد، می‌تواند نگران‌کننده باشد.

## ۷-۳-۲. سازوکار واکنش‌ها

خرابی بتن توسط اسیدها در مرحله اول حاصل تجزیه محصولات هیدراته شدن خمیر مواد سیمانی است. محصولات مختلف هیدراته شدن سیمان در مقادیر متفاوتی از pH شروع به تجزیه می‌کنند. پرتلندایت  $(Ca(OH)_2, CH)$  انحلال‌پذیرترین محصول هیدراته شدن می‌باشد. در دمای اتاق، پرتلندایت در pH کمتر از ۱۲/۴ و اترینگایت در pH زیر ۱۰/۴ تجزیه می‌شوند (Reardon و Warren، ۱۹۹۴) و C-S-H زمانی که pH به حدود ۱۰ کاهش می‌یابد، شروع به تجزیه می‌کند (Brown و Beaudoin، ۱۹۹۲). سنگدانه‌های ساخته شده از سنگ آهک و سنگ‌های دولومیتی مستعد حمله اسیدی هستند، در حالی که بیش‌تر سنگدانه‌های سیلیسی در برابر اسیدها مقاوم می‌باشند.

شدت تهاجمی بودن اسید به بتن به نوع آنیون، غلظت آن و درجه تفکیک آن در محلول بستگی دارد (Bajza و Zivica، ۲۰۰۱). برای یک pH معین، استیک اسید تهاجمی‌تر از نیتریک اسید می‌باشد (Shi و Stegemann، ۲۰۰۰؛ Shi، ۲۰۰۳؛ Bakharev و همکاران، ۲۰۰۳). اگرالیک اسید و فسفریک اسید تهاجم کمتری دارند و عمدتاً به این دلیل که با بتن واکنش می‌دهند و به ترتیب رسوبات کلسیم اگرالات و کلسیم فسفات را تشکیل می‌دهند. این رسوبات در آب نامحلول هستند و تمایل دارند که سطح بتن را پوشانند و از تخریب بیش‌تر محافظت کنند. رویارویی با سولفوریک اسید به دلیل pH کم آن، ممکن است منجر به خرابی سریع شود. به‌علاوه، این واکنش‌ها ممکن است کلسیم سولفات تولید کند که می‌تواند موجب حمله سولفاتی به بتن مجاور که تحت تأثیر حمله اسیدی اولیه قرار نگرفته، شود.

تجزیه C-S-H با حمله اسیدی معمولاً ژل سیلیس تولید می‌نماید که ظرفیت پیوند کمی دارد. محصولات تجزیه حاصل از کلسیم‌زدایی C-S-H اصلی، حلالیت کمی دارند و می‌توانند تا حدودی از خوردگی بیش‌تر محافظت نمایند (Shi و Stegeman، ۲۰۰۰؛ Shi، ۲۰۰۳). اگر C-S-H اصلی دارای نسبت کلسیم به سیلیس زیادی باشد، کلسیم بیش‌تری حل می‌شود و خوردگی بتن سریع‌تر رخ می‌دهد. Shi و Stegeman (۲۰۰۰) دریافتند که خمیر آهک- خاکستر بادی اگر چه متخلخلتر است، کندتر از خمیر سیمان پرتلند خورده می‌شود.

### ۷-۳-۲-۱. حمله کربنیک اسید

دی‌اکسید کربن می‌تواند در باران حل می‌شود و کربنیک اسید تشکیل دهد که می‌تواند پس از آن وارد زمین شود. تجزیه مواد آلی کربن دی‌اکسید را آزاد می‌کند که همچنین ممکن است کربنیک اسید را در آب‌های زیرزمینی نیز تشکیل دهد. غلظت کربنیک اسید در آب‌های زیرزمینی می‌تواند به اندازه‌های زیاد شود که به بتن حمله نماید. کلسیم کربنات در حضور کربنیک اسید حل می‌شود و یون‌های کلسیم ( $Ca^{2+}$ ) و بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ ) آزاد را تشکیل می‌دهد. بحث‌های مفصل در مورد تعادل کربنات در سامانه‌های طبیعی را می‌توان در جاهای دیگر یافت (Stumm و Morgan، ۱۹۹۵؛ Krauskopf و Bird، ۱۹۹۵؛ Butler، ۱۹۹۸). اگر قلیائیت خاک به اندازه کافی زیاد باشد، خاک، کربنیک اسید موجود در آب را خنثی یا بافر می‌نماید و از حمله کربنیک اسید به بتن جلوگیری می‌کند. اگر اسید خنثی نشود، می‌تواند به درجات مختلف، از ملایم تا قابلیت‌وجه، به بتن حمله کند. این نوع حمله در ادبیات به عنوان  $CO_2$  مهاجم نامیده شده، در حالی که در واقع، حمله از جانب  $CO_2$  نیست و حمله از سوی کربنیک اسید می‌باشد. معیارهای آزمایشی مربوط به حمله کربنیک اسید از عبارت « $CO_2$  مهاجم» (که به صورت میلی‌گرم  $CO_2$  در لیتر گزارش می‌شود) برای آنچه که در واقع کربنیک اسید در غلظت کافی برای حمله به بتن بود، استفاده کرده‌اند. بحث‌های خوبی در مورد این موضوع را می‌توان در Lea (۱۹۷۱) و Hewlett (۱۹۹۸) یافت.

آب‌هایی که غلظت‌های بالقوه مضر کربنیک اسید دارند، دارای عدد pH از تقریباً خنثی تا کمی اسیدی هستند. از آنجایی که روند حمله، به هر دو ویژگی کیفیت بتن و غلظت کربنیک اسید بستگی دارد، نه عدد pH و نه مقدار  $CO_2$  آزاد در آب شاخص قابل اعتمادی برای درجه آسیب احتمالی نیستند. علاوه بر این، در مورد مقادیر محدود عدد pH یا غلظت  $CO_2$  در آب اتفاق نظر وجود ندارد، که این امر تا حدی به دلیل شرایط بسیار متفاوت در ساخت‌وسازهای زیرزمینی است. مطالعات نشان داده‌اند که آب حاوی بیش از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربنیک اسید می‌تواند منجر به کربناته‌شدن سریع و حمله به خمیر سیمان هیدراته‌شده گردد. با این حال، آب‌هایی که آزادانه حرکت می‌کنند با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر یا کمتر کربنیک اسید نیز می‌تواند منجر به کربناته‌شدن قابل توجهی شود (Terzaghi، ۱۹۴۸، ۱۹۴۹؛ Hewlett، ۱۹۹۸). DIN ۴۰۳۰ معیارها و روش آزمایشی برای ارزیابی استعداد آسیب‌پذیری ناشی از آب حاوی کربنیک اسید را ارائه نموده است.

### ۷-۳-۳. کاهش اثر

استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیس باعث کاهش مقدار CH و افزایش مقاومت بتن در برابر اسیدها می‌شود (Nilson و Sellevold، ۱۹۸۷). با این حال، در تمامی موارد و در صورت امکان، مدت رویارویی با اسیدها باید به حداقل برسد و در صورت امکان از غوطه‌ور شدن بتن خودداری شود. هیچ بتن حاوی سیمان هیدرولیکی، صرف نظر از ترکیب آن، برای مدت طولانی در برابر آب بسیار اسیدی (pH ۳ یا کمتر) مقاومت نمی‌کند. چنین مواردی معمولاً مستلزم استفاده از یک سامانه حفاظتی مناسب است.

### ۷-۴. آب شیرین

آب شیرین به محلول‌های آبی با pH تقریباً خنثی، قدرت یونی بسیار کم و مقدار جامدات محلول کم اطلاق می‌شود.

### ۷-۴-۱. وقوع

آب‌های شیرین شامل آب باران، آب موجود در اکثر نهرها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها؛ و آب شهری کلرو فلوئور زده شده، می‌باشد. آب‌های شیرین همچنین می‌توانند در تأسیسات صنعتی، تولیدی و سایر تأسیسات که در آن آب‌های مقطر تولید یا در فرآیندهای مختلف استفاده می‌گردد، وجود داشته باشد. رعد و برق در طبیعت، مقادیر کم نیترو، نیتریک، سولفور و سولفوریک اسیدها را در آب‌های طبیعی تولید می‌کند که می‌تواند موجب تخریب سطحی بتن شود. این امر به‌ویژه در نواحی که مکرراً در معرض رعد و برق هستند، رخ می‌دهد. برخی از آب‌های شیرین ممکن است به دلیل رویارویی با باران اسیدی تا حدودی اسیدی شوند یا ممکن است حاوی غلظت‌های کمی از سولفات‌ها، نترات‌ها و سایر نمک‌ها باشند که در غلظت‌های زیادتر می‌توانند به بتن حمله کنند. در هر حال، حمله شیمیایی قابل توجه توسط آب شیرین عملاً گزارش نشده است. ساخته شدن بزرگراه‌ها، آبروها، لوله‌ها و ساختمان‌ها با انتظار کامل از عملکرد این سازه‌ها به نحوی که در چنین شرایط رویارویی در طول بهره‌برداری چندان تحت تأثیر قرار نخواهند گرفت، شاهدی بر عدم خرابی قابل توجه بتن توسط آب شیرین می‌باشد.

### ۷-۴-۲. سازوکارهای واکنش

آب‌های بسیار خالص تهاجمی هستند. زیرا این آب‌ها در مقابله با اجزای CH، C-S-H و کلسیم کربنات موجود در خمیر سیمان اشباع‌نشده می‌باشند. بطور کلی، سازوکارهای واکنش مرتبط با شرایط رویارویی با آب شیرین مشابه سازوکارهای حمله اسیدی است؛ زیرا حمله شامل انحلال ترجیحی<sup>۱۳۵</sup> یا نشت هیدرات‌های محلول سیمان می‌شود. در نتیجه ممکن است دوباره جایگزین شدن مداوم آب شیرین خرابی را تسریع نماید و نیز امکان اینکه آب جاری تهاجمی باشد، وجود دارد. ریزش آب از مواردی همانند ناودان‌ها و راه‌آب‌ها نیز با توجه به اینکه یک جزء فیزیکی یا فرسایشی در حمله دخیل خواهد بود، ممکن است بسیار تهاجمی به حساب آید.

بتن تازه ریخته شده بسیار قلیایی است و سطوح آن ممکن است در رویارویی با آب شیرین تحت تأثیر قرار گیرد. بسیاری از سطوح، هنگامی که در معرض هوا قرار می‌گیرند به راحتی کربناته می‌شوند، اما این امر آن‌ها را تا حد زیادی پایدار می‌نماید. متأسفانه، بسیاری از گزارش‌های موجود در نشریات در خصوص مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتن تازه در شرایط رویارویی با مواد شیمیایی، پیش از آنکه بطور قابل توجهی کربناته شوند، می‌باشد. چنین مطالعاتی برای بتن در کارگاه، اغلب کاربردی محسوب نمی‌شود. برخی از آب‌های شیرین که از کربنات‌ها اشباع نشده‌اند ممکن است به بتن کربناته شده حمله کنند. حتی پس از چندین دهه رویارویی با چنین شرایطی، خرابی بتن کربناته معمولاً بسیار کند می‌باشد.

#### ۷-۴-۳. کاهش اثر

راهبردهای کمینه‌نمودن اثرات رویارویی با آب شیرین شامل به حداقل رساندن نفوذپذیری و کاهش مقدار پرتلندایت<sup>۱۳۶</sup> خمیر سیمان است. ملاحظات طراحی که زهکشی کافی، محدودیت دوباره جایگزین شدن و حفاظت در برابر ریزش آب را فراهم می‌کند، نیز مهم هستند.

#### ۷-۵. کربناته‌شدن

کربناته‌شدن زمانی اتفاق می‌افتد که ترکیبات سیمانی هیدراته با کربن دی‌اکسید اتمسفر یا یون‌های کربنات موجود در محلول واکنش دهند. ساختار منافذ بتن تا حد زیادی تعیین‌کننده میزان و عمقی است که کربناته‌شدن در آن رخ می‌دهد (Bier, 1987). کربناته‌شدن از سطح در معرض قرار گرفته بتن آغاز می‌گردد تا یک لایه بیرونی از ترکیبات حاوی کربنات را تشکیل شود و در نتیجه تخریب سطح کاهش می‌یابد (Parrott, 1987). کاهش تخریب مستقیماً با تبدیل CH به کلسیم کربنات مرتبط است، بنابراین منجر به افزایش ۱۱ درصدی حجم جامد در مقایسه با حجم اولیه CH در لایه بالایی می‌شود (Bier, 1987). عمل آوری مرطوب طولانی‌مدت می‌تواند منجر به تأخیر در کربناته‌شدن گردد (Parrott, 1987). کربناته‌شدن بسته به سن بتن و محیط می‌تواند مفید یا مضر باشد. اگرچه کربناته‌شدن می‌تواند سبب بهبود مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری گردد، اما نرخ خوردگی آرماتورهای فولادی را نیز می‌تواند افزایش دهد.

#### ۷-۵-۱. وقوع

##### ۷-۵-۱-۱. کربناته‌شدن بتن تازه

کربناته‌شدن بتن تازه معمولاً با رویارویی کربن دی‌اکسید اتمسفر در جریان فرآیند سخت شدن رخ می‌دهد. همچنین استفاده از بخاری‌های بدون دودکش یا دود خروجی تجهیزات ممکن است منجر به کربناته‌شدن شود. نتیجه این امر می‌تواند ترک خوردگی سطحی زیاد یا تشکیل مواد باقی‌مانده پودری سست بر روی سطح، باشد. کربناته‌شدن شدید پیش از گیرش نهایی می‌تواند موجب ایجاد سطحی با مقاومت کمتر در برابر سایش شود.

<sup>۱۳۶</sup> توضیحات مترجم: این امر با مصرف پوزولانها ممکن می‌شود.

### ۷-۱-۵-۲. کربناته شدن بتن در سنین اولیه

بتن به اصطلاح نابالغ نسبت به بتن بالغ در برابر کربناته شدن آسیب پذیرتر می باشد؛ زیرا ساختار آن به اندازه کافی هیدراته نشده که بتواند نفوذپذیری را محدود نماید. بنابراین کربناته شدن در سنین اولیه یک عضو بتنی با سرعت بیشتری پیشرفت می کند. در ابتدا، CH با کربن دی اکسید واکنش و کلسیم کربنات تشکیل می دهد؛ تتراکلسیم آلومینات هیدراته با کربن دی اکسید واکنش می دهد و مونوکربوآلومینات هیدراته تشکیل می شود (Bier و همکاران، ۱۹۸۷).

### ۷-۱-۵-۳. کربناته شدن بتن بالغ

بتن در سنین زیاد تا حدی کربناته می شود. کربناته شدن بتن در سطوح نمایان رخ می دهد. با این حال، بتن نفوذپذیرتر، درشت تر، با منافذ باز پس از پرداخت و در برخی محیطها، می تواند سرعت و عمق کربناته شدن بیشتری داشته باشد. تداوم کربناته شدن می تواند عدد pH خمیره سیمانی را کاهش دهد که منجر به افزایش نرخ خوردگی آرماتور می شود. برای بحث دقیق در مورد خوردگی به ACI 222R مراجعه گردد.

### ۷-۵-۲. سازوکارهای واکنش

#### ۷-۲-۵-۱. کربناته شدن اتمسفری

بطور کلی، واکنش سیمان پرتلند هیدراته با کربن دی اکسید موجود در اتمسفر عموماً کند است. این نرخ به رطوبت نسبی محیط، دما، نفوذپذیری بتن و غلظت  $CO_2$ ، وابستگی زیادی دارد. با ثابت نگه داشتن سایر عوامل، هنگامی که رطوبت نسبی بتن بین ۵۰ تا ۷۵ درصد باشد، کربناته شدن سریع تر اتفاق می افتد. در شرایط رطوبت نسبی زیر ۲۵ درصد، درجه کربناته شدن ناچیز است و در رطوبت نسبی بیشتر از ۷۵ درصد، رطوبت موجود در حفرات، نفوذ  $CO_2$  را محدود می نماید (Verbeck، ۱۹۵۸).

#### ۷-۲-۵-۲. کربناته شدن توسط ترکیبات کربنی موجود در آب

کربناته شدن همچنین می تواند در شرایط رویارویی بتن با آب حاوی غلظت کافی از یونهای کربنات یا بی کربنات رخ دهد. ترکیبات کربنی در بیشتر آبها یافت می شوند. زمانیکه کربن دی اکسید موجود در هوا در باران حل می شود، یا هنگامی که مواد آلی در خاک تجزیه می گردند و یا در مواقعی که برخی مواد معدنی حاوی کربناتها هوازده می شوند، ترکیبات کربنی وارد آب می گردند. معمولاً یونهای کربنات ( $CO_3^{2-}$ ) و بی کربنات ( $HCO_3^-$ ) فراوانترین ترکیبات کربنی موجود در آبهای طبیعی می باشند. مباحث با جزئیات بیشتر در مورد تعادل کربنات در سامانههای طبیعی را می توان در Morgan و Stumm (۱۹۹۵)، Krauskopf و Bird (۱۹۹۵) و Butler (۱۹۹۸) یافت.

### ۷-۲-۲-۵-۱. قلیائیت آب (بافر قلیائیت کربناتی)

قلیائیت کربناتی می‌تواند نقش مهمی در طول عمر بهره‌برداری بتن ایفا نماید. بطور کلی، زمانی که قلیائیت کربنات، که غلظتی از یون‌های کربنات و بی‌کربنات است، برای خشتی یا بافر کردن جزء اسیدی آب کافی باشد، ممکن است از حمله اسیدی و تراوش آن جلوگیری شود. حمله ناشی از تراوش هنگامی رخ می‌دهد که آب به‌طور مداوم دارای قلیائیت کربناتی کم باشد و موجب انحلال انتخابی ترکیبات کربنات‌دار سیمان گردد. این حمله ناشی از تراوش، که در ادبیات گذشته به عنوان حمله تهاجمی  $CO_2$  از آن یاد می‌شد (Bic-zok؛ ۱۹۶۷؛ Lea؛ ۱۹۷۱؛ Ibrahim؛ ۱۹۹۷)، بهتر است «حمله قلیائیت کربناتی کم» نامیده شود. در جایی که حمله  $CO_2$  آزاد یا کربنیک اسید در محلول، مربوط به حمله اسیدی باشد که بتن را از سطح به داخل حل می‌کند (بخش ۴-۳)، حمله قلیائیت کربناتی کم مربوط به حمله ناشی از تراوش از داخل بتن است. به عبارت ساده‌تر، قلیائیت کربناتی کم، عدم تعادل در آب به دلیل کمبود قلیائیت کربنات مورد نیاز برای خشتی یا بافر کردن اجزای اسیدی است، و حمله قلیائیت کربناتی کم یا به اصطلاح حمله تهاجمی  $CO_2$ ، تراوش ترکیبات سیمانی کربنات‌دار تا زمانیکه یک تعادل مجدد برقرار گردد، می‌باشد. این راهنما به جزئیات این شیمی پیچیده نمی‌پردازد، بلکه اهمیت قلیائیت کربنات را در بیشتر محیط‌های بتن‌ریزی که آب در تماس مستقیم با بتن است، شرح می‌دهد. مباحثی در خصوص سامانه بافر قلیایی کربنات در بتن در Lea (۱۹۷۱)، Biczok (۱۹۶۷) و Hewlett (۱۹۹۸) یافت می‌شود.

### ۷-۶. مواد شیمیایی صنعتی

مواد شیمیایی صنعتی بسته به نوع یا دسته‌بندی ماده شیمیایی، غلظت آن، مدت زمان رویارویی و برهم‌کنش با اجزای موجود در بتن، می‌توانند به روش‌های مختلف به بتن حمله کنند. فرآیندهای صنعتی معمولاً منجر به شرایط رویارویی از حالت تصادفی تا دائمی و پیوسته می‌شوند و حتی در مواقعی که عوامل فرآیند صنعتی همچون دماهای زیاد، رطوبت زیاد و لرزش تجهیزات شرایط را تشدید می‌کنند، موجب حالت شدید رویارویی می‌گردند.

### ۷-۶-۱. وقوع

مواد شیمیایی صنعتی ممکن است شامل اسیدها، بازها، قلیایی‌ها، مواد خورنده، اکسیدکننده‌ها، مواد قابل احتراق، مواد قابل اشتعال، مواد منفجره، مواد برودتی و سایر شرایط خاص فرآیند یا ترکیبی از این شرایط باشند. برای خلاصه‌ای از اثرات بسیاری از مواد شیمیایی صنعتی بر بتن، به PCA (۲۰۰۱) و ACI 515.2R مراجعه شود. بتن در محیط‌های صنعتی ممکن است در شرایط رویارویی مستقیم یا غیرمستقیم با مواد شیمیایی باشد و یا شرایط رویارویی مرتبط با سایش و فرسایش را تجربه نماید. رویارویی مستقیم در سازه‌هایی همانند سازه‌های خنک‌کننده آب و سازه‌های حفاظتی اولیه، رخ می‌دهد. سایش و فرسایش باید در سازه‌هایی که در معرض مایعات متحرک هستند، در نظر گرفته شود. شالوده‌ها، تجهیزات تکیه‌گاه‌ها و قاب‌های سازه‌ای ممکن است با مواد شیمیایی تماس مستقیم داشته باشند، اما عمدتاً در معرض رویارویی غیرمستقیم با مواد شیمیایی هستند.

رویاری غیرمستقیم، مواجهه با دودها یا بخارها و رسوب‌های این منابع را شامل می‌شود. مواد شیمیایی بی‌آب ممکن است در حالت خالص خود برای بتن، مهاجم یا غیرمهاجم محسوب شوند، ولی در صورت رویاری با رطوبت، مانند رطوبت موجود در هوا، می‌توانند مهاجم گردند. این ترکیبات ممکن است در اثر تماس با رطوبت به حالت مایع تبدیل گردند و سپس به بتن اطراف نفوذ نمایند.

### ۶-۲. سازوکارهای واکنش

از آنجایی که مواد شیمیایی صنعتی طیف وسیعی از حالت بسیار قلیایی تا بسیار اسیدی را شامل می‌شوند، شرح جزئیات درباره سازوکارهای واکنش‌های بالقوه، خارج از محدوده این راهنما است. Biczok (۱۹۶۷) در خصوص طیف وسیعی از این مواد شیمیایی اطلاعات پشتیبان مفیدی را ارائه می‌دهد. محلول‌های قلیایی دارای pH بیشتر از ۷ هستند. از آنجایی که بتن به خودی خود بسیار قلیایی است، برهمکنش مواد شیمیایی قلیایی حاصل از فرآیندهای صنعتی ممکن است مستقیماً بر دوام بتن تأثیر نگذارد، مگر اینکه جزء یا مشخصه‌ای در ساختار بتن وجود داشته باشد که با ماده شیمیایی نفوذی واکنش نشان دهد. به عنوان مثال می‌توان به اثر خوردنده محلول‌های نمک بر فولاد مسلح کننده در بتن اشاره نمود. شستشو با محلول‌های خنثی‌تر می‌تواند تخلخل بتن را افزایش داده و آن را در برابر خرابی‌های ناشی از یخ‌زدن و آبدن، فروریختن و حمله بیشتر، آسیب‌پذیرتر نماید. تجمع رسوب‌ها می‌تواند فضاهای حباب هوا را مسدود کند و بتن را مستعدتر برای آسیب ناشی از یخ‌زدن و آبدن و فروریختن کند. اسیدها و مواد خوردنده به عمق قابل توجهی از بتن نفوذ نمی‌کنند، اما در تماس با سطح بتن از طریق سازوکارهای شرح داده شده در ۶-۳ واکنش نشان می‌دهند.

### ۶-۳. کاهش اثر

تمامی عواملی که برای ایجاد بتن بادوام بکار برده می‌شوند، در خصوص دوام در برابر حملات شیمیایی نیز صدق می‌کند. با بکارگیری مواد مکمل سیمانی (SCMs) در طراحی مخلوط همراه با عمل‌آوری مناسب می‌توان نفوذپذیری بتن را کاهش داد. حفاظت فولاد مسلح کننده را می‌توان با روش‌های مختلفی از جمله آب‌بندی بتن، حذف هرگونه آلودگی سطحی از آرماتور، بهبود پیوند بین آرماتور و خمیر، استفاده از آرماتور با پوشش اپوکسی و افزایش حداقل پوشش روی آرماتور، بدست آورد. هنگام افزایش پوشش روی آرماتور، معمار یا مهندس باید در نظر داشته باشد که عرض ترک احتمالاً افزایش خواهد یافت. فصل ۳ این موضوعات را به تفصیل مورد بحث قرار می‌دهد.

برای مهندس طراح و پیمانکار، گزینه‌های دیگری نیز وجود دارد که دوام بتن را افزایش می‌دهد. درز پرکنها، درزگیرهای آییند، نوارهای آییند و درزبندهای سطحی مقاوم و سازگار در برابر مواد شیمیایی که انتظار رویاری سازه با آنها وجود دارد، باید مشخص گردند. همه موارد باید با رعایت کامل توصیه‌های تولیدکننده، نصب یا اعمال شود. عمل‌آوری مرطوب روشی توصیه شده جهت دستیابی به بادوام‌ترین بتن است.

در صورت استفاده از مواد عمل‌آوری<sup>۱۳۷</sup>، باید با درزبند یا پوشش سطحی که اعمال شده، سازگار باشند. استفاده از بتن جبران‌کننده جمع‌شدگی<sup>۱۳۸</sup> مطابق با ACI PRC-223 می‌تواند دوام را به ویژه در محیط‌های شیمیایی بهبود بخشد. از آنجایی که بتن جبران‌کننده جمع‌شدگی، ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی و تعداد درزهای انقباض را به حداقل می‌رساند، مسیرهای نشت بالقوه در یک محیط صنعتی را کاهش می‌دهد.

## ۷-۷. مواد شیمیایی یخ‌زدا و ضد یخ

استفاده از مواد شیمیایی یخ‌زدا سابقه طولانی در کمک به حفظ شرایط ایمن رانندگی در زمستان دارد. این اقدام بصورت کلی شامل دو استراتژی مختلف است: یخ‌زدایی و استفاده از مواد ضد یخ. یخ‌زدایی به حذف یخ پس از تجمع در روسازی اشاره دارد، در حالی که مواد ضد یخ به استفاده قبلی از مواد شیمیایی برای پیشگیری از چسبیدن یخ به روسازی اشاره می‌نماید. از نظر تاریخی، اکثر مشکلات دوام مربوط به یخ‌زداها بیشتر از آنکه به حمله شیمیایی مرتبط باشند، ناشی از فرآیندهای فیزیکی است که پوسته‌شدن را تشدید می‌کنند. ولی ممکن است یخ‌زداها با خرابی‌های قابل توجه ناشی از سازوکارهای مختلف حمله شیمیایی همراه باشند.

### ۷-۷-۱. وقوع

یخ‌زداها به دو گروه با پایه کلرایدی و غیر کلرایدی تقسیم می‌شوند. محلول‌های پایه کلرایدی در طول تاریخ کاربرد گسترده‌تری داشته‌اند. آن‌ها عبارتند از سدیم کلراید (NaCl)، کلسیم کلراید (CaCl<sub>2</sub>)، منیزیم کلراید (MgCl<sub>2</sub>) و بسیاری از محصولات تجاری موجود که ترکیبی از این نمک‌ها را تشکیل می‌دهند. برخی از یخ‌زداهای پایه کلرایدی ممکن است حاوی درصدی قابل توجهی از سایر مواد شیمیایی باشند. ترکیبات سایر محصولات شامل محصولات کشاورزی با پایه MgCl<sub>2</sub> است. از سال ۲۰۰۰، استفاده از یخ‌زداهای MgCl<sub>2</sub> به ویژه در غرب ایالات متحده افزایش چشمگیری داشته است. این رشد تا حدی به این دلیل بوده‌است که MgCl<sub>2</sub> در دماهای کمتر در مقایسه با NaCl و CaCl<sub>2</sub> مؤثر می‌باشد.

معرفی یخ‌زداهای غیر کلرایدی ناشی از نگرانی‌های مربوط به خوردگی فولاد مسلح‌کننده و اثرات زیست‌محیطی بر روی پوشش‌های گیاهی است و همچنین به این دلیل که این دسته از یخ‌زداها در دماهای کمتر نسبت به یخ‌زداهای پایه کلرایدی مؤثر می‌باشند. عمده یخ‌زداهای غیر کلرایدی شامل کلسیم-منیزیم استات، اوره، گلیکول‌های متشکل از اتیلن، پروپیلن و دی اتیلن گلیکول، و قلیایی استات‌ها و قلیایی فرمات‌ها هستند. یخ‌زداهای کلسیم-منیزیم استات در اواخر دهه ۱۹۷۰ معرفی گشته‌اند. با توجه به کاهش هزینه‌های تولید، استفاده از آن‌ها گسترده‌تر شده است.

به‌طور سنتی، اوره برای روسازی فرودگاه‌ها استفاده می‌شد، اما اکنون به دلیل ایجاد نگرانی‌های زیست‌محیطی، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

<sup>137</sup> Curing agents

<sup>138</sup> Shrinkage-compensating concrete

گلیکول‌های با پایه اتیلن و پروپیلن عمدتاً برای یخزدایی و بعنوان ضدیخ هواپیما به نحو گسترده‌ای استفاده می‌شوند. آن‌ها همچنین گاه در ترکیب با اوره، برای تعمیر و نگهداری روسازی‌های فرودگاه استفاده می‌گردند. نسل جدیدی از یخزداها و ضدیخ‌ها با قلیایی استات و قلیایی فرمات در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ برای جایگزینی اوره در یخزدایی روسازی‌های فرودگاه و برای کاهش نگرانی‌های مرتبط با سمی بودن اتیلن گلیکول پدیدار شدند. این یخزداها و مواد ضدیخ شامل پتاسیم استات، سدیم استات، پتاسیم فرمات و سدیم فرمات هستند و کاربردهای فراوانی دارند.

### ۷-۲-۲. سازوکارهای واکنش

سازوکارهای واکنش مرتبط با مواد شیمیایی یخزدا پیچیده هستند و حوزه فعالی از تحقیقات در حال انجام را تشکیل می‌دهند. اگرچه در ابتدا به عنوان موادی بیخطر برای بتن در نظر گرفته می‌شد، اما اکنون مشخص شده است که NaCl باعث ایجاد واکنش‌هایی می‌شود که می‌تواند منجر به انحلال پرتلندایت گردد. انحلال پرتلندایت ممکن است تداخل بتن را افزایش و pH مایع منفذی را کاهش دهد که می‌تواند پایداری فاز C-S-H را برهم زند. یخزداهای پایه کلرایدی ممکن است منجر به تشکیل فازهای کلسیم کلروآلومینات پیچیده همچون نمک فریدل گردند. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که  $\text{CaCl}_2$  برای بتن مهاجم محسوب می‌شود (Collepari و همکاران، ۱۹۹۴). در میان سازوکارهای دیگر، یخزداهای  $\text{CaCl}_2$  منجر به واکنش‌هایی می‌گردند که ممکن است فازهای کلسیم اکسی کلراید هیدراته را تشکیل دهند (Brown و Bothe، ۲۰۰۴). ایجاد فشارهای هیدرولیکی ناشی از این واکنش‌ها ممکن است برای خمیر سیمان مخرب باشد. کلرایدها همچنین ممکن است ASR را تحت برخی شرایط تسریع نمایند (Chatterji و همکاران، ۱۹۸۶). یخزداهای  $\text{MgCl}_2$  با تشکیل بروسیت که آسیب‌رسان نباشد، و فازهای منیزیم سیلیکات هیدراته (M-S-H) که با مصرف C-S-H تشکیل می‌گردند، مرتبط می‌باشند. تشکیل M-S-H که خاصیت سیمانی ندارد، می‌تواند با ایجاد ترک خوردگی، لایه لایه شدن و در نهایت از هم‌پاشیدگی، خرابی قابل توجهی در روسازی ایجاد کند. اکسی کلرایدهای مخرب نیز در ملات‌های در معرض  $\text{MgCl}_2$  یافت شده‌اند (Julio و Betancourt، ۲۰۰۵؛ Sutter و همکاران، ۲۰۰۶).

کلسیم-منیزیم استات ممکن است در میان یکی از مهاجم‌ترین یخزداها از نظر حمله شیمیایی باشد. برخی از مؤلفین (Peterson، ۱۹۹۵؛ Santagata و Collepari، ۲۰۰۰) گزارش می‌دهند که رویارویی با محلول‌های یخزدای کلسیم-منیزیم استات به‌طور قابل توجهی خمیره سیمان را تخریب می‌کند و منجر به از دست دادن جرم و مقاومت فشاری می‌شود. سازوکارهای واکنش مشابه سازوکارهای یخزداهای  $\text{MgCl}_2$  است؛ انحلال و تراوش پرتلندایت، ناپایداری C-S-H و تشکیل M-S-H و رسوب بروسیت و کلسیت. یخزداهای کلسیم-منیزیم استات با پوسته شدن، ترک خوردگی و از دست دادن جرم و مقاومت فشاری مرتبط می‌باشند. فرسودگی زود هنگام برخی از روسازی‌های بتنی فرودگاه‌های در معرض یخزداهای قلیایی استات و سدیم فرمات باعث ایجاد نگرانی شده است. تحقیقاتی جهت بررسی ارتباط بالقوه میان استفاده از این یخزداها

و دوام بتن در حال انجام می‌باشد. Rangaraju و همکاران (۲۰۰۵) پیشنهاد نموده‌اند که یخزدهای قلیایی استات و قلیایی فرمات می‌توانند موجب ایجاد انبساط آسیرسان ناشی از ASR در نمونه‌های آزمایش گردند. یخزدهای شیمیایی ممکن است در خرابی نسبتاً سریع درزها در روسازی‌ها و سطوح مسطح بیرونی نیز نقش داشته باشند. خرابی به صورت ترک خوردگی و پوسته شدن موازی با درزها ظاهر می‌گردد که ممکن است در تقاطع درزها و در مسیر چرخ‌ها بیشترین شدت را داشته باشد. در برخی ایالت‌های شمال ایالات متحده، خرابی زود هنگام در درزهای روسازی مشاهده شده است (Taylor و همکاران، ۲۰۱۲). ارتباط میان یخزدهای شیمیایی و خرابی سریع درزها، موضوعی در تحقیقات کنونی بوده و سازوکارهای مختلفی برای توضیح این خرابی‌ها ارائه شده است. علاوه بر کاهش نقطه یخ‌زدن آب، مواد شیمیایی یخ‌زدا و ضد یخ سبب ایجاد تغییرات اساسی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول‌هایی که درزها را پر می‌کنند، همانند گرانروی، کشش سطحی و جذب آن‌ها می‌گردند (Spragg و همکاران، ۲۰۱۱؛ Villani و همکاران، ۲۰۱۴b). این تغییرات منجر به درجه اشباع بیشتر و افزایش قابل توجهی در تناوب ایجاد ترک خوردگی و ریز ترک خوردگی تحت شرایط معین چرخه دمایی می‌شوند (Villani و همکاران، ۲۰۱۴b؛ Farnam و همکاران، ۲۰۱۴). در شرایط رویارویی با غلظت‌های زیاد از مواد شیمیایی یخ‌زدا، حفره‌های هوای بتن با رسوبات ثانویه نظیر اترینگایت، پرتلندایت و کانی‌های اکسی کلراید پر می‌شوند (Sutter و همکاران، ۲۰۰۶؛ Peterson و همکاران، ۲۰۱۳). فازهای اکسی کلراید عمدتاً در مطالعات آزمایشگاهی مشاهده می‌شوند، اما مستندسازی حضور آن‌ها در بتن در کارگاه به دلیل ناپایداری این ترکیبات امری دشوار است (Peterson و همکاران، ۲۰۱۳). رسوبات اترینگایت می‌توانند اشباع بتن را تسریع نمایند (Stark و Bollmann، ۱۹۹۹) و احتمالاً کارایی سامانه‌های حبابهای هوا را کاهش می‌دهند و بتن را در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن آسیب‌پذیرتر می‌کنند. نمک‌های یخ‌زدا همچنین می‌توانند در دماهای کم در وهله اول ترکیبات با پایه کلسیم موجود در ناحیه انتقال سطحی ذرات درشت‌دانه موجود در سطح برش خورده که در معرض قرار گرفته را حل کنند (Zhang و Taylor، ۲۰۱۲). در آزمایشگاه، برخی ترک‌ها در بتن در شرایط رویارویی با محلول‌های یخ‌زدا در دماهای بیشتر از یخ‌زدن مشاهده شده‌اند (Farnam و همکاران، ۲۰۱۴). این ترک خوردگی ممکن است حاصل تغییرات کانی‌شناسی در خمیر سیمان که ناشی از واکنش‌هایی که محلول‌های یخ‌زدایی در آن دخیل است، باشد. اگرچه سازوکارهای خاص واکنش تاکنون نامشخص هستند.

### ۷-۳-۷. کاهش اثر

کاهش اثرات مواد شیمیایی یخ‌زدا شامل مراحل است که بیشتر برای به حداقل رساندن نفوذپذیری و کنترل واکنش‌زایی بتن شرح داده شد. عمل‌آوری خوب بطور ویژه‌ای در کاهش اثرات یخ‌زدا پراهمیت می‌باشد. باید دقت نمود که در طول سال اول بهره‌برداری، از یخ‌زداها استفاده نگردد. کاهش اثر همچنین مستلزم فراهم نمودن زهکشی کافی و حفظ و نگهداری آن جهت به حداقل رساندن مدت زمان رویارویی است.

## ۷-۸. سازه‌های زیست‌محیطی (آب و فاضلاب)

سازه‌های زیست‌محیطی به گونه‌ای طراحی گشته‌اند که حاوی مایعات و گازها باشند. سازه‌های زیست‌محیطی شامل تصفیه‌خانه‌های آب؛ تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خانگی و صنعتی؛ مخازن ذخیره بسته و روباز؛ ایستگاه‌های پمپ آب و فاضلاب؛ آبروها، فاضلاب‌روها، آدم‌روها و اتاقک‌های ارتباطی؛ و سازه‌های نگهدارنده مواد خطرناک مطابق تعریف ACI 350.2R می‌شوند. هنگامی که غلظت مواد شیمیایی موجود کافی باشد، می‌توانند به بتن حمله نمایند. مواد شیمیایی موجود ممکن است مربوط به مواد شیمیایی فرآیندی حجمی بوده یا آندسته از موادی باشند که در مایع یا گاز موجود در سازه‌های محیطی وجود دارند. حمله می‌تواند در دماهای بیشتر، تهاجمی‌تر باشد.

### ۷-۸-۱. وقوع

مواد شیمیایی مهاجم معمولاً در مخازن ذخیره حجمی و در سامانه‌های پمپ کردن وجود دارند. سازه‌های حفاظتی ثانویه باید از رسیدن مواد شیمیایی نشتی به خاک جلوگیری نمایند. حمله شیمیایی به بتن ممکن است در نقطه تزریق مواد شیمیایی به سامانه فرآیند رخ دهد؛ به خصوص در شرایطی که تزریق بجای آنکه به سمت مایع فرآیند بوده، به سمت بتن باشد.

عوامل شیمیایی در سازه‌های زیست‌محیطی، از منظر توانایی آن‌ها در حمله به بتن در طیف گسترده‌ای از نسبتاً بیخطر تا بسیار مهاجم قرار دارند. ACI 350 عوامل شیمیایی را به سه دسته کلی طبقه‌بندی می‌کند. برای بحث کامل‌تر به R4.5.1.4 از ACI 350.1 مراجعه گردد. مواد شیمیایی گروه ۱ به‌طور مستقیم برای بتن مضر در نظر گرفته نمی‌شوند، اما چنانچه با سایر مواد شیمیایی که می‌توانند با بتن واکنش دهند ترکیب گردند، می‌توانند نگران‌کننده باشند. مواد شیمیایی گروه ۲ همچون کربن فعال و پتاسیم پرمنگنات ممکن است بتن را لکه‌دار نمایند. مواد شیمیایی گروه ۳ برای بتن خورنده می‌باشند. ACI 350.1 مواد شیمیایی گروه ۳ را بر اساس نرخ خوردگی بتن در شرایط رویارویی معمول سازه‌های زیست‌محیطی، متمایز می‌کند. مواد شیمیایی گروه ۳a دارای نرخ خوردگی آهسته، مواد شیمیایی گروه ۳b دارای نرخ خوردگی متوسط و مواد شیمیایی گروه ۳c دارای نرخ خوردگی سریع می‌باشند.

### ۷-۸-۲. سازوکارهای واکنش

سازوکارهای واکنش در سازه‌های زیست‌محیطی با توجه به وجود انواع مختلفی از شرایط رویارویی، طیف گسترده‌ای را شامل می‌شوند. به‌طور کلی، سازوکارهای واکنش در بسیاری از شرایط رویارویی مشابه بسیاری از سازوکارهای مورد بحث در سایر بخش‌های این فصل می‌باشد. سازه‌های زیست‌محیطی که در معرض مواد شیمیایی با pH کم قرار دارند، به دلیل انحلال اجزای سیمانی و احتمالاً سنگدانه‌های بتن، در معرض نشی و خوردگی بتن هستند. برخی از مواد شیمیایی مهاجم ممکن است با فازهای مواد سیمانی واکنش نشان دهند و بتن را لکه‌دار نمایند. تصفیه‌خانه‌های آب ممکن است بتن‌ها را در معرض آب نسبتاً شیرین قرار دهند. برخی از

سازه‌ها ممکن است در معرض محلول‌هایی که قلیائیت بسیار کمی دارند، قرار گیرند. تصفیه‌خانه‌ها فاضلاب و تأسیسات آن ممکن است بتن را در معرض فعالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی قرار دهند که در نتیجه این امر، شرایط رویارویی بسیار مهاجم ایجاد می‌گردد. فعالیت باکتری در شرایط بی‌هوازی ممکن است منجر به تولید گاز هیدروژن سولفید شود. باکتری‌های هوازی موجود در دیواره‌های مرطوب تأسیسات فاضلاب، همانند پوشش لوله، می‌توانند هیدروژن سولفید را به سولفوریک اسید تبدیل نمایند. در چنین محیط‌هایی خرابی قابل توجه بتن در اثر انحلال فازهای سیمانی مانند پرتلندایت و C-S-H، رسوب محصولات ثانویه همچون سنگ گچ و تراوش اجزای آهن‌دار و آهکی موجود در سنگدانه‌ها می‌تواند رخ دهد. در شرایط دیگر، محلول‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب منجر به رسوب استروویت<sup>۱۳</sup> می‌شود که یک ماده معدنی منیزیم آمونیوم فسفات ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) است. رسوبات استروویت می‌تواند کارایی فرآیندهای تصفیه را مختل کند و باعث ایجاد مشکلات در نگهداری گردد.

### ۷-۸-۳. کاهش اثر

فرآیند طراحی سازه‌های زیست‌محیطی بتنی می‌تواند بر استعداد حمله شیمیایی به بتن تأثیر بگذارد. ACI 350 حداقل الزامات جهت طراحی سازه‌های زیست‌محیطی بتنی از جمله الزامات خاص دوام و حفاظت را تعیین می‌کند. در سازه‌های زیست‌محیطی، با بکارگیری یک فرآیند و طراحی سازه‌ای بگونه‌ای که ایجاد خوردگی در بتن توسط مایع در حال فرآوری را افزایش ندهد؛ استفاده از مخلوط مناسب بتن برای شرایط بهره‌برداری مورد انتظار؛ بهره‌گیری از مصالح بتن که به درستی انتخاب شده‌اند؛ و استفاده از فرآیند خوب بتن‌ریزی با حمل، درجا ریختن و عمل‌آوری مناسب، حمله شیمیایی ممکن است کنترل گردد. حتی زمانی که این روش‌ها دنبال شوند، ممکن است نیاز به ایجاد یک مانع محافظ همچنان وجود داشته باشد؛ به‌ویژه در مواقعی که ماده شیمیایی در تماس با بتن بتواند باعث ایجاد خرابی غیرقابل قبول سریع در طول مدت زمان مورد انتظار برای تماس بتن با ماده شیمیایی، شود. برای الزامات مربوط به استفاده از موانع محافظ به ACI 350 مراجعه گردد.

# فصل ۱

حملہ فیزیکی  
نمک

## ۸-۱. مقدمه

حمله فیزیکی نمک یک سازوکار خرابی ناشی از تبلور نمک‌ها در منافذ نزدیک سطوح تبخیری بتن است. با توجه به اینکه واکنش‌های شیمیایی بین بتن و نمک متبلور به‌طور قابل توجهی وارد این سازوکار نمی‌گردند، چنین سازوکاری حمله فیزیکی نمک نامیده می‌شود (Mehta و Monteiro، ۲۰۰۶). خرابی از فروریختن ریزدانه‌های سطحی و پوسته شدن، که عمدتاً جنبه ظاهری دارد، تا از هم‌پاشیدگی پیشرونده شدید متغیر می‌باشد. خرابی در سطوح تبخیری بالای تراز خاک یا روی سطوح مسطح که ممکن است آب در آن‌ها بصورت موئینه حرکت کند، رخ می‌دهد (شکل ۸-۱ الف و ۸-۱ ب). رایج‌ترین نمک‌های مرتبط با حمله فیزیکی نمک به ترتیب کاهش اثر تهاجمی عبارتند از سدیم سولفات، سدیم کربنات و سدیم کلراید (Haynes و همکاران، ۲۰۱۰؛ Sakr و همکاران، ۲۰۲۰).

حمله فیزیکی نمک را تبلور نمک، خرابی ناشی از هیدراته شدن نمک، نمگیری نمک و هوازدگی نمکی نیز می‌نامند. گزارش‌هایی که حمله فیزیکی نمک را شناسایی می‌کنند، Bates و همکاران (۱۹۱۳)، Wig و همکاران (۱۹۱۷)، Reading (۱۹۷۵، ۱۹۸۲)، Novak و Colville (۱۹۸۹)، Yen و Bright (۱۹۹۰)، Haynes و همکاران (۱۹۹۶)، Hime و همکاران (۲۰۰۱)، و Erlin و Jana (۲۰۰۳) را شامل می‌شود. حمله فیزیکی نمک به بتن در اوایل دهه ۱۹۹۰ با تحقیقاتی که توسط Folliard و Sandberg (۱۹۹۴) و با پیشرفت نظری توسط Scherer (۱۹۹۹) آغاز شد، مورد توجه قرار گرفت. مطالعات پیشین عموماً بر حمله شیمیایی سولفات به بتن متمرکز بود، در حالی که حمله فیزیکی نمک سولفات اغلب نادیده گرفته شده یا به اشتباه شناسایی گشته است (Haynes، ۲۰۰۲).

حمله فیزیکی نمک همچنین به عنوان یک سازوکار خرابی برای سنگ و آجر بنایی و همچنین سایر مواد متخلخل رخ می‌دهد. این سازوکار خرابی یکی از اجزای مهم پدیده گسترده‌تری به نام هوازدگی نمک است که در آن اختلاف انبساط و انقباض محلول‌های منفذی در مصالح ساختمانی متخلخل نیز در خرابی نقش دارد. تحقیقات انجام شده در علوم زمین و همچنین حفاظت از ساختمان و هنر، اطلاعات مفیدی را در خصوص پدیده‌های مرتبط با هوازدگی نمکی فراهم می‌کند (Evans، ۱۹۷۰؛ Winkler، ۱۹۹۷؛ و Goudie و Viles، ۱۹۹۷؛ Doehne، ۲۰۰۲).

پوسته شدن سطوح بتنی توسط حمله فیزیکی نمک را نباید با پوسته شدن سطوح بتنی توسط یخ زدن و آب شدن بتن در حضور یا عدم وجود نمک‌های یخ‌زدا اشتباه گرفت. سطوح بتنی در معرض شرایط یخ زدن و آب شدن در حضور نمک‌های یخ‌زدا ممکن است توسط سازوکارهای شیمیایی و فیزیکی خراب شوند (فصل ۴) (Mehta و Monteiro، ۲۰۰۶؛ Valenza و Scherer، ۲۰۰۷؛ ACI 201.3T).



شکل ۸-۱ الف. حمله فیزیکی نمک به شالوده بتنی ساختمان مسکونی. پوسته شدن سطح بتن ناشی از سدیم سولفات موجود در آب منفذی خاک می‌باشد. نمک در پشت یک پوشش رنگ روی پانچور دیوار انباشته شده است (Bassuoni و Haynes، ۲۰۱۱).



شکل ۸-۱ ب. حمله فیزیکی نمک ناشی از سدیم کربنات به دال بتنی پارکینگ. پوسته شدن در امتداد جبهه تبخیر رخ داده است (Bassuoni و Haynes، ۲۰۱۱).

## ۸-۲. وقوع

مثال‌های قبلی حمله فیزیکی نمک به سال ۱۹۱۳ برمی‌گردد، موقعی که Hansen (۱۹۶۸) آسیب دیواره‌های لوله‌های ملاتی را توسط نیروی مکانیکی اعمال شده توسط تبلور نمک گزارش نمود. Reading (۱۹۸۲) نمونه‌هایی از عناصر سازه‌ای را در یک سد (مونتانا) نشان داد که تنها با فعالیت فیزیکی سدیم سولفات مورد حمله قرار گرفتند. در حال حاضر، حمله فیزیکی نمک به بتن در مکان‌های مختلف در سراسر جهان و به‌طور معمول در محیط‌های خشک که نمک‌ها در منافذ ریز سطحی به دلیل تبخیر در نزدیکی سطوح عناصر بتنی تبلور می‌شوند، مشاهده شده است. این فرآیند به حضور نمک‌های محلول در آب ناشی از آب دریا، آب‌های زیرزمینی، خاک و سایر منابع نیاز دارد. برخی از شرایط رویارویی زیست‌محیطی در ایجاد حمله فیزیکی نمک تهاجمی تر محسوب می‌شوند. این شرایط به‌طور معمول با نوسانات دما و رطوبت نسبی، به صورت روزانه اتفاق می‌افتد. در محیط‌های طبیعی این حمله عمدتاً در مناطق خشک، همانند جنوب غربی ایالات متحده؛ بخش‌هایی از جنوب اروپا؛ مناطق ساحلی استرالیا؛ و در اکثر نقاط خاورمیانه، به ویژه در نواحی خلیج فارس رخ می‌دهد.<sup>۱۴۰</sup> بعلاوه، ریزاقلیم‌های محلی می‌توانند شرایط مشابهی را فراهم نمایند. اقدامات مربوط به محوطه‌سازی و آبیاری نیز می‌توانند منجر به ایجاد شرایط مساعد جهت رخ دادن حمله فیزیکی نمک گردند.

حمله فیزیکی نمک ممکن است حتی زمانی که غلظت نمک در خاک کم باشد، رخ دهد. زیرا غلظت نمک‌ها در طول زمان در سطوح تبخیری بتن افزایش می‌یابد. برخلاف حمله شیمیایی سولفات، غلظت آستانه‌ای از نمک‌ها یا اجزای شیمیایی گزارش نشده که بتواند نشانگر شدت بالقوه حمله باشد. یک راهکار مفید برای ارزیابی مستعد بودن حمله شامل درک استعداد خشک شدن در سطوح تبخیری، تغییرات روزانه دمای محیط و رطوبت نسبی و تعیین انواع نمک‌های محلول در آب در تماس با خاک و آب است. مورد اخیر تعیین وجود یا عدم وجود آنیون‌های محلول در آب همچون سولفات، کربنات، بی‌کربنات و کلراید و کاتیون‌هایی مانند سدیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم در خاک یا آب را شامل می‌شود.

محلول‌های سدیم سولفات حاوی یون‌های سولفات هستند، بنابراین زمانی که این نمک در محیط رویارویی موجود باشد، استعداد حمله شیمیایی سولفات به بتن وجود دارد. سایر نمک‌های سولفات مانند کلسیم، منیزیم، پتاسیم، آهن و آمونیوم سولفات می‌توانند در حمله شیمیایی سولفات به بتن نقش داشته باشند؛ اما به نظر نمی‌رسد که با حمله فیزیکی نمک به بتن آسیب وارد نمایند.

## ۸-۳. پیشینه

بسیاری از تحقیقات اولیه در مطالعه بر روی بتن با مشاهده شواهد میدانی، از حمله فیزیکی در رویارویی با نمک، معمولاً در خاک‌های حاوی سولفات و گاهی اوقات در خاک‌های حاوی کربنات، را گزارش نموده‌اند. در سال ۱۹۱۲، آزمایش‌هایی توسط Bates و همکاران (۱۹۱۳) برای بررسی علت خرابی میدانی در بتن تحت شرایط رویارویی با آب‌های قلیایی (در بیشتر مواقع رویارویی با سدیم سولفات) انجام پذیرفت.

<sup>۱۴۰</sup> توضیحات مترجم: در مناطق خشک فلات ایران و حتی در نزدیکی خلیج فارس و دریای عمان می‌توان آن را در بتن‌های نزدیک به سطح زمین که بر سطح زمین متکی هستند یا از زیر سطح زمین ادامه یافته‌اند و نمایان می‌باشند، دید که باعث خرابی‌های زیاد می‌شود.

این مطالعه موجب شکل‌گیری یک برنامه آزمایشی بزرگ در هفت منطقه از ایالات متحده به عنوان نقاط مورد آزمایش گشت که این مناطق دارای خاک‌هایی با غلظت زیاد نمک‌های قلیایی بودند. Wil-Furlong و liams (۱۹۲۶) مشاهده کردند که تبلور نمک‌ها در منافذ بتن همراه با برخی دیگر از واکنش‌های شیمیایی ناشناخته رخ می‌دهد. اداره احیای اراضی ایالات متحده (۱۹۶۳) به این موضوع اشاره کرده است که نمک‌هایی همچون سدیم کربنات می‌توانند با متبلور شدن در منافذ بتن، سبب از هم پاشیدگی سطح شوند و اینگونه به نظر می‌رسد که این واکنش کاملاً فیزیکی باشد. مدت‌ها بعد، Reading (۱۹۷۵، ۱۹۸۲) گزارش داد که یک دیواره بتنی خروجی آب یک سد دچار خرابی ناشی از واکنش فیزیکی سدیم سولفات شده است. یکی از مهم‌ترین برنامه‌های آزمایشی که حمله فیزیکی نمک را شناسایی کرد، آزمایش‌های میدانی طولانی‌مدت انجمن سیمان پرتلند بر روی بتن در شرایط رویارویی با خاک‌های حاوی سولفات بوده است (McMillan و همکاران، ۱۹۴۹؛ Stark، ۱۹۸۲، ۱۹۸۹b، ۲۰۰۲). در کل، هزاران نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. تحقیقات اولیه توسط McMillan و همکاران (۱۹۴۹) شکل غیرهیدراته (تاردیت  $^{141}$   $[Na_2SO_4]$ ) و شکل ده‌آبه (میرابیلیت  $^{142}$   $[Na_2SO_4 \cdot 10H_2O]$ ) سدیم سولفات را شناسایی و مورد بحث قرار دادند، اما میان این فازهای نمکی با خرابی مشاهده شده در بتن ارتباطی برقرار نکردند. Stark (۲۰۰۲) نمونه‌های آسیب دیده را بصورت میکروسکوپی بررسی کرد و حمله فیزیکی نمک را به عنوان عامل اصلی خرابی در نمونه‌های بتن تحت شرایط رویارویی میدانی شناسایی نمود. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت در برابر خرابی با کاهش  $w/cm$  در مخلوط‌های بتن با و بدون مواد مکمل سیمانی بهبود یافته است. مخلوط‌های بتنی که در برابر حمله فیزیکی نمک مقاومت بهتری داشته‌اند، حاوی سیمان پرتلند بدون ماده مکمل سیمانی و  $w/cm$  برابر ۰/۳۸ بوده‌اند.

Stark (۱۹۸۲، ۱۹۸۹b، ۲۰۰۲) به این نتیجه دست یافت که مواد مکمل سیمانی که به بتن اضافه می‌شوند، ممکن است مقاومت در برابر خرابی سطح را کاهش دهند. سایر محققین نیز اثرات منفی مربوط به استفاده از مواد مکمل سیمانی را مشاهده نمودند (Irassar و همکاران، ۱۹۹۶؛ Bassuoni و Nehdi، ۲۰۰۹). به هر حال، O'Neill و Obla (۲۰۱۷) دریافتند که وقتی خاکستریادی و سرباره به عنوان بخشی از مواد سیمانی در بتن استفاده می‌شوند، بر مقاومت بتن در برابر تخریب سطحی ناشی از حمله فیزیکی نمک تأثیری نمی‌گذارند. Zhutovsky و Hooton (۲۰۱۷) دریافتند که در  $w/cm$  برابر ۰/۴۰، مخلوط‌های حاوی سرباره عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های سیمان پرتلند داشته‌اند، در حالیکه خاکستر بادی نوع F، به دلیل سرعت کمتر واکنش همراه با عمل‌آوری محدود پیش از شرایط رویارویی، مقاومت را کاهش می‌دهند.

Folliard و Sandberg (۱۹۹۴) آزمایش‌های تحقیقاتی را بر روی نمونه‌های کوچک بتن به منظور شناخت سازوکارهای خرابی از طریق ایجاد تبلور نمک در اثر هیدراته‌شدن، تبخیر و تغییرات دما انجام دادند. مهاجم‌ترین محیط آزمایش مربوط به شرایط غوطه‌ور شدن آزمون‌ها در محلول سدیم سولفات و دمای چرخ‌های بین ۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس بود که آسیب در این آزمون‌ها با کاهش دما رخ می‌داد. با

<sup>141</sup>Thenardite<sup>142</sup> Mirabilite

کاهش دما، محلول نمکی با میراییت فوق اشباع می‌شد؛ بنابراین، احتمالاً رسوب یا رشد میراییت مسئول خرابی بوده است. Haynes و همکاران (۲۰۰۸، ۲۰۱۰) یک مطالعه سه ساله‌ای که در آن بتن تا حدی در محلول سدیم سولفات، سدیم کربنات، یا محلول سدیم کلراید غوطه ور شده بود، انجام دادند و دریافتند که شرایط محیطی چرخ‌های موجب خرابی بیشتری نسبت به حالتی که در آن شرایط محیطی ثابت است، می‌گردد. با این حال، حتی هنگامی که شرایط محیطی ثابت نگه داشته شده بود، آسیب همچنان مشاهده گردید. مهاجم‌ترین نمک سدیم سولفات و پس از آن با اختلاف کم، سدیم کربنات بوده است. در مطالعات آزمایشگاهی، رویارویی با سدیم کلراید در مقایسه با سایر نمک‌ها، خرابی جزئی ایجاد نمود.

#### ۸-۴. سازوکار

فشار تبلور ناشی از رشد بلورها، علت اصلی حمله فیزیکی نمک است. Scherer (۲۰۰۴) خلاصه‌ای از معادلات تعادل ترمودینامیکی که بر توسعه فشار تبلور حاکم است، را ارائه می‌دهد. به عنوان یک قاعده کلی، فشارهای تبلور با کاهش اندازه منافذ داخل بتن افزایش می‌یابد. این فشارها بر دیواره‌های منافذ تنش وارد می‌کنند که در نهایت هنگامی که فشارها از مقاومت کششی خمیر سیمان اطراف فراتر رود، موجب ایجاد ریزترک می‌گردد.

تبلور نمک در سطوح تبخیری اتفاق می‌افتد؛ چرا که نمک‌ها با تبخیر غلیظتر شده، محلول فوق اشباع می‌گردد و نمک‌ها رسوب می‌نمایند. هنگامی که نمک‌ها متبلور می‌شوند، رشد پیدا می‌نمایند و فشار ایجاد می‌کنند (Scherer، ۲۰۰۴). چرخه‌های انحلال و تبلور مجدد نیز سبب ایجاد آسیب می‌شود. برای مثال، سدیم کلراید جاذب رطوبت می‌باشد؛ در رطوبت نسبی بیشتر از ۷۵ درصد (محدوده دمایی ۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس)، زمانی که بلورها در آب حل شوند، در رطوبت نسبی کمتر دوباره متبلور می‌شوند.

سدیم سولفات و سدیم کربنات با سازوکار متفاوتی انحلال و مجدداً متبلور می‌شوند. آن‌ها می‌توانند در اثر تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی، تغییرات فاز دهند. تاردیت ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )، شکل بی‌آب سدیم سولفات، در شرایط محیطی ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی تا ۷۵ درصد پایدار است. اما، در رطوبت‌های نسبی بیشتر، بلورها رطوبت هوا را جذب می‌کنند و حل می‌شوند و محلولی تولید می‌نمایند که به واسطه آن بلور ده‌آبه (میراییت،  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) متبلور می‌گردد. در دمای بیش از ۳۲/۴ درجه سلسیوس، تنها تاردیت پایدار می‌باشد. این ویژگی‌های نمک اجازه می‌دهد که تغییر فاز در چرخه‌های روزانه رخ دهد؛ به نحوی که تاردیت در طول روز گرم و خشک و میراییت در طول شب‌های سرد و مرطوب ایجاد می‌شود. تبدیل تاردیت به میراییت شامل افزایش ۳۱۴ درصدی حجم مولی است. برای سدیم کربنات، تبدیل فاز کم‌آبه (ترموناتریت<sup>۱۴۳</sup>،  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) به فاز ده‌آبه (ناترون<sup>۱۴۴</sup>،  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) منجر به افزایش ۲۶۰ درصدی می‌شود.

مدل‌های ترمودینامیکی نشان می‌دهند که فشار تبلور بیشتر در منافذ کوچک‌تر ایجاد می‌شود (Scherer)

<sup>143</sup> Thermonatrite

<sup>144</sup> Natron

۲۰۰۴ a). در نتیجه، سفیدکزنی<sup>۱۴۵</sup> معمولاً با خرابی ناشی از نمک مرتبط نیست؛ زیرا تبلور نمک در سطوح نمایانی که چنین رشدی به راحتی در آن امکان پذیر است، رخ می‌دهد. اگر جبهه‌های تبخیر در زیر سطوح نمایان ایجاد شوند، رسوب و رشد بلوری در شبکه منافذ بتنی در فرآیندی به نام سفیدکزنی درونی<sup>۱۴۶</sup> اتفاق می‌افتد. هنگامی که سفیدکزنی درونی به جای سفیدکزنی رخ دهد، می‌تواند منجر به آسیب شود؛ زیرا فشار در منافذ ریز ایجاد گشته که می‌تواند موجب ریزترک خوردگی گردد.

## ۵-۸. آزمایش

در حال حاضر، هیچ آزمایش استاندارد برای تعیین مقاومت بالقوه مخلوط بتن در برابر حمله فیزیکی نمک وجود ندارد. روش‌های آزمایشی مختلفی برای شبیه‌سازی حمله فیزیکی نمک گزارش شده‌اند که به روش‌های غوطه‌وری کامل، تر و خشک شدن و نیمه غوطه‌ور شدن طبقه‌بندی می‌شوند؛ قابل توجه است که برای شیوه‌های تسریع شده، از سدیم سولفات به دلیل خاصیت مهاجم بودن این ماده، استفاده می‌گردد.

### ۱-۵-۸. آزمایش‌های غوطه‌وری کامل

این روش آزمایش به غوطه‌ور نمودن نمونه‌ها در محلول نمک و رویارویی آن‌ها با چرخه‌های حرارتی بستگی دارد که منجر به حمله فیزیکی نمک در حین یا پس از غوطه‌وری می‌گردد. Sandberg و Folliard (۱۹۹۴) نمونه‌هایی را که به‌طور کامل در محلول سدیم سولفات ۳۰ درصد وزنی غوطه‌ور شده و همزمان در دمای ۳۰ تا ۵ درجه سلسیوس خشک می‌شوند، آزمایش نمودند. نتیجه این مطالعه، فوق اشباع شدن زیاد و به دنبال آن تبلور میرابیلیت گشت. پس از آن، نمونه‌های کاملاً غوطه‌ور شده مجدداً تا دمای ۳۰ درجه سلسیوس گرم شدند. سپس این چرخه حرارتی هر ۲۴ ساعت تکرار گردید و نرخ تقریبی سرمایش و گرمایش برابر (به ترتیب) ۴ و ۲/۵ درجه سلسیوس در ساعت بود. این رویارویی منجر به از دست دادن ۲۰ درصد و ۷۵ درصد جرم در نمونه‌های ساخته شده با  $w/cm$  به ترتیب برابر ۰/۳۵ و ۰/۵۰ شد (Hooton و Zhutovsky، ۲۰۱۷).

### ۲-۵-۸. آزمایش‌های تر و خشک شدن

این روش آزمایش شامل غوطه‌وری چرخ‌های نمونه‌های بتنی در محلول‌های نمکی و به دنبال آن خشک شدن می‌باشد. به عنوان مثال، Bassuoni و Nehdi (۲۰۰۹) نمونه‌هایی را با  $w/cm$  برابر ۰/۳۸ در شرایط رویارویی تر و خشک شدن چرخ‌های قرار دادند که در آن هر چرخه شامل ۴ روز غوطه‌وری کامل در محلول سدیم سولفات ۵ درصد و ۳ روز خشک شدن در دمای ۴۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۵ درصد بود. این شرایط رویارویی برای ۱۰۴ چرخه ادامه یافت. در پی آن بررسی ریزساختاری نشان داد که رویارویی تر و خشک شدن سبب ایجاد خرابی ترکیبی یعنی رخدادن تبلور نمک و حمله شیمیایی سولفات می‌شود.

<sup>145</sup> Efflorescence

<sup>146</sup> Subflorescence

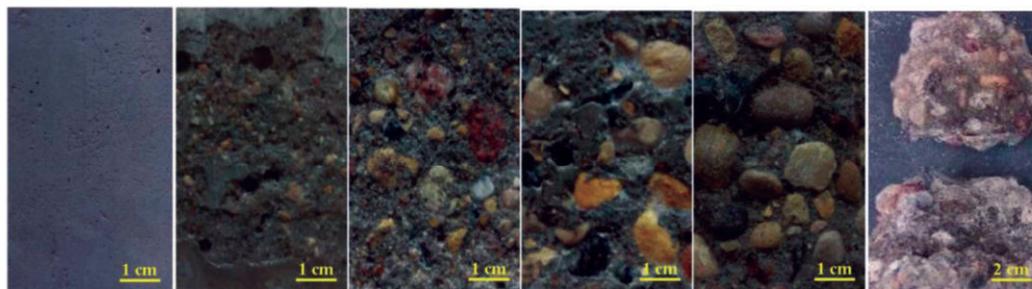
به طوری که سدیم سولفات در نزدیکی سطوح نمایان نمونه متبلور می گردد و به شکل گیری ریزترک که نفوذ بیشتر محلول در اعماق نمونه ها را تسهیل می نماید، منجر می شود و موجب توسعه محصولات حمله سولفاتی گردیده است. به احتمال زیاد به دلیل  $w/cm$  کم بتن ها، از دست دادن جرم ناشی از تبلور نمک به اندازه کافی شدید نباشد تا به طور قطعی مقاومت بتن در برابر حمله فیزیکی نمک در این شرایط رویارویی را ارزیابی نماید. علاوه بر این، دوره طولانی رویارویی موجب توسعه حمله شیمیایی سولفات شده که حمله فیزیکی نمک را پنهان کرده است. Doerr و Brown (۲۰۰۰) اندرکنش میان حمله فیزیکی نمک و حمله شیمیایی سولفات، در نمونه های حاصل از بتن میدانی، در محلی که تجمع اترینگایت بلافاصله در زیر سطح کریناته یافت شده را مشاهده نموده اند.

### ۸-۵-۳. آزمایش های نیمه غوطه ور

این روش اجازه می دهد تا اثر موثنگی در آزمونه های بتنی که نیمه غوطه ور شده اند، رخ دهد؛ هنگامی که محلول های نمکی از طریق منافذ موثینه آزمونه ها به ناحیه تبخیری مهاجرت نمایند و متبلور می گردند. Bas-Rahman و suoni (۲۰۱۶) یک آزمایش نیمه غوطه ور، با اعمال شرایط شدید رویارویی، جهت حصول نتایج مقاومت بتن در برابر حمله فیزیکی نمک در طول مدت ۴ ماه، را پیشنهاد نمودند. در این آزمایش، یک سوم ارتفاع استوانه های بتنی در محلول ۱۰ درصد سدیم سولفات غوطه ور شدند. قسمت بالایی آزمونه ها در معرض دما و رطوبت چرخ های قرار گرفت، در حالی که قسمت زیرین غوطه ور تنها در معرض تغییرات دمای چرخ های قرار گرفتند. هر چرخه به مدت ۲۴ ساعت ادامه داشت و شامل دو مرحله بود: (۱) مرحله حرارت دیدن یا خشک شدن ۸ ساعته ( $2 \pm 40$  درجه سلسیوس و رطوبت نسبی  $5 \pm 35$  درصد) و به دنبال آن مرحله خنک کردن یا مرطوب نمودن ۱۶ ساعته ( $2 \pm 20$  درجه سلسیوس و رطوبت نسبی  $5 \pm 90$  درصد). این شرایط بر اساس نمودار فاز سدیم سولفات برای ایجاد تبلور مکرر تاردیت در محیط گرم و خشک و میراییت در محیط خیس یا مرطوب در دمای اتاق انتخاب شدند. نتایج آزمون، پوسته شدن بسیار زیادی را در طول مدت ۴ ماه نشان داد؛ مقدار کاهش جرم برای آزمونه های ساخته شده با  $w/cm$  برابر  $0/40$  و  $0/50$ ، به ترتیب بین ۷٪ تا ۱۶٪ و ۲۱٪ تا ۲۵٪ پس از ۱۲۰ چرخه بود. O'Neill و O'bla (۲۰۱۷) و همکاران (۲۰۱۵) آزمایش تسریع شده مشابهی را با استفاده از محلول سدیم سولفات ۱۰ درصد گزارش نموده اند. آزمونه های نیمه غوطه ور شده ابتدا به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۲۱ تا ۲۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۷ تا ۸۵ درصد و سپس به مدت ۸ ساعت در دمای ۳۱ تا ۳۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۲۱ تا ۳۴ درصد نگهداری شدند. در پایان هر ۱۰ چرخه، درجه بندی ظاهری، فاصله پوسته شدن و کاهش جرم اندازه گیری گردید. در طی ۵۰ چرخه، آن ها متوجه تفاوت های مشخصی در بین آزمونه ها شدند. مخلوط های با  $w/cm$  کمتر ( $0/40$ ) درجه بندی ظاهری بهتر و فواصل پوسته شدن و کاهش جرم کمتری نسبت به مخلوط های با  $w/cm$  بیشتر ( $0/50$  و  $0/60$ ) داشتند.

### ۸-۵-۴. شاخص‌های آزمایش

بررسی ظاهری یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی حمله فیزیکی نمک به بتن است. رتبه‌بندی ظاهری را می‌توان بر اساس مقیاسی عددی و روایت توصیفی انجام داد. این روش، زمانی مفید است که تفاوت قابل توجهی در میزان آسیب‌دیدگی بین نمونه‌ها رخ دهد. نمونه‌ای از یک رتبه‌بندی تصویری برای خرابی سطحی بتن توسط حمله فیزیکی نمک پس از آزمایش غوطه‌وری جزئی که توسط Rahman و Bassuoni (۲۰۱۶) ارائه گردید، در شکل ۸-۵-۴ نشان داده شده است (Sakr و همکاران، ۲۰۲۰). در این شکل، رتبه‌بندی عملکرد مخلوط‌های بتن مختلف به صورت زیر صورت گرفته است: صفر (فاقد خرابی: بدون از دست رفتن مقدار قابل مشاهده خمیر)، ۱ (کم: از دست دادن مقدار قابل مشاهده خمیر)، ۲ (متوسط: نمایان شدن ریزدانه‌ها)، ۳ (شدید: نمایان شدن درشتدانه‌ها)، ۴ (بسیار شدید: جدا شدن خمیر از اطراف سنگدانه) و ۵ (خرد شدن: در درجه اول مربوط به نمونه‌های مغزه آزمایشگاهی است اما به‌طور کلی با بتن اجرا شده در محل ارتباط ندارد). با این حال، در مورد قیاس خرابی سطحی، رتبه‌بندی ظاهری به تنهایی ارزیابی قاطعی را برای مخلوط‌های بتن ارائه نمی‌دهد و بنابراین، سایر شاخص‌های فیزیکی ممکن است برای ثبت تغییرات در عملکرد استفاده شوند.



۵- خرد شدن ۴- بسیار شدید ۳- شدید ۲- متوسط ۱- کم ۰- فاقد خرابی

شکل ۸-۵-۴. نمونه‌ای از رتبه‌بندی ظاهری حمله فیزیکی نمک به بتن (Sakr و همکاران، ۲۰۲۰) (نکات: ۱ سانتیمتر؛ عکس‌ها نشان‌دهنده عملکرد مخلوط‌های مختلف بتن پس از آزمایش غوطه‌وری جزئی ارائه شده توسط Rahman و Bassuoni (۲۰۱۶) هستند؛ حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۴ میلی‌متر است).

از دست دادن جرم، مقدار مواد پوسه‌شده از نمونه‌ها در نتیجه تبلور نمک نسبت به جرم اولیه آن‌ها را بیان می‌کند. برای آزمایش‌هایی که برای مدت زمان کوتاه و یا برای مخلوط‌های مقاوم در برابر حمله شیمیایی انجام می‌شوند، تغییر جرم شاخصی رضایت‌بخش و حساس برای ارزیابی آسیب فیزیکی حمله نمک است (Hooton و Zhutovsky، ۲۰۱۷). با این حال، هنگامی که آزمایش برای مدت طولانی انجام می‌گیرد و هرگاه که مخلوط‌های بتن آزمایش‌شده در برابر حمله شیمیایی مقاوم نیستند، این مولفه ممکن است برای ارزیابی آسیب فیزیکی حمله نمک مناسب نباشد. تحت چنین شرایطی، به ویژه در قسمت غوطه‌ور شده نمونه، حمله شیمیایی نیز ممکن است بر روی نمونه‌ها تأثیر می‌گذارد که این امر منجر به از دست دادن جرم اضافی از بتن می‌شود (Hartell، ۲۰۱۱).

Ferraris و همکاران (۲۰۰۶) و O'Neil و Obla (۲۰۱۷) یک مقیاس فاصله‌ای برای پوسته شدن را همراه با کاهش وزن برای مشخص کردن آسیب آزمون‌هایی که در معرض آزمایش حمله فیزیکی نمک برای مدت زمان طولانی قرار داشتند، بکار بردند. برای آزمون‌های نیمه غوطه‌ور، پوسته شدن به دلیل حمله فیزیکی نمک در نزدیکی سطح محلول رخ می‌دهد و با گذشت زمان و پیشرفت سطح خرابی، به سمت بالای نمونه حرکت می‌کند. بنابراین، فاصله پوسته شدن به عنوان فاصله عمودی در امتداد سطح آزمون بین تراز قرارگیری محلول و بالاترین نقطه‌ای که جبهه پوسته شدن به آن پیشرفت کرده است، اندازه‌گیری شد. اگرچه این روش می‌تواند برای ارزیابی و مقایسه مقادیر آسیب در خرابی‌های با شدت متوسط مفید باشد؛ اما در موارد خرابی‌های شدید به دلیل آن که کل بخش بالایی آزمون به‌طور مداوم دچار کاهش وزن می‌شود و حتی امکان کاهش ارتفاع آزمون‌ها نیز وجود دارد، نمی‌توان از آن استفاده کرد. برای شرایط رویارویی کوتاه‌مدت تهاجم فیزیکی نمک، رتبه‌بندی‌های ظاهری همراه با کاهش وزن آزمون‌ها که نسبت سطح به حجم مشابهی دارند، به عنوان شاخص‌های مناسب سطح آسیب در بتن می‌باشند.

## ۸-۶. عوامل کلیدی

عواملی مهم برای شدت خرابی بتن ناشی از فشار تبلور عبارتند از: درجه فوق اشباع بودن محلول، توزیع نمک در منافذ (نزدیک بودن جبهه تبخیر به سطح)، اندازه و توزیع اندازه منافذ، جذب موئنه و مقاومت کششی بتن. درجه فوق اشباع بودن محلول از آنجایی اهمیت دارد که قابلیت تبلور با افزایش میزان فوق اشباع بودن بیشتر می‌گردد و می‌تواند منجر به آسیب شدیدتر شود. مشخص شده است که هوازائی در بتن باعث به تأخیر انداختن پوسته شدن سطح آزمون‌ها ناشی از حمله فیزیکی نمک در شرایط رویارویی غوطه‌وری کامل و جزئی می‌گردد (Drimalas, ۲۰۰۷؛ Bassuoni و Nehdi, ۲۰۰۹). با این حال، نهایتاً حباب‌های هوا با رسوب نمک پر می‌شوند؛ بنابراین، فشار تبلور باعث ایجاد ریزترک و پوسته شدن سریع خمیره سیمانی به روشی مشابه در بتن بدون حباب هوا خواهد شد (Nehdi و Bassuoni, ۲۰۰۹).

نشان داده شده است که نسبت  $w/cm$  کمتر برای بهبود دوام بتن در برابر حمله فیزیکی نمک مفید است. گزارش شده است که صرف نظر از نوع خمیر یا شرایط رویارویی، کاهش  $w/cm$  به مقدار  $0/45$  یا مقادیر کمتر از آن باعث به حداقل رسیدن یا حذف پوسته شدن سطح بتن ناشی از حمله فیزیکی نمک می‌گردد (Alyami و همکاران, ۲۰۲۱؛ Sakr و همکاران, ۲۰۲۱؛ Bassuoni, Kurtis و Lee, ۲۰۱۷؛ O'Neil, ۲۰۱۷؛ Zhutovsky و Hooton, ۲۰۱۷؛ Bassuoni و Rahman, ۲۰۱۶؛ Drimalas, ۲۰۰۷؛ Stark, ۲۰۰۲). علت این موضوع به کاهش نفوذپذیری (دوام فیزیکی) بتن نسبت داده می‌شود، زیرا نسبت  $w/cm$  کمتر باعث کاهش میزان تخلخل و کمتر شدن اتصال حفرات می‌گردد که این امر منجر به کاهش سرعت ورود و جذب کمتر محلول و در نتیجه کاهش حجم نمک‌های متبلور در حفرات سطحی و در نهایت پوسته شدن سطح بتن خواهد شد (Sakr و همکاران, ۲۰۲۰).

تأثیر مواد مکمل سیمان بر دوام بتن در برابر حمله فیزیکی نمک بصورت منفی (Nehdi و Sulaiman، ۲۰۱۷؛ Aguayo، ۲۰۱۶؛ Drimalas، ۲۰۰۷؛ Stark، ۲۰۰۲؛ Irassar و همکاران، ۱۹۹۶)، بی اثر (Obla و O'Neill، ۲۰۱۷) یا مثبت (Zhutovsky و Hooton، ۲۰۱۷؛ Folliard و Sandberg، ۱۹۹۴) گزارش شده است. این تنوع در نتیجه گیری به درجه بلوغ بتن و شرایط عمل آوری سطوح جانبی بتن که در حمله فیزیکی نمک بیشتر تحت تأثیر قرار می گیرند و همچنین به نوع آزمایش انجام شده، مرتبط است (Sakr، ۲۰۲۰). شرایط غوطه‌وری کامل به دلیل رطوبت نسبی زیاد به‌طور مداوم باعث بهبود عمل آوری و پیشرفت واکنش هیدراته‌شدن و پوزولانی خمیرهای حاوی مواد مکمل سیمانی می‌شود، در حالی که شرایط رویارویی نیمه غوطه‌وری به دلیل وجود جبهه خشک‌شدن، شرایط عمل آوری طولانی مدت مطلوبی را فراهم نمی‌کند (Sakr و Bassuoni، ۲۰۲۱). مقادیر ایمن جایگزینی برای بکارگیری مواد مکمل سیمانی که در آن بتن عملکرد بهتری داشته باشد، هنوز نامشخص است. با این حال، افزایش زمان عمل آوری مرطوب اولیه باعث بهبود عملکرد در شرایط رویارویی با حمله فیزیکی نمک می‌شود (Sakr و همکاران، ۲۰۲۰).

## ۸-۷. محافظت

روش پوشش‌دهی در بسیاری از نقاط جهان برای محافظت از دیوارهای بتنی، بنایی و آجری در برابر حمله فیزیکی نمک رایج بوده است. اندود یا ملات قربانی شونده، گچ و رنگ‌ها (شکل ۸-۱ الف) نفوذپذیری بیشتری نسبت به مواد پایه (بتن) دارد و مسیر آسان‌تری را برای تبخیر و به دنبال آن، تبلور نمک فراهم می‌کند و در نتیجه آسیب وارده به مواد پایه را کاهش می‌دهد. با این حال، از آنجایی که پوشش‌های قربانی شونده به تدریج و با گذر زمان از بین می‌روند، به نگهداری منظم، لکه‌گیری و در نهایت جایگزینی نیاز دارند (Young، ۲۰۰۸).

مواد و پوشش‌ها برای حفاظت و ترمیم آسیب‌های وارده به بتن ناشی از حمله فیزیکی نمک به‌طور گسترده در ادبیات فنی مطرح نشده‌اند. این موارد معمولاً بصورت کلی و بدون اطلاعات خاص در مورد اجزای اصلی یا نام تجاریشان معرفی می‌شوند (Sakr و همکاران، ۲۰۲۰). در آزمایش‌های میدانی طولانی مدت انجام شده توسط انجمن سیمان پرتلند، از رتبه‌بندی ظاهری برای ارزیابی پوشش‌های بتن استفاده شد که در آن اعداد ۱ و ۵ به ترتیب بیانگر بهترین و بدترین عملکرد بود (Stark، ۲۰۰۲). در نسبت آب به مواد چسباننده برابر با ۰/۷۱، تیرهای محافظت شده با پوشش‌ها عملکردی قابل مقایسه با تیرهای بدون پوشش داشتند. در نسبت w/cm کمتر از ۰/۴۹، تیرهای بتنی پوشش داده شده با روغن بذر کتان و اپوکسی نسبت به تیرهای بدون پوشش آییند کننده، عملکرد بهتری داشتند (متوسط امتیاز ظاهری برابر با ۳/۱)، در حالی که بتن محافظت‌شده با آلکیل‌الکوکوسی سیلان<sup>۱۴۷</sup> یا ترکیبی اختصاصی از سیلان، سیلوکسان‌ها، استئارات‌ها و ترکیبات آلومینیوم، عملکردی برتر (امتیاز ظاهری به ترتیب ۱/۳ و ۲) در مقایسه با بتن محافظت نشده (با امتیاز ظاهری ۴/۲) داشتند.

Sakr و همکاران (۲۰۲۰) گزارشی بر مبنای تحقیق Haynes (۲۰۱۲) بر روی عملکرد پوشش‌ها بر روی مغزه‌های بتنی نیمه غوطه‌ور در محلول سولفات سدیم ۵٪ و در شرایط محیطی متغیر طی چرخه‌های ۳ روزه

بین دمای ۴۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۱٪ و ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۲٪ (که در واقع یک چرخه کامل ۶ روزه است) ارائه دادند (Haynes و همکاران، ۲۰۰۸). مغزه‌های تهیه شده از بتن اجرا شده در میدان با مقاومت طراحی ۲۰/۵ مگاپاسکال (که نسبت w/cm در آن‌ها نامعلوم است اما احتمالاً در حدود ۰/۶۰ تا ۰/۷۰ می‌باشد) در معرض ۱۰ چرخه قرار گرفتند که این امر منجر به پوسته شدن در تراز بالاتر از سطح محلول شد. در پی آن، مغزه‌ها با آب شستشو داده شدند و خشک گردیدند و با استفاده از محصولات مختلفی شامل امولسیون آسفالتی، سدیم سیلیکات، لیتوم سیلیکات، رنگ لاتکس، ملات اصلاح شده با پلیمر لاتکس، ملات امولسیون اکریلیک و اپوکسی در تراز بالای سطح محلول پوشش داده شدند. سپس نمونه‌ها در معرض ۱۰ چرخه دیگر قرار گرفتند. خرابی قابل توجه در اکثر نمونه‌ها رخ داد. پوشش‌های موفق، امولسیون اکریلیک و اپوکسی بودند که در آن نمونه‌ها و پوشش‌ها سالم باقی ماندند و در بتن، پوسته شدن اضافی رخ نداد. ملات امولسیون اکریلیک برای تعمیر مصالح بنایی که در معرض حمله فیزیکی نمک (سدیم سولفات) قرار گرفتند، استفاده شد. در این حالت به مدت ۷ سال هیچ گونه شواهدی از تکرار حمله فیزیکی نمک مشاهده نشد و عملکرد گزارش گردید (Sakr و همکاران، ۲۰۲۰).

با استفاده از آزمایش غوطه‌وری جزئی تسریع شده ارائه شده توسط Rahman و Bassuoni (۲۰۱۶) در طی ۱۲۰ چرخه مشخص شد که پوشش‌های اپوکسی و اتیل سیلیکات و همچنین ملات امولسیون اکریلیک حفاظت کارآمدی را برای بتن ساخته شده با نسبت w/cm برابر با ۰/۶، بدون پوسته شدن و یا مقادیر جزئی آن به همراه رتبه بندی ظاهری بین ۰ تا ۱ (Sakr و همکاران، ۲۰۱۹) با استفاده از یک رتبه‌بندی تصویری مشابه آنچه در شکل ۸-۵-۴ ارائه شده است، داشته‌اند. بهبود مشابهی در عملکرد بتن با نسبت w/cm برابر با ۰/۶ در مقابل حمله فیزیکی نمک با استفاده از پوشش‌های محلول آبی ۵۰ درصد جرمی نانو سیلیس (Sakr و Bassuoni، ۲۰۲۰) و نانو کامپوزیت‌های متشکل از رزین‌های پایه سیلان یا متیل متاکریلات و ۵ درصد جرمی نانو سیلیس یا نانورس مونت موریلونیت (Sakr و Bassuoni، ۲۰۲۱)، به دست آمد.

## ۸-۸ توصیه‌ها

هنوز به تحقیقات بیشتری برای درک بهتر حمله فیزیکی نمک به بتن، به ویژه در زمینه‌های مربوط به رابطه غلظت نمک و نفوذپذیری بتن، توسعه یک آزمون آزمایشگاهی استاندارد برای پیش بینی قابل اطمینان عملکرد میدانی، و درک عواملی که در اثرگذاری مواد مکمل سیمانی و عمل‌آوری بر روی دوام بتن مهماند، نیاز است. بر اساس دانش روز در این زمینه، توصیه‌های زیر را می‌توان برای بهبود دوام بتن در برابر حمله فیزیکی نمک ارائه نمود:

الف) حداکثر نسبت w/cm برابر با ۰/۴۵ دوام بتن در برابر حمله فیزیکی نمک را در بسیاری از شرایط رویارویی بهبود می‌بخشد، اما نسبت w/cm کمتر می‌تواند مزایای بیشتری در برابر شرایط رویارویی شدید داشته باشد. بعلاوه، برای شرایط رویارویی با نمک‌های سولفاتی، خمیر نیز باید در برابر سولفات‌ها مقاوم باشد.

ب) بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی باید عمل‌آوری مرطوب کافی داشته باشند تا امکان قطع اتصال‌های

فضاهای موئینه در منافذ نزدیک سطح فراهم گردد. در غیر این صورت، استفاده از این مواد می تواند تاثیر منفی بر حمله فیزیکی نمک در بتن داشته باشد.

ج) در مواردی که خطر وقوع حمله فیزیکی نمک غیر قابل قبول است، باید از روش های اجرا جهت جداسازی سطح تماس بتن با محلول های نمک، مانند استفاده از آییند کننده های موئینه، بهره گرفت.

د) پوشش های قربانی شونده می تواند برای محافظت از بتن در برابر حمله فیزیکی نمک استفاده شوند. برای حفاظت و اقدامات ترمیمی، استفاده از بعضی پوشش های سطحی خاص (آلکیل الکوکسی سیلان یا ترکیبی اختصاصی از سیلان، سیلوکسان ها، استئارات ها و ترکیبات آلومینیوم؛ ملات امولسیون اکریلیک؛ اپوکسی؛ اتیل سیلیکات؛ محلول آبی ۵۰ درصد نانوسیلیس؛ نانو کامپوزیت های متشکل از سیلان یا رزین های متیل متاکریلات و ۵٪ نانوسیلیس یا نانو رس مونت موریلونیت) می توانند با کاهش جذب محلول نمک و سرعت تبخیر، تاثیر حمله فیزیکی نمک به بتن را کاهش دهند. توصیه می شود که کاربر قبل از انتخاب یک پوشش خاص، آزمایش تسریع شده را انجام دهد و یا اطلاعات مستند مربوط به عملکرد میدانی این مواد را به دست آورد.

# فصل ۹

خوردگی فلزات و  
تخریب سایر مصالح  
مدفون در بتن

## ۹-۱. مقدمه

درک شرایطی که باعث خوردگی (زنگ‌زدن) فولادهای مسلح‌کننده و پیش‌تنیدگی می‌شود، حیاتی است. برای افزایش عمر مفید بهره‌برداری، خطر خوردگی زیاد در سازه‌های بتنی حاوی فولاد مدفون را می‌توان به حداقل رساند. هدف این فصل، ارائه خلاصه‌ای در مورد سازوکارهای خوردگی فولاد، شرایطی که تحت آن چنین خوردگی رخ می‌دهد، روش‌ها و شیوه‌هایی که از آن‌ها می‌توان برای جلوگیری یا محدود کردن خوردگی فولاد و یا حفاظت از سایر مصالح مدفون در بتن استفاده کرد، می‌باشد.

در بتن توسط محیط بسیارقلیایی که بوسیله مایع منفذی خمیر سیمان پرتلند ایجاد می‌شود، از خوردگی فولاد مدفون محافظت می‌گردد. کفایت حفاظت به ضخامت پوشش بتنی، کیفیت بتن، جزئیات اجرایی، میزان رویارویی با کلرایدهای موجود در مواد تشکیل دهنده بتن و محیط قرارگیری، و شرایط محیط بهره‌برداری بستگی دارد. شرح جامع‌تری از موضوع را می‌توان در ACI 222R و Broomfield (۲۰۰۷) یافت.

## ۹-۲. اصول کلی شروع خوردگی فولاد در بتن

### ۹-۲-۱. کلیات

فرآیند خوردگی فولاد در بتن به چند مرحله تقسیم می‌شود:

- ۱- شروع: لایه انفعالی معمول بر روی فولاد از بین می‌رود.
- ۲- رشد خوردگی (انتشار): فرآیند خوردگی فعال برقرار می‌شود و خوردگی پیشرفت می‌کند.
- ۳- آسیب: خوردگی به اندازه کافی شدید است که ترک خوردگی، طبله شدن یا هر دو رخ می‌دهد و در نهایت ممکن است عضو سازه‌ای عملکرد مورد نظر خود را نداشته‌باشد.

## ۹-۲-۲. سازوکارهای محافظتی در بتن

### ۹-۲-۲-۱. کلیات

همان‌طور که در ACI 222R توضیح داده شده است، قلیائیت زیاد (pH بیشتر از ۱۲/۵) در بتن از آرماتورهای فولادی مدفون در آن را در برابر خوردگی محافظت می‌کند. در شرایط حضور اکسیژن، pH زیاد محلول منفذی باعث ایجاد یک لایه خوردگی بسیار نازک بر روی سطح فولاد تحت عنوان «لایه انفعالی»<sup>۱۴۸</sup> می‌شود. ترکیب این لایه به خواص متالورژی فلز بستگی دارد و به عنوان ترکیبی از هیدروکسیدها و اکسیدها شناخته می‌شود. این لایه با محیط در تعادل است، واکنش‌های خوردگی را کند می‌کند و بنابراین، فولاد در برابر خوردگی فعال محافظت می‌گردد و اصطلاحاً «انفعالی» گفته می‌شود.

بسته به نفوذپذیری پوشش بتن بر روی فولاد و قلیایی بودن محلول منفذی بتن، لایه انفعالی حفظ می‌شود. اگر لایه انفعالی از بین رود که به آن «غیرانفعالی‌سازی»<sup>۱۴۹</sup> می‌گویند، روند خوردگی تسریع می‌یابد و مرحله

<sup>148</sup> Passive film

<sup>149</sup> Depassivation

انتشار آغاز می‌شود. لایه انفعالی می‌تواند به صورت موضعی از بین برود به طوری که خوردگی موضعی حاصل شود. اگر خرابی در نواحی بزرگتری اتفاق بیفتد، خوردگی عمومی یکنواختتری رخ می‌دهد. دلایل اصلی خرابی لایه انفعالی عبارتند از:

- الف) تخریب شیمیایی، فیزیکی یا مکانیکی لایه پوشش بتنی
- ب) نفوذ کلراید تا سطح مسلح کننده<sup>۱۵۰</sup>
- ج) کرنش شدن بتن تا عمق مسلح کننده<sup>۱۵۱</sup>
- د) تغییر پلاریزاسیون فولاد مسلح کننده مانند خوردگی فلزات غیر مشابه یا نشست جریان سرگردان<sup>۱۵۲</sup>

### ۹-۲-۲-۲. فرآیند خوردگی

خوردگی فولاد در بتن، یک فرآیند الکتروشیمیایی است که نیاز به توسعه یک آند در جایی که اکسیده شدن انجام می‌شود و یک کاتد که در آن احیا صورت می‌گیرد، دارد. در آند، الکترون‌ها آزاد می‌گردد و یون‌های آهن تشکیل می‌شوند.



در کاتد، الکترون‌ها مصرف می‌شوند و یون‌های هیدروکسید تشکیل و آزاد می‌گردند.



در پی آن یون‌های آهن ممکن است با یون‌های اکسیژن یا هیدروکسید ترکیب شوند و اشکال مختلفی از محصولات خوردگی یا زنگ را تولید کنند. تشکیل زنگ اغلب باعث انقباض گردیده که به نوبه خود ممکن است باعث ترک خوردن و پوسته شدن پوشش بتنی شود. برای توضیحات بیشتر در مورد فرآیند خوردگی به ACI 222R مراجعه شود.

### ۹-۲-۲-۳. خرابی به دلیل تاهین ناکافی اکسیژن

لایه فعالی به یک شار اکسیژن معادل تقریباً ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌آمپر بر مترمربع نیاز دارد. اگر شار اکسیژن کمتر از این مقدار باشد، به تدریج از ضخامت لایه انفعالی کاسته شده و فولاد سخت محافظت نشده ظاهر می‌شود. نتیجه آن، خوردگی با روند بسیار کم (بسته به شار اکسیژن)، اما با پتانسیل فعال، هر چند بسیار منفی است (Fidjestøl و Nilsen، ۱۹۸۰). انتشار اکسیژن کم می‌تواند در بتن غوطه‌ور در آب دریا یا آب شیرین (Fidjestøl و همکاران، ۱۹۸۵)، یا با قرار گرفتن در زیر سطح آب زیرزمینی رخ دهد.

<sup>۱۵۰</sup> توضیحات مترجم: به همراه رسیدن غلظت به حد معینی برای شروع خوردگی (غلظت بحرانی)  
<sup>۱۵۱</sup> توضیحات مترجم: به همراه کاهش شدید pH محلول منفذی بتن در مجاورت میلگرد

### ۹-۲-۲-۴. کربناته شدن

واکنش بین  $CO_2$ ، معمولاً از هوای محیط، و خمیر سیمان می‌تواند pH را به کمتر از ۹ کاهش دهد و در نتیجه باعث از بین رفتن قسمت انفعالی شود. نرخ خوردگی افزایش می‌یابد و میزان آن به در دسترس بودن اکسیژن و همچنین رطوبت بستگی دارد، زیرا این موارد بر مقاومت الکتریکی بتن تأثیر می‌گذارند.

### ۹-۲-۲-۵. از بین رفتن موضعی ناشی از کلراید

مقادیر کلراید بیشتر از غلظت مشخصی که تحت عنوان آستانه کلراید شناخته می‌شود، باعث از بین رفتن موضعی لایه انفعالی می‌شود که به خوردگی میانجامد. روند خوردگی به در دسترس بودن اکسیژن و کلرایدها، نسبت سطح آند به کاتد و مقاومت الکتریکی بتن بستگی دارد. غلظت کلراید لازم برای از بین رفتن لایه انفعالی به pH و ترکیب مایع منفذی، کیفیت اکسید لایه انفعالی و خصوصیات سطح مشترک فولاد و بتن بستگی دارد و بنابراین برای همه موارد یک مقدار نیست. توجه گردد که آستانه کلراید توزیعی از مقادیر را شامل می‌شود.

اگرچه بتن‌های امروزی تغییرات بیشتری در مایع منفذی دارند، اما عمدتاً به دلیل استفاده از مواد مکمل سیمانی مانند خاکستر بادی، سرباره و دوده سیلیس، محدودیت‌های کلرایدها در سازه‌های جدید مطابق آنچه که در ACI 222R ارائه شده است، همچنان محافظه کارانه بوده و مناسب هستند. ACI 318-14 مقادیر محدودیت‌های مجاز بیشتری را ارائه می‌کند.

از آنجایی که برخی از مصالح بتن حاوی کلرایدی هستند که در بتن آزاد نمی‌شوند، عملکرد خوب این مواد در گذشته ممکن است مبنایی برای مجاز شمردن مقادیر بیشتر کلراید باشد. مقادیر کلراید پیشنهادی یک رویکرد محافظه کارانه است که باید منجر به کاهش خطر خوردگی شود؛ این رویکرد محافظه کارانه به دلیل گزارش‌های متناقض در مورد آستانه کلراید، اثرات محیط‌های مختلف رویارویی، و ترکیب مصالح ضروری است. همچنین به دلیل امکان نفوذ کلراید از محیط‌هایی نظیر عرشه پل‌ها، سازه‌های پارکینگ و شرایط دریایی، استفاده از این رویکرد محافظه کارانه توصیه می‌شود. بتن باید با مصالحی ساخته شود که کل کلراید در بتن مطابق با دستورالعمل‌های ارائه شده در ACI 222R باشد<sup>۱۵۳</sup>.

## ۹-۳. انتشار خوردگی

### ۹-۳-۱. کلیات

به مجرد اینکه خوردگی آغاز شده است، به خصوص اگر نرخ خوردگی بسیار کم باشد، سازه ممکن است هنوز چندین سال عمر مفید بهره‌برداری داشته باشد. عوامل بیان شده در بخش‌های ۹-۳-۲ تا ۹-۳-۴ نرخ خوردگی را کنترل می‌کنند.

<sup>۱۵۳</sup> توضیحات مترجم: در تجدید نظر دوم آئین نامه بتن ایران (آبا)، این مقادیر ارائه شده‌اند.

### ۹-۳-۲. کنترل آندی

کنترل آندی مبتنی بر کنترل کافی میزان انحلال محصولات خوردگی تشکیل شده در آند است. نرخ انحلال آهن، نرخ خوردگی را تعیین می‌کند.

### ۹-۳-۳. کنترل کاتدی

نرخ خوردگی با میزان در دسترس بودن اکسیژن در کاتد و نسبت بین مساحت نواحی کاتدی و آندی کنترل، و با در دسترس بودن اکسیژن، اندازه کاتد یا هر دو مورد محدود می‌شود. به‌طور معمول، میزان اکسیژن در کاتد بسیار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای ادامه خوردگی است، بنابراین نرخ آن توسط سایر عوامل کنترل می‌گردد. پوشش دادن آرماتور یکی از راه‌های محدود کردن اکسیژن رسانی به سطح کاتد است. این پوشش همچنین از دسترسی عوامل مهاجم به سطح فولاد جلوگیری می‌نماید. همچنین در جایی که بتن کاملاً از آب اشباع باشد، شار اکسیژن از سطح بتن به فولاد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و کنترل کاتدی اتفاق می‌افتد.

### ۹-۳-۴. کنترل مقاومت الکتریکی

وجود یک الکترولیت برای انتشار خوردگی ضروری است. مقاومت الکتریکی الکترولیت می‌تواند انتشار خوردگی را برای بتن ترک نخورده محدود نماید (Marcotte و Hansson, ۲۰۰۳). کنترل مقاومت الکتریکی مستلزم آن است که مقاومت الکتریکی بتن به اندازه کافی زیاد باشد تا جریان تولید شده از دو واکنش نیم پیل را محدود نماید.

ممکن است تفاوت زیادی در پتانسیل نیم پیل بین نواحی کاتدی و آندی فولاد وجود داشته باشد. با این حال، اگر مقاومت الکتریکی بتن ( $R$ ) بین دو ناحیه به اندازه کافی زیاد باشد، بیشتر اختلاف پتانسیل صرف غلبه بر افت ولتاژ (IR)، ناشی از جریان الکتریکی ( $I$ ) پدید آمده در مقابل این مقاومت الکتریکی، حتی در چگالی جریان خوردگی بسیار کوچک می‌شود. این اثر، اغلب در بتن کاملاً کرناته‌شده در یک محیط نسبتاً خشک، در بتن حاوی مواد مکمل سیمانی یا جایی که فاصله زیادی بین نواحی آندی و کاتدی وجود دارد، دیده می‌شود. این بدان معنی است که خوردگی می‌تواند با وجود تفاوت‌های زیاد در پتانسیل نیم پیل، ناچیز باشد.

### ۹-۴. خواص وابسته به خوردگی در مصالح بتن

مصالح بتن باید الزامات استانداردهای مربوطه را برای بتن سازه‌ای برآورده سازند.

### ۹-۴-۱. سیمان پرتلند

قلیائیت خمیر سیمان پرتلند، ناشی از وجود هیدروکسیدهای کلسیم، پتاسیم و سدیم در محلول منفذی است. کلسیم هیدروکسید (CH) فراوانترین بوده و ۱۵ تا ۲۵ درصد خمیر را تشکیل می‌دهد. در حالی که

فصل نهم - خوردگی فلزات و تخریب سایر مصالح مدفون در بتن ..... ۱۶۱

pH محلول اشباع کلسیم هیدروکسید تنها ۱۲/۴ است، اغلب pH ۱۳/۵ تا ۱۴ در مایع منفذی بتن یافت شده است (Justnes و Nygaard، ۱۹۹۴) که این امر بوسیله حضور یونهای OH<sup>-</sup> مرتبط با مواد قلیایی در بتن قابل توجه است.

وجود C<sub>3</sub>A در سیمان می تواند دو مزیت داشته باشد: کاهش نفوذ کلراید و مقیدسازی کلرایدهای مخلوط یا نفوذی. این موضوع اولین بار توسط Verbeck (۱۹۶۸) بیان شد و از آن زمان تحقیقات دیگر آن را تایید کرده اند (Rasheeduzzafar و همکاران، ۱۹۹۲). نتیجه اصلی این موضوع آن است که به طور کلی استفاده از سیمانهای با مقادیر بسیار کم C<sub>3</sub>A (پرتلند نوع ۷) در محیطهای حاوی مقادیر زیاد کلراید، عموماً توصیه نمی شود.

### ۹-۴-۲. مواد مکمل سیمان

استفاده از خاکستر بادی، سرباره و دوده سیلیس، معمولاً برای بهبود دوام بتن در برابر خوردگی ناشی از کلراید، در نظر گرفته می شود. در حالی که استفاده از چنین موادی در بتن مقداری از Ca(OH)<sub>2</sub> که به عنوان یک بافر در برابر تغییرات pH ناشی از کرناته شدن بتن عمل می کند را مصرف می نماید (van Selst و Bijen، ۱۹۹۱؛ Horiguchi و همکاران، ۱۹۹۴؛ Branca و همکاران، ۱۹۹۲)، بهبود در توزیع منافذ و نفوذپذیری می تواند با اثر منفی کاهش در میزان Ca(OH)<sub>2</sub> مقابله کند (Kawamura و Torii، ۱۹۹۴؛ Hakkinen، ۱۹۹۲). همچنین، مواد مکمل سیمان می توانند مقاومت الکتریکی بتن ترک نخورده را افزایش داده و در نتیجه نرخ خوردگی آغاز شده را کاهش دهند (Schiessl و همکاران، ۱۹۹۴؛ Fidjestøl، ۱۹۸۷ و Alonso، ۱۹۹۱ و همکاران، ۱۹۹۲).

در دهه ۱۹۹۰، توسعه بتن با دوام در برابر خوردگی بر استفاده از مخلوط سیمان پرتلند و سایر مواد سیمانی متمرکز شد (Baweja و همکاران، ۱۹۹۴؛ Helland و Maage، ۱۹۹۱؛ Maage و همکاران، ۱۹۹۴؛ Berke و همکاران، ۱۹۹۱؛ Colleparidi و همکاران، ۱۰۰۴؛ Anqi و همکاران، ۱۹۹۱؛ Hussain و Rasheeduzzafar، ۱۹۹۴؛ Decter و همکاران، ۱۹۸۹؛ Haque و همکاران، ۱۹۹۲؛ Ozyildirim، ۱۹۹۴).

Malhotra و همکاران (۲۰۰۰) و Smith و همکاران (۲۰۰۴) همگی گزارش داده اند که که بتن حاوی مقادیر متوسط تا زیاد خاکستر بادی مقاومت بیشتری در برابر نفوذ کلرایدها دارد و بهبود دوام در برابر خوردگی را نشان می دهد.

سرباره در سازه های دریایی از اوایل دهه ۱۹۰۰ استفاده شده است. تجربیات دوام در برابر خوردگی ناشی از کلراید به طور کلی خوب است (Wiebenga، ۱۹۸۴؛ Hope و همکاران، ۱۹۸۵؛ Pal و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین نشان داده شده است که سرباره، دوام در برابر نفوذ نمک های یخزدا را بهبود می بخشد (McGrath و Hooton، ۱۹۹۷؛ Bleszynski و همکاران، ۲۰۰۲).

دوده سیلیس به شیوه های مختلفی در کاهش خطر خوردگی عمل می کند. کاهش نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی به معنی کاهش شدید نرخ نفوذ کلراید در سازه های دریایی و سازه های در معرض نمک های یخزدا است. چنین بتنی همچنین دارای مقاومت الکتریکی بسیار زیاد است و در نتیجه نرخ خوردگی را پس از شروع، به شدت کاهش می دهد (Wolsiefer، ۱۹۹۱؛ Pettersson، ۱۹۹۵؛ Fidjestøl، ۱۹۸۷ و Frearson و Fidjestøl، ۱۹۹۳).

Alonso؛ ۱۹۹۴ و همکاران، Berke؛ ۱۹۹۲ و همکاران، ۱۹۹۲؛ Gautefall و Vennesland؛ ۱۹۸۵؛ Zhang و Gjørv؛ ۱۹۹۱؛ Fidjestøl و Justnes؛ ۲۰۰۲؛ Skjølsvold و همکاران، ۲۰۰۷).

### ۹-۴-۳. سنگدانه‌ها

سنگدانه‌ها، به ویژه آن دسته از سنگدانه‌هایی که در معرض آب دریا قرار دارند یا قرضه طبیعی آن‌ها در آب‌های زیرزمینی حاوی کلراید است، می‌توانند حاوی نمک‌های کلرایدی باشند. سنگ‌های رسوبی تشکیل‌شده در بستر دریاها قدیم نیز می‌توانند مقادیر قابل توجهی کلراید داشته باشند. مواردی گزارش شده است که در آن سنگدانه استخراج شده، شن، و ماسه طبیعی حاوی مقادیر کمی کلراید بوده‌اند که استفاده از آن‌ها منجر به مقادیر کلرایدی در بتن می‌شود که بیش از حداکثر مقدار توصیف‌شده در بخش ۷-۲-۲-۵ است (Gaynor، ۱۹۸۵). البته توجه شود که کلرایدهای مقیدشده در سنگدانه‌ها ممکن است در خوردگی فولاد نقش نداشته باشند. استاندارد ASTM C1524 را می‌توان برای تعیین مقدار کلراید قابل حل در آب موجود در سنگدانه‌ها که بالقوه می‌تواند در شروع خوردگی اثر گذار باشند، استفاده کرد.

### ۹-۴-۴. آب اختلاط

آب اختلاط آشامیدنی می‌تواند حاوی مقادیر کمی کلراید باشد. ASTM C1602/C1602M دارای محدودیت‌های اختیاری برای کلرایدها در آب اختلاط است: ۵۰۰ ppm برای بتن پیش‌تنیده، عرشه پل، یا هر سازه دیگر مدنظر و ۱۰۰۰ ppm برای سایر بتن‌های مسلح در محیط‌های مرطوب.

### ۹-۴-۵. افزودنی‌ها

#### ۹-۴-۵-۱. کلیات

مواد افزودنی حاوی غلظت قابل توجهی از  $\text{CaCl}_2$  نباید در بتن حاوی فلز مدفون استفاده شوند. برخی از افزودنی‌های کاهنده آب ممکن است حاوی کلراید باشند تا عملکرد افزودنی بهبود یابد، اما زمانی که در مقادیر توصیه‌شده به بتن افزوده می‌گردند، تنها مقادیر کمی کلراید به بتن اضافه می‌کنند. مواد افزودنی با زمان گیرش معمولی که سهم کلراید آن‌ها در بتن کمتر از ۰/۱ درصد وزنی سیمان هستند، رایجترین نوع بشمار می‌روند؛ استفاده از آن‌ها باید بر اساس کاربرد ارزیابی شود. افزودنی‌های شیمیایی در ACI 212.3R به تفصیل توضیح داده شده‌اند.<sup>۱۵۴</sup>

<sup>۱۵۴</sup> توضیحات مترجم: در استاندارد ملی ایران به شماره ۲۹۳۰، مشخصات این مواد ارائه شده‌اند.

### ۹-۴-۵-۲. زودگیرکننده‌ها

افزودنی‌های زودگیرکننده، غیر از آن‌هایی که بر پایه  $\text{CaCl}_2$  هستند، در بتن بصورت‌های متفاوت و موفقیت‌آمیزی استفاده شده‌اند. زودگیرکننده‌هایی که حاوی کلراید نیستند نباید به‌طور خودکار غیرخورنده فرض شوند. موادی که بیشتر در زودگیرکننده‌های فاقد کلراید استفاده می‌شوند عبارتند از کلسیم فرمات، سدیم تیوسیانات، کلسیم نترات و کلسیم نیتريت. به‌طور کلی پذیرفته شده است که فرمات‌ها در بتن خورنده نیستند (Holm, ۱۹۸۷) و کلسیم نیتريت نیز یک بازدارنده خوردگی است.

### ۹-۴-۵-۳. بازدارنده‌های خوردگی

ACI 222.3R یک شمای کلی از بازدارنده‌های خوردگی برای سامانه‌های بتنی ارائه می‌دهد. چهار ماده افزودنی بازدارنده خوردگی در بازار رایج هستند: (۱) آمین کربوکسیلات، (۲) امولسیون آلی آمین استر، (۳) کلسیم نیتريت و (۴) نمک آلی آلکنیل دی کربوکسیلیک اسید (ACI 212.3R). افزودنی آمین کربوکسیلات از فاز بخار بازدارنده‌هایی ساخته شده که سابقه طولانی استفاده در سایر صنایع دارند. به عنوان یک بازدارنده آندی و کاتدی، این ماده می‌تواند در ساخت و سازه‌ای جدید و کاربردهای تعمیراتی مفید باشد (Bavarian و Reiner, ۲۰۰۴). گزارش شده که محافظت ایجاد شده توسط امولسیون آلی آمین استر از طریق کاهش نفوذ کلراید و تشکیل یک قشر محافظ در سطح فولاد می‌باشد (Nmai و همکاران، ۱۹۹۲؛ Bobrowski و Youn, ۱۹۹۳). ارزیابی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که امولسیون آلی آمین استر شروع خوردگی را به تاخیر می‌اندازد و نرخ خوردگی را کاهش می‌دهد (Nmai و همکاران، ۱۹۹۲؛ Krauss و Nmail, ۱۹۹۴). کلسیم نیتريت به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک ماده افزودنی زودگیرکننده استفاده می‌شود که عملکردی به عنوان یک بازدارنده خوردگی نیز دارد. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که این ماده شروع خوردگی را به تاخیر می‌اندازد و یا نرخ خوردگی را پس از شروع آن کاهش می‌دهد (Berke, ۱۹۸۵؛ Rob- و Berke, ۱۹۸۵). نسبت یون کلراید به یون نیتريت اهمیت دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که کلسیم نیتريت می‌تواند محافظت در برابر خوردگی را حتی در نسبت‌های وزنی کلراید به نیتريت بیش از ۱/۰ تا ۱/۵ نیز ایجاد نماید (Berke, ۱۹۸۷). اگر چه میزان مصرف متفاوت است اما مقادیر ۱۰ تا ۳۰ لیتر بر مترمکعب در بتن محدودهای رایج بشمار می‌رود. Berke و Rosenberg (۱۹۸۹) مطالعات گسترده‌ای در مورد استفاده از کلسیم نیتريت به عنوان یک بازدارنده خوردگی برای فولاد، فولاد گالوانیزه و آلومینیوم در بتن انجام دادند که بعداً توسط Berke و همکارانش به روز شد (۱۹۹۴). چنانچه اثر زودگیرکنندگی کلسیم نیتريت نامطلوب باشد، توصیه می‌شود از کندگیرکننده استفاده گردد. هنگامی که از کلسیم نیتريت برای حفظ مقدار هوای مورد نظر استفاده می‌شود، ممکن است مقادیر بیشتری از مواد افزودنی حباب‌هواساز لازم باشد. Montes و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که اثر کلسیم نیتريت بر بازدارندگی خوردگی در قطعات ترک خورده محدود است.

## ۹-۵. کاهش دادن خوردگی

### ۹-۵-۱. کلیات

در کاهش دادن خوردگی، نکات بسیار مهم زیر باید از منظر عمر بهره‌برداری بتن ارزیابی گردند:

الف) شروع خوردگی

ب) نمایان شدن محصولات خوردگی (لکه‌های زنگ‌زدگی)

ج) بهره‌برداری شامل ترک خوردگی، فروریختن و یا هردو

د) ظرفیت باربری سازه در صورتی که به‌طور جدی کاهش یابد یا سازه دیگر نتواند پاسخگوی هدف مورد نظر خود باشد.

ملاحظات سنتی عمر بهره‌برداری، فقط شروع خوردگی را در نظر می‌گیرند؛ با این حال حتی برای سازه‌های نمایان و قابل مشاهده، معیار (ب) یا (ج) ممکن است در طراحی مناسبتر باشد.

خوردگی فولاد در بتن به محیطی که سازه در آن قرار می‌گیرد، بستگی دارد. جدول ۱۹-۳-۱ در نشریه ACI 318-14 طبقه‌بندی شرایط رویارویی را برای حفاظت در برابر خوردگی آرماتورها مشخص می‌کند: C0 برای بتن خشک یا محافظت شده از رطوبت تعیین شده است. C1 برای بتن در معرض رطوبت است که در مواجهه منع خارجی کلراید نبوده و C2 برای بتن در معرض رطوبت و منع خارجی کلرایدهای حاصل از مواد شیمیایی یخ‌زدا، نمک، آب شور، آب دریا یا پاشش از این منابع، تعیین شده است. با انتخاب اقدامات و موادی که شروع خوردگی را به تاخیر می‌اندازد و سپس نرخ آن را کاهش می‌دهند، می‌توان خوردگی را به حداقل رساند. به‌طور فزاینده‌ای از مدل‌های پیش‌بینی عمر مفید برای تعیین ترکیبی از مصالح بتن که می‌تواند در راستای دستیابی به عمر بهره‌برداری طراحی شده از دیدگاه خوردگی کمک کند، استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به مدل‌های عمر مفید در ACI 365.1R آورده شده است. راهنمای دقیق در مورد استراتژی‌های پیشگیرانه را می‌توان در ACI 222.3R یافت. بحث کلی در مورد برخی از عوامل موثر بر مقاومت در برابر خوردگی در بخش‌های زیر شرح داده شده است.

### ۹-۵-۲. طراحی و فرآیند

#### ۹-۵-۲-۱. کیفیت بتن و پوشش روی فولاد

#### ۹-۵-۲-۱-۱. ضخامت پوشش

مطالعات گسترده نشان داده‌اند که پوشش ۲۵ میلی‌متری روی میلگردهای فولادی لخت، حتی اگر بتن نسبت  $w/cm$  کمتر از  $۰/۳$  داشته باشد، برای حفاظت از کلراید در محیط‌های خورنده شدید، ناکافی است (Clear، ۱۹۷۶؛ Pfeifer و همکاران، ۱۹۸۷؛ Marusin و Pfeifer، ۱۹۸۵). آزمایش‌ها همچنین نشان داده‌اند که حتی در بتن‌های با کیفیت، مانند بتن‌های ساخته شده با نسبت  $w/cm$  برابر با  $۰/۳$ ، مقدار کلراید در ضخامت ۱۲ میلی‌متری از سطح بتن می‌تواند بسیار بیشتر از مقدار آن در عمق ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متری باشد. در

نتیجه، ضخامت پوشش برای محیط‌های خورنده متوسط تا شدید باید حداقل ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر باشد. بتن، نمک‌های استفاده‌شده در عملیات یخ‌زدایی را جذب می‌کند. برای به تعویق انداختن شروع خوردگی، ضخامت پوشش باید در حداکثر مقدار ممکن باشد. Reinschmidt و Trejo (۲۰۰۷) گزارش کردند که افزایش پوشش بتن موثرترین راه برای افزایش زمان رسیدن به خوردگی و افزایش عمر مفید سازه بتنی است. با این حال، ضخامت پوشش بیش از حد می‌تواند باعث افزایش ترک خوردگی گردد. Weyers و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر ضخامت پوشش برای پل‌ها را بررسی کردند و ضخامت پوشش ۷۰ میلی‌متری را توصیه نمودند. ACI 318-14 الزامات پوشش بتنی را برای شرایط رویارویی C2 مشخص کرده‌است که این موارد به شرایط رویارویی، نوع عضو، و نوع و اندازه آرماتورها بستگی دارد<sup>۱۵۵</sup>.

### ۹-۵-۲-۱-۲. کیفیت بتن

تحقیقات آزمایشگاهی متعددی نشان داده‌اند که بتن ساخته شده با نسبت  $w/cm$  کم و دارای پوشش کافی روی فولاد به میزان قابل توجهی بهتر از بتن ساخته شده با نسبت  $w/cm$  بیشتر عمل می‌کند. نفوذ یون کلراید تا عمق ۲۵ میلی‌متر در بتن‌های ساخته شده با نسبت  $w/cm$  برابر با  $۰/۴$  و  $۰/۵$ ، تقریباً ۴۰۰ تا ۶۰۰ درصد بیشتر از بتن با نسبت  $w/cm$  برابر با  $۰/۳۲$  است (Pfeifer و همکاران، ۱۹۸۷). به‌طور مشابه، استفاده مناسب از مواد مکمل سیمان می‌تواند زمان شروع خوردگی را افزایش و نرخ آن را کاهش دهد.

ACI 318 و سایر مشخصات مربوطه، الزامات سختگیرانه‌ای را برای نسبت‌های مخلوط بتن در شرایط رویارویی شدید کلرایدی تعیین می‌کند. اداره مدیریت راه‌های عمومی نروژ<sup>۱۵۶</sup> (۲۰۰۹) بسته به محل، الزامات خاصی را برای نسبت‌های مخلوط دارد (نسبت  $w/cm$  کمتر از  $۰/۳۸$  تا  $۰/۴$  و میزان مشخصی دوده‌سیلیس). مشخصات پروژه کمر بند بزرگ (Storbælt)، نسبت  $w/cm$  کم با استفاده از دوده‌سیلیس و خاکستر بادی برای ارائه عمر مفید ۱۰۰ ساله را الزامی میداند (انتشارات فنی Storbælt، ۱۹۹۹). فلسفه‌ای مشابه برای نسبت‌های مخلوط ۱ تا ۲ میلیون مترمکعب بتن جهت راه اتصال ۱۰ کیلومتری در Øresund از سوئد به دانمارک استفاده شد (Henriksen و همکاران، ۲۰۰۰).

همچنین کلرایدهای مخلوط شده در بتن می‌توانند بر کیفیت و عملکرد دراز مدت سازه‌های بتنی تأثیر بگذارند. جدول ۹-۵-۲-۱-۲ محدودیت‌های ارائه شده توسط ACI 222R را در خصوص کلراید در بتن تازه ساخته شده نشان می‌دهد.

<sup>۱۵۵</sup> توضیحات مترجم: در تجدید نظر دوم آئین نامه بتن ایران (آبا) به این امر توجه ویژه‌ای در شرایط رویارویی مختلف شده است.  
<sup>۱۵۶</sup> Norwegian Public Roads Administration

جدول ۹-۲-۵-۲. محدودیت‌های کلراید در بتن تازه ساخته شده (توصیه شده توسط ACI 222R)

روش Soxhlet*	کلراید محلول در آب (ASTM C1218/C1218M)	کلراید محلول در اسید (ASTM C1152/C1152M)	
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸	بتن پیش‌تنیده
۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۰	بتن مسلح در شرایط مرطوب
۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۰	بتن مسلح در شرایط خشک یا محافظت‌شده

\* روش Soxhlet در ACI 222.1R شرح داده شده است.  
نکته: تمامی مقادیر کلراید معرفی شده بر حسب میزان نسبت وزنی CI به سیمان می‌باشند.

توجه گردد که در مشخصات سایر کشورها، مانند CSA A23.1-14/CSA A23.2 در کانادا و EN206 در اروپا، محدودیت‌های میزان کلراید به صورت درصد وزنی در کل مواد سیمانی یعنی سیمان پرتلند به اضافه مواد مکمل سیمانی بیان می‌شود.

توجه شود که آستانه کلراید برای بتن پیش‌تنیده کمتر از آستانه آن برای بتن مسلح است. فولادهای پیش‌تنیده دارای ترکیب شیمیایی متفاوتی نسبت به فولادهای تقویت‌کننده معمولی هستند و اغلب تحت تاثیر سازوکارهای خوردگی بیشتری قرار می‌گیرند (بخش ۹-۶). بر اثر این سازوکارهای خوردگی و تنش‌های زیاد در این فولادها، محدودیت‌های اضافی در مقایسه با فولاد سیاه منظور شده است. نوع سازه و اهمیت آن، روش‌های ساخت و شرایط رویارویی نیز بر عملکرد این فولادها در برابر خوردگی تأثیر می‌گذارد.

گزارش مؤسسه دولتی بزرگراه‌ها<sup>۱۵۷</sup> برای سازه‌های پس کشیده (FHWA، ۲۰۱۲) بیان می‌دارد که، اگرچه آئین‌نامه‌ها مقدار حداکثر ۰/۰۸ درصد کل سیمان را برای کلراید در گروت تازه مجاز می‌دانند اما ممکن است به مقدار کلراید کل کمتری نیاز باشد.

### ۹-۲-۵-۳. ترک‌ها

ترک‌ها سرعت نفوذ کلراید بسیار سریع‌تری را نسبت به فرآیندهای انتشار فراهم می‌آورند و می‌توانند سلول‌هایی با غلظت زیاد کلراید را ایجاد نمایند که خوردگی را تسریع می‌کنند. ACI 318-99 به این نتیجه رسید که نقش ترک‌ها در خوردگی آرماتورها بحث‌برانگیز است و بدون داده‌های علمی معتبری که عرض ترک را با فعالیت خوردگی مرتبط می‌سازد، روش طراحی را برای محدود کردن عرض ترک اصلاح نمود، عرض ترک ( $W_{max}$ ) را از معادله طراحی حذف و معادله‌ای بر اساس کنترل فاصله میلگردها را جایگزین کرد. اگرچه ACI 318 محدودیت‌های صریحی را برای عرض ترک در معادله ارائه نمی‌کند، این معادله به‌طور غیر مستقیم حداکثر عرض ترک را بین ۰/۴ تا ۰/۵۲ میلی‌متر محدود می‌سازد.

علاوه بر این، در برخی حالات نظیر زمانی که نوک ترک به فولاد می‌رسد، اثرات وجود ترک بر خوردگی ممکن است بیش از ورود مواد مضر باشد؛ در این حالت نسبت آند کوچک به کاتد بزرگ ایجاد می‌شود که ممکن است خوردگی و همچنین ترک خوردگی بیشتر را تسریع نماید. برای مثال، گزارش شده است که در سازه‌های غوطه‌ور در آب دریا، ترک‌های بزرگ و دینامیکی (فعال) توسط بروسیت و آراگونیت (منزیم هیدروکسید و کلسیم کربنات) در یک دوره نسبتاً کوتاه بسته می‌شوند (Espelid و Fidjestøl، ۱۹۸۶؛ Newman و Buenfeld، ۱۹۸۶). ACI 224R و ACI 224.1R دیدگاه کلی مناسبی از مسائل مربوط به ترک‌ها و خوردگی ارائه می‌دهند. برای به حداقل رساندن تشکیل ترک، بتن باید همیشه با کمترین میزان آب ممکن برای ایجاد روانی مطلوب ساخته شود. همچنین، جزئیات مناسب آرماتورها، حداقل میزان کافی آرماتورهای سازه‌ای، و کنترل حرارت هیدراته‌شدن و اثرات قیدها در ساخت سازه‌ای که در آن ترک‌ها، دوام در برابر خوردگی را کاهش نمی‌دهند، مهم هستند. استفاده از افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی<sup>۵۸</sup>، سنگدانه‌های سبک از قبل خیس شده اشباع برای عمل‌آوری داخلی، و اصلاح مخلوط در راستای بهینه‌سازی و کاهش حجم خمیر در آن، راهکارهایی اضافی برای کاهش ترک خوردگی در مخلوط‌های بتن می‌باشند.

#### ۹-۲-۲. رسانایی بتن

هنگامی که بتن نسبتاً خشک نگه داشته شود، خوردگی فولاد به حداقل می‌رسد. به عنوان مثال، اگر بتن حاوی حداکثر ۲٪  $CaCl_2$  با حداکثر رطوبت نسبی داخلی ۵۰ تا ۶۰٪ خشک شود، فولاد مدفون آن نمی‌تواند خورده شده و یا با سرعت غیر قابل اغماضی خورده شود (Tutti، ۱۹۸۲). با این حال، حفظ رطوبت نسبی داخلی کمتر از میزان ۵۰٪، همواره امکان پذیر نیست.

در حالی که بسته به شرایط تر و خشک شدن محیط، نواحی سطحی سازه‌های بتنی نمایان دارای مقادیر رسانایی الکتریکی زیاد یا کمی هستند، معمولاً جهت دستیابی به رسانایی الکتریکی کم در بخش‌های داخلی بتن به دوره‌های خشک شدن طولانی نیاز است. Pfeifer و همکاران (۱۹۸۷) دریافته‌اند که دال‌های بتن مسلح به ضخامت ۱۸۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر با نسبت  $w/cm$  در محدوده ۰/۳۰ تا ۰/۵۰ اساساً دارای مقادیر اولیه برابری از مقاومت الکتریکی AC بین شبکه آرماتور فوقانی و تحتانی در سن ۲۸ روزه هستند.

مصالح سیمانی که شامل مواد مکمل سیمانی هستند می‌توانند مقاومت الکتریکی بسیار زیادی در بتن ایجاد کنند. سرباره، خاکستر بادی و بویژه دوده سیلیس، مقاومت الکتریکی بسیار بیشتری از آنچه توسط بتن حاوی سیمان پرتلند ایجاد می‌شود، فراهم می‌آورند (Cabreria و Ghoddoussi، ۱۹۹۴؛ Frearson و Fidjestøl، ۱۹۹۴؛ Gautefall و Vennesland، ۱۹۸۵؛ Berke، ۱۹۸۸). به‌طور مشابه، آزمایش‌های مقاومت AC بر روی بتن ساخته شده با دوده سیلیس و نسبت  $w/cm$  برابر با ۰/۲۰، مقاومت الکتریکی اولیه بسیار زیادی را در مقایسه با بتن‌های ساخته شده با نسبت  $w/cm$  بین ۰/۳۰ تا ۰/۵۰ نشان می‌دهد. مقاومت الکتریکی زیاد بتن حاوی دوده سیلیسی می‌تواند به دلیل ریزساختار خمیر تراکم‌تر، تغییرات در شیمی محلول منفذی، و خود

خشک‌شدگی در نسبت‌های کم w/cm باشد. تحقیقات میدانی در بیش از ۲۰ سال، عملکرد بلندمدت مواد مکمل سیمان (دوده‌سیلیس) را تایید می‌کند (Fidjestol و Justnes؛ ۲۰۰۲؛ Skjolsvold و همکاران، ۲۰۰۷). مقاومت الکتریکی زیاد چسباننده‌های آمیخته بوسیله آزمایش‌های ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) که روشی برای تعیین رسانایی ارائه می‌کند که به عنوان شاخص غیرمستقیمی از انتشار کلراید استفاده می‌شود، تأیید می‌گردد. در چندین تحقیق، ارتباط میان مقاومت الکتریکی و انتشار کلراید وجود داشته که توسط آزمایش‌های متداول‌تر انتشار یا حوضچه‌سازی تعیین شده است (Detwiler و Fapohunda؛ ۱۹۹۳؛ Wolsiefer، ۱۹۹۱؛ Misra و همکاران، ۱۹۹۴؛ Öst و Burg، ۱۹۹۲). با این حال، همان‌طور که در استاندارد مشخص شده است، نمی‌توان این رابطه را جامع فرض نمود زیرا به ترکیب چسباننده، مانند مقدار و نوع سیمان و مواد سیمانی استفاده شده نیز وابسته است.

### ۹-۵-۳. جوانب اجرایی

#### ۹-۵-۳-۱. مهارت اجرایی

مهارت اجرایی مناسب برای دستیابی به بتن یکنواخت با نفوذپذیری کم الزامی است. برای بتن با اسلامپ کم می‌توان بوسیله تراکم خوب از جداشدگی و کرم‌شدگی جلوگیری نمود. رعایت الزامات و مشخصات مربوط به دوام ضروری است.

#### ۹-۵-۳-۲. جزئیات مسلح‌کننده‌ها

دو عامل مهم هستند که باید در جزئیات مسلح‌کننده‌ها در نظر گرفته شوند:

- ۱- باید فاصله کافی برای ایجاد پوشش بتنی مناسب در نظر گرفته شود تا از کرم‌شدگی و تراکم ضعیف جلوگیری و پیوند خوبی بین بتن و فولاد برقرار گردد.
- ۲- خوردگی در میلگردهای با قطر کم نسبتاً شدیدتر از میلگردهای با قطر زیاد می‌باشد. خوردگی به میزان ۱ میلی‌متر در یک میلگرد شماره ۱۰ میلی‌متری به معنای از دست دادن تقریباً ۴۰٪ سطح مقطع می‌باشد در حالی که برای میلگرد شماره ۲۵ میلی‌متری به معنای ۱۵٪ از دست رفتن سطح مقطع است. با این حال، توجه گردد میلگردهای با قطر کمتر می‌توانند باعث توزیع بهتر ترک شوند، در حالیکه میلگردهای با قطر زیادتر می‌توانند باعث ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر نسبت به میلگردهای با قطر کمتر گردند.

#### ۹-۵-۳-۳. عمل آوری

عمل آوری خوب به دلیل افزایش هیدراته‌شدن سیمان، باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود. حداقل ۷ روز عمل آوری مرطوب مداوم یا عمل آوری با مواد غشاساز به‌طور ایده‌آل مشخص شده است. محدود کردن تنش‌های حرارتی اولیه نیز مهم است. عمل آوری خوب مولفه‌های انتقال و همچنین شار عبوری طی آزمایش ASTM C1202 (یا AASHTO T 277) را کاهش می‌دهد (Acker و همکاران، ۱۹۸۶؛ Marusin، ۱۹۸۹). علاوه بر این، به دلیل عمل آوری ناکافی، نرخ نفوذ کلراید می‌تواند در بخش نزدیک به سطح پوشش بتن،

فصل نهم - خوردگی فلزات و تخریب سایر مصالح مدفون در بتن ..... ۱۶۹

چندین برابر بیشتر از عمق آن باشد (Hooton و همکاران، ۲۰۰۲).

#### ۹-۳-۵-۴. قالب‌بندی

قالب‌بندی خوب و محکم الزامی است. فراهم نمودن تکیه گاه مناسب برای پرداخت سطح و تکیه گاه‌های صحیح برای آرماتورها جهت تأمین پوشش تعیین شده روی میلگردها، اهمیت دارد. به صورت مشابه، استفاده از فاصله‌اندازهای (لقمه‌های) جانبی قالب برای میلگردها در قالب‌های عمودی نیز مهم است. آسترهای با نفوذپذیری کنترل‌شده برای قالب‌بندی ممکن است کیفیت پوشش را بهبود بخشد (Sha'at و همکاران، ۱۹۹۳).

#### ۹-۵-۵-۴. طراحی

طراحی می‌تواند کمک زیادی به کاهش حمله خوردگی کند زیرا جزئیات مناسب می‌تواند تجمع نمک‌ها و ایجاد نواحی با رطوبت زیاد که در آن‌ها خوردگی ادامه می‌یابد، را به حداقل برساند.

#### ۹-۴-۵-۱. چیدمان کلی سازه

قرارگیری و چیدمان کلی سازه در یک شرایط محیطی مطلوب اهمیت دارد. افزایش ارتفاع پل بر روی دریا، رویارویی با کلراید را کاهش می‌دهد: بازرسی میدانی از پل‌های بتنی نشان داد که افزایش ارتفاع پل از سطح دریا از ۸ به ۲۸ متر، مقدار تجمع کلرایدها بر روی سطح را تا ۸۵ درصد کاهش می‌دهد (Blankvoll و Fluge، ۱۹۹۵). همچنین رویارویی با کلراید در سمت پشت به باد سازه تا هشت برابر بیشتر از سمت بادگیر سازه بود. به‌طور مشابه، قرارگیری ستون‌های پل متحرک به دور از پاشش ناشی از عبور و مرور، رویارویی بتن با کلراید را کاهش می‌دهد.

#### ۹-۴-۵-۲. زهکشی

باید توجه ویژه‌ای به جزئیات طراحی شود تا اطمینان حاصل گردد که آب زهکشی شده و بر روی سطوح جمع نمی‌شود. در این میان تعدادی از جزئیات مانند شیب مناسب و لوله‌های زهکشی ممتد که آب را از سطح بتن دور می‌کنند، مهم هستند (Kompen، ۱۹۹۴).

#### ۹-۴-۵-۳. اجزاء نمایان

باید به اجزاء نیمه مدفون یا نیمه نمایان مانند پیچ‌ها که مستقیماً با محیط‌های خورنده رویارو هستند، توجه شود. دوام این اجزاء در برابر محیط خورنده باید بررسی گردد و از کنار هم قرار گرفتن فلزات با جنس متفاوت خودداری شود. بتن باید با دقت در اطراف اجزاء مدفون ریخته شود تا به خوبی متراکم گردد و از ایجاد مسیرهایی برای رسیدن آسان محلول‌های خورنده به داخل بتن جلوگیری شود.

### ۹-۵-۵. سامانه‌های محافظتی خاص

هزینه‌های تعمیرات آسیب‌های ناشی از خوردگی بسیار زیاد است. سامانه‌های حفاظتی متعددی پیشنهاد شده‌اند و خواننده جهت درک جامع از گزینه‌های حفاظتی و کاهش دهنده، به ACI 222R، ACI 222.3R و ACI 515.2R ارجاع داده می‌شود. نشان داده شده است که برخی از این سامانه‌های محافظتی، کارآمد می‌باشند. تعدادی از این سامانه‌ها شرح زیر می‌باشند:

الف) روکش‌ها و وصله‌های با نسبت  $w/cm$  بسیار کم (۰/۳۲)، روکش‌های بتن اصلاح شده با لاتکس (Clear و Hay، ۱۹۷۳؛ FHWA، ۱۹۷۵)، بتن حاوی دوده سیلیس، و بتن حاوی مواد افزودنی کاهنده آب قوی (فوق روان کننده).

ب) میلگردهای فولادی پوشش داده شده با اپوکسی.

ج) فولادهای مقاوم در برابر زنگ‌زدن (ضد زنگ) (Rasheeduzzafar و همکاران، ۱۹۹۲؛ Pil- و Trejo و dai، ۲۰۰۴؛ Virmani و Clemeña، ۲۰۰۴؛ Williamson و همکاران، ۲۰۰۳).

د) غشاهای ضد آب (Van Til و همکاران، ۱۹۷۶).

ه) سامانه‌های محافظ سطحی تولید شده از سیلان‌ها، سیلوکسان‌ها، اپوکسی‌ها، پلی اورتان‌ها و متاکریلات‌ها (Van Daeer و Sheret، ۱۹۷۵).

و) محافظت کاتدی.

### ۹-۶. خوردگی آرماتورهای فولادی پیش تنیده

سازوکارها و خطرات مرتبط با خوردگی کلی سطحی و حفره‌ای در سامانه‌های کابل‌های فولادی پیش تنیده قابل مقایسه با میلگردهای فولادی معمولی (بخش‌های ۹-۱ تا ۹-۵) با دقت اضافی در مورد گسیختگی ناشی از تُرد شدن هیدروژنی<sup>۱۵۹</sup> و ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش<sup>۱۶۰</sup> می‌باشد. تُرد شدن هیدروژنی نتیجه از دست دادن شکل‌پذیری در آرماتور فولادی ناشی از جذب موضعی هیدروژن اتمی آزاد شده از پیل‌های خوردگی و تماس با آب، هیدروژن سولفید و سایر منابع در سطح فولاد است. ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش به‌طور مشابه یک رویداد گسیختگی شکننده است که ناشی از برهمکنش تنش کششی در آرماتور فولادی و محیط خورنده ایجاد می‌شود (همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد) می‌باشد. برخی اعضای سامانه‌های فولادی پیش تنیده، مانند مهارهای انتهایی و کابل‌های دال، که در معرض محلول‌های یخ‌زدا قرار می‌گیرند یا با سایر اجزای فلزی (به عنوان مثال، کانال‌ها) در تماس هستند، ممکن است به دلیل کاهش حفاظت پوشش بتنی، اثر گالوانیک، یا قرار گرفتن مستقیم در محیط‌های تهاجمی خطر بیشتری داشته باشند. برخلاف خوردگی کلی سطحی، این سازوکارها باعث از دست دادن ناگهانی عملکرد پیش تنیدگی و آسیب دائمی به عضو(های) تحت تاثیر می‌شوند، و مکان یابی آن‌ها از طریق بازرسی یا آزمایش در زمانی که سازه در حال بهره‌برداری است، دشوار می‌باشد. برای کاهش خطر وقوع، اقدامات

<sup>159</sup> Hydrogen embrittlement

<sup>160</sup> Stress corrosion cracking

پیشگیرانه در طی ساخت مورد نیاز است. ACI 222.2R جزئیات بیشتری در مورد سامانه‌های پیش‌تنیدگی، تخریب، محافظت، ارزیابی میدانی، و روش‌های ترمیم ارائه می‌دهد.

از خوردگی فولادهای پیش‌تنیده، زمانی به بهترین شکل جلوگیری می‌گردد که اقدامات پیشگیرانه در کارگاه ساخت شروع شود و از طریق نصب و قرار دادن مناسب در غلاف، بتن یا مصالح روانمالات بادوام ادامه یابد. مواد خام فولادی پیش‌تنیده و محصولات مهار انتهایی باید از قرار گرفتن در معرض عناصر خورنده مانند باران، برف، مواد شیمیایی یخ‌زده، پاشیدن نمک و آب در کارگاه تولید، طی حمل و نقل به سمت محل ساخت، و طی فرآیند انبار کردن در کارگاه تا زمان جایدهی محافظت شوند. در حالت مطلوب، کابل‌ها و سیم‌ها باید در داخل یک انبار با آب و هوای کنترل شده نگهداشته شوند، پس از بسته‌بندی با سلفون حرارتی و پوشاندن با برزنت حمل شوند و در کارگاه در یک محیط با آب و هوای کنترل شده انبار گردند. این اقدامات از تشکیل هرگونه پیل خوردگی قبل از جایدهی جلوگیری می‌کنند.

حفاظت از کابل‌ها، کلاف‌ها یا سیم‌ها باید تا زمانی که برای نصب آماده می‌شوند، در قالب قرار می‌گیرند و برای کشش آماده می‌گردند، ادامه یابد. حفاظت موقت از کابل‌ها یا کلاف‌ها و ادوات مهار در انتها و درزهای اجرایی توصیه می‌شود، زیرا آرماتور پیش‌تنیده ممکن است در طول دوره‌ای که بتن ریخته می‌شود و به مقاومت لازم برای اعمال تنش می‌رسد، در معرض جو قرار گیرد. غلاف‌ها و مجراها باید آییند باشند و آب اضافی آن‌ها برداشته شود. هر دنباله‌ای از کابل یا طول اضافی کلاف‌ها باید پس از اتمام بازرسی و شروع اعمال تنش بریده شده و پوشانده شود. قبل و بعد از اعمال تنش، تمام سطوح در معرض باید بازرسی و تمیز شوند، آب برداشته شود، و برای جلوگیری از قرار گرفتن در معرض، در مدت کوتاهی پس از آن سوراخ‌های مهارها با روان‌مالات پر شوند. سامانه‌هایی که از محفظه‌های گریس در مهارهای انتهایی استفاده می‌کنند، باید به صورت دوره‌ای بازرسی شوند تا اطمینان حاصل شود که گریس نشتی ندارد و محفظه‌ها پر هستند. ارزیابی تخصصی و روش‌های تعمیر معینی برای رسیدگی کردن به سامانه‌های پیش‌تنیدگی برگزیده شده، پس از بهره‌برداری، توسعه داده شده است. برای بحث دقیق‌تر در مورد خوردگی کلاف پیش‌تنیدگی، به ACI 222.2R مراجعه شود.

## ۹-۷. خرابی سایر مواد به غیر از فولاد

### ۹-۷-۱. مقدمه

گاهی اوقات از فلزات غیر آهنی در بتن استفاده می‌شود. این فلزات عبارتند از: آلومینیوم، سرب، مس و آلیاژهای مس، روی، کادمیوم، فلز مونل<sup>۱۶۱</sup>، استلایت<sup>۱۶۲</sup> (آلیاژهای کبالت-کروم-تنگستن)، نقره و قلع. از فولاد گالوانیزه و آلیاژهای مخصوص فولاد مانند فولادهای ضد زنگ و فولادهای کروم-نیکل نیز استفاده شده است. از روی و کادمیوم به عنوان پوشش روی فولاد استفاده می‌شود.

<sup>161</sup> Monel metal

<sup>162</sup> Stellite

خوردگی فلزات یا آلیاژهای غیر آهنی می‌تواند ناشی از پدیده‌های مختلفی باشد. فلز ممکن است در بتن با قلیائیت زیاد یا در حضور یون‌های کلراید ناپایدار باشد. حالت اول زمانی اتفاق می‌افتد که بتن نسبتاً تازه باشد و ممکن است خود محدود کننده باشد. حالت دوم به ویژه زمانی که فلز در تماس با فلزی غیر مشابه باشد، می‌تواند شروع به خوردگی کند. هنگامی که فلزات غیر مشابه در تماس الکتریکی (کنار هم قرار گرفته) هستند، یک سلول گالوانی می‌تواند رخ دهد که منجر به خوردگی فلز فعال‌تر می‌گردد. اطلاعات دقیق‌تر در مورد خوردگی فلزات غیر آهنی در دسترس می‌باشد (Fintel, ۱۹۸۴؛ Erlin, ۲۰۰۶).

### ۹-۷-۲. آلومینیوم

خوردگی آلومینیوم تعیبه شده در بتن می‌تواند باعث ترک خوردن بتن شود. اگر بتن حاوی فولاد در تماس با آلومینیوم باشد، و کلرایدها در غلظت‌های قابل توجهی وجود داشته باشند یا سیمان دارای مقدار قلیایی زیاد باشد، شرایط مساعد برای خوردگی ایجاد می‌گردد (Woods, ۱۹۶۸؛ Erlin, ۲۰۰۶). هنگامی که فلزات در کنار هم قرار می‌گیرند، افزایش نسبت سطح فولاد، به ویژه در حضور غلظت‌های قابل توجه کلراید، خوردگی آلومینیوم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است زمانی که بتن تازه با آلومینیوم تماس پیدا کند، گاز هیدروژن ایجاد شود؛ که امکان دارد تخلخل بتن و در نتیجه نفوذ عوامل خوردنده در آینده را افزایش دهد. برخی از آلیاژهای آلومینیوم نسبت به انواع دیگر، بیشتر مستعد این مشکل هستند. نشان داده شده است که بازدارنده‌های خوردگی مانند نیتريت کلسیم باعث بهبود مقاومت در برابر خوردگی آلومینیوم در بتن می‌شوند (Berke و Rosenberg, ۱۹۸۹).

### ۹-۷-۳. سرب

در بتن مرطوب، سرب توسط  $\text{CaOH}_2$  بتن مورد حمله قرار می‌گیرد و ممکن است طی چند سال از بین برود. تماس سرب با آرماتورهای فولادی می‌تواند حمله را تسریع نماید. سرب باید توسط لایه پلاستیکی محافظ یا سایر موادی که تحت تاثیر بتن مرطوب قرار نمی‌گیرند، از بتن جدا شود. خوردگی سرب مدفون در بتن به احتمال زیاد به بتن آسیب نمی‌رساند (Alhassan, ۲۰۰۵).

### ۹-۷-۴. مس و آلیاژهای مسی

مس به‌طور معمول توسط بتن خورده نمی‌شود، همان‌طور که استفاده گسترده و موفقیت‌آمیز از نوارهای آئیند مسی و تعیبه لوله‌های مسی در بتن برای چندین سال مشهود است (Erlin, ۲۰۰۶). با این حال، خوردگی لوله‌های مسی در جایی که آمونیاک وجود دارد گزارش شده است. همچنین گزارش‌هایی مبنی بر اینکه مقادیر کمی آمونیاک و احتمالاً نیترات‌ها می‌تواند باعث ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش در مس تعیبه شده شوند. اگر فولاد به مس متصل شود، خوردگی گالوانیک در فولاد رخ می‌دهد (Erlin, ۲۰۰۶).

### ۹-۷-۵. روی

روی با مواد قلیایی که در بتن وجود دارند، واکنش نشان می‌دهد. با این حال، گاهی اوقات روی به شکل پوشش گالوانیزه بر روی میلگردهای فولادی عمداً در بتن تعیبه می‌شود. داده‌های موجود در مورد مزایای این پوشش، در صورت وجود، متناقض هستند (Cook، ۱۹۸۰؛ Stark و Perenchio، ۱۹۷۵؛ Hill و همکاران، ۱۹۷۶؛ Griffin، ۱۹۶۹؛ مؤسسه دولتی بزرگراه‌ها، ۱۹۷۶). فرو بردن میله‌های گالوانیزه در کرومات یا استفاده از ۴۰۰ ppm کرومات در آب اختلاط برای جلوگیری از ایجاد هیدروژن در بتن تازه توصیه می‌گردد. به دلیل آلرژی‌های پوستی احتمالی، هنگام استفاده از نمک‌های کروم احتیاط لازم است. علاوه بر این، به کاربران هشدار داده می‌شود که اجازه ندهند فولاد گالوانیزه و سیاه در یک سازه با یکدیگر تماس پیدا کنند زیرا استفاده از فلزات غیر مشابه می‌تواند منجر به خوردگی گالوانیکی گردد. نشان داده شده است که بازدارنده‌های خوردگی، مانند نیتريت کلسیم، مقاومت در برابر خوردگی روی در بتن را بهبود می‌بخشند (Page و Rosenber، ۱۹۸۹؛ Berke و همکاران، ۱۹۸۹).

### ۹-۷-۶. سایر فلزات

کروم و آلیاژهای نیکل، مانند نقره و قلع به‌طور کلی مقاومت خوبی در برابر خوردگی در بتن دارند. مقاومت در برابر خوردگی برخی از این فلزات ممکن است به دلیل وجود کلرایدهای محلول آب دریا یا نمک‌های یخ‌زدا اثر منفی داشته باشد. استفاده از فولاد زنگ‌نزن ممکن است از نظر اقتصادی در برخی از محیط‌های دارای کلراید زیاد که هزینه اولیه زیادتر با کاهش هزینه تمهیدات در بهره‌برداری در طول چرخه عمر جبران می‌شود، توجیه داشته باشد. به عنوان مثال می‌توان مکان‌های دریایی و عرشه‌های پل به‌شدت یخ‌زدایی شده را نام برد. با این حال، فولادهای ضد زنگ سریهای ۳۰۰ زمانی که دما بیش از ۶۰ درجه سلسیوس باشد و محلول‌های کلراید با مواد فولادی در تماس باشند، مستعد ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش هستند. تعیبه فولادهایی که در طبیعت هوازده شده‌اند در بتن حاوی رطوبت و کلراید معمولاً عملکرد خوبی نشان نمی‌دهند. هوازده‌گی فولادهای متصل به بتن ممکن است موجب خروج زنگ‌زدگی‌ها از داخل بتن شده و لکه‌دار شدن سطوح بتن گردند (McDad و همکاران، ۲۰۰۰).

### ۹-۷-۷. پلیمرها

پلیمرها به‌طور فزاینده‌ای در بتن در کاربردهایی مانند لوله‌ها، سپرهای حفاظتی، آرما تورها، نوارهای آب‌بند، لقمه‌ها و تسلیح بتن در حال استفاده می‌باشند. بسیاری از پلاستیک‌ها در برابر قلیایی‌های قوی مقاوم هستند و بنابراین انتظار می‌رود عملکرد رضایت‌بخشی داشته باشند. با این حال، به دلیل تنوع زیاد پلاستیک‌ها و مواد ترکیب شده با آن‌ها، باید داده‌های آزمایشی دقیقی برای هر کاربرد مورد نظر ایجاد گردد.

### ۹-۷-۸. چوب

چوب به طور گسترده در ملات و بتن یا در کنار آن استفاده شده است. چنین استفاده‌های شامل ترکیب خاک اره، خمیر چوب و الیاف چوب در بتن و مدفون نمودن چوب در بتن می‌باشد (Erlin, ۲۰۰۶). استفاده از خاک اره، خرده چوب یا الیاف فرآوری نشده معمولاً منجر به بتن کندگیر و کم مقاومت می‌شود (Erlin, ۲۰۰۶). افزودن آهک هیدراته به اندازه یک سوم تا یک دوم حجم سیمان معمولاً در به حداقل رساندن این مشکلات موثر است. علاوه بر این، افزودن تا ۵ درصد از  $CaCl_2$  دو آبه بر حسب وزن سیمان نیز در به حداقل رساندن این مشکلات کمک کرده است (Erlin, ۲۰۰۶).  $CaCl_2$  در چنین مقادیری می‌تواند باعث خوردگی فلزات تعبیه شده گردد، و می‌تواند اثرات نامطلوبی بر بتن داشته باشد. مشکل دیگر چنین بتنی تغییر حجم زیاد است که حتی با تغییر رطوبت جوی نیز رخ می‌دهد. این تغییر حجم ممکن است منجر به ترک خوردن و اعوجاج در بتن گردد (Erlin, ۲۰۰۶). جایدهی الوار در بتن گاهی اوقات منجر به شسته شدن چوب توسط  $Ca(OH)_2$  و بدنبال آن تخریب شده است. چوب‌های نرم، ترجیحاً با مقدار صمغ زیاد، مناسب‌ترین چوب برای چنین استفاده‌های گزارش شده‌اند (Erlin, ۲۰۰۶).

### ۹-۷-۹. خلاصه

بتن حاوی سیمان پرتلند می‌تواند محافظت عالی در برابر خوردگی برای فولاد تعبیه شده در آن ایجاد کند. هنگامی که خوردگی رخ می‌دهد، هزینه‌های تعمیرات می‌تواند بسیار زیاد باشد. استفاده از بتن با کیفیت؛ پوشش کافی بر روی فولاد؛ نوع مناسب مسلح کننده؛ و طراحی صحیح شامل جزئیات و حفاظت اضافی، برای به حداقل رساندن خرابی ناشی از خوردگی فولاد، پیش نیاز می‌باشند.  $ACI\ 222R$  و  $ACI\ 222.3R$  خلاصه‌ای از علل و سازوکارهای خوردگی فولاد را ارائه می‌دهند. آن‌ها شامل اطلاعاتی در مورد نحوه محافظت در برابر خوردگی در سازه‌های جدید و روش‌هایی برای شناسایی محیط‌های خورنده و اقدامات اصلاحی در جایی که خوردگی در حال رخ دادن است، می‌باشند.

فصل ۱۰

سایش

## ۱۰-۱. مقدمه

مقاومت سایشی بتن به عنوان توانایی یک سطح برای مقاومت در برابر سایش در اثر ضربه، مالش و اصطکاک تعریف می‌شود. سایش کف‌ها، روسازی‌ها، پیاده‌روها، دال‌های پارکینگ، و سایر کاربردهای ویژه مانند تراورس راه‌آهن می‌تواند ناشی از استفاده کاربردی معمولی یا تردد با پای پیاده یا وسایل نقلیه باشد. باد، آب، یخ یا ذرات موجود در آب نیز می‌توانند سطوح بتنی را بسایند (Price, ۱۹۴۷؛ Jacobsen و همکاران، ۲۰۱۵). مواردی وجود دارد که سایش از نظر سازه‌های نگرانی چندانی ندارد، اما ممکن است مشکل گرد و غبار وجود داشته باشد که می‌تواند قابل اعتراض باشد. در این راهنما فقط سایش بتن در سازه‌های هیدرولیکی به‌طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته است؛ این موضوع با جزئیات بیشتری در ACI 207.6R بررسی شده است.

## ۱۰-۲. آزمایش بتن برای مقاومت در برابر سایش

تحقیق برای توسعه آزمایش‌های آزمایشگاهی معنی‌دار در مورد سایش بتن از اوایل دهه ۱۹۰۰ در جریان بوده است. انواع مختلفی از سایش وجود دارد و هیچ روش آزمایشی واحدی که برای کلیه شرایط کافی باشد، ابداع نشده است. شرح مفصلی از روش‌های آزمایش سایش یا فرسایش را می‌توان در Bakke (۲۰۰۶) یافت. چندین حوزه گسترده مرتبط با سایش وجود دارد که هر کدام سازوکار منحصر به فرد خود را دارند که ممکن است به روش‌های آزمایش متفاوتی نیاز داشته باشند (Prior, ۱۹۶۶؛ Møen و همکاران، ۲۰۰۷؛ Riding و همکاران، ۲۰۱۸).

الف) سایش در ساخت و ساز کف و دال؛ جدول ۱۰.۲ رده‌های تردد و استفاده از کف، و ملاحظات ویژه مورد نیاز برای مقاومت خوب در برابر سایش را نشان می‌دهد (ACI 302.1R).

ب) سایش در پیاده‌روها در اثر عملیات برف رویی

ج) سایش سطوح بتنی جاده، پارکینگ و سطوح صنعتی بیرونی به دلیل ساییدگی، خراشیدگی و ضربه ناشی از کامیون‌های سنگین و سایر وسایل نقلیه

د) فرسایش سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها، سرریزها، تونل‌ها، پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌ها در اثر فعالیت مواد ساینده که توسط مایع روان حمل می‌شوند (ساییدگی و خراشیدن)

ه) عمل خلاءزایی<sup>۱۶۳</sup> روی بتن در سدها، سرریزها، تونل‌ها و سایر سازه‌های هیدرولیکی به دلیل سرعت زیاد جریان و فشارهای منفی (مکش)

و) سایش تراورس بتنی راه‌آهن در ناحیه قرارگیری ریل و در زیر و کناره‌های تراورس (سایش توسط بالاست) ASTM C779/C779M سه روش عملیاتی را برای ارزیابی سطوح کف پوشش می‌دهد: روش A، صفحات گردان<sup>۱۶۴</sup>؛ روش B، چرخ‌های ساینده<sup>۱۶۵</sup>؛ و روش C، ساچمه‌ها<sup>۱۶۶</sup>. ASTM C944/C944M مشابه

<sup>163</sup> Cavitation

<sup>164</sup> Revolving discs

<sup>165</sup> Dressing wheels

<sup>166</sup> Ball bearings

روش B در ASTM C779/C779M می‌باشد و برای آزمایش نواحی کوچکتر از آنچه برای ASTM C779/C779M لازم است، استفاده می‌شود.

هر روش برای ایجاد اطلاعات در مورد مقاومت در برابر سایش استفاده شده است. Liu (۱۹۹۴) گزارش نمود که قابل تکرارترین نتایج با استفاده از صفحات گردان به دست می‌آید. تکرارپذیری آزمایش سایش عامل مهمی در انتخاب روش آزمایش است. تکرار نتایج برای جلوگیری از نتایج گمراه کننده حاصل از آزمایش‌های منفرد ضروری است.

وضعیت سطح بتن، سنگدانه‌های سست که در طول روند آزمایش از جای خود جدا و ساییده می‌شوند، و توجه و انتخاب نمونه‌های معرف همگی می‌توانند بر نتایج آزمایش تاثیر بگذارند. نمونه‌هایی که در آزمایشگاه برای مقایسه تولید می‌شوند باید از مواد و نسبت‌های یکسان ساخته شوند، و انتخاب محل‌های آزمایش میدانی باید بر اساس ارائه نتایج معرف انجام شود.

برای تعیین محدودیت‌ها برای مقاومت سایشی بتن، لازم است به مقادیر نسبی به دست آمده در طول آزمایش برای ارائه پیش‌بینی سرویس دهی اتکا کرد.

سایش و فرسایش زیر آب نیازهای ویژه‌ای را برای روش‌های آزمایشی مورد استفاده جهت ارزیابی دوام ارائه می‌کنند. ASTM C1138 از به هم زدن گلوله‌های فولادی در آب برای تعیین مقاومت سایشی استفاده می‌نماید. ASTM C418 از یک دستگاه ماسه‌پاشی برای اندازه‌گیری عمق یا سایش برای شبیه‌سازی مقاومت نسبی سایشی ناشی از برخورد ماسه<sup>۱۶۷</sup> استفاده می‌کند. این آزمایش ابزاری برای ارزیابی مقاومت در برابر سایش ناشی از ساینده‌ها موجود در آب و ساینده‌های در طی جریان تردد فراهم می‌نماید.

مقاومت سایشی بتن متخلخل را می‌توان با استفاده از ASTM C1747/C1747M اندازه‌گیری کرد. در این روش آزمایش، مقاومت ضربه‌ای و سایشی بتن متخلخل از درصد کاهش جرم سه نمونه بتن استوانه‌ای پس از قرار دادن آن‌ها در دستگاه لس آنجلس و چرخش ۵۰۰ دور تعیین می‌گردد.

مقاومت سایشی تراورس راه آهن در ناحیه نشیمن ریل با استفاده از AREMA Test 6 اندازه‌گیری می‌شود (AREMA، ۲۰۱۲). این روش آزمایش، سایشی را شبیه‌سازی می‌کند که در زمان وجود رطوبت و ماسه بین نشیمنگاه ریل بر روی تراورس بتنی و زیرسری هنگامی که بارهای سنگین در یک زاویه اعمال می‌شود، رخ می‌دهد. یک بار دورهای با زاویه ۲۷/۵ درجه با راستای قائم بر ریل با ماسه و یک چکه آب در هر طرف هر نشیمنگاه ریلی اعمال می‌شود. تراورس‌هایی که قطعاتی از آن‌ها می‌شکنند و جدا می‌شوند یا تغییر شکل ریل بیش از ۵ میلی‌متر در حین بارگذاری قبل از ۱،۰۰۰،۰۰۰ دوره هستند، در آزمون مردود شناخته می‌شوند (AREMA، ۲۰۱۲). این سامانه آزمایش سعی بر آن دارد اصطکاک جنبشی که باعث می‌شود زیرسری و سنگریزه پایین زیرسری به سوی نشیمن ریل بر روی تراورس به صورت جانبی به جلو و عقب حرکت کنند و منجر به سایش شود را شبیه‌سازی کند (Kemes و همکاران، ۲۰۱۱).

به طور خلاصه، آزمایش‌های متعدد برای تعیین دوام طرح مخلوط بتن انتخاب شده و ساخت نمونه برای شبیه‌سازی اعمال سایشی کمک می‌کنند. بسیاری از این آزمایش‌ها مواجهه با شرایط رویارویی خاص با گونه‌های سازه‌ای خاص (به عنوان مثال تراورس راه‌آهن) را هدف قرار می‌دهند. استفاده از یک یا چند مورد از این آزمایش‌ها برای ارزیابی عملکرد آینده یک نوع سازه‌ای خاص در معرض یک یا چند شکل سایشی است، مستلزم در نظر گرفتن و منطبق نمودن شرایط آزمایش (به عنوان مثال، اندازه نمونه و شرایط سطح) با شرایط بهره‌برداری مورد انتظار می‌باشد.

جدول ۱۰-۲. طبقه‌بندی کف‌ها و ملاحظات جهت بهبود دوام در برابر سایش

طبقه‌بندی	نوع ترافیک پیش‌بینی شده	کاربرد	ملاحظات ویژه	پرداخت نهایی
۱- نمایان	سطح در معرض - تردد پیاده	دفاتر، کلیساها، ساختمان مسکونی چند واحدی، تزیینی	پرداخت بکتواخت، سنگدانه بدون لغزش در نواحی خاص، عمل آوری سنگدانه‌های معدنی رنگی، رنگدانه‌ها یا سنگدانه‌های نمایان، نقشه‌های مهر شده یا مثبت کاری شده، طرح هنری، عمل آوری، عملیات سطحی، نگهداری	پرداخت با ماله فلزی معمولی، پرداخت بدون لغزش در صورت لزوم براق کردن با صیقل دادن برای افزایش درخشندگی در صورت لزوم
۲- پوشیده	سطح پوشیده - تردد پیاده	دفاتر، کلیساها، ساختمان مسکونی چند واحدی، سازمانی یا پوشش‌های کف	دال‌های صاف و تراز به‌طور مناسب خشک شده برای پوشش‌های اعمال‌شده، عمل آوری	پرداخت کم با ماله فلزی
۳- روکش	سطح در معرض یا پوشیده - تردد پیاده	روکش چسبانده نشده یا شده روی دال پایه برای ساختمان‌های تجاری یا غیرصنعتی که نوع ساخت و ساز یا برنامه زمانبندی حکم می‌کند	دال پایه - رواداری صحیح سطح بکتواخت تراز، عمل آوری روکش چسبانده نشده - پیوندزدا روی دال پایه، حداقل ضخامت ۷۵ میلی‌متر، مسلح، عمل آوری رویه چسبانده شده - سنگدانه با اندازه مناسب حداقل ضخامت ۱۹ میلی‌متر، عمل آوری	دال پایه - پرداخت با ماله زیر روکش چسبانده نشده. سطح تمیز و بافتدار زیر روکش چسبانده شده روکش - برای سطوح در معرض، پرداخت معمولی با ماله فولادی؛ برای سطح پوشیده شده، پرداخت فلزی کم
۴- سازمانی یا تجاری	سطح در معرض یا پوشیده - تردد پیاده یا وسایل نقلیه سبک	سازمانی یا تجاری	دال تراز و مسطح مناسب برای پوشش‌های اعمال شده، سنگدانه‌های بدون لغزش برای نواحی خاص، عمل آوری؛ درزهای تنظیم با پوشش‌های اعمال شده	پرداخت با ماله فلزی معمولی

<p>پرداخت زیاد با ماله فلزی</p>	<p>بستر یکنواخت خوب، طرح اتصال، انتقال بار اتصال، مقاومت سایشی، عمل آوری</p>	<p>کف‌های صنعتی برای تولید، فرآوری و اتبارداری</p>	<p>سطح در معرض - تردد وسایل نقلیه صنعتی از جمله چرخ‌های هوای فشرده و چرخ‌های جامد نسبتاً نرم</p>	<p>۵- صنعتی</p>
<p>سختکننده سطح سنگدانه فلزی یا معدنی ویژه، اعمال مکرر ماله فلزی سخت</p>	<p>بستر یکنواخت خوب، طرح اتصال، انتقال بار اتصال لازم، مقاومت سایشی، عمل آوری</p>	<p>کف‌های صنعتی در معرض ترافیک سنگین؛ می‌تواند در معرض بارهای ضربه‌ای قرار گیرد</p>	<p>سطح در معرض - تردد وسایل نقلیه صنعتی سنگین مانند چرخ‌های سخت و بارهای سنگین چرخ</p>	<p>۶- صنعتی سنگین</p>
<p>سطح دال پایه تمیز و بافت دار مناسب برای چسباندن روکش بعدی. ماله برقی ویژه برای روکش اختیاری است، پرداخت زیاد با ماله فلزی</p>	<p>دال پایه - بستر یکنواخت خوب، تسلیح، طرح اتصال، سطح تراز، عمل آوری روکش - متشکل از سنگدانه‌های خوب دانه‌بندی شده تمام معدنی یا تمام فلزی. حداقل ضخامت ۱۹ میلی‌متر. سختکننده سطح سنگدانه معدنی یا فلزی اعمال شده بر روکش صاف یا مقاومت جهت سخت شدن، عمل آوری</p>	<p>بسترهای دولایه پیوسته شده در معرض ترافیک و ضربه سنگین</p>	<p>سطح در معرض - تردد وسایل نقلیه صنعتی سنگین مانند چرخ‌های سخت و بارهای سنگین چرخ</p>	<p>۷- روکش صنعتی سنگین</p>
<p>مشابه با رده‌های ۴، ۵ یا ۶</p>	<p>جداساز چسبندگی روی دال پایه، حداقل ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، مقامت سایشی، عمل آوری</p>	<p>روکش چسبانده نشده - در کف‌های جدید یا قدیمی که توالی یا برنامه زمان‌بندی ساخت و ساز حکم می‌کند</p>	<p>مشابه با رده‌های ۴، ۵ یا ۶</p>	<p>۸- روکش تجاری یا صنعتی</p>
<p>پیروی سختگیرانه از روش‌هایی که در بخش ۸-۹ از ACI 302.1R بیان شده است</p>	<p>الزامات مختلف کیفیت بتن. هنگامی که از سخت‌کننده‌های پاشیدنی روی سطح استفاده می‌شود، روش‌های استفاده ویژه و توجه دقیق به جزئیات توصیه می‌گردد. FF50 تا FF125، سطح فوق هموار، عمل آوری</p>	<p>اتبارهای با راهروهای باریک و با ارتفاع زیاد؛ استودیوهای تلویزیونی، پیست‌های یخ، یا سالن‌های ورزشی (ACI 360R)</p>	<p>سطح در معرض - روداری سطح فوق هموار یا بحرانی مورد نیاز است؛ مواد ویژه - وسایل نقلیه یا روباتیک حمل و نقل که به روداری‌های خاص نیاز دارند</p>	<p>۹- مشخصات سطح بحرانی</p>

### ۱۰-۳. عوامل موثر بر مقاومت سایشی بتن

مقاومت سایشی بتن یک پدیده پیشرونده است. سایش اولیه معمولاً مربوط به لایه رویی خمیر که سنگدانه‌ها را میپوشاند، است. مقاومت سایشی سطح خمیر به مقاومت فشاری مربوط می‌شود. بنابراین، قضاوت اولیه در مورد سایش نسبی کف می‌تواند بر اساس مقاومت فشاری انجام پذیرد (Witte و Backstrom، ۱۹۵۱؛ Zhao و همکاران، ۲۰۱۷).

با سائیده شدن خمیر سستتر، ذرات سنگدانه‌های ریز و درشت نمایان می‌گردند، و سایش و ضربه باعث تخریب بیشتر می‌شود که بیشتر به مقاومت پیوند خمیر با سنگدانه و سختی نسبی سنگدانه تا به مقاومت فشاری بتن مربوط می‌شود. سائیدگی در یک آزمایش آزمایشگاهی به این نتیجه رسیده‌اند که با استفاده از ماسه سیلیسی به عنوان ماده ساینده روی دستگاه چرخ سایش، سایش از مدل اصلاح شده Reuss پیروی می‌کند (Van Dam، ۲۰۱۴). این مدل نشان داد که سخت‌ترین فاز دارای اثر نامتناسبی بر مقاومت سایشی است، و بر نقش سختی سنگدانه‌های درشت تأکید دارد. بعد از سختی سنگدانه، مقاومت فشاری نقش دوم را در مقاومت سایشی بازی می‌کند. برای یک سنگدانه معین، مقاومت سایشی متناسب با مقاومت فشاری افزایش می‌یابد (Scripture و همکاران، ۱۹۵۳؛ Witte و Backstrom، ۱۹۵۱).

نشان داده شده است که سایش بتن فوق توانمند<sup>۱۶۸</sup> (UHPC) در مقایسه با بتن توانمند<sup>۱۶۹</sup> (HPC) کمتر است. این امر به وجود حجم زیادی از ذرات سیمانی هیدراته نشده نسبت داده شده است که به دلیل  $w/cm$  کم استفاده شده در UHPC در سطح باقی میمانند. HPC در مقایسه با UHPC نسبت زیادتری از C-S-H را در سطح دارد. چگالی و سختی بیشتر ذرات سیمانی هیدراته نشده در مقایسه با C-S-H به تفاوت مشاهده شده در عملکرد بین UHPC و HPC منجر می‌گردد (Zhao و همکاران، ۲۰۱۷).

از آنجایی که سایش در سطح رخ می‌دهد، بسیار مهم است که مقاومت و سختی سطح به حداکثر برسد. مقاومت را می‌توان با استفاده از خشکه‌پاش‌ها<sup>۱۷۰</sup> و روکش‌ها، فنون پرداخت (بخش ۴-۱۰-۴) و عمل‌آوری کافی بهبود بخشید. علاوه بر این، استفاده از مخلوط‌های بتن با  $w/cm$  کم تا متوسط (کمتر از ۰/۴۵) برای بهبود مقاومت و مقاومت در برابر سایش سطحی توصیه می‌گردد.

اگرچه به عنوان یک شاخص نسبی مفید است، اما نباید تنها به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری اتکا کرد. بازرسی باید در حین اجرا و پرداخت دال‌های کف انجام شود تا با ترغیب به استفاده از پرداخت ماله پروانه‌ای و عمل‌آوری کافی، سطحی مقاوم در برابر سایش به دست آید (Sadegzadeh و Kettle، ۱۹۸۷). با یک مخلوط بتن معین، مقاومت فشاری در سطح با موارد زیر بهبود می‌یابد:

الف) پرهیز از جداشدگی

ب) از بین بردن آب‌انداختگی

ج) زمان مناسب پرداخت

<sup>168</sup> Ultra-high-performance concrete

<sup>169</sup> High-performance concrete

<sup>170</sup> Dry shake

د) به حداقل رساندن  $w/cm$  در سطح (نباید اجازه اضافه کردن آب به سطح در حین پرداخت داده شود)  
 ه) ماله کشی زیاد (لیسه‌ای) سطح، که نباید روی بتن حاوی مواد افزودنی حباب هوازا یا بتنی که دارای هوای کل بیش از ۳ درصد است، انجام شود (به ACI 302.1R مراجعه شود).  
 و) روش‌های عمل‌آوری مناسب

تناسب اقتصادی مخلوط بتن با مقاومت معمولی برای افزایش مقاومت فشاری شامل محدودیت حداکثر  $w/cm$  و بکاربردن بزرگترین اندازه سنگدانه ممکن می‌باشد. هنگامی که از مواد مکمل سیمان (SCMs) مانند دوده سیلیس، سرباره یا خاکستر بادی در بتن استفاده می‌شود، مقاومت سایشی به‌طور کلی به مقاومت فشاری ایجاد شده مرتبط است (Keshari، ۲۰۰۹؛ Naik و همکاران، ۱۹۹۵، ۲۰۰۲؛ Turk و Karatas، ۲۰۱۱؛ Yen و همکاران، ۲۰۰۷). در مورد مواد مکمل سیمان، استفاده از روش‌های عمل‌آوری مناسب برای اطمینان از مقاومت سایشی کافی اجباری می‌باشد (Yen و همکاران، ۲۰۰۷). بتن پلیمری، بتن آغشته به پلیمر (Hol-land و Gutschow، ۱۹۸۷)، بتن اپوکسی (Mirza و همکاران، ۱۹۹۰)، سیمان آلومینات کلسیم (Scrivener و همکاران، ۱۹۹۹)، و سیمان سولفوآلومینات کلسیم (Markey و همکاران، ۲۰۰۶) مقاومت سایشی استثنایی از خود نشان داده‌اند. باید به کیفیت سنگدانه توجه نمود (Scripture و همکاران، ۱۹۵۳؛ Smith، ۱۹۵۸). عمر مفید برخی از دال‌های بتنی مانند کف انبارها که در معرض سایش در اثر تردد با چرخ‌های فولادی یا لاستیکی سخت قرار می‌گیرند، با استفاده از سنگدانه‌های محکم و سخت به‌شدت افزایش می‌یابد. مقاومت سایشی بتن سبک با مقاومت فشاری آن مرتبط می‌باشد. با این حال، فقط استفاده از سبکدانه‌های ممکن است برای سازه‌هایی با نیازهای مقاومت سایشی زیاد توصیه نشود (ACI 213R). مقاومت سایشی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی تا حد زیادی به مقاومت فشاری و نوع سنگدانه حاصل از بتن بازیافتی بستگی دارد (Ekolu و همکاران، ۲۰۱۲؛ de Brito، ۲۰۱۰).

سنگدانه‌های مقاوم در برابر سایش می‌توانند با روش خشکه‌پاش (ACI 302.1R) و یا به عنوان بخشی از مخلوط روکش با مقاومت زیاد مورد استفاده قرار گیرند. اگر سایش، نگرانی اصلی باشد، افزودن سنگدانه‌های با کیفیت کوارتز، تله‌سنگ<sup>۳۱</sup>، یا سنگ سنباده که به درستی با سیمان تناسب داشته باشند، با بهبود مقاومت فشاری در سطح، مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد. سنگدانه‌های مورد استفاده در مخلوط‌های روکش یا خشکه‌پاش باید سخت‌تر از سنگدانه‌های موجود در بتن باشند. برای مقاومت سایشی بیشتر، تغییر سنگدانه به ترکیبی از سنگدانه‌های فلزی باعث افزایش بیشتر مقاومت در برابر سایش و افزایش عمر مفید می‌گردد. یکی دیگر از مزایای استفاده از سنگدانه‌های فلزی، بهبود مقاومت در برابر ضربه، به ویژه در اتصالات است. استفاده از بسترهای دو لایه با بهره بردن از روکش‌های با مقاومت زیاد، عموماً محدود به کف‌هایی می‌شود که هم مقاومت در برابر سایش و هم مقاومت در برابر ضربه مورد نیاز است. یک بستر دو لایه در حالی که مقاومت سایشی عالی ارائه می‌دهد، معمولاً گرانتر خواهد بود. مقاومت اضافی در برابر ضربه را می‌توان با استفاده از روکشی که حاوی سیمان پرتلند و سنگدانه‌های فلزی است به دست آید.

یک عنصر کلیدی در تولید سطوح کف رضایت بخش، عمل آوری است (Lin، ۱۹۹۴؛ ACI 302.1R)؛ (ACI 308R). از آنجایی که بالاترین قسمت سطح بتن ناحیه‌ای است که توسط تردد مورد سایش قرار می‌گیرد، حداکثر مقاومت و سختی این ناحیه مهمترین عناصر برای اطمینان از مقاومت سایشی سطح هستند. این امر تا حدی از طریق نحوه پرداخت مناسب، روش‌های ماله‌کشی و روش‌های عمل آوری مناسب و به موقع انجام می‌پذیرد (بخش ۴-۴-۱۰). نشان داده شده است بازده عمل آوری، که با قابلیت جذب در سطح سایش فوقانی اندازه‌گیری می‌شود، مستقیماً با مقاومت سایشی در ارتباط می‌باشد. عمل آوری تاثیر کمتری بر مقاومت سایشی مقاطع عمیق‌تر همان بتن دارد (Scholer و Senbetta، ۱۹۸۴).

### ۱۰-۴. توصیه‌هایی برای سطوح بتنی مقاوم در برابر سایش

#### ۱۰-۴-۱. عوامل موثر بر استراتژی‌های افزایش مقاومت سایشی

استراتژی‌ها و عوامل تعیین نسبت مخلوط زیر مستقیماً بر مقاومت بتن و بنابراین مقاومت سایشی بتن تأثیر می‌گذارند (ACI 302.1R):

الف) مقدار کم  $w/cm$  در سطح - مراحل کاهش  $w/cm$  شامل استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب، نسبت‌های مخلوط برای کاهش آب‌انداختگی، زمان‌بندی عملیات پرداخت که از اضافه شدن آب در سطح (آب‌انداختگی بیشتر) در حین ماله‌کشی جلوگیری می‌نماید، و زدودن آب با مکش می‌باشد.

ب) دانه‌بندی خوب سنگدانه‌های ریز و درشت (مطابق با ASTM C33/C33M) - حداکثر اندازه درشتدانه باید برای کارایی بهینه و حداقل مقدار آب انتخاب گردد.

ج) انتخاب اسلامپ - کمترین اسلامپ سازگار با بتن ریزی و تراکم مناسب، همان‌طور که در ACI 309R توصیه شده است.

د) مقدار حباب هوای سازگار با شرایط رویارویی - علاوه بر تاثیر مضر بر مقاومت فشاری، مقادیر هوا می‌توانند در صورت زمان‌بندی نامناسب عملیات پرداخت، منجر به تاول‌زدگی و لایه‌لایه شدن سطح شوند. هوای ایجاد شده نباید برای روکش‌های خشکه پاش استفاده شوند مگر اینکه اقدامات احتیاطی خاصی که توسط سازنده ارائه شده، رعایت شوند.

#### ۱۰-۴-۲. کف‌های با بسترهای دولایه

روکش‌های با مقاومت زیاد بیش از ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت در برابر سایش را افزایش می‌دهند. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها در مخلوط‌های روکش ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

#### ۱۰-۴-۳. سنگدانه‌های بتن ویژه

انتخاب سنگدانه‌های سخت برای بهبود عملکرد مقاومتی در  $w/cm$  معین، مقاومت سایشی را نیز بهبود می‌بخشد. به‌طور معمول، سنگدانه‌ها به صورت خشکه پاش یا در روکش‌های چسبانده شده با مقاومت زیاد استفاده می‌شوند.

**۱۰-۴-۴. روش های پرداخت مناسب**

عملیات شمشه کشی و ماله کشی باید تا زمانی که بتن درخشش سطح خود را از دست بدهد به تعویق بیفتد. ممکن است لازم باشد که آب آزاد از سطح برداشته شود تا قبل از سخت شدن بتن زیر لایه به عملیات پرداخت اجازه ادامه بدهد. آب راکد هرگز نباید به درون سطوح بتنی رانده شود زیرا مقاومت فشاری خمیره سطح را کاهش می دهد. مدت زمان تاخیر بسته به دما، رطوبت، حرکت هوا و استفاده از مواد مکمل سیمان بسیار متفاوت خواهد بود. جزئیات بیشتر در مورد عملیات پرداخت مناسب در ACI 302.1R ارائه شده است.

**۱۰-۴-۵. آب زدائی با مکش**

آب زدائی با مکش، روشی برای برداشتن آب از سطح بتن بلافاصله پس از بتن ریزی است (Şimşek, ۲۰۰۵). در حالیکه این امر عمل امکان کاهش w/cm را فراهم می کند، کیفیت سطح پرداخت شده هنوز هم به شدت به زمانبندی پرداخت و اقدامات بعدی پیمانکار بستگی دارد. اطمینان از اینکه آب زدائی مناسب در لایه های سطوح مکش انجام شده است، ضروری می باشد. نواحی با آب زدائی نامناسب به دلیل افزایش موضعی w/cm مقاومت کمتری در برابر سایش دارند.

**۱۰-۴-۶. خشکه پاش ها و روکش های ویژه**

هنگامی که سایش شدید پیش بینی می شود، باید از خشکه پاش یا مخلوط های روکش مخصوص استفاده گردد. توصیه های تولید کننده مواد باید رعایت شود. راهنمایی اضافی در ACI 302.1R ارائه شده است.

**۱۰-۴-۷. روش های عمل آوری مناسب**

برای اکثر کف های بتنی، عمل آوری با آب (مرطوب نگه داشتن مستمر بتن) موثرترین روش برای تولید یک سطح سخت و متراکم است (Shurpali و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال، ممکن است عمل آوری با آب همیشه عملی نباشد. ترکیبات عمل آوری که از دست دادن رطوبت در بتن در اثر تبخیر را کاهش می دهند، به عنوان جایگزین استفاده می شوند. ترکیبات عمل آوری همچنین محافظت در برابر کریستاله شدن اولیه را فراهم می کنند و از از بین رفتن زودهنگام یا بیش از حد رطوبت سطح جلوگیری می نمایند (Al-Khayat و همکاران، ۲۰۰۲). عمل آوری مرطوب روکش های پاششی فلزی توصیه نمی شود، زیرا برخی از منابع آب و آب باران دارای pH کمتر از ۷ هستند که ممکن است منجر به اکسید شدن ذرات سنگدانه های فلزی گردد. برای بتن متخلخل، عمل آوری با ورق پلاستیکی مقاومت سایشی را بهبود بخشید. همچنین مشخص شد که استفاده از روغن سویا یا یک ترکیب عمل آوری بر روی سطح بتن متخلخل باعث افزایش مقاومت در برابر سایش می شود (Kevem و همکاران، ۲۰۰۹). مشخص شد که افزودنی های لانکس مقاومت سایشی بتن متخلخل را تا حد زیادی بهبود می بخشد (Wu و همکاران، ۲۰۱۱).

عمل آوری با آب از طریق استفاده از پاشش، حوضچه‌سازی، یا پوشش‌های مرطوب مانند گونی مرطوب یا لحاف‌های پنبه‌ای انجام می‌پذیرد. کاغذ یا ورقه‌های پلاستیکی مقاوم در برابر آب قابل قبول هستند، مشروط بر اینکه ابتدا بتن خیس شود و سپس بلافاصله پوشانده شود، به طوری که لبه‌ها روی هم قرار گیرد و با استفاده از نوار مقاوم در برابر آب درزبندی صورت پذیرد. استفاده از ورقه‌های پلاستیکی بدون یک لایه پارچه مرطوب می‌تواند منجر به رنگ غیر یکنواخت سطح شود.

ترکیبات عمل آوری باید حداقل الزامات ASTM C309 یا ASTM C1315 را برآورده نماید. آن‌ها باید بلافاصله پس از پرداخت سطح بتن و مطابق با توصیه‌های تولیدکننده در یک پوشش یکنواخت اعمال شوند. میزان پوشش توصیه شده بسته به بافت سطحی سطح پرداخت شده متفاوت خواهد بود. ترکیب عمل آوری بر روی سطح صافتر، در مقایسه با ترکیب عمل آوری روی دال بافتدار بزرگراه، خواص حفظ رطوبت بهتری خواهد داشت. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های کوچک‌تر منجر به نرخ تبخیر کمتری می‌شوند و بنابراین، به میزان پوشش کمتری نیاز دارند. اگر پیش از آنکه عمل آوری کامل شود، کف در معرض تردد قرار گیرد، ترکیب باید با کاغذ مقاوم در برابر سایش پوشانده شود. برای سطوحی که با رنگ یا کاشی کف پوشانده می‌شوند، ترکیبات عمل آوری نباید بکار رود، مگر اینکه ترکیب عمل آوری با این مواد سازگار باشد.

عمل آوری مرطوب برای بتن با  $w/cm$  کم جهت تامین آب اضافی برای هیدراته‌شدن سیمان، در جایی که خنک شدن سطح مورد نظر است، جایی که بتن بعداً چسبانده می‌شود، یا جایی که سخت‌کننده‌های مایع اعمال می‌گردد، توصیه می‌شود. روش‌های عمل آوری به‌طور مفصل در ACI 308R توضیح داده شده است. دستگاه‌های تولید گرما مانند ماشین‌های پرداخت، وسایل نقلیه و ماشین‌های جوشکاری که سوخت‌های فسیلی یا سایر منابع دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) را می‌سوزانند، نباید بدون توجه به تهویه مناسب استفاده شوند.  $CO_2$  از طریق سازوکاری که کربناته‌شدن نامیده می‌شود، می‌تواند بر سطوح بتن تازه بین زمان بتن‌ریزی و استفاده از یک ترکیب عمل آوری تأثیر منفی بگذارد. شدت اثر بستگی به غلظت  $CO_2$ ، رطوبت و دمای محیط و طول مدت قرار گرفتن در معرض هوا دارد (Freeman و Kauer، ۱۹۵۵؛ Matsuzawa و همکاران، ۲۰۱۰). کربناته‌شدن اولیه مقاومت سایشی سطوح بتنی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. میزان کاهش بستگی به عمق کربناته‌شدن دارد. یک تعمیر موثر، ساییدن سطح تا رسیدن به بتن سالم و سخت می‌باشد.

## ۱۰-۵. سایش ساینده‌ها و لاستیک‌های میخ‌دار و زنجیر چرخ روی بتن

هنگامی که جاده‌ها لغزنده هستند، مواد ساینده مانند ماسه اغلب بر روی سطح روسازی اعمال می‌شوند. با این حال، تجربه سال‌ها استفاده از ماسه در زمستان نشان می‌دهد که اگر بتن با کیفیت مناسب باشد و سنگدانه‌ها در برابر سایش، مقاوم باشند، این امر باعث سایش کمی می‌شود.

با این حال، زنجیرهای چرخ و لاستیک‌های میخ‌دار، می‌توانند منجر به سایش قابل توجه سطوح بتنی شوند، حتی در جایی که بتن با کیفیت عالی باشد. آسیب ناشی از ضربه دینامیکی نوک کوچک کاربید تنگستن گل‌میخ است که تقریباً ۱۰۰ عدد از آن در هر لاستیک وجود دارد. نرخ سایش روسازی بیش از ۱ میلی‌متر

در سال در مناطقی که از لاستیک‌های میخ‌دار یا زنجیرهای چرخ استفاده می‌شود، رایج است (Anderson و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۱).

تحقیقات عمدتاً در اسکاندیناوی، کانادا و ایالات متحده برای بررسی خواص بتن موجود در رابطه با سایش لاستیک‌های میخ‌دار انجام شده است (Anderson و همکاران، ۲۰۱۱؛ Frith و همکاران، ۲۰۰۳؛ Smith و Schonfeld، ۱۹۷۱؛ Keyser، ۱۹۷۱؛ Preus، ۱۹۷۳). سنگدانه سخت و درشت و خمیره ملات با مقاومت زیاد در مقاومت سایشی روسازی‌ها مفید می‌باشند (Anderson و همکاران، ۲۰۰۶؛ Gencel و همکاران، ۲۰۱۰؛ Frith و همکاران، ۲۰۰۳؛ Naik و همکاران، ۱۹۹۵؛ Van Dam، ۲۰۱۴). نشان داده شده است که استفاده از سنگدانه‌های آتشفشانی سخت و ریزدانه سایش لاستیک‌های میخ‌دار را سه تا پنج برابر کاهش می‌دهد (Frith و همکاران، ۲۰۰۳).

بتن سیمان پلیمری<sup>۱۷۲</sup> و بتن خاکستر بادی پلیمری<sup>۱۷۳</sup> مقاومت بهتری در برابر سایش ایجاد می‌کنند، هرچند که مقاومت در برابر لغزش را قربانی می‌کنند (Preus، ۱۹۷۳). عملکرد لایه‌های بتن پلیاستر ممکن است به‌طور قابل توجهی به روش‌های بتن‌ریزی مورد استفاده و نوع ماده چسباننده بستگی داشته باشد (Stempihar و همکاران، ۲۰۱۸). پوشش‌های بتن مسلح با الیاف فولادی نیز مورد آزمایش قرار گرفتند و کاهش سایش را نشان دادند (Preus، ۱۹۷۳). الیاف در معرض می‌توانند تاثیر نامطلوبی بر سایش لاستیک خودرو بگذارند. بتن فوق توانمند به عنوان یک ماده روسازی در مناطق با لاستیک‌های میخ‌دار، امیدوارکننده است؛ با این حال، زمان بیشتری برای ارزیابی میدانی مورد نیاز می‌باشد (Haber و همکاران، ۲۰۱۷).

## ۱۰-۶. مقاومت در برابر لغزش در روسازی‌ها

مقاومت در برابر لغزش روسازی‌های بتنی به بافت سطحی بتن بستگی دارد. دو نوع بافت سطحی وجود دارد: الف) بافت درشت ناشی از از بی‌نظمی‌های سطحی که در زمان ساخت ایجاد می‌شود. ب) بافت ریز ناشی از نوع و سختی سنگدانه‌های ریز بافت ریز در سرعت‌های کمتر از تقریباً ۸۰ کیلومتر در ساعت مهمتر می‌باشد (Meyer و Kummer، ۱۹۶۷؛ Murphy، ۱۹۷۵؛ Wilk، ۱۹۷۸). بافت درشت در سرعت‌های بیشتر از ۸۰ کیلومتر در ساعت بسیار مهم می‌گردد، زیرا برای کمک به جلوگیری از آب پیمایش<sup>۱۷۴</sup> در زیر لاستیک‌ها به آن تکیه می‌شود. مقاومت در برابر لغزش روسازی بتنی در ابتدا به بافت ساخته شده در لایه سطحی بتن بستگی دارد (Dahir، ۱۹۸۱). به مرور زمان، تردد چرخ لاستیکی خمیر سطحی را میساید، که بافت درشت مفید را از بین می‌برد و سنگدانه‌های درشت و ریز را در معرض قرار می‌دهد. نرخی که خمیر سطحی از بین می‌رود و عواقب آن بر مقاومت لغزشی روسازی به عمق و کیفیت خمیر سطحی و نوع سنگ (سختی) سنگدانه‌های ریز و درشت بستگی دارد.

<sup>172</sup> Polymer cement concrete

<sup>173</sup> Polymer fly-ash concrete

<sup>174</sup> Hydroplaning: تجمع آب بین لاستیک خودرو و سطح روسازی که موجب از میان رفتن اصطکاک لاستیک و سطح می‌شود.

سنگدانه‌های ریز حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد معدنی سیلیکات در اندازه ذرات بزرگتر به کاهش سرعت سایش سطح و حفظ ریزبافت لازم برای مقاومت لغزشی مطلوب در سرعت کم کمک می‌کنند (Fowler و Rached، ۲۰۱۲؛ Rado، ۲۰۰۹). با این حال، برخی از انواع سنگ‌ها تحت سایش چرخ لاستیکی صیقل داده می‌شوند. اینها شامل سنگ آهک، دولومیت و سرپانتین<sup>۱۷۵</sup> با بافت بسیار ریز می‌باشند؛ هرچه بافت ریزتر باشد، عملیات صیقلی نمودن سریع‌تر انجام می‌پذیرد. در جایی که هم هر دو سنگدانه‌های ریز و درشت از این نوع سنگ‌ها ساخته شوند، ممکن است صیقلی شدن سریع در کل سطح روسازی و کاهش جدی مقاومت لغزشی رخ دهد. در جایی که سنگدانه درشت فقط از نوع صیقل‌خور است، مشکل تا زمانی که سنگدانه درشت در اثر سایش در معرض قرار بگیرد به تعویق می‌افتد. با این حال، اگر سنگدانه درشت، به عنوان مثال، یک سیلیس درشت دانه یا سرباره متخلخل<sup>۱۷۶</sup> باشد، ممکن است هنگامی که سنگدانه در معرض قرار می‌گیرد، مقاومت لغزشی افزایش یابد (Rado، ۲۰۰۹).

بافت درشت به این دلیل مهم است که از آب پیمایش در زیر لاستیک جلوگیری می‌نماید. نمونه‌ای از ساخت بافت درشت در سطوح روسازی، قرار دادن شیارهایی در بتن (چه قبل از سخت شدن (شیارزنی) چه پس از سخت شدن با اره زنی) برای ایجاد کانال‌هایی جهت خروج آبی، که در غیر این صورت بین لاستیک و روسازی محبوس می‌شود، است. فضاهای بین شیارها باید به ویژه در برابر سایش سطحی و یخ‌زدگی مقاوم باشند. یک بتن با کیفیت عالی که به نحو صحیح پرداخت و عمل آوری شده باشد، دوام و مقاومت لازم در برابر سایش را دارد (Fwa و Ong، ۲۰۰۸).

روسازی‌های دو لایه را می‌توان برای بهبود مقاومت سایشی سطح بالایی با بهره‌مندی از سنگدانه سخت‌تر و مقاوم‌تر در برابر سایش فقط در لایه بالا استفاده کرد. اجازه استفاده از سنگدانه کم‌هزینه‌تر و در دسترس‌تر در لایه پایین می‌تواند در هزینه کل پروژه صرفه‌جویی کند (Fick، ۲۰۰۸).

## ۱۰-۷. فرسایش

فرسایش بتن خارج شدن پیشرونده جرم از سطح بتن در اثر حمله شیمیایی، سایش یا خلاءزایی می‌باشد (ACI 207.6R). فرسایش در اثر حمله شیمیایی زمانی رخ می‌دهد که اجزای خمیر یا سنگدانه بتن شسته یا حل شوند. به دلیل افزایش نرخ حذف مواد و حفظ pH کم در نزدیکی سطح بتن، نرخ تخریب می‌تواند با جریان مایع به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. فرسایش زمانی اتفاق می‌افتد که مواد جامد معلق در آب به سطح ضربه می‌زند یا سائیده می‌شود و منجر به از بین رفتن مواد می‌گردد. خلاءزایی زمانی اتفاق می‌افتد که فشار موضعی در یک سامانه هیدرولیک به زیر فشار تبخیر مایع می‌رسد و باعث تبخیر و متراکم شدن مجدد مایع می‌شود. از آنجایی که مایع به سرعت دوباره متراکم می‌شود و فاز حباب یا حفره در هم می‌شکند، فشارهای بسیار زیادی بر روی بتن ایجاد می‌گردد که باعث آسیب و از دست دادن مواد می‌شود (ACI 207.6R).

<sup>175</sup> Serpentine

<sup>176</sup> Vesicular slag

این گزارش حاوی خلاصه‌ای از سازوکار تخریب و خواص مواد بتن است که دوام را افزایش می‌دهد، در حالی که پوشش کامل‌تر این موضوعات در ACI 207.6R موجود است. فرسایش با حمله شیمیایی با جزئیات بیشتر در فصل ۷ این راهنما پوشش داده شده است.

### ۱۰-۷-۱. سایش

جامدات معلق می‌توانند سطح بتن را به‌طور یکنواخت ساییده و ظاهر نسبتاً صاف و فرسوده‌های ایجاد کنند. عواملی که باعث افزایش سایش می‌شوند عبارتند از سرعت‌های زیاد آب؛ ذرات بزرگ، سخت و تیز؛ مقدار کل مواد جامد معلق زیاد؛ دوره‌های طولانی قرار گرفتن در معرض؛ و شکل بتن. حوضچه‌های آرامش، دریچه‌های خروجی<sup>۱۷۷</sup>، سدهای متحرک<sup>۱۷۸</sup>، کانال‌ها و پوشش‌های تونل، سازه‌های هیدرولیکی رایجی هستند که آسیب سایشی یا فرسایشی را تجربه می‌کنند (ACI 207.6R؛ اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۲۰۱۵). تکیه‌گاه‌های پل و سایر سازه‌ها در رودخانه‌ها یا دیگر اجسام جاری در آب نیز مستعد آسیب‌های سایشی یا فرسایشی هستند.

هیچ بتنی کاملاً در برابر فرسایش ناشی از سایش در سازه‌های هیدرولیکی مصون نیست. برای ساخت بتن مقاوم در برابر سایش خمیرهای باکیفیت عالی با ریزساختار متراکم حیاتی هستند. سنگدانه‌های بتنی سخت و مقاوم در برابر سایش ضروری می‌باشند. سنگدانه‌های درشت بزرگتر نیز به افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش سایشی کمک می‌کنند (Liu و همکاران، ۲۰۰۶).

بتن توانمند به دلیل کیفیت بیشتر خمیر و سنگدانه‌ها در برابر آسیب سایش مقاوم‌تر است. مشخص شده است که در بتن حاوی دوده سیلیس با w/cm کم مقاومت در برابر آسیب سایشی یا فرسایشی افزایش می‌یابد. نشان داده شده است که بتن پلیمری مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش یا فرسایش دارد (Klieger و Greening، ۱۹۶۹؛ Scrivener و همکاران، ۱۹۹۹، اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۲۰۱۵).

### ۱۰-۷-۲. خلاءزایی

کارآمدترین راه برای جلوگیری از آسیب خلاءزایی در سازه‌های هیدرولیکی، جلوگیری از خلاءزایی است. این کار به بهترین وجه با در نظر گرفتن خلاءزایی در طراحی اولیه سازه و هیدرولیک با تغییر هندسه سازه، کاهش بی‌نظمی‌های سطحی، کاهش سرعت جریان، یا با هوادهی انجام می‌شود (Meford و Frizell، ۱۹۹۱). در صورت امکان باید از اتصالات اجتناب شود یا تعداد آن را به حداقل رساند، زیرا می‌توانند تلاطم را افزایش دهند. کمتر احتمال دارد که سامانه‌های پرفشار با سرعت کم خلاءزایی را تجربه کنند. برای کاهش بی‌نظمی‌های سطحی و تلاطم موضعی، ممکن است روادارهای ساخت سختگیرانه برای صافی سطح بتن ضروری باشد.

<sup>177</sup> Outlet works

<sup>178</sup> Locks

خلأزایی چنان سازوکار آسیب‌رسانی است که هیچ ماده‌ای را نمی‌توان ضد خلأزایی ساخت. عمر مفید یک سازه می‌تواند با استفاده از مواد مقاوم‌تر افزایش یابد. بتن مقاوم در برابر خلأزایی دارای الزامات مشابه با بتن مقاوم در برابر سایش است. پارامترهای مخلوط بتن که مقاومت در برابر فرسایش سایشی بتن را افزایش می‌دهند، به همان اندازه برای مقاومت در برابر آسیب خلأزایی اعمال می‌شوند (MacDonald، ۲۰۰۰). همچنین نشان داده شده است که در بتن اصلاح شده با لاتکس با افزایش چسبندگی خمیر و سنگدانه، مقاومت خلأزایی افزایش می‌یابد (MacDonald، ۲۰۰۰).

برای تعمیر خلأزایی، علت خلأزایی باید بررسی گردد، که ممکن است شامل هوادهی یا تغییر مشخصات جریان باشد. هنگامی که این روش‌ها غیرعملی هستند، استفاده از مواد تعمیراتی با کیفیت بهتر و مقاوم در برابر فرسایش ممکن است عمر مفید سازه را افزایش دهد. تعمیرات باید از رواداری‌های سختگیرانه در مورد صافی سطح پیروی کنند. ممکن است در تعمیر، از بتن حاوی دوده سیلیس، بتن با چسب اپوکسی یا بتن پلیمری استفاده شود. سطوح فولادی ضد زنگ نیز ممکن است برای زره‌پوش کردن سطح مورد استفاده قرار گیرند، اگرچه آسیب همچنان رخ خواهد داد. استفاده از بتن پلیمری، پوشش اپوکسی یا فولاد ضد زنگ نیز دارای مزیت سطح صاف است که تلاطم را کاهش می‌دهد (اداره احیای اراضی ایالات متحده، ۲۰۱۵).

# فصل ۱۱

خلاصه

دوام بتن یکی از ویژگی‌هایی است که آن را به پرمصرفترین مصالح ساختمانی در جهان تبدیل می‌کند. این راهنما عوامل مختلفی را توصیف می‌کند که می‌توانند با توجه به سازوکارهای خاص خرابی در بستر شرایط محیطی که بتن با آن‌ها رویارو می‌شود، دوام بتن را تحت تاثیر قرار دهند. استراتژی‌هایی برای افزایش دوام بتن از طریق استفاده از مواد و نسبت‌های مخلوط مناسب ارائه می‌شود و تاکید می‌کند که شیوه‌های جایدهی و طرز کار مناسب نیز برای تولید بتن بادوام در شرایط رویارویی محیطی معین ضروری است. به‌طور خاص، این راهنما اهمیت مقاومت بتن در برابر نفوذ مایع را که بر دوام تاثیر می‌گذارد مورد بحث قرار می‌دهد و فصل‌های جداگانه‌ای را در مورد سازوکارهای خرابی شامل یخ‌زدن و آب‌شدن، واکنش قلیایی سنگدانه، حمله سولفاتی، حمله شیمیایی تهاجمی، حمله فیزیکی نمک، خوردگی فلزات و سایر مواد تعبیه شده و همچنین سایش ارائه می‌نماید. برای هر یک از این سازوکارهای خرابی، توصیه‌هایی برای پیشگیری یا به حداقل رساندن آسیب ارائه شده است.

# فصل ١٢

## منابع

اسناد کمیته ACI و اسناد منتشر شده توسط سایر سازمانها ابتدا با شماره سند، عنوان کامل و سال انتشار و سپس اسناد تألیفی که بر اساس حروف الفبا لیست شده‌اند، فهرست می‌شوند.

- ACI 201.3T-19—Joint Deterioration and Chloride Based Deicing Chemicals*
- ACI PRC-207.1 -21—Mass Concrete—Guide*
- ACI 207.2R-07—Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*
- ACI 207.6R-17—Report on the Erosion of Concrete in Hydraulic Structures*
- ACI 212.3R-16—Report on Chemical Admixtures for Concrete*
- ACI 213R-14—Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*
- ACI 216.1 -14(19)—Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*
- ACI 221.1R-98(08)—Report on Alkali-Aggregate Reactivity*
- ACI 222R-19—Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion*
- ACI 222.1R-96—Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor (withdrawn 2007)*
- ACI 222.2R-14—Report on Corrosion of Prestressing Steels*
- ACI 222.3R-11—Guide to Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures*
- ACI PRC-223-21—Shrinkage-Compensating Concrete—Guide*
- ACI 224R-01 (08)—Control of Cracking in Concrete Structures*
- ACI 224.1R-07—Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures*
- ACI 301 -20—Specifications for Concrete Construction*
- ACI 302.1R-15—Guide for Concrete Floor and Slab Construction*
- ACI 304R-00(09)—Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*
- ACI 305R-20—Guide to Hot Weather Concreting*
- ACI 306R-16—Guide to Cold Weather Concreting*
- ACI 308R-16—Guide to External Curing of Concrete*
- ACI 309R-05—Guide for Consolidation of Concrete*
- ACI 318-14—Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*
- ACI 318-99—Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*
- ACI 350-06—Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary*
- ACI 350.1 -10—Specification for Tightness Testing of Environmental Engineering Concrete Containment Structures and Commentary*
- ACI 350.2R-04—Concrete Structures for Containment of Hazardous Materials*
- ACI 357.1R-91 (97)—Report on Offshore Concrete Structures for the Arctic*
- ACI 360R-10—Guide to Design of Slabs-on-Ground*
- ACI 365.1R-17—Report on Service Life Prediction*
- ACI 515.2R-13—Guide to Selecting Protective Treatments for Concrete*
- ASTM International*
- ASTM C33/C33M-18—Standard Specification for Concrete Aggregates*
- ASTM C109/C109M-21—Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*
- ASTM C114-18—Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*

- ASTM C150/C150M-19—Standard Specification for Portland Cement*
- ASTM C227-10—Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar Bar Method) (withdrawn 2018)*
- ASTM C260/C260M-10a(2016)—Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*
- ASTM C265-08—Standard Test Method for Water- Extractable Sulfate in Hydrated Hydraulic Cement Mortar (withdrawn 2017)*
- ASTM C289-07—Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method) (withdrawn 2016)*
- ASTM C295/C295M-19—Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*
- ASTM C309-19—Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete*
- ASTM C418-20—Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*
- ASTM C441 /C441M-17—Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction*
- ASTM C452-21—Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate*
- ASTM C457/C457M-16—Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*
- ASTM C494/C494M-19e1—Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*
- ASTM C563-16—Standard Test Method for Approximation of Optimum SO<sub>3</sub> in Hydraulic Cement Using Compressive Strength*
- ASTM C586-19—Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method)*
- ASTM C595/C595M-21—Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*
- ASTM C618-22—Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*
- ASTM C642-21—Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*
- ASTM C666/C666M-15—Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*
- ASTM C672/C672M-12—Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (withdrawn 2021)*
- ASTM C779/C779M-19—Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*
- ASTM C845/C845M-18—Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement*
- ASTM C856-20—Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*
- ASTM C944/C944M-19—Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*
- ASTM C989/C989M-18a—Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*
- ASTM C1012/C1012M-18b—Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*
- ASTM C1017/C1017M-13—Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in*

*Producing Flowing Concrete*

*ASTM C1038/C1038M-19—Standard Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water*

*ASTM C1105-08a(2016)—Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction*

*ASTM C1138-19—Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*

*ASTM C1152/C1152M-20—Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*

*ASTM C1157/C1157M-11—Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*

*ASTM C1202-22e1—Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*

*ASTM C1218/C1218M-20—Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*

*ASTM C1240-20—Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*

*ASTM C1260-21—Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*

*ASTM C1293-20a—Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*

*ASTM C1315-19—Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds Having Special Properties for Curing and Sealing Concrete*

*ASTM C1524-02(2010)—Standard Test Method for Water-Extractable Chloride in Aggregate (Soxhlet Method)*

*ASTM C1543-10a—Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding (withdrawn 2019)*

*ASTM C1556-22—Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*

*ASTM C1567-21—Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)*

*ASTM C1580-20—Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil*

*ASTM C1585-20—Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*

*ASTM C1602/C1602M-22—Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*

*ASTM C1747/C1747M-13—Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion (withdrawn 2022)*

*ASTM C1778-20—Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*

*American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO)*

*AASHTO PP 65-11—Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction*

*AASHTO R 80-17—Standard Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction*

*AASHTO T 259-02—Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion*

**Penetration**

**AASHTO T 277-15—Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**

**AASHTO T 380-19—Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT)**

**CSA Group**

**CSA A23.1-19/CSA A23.2-19—Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/ Test Methods and Standard Practices for Concrete**

**CSA A23.2-14A-14—Potential Expansivity of Aggregates; Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms**

**CSA A23.2-26A-19—Determination of Potential Alkali- Carbonate Reactivity of Quarried Carbonate Rocks by Chemical Composition**

**CSA A23.2-27A-19—Standard Practice to Identify Potential for Alkali- Reactivity of Aggregates and Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete**

**CSA A23.2-28A-19—Standard Practice for Laboratory Testing to Demonstrate the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials and Lithium-Based Admixtures to Prevent Alkali-Silica Reaction in Concrete**

**European Committee for Standardization (EN)**

**EN-12620-13—Aggregates for Concrete**

**German Institute of Standardization (DIN)**

**DIN 4030:2006-06—Assessment of Water, Soil, and Gases for Their Aggressiveness to Concrete – Part 1 : Principles and Limiting Values**

**U.S. Army Corps of Engineers (USACE)**

**CRD-C 662:2010—Determining the Potential Alkali- Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials, Lithium Nitrate Admixture and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)**

**EM 1110-2-2000:1994—Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures**

**Authored documents**

**AASHTO, 2000, "AASHTO Guide Specification for Highway Construction, Section 56X, Portland Cement**

**Concrete Resistant to Excessive Expansion Caused by Alkali-Silica Reaction," American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC.**

**Abbas, A.; Carcasses, M.; and Ollivier, J.-P.,1999, "Gas Permeability of Concrete in Relation to its Degree of Saturation," Materials and Structures, V. 32, No. 1, Jan.-Feb., pp. 3-8. doi: 10.1007/BF02480405**

**Acker, P.; Foucrier, C.; and Malier, Y.,1986, "Temperature-Related Mechanical Effects in Concrete Elements and Optimization of the Manufacturing Process," Concrete at Early Ages, SP-95, J. F. Young, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 33-47.**

**Aguayo, F., 2016, "External Sulfate Attack of Concrete: An Accelerated Test Method, Mechanisms, and Mitigation Techniques," PhD thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX.**

**Alhassan, S. J., 2005, "Corrosion of Lead and Lead Alloys," ASM Handbook, Volume 13B: Corrosion: Materials, S. D. Cramer and B. S. Covino Jr., eds., pp.195-204.**

**Al-Khayat, H.; Haque, M. N.; and Fattuhi, N.I., 2002, "Concrete Carbonation in Arid Climate," Materials and Structures, V. 35, pp. 421 -426.**

**Alksnis, F. F., and Alksne, V. I.,1986, "Sur le role de la phase siliceuse dans les processus**

*de destruction de la pierre de la ciment dans les milieux de sulfate," Proceedings, 8<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 170-174.*

Almond, D. K., and Janssen, D. J., 1991, "The Washington Hydraulic Fracture Test for Concrete Aggregates Exposed to Freezing and Thawing," *Supplemental Papers, Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, QC, Canada, pp. 265-293.*

Alonso, C.; Andrade, C.; Bacle, B.; and Fidjesøl, P., 1992, "Corrosion de Armaduras en Microhormigones de Humo de Silica Carbonatados (Corrosion of Reinforcement in Carbonated Microconcrete with Silica Fume)," *Proceedings, ERMCO Conference, Madrid. (in Spanish)*

Alyami, M.; Mosavi, H.; Alrashidi, S.; Almarshoud, M.; Ferraro, C.; and Riding, K., "Lab and Field Study of Physical Sulfate Attack on Concrete Mixtures with Supplementary Cementitious Materials," *Journal of Materials in Civil Engineering, V. 33, No. 1, pp. 1 -10.*

Anderson, K. W.; Uhlmeier, J.; Russell, M.; and Weston, J., 2006, "Wear Resistant Pavement Study," *Report No. WA-RD 657.1, Washington State Department of Transportation, 113 pp.*

Anderson, K. W.; Uhlmeier, J.; Russell, M.; and Weston, J., 2009, "Wear Resistant Pavement Study," *Report No. WA-RD 657.2, Washington State Department of Transportation, 122 pp.*

Anderson, K. W.; Uhlmeier, J.; Russell, M.; and Weston, J., 2011, "Studded Tire Wear Resistance of PCC Pavements with Special Mix Designs," *Report No. WA-RD 658.2, Washington State Department of Transportation, 68 pp.*

Andersson, K.; Allard, B.; Bengtsson, M.; and Magnusson, B., 1989, "Chemical Composition of Cement Pore Solutions," *Cement and Concrete Research, V. 19, No.3, pp. 327-332. doi: 10.1016/0008-8846(89)90022-7*

Andrade, C., 1993, "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurement," *Cement and Concrete Research, V. 23, No. 3, pp. 724-742. doi: 10.1016/0008-8846(93)90023-3*

Andrade, C., and Whiting, D., 1996, "A Comparison of Chloride Ion Diffusion Coefficients Derived from Concentration Gradients and Non-Steady State Accelerated Ionic Migration," *Materials and Structures, V. 29, No. 8, pp. 476-484. doi: 10.1007/BF02486282*

Ann, K. Y.; Jung, H. S.; Kim, H. S.; Kim, S. S.; and Moon, H. Y., 2006, "Effect of Calcium Nitrite-Based Corrosion Inhibitor in Preventing Corrosion of Embedded Steel in Concrete," *Cement and Concrete Research, V. 36, No. 3,*

*pp. 530-535. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.09.003* Anqi, L.; Baoyu, L.; Guoping, H.; Yeibo, C.; and Guolian, S., 1991, "Study on Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Containing Condensed Silica Fume and Its Application," *Durability of Concrete, Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference, SP-126, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, V. 1, pp. 499-510.*

AREMA, 2012, "Ties," *Chapter 30, Manual for Railway Engineering, American Railway Engineering and Maintenance- of-Way Association, Lanham, MD.*

Asgeirsson, H., and Gudmundsson, G., 1979, "Pozzolanic Activity of Silica Dust," *Cement and Concrete Research, V. 9, No. 2, pp. 249-252. doi: 10.1016/0008-8846(79)90031-0*

Attiogbe, E. K.; Nmai, C. K.; and Gay, F. T., 1992, "Air- Void System Parameters and Freeze-Thaw Durability of Concrete Containing Superplasticizers," *Concrete International, V. 14, No. 7, July, pp. 57-61.*

Ayora, C.; Chinchon, S.; Aguado, A.; and Guirado, F., 1998, "Weathering of Iron Sulfides and Concrete Alternation: Thermodynamic Model and Observation in Dams from Central Pyrenees, Spain," *Cement and Concrete Research, V. 28, No. 4, pp. 591 -603.*

Backstrom, J. E.; Burrows, R. W.; Mielenz, R. C.; and Wolkodof, V. E., 1958a, "Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete, Part 2—Influence of Type and Amount of Air-Entraining Agent," *ACI Journal Proceedings*, V. 55, No. 8, Aug., pp. 261-272.

Backstrom, J. E.; Burrows, R. W.; Mielenz, R. C.; and Wolkodof, V. E., 1958b, "Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete, Part 3—Influence of Water-Cement Ratio and Compaction," *ACI Journal Proceedings*, V. 55, No. 8, Aug., pp. 359-375.

Backstrom, J. E.; Burrows, R. W.; Wolkodof, V. E.; and Powers, T. C., 1954, discussion of "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 51, No. 4, Dec., pp. 760-761.

Baer, J., 1988, *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover, Mineola, NY, 764 pp.

Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; and Cheng, Y. B., 2003, "Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Acid

Attack," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 10, Jan., pp. 1607-1611. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00125-X

Bakke, K. J., 2006, "Abrasion Resistance," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM STP169D, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 184-193.

Bakker, R., 1980, "On the Cause of Increased Resistance of Concrete Made from Blast Furnace Cement to the Alkali-Silica Reaction and to Sulfate Corrosion," thesis, RWTH,

Aachen, Germany, 118 pp. Barcelo, L.; Gartner, E.; Barbarulo, R.; Hossack, A.;

Ahani, R.; Thomas, M.; Hooton, D.; Brouard, E.; Delagrave, A.; and Blair, B., 2014 "A Modified ASTM C1012 Procedure for Qualifying Blended Cements Containing Limestone and SCMs for Use in Sulfate-Rich Environments," *Cement and Concrete Research*, V. 63, Sept., pp. 75-88.

Barona de la O, F., 1951, "Alkali-Aggregate Expansion Corrected with Portland-Slag Cement," *ACI Journal*

*Proceedings*, V. 47, No. 3, Mar., pp. 545-552.

Bassuoni, M. T., and Nehdi, M. L., 2009, "Durability of Self-Consolidating Concrete to Different Exposure Regimes of Sodium Sulfate Attack," *Materials and Structures*, V. 42, No. 8, Oct., pp. 1039-1057. doi: 10.1617/s11527-008-9442-2

Bassuoni, M. T., and Rahman, M. M., 2016, "Response of Concrete to Accelerated Physical Salt Attack Exposure," *Cement and Concrete Research*, V. 79, pp. 395-408.

Bastüensen, R.; Mourn, J.; and Rosenquist, I., 1957, "Some Investigations of Alum Shale in Construction (Bidragfl Belysning av visse Bygningstekniske Problemer ved Osloomradets Alunskifere)," Publication No.22, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 69 pp. (in Norwegian)

Bates, P. H., and Klein, A. A., 1917, "Properties of the Calcium Silicates and Calcium Aluminate Occurring in Normal Portland Cement," *Technologic Papers of the Bureau of Standards*, U.S. Department of Commerce, Washington, DC., No. 78, June, 52 pp.

Bates, P. H.; Phillips, A. J.; and Wig, R. J., 1913, "Action of the Salts in Alkali Water and Sea Water on Cement," *Technologic Papers of the Bureau of Standards*, U.S. Department of Commerce, Washington, DC., No. 12, GPO, 157 pp.

Bavarian, B., and Reiner, L., 2004. "Improving Durability of Reinforced Concrete Structures using Migrating Corrosion Inhibitors," Paper 04323, *Proceedings, Corrosion 2004*,

National Association of Corrosion Engineers (NACE), New Orleans, LA, pp. 04323/1-04323/11.

Baweja, D.; Sirivivatnanon, V.; Gross, W.; and Laurie, G., 1994, "High-Performance

*Australian Concretes for Marine Applications," High-Performance Concrete, Proceedings of the Second ACI International Conference, SP-149, V. M.*

*Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 363-378.*

*Beaudoin, J. J., and Brown, P. W., 1992, "The Structure of Hardened Cement Paste," Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement, V. I, New Delhi, National Council for Cement and Building Materials, pp. 485-525.*

*Bellmann, F., and Stark, J., 2007, "Prevention of Thaumassite Formation in Concrete Exposed to Sulfate Attack," Cement and Concrete Research, V. 37, No. 8, Aug., pp. 1215-1222. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.04.007*

*Bellmann, F., and Stark, J., 2008, "The Role of Calcium Hydroxide in the Formation of Thaumassite," Cement and Concrete Research, V. 38, No. 10, Oct., pp. 1154-1161 . doi: 10.1016/j.cemconres.2008.04.005*

*Bellport, B. P., 1968, "Combating Sulphate Attack on Concrete on Bureau of Reclamation Projects," Performance of Concrete, University of Toronto Press, pp. 77-92.*

*Belzile, N.; Chen, Y. W.; Cai, M. F.; and Li, Y., 2004, "A Review on Pyrrhotite Oxidation," Journal of Geochemical Exploration, V. 84, pp. 65-76.*

*Bentz, D. P., 2000, "Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete," ACI Materials Journal, V. 97, No. 3, May-June, pp. 351 -359.*

*Bentz, D. P.; Garboczi, E. J.; and Snyder, K. A., 1999, "A Hard Core/Soft Shell Microstructural Model for Studying Percolation and Transport in Three-Dimensional Composite Media," NISTIR 6265, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, Jan.*

*Bentz, D. P.; Schlangen, E.; and Garboczi, E. J., 1995, "Computer Simulation of Interfacial Zone Microstructure and Its Effect on the Properties of Cement-Based Composites,"*

*Materials Science of Concrete IV, J. Skalny and S. Mindess, eds., American Ceramic Society, Westerville,*

*OH, pp. 155-199.*

*Berke, N. S., 1985, "Effects of Calcium Nitrite and Mix Design on the Corrosion Resistance of Steel in Concrete (Part 1)," NACE Corrosion 85, Paper No.273, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX. Berke, N. S., 1987, "Effect of Calcium Nitrite and Mix*

*Design on the Corrosion Resistance of Steel in Concrete (Part 2, Long-Term)," NACE Corrosion 87, Paper No. 132, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX.*

*Berke, N. S., 1988, "Microsilica and Concrete Durability," Transportation Research Record 1204, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 21 -26.*

*Berke, N. S.; Dallaire, M. P.; and Hicks, M. C., 1992, "Plastic, Mechanical, Corrosion, and Chemical Resistance Properties of Silica Fume (Microsilica) Concretes," Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete: Fourth CANMET/ACI International Conference, V. M.*

*Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1125-1150.*

*Berke, N. S., and Hicks, M. C., 1992, "Estimating the Life Cycle of Reinforced Concrete Decks and Marine Piles Using Laboratory Diffusion and Corrosion Data," Corrosion Forms and Control for Infrastructure, V. 1139, pp. 207-231 ., 207-225. doi: 10.1520/STP19764S*

*Berke, N. S.; Hicks, M. C.; and Hoopes, R. J., 1994, "Condition Assessment of Field Structures with Calcium*

*Nitrite," Concrete Bridges in Aggressive Environments: Philip D. Cady International Symposium, SP-151, R. E. Weyers, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 43-72.*

*Berke, N. S., and Roberts, L. R., 1989, "Use of Concrete Admixtures to Provide Long-*

*Term Durability from Steel Corrosion," Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-119, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 383-403.*

*Berke, N. S., and Rosenberg, A., 1989, "Technical Review of Calcium Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete," Transportation Research Record 1211, Transportation Research Board, Washington, DC, 18 pp.*

*Berke, N. S.; Scali, M. J.; Regan, J. C.; and Shen, D. F., 1991, "Long-Term Corrosion Resistance of Steel in Silica Fume and/or Fly Ash Containing Concretes," Durability of Concrete, Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference, SP-126, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 393-422.*

*Bérubé, M.-A., and Duchesne, J., 1992, "Evaluation of Testing Methods Used for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction," Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference, SP-132, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 549-575.*

*Bérubé, M.-A.; Duchesne, J.; Dorion, J.; and Riveš, M., 2002, "Laboratory Assessment of Alkali Contribution by Aggregates to Concrete and Application to Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reactivity," Cement and Concrete Research, V. 32, No. 8, Aug., pp. 1215-1227. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00766-4*

*Bérubé, M.-A., and Fournier, B., 1992a, "Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity," Advances in Concrete Technology, V. M. Malhotra, ed., CANMET/EMR, Ottawa, ON, Canada, pp. 583-627.*

*Bérubé, M.-A., and Fournier, B., 1992b, "Effectiveness of the Accelerated Mortar Bar Method, ASTM C9 Proposal P214 or NBRI, for Assessing Potential AAR in Quebec (Canada)," Proceedings of the Ninth International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Concrete*

*Society, Slough, UK, pp. 92-101 .*

*Bérubé, M.-A., and Fournier, B., 1993, "Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete," Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, R. Rivera Villareal, ed., Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, Mexico, Oct., pp. 54-78.*

*Bessey, G. E., and Lea, F. M., 1953, "The Distribution of Sulphates in Clay Soils and Ground Waters," Proceedings—Institution of Civil Engineers, V. 2, No. 2, pp. 159-181 . doi: 10.1680/jicep.1953.11030*

*Bhatty, M. S. Y., and Greening, N. R., 1978, "Interaction of Alkalis with Hydrating and Hydrated Calcium Silicates," Proceedings of the Fourth International Conference on the Effects of Alkalis in Cement and Concrete, Purdue University,*

*West Lafayette, IN, pp. 87-112. Bickley, J. A.; Hemmings, R. T.; Hooton, R. D.; and*

*Balinsky, J., 1994, "Thaumasite Related Deterioration of Concrete Structures," Proceedings of Concrete Technology: Past, Present and Future, SP-144, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Mar., pp. 159-175.*

*Biczok, I., 1967, Concrete Corrosion and Concrete Protection, Chemical Publishing Co., Inc, New York.*

*Biczok, I., 1972, Concrete Corrosion—Concrete Protection, eighth edition, Akademiai Kiado, Budapest, 545 pp.*

*Bier, T. A., 1987, "Influence of Type of Cement and Curing on Carbonation Progress and Pore Structure of*

*Hydrated Cement Pastes," Microstructural Development During Hydration of Cement,*

*Proceedings of the Materials Research Society, Pittsburgh, PA, V. 85, pp. 123-134.*

Bier, T. A.; Ludirdja, D.; Young, J.; and Berger, R., 1988, "The Effect of Pore Structure on the Permeability of Concrete," *Pore Structure and Permeability of Cementitious Materials, Proceedings of the Materials Research Society, Pittsburgh, PA, V. 137, pp. 235-241*.

Bijen, J., and van Selst, R., 1991, "Effects of Fly Ash on Carbonation of Concrete with Portland Blast-Furnace

Slag Cement," *Durability of Concrete, Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference, SP-126, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1001 -1030.*

Blanks, R. F., 1950, "Fly Ash as a Pozzolan," *ACI Journal Proceedings, V. 47, No. 9, Sept., pp. 701 -707.*

Bleszynski, R. F., 2002, "The Performance and Durability of Concrete with Ternary Blends of Silica Fume and Blast-Furnace Slag," PhD thesis, University of Toronto, Toronto, ON, Canada.

Bleszynski, R. F.; Hooton, R. D.; Thomas, M. D. A.; and Rogers, C. A., 2002, "Durability of Ternary Blend Concretes with Silica Fume and Blastfurnace Slag: Laboratory and Outdoor Exposure Site Studies," *ACI Materials Journal, V. 99, No. 5, Sept.-Oct., pp. 499-508.*

Bleszynski, R. F., and Thomas, M. D. A., 1998, "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash

Concrete Immersed in Alkaline Solutions," *Advanced Cement Based Materials, V. 7, No. 2, Mar., pp. 66-78. doi: 10.1016/S1065-7355(97)00030-8*

Blowes, D. W.; Ptacek, C. J.; Jambor, J. L.; and Weisener, C. G., 2003, *Treatise on Geochemistry: Volume 9.05 The Geochemistry of Acid Mine Drainage, pp. 149-204.*

Bobrowski, G., and Youn, D. J., 1993, "Corrosion Inhibitors in Cracked Concrete: An Admixture Solution," *Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence, Proceedings of the International Conference, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., E&F Spon, London, UK, V. 2, pp. 1249-1263.*

Boddy, A. M.; Hooton, R. D.; and Thomas, M. D. A., 2003, "The Effect of the Silica Content of Silica Fume on its Ability to Control Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research, V. 33, No. 8, Aug., pp. 1263-1268. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00058-9*

Bognacki, C. J.; Pirozzi, M.; Marsanno, J.; and Baumann, W. C., 2010, "Rapid Chloride Permeability Testing's Suitability for Use in Performance-Based Specifications," *Concrete International, V. 28, No. 5, May, pp. 47-52.*

Bogue, R. H., 1955, *The Chemistry of Portland Cement, second edition, Reinhold Publishing Corporation, New York.*

Bowles, J. F.W.; Howie, R. A.; Vaughan, D. J.; and Zussman, J., 2011, *Rock-Forming Minerals Vol. 5A: Non-*

*Silicates Oxides, Hydroxides and Sulphides, second edition, Geological Society of London, England, pp. 627-763.*

Branca, C.; Fratesi, R.; Moriconi, G.; and Simoncini, S., 1992, "Influence of Fly Ash on Concrete Carbonation and Rebar Corrosion," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference, SP-132, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 245-256.*

Broomfeld, J., 2007, *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, second edition, Taylor & Francis, London, 296 pp.*

Brown, P. V., and Bothe Jr., J. V., 2004, "The System CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at 23±2°C

*and Mechanisms of*

*Chloride Binding in Concrete,*” *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 9, Sept., pp. 1549-1553. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.03.011

Brown, P. W., 2002, “*Thaumasite Formation and Other Forms of Sulfate Attack,*” *Cement and Concrete Composites Special Issue: Sulfate Attack and Thaumasite Formation*, V. 24, No. 3-4, June-Aug., pp. 301 -303. doi: 10.1016/S0958-9465(01)00081-6

Brown, P.W. and A. Doerr, A., 2000, “*Chemical Changes in Concrete Due to the Ingress of Aggressive Species,*” *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 3, pp. 411 -418

Brown, P. W.; Taylor, H. F. W.; Young, J. F.; and Johannsen, V.,1986, “*The Hydration of Tricalcium Aluminate and Tetracalcium Aluminoferrite in the Presence of Calcium Sulfate,*” *Materials and Structures*, V.19, No. 2, Mar., pp. 137-147. doi: 10.1007/BF02481758

Browne, R. D.,1980, “*Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures,*” *Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 169-204.

Buck, A. D.; Houston, B. J.; and Pepper, L.,1953, “*Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction,*”

*ACI Journal Proceedings*, V. 50, No. 10, Oct., p. 1160 Buendorf, N. R., and Newman, J. B.,1986, “*The Development and Stability of Surface Layers on Concrete Exposed to Sea-Water,*” *Cement and Concrete Research*, V. 16, No. 5, Sept., pp. 721 -732. doi: 10.1016/0008-8846(86)90046-3

Buendorf, N. R., and Newman, J. B.,1987, “*Examination of Three Methods for Studying Ion Diffusion in Cement Pastes, Mortars and Concrete,*” *Materials and Structures*, V. 20, No. 1, Jan., pp. 3-10. doi: 10.1007/BF02472720

Buendorf, N. R.; Glass, G. K.; Hassanein, A. M.; and Zhang, J. Z.,1998, “*Chloride Transport in Concrete*

*Subjected to Electric Field,*” *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 10, No. 4, Nov., pp. 220-228. doi: 10.1061 / (ASCE)0899-1561 (1998)10:4(220)

Buendorf, N. R.; Shurafa-Daoudi, M. T.; and McLoughlin, I. M.,1995, “*Chloride Transport due to Wick Action in Concrete,*” *Chloride Penetration into Concrete*, L. O.

Nilsson and J. P. Ollivier, eds., RILEM, Paris, pp. 315-324. Butler, J. N.,1998, *Ionic Equilibrium: Solubility and pH Calculations*, Wiley-Interscience, New York, Mar., 559 pp.

Burg, R. G., and Öst, B. W.,1992, “*Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes,*” *Research and Development Bulletin RD104T*, Portland

*Cement Association*, Skokie, IL, 55 pp. Cabrera, J. G., and Ghodoussi, P.,1994, “*Influence of Fly Ash on the Resistivity and Rate of Corrosion of Reinforced Concrete,*” *Durability of Concrete*, *Proceedings of*

*the Third CANMET/ACI International Conference*, SP-145, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 229-244.

Campbell, G. M., and Detwiler, R. J.,1993, “*Development of Mix Designs for Strength and Durability of Steam- Cured Concrete,*” *Concrete International*, V. 15, No. 7, July, pp. 37-39.

Canham, I.,1987, “*The Control of Alkali Silica Reaction using Blended Cements,*” PhD thesis, University of Aston, Birmingham, UK, 280 pp.

Canham, I.; Page, C. L.; and Nixon, P. J.,1987, “*Aspects of the Pore Solution Chemistry of Blended Cements Related to the Control of Alkali Silica Reaction,*” *Cement and Concrete Research*, V. 17, No. 5, Sept., pp. 839-844. doi: 10.1016/0008-8846(87)90046-9

Cao, Y., and Detwiler, R. J.,1995, “*Backscattered Electron Imaging of Cement Pastes*

Cured at Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, V. 25, No. 3, Apr., pp. 627-638. doi: 10.1016/0008-8846(95)00051-D

Chatterji, S., 1979, "The Role of Ca(OH)<sub>2</sub> in the Breakdown of Portland Cement Concrete due to Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 9, No. 2, Mar., pp. 185-188. doi: 10.1016/0008-8846(79)90024-3

Chatterji, S., and Clausson-Kaas, N. F., 1984, "Prevention of Alkali-Silica Expansion by Using Slag-Portland Cement," *Cement and Concrete Research*, V. 14, No. 6, Sept., pp. 816-818. doi: 10.1016/0008-8846(84)90006-1

Chatterji, S.; Thaulow, N.; Jensen, A. D.; and Christensen, P., 1986, "Mechanism of Accelerating Effects of NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> on Alkali Silica Reaction," 7th International Conference on Alkali Aggregate Reactions, Ottawa, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, pp. 115-119.

Chatterji, S.; Thaulow, N.; and Jensen, A. D., 1987, "Studies of Alkali-Silica Reaction, Part 4—Effect of

Different Alkali Salt Solutions on Expansion," *Cement and Concrete Research*, V. 17, No. 5, Sept., pp. 777-783. doi: 10.1016/0008-8846(87)90040-8

Chinchón-Payá, S.; Aguado, A.; and Chinchon, S. 2012, "A Comparative Investigation of the Degradation of Pyrite and Pyrrhotite under Simulated Laboratory Conditions," *Engineering Geology*, V. 127, pp. 75-80. doi: 10.1016/j. enggeo.2011 .12.003.

Chopperla, K. S. T.; Drimalas, T.; Beyene, M.; Tanesi, J.; Folliard, K.; Ardani, A.; and Ideker, J. H., 2022, "Combining Reliable Performance Testing and Binder Properties to Determine Preventive Measures for Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 151, Article 106641 .

Chopperla, K. S. T.; Smith, S.; Drimalas, T.; Vaddey, P. N.; Bentivegna, A.; Kurtis, K. E.; Thomas, M. D. A.; and Chung, J. H., and Consolazio, G. R., 2005, "Numerical Modeling of Transport Phenomena in Reinforced Concrete Exposed to Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, V. 35, No. 3, Mar., pp. 597-608. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.037

Clear, K. C., 1976, "Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, V. 3: Performance After 830 Daily Salt Applications," Report No. FHWA-RD-76-70, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Clear, K. C., and Hay, R. E., 1973, "Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, V. 1 : Effect of Mix Design and Construction Parameters," Interim Report No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Clemeña, G. G., and Virmani, Y. P., 2004, "Comparing the Chloride Resistances of Reinforcing Bars Evaluating New, Economical Metallic Reinforcement for its Ability to Withstand High Salt Concentrations," *Concrete International*, V. 26, No. 11, Nov., pp. 39-49.

Collins, C. L.; Ideker, J. H.; and Kurtis, K. E., 2004, "Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO<sub>3</sub> on Alkali- Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 8, pp. 1403-1415. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.01 .011

Collepari, M.; Coppola, L.; and Pistolesi, C., 1994, "Durability of Concrete Structures Exposed to CaCl<sub>2</sub> Based Deicing Salts," *Durability of Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-145, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 107-120.*

Cook, A. R., 1980, "Deicing Salts and the Longevity of Reinforced Concrete," Paper 132, Corrosion/80, NACE International, Houston, TX. Cooke, T. H., 1990, *Concrete Pumping and Spraying: A Practical Guide*, Van Nostrand-Reinhold, New York, 251 pp.

Cordon, W. A., 1966, "Freezing and Thawing of Concrete—Mechanisms and Control," *Monograph No. 3, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, 99 pp.

Coussy, O., and Monteiro, P. J. M., 2008, "Poroelastic Model for Concrete Exposed to Freezing Temperatures," *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 1, Jan., pp. 40-48. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.006

Coussy, O., and Monteiro, P. J. M., 2009, errata to "Poroelastic Model for Concrete Exposed to Freezing Temperatures," *Cement and Concrete Research*, V. 39, No. 4, Apr., pp. 371-372. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.01.009

Cox, H. P.; Coleman, R. B.; and White, L., 1950, "Effect of Blastfurnace-Slag Cement on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete," *Pit and Quarry*, V. 45, No. 5, pp. 95-96.

Crammond, N. J., 2002a, "The Occurrence of Thaumasite in Modern Construction – A Review," *Cement and Concrete Composites*, V. 24, No. 3-4, June-Aug., pp. 393-402. doi: 10.1016/S0958-9465(01)00092-0

Crammond, N. J., 2002b, "The Thaumasite Form of Sulfate Attack in the U.K.," *Proceedings of the 1st International Conference on Thaumasite in Cementitious Materials, Building Research Establishment, UK*.

Dahir, S. H., 1981, "Relative Resistance of Rained-On Concrete Pavements to Abrasion, Skidding, and Scaling," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 3, No. 1, pp. 13-20. doi: 10.1520/CCA10197J

Day, R. L., 1992, "The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis," *Research and Development Bulletin RD108T, Portland Cement Association, Skokie, IL*, 30 pp. de Brito, J., 2010, "Abrasion Resistance of Concrete Made with Recycled Aggregates," *International Journal of Sustainable Engineering*, V. 3, No. 1, pp. 58-64. doi: 10.1080/19397030903254710

De Belie, N.; Verselder, H. J.; De Blaere, B. D.; Van Nieuwenburg, D.; and Verschoore, R., 1996, "Influence of the Cement Type on the Resistance of Concrete to Feed Acids," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 11, Nov., pp. 1717-1725. doi: 10.1016/S0008-8846(96)00155-X

Dexter, M. H.; Short, N. R.; Page, C. L.; and Higgins, D. D., 1989, "Chloride Ion Penetration into Blended Cement Pastes and Concrete," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-114, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 1399-1412.

DeGrosbois, M., and Fontaine, E., 2000, "Performance of the 60 C-Accelerated Concrete Prism Test for The Evaluation of Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates," *The 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, Quebec City, QC, Canada*, pp. 277-286.

Delagrave, A.; Bigas, J. P.; Ollivier, J. P.; Marchand, J.; and Pigeon, M., 1997, "Influence of the Interfacial Zone on the Chloride Difusivity of Mortars," *Advanced Cement Based Materials*, V. 5, No. 3-4, Apr.-May, pp. 86-92. doi: 10.1016/S1065-7355(96)00008-9

Dent Glasser, L. S., and Kataoka, N., 1981, "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reactions," *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, CSIRO, Pretoria, Paper S252/23*.

DePuy, G. W., 1994, "Chemical Resistance of Concrete," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP 169C, ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 263-281.

Detwiler, R. J., and Fapohunda, C. A., 1993, "Comparison of Two Methods for Measuring

the Chloride Ion Permeability of Concrete," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 15, No. 1, Summer, pp. 70-73.

Detwiler, R. J., and Taylor, P. C., 2003, *Controlling Cracks in Concrete*, EB229, Portland Cement Association, Skokie, IL, 45 pp.

Diamond, S., 1981, "Effects of Two Danish Fly Ashes on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement Fly Ash Pastes," *Cement and Concrete Research*, V. 11, No. 3, May, pp. 383-394. doi: 10.1016/0008-8846(81)90110-1

Diamond, S., 1983a, "Alkali Reactions in Concrete –Pore Solution Effects," *Proceedings of the 6th International Conference on Alkalies in Concrete*, G. M. Idorn and S. Rostam, eds., Danish Concrete Association, Copenhagen, pp. 155-166.

Diamond, S., 1983b, "Effects of Microsilica (Silica Fume) on Pore-Solution Chemistry of Cement Pastes," *Communications of the American Ceramics Society*, May, pp. 82-84.

Diamond, S., 1989, "ASR—Another Look at Mechanisms," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 83-94.

Diamond, S., 1998, "Concrete Porosity Revisited," *Materials Science of Concrete, Special Volume: The Diamond Symposium*, M. Cohen, S. Mindess, and J. P. Skalny, eds., The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 3-23.

Diamond, S., and López-Flores, F., 1981, "Comparative Studies of the Effects of Lignitic and Bituminous Fly Ashes in Hydrated Cement Systems," *Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Proceedings of the MRS Symposium N*, S. Diamond, ed., Materials Research Society, Warrendale, PA, pp. 112-123

Dikeou, J. T., 1975, "Fly Ash Increases Resistance of Concrete to Sulfate Attack," *Research Report No. 23*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, 17 pp. Doehne, E., 2002, "Salt Weathering: A Selective Review," *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*, Geological Society Special Publication 205, pp. 51 -64.

Drimalis, T., 2007, "Laboratory and Field Evaluations of External Sulfate Attack," PhD thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX, 187 pp.

Drimalas, T.; Ideker, J. H.; Bentivegna, A. F.; Folliard, K. J.; Fournier, B.; and Thomas, M. D. A., 2012, "The Long-

Term Monitoring of Large-Scale Concrete Specimens Containing Lithium Salts to Mitigate Alkali-Silica Reaction," *Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, SP-289,

T. C. Holland, P. R. Gupta, and V. M. Malhotra, eds., *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI.

Du., R.; Xian, H.; Wu, X.; Zhu, J.; Wei, J.; Xing, J.; Tan, W.; and He, H., 2021, "Morphology Dominated Rapid Oxidation of Framboidal Pyrite," *Geochemical Perspectives Letters*, V. 16, pp. 53-58. doi: 10.7185/geochemlet.2014

Dubberke, W., and Marks, V. J., 1985, "The Effect of Deicing Salt on Aggregate Durability," *Transportation Research Record, Research Project HR-266, Progress Report for the Iowa Highway Research Board, 64th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, Jan., pp. 27-34.

Dubovoy, V. S.; Gebler, S. H.; and Klieger, P., 2002, "Cement-Alkali Level as it Affects Air Void Stability, Freeze-Thaw Resistance, and Deicer Scaling Resistance of Concrete," *Research and Development Bulletin RD128*, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Duchesne, J., and Bérubé, M. A., 1992, "An Autoclave Mortar Bar Test for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion due to AAR," *Proceedings of*

*the 9th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction in Concrete, The Concrete Society, pp. 279-297.*

Duchesne, J., and Bérubé, M. A., 1994, "The Effectiveness of Supplementary Cementing Materials in Suppressing Expansion Due to ASR: Another Look at Reaction Mechanisms, Part 1 : Concrete Expansion and Portlandite Depletion," *Cement and Concrete Research*, V. 24, No. 1, pp. 73-82. doi: 10.1016/0008-8846(94)90084-1

Duchesne, J.; Rodriques, A.; and Fournier, B., 2021, "Concrete Damage due to Oxidation of Sulfide-Bearing Aggregate: A Review," *RILEM Technical Letters*, V. 6, pp. 82-92. doi: 10.21809/rilemtechlett.2021.138

Dunstan Jr., E. R., 1976, "Performance of Lignite and Subbituminous Fly Ash in Concrete—A Progress Report," Report No. REC-ERC-76-1, U.S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, CO, 23 pp.

Durand, B.; Bérand, J.; Roux, R.; and Soles, J., 1990, "Alkali-Silica Reaction: The Relation between Pore Solution Characteristics and Expansion Test Results," *Cement and Concrete Research*, V. 20, No. 3, May, pp. 419-428. doi: 10.1016/0008-8846(90)90032-S

Dyer, R. M., 1991, "An Investigation of Concrete Pumping Pressure and the Effects on the Air Void System

of Concrete," *Master's thesis, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, WA.*

East, B. L., 2007, "Laboratory and Field Investigations on the Use of Lithium Nitrate to Prevent or Mitigate Alkali- Silica Reaction," *MS thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX, 400 pp.*

Eglinton, M., 1998, "Resistance of Concrete to Destructive Agencies," *Lea's Chemistry of Cement and Concrete, fourth edition, P. C. Hewlett, ed., Arnold Publishers, London, pp. 299-342.*

Ekolu, S. O.; Makama, L. N.; and Shuluuka, W. P., 2012, "Influence of Different Recycled Aggregate Types on Strength and Abrasion Resistance Properties of Concrete," *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), M. G. Alexander, H. Beushausen, and F. Dehn, eds., CRC Press, Boca Raton, FL, pp.193-198.*

Elkey, W. E.; Janssen, D. J.; and Hover, K. C., 1993, "Concrete Pumping Effects on Entrained Air Voids," *National Technical Information Service PB94-207420, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA.*

Erlin, B., 2006, "Chapter 17: Embedded Metals and Materials Other Than Reinforcing Steel," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP 169D, J. F. Lamond and J. H. Pielert, eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, Jan., pp. 174-183.*

Erlin, B., and Jana, D., 2003, "Forces of Hydration that can Cause Havoc in Concrete," *Concrete International*, V. 25, No. 11, Nov., pp. 51 -57.

Erlin, B., and Stark, D. C., 1966, "Identification and Occurrence of Thaumasite in Concrete—A Discussion for the 1965 HRB Symposium on Aggressive Fluids," *Portland Cement Association, Skokie, IL.*

Espelid, B., and Fidjestøl, P., 1986, "Durability and Corrosion Behavior of Dynamically Loaded Offshore Concrete Structures," *Proceedings of the International Conference on Concrete in the Marine Environment (Marine Concrete '86), The Concrete Society, UK.*

Evans, I. S., 1970, "Salt Crystallization and Rock Weathering: A Review," *Revue de Geomorphologie Dynamique*, V.19, No. 4, pp. 153-177.

Farnam, Y.; Bentz, D.; Sakulich, A.; Flynn, D.; and Weiss, J., 2014, "Measuring Freeze and Thaw Damage in Mortars Containing Deicing Salt Using a Low-Temperature Longitudinal Guarded Comparative Calorimeter and Acoustic Emission," *Advances in Civil Engineering Materials*, V. 3, No. 1, Jan., pp. 316-337. doi: 10.1520/ACEM20130095

Federal Highway Administration (FHWA), 1975, "AASHTO-FHWA Special Products Evaluation List (SPEL)," Report No. FHWA-RD-76-41, Washington, DC. Federal Highway Administration (FHWA), 1976, "Use of Galvanized Rebars in Bridge Decks," Notice No. 5, 140.10, July, Washington, DC.

Federal Highway Administration (FHWA), 2012, "Literature Review of Chloride Threshold Values for Grouted Post-Tensioned Tendons," Report No. FHWA-HRT-12-067, Washington, DC.

Feldman, R. F.; Chan, G. W.; Brousseau, R. J.; and Tumidajski, P. J., 1994, "Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test," *ACI Materials Journal*, V. 91, No. 3, May-June, pp. 246-255.

Feng, X.; Thomas, M. D. A.; Bremner, T. W.; Folliard, K. J.; and Fournier, B., 2008, "Summary of Research on the Effect of LiNO<sub>3</sub> on Alkali-Silica Reaction in New Concrete," *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, M. A. T. M. Broekmans and B. J. Wigum, eds., Trondheim, Norway, pp. 636-642.

Ferraris, C. F., Stutzman, P.E., and Snyder, K. A., 2006, "Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach," RD 2486, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Ferraro, C.C., 2018 "Mass Concrete Modeling and Thermal Control: Investigation of Delayed Ettringite Formation and Thermal Cracking in Massive Concrete Structures," 3002007577, *Advanced Nuclear Technology: Electric Power Research Institute*, Charlotte, NC.

Fick, G., 2008, "National Open House—Two-Lift Concrete Paving. October 15-16, 2008. Salina/Abilene, KS – Interstate 70," *Final Report, National Concrete Pavement Technology Center*, 24 pp.

Fidjestøl, P., 1987, "Reinforcement Corrosion and the Use of CSF-Based Additives," *Concrete Durability—Katharine and Bryant Mather International Conference*, SP-100, J. M Scanlon, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1445-1458.

Fidjestøl, P., 1991, "Korrosjonshastighet i karbonatisert betong (Rate of Corrosion in Carbonated Concrete)," *Skandinavisk miniseminar*, Trondheim, Norway.

Fidjestøl, P., 1993, "Chloride Resistance of Blended and Triple Blend Cements," *Proceedings Nordisk Miniseminar om klorider i betong*, L.-O. Nilsson, ed., Institute of Building Materials, Chalmers University, Gothenburg, Jan.

Fidjestøl, P., and Frearson, J., 1994, "High-Performance Concrete Using Blended and Triple Blended Binders," *High-Performance Concrete, Proceedings of the Second ACI International Conference*, SP-149, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 135-158.

Fidjestøl, P., and Jusnes, H., 2002, "Long Term Experience with Microsilica Concrete in a Marine Environment," *Nordic Concrete Research*, Norwegian Concrete Association, Oslo, Norway, 11 pp.

Fidjestøl, P., and Nilsen, N., 1980, "Field Test of Reinforcement Corrosion in Concrete," *Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 205-222.

Fidjestøl, P.; Rønning, B.; and Røland, B., 1985, "Criteria for Cover and Crack Control in the Permanently Wet Part of Marine Concrete Structures," *Report to Concrete in the Oceans*,

Phase 2.

Figg, J. W., 1981, "Reaction between Cement and Artificial Glass in Concrete," *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa.*

Fintel, M., ed., 1984, *Handbook of Concrete Engineering, Van Nostrand, Reinhold Co, New York, 892 pp.*

Fleming, A. G., 1933, "The Development of Special Portland Cements in Canada," *The Engineering Journal, V. 16, pp. 215-223.*

Flemming, H.-C., 1995, "Eating Away at the Infrastructure— The Heavy Cost of Microbial Corrosion," *Water Quality International, No. 4, pp. 16-19.*

Fluge, F., and Blankvoll, A., 1995, "Chloride Exposure on Gimsøystraument Bridge, Results from Extended Condition Survey," *Proceedings of the Nordic Seminar on Corrosion of Reinforcement: Field and Laboratory Studies for Modeling and Service Life, Report TVBM-3064, K. Tuutti, ed., University of Lund, Sweden.*

Folliard, K. J., and Sandberg, P., 1994, "Mechanisms of Concrete Deterioration by Sodium Sulfate Crystallization," *Durability of Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-145, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 933-945.*

Folliard, K. J.; Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Kurtis, K. E.; and Ideker, J. H., 2006a, "Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction (ASR)," *Publication FHWA-HRT-06-073, Federal Highway Administration, Washington, DC.*

Folliard, K. J.; Barborak, R.; Drimalas, T.; Du, L.; Garber, S.; Ideker, J.; Ley, T.; Williams, S.; Juenger, M.; Thomas, M. D. A.; and Fournier, B., 2006b, "Preventing ASR/DEF in New Concrete: Final Report," *CTR 4085-5, Center for Transportation Research (CTR), University of Texas at Austin, Austin, TX.*

Fournier, B., and Bérubé, M. A., 2000, "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A Review of Basic Concepts and Engineering Implications," *Canadian Journal of Civil Engineering, V. 27, No. 2, Apr., pp. 167-191. doi: 10.1139/l99-072*

Fournier, B.; Bilodeau, A.; Nkinamubanzi, P.C.; and Bouzoubaa, N., 2018a, "Field and Laboratory Investigations on the Use of Fly Ash and Li-based Admixtures to Prevent ASR in Concrete," *6th International Conference on Durability of Concrete Structures, University of Leeds (UK), Paper 1219.*

Fournier, B.; Chevrier, R.; Bilodeau, A.; Nkinamubanzi, P. C.; and Bouzoubaa, N., 2016, "Comparative Field and Laboratory Investigations on the Use of Supplementary Cementing Materials (SCM) to Control Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete," *15th International Conference on AAR, Sao Paulo, Brazil.*

Fournier, B.; Chevrier, R.; DeGrosbois, M.; Lisella, R.; Folliard, K.; Ideker, J.; Shehata, M.; Thomas, M.; and Baxter, S., 2004, "The Accelerated Concrete Prism Test (60°C): Variability of the Test Method and Proposed Expansion Limits," *The 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing China, M. Deng and M. Tang, eds., International Academic Publishers/ Beijing World Publishing Corporation, Beijing, pp. 314-323.*

Fournier, B.; Lindgård, J.; Wigum, B. J.; and Borchers, I., 2018b, "Outdoor Exposure Site Testing for Preventing Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete—A Review," *Fifth International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa.*

Fowler, D. W., and Rached, M. M., 2012, "Polish Resistance of Fine Aggregates in Portland Cement Concrete Pavements," *Transportation Research Record* No. 2267, pp. 29-36. doi: 10.3141/2267-03

French, W. J., 1986, "A Review of Some Reactive Aggregates from the UK with Reference to the Mechanism of Reaction and Deterioration," *Proceedings, Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, P. E. Grattan-Bellew, ed., Noyes Publications, ed., Park Ridge, NJ, pp. 226-230.

French, W. J., and Poole, A. B., 1976, "Alkali-Aggressive Reactions and the Middle East," *Concrete (London)*, V. 10, No. 1, pp. 18-20.

Frith, D. J.; Morian, D. A.; Stofels, S. M.; and Saboundjian, S., 2003, "Hard Aggregate Resistance to Studded Tires: Alaskan Experience," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, V. 1874, pp. 19-28.

Frizell, K., and Meford, B. W., 1991, "Designing Spillways to Prevent Cavitation Damage," *Concrete International*, V. 13, No. 5, May, pp. 58-64.

Gagatek, D., and Hooton, R. D., 2019, "Assessing Performance of Sulfate Resistant Portland Cements," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 6, Nov. pp. 227-233.

Gautefall, O., and Vennesland, Ø., 1985, "Elektrisk motstand og pH-nivå. Modifisert Portland cement, delrapport 5 (Electrical Resistivity and pH. Modified Portland Cement Part 5)," *Sintef Report No. STF 65 A85042*, Trondheim, Norway (in Norwegian).

Gaynor, R. D., 1985, "Understanding Chloride Percentages," *Concrete International*, V. 7, No. 9, Sept., pp. 26-27.

Geiss, C. E., and Gourley, J. R., 2019, "A Thermomagnetic Technique to Quantify the Risk of Internal Sulfur Attack due to Pyrrhoite," *Cement and Concrete Research*, V. 115, pp. 1-7.

Gencel, O.; Ozel, C.; and Filiz, M., 2010, "Investigation on Abrasive Wear of Concrete Containing Hematite," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, V. 18, pp. 40-49.

Ghorab, H. Y.; Heinz, D.; Ludwig, U.; Meskendahl, T.; and Wolter, A., 1980, "On the Stability of Calcium Aluminate Sulphate Hydrates in Pure Systems and in Cements," *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Editions Septima, Paris, V. 4, pp. 496-503.

Gilliland, J. L., and Moran, W. T., 1949, "Siliceous Admixture for the Davis Dam," *Engineering News Record*, V. 142, Feb., 62 pp.

Gillott, J. E., 1978, "Effect of Deicing Agents and Sulfate Solutions on Concrete Aggregate," *Quarterly Journal of Engineering Geology*, V. 11, No. 2, pp. 177-192. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1978.011.02.06

Gilpin, R. R., 1980, "A Model for the Prediction of Ice Lensing and Frost Heave in Soils," *Water Resources Research*, V. 16, No. 5, Oct., pp. 918-930. doi: 10.1029/WR016i005p00918

Glasser, F. P., 1992, "Chemistry of the Alkali-Aggregate Reaction," *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R. N. Swamy, ed., Blackie, London, UK, pp. 96-121.

Glasser, F. P., and Marr, J., 1985, "The Alkali Binding Potential of OPC and Blended Cements," *Il Cemento*, The Concrete Society, Slough, UK, V. 82, pp. 85-94.

Gollop, R. S., and Taylor, H. F. W., 1995, "Microstructural and Microanalytical Studies of Sulfate Attack III. Sulfate-Resisting Portland Cement: Reactions with Sodium and Magnesium Sulfate Solutions," *Cement and Concrete Research*, V. 25, No. 7, Oct., pp. 1581-1590. doi: 10.1016/0008-8846(95)00151-2

Goto, S., and Roy, D. M., 1981, "The Effect of W/C Ratio and Curing Temperature on the Permeability of Hardened Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, V. 11, No. 4, July-Aug., pp. 575-579. doi: 10.1016/0008-8846(81)90087-9

Goudie, A., and Viles, H., 1997, *Salt Weathering Hazards*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, 241 pp.

Grattan-Bellew, P. E., 1989, "Test Methods and Criteria for Evaluating the Potential Reactivity of Aggregates," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japan, The Society of Materials Science, Japan, pp. 279-294.

Grattan-Bellew, P. E., 1995, "Laboratory Evaluation of Alkali-Silica Reaction from Saunders Generating Stations," *ACI Materials Journal*, V. 92, No. 2, Mar.-Apr., pp. 126-134.

Grattan-Bellew, P. E., and Eden, W. J., 1975, "Concrete Deterioration and Floor Heave Due to Biogeochemical Weathering of Underlying Shale," *Canadian Geotechnical Journal*, V. 12, pp. 372-378.

Griffn, D. F., 1969, "Effectiveness of Zinc Coating on Reinforcing Steel in Concrete Exposed to a Marine Environment," *Technical Note No. N-1032*, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, CA, July, 42 pp.

Haber, Z. A.; Munoz, J. F.; and Graybeal, B. A., 2017, "Field Test of an Ultra-High Performance Concrete Overlay," *Report FHWA-HRT-17-096*, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Hagerman, T., and Roosaar, H., 1955, "Damage to Concrete Caused by Sulfide Minerals," *Beton*, V. 40, No. 2, pp. 151-161.

Hakkinen, T., 1992, "Permeability of High-Strength Blast Furnace Slag Concrete," *Nordic Concrete Research (Norsk Betongforening)*, Nordic Concrete Federation, Oslo, Norway, No. 11, Feb., pp. 55-67.

Hall, C., and Hof, W. D., 2012, *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*, second edition, Spon Press, New York, 370 pp.

Hallet, B.; Walder, J. S.; and Stubbs, C. W., 1991, "Weathering by Segregation Ice Growth in Microcracks at Sustained Sub-Zero Temperatures: Verification from an Experimental Study Using Acoustic Emissions," *Permafrost and Periglacial Proceedings*, V. 2, 283-300 pp.

Hamilton, J. J., and Handegord, G. O., 1968, "The Performance of Ordinary Portland Cement Concrete in Prairie Soils of High Sulphate Content," *Performance of Concrete—Resistance of Concrete to Sulphate and Other Environmental Conditions*, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada, pp. 135-158.

Hansen, W. C., 1944, "Studies Relating to the Mechanism by Which the Alkali-Silica Reaction Proceeds in Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 41, pp. 213-227.

Hansen, W. C., 1960, "Inhibiting Alkali-Aggregate Reaction with Barium Salts," *ACI Journal Proceedings*, V. 57, No. 9, Mar., pp. 881-883.

Hansen, W. C., 1968, "The Chemistry of Sulphate-Resisting Portland Cements," *Performance of Concrete*, Thorvaldson Symposium, E. G. Swenson, ed., University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada, pp. 18-55.

Hansen, W. C., and Pressler, E. E., 1947, "Solubility of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  in Dilute Alkali Solutions," *Industrial & Engineering Chemistry*, V. 39, No. 10, Oct., pp. 1280-1282. doi: 10.1021/ie50454a005

Haque, M. N.; Kayyali, O. A.; and Gopalan, M. K., 1992, "Fly Ash Reduces Harmful Chloride Ions in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June, pp. 238-241.

Harboe, E. M., 1982, "Longtime Studies and Field Experience with Sulfate Attack," *Sulfate Resistance of Concrete, SP-77*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Oct., pp. 1-20.

Hartell, J. A.; Boyd, A. J.; and Ferraro, C. C., 2011, "Sulfate Attack on Concrete: Effect of Partial Immersion," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 23, No. 5, pp. 572-579.

Hayes, C. F., 2007, "Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soils," PCA R&D SN3016, Portland Cement Association, Skokie, IL, 10 pp.

Haynes, H., 2002, "Sulfate Attack on Concrete: Laboratory vs. Field Experience," *Concrete International*, V. 24, No. 7, July, pp. 64-70.

Haynes, B., 2012, "Preliminary Tests of Repair Material for Physical Sulfate Attack," *Technical Session on Physical Salt Attack of Concrete Parts I & II, ACI Committee 201, ACI Spring 2012 Convention – The Art of Concrete, Dallas, TX, USA*, <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/B.Haynes-PSA-Presentation-ACI-Spring-2012.pdf>.

Haynes, H., and Bassuoni, M. T., 2011, "Physical Salt Attack on Concrete," *Concrete International*, V. 33, No. 11, Nov., pp. 38-42.

Haynes, H.; O'Neill, R.; and Mehta, P. K., 1996, "Concrete Deterioration from Physical Attack by Salts," *Concrete International*, V. 18, No. 1, Jan., pp. 63-68.

Haynes, H.; O'Neill, R.; Nef, M.; and Mehta, P. K., 2008, "Salt Weathering Distress on Concrete Exposed to Sodium Sulfate Environment," *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 1, Jan.-Feb., pp. 35-43.

Haynes, H.; O'Neill, R.; Nef, M.; and Mehta, P. K., 2010, "Salt Weathering of Concrete by Sodium Carbonate and Sodium Chloride," *ACI Materials Journal*, V. 107, No. 3, May-June, pp. 258-266.

Hearn, N.; Hooton, R. D.; and Nokken, M. R., 2006, "Pore Structure and Permeability," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*, ASTM STP 169D, pp. 238-252.

Heinz, D., and Ludwig, U., 1987, "Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes Subjected to Heat Treatment," *Concrete Durability: Katherine and Bryant Mather International Conference*, J. M. Scanlon, ed., SP-100, V. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 2059-2071.

Helmuth, R. A., 1960a, "Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes," *Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, NBS, Washington, DC pp. 855-869.

Helmuth, R. A., 1960b, "Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes," *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry on Cement*, Monograph No. 43, National Bureau of Standards, Washington, DC, V. 2, pp. 855-869.

Helmuth, R. A., 1960c, "Frost Action in Concrete" *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Monograph No. 43, National Bureau of Standards, Washington, DC, V. 2, pp. 829-833.

Henriksen, H.; Kjaer, U.; and Lundberg, L., 2000, "Concrete Technology—Development of Concrete Mixes for Tunnel Elements and Ramps and Experiences from the Concrete Production and Castings," *Øresund Link Immersed Tunnel Conference*, Copenhagen, Apr., pp. D1 -1 - D1 -12.

Hewlett, P. C., 1998, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1053 pp.

Hill, G. A.; Spellman, D. L.; and Stratfull, R. F., 1976, "Laboratory Corrosion Tests of Galvanized Steel in Concrete," *Transportation Research Record*, No. 604, pp. 25-37.

Hill, J.; Byars, E. A.; Sharp, J. H.; Lynsdale, C. J.; Cripps, J. C.; and Zhou, Q., 2003, "An Experimental Study of Combined Acid and Sulfate Attack of Concrete," *Cement and Concrete Composites*, V. 25, No. 8, Dec., pp. 997-1003. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00123-9

Hime, W. G.; Martinek, R. A.; Backus, L. A.; and Marusin, S. L., 2001, "Salt Hydration

*Distress*," *Concrete International*, V. 23, No. 10, Oct., pp. 43-50.

Hobbs, D. W., 1989, "Effect of Mineral and Chemical Admixtures on Alkali-Aggregate Reaction," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, K. Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura, eds., E&FN Spon, London, UK, pp. 173-186.

Holland, T. C., and Gutschow, R. A., 1987, "Erosion Resistance with Silica-Fume Concrete," *Concrete International*, V. 9, No. 3, Mar., pp. 32-40.

Holm, J., 1987, "Comparison of the Corrosion Potential of Calcium Chloride and a Calcium Nitrite Based Non-Chloride Accelerator—A Macro-Cell Corrosion Approach," *Corrosion, Concrete, and Chlorides*, SP-102, F. W. Gibson, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 35-48.

Hooton, R. D., 1989, "What is Needed in a Permeability Test for Evaluation of Concrete Quality," in *Pore Structure and Permeability of Cementitious Materials*, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 137, eds. L. R. Roberts and J. P. Skalny, pp. 141-149.

Hooton, R. D., 1991, "New Aggregates Alkali-Reactivity Test Methods," *Research Report MAT-91-14*, Ministry of Transportation, ON, Canada.

Hooton, R. D., 1993, "Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing, and Alkali-Silica Reactivity," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 2, Mar.-Apr., pp. 143-151.

Hooton, R. D., 2007, "Evolution of North American Standards for Sulfate Resistance: an Historic Perspective and Recent Developments," *Proceedings of the RILEM Workshop on Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, Ghent, Belgium, pp. 75-77.

Hooton, R. D., 2008, "Bridging the Gap Between Research and Standards," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 2, Feb., pp. 247-258. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.012

Hooton, R. D., and Brown, P. W., 2009, "Development of Test Methods to Address the Various Mechanisms of Sulfate Attack," *RILEM Proceedings on PRO63, Concrete in Aggressive, Aqueous Environments*, Toulouse, Vol. 2, pp. 280-297.

Hooton, R. D., and Rogers, C. A., 1989, "Evaluation of Rapid Test Methods for Detecting Alkali-Reactive Aggregates," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, The Society of Materials Science, Japan, pp. 439-444.

Hooton, R. D., and Rogers, C. A., 1992, "Development of the NBRI Rapid Mortar Bar Test Leading to Its Use in North America," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, The Concrete Society, Weham, Slough, Vol. 1, pp. 461-467.

Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., 2002, "The Use of Limestone in Portland Cements: Effect on Thaumasite Form of Sulfate Attack," *PCA R&D Serial No. 2658*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 10 pp.

Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., 2016, *Sulfate Resistance of Mortar and Concrete Produced with Portland-Limestone Cement and Supplementary Cementitious Materials*, SN3285, Portland Cement Association, Skokie, IL, 181 pp. [Online]. Available: [http://www.cement.org/pdf\\_files/sn3285.pdf](http://www.cement.org/pdf_files/sn3285.pdf)

Hooton, R. D.; Geiker, M. R.; and Bentz, E. C., 2002, "Effects of Curing on Chloride Ingress and Implications for Service Life," *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 2, Mar.-Apr., pp. 201-206.

Hooton, R. D.; Ramezani-pour, A.; and Schutz, U., 2010, "Decreasing the Clinker Component in Cementing Materials: Performance of Portland-Limestone Cements in Concrete in combination with Supplementary Cementing Materials," *CD Proceedings*, 2010

*Concrete Sustainability Conference, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Springs, MD, 15 pp.*

Hooton, R. D.; Rogers, C. A.; MacDonald, C. A.; and Ramlochan, T., 2013, "20-Year Field Evaluation of Alkali-Silica Reaction Mitigation," *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No. 5, Sept.-Oct., pp. 539-548.

Hong, S.-Y., and Glasser, F. P., 1999, "Alkali Binding in Cement Pastes: Part I. The C-S-H Phase," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 12, Dec., pp. 1893-1903. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00187-8

Hong, S.-Y., and Glasser, F. P., 2002, "Alkali Sorption by C-S-H and C-A-S-H Gels: Part II. Role of Alumina," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, July, pp. 1101-1111. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00753-6

Hope, B. B.; Ip, A. K.; and Manning, D. G., 1985, "Corrosion and Electrical Impedance in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, No. 3, May, pp. 525-534. doi: 10.1016/0008-8846(85)90127-9

Horiguchi, K.; Chosokabi, T.; Ikabata, T.; and Suzuki, Y., 1994, "Rate of Carbonation in Concrete Made with Blended Cement," in *Durability of Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-145, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 917-932.*

Hossack, A., and Thomas, M. D. A., 2015, "Varying Fly ash and Slag Contents in Portland Limestone Cement Mortars Exposed to External Sulfates," *Construction and Building Materials*, Vol. 78, pp. 333-341.

Hossack, A.; Thomas, M.D.A.; and Mofatt, E., 2020, "Field Performance of Portland Limestone Cement Concretes Exposed to Cold-Temperature Sulfate Solutions," in *External Sulphate Attack—Field Aspects and Lab Tests, E. Menendez and V. Baroghel-Bouny, eds., RILEM Book Series, Vol. 21, https://doi.org/10.1007/978-3-030-20331-3, pp. 3-14.*

Howie, R. A.; Zussman, J.; and Deer, W., 1992, *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*, London, UK: Longman, 696 pp.

Hudec, P. P., and Larbi, E. Y., 1989, "Chemical Treatments and Additives to Minimize Alkali Reactivity," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, The Society of Materials Science, Japan, pp. 193-198.*

Hurst, W. D., 1968, "Experience in the Winnipeg Area with Sulphate-Resisting Cement Concrete," in *Performance of Concrete-Resistance of Concrete to Sulphate and Other Environmental Conditions, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada, pp. 125-134.*

Hussain, S. E., and Rasheeduzzafar, 1994, "Corrosion Resistance Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 3, May-June, pp. 264-272.

Ibrahim, A. A.; Abuazza, O. A.; and Tarrani, F. A., 1997, "Prestressed Concrete Cylinder Pipes Exposed Internally to Aggressive Water," in *Durability of Concrete, SP-170, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 437-439.*

Ideker, J. H., 2022, "Unified Durability Guidance in ACI Committee Documents," *ACI Materials Journal*, Vol. 119, No. 2, Mar., pp. 29-42.

Ideker, J.; Drimalas, T.; Fournier, B.; Folliard, K. J.; Hooton, D.; and Thomas, M. D. A., 2016, "Managing Alkali-Aggregate Reactivity: North American Approach," *Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity (ICAAAR), Paper 156, Sao Paolo, Brazil, July.*

Ideker, J. H.; East, B. L.; Folliard, K. J.; Thomas, M. D. A.; and Fournier, B., 2010, "The Current State of the Accelerated Concrete Prism Test," *Cement and Concrete Research*, Vol.

40, No. 4, Apr., pp. 550-555. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.030

Ideker, J. H.; Folliard, K. J.; Juenger, M. C. G.; and Bentivegna, A. F., 2012, "Do Current Laboratory Test Methods Accurately Predict Alkali-Silica Reactivity?" *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 4, July-Aug., pp. 395-400.

Ideker, J. H.; Drimalas, T.; Bentivegna, A. F.; Folliard, K. J.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A.; Hooton, R. D.; and Rogers, C. A., 2012, "The Importance of Outdoor Exposure Site Testing," *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity (ICAAR)*, Austin, TX, May.

Idorn, G. M., and Roy, D. M., 1986, "Opportunities with Alkalies in Concrete Testing, Research, and Engineering Practice," in *Alkalies in Concrete*, STP-930, ASTM International, West Conshohocken, PA, Jan., pp. 5-15.

Irassar, E. F.; Di Maio, A.; and Batic, O. R., 1996, "Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 1, Jan., pp. 113-123. doi: 10.1016/0008-8846(95)00195-6

Jacobsen, S.; Scherer, G. W.; and Schulson, E. M., 2015. "Concrete-Ice Abrasion Mechanics," *Cement and Concrete Research*, Vol. 73, pp. 79-95.

Jambor, J. L., and Bowles, D. W., 1998, "Theory and Applications of Mineralogy in Environmental Studies of Sulfide-Bearing Mine Wastes," in *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy, Short Course Series 27*, L. J. Cabri and D. J. Vaughan, eds., Mineral Association of Canada, Ottawa, ON, Canada, pp. 367-402.

Janssen, D. J., 2001, "Highway Concrete Pavement Technology Volume II: Field Evaluation of SHRP C-203 (Freeze-Thaw Resistance) Test Sites," *Federal Highway Administration*, Washington, DC.

Janssen, D. J., and Snyder, M. B., 1993, "Mass Loss Experience with ASTM C666: With and Without Deicing Salt," in *Proceedings, International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in the Presence of Deicing Salts*, Laval University, Sainte-Foy, QC, Canada, E&FN Spon, London, Aug., pp. 137-151.

Janssen, D. J., and Snyder, M. B., 1994, "Resistance of Concrete to Freezing and Thawing," SHRP-C-391, Strategic Highway Research Program, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Janssen, D. J.; DuBose, J. D.; Patel, A. J.; and Dempsey, B. J., 1986, "Predicting the Progression of D-Cracking," *Transportation Engineering Series No. 44*, University of Illinois, Champaign, IL.

Janssen, D. J.; Dyer, R. M.; and Elkey, W. E., 1995, "Effect of Pumping on Entrained Air Voids: Role of Pressure," in *Proceedings, CONSEC 95*, Sakai, K., N. Banthia, and O. E. Gjorv, eds., Sapporo, Japan, E&FN Spon, Tokyo, pp. 233-242.

Janzen, M. P.; Nicholson, R. V.; and Scharer, J. M., 2000, "Pyrrhotite Reaction Kinetics: Reaction Rates for Oxidation by Oxygen, Ferric Iron, and for Nonoxidative Dissolution," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 64, pp. 1511-1522. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00421-4.

Johannesson, B. F., 2003, "A Theoretical Model Describing Diffusion of a Mixture of Different Types of Ions in Pore Solution of Concrete Coupled to Moisture Transport," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 4, Apr., pp. 481-488. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00993-6

Johansen, V.; Thaulow, N.; and Skalny, J., 1993, "Simultaneous Presence of Alkali-Silica Gel and Ettringite in Concrete," *Advances in Cement Research*, Vol. 5, No. 17, Jan., pp. 23-29. doi: 10.1680/adcr.1993.5.17.23

Julio-Betancourt, G. A., and Hooton, R. D., 2005, "Effect of De-Icer and Anti-Icer Chemicals on the Durability, Microstructure and Properties of Cement-Based Materials," *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering*, Toronto, ON, Canada, pp. 2669.

Justnes, H., and Nygaard, E. C., 1994, "The Influence of Technical Calcium Nitrate Additions on the Chloride Binding Capacity of Cement and the Rate of Chloride Induced Corrosion of Steel Embedded in Mortars," *Proceedings of the International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy, ed., Sheffield, UK, Academic Press, London, pp. 491-502.

Kalousek, G. L.; Porter, L. C.; and Benton, E. J., 1972, "Concrete for Long-Time Service in Sulfate Environment," *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, No. 1, Jan., pp. 79-89. doi: 10.1016/0008-8846(72)90025-7

Kalousek, G. L.; Porter, L. C.; and Harboe, E. J., 1976, "Past, Present, and Potential Developments of Sulphate-Resisting Concretes," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 4, No. 5, Sept., pp. 347-354. doi: 10.1520/JTE10522J

Kaneuji, M.; Winslow, D. N.; and Dolch, W. L., 1980, "The Relationship Between an Aggregate's Pore Size Distribution and Its Freeze Thaw Durability in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, No. 3, May, pp. 433-441. doi: 10.1016/0008-8846(80)90119-2

Kauer, J. A., and Freeman, R. L., 1955, "Effect of Carbon Dioxide on Fresh Concrete," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 52, No. 4, Dec., pp. 447-454.

Kawamura, M., and Takemoto, K., 1988, "Correlation between Pore Solution Composition and Alkali Silica Expansion in Mortars Containing Various Fly Ashes and Blastfurnace Slags," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 10, No. 4, pp. 215-223. doi: 10.1016/0262-5075(88)90051-6

Kawamura, M.; Takemoto, K.; and Hasaba, S., 1987, "Effectiveness of Various Silica Fumes in Preventing Alkali-Silica Expansion," *Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, SP-100*, J. M. Scanlon, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1809-1820.

Kelham, S., 1996, "The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, No. 3, pp. 171-179. doi: 10.1016/0958-9465(95)00013-5

Kennerley, R. A., 1988, "Experience in New Zealand with Pozzolans, Fly Ash and Slag," *Concrete 88 Workshop*, W. G. Ryan, ed., Concrete Institute of Australia, Sydney, pp. 268-290.

Kennerley, R. A.; St. John, D. A.; and Smith, L. M., 1981, "A Review of Thirty Years of Investigation of the Alkali-Aggregate Reaction in New Zealand," *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Cape Town, CSIRO, Pretoria, Paper S252/12.

Kernes, R. G.; Edwards, J. R.; Dersch, M. S.; Lange, D. A.; and Barkan, C. P. L., 2011, "Investigation of the Impact of Abrasion as a Concrete Cross-tie Rail Seat Deterioration (RSD) Mechanism," *AREMA 2011 Annual Conference in Conjunction with Railway Interchange 2011*, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Lanham, MD, 24 pp.

Keshari, S., 2009, "Effect of Constituent Materials and Curing Methods on the Abrasion Resistance and Durability of High Performance Concrete for Pre-Cast Pre-Stressed Bridge Deck Slabs," *master's thesis*, Oregon State University, Corvallis, OR, 243 pp.

Kettle, R., and Sadegzadeh, M., 1987, "Influence of Construction Procedures on Abrasion Resistance," *Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, SP-100*, J. M. Scanlon, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1385-

1410.

Kevern, J. T.; Schaefer, V. R.; and Wang, K., 2009, "The Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37, No. 4, pp. 1-6.

Keyser, J. H., 1971, "Resistance of Various Types of Bituminous Concrete and Cement Concrete to Wear by Studded Tires," *Highway Research Record No. 352, Highway Transportation Research Board*, pp. 16-31.

Kjellsen, K. O.; Detwiler, R. J.; and Gjrv, O. E., 1991, "Development of Microstructures in Plain Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 1, Jan., pp. 179-189. doi: 10.1016/0008-8846(91)90044-1

Klieger, P., 1952, "Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Sizes of Aggregate," *Research Department Bulletin RX040, Portland Cement Association, Skokie, IL*.

Klieger, P., 1956, "Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregates," *Research Department Bulletin RX077, Portland Cement Association, Skokie, IL*.

Klieger, P., and Gebler, S., 1987, "Fly Ash and Concrete Durability," *Concrete Durability: Katharine and Bryant Mather International Conference, SP-100, J. M. Scanlon, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 1043-1069.

Klieger, P., and Greening, N. R., 1969, "Properties of Expansive Cement Concretes," *Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, Japan*, pp. 439-456.

Klieger, P.; Monfore, G.; Stark, D.; and Teske, W., 1974, "D-Cracking of Concrete Pavements in Ohio," *Final Report, Ohio-DOT-11-74*.

Kollek, J. J.; Varma, S. P.; and Zaris, C., 1986, "Measurement of OH<sup>-</sup> Concentrations of Pore Fluids and Expansion Due to Alkali-Silica Reaction in Composite Cement Mortars," *Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 3, Rio de Janeiro, Brazil*, pp. 183-189.

Kompen, R., 1994, "Prosjektering for bestandighet (Development of Resistance)," *Prosjektering og Produksjon av bestandige betongkonstruksjoner (Design and Production of Resistant Concrete Structures), Jan. 10-12, 1994, Trondheim, Norsk Betonforening. (in Norwegian)*

Krauskopf, K. B., and Bird, D. K., 1995, *Introduction to Geochemistry, third edition, Stanford University Press, CA*, 647 pp.

Kummer, H. W., and Meyer, W. E., 1967, "Tentative Skid-Resistance Requirements for Main Rural Highways," *NCHRP Report No. 37, Highway Transportation Research Board, Washington, DC*, 80 pp.

Lane, D. S., 1987, "Long-Term Mortar Bar Expansion Tests for Potential Alkali-Aggregate Reactivity," *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, P. E. Grattan-Bellew, ed., Noyes, Park Ridge, NJ*, pp. 336-341.

Latifee, E. R., and Rangaraju, P. R., 2015, "Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating

Alkali-Silica Reactivity of Aggregates," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 27, No. 7, pp. 1-10.

Lawrence, C. D., 1995, "Delayed Ettringite Formation: An Issue?" *Materials Science of Concrete IV, J. Skalny and S. Mindess, eds., American Ceramic Society, Westerville, OH*, pp. 113-154.

Lawrence, M., and Vivian, H. F., 1961, "The Reactions of Various Alkalies with Silica," *Australian Journal Applied Science, Commonwealth Scientific and Industrial Research Corporation, Melbourne, Australia*, V. 12, No. 1, pp. 96-103.

Lea, F. M., 1971, *The Chemistry of Cement and Concrete*, third edition, Chemical Publishing Co, New York, 727 pp.

Lee, B. Y., and Kurtis, K. E., 2017, "Effect of Pore Structure on Salt Crystallization Damage of Cement-Based Materials: Consideration of w/b and Nanoparticle Use," *Cement and Concrete Research*, V. 98, pp. 61 -70.

Lerch, W.; Ashton, F. W.; and Bogue, R. H., 1929, "The Sulphoaluminates of Calcium," *Bureau of Standards Journal of Research*, V. 2, No. 4, pp. 715-731 . doi: 10.6028/jres.002.020

Lichtner, P. C.; Steefel, C. I.; and Oelkers, E. H., 1996, "Reactive Transport in Porous Media," *Reviews in Mineralogy*, P. H. Ribbe, ed., *Mineralogical Society of America, Blacksburg, VA*, 438 pp.

Lindgård J.; Nixon, P. J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B. J.; Haugen, M., Åkesson, U., 2010, "The EU 'PARTNER' Project—European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates: Final Results and Recommendations," *Cement and Concrete Research*, V. 40, No. 4, pp. 611 -635.

Litvan, G. G., 1972, "Phase Transitions of Adsorbates: IV, Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 55, No. 1, Jan., pp. 38-42. doi: 10.1111/j.1151-2916.1972.tb13393.x

Litvan, G. G., 1978, "Adsorption Systems at Temperatures Below the Freezing Point of the Adsorptive," *Advanced Colloidal and Interfacial Science*, V. 9, No. 4, June, pp. 253-302. doi: 10.1016/0001-8686(78)85001-5

Liu, K.-W., and Mukhopadhyay, A. K., 2014 "A Kinetic- Based ASR Aggregate Classification System," *Journal of Construction and Building Materials*, V. 68, pp. 525-534.

Liu, T., 1994, "Abrasion Resistance," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP-169C, P. Klieger and J. Lamond, eds., *ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 182-192.

Liu, Y.; Yen, T.; and Hsu, T., 2006, "Abrasion Erosion of Concrete by Water-Borne Sand," *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 10, Oct., pp. 1814-1820. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.018

Longuet, P., 1976, "La protection des armatures dans le beton armé élaboré avec des ciments de laitier," *Silicates Industriels*, V. 7, No. 8, pp. 321 -328.

Lossing, F. A., 1966, "Sulfate Attack on Concrete Pavements in Mississippi," *Highway Research Record No. 113*, *Highway Transportation Research Board, Washington, DC*, pp. 88-102.

Lu, D.; Fournier, B.; Grattan-Bellew, P.; Xu, Z.; and Tang, M., 2008, "Development of a Universal Accelerated Test for Alkali-silica and Alkali-Carbonate Reactivity of Concrete Aggregates," *Materials and Structures*, V. 41, No. 2, Mar., pp. 235-246. doi: 10.1617/s11527-007-9232-2

Lu, Y.; Garboczi, E.; Bentz, D.; and Davis, J., 2012, "Modeling of Chloride Transport in Cracked Concrete: A 3-D Image-based Microstructure Simulation," *Proceedings of the COMSOL Conference (The 8th Annual Conference on Multiphysics Simulation)*, Boston, MA. <http://concrete.nist.gov/~bentz/ModelingChlorideIonTransport-CrackedConcrete.pdf>

Lute, R. D.; Folliard, K. J.; Drimalas, T.; and Rust, C., 2016, "Coatings and Sealers for Mitigation of Alkali-Silica Reaction and/or Delayed Ettringite Formation," *Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity (ICAAR)*, Sao Paolo,

Brazil, Paper 104, July.

Maage, M., and Helland, S., 1991, "Quality Inspection of 'Shore Approach' High-Strength Concrete," *Durability of Concrete, Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference, SP-126*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 609-626.

Maage, M.; Helland, S.; Carlsen, J. E.; and Ronne, M., 1994, "Inspection and Repair of a Concrete Wharf," *Durability of Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-145*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 797-810.

MacDonald, J. E., 2000, "Evaluation of Materials for Repair of Erosion Damage in Hydraulic Structures," *Durability of Concrete, Proceedings of the CANMET/ACI International Conference, SP-192*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 887-898.

Magni, E. R.; Rogers, C. A.; and Grattan-Bellew, P. E., 1987, "The Influence of the Alkali-Silicate Reaction on Structures in the Vicinity of Sudbury, Ontario," *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, P. E. Grattan-Bellew, ed., Noyes, Park Ridge, NJ, pp. 17-22.

Malhotra, V. M.; Zhang, M.-H.; Read, P. H.; and Ryell, J., 2000, "Long-Term Mechanical Properties and Durability Characteristics of High-Strength/High-Performance Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials under Outdoor Exposure Conditions," *ACI Materials Journal*, V. 97, No. 5, Sept.-Oct., pp. 518-525.

Marcelino, A. P.; Calixto, J. M.; Gumieri, A. G.; Ferreira, M. C.; Caldeira, C. L.; Silva M. V.; and Costa, A. L.,

2016, "Evaluation of Pyrite and Pyrrhotite in Concretes," *IBRACON Structures and Materials Journal*, V. 9, No. 3, pp. 484-493.

Marchand, J.; Pleau, R.; and Gagné, R., 1995, "Deterioration of Concrete Due to Freezing and Thawing," *Materials Science of Concrete IV*, J. Skalny and S. Mindess, eds., The American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 283-354.

Marcotte, T. D., and Hansson, C. M., 2003, "The Influence of Silica Fume on the Corrosion Resistance of Steel in High Performance Concrete Exposed to Simulated Sea Water," *Journal of Materials Science*, V. 38, No. 23, Dec., pp. 4765-4776. doi: 10.1023/A:1027431203746

Markey, S. M.; Lee, S. I.; Mukhopadhyay, A. K.; Zollinger, D. G.; Whitney, D. P.; and Fowler, D. W., 2006, "Investigation of Spall Repair Materials for Concrete Pavement," Report No. FHWA/TX-06/0-5110-1, 158 pp.

Marks, V. J., and Dubberke, W., 1982, "Durability of Concrete and the Iowa Pore Index Test," *Transportation Research Record* No. 853, pp. 25-30.

Martín-Pérez, B.; Pantazopoulou, S.; and Thomas, M. D. A., 2001, "Numerical Solution of Mass Transport Equations in Concrete Structures," *Computers & Structures*, V. 79, No. 13, pp. 1251-1264 doi: 10.1016/S0045-7949(01)00018-9

Marusin, S. L., 1989, "Influence of Length of Moist Curing Time on Weight Change Behavior and Chloride Ion Permeability of Concrete Containing Silica Fume," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-114*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 929-944.

Marusin, S. L., and Pfeifer, D. W., 1985, "Chloride Ion Penetration into Concrete Made with Various Admixtures," *Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used*, RILEM Symposium 85, Universidad Autónoma de Nuevo León,

Monterrey, NL, Mexico.

Mather, B., 1966, "Effects of Seawater on Concrete," *Highway Research Record No. 113, Highway Transportation Research Board, Washington, DC*, pp. 33-42.

Mather, B., 1968, "Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete," *Performance of Concrete—Resistance of Concrete to Sulphate and Other Environmental Conditions, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada*, pp. 66-76.

Mather, K., 1978, "Tests and Evaluation of Portland and Blended Cements for Resistance to Sulfate Attack," *Cement Standards: Evolution and Trends, STP-663, ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 74-86.

Mather, B., 1981 a, "Blends of Cementitious Materials for Concrete to be Exposed to Seawater," *Proceedings of the 5th International Symposium on Concrete Technology, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, NL, Mexico*, pp. 289-310.

Mather, K., 1981 b, "Factors Affecting Sulfate Resistance of Mortars," *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Editions Septima, Paris, V. IV*, pp. 580-585.

Mather, B., 1990, "How to Make Concrete that will be Immune to the Effects of Freezing and Thawing," *Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, SP-122, D. Whiting, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 1-18.

Mather, B., 1992, "Calcium Chloride Type V Cement Concrete," *Durability of Concrete: Proceedings of the G. M. Idorn International Symposium, SP-131, J. Holm and M. Geiker, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 169-178.

Mather, K., 1982, "Current Research in Sulfate Resistance at the Waterways Experiment Station," *Sulfate Resistance of Concrete, SP-77, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 63-74.

Matthews, J. D., 1994, "Performance of Limestone Filler Cement Concrete," *Proceedings of Euro-Cements – Impact of ENV 197 on Concrete Construction, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., E&FN Spon, London*, pp. 113-147.

Matsuzawa, K.; Kitsutaka, Y.; and Tsukagoshi, M., 2010, "Effect of Humidity on Rate of Carbonation of Concrete Exposed to High-Temperature Environment," *Proceedings of the 4th International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants*, pp. 109-114.

McCoy, W. J., and Caldwell, A. G., 1951, "New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion," *ACI Journal Proceedings, V. 48, No. 9, Sept.*, pp. 693-706.

McDad, B.; Lafrey, D. C.; Dammann, M.; and Medlock, R. D., 2000, "Performance of Weathering Steel in TxDOT Bridges," *Research Project Report 0-1818, Texas Department of Transportation, Austin, TX*, 108 pp.

McGrath, P. F., and Hooton, R. D., 1996, "Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests," *Cement and Concrete Research, V. 26, No. 8, Aug.*, pp. 1239-1244. doi: 10.1016/0008-8846(96)00094-4

McGrath, P. F., and Hooton, R. D., 1997, "Effect of Binder Composition on Chloride Penetration Resistance of Concrete," *Proceedings of the Fourth International Conference on Durability of Concrete, Sydney, SP-170, V. 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 331-347.

McGrath, P. F., and Hooton, R. D., 1999, "Re-Evaluation of the AASHTO T 259 90-Day Salt Ponding Test," *Cement and Concrete Research, V. 29, No. 8, Aug.*, pp. 1239-1248. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00058-7

McMillan, F. R.; Stanton, T. E.; Tyler, I. L.; and Hansen, W. C., 1949, "Long-Time Study of Cement Performance in Concrete," *Research and Development Bulletin 30*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 64 pp.

Mehta, P. K., 1976, discussion of "Combating Sulfate Attack in Corps of Engineers Concrete Construction," *ACI Journal Proceedings*, V. 73, No. 4, Apr., pp. 237-238.

Mehta, P. K., 1981, "Sulfate Resistance of Blended Portland Cements Containing Pozzolans and Granulated Blast-Furnace Slag," *Proceedings of the 5th International Symposium on Concrete Technology*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, NL, Mexico, pp. 35-50.

Mehta, P. K., 1986, *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 450 pp.

Mehta, P. K., 1992, "Sulfate Attack on Concrete—A Critical Review," *Material Science of Concrete*, J. Skalny, ed., American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 105-130.

Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M., 2006, *Concrete*, third edition, McGraw-Hill, New York, 659 pp.

Mielenz, R. C.; Marusin, S.; Hime, W. G.; and Zugovic, Z. T., 1995, "Prestressed Concrete Railway Tie Distress: Alkali-Silica Reaction or Delayed Ettringite Formation," *Concrete International*, V. 17, No. 12, Dec., pp. 62-68.

Mielenz, R. C.; Wolkodof, V. E.; Backstrom, J. E.; and Burrows, R. W., 1958a, "Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete, Part 4—The Air Void System in Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 55, No. 10, Oct., pp. 507-518.

Mielenz, R. C.; Wolkodof, V. E.; Backstrom, J. E.; and Flack, H. L., 1958b, "Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete, Part 1—Entrained Air in Unhardened Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 55, No. 7, July, pp. 507-518.

Mindess, S., and Young, J. F., 1981, *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 671 pp.

Mirza, J.; Turenne, S.; and Masounave, J., 1990, "Influence of Structural Parameters on Abrasion-Erosion Resistance of Various Repairing Mortars," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 17, No. 1, pp. 12-18. doi: 10.1139/190-003

Misra, S.; Yamamoto, A.; Tsutsumi, T.; and Motohashi, K., 1994, "Application of Rapid Chloride Permeability Test to Quality Control of Concrete," *Durability of Concrete, Proceedings of the Third International CANMET/ACI Conference*, SP-145, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 487-502.

Missouri Highway and Transportation Department, 1990, "Influence of Design Characteristics on Concrete Durability," NCHRP84-2, Jefferson City, MO.

Mittermayr, F., 2012, "Why Thaumasite is Forming in Concrete Structures," PhD thesis, Technical University of Graz, Austria, Oct., 118 pp.

Mittermayr, F.; Klammer, D.; Köhler, S.; Leis, A.; Boettcher, M.; and Dietzel, M., 2010, "Thaumasite Formation in Concrete—An Isotope Study," *Geophysical Research Abstracts*, V. 12, EGU2010-14908, EGU General Assembly.

Mittermayr, F.; Baldermann, A.; Kurta, C.; Rinder, T.; Klammer, D.; Leis, A.; Tritthart, J.; and Dietzel, M., 2013, "Evaporation — A Key Mechanism for the Thaumasite Form of Sulfate Attack," *Cement and Concrete Research*, V. 49, pp. 55-64.

Møen, E.; Jacobsen, S.; and Myhra, H., 2007, "Ice abrasion data on concrete structures — an overview," *Stat of the art report*, SINTEF COIN — Concrete Innovation Centre, 63 pp.

Monteiro, P. J. M., and Kurtis, K. E., 2003, "Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 7, July, pp. 987-993. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01097-9

Montes, P.; Bremner, T. W.; and Lister, D. H., 2004, "Influence of Calcium Nitrite Inhibitor and Crack Width on Corrosion of Steel in High Performance Concrete Subjected to a Simulated Marine Environment," *Cement and Concrete Composites*, V. 26, No. 3, Apr., pp. 243-253. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00043-X

Moses, C. O.; Nordstrom, D. K.; Herman, J. S.; and Mills, A. L., 1987, "Initiation of Aqueous Pyrite Oxidation

by Dissolved Oxygen and by Ferric Iron," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 51, No. 6, pp. 1561-1571.

Multani, R. S.; Williams, H.; Johnson, B.; Li, R.; and Waters, K. E.; 2018, "The Effect of Superstructure on the Zeta Potential, Xanthate Adsorption, and Flotation Response of Pyrrhotite," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, V. 551, pp. 108-116.

Moum, J., and Rosenquist, I. T., 1959, "Sulfate Attack on Concrete in the Oslo Region," *ACI Journal Proceedings*, V. 56, No. 3, Mar., pp. 257-264.

Murdock, K. J., and Blanchette, A., 1994, "Rapid Evaluation of Alkali-Aggregate Reactivity Using a 60 C Concrete Prism Test," *The 3rd International Conference on Durability of Concrete*, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 57-78.

Murphy, W. E., 1975, "Skidding Resistance of Concrete Pavements: A Review of Research, Development and Practice in the United Kingdom," *Roadways and Airport Pavements*, SP-51, W. M. Singley and T. J. Pasko, Jr., eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 231-256.

Nagataki, S., and Wu, C., 1995, "A Study of the Properties of Portland Cement Incorporating Silica Fume and Blast Furnace Slag," *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference*, V. M. Malhotra, ed., SP-153, V. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1051-1068.

Naik, T. R.; Singh, S. S.; and Hossain, M. M., 1995, "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made with Class C Fly Ash," *ACI Materials Journal*, V. 92, No. 6, Nov.-Dec., pp. 649-659.

Naik, T. R.; Singh, S. S.; and Ramme, B. W., 2002, "Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, V. 14, No. 5, Oct., pp. 417-426. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(417)

Ngala, V. T., and Page, C. L., 1997, "Effect of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hardened Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, V. 27, No. 7, July, pp. 995-1007. doi: 10.1016/S0008-8846(97)00102-6

Nixon, P. J., and Sims, I., 1992, "RILEM TC106 Alkali Aggregate Reaction—Accelerated Tests Interim Report and Summary of National Specifications," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, V. 2, The Concrete Society, Slough, UK, pp. 731-738.

Nixon, P. J.; Canham, I.; Page, C. L.; and Bollinghaus, R., 1987, "Sodium Chloride and Alkali-Aggregate Reaction," *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, P. E. Grattan-Bellew, ed., Noyes, Park Ridge, NJ, pp. 110-114.

Nixon, P. J.; Collins, R. J.; and Rayment, P. L., 1979, "The Concentration of Alkalies by Moisture Migration in Concrete—A Factor Influencing Alkali Aggregate Reaction," *Cement and Concrete Research*, V. 9, No. 4, July, pp. 417-423. doi: 10.1016/0008-8846(79)90038-3

Nmai, C. K., and Krauss, P. D., 1994, "Comparative Evaluation of Corrosion-Inhibiting Chemical Admixtures for Reinforced Concrete," *Durability of Concrete*, *Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference*, SP-145, V.M. Malhotra, ed., American

Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 245-262.

Nmai, C. K.; Farrington, S.; and Bobrowski, G. S., 1992, "Organic-Based Corrosion-Inhibiting Admixture for Reinforced Concrete," *Concrete International*, V. 14, No. 4, Apr., pp. 45-51.

Nobsť, P., and Stark, J., 2003, "Investigations on the Influence of Cement Type on Thaumassite Formation," *Cement and Concrete Composites*, V. 25, No. 8, Dec., pp. 899-906. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00118-5

Norwegian Public Roads Administration, 2009, "Handbook 026E, General Specifications 2. Standard Specification Texts for Bridges and Quays, Principal Specification 8," [www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Handboker](http://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Handboker) (in Norwegian) (accessed Oct. 7, 2016).

Novak, G. A., and Colville, A. A., 1989, "Eforescent Mineral Assemblages Associated with Cracked and Degraded Residential Concrete Foundations in Southern California," *Cement and Concrete Research*, V. 19, No. 1, Jan., pp. 1-6. doi: 10.1016/0008-8846(89)90059-8

Oberholster, R. E., 1992, "The Effect of Different Outdoor Exposure Conditions on the Expansion Due to Alkali-Silica Reaction," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, V. 2, The Concrete Society, Slough, UK, pp. 623-628.

Oberholster, R. E., 1994, "Alkali-Silica Reaction Products and Their Development," *Cement and Concrete Research*, V. 18, No. 4, July, pp. 621-635.

Oberholster, R. E., and Davies, G., 1986, "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates," *Cement and Concrete Research*, V. 16, No. 2, Mar., pp. 181-189. doi: 10.1016/0008-8846(86)90134-1

Oberholster, R. E., and Westra, W. B., 1981, "The Effectiveness of Mineral Admixtures in Reducing Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction with Malmesbury Group Aggregates," *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Cape Town, NBRI, Pretoria, Paper S252/31, 10 pp.

Oberholster, R. E.; Maree, H.; and Brand, J. H. B., 1992, "Cracked Prestressed Concrete Railway Sleepers: Alkali-Silica Reaction or Delayed Ettringite Formation," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, The Concrete Society, London, UK, pp. 739-749.

Obla, K. H., and Lobo, C. L., 2007, "Criteria for Concrete Mixtures Resistant to Chemical Sulfate Attack," *Sulfate Attack on Concrete: A Holistic Perspective*, SP-317, M. T. Bassuoni, R. Hooton, and T. Drimalas, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1-16.

Obla, K. H.; Lobo, C. L.; and Kim, H., 2015, "An Evaluation of Performance-Based Alternatives to the Durability Provisions of the ACI 318 Building Code," Report submitted to the RMC Research and Education Foundation, Jan., 123 pp., [http://www.rmc-foundation.org/Concrete\\_Apps\\_Track.htm](http://www.rmc-foundation.org/Concrete_Apps_Track.htm)

Obla, K., and O'Neill, R., 2017, "Criteria for Selecting Mixtures Resistant to Physical Salt Attack," *Sulfate Attack on Concrete: A Holistic Perspective*, SP-317, M. T. Bassuoni, R. Hooton, and T. Drimalas, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1-20.

Ohama, Y.; Katsunori, D.; and Kakegawa, M., 1989, "Inhibiting Alkali-Aggregate Reaction with Chemical Admixtures," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, The Society of Materials Science, Kyoto, Japan, pp. 187-192.

Ong, G. P., and Fwa, T. F., 2008, "Hydroplaning Risk Management for Grooved Pavements," *7th International Conference on Managing Pavement Assets*, Calgary, AB, Canada, 11 pp.

Ozyildirim, C., 1994, "Laboratory Investigation of Low-Permeability Concretes Containing

*Slag and Silica Fume," ACI Materials Journal, V. 91, No. 2, Mar.-Apr., pp.197-202.*

Page, C. L., and Vennesland, Ø.,1983, "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes," *Material Construction Material Structures, V. 16, No. 1, Jan., pp.19-25. doi: 10.1007/BF02474863*

Page, C. L.; Sergi, G.; and Short, N. R.,1989, "Corrosion Behaviour of Zinc-Coated Steel in Silica Fume Concrete," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference, SP-114, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 887-896.*

Pal, S. C.; Mukherjee, A.; and Pathak, S. R., 2002, "Corrosion Behavior of Reinforcement in Slag Concrete," *ACI Materials Journal, V. 99, No. 6, Nov.-Dec., pp. 521 -527.*

Parrott, L. J.,1987, "Measurement and Modeling of Porosity in Drying Cement Paste," *Microstructural Development During Hydration of Cement, Proceedings of the Materials Research Society, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, V. 85, pp. 91 -104.*

Patzias, T.,1991, "The Development of ASTM Method C 1012 with Recommended Acceptance Limits for Sulfate Resistance of Hydraulic Cements," *Cement, Concrete and Aggregates, V. 13, No. 1, Summer, pp. 50-57. doi: 10.1520/CCA10549J*

Pedneault, A.,1996, "Development of Testing and Analytical Procedures for the Evaluation of the Residual Potential of Reaction, Expansion, and Deterioration of Concrete Affected by ASR," *MSc thesis, Laval University, Quebec City, QC, Canada, 133 pp.*

Penttala, V.,1998, "Freezing-Induced Strains and Pressures in Wet Porous Materials and Especially in Concrete Mortars," *Advanced Cement Based Materials, V. 7, No. 1, Jan., pp. 8-19. doi: 10.1016/S1065-7355(97)00011 -4*

Pepper, L.,1963, "Influence of Alkali Content of Fly Ash on Effectiveness in Preventing Expansion of Concrete," *Technical Report No. 6-627, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MI, 17 pp.*

Pepper, L., and Mather, B.,1959, "Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction," *Proceedings, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1178-1202.*

Perry, C., and Gillott, J. E.,1985, "The Feasibility of Using Silica Fume to Control Concrete Expansion Due to Alkali-Aggregate Reactions," *Durability of Building Materials, V. 3, No. 2, pp. 133-146.*

Peterson, K.; Julio-Betancourt, G.; Sutter, L.; Hooton, R. D.; and Johnston, D., 2013, "Observations of Chloride Ingress and Calcium Oxychloride Formation in Laboratory Concrete and Mortar at 5°C," *Cement and Concrete Research, V. 45, No. 1, Jan., pp. 79-90. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.01 .001*

Peterson, O.,1995, "Chemical Effects on Cement Mortar of Calcium-Magnesium Acetate as a Deicing Salt," *Cement and Concrete Research, V. 25, No. 3, Mar., pp. 617-626. doi: 10.1016/0008-8846(95)00050-M*

Pettersson, K.,1994, "Olika faktorerers inverkan på kloridDiffusion i betongkonstruktioner," ("The influence of Different factors on chloride Diffusion in concrete," *CBI Rapport 4:94, Cement och Betong Institutet, Stockholm, Sweden, 37 pp. (in Swedish with English summary)*

Pettersson, K.,1995, "Chloride Threshold Value and the Corrosion Rate in Reinforced Concrete," *Proceedings of the Nordic Seminar on Corrosion of Reinforcement: Field and Laboratory Studies for Modeling and Service Life, Report TVBM-3064, K. Tuutti, ed., University of Lund, Sweden.*

Pfeifer, D. W.; Landgren, J. R.; and Zoob, A.,1987, "Protective Systems for New Prestressed and Substructure Concrete," *FHWA Report No. RD-86-193, Federal Highway*

*Administration, Washington, DC.*

Philleo, R. E., 1955, "A Method for Analyzing Void Distribution in Air-Entrained Concrete," Portland Cement Association Research and Development Division, Skokie, IL, May.

Pigeon, M., 1994, "Frost Resistance, A Critical Look," *Concrete Technology: Past, Present, and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, SP-144, P. K.*

Mehta, ed., *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 142-158.*

Pleau, R.; Pigeon, M.; Lamontagne, A.; and Lessard, M., 1995, "Influence of Pumping on the Characteristics of the Air Void System in High Performance Concrete," *Transportation Research Record No. 1478, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 30-36.*

Popovic, K.; Ukraincik, V.; and Djurekovic, A., 1984, "Improvement of Mortar and Concrete Durability by the Use of Condensed Silica Fume," *Durability of Building Materials, V. 2, No. 2, pp. 171 -186.*

Portland Cement Association, 2001, "Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments," *IS001, Skokie, IL, 24 pp.*

Powers, T. C., 1945, "Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete," *ACI Journal Proceedings, V. 41, No. 4, Feb., pp. 245-272.*

Powers, T. C., 1949, "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete," *Proceedings of the Highway Research Board, V. 29, pp. 184-202.*

Powers, T. C., 1954, "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete," *ACI Journal Proceedings, V. 50, No. 9, Sept., pp. 741 -760.*

Powers, T. C., 1955, "Basic Considerations Pertaining to Freezing and Thawing Tests," *ASTM Proceedings, V. 55, pp. 1132-1155.*

Powers, T. C., 1958, "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste," *Journal of the American Ceramic Society, V. 41, No. 1, pp. 1 -6. doi: 10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x*

Powers, T. C., 1962a, "Prevention of Frost Damage to Green Concrete," *RX148, Portland Cement Association, Skokie, IL, 18 pp.*

Powers, T. C., 1962b, "Physical Properties of Cement Paste," *Proceedings, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Monograph 43, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, V. II, pp. 577-608.*

Powers, T. C., 1975, "Freezing Effects in Concrete," *Durability of Concrete, SP-47, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 1 -11 .*

Powers, T. C., and Brownyard, T. L., 1947, "Studies of the Physical Properties of Hardened Cement Paste, Part 8," *ACI Journal Proceedings, V. 42, No. 8, pp. 933-969.*

Powers, T. C., and Brownyard, T. L., 1948, "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste," *Bulletin 22, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., reprinted from ACI Journal Proceedings, V. 43, 1947, pp. 101 -132, pp. 249-336, pp. 469-505, pp. 549-602, pp. 669-712, pp. 845-880, pp. 933-992.*

Powers, T. C., and Helmuth, R. A., 1956, "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing," *Proceedings of the Highway Research Board, V. 32, pp. 285-297.*

Powers, T. C.; Copeland, H. E.; and Mann, H. M., 1959, "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes," *Department Bulletin RX110, Research and Development Laboratories of the Portland-Cement Association, reprinted from the Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Skokie, IL, May, V. 1, No. 2, pp. 38-48.*

Powers, T. C.; Copeland, L. E.; Hayes, J. C.; and Mann, H. M., 1954, "Permeability of Portland Cement Paste," *ACI Journal Proceedings, V. 51, No. 11, Nov., pp. 285-298.*

Preus, C. K., 1973, "After Studs in Minnesota," *Highway Research Record*, No. 477, Highway Transportation Research Board, Washinton, DC, pp. 11 -15.

Prezzi, M.; Monteiro, P. J. M.; and Sposito, G., 1997, "The Alkali-Silica Reaction, Part I: Use of the Double-Layer Theory to Explain the Behavior of Reaction-Product Gels," *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 1, Jan.-Feb., pp. 10-17.

Price, G. C., and Peterson, R., 1968, "Experience with Concrete in Sulphate Environments in Western Canada," *Performance of Concrete—Resistance of Concrete to Sulphate and Other Environmental Conditions*, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada, pp. 93-112.

Prior, M. E., 1966, "Abrasion Resistance-Hardened Concrete," *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP-169A, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 246-260.

Price, W. H., 1947, "Erosion of Concrete by Cavitation and Solids in Flowing Water," *ACI Journal Proceedings*, V. 43, No. 9, May, pp. 1009-1023. See also Discussion, pp. 1024-1 and 1024-2. Puerto Rico DOT SP934, Special Provision 934—Structural Concrete.

Pugh, C. E.; Hossner, L. R.; and Dixon, J. B., 1984, "Oxidation Rate of Iron Sulfides as Affected by Surface Area, Morphology, Oxygen Concentration and Autotrophic Bacteria," *Soil Science*, V. 137, pp. 309-314. Rado, Z., 2009, "Evaluating Performance of Limestone Prone to Polishing," Report No. FHWA-PA-2009-022- 510401 -015, 196 pp.

Rajabipour, F.; Giannini, E.; Dunant, C.; Ideker, J. H.; and Thomas, M. D. A., 2015, "Alkali-Silica Reaction: Current Understanding of the Reaction Mechanisms and the Knowledge Gaps," *Cement and Concrete Research*, V. 76, pp. 130-146.

Ramlochan, T., 2002, "The Role of Pozzolans and Slag in Controlling Delayed Ettringite Formation," PhD thesis, University of Toronto.

Ramlochan, T.; Thomas, M.; and Gruber, K. A., 2000, "The Effect of Metakaolin on Alkali-Silica Reaction in Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 3, Mar., pp. 339-344. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00261 -6

Ramlochan, T.; Zacarias, P.; Thomas, M. D. A.; and Hooton, R. D., 2003, "The Effect of Pozzolans and Slag on the Expansion of Mortars Cured at Elevated Temperature, Part I: Expansive Behaviour," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 6, June, pp. 807-814. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01066-9

Ranc, R., and Debray, L., 1992, "Reference Test Methods and a Performance Criterion for Concrete Structures," *The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, The Concrete Society, London, UK, pp. 824-831 .

Rangaraju, P. R.; Kaveh, A.; Enugula, S.S.R.; and Latifee, E.R., 2016, "Evaluation of Alkali-Silica Reaction Potential of Marginal Aggregates Using Miniature Concrete Prism Test (MCPT)," *Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, Sao Paulo, Brazil, July.

Rangaraju, P. R.; Sompura, K. R.; Olek, J.; Diamond, S.; and Lovell, J., 2005, "Potential for Development of Alkali- Silica Reaction in Presence of Airfield Deicing Chemicals," *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements*, International Society for Concrete Pavements Inc., Colorado Springs, CO, pp. 1269-1288.

Rasheeduzzafar, and Hussain, S. E., 1991, "Effect of Microsilica and Blast Furnace Slag on Pore Solution Composition and Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Composites*, V. 13, No. 3, pp. 219-225.

Rasheeduzzafar; Hussain, S. E.; and Al-Saadoun, S. S., 1992, "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding Corrosion of Reinforcing Steel in

Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 1, Jan.-Feb., pp. 3-12.

Rayment, P. L., 1982, "The Effect of Pulverised-Fuel Ash on the c/s Molar Ratio and Alkali Content of Calcium Silicate Hydrates in Cement," *Cement and Concrete Research*, V. 12, No. 2, pp. 133-140. doi: 10.1016/0008-8846(82)90001-1

Reading, T. J., 1975, "Combating Sulfate Attack in Corps of Engineers Concrete Construction," *Durability of Concrete*, SP-47, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 343-366.

Reading, T. J., 1982, "Physical Aspects of Sodium Sulfate Attack on Concrete," *Sulfate Resistance of Concrete*, SP-77, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 75-79.

Rebel, W.; Detwiler, R. J.; Gebler, S. H.; and Hooton, R. D., 2005, "The Right Sulfate Test Makes a Difference," *Concrete International*, V. 27, No. 2, Feb., pp.49-52.

Regourd, M., and Hornain, H., 1986, "Microstructure of Reaction Products," *Proceedings of Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, P. E. Grattan-Bellew, ed., Noyes, Park Ridge, NJ, pp. 375-380.

Regourd, M.; Hornain, H.; Levy, P.; and Morturaux, B., 1980, "Resistance of Concrete to Physico-Chemical Attack," *Proceedings of the Seventh International Conference on the Chemistry of Cement*, Editions Septima, Paris, V. III, pp. VII-104-VII-109.

Reinhardt, H. W., ed., 1997, "Penetration and Permeability of Concrete: Barriers to Organic and Contaminating Liquids," *RILEM Report 16*, E&FN Spon, London, UK, 332 pp.

Reou, J. S., and Ann, K. Y., 2008, "The Electrochemical Assessment of Corrosion Inhibition Effect of Calcium Nitrite in Blended Concretes," *Materials Chemistry and Physics*, V. 109, No. 2-3, June, pp. 526-533. doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.12.030

Riding, K. A.; Peterman, R.; Guthrie, S.; Brueseke, M.; Mosavi, H.; Daily, K.; and Risovi-Hendrickson, W., 2018, "Environmental and Track Factors that Contribute to Abrasion Damage," *Technical Publication JRC2018-6166*, *Proceedings of the Joint Rail Conference 2018*, Pittsburgh, PA, Apr., 9 pp.

RILEM, 1962, "Durability of Concrete," *RILEM Bulletin No. 14*, *RILEM Symposium*, General Reports, Mar., 149 pp.

RILEM TC 117-FDC, 1996, "Test Method for the Freeze Thaw and Deicing Resistance of Concrete—Tests with Sodium Chloride (CDF)," *Materials and Structures*, V. 29, No.193, pp. 523-528.

RILEM TC 219-ACS, 2016, "RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures," P. J. Nixon and I. Sims, eds., Springer.

Rodrigues, A.; Duchesne, J.; Fournier, B.; Durand, B.; Rivard, P.; and Shehata, M., 2012, "Mineralogical and Chemical Assessment of Concrete Damaged by Oxidation of Sulphide Bearing Aggregates," *Cement and Concrete Research*, V. 42, pp. 1336-1347.

Rodrigues, A.; Duchesne, J.; Fournier, B.; Durand, B.; Shehata, M.; and Rivard, P., 2016, "Evaluation Protocol for Concrete Aggregates Containing Iron Sulfide Minerals," *ACI Materials Journal*, V. 113, No. 3, May-June, pp. 349-359.

Rogers, C. A., and Hooton, R. D., 1991, "Reduction in Mortar and Concrete Expansion with Reactive Aggregates Due to Alkali Leaching," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 13, No. 1, July, pp. 42-49. doi: 10.1520/CCA10548J

Rogers, C. A., and Hooton, R. D., 1992, "Comparison between Laboratory and Field Expansion of Alkali-Carbonate Reactive Aggregates," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, V. 2, The Concrete Society, Slough, UK, pp. 877-884.

Rotter, H. M., 1995, "Alkali-Aggregate Reaction: From Basic Principles to Structural Behavior—Literature Review," Department of Civil Engineering, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.

Roy, D. M., and Idorn, G. M., 1982, "Hydration, Structure, and Properties of Blast-Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 79, No. 6, Nov.- Dec., pp. 444-457.

Sakaguchi, Y.; Takamura, M.; Kitagawa, A.; Hori, T.; Tomosawa, F.; and Abe, M., 1989, "The Inhibiting Effect of Lithium Compounds on Alkali-Silica Reaction," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate*

Reaction, K. Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura, eds., *The Society of Materials Science, Kyoto, Japan*, pp. 229-234.

Sakr, M., and Bassuoni, M. T., 2020, "Effect of Nano- Based Coatings on Concrete under Aggravated Exposures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 32, No. 10, Oct., pp. 1-15.

Sakr, M., and Bassuoni, M. T., 2021 a, "Modeling of Parameters Affecting Physical Salt Attack of Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 118, No. 2, Mar., pp. 173-188.

Sakr, M., and Bassuoni, M. T., 2021b, "Performance of Concrete under Physical Salt Attack Combined with Carbonation," *Cement and Concrete Research*, V. 141, pp. 1-16.

Sakr, M., and Bassuoni, M. T., 2021 c, "Silane and Methyl-methacrylate Based Nanocomposites as Coatings for Concrete Exposed to Salt Solutions and Cyclic Environments," *Cement and Concrete Composites*, V. 115, pp. 1-18.

Sakr, M.; Bassuoni, M. T.; Hooton, D.; Drimalas, T.; Haynes, H.; and Folliard, K., 2020, "Physical Salt Attack on Concrete: Mechanisms, Influential Factors and Mitigation," *ACI Materials Journal*, V. 117, No. 6, Nov., pp. 253-268.

Sakr, M. R., Bassuoni, M. T., and Taha, M. R., 2019, "Effect of Coatings on Concrete Resistance to Physical Salt Attack," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 6, Nov., pp. 255-267.

Samson, E.; Marchand, J.; and Beaudoin, J. J., 1999, "Describing Ion Diffusion Mechanisms in Cement-Based Materials Using the Homogenization Technique," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 8, Aug., pp. 1341-1345. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00101-5

Santagata, M. C., and Collepardi, M., 2000, "The Effects of CMA Deicers on Concrete Properties," *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 9, Sept., pp. 1389-1394. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00334-3

Santhanam, M.; Cohen, M.; and Olek, J., 2006, "Differentiating Seawater and Groundwater Sulfate Attack in Portland Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 12, Dec., pp. 2132-2137. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.09.011

Scherer, G. W., 1999, "Crystallization in Pores," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 8, Aug., pp. 1347-1358. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00002-2

Scherer, G. W., 2004a, "Stress from Crystallization of Salt," *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 9, Sept., pp. 1613-1624. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.034

Scherer, G. W., 2004b, "Factors Affecting Crystallization Pressure," *Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, Proceedings of International RILEM, 186-ISA Workshop*, ed. K. Scrivener and J. Skalny, PRO 35, RILEM Publications, Paris, pp. 139-154.

Scherer, G. W., and Valenza, J. J., 2005, "Mechanisms of Frost Damage," *Materials Science of Concrete VII*, J. Schmidt, T.; Lothenbach, B.; Romer, M.; Scrivener, K.; Rentsch, D.; and Figi, R., 2008, "A Thermodynamic and Experimental Study of the Conditions of Thaumassite Formation," *Cement and Concrete Research*, V. 38, pp. 337-349.

Schiessl, P.; Wiens, U.; and Breit, W., 1994, "Reduzierung des Alkalitätsdepots durch

*Puzzolane (Reduction in the Alkali Reserve Due to Pozzolans),* Technical Report No. F 397, Institut für Bauforschung, Technische Hochschule Aachen, Germany.

Schmidt, T.; Lothenbach, B.; Romer, M.; Scrivener, K.; Rentsch, D.; and Figi, R., 2008, "A Thermodynamic and Experimental Study of the Conditions of Thaumassite Formation," *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 3, pp. 337-349.

Schwartz, D. R., 1987, "D-Cracking of Concrete Pavements," *Synthesis of Highway Practice No. 134, National Cooperative Highway Research Program, National Academy of Science, Washington, DC.* Scripture Jr., E. W.; Benedict, S. W.; and Bryant, D. E., 1953, "Floor Aggregates," *ACI Journal Proceedings*, V. 50, No. 4, pp. 305-316. See also Discussion, pp. 316-1 to 316-5.

Scrivener, K. L., and Young, J. F., 1997, *Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems*, E&FN Spon, London, UK, 455 pp.

Scrivener, K. L.; Cabiron, J. L.; and Letourneux, R., 1999, "High-Performance Concrete from Calcium Aluminate Cements," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 8, Aug., pp. 1215-1223. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00103-9

Sellevoid, E. J., and Nilson, T., 1987, "Condensed Silica Fume in Concrete—A World View," *Supplementary Cementing Materials for Concrete, SP-86-8E, CANMET, Energy Mines and Resources, Ottawa, ON, Canada.*

Senbetta, E., and Scholer, C., 1984, "A New Approach for Testing Concrete Curing Efficiency," *ACI Journal Proceedings*, V. 81, No. 1, Jan.-Feb., pp. 82-87.

Setzer, M. J., 1999, "Micro Ice Lens Formation and Frost Damage," *Frost Damage in Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, D. J. Janssen, M. J. Setzer, and M. B. Snyder, eds., RILEM Publication PRO 25, Minneapolis, MN, pp. 1 -15.*

Setzer, M. J., 2002, "Development of the Micro-Ice-Lens Model," *Frost Resistance of Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop, M. J. Setzer, R. Auberg, and H.-J. Heck, eds., RILEM Publication PRO 24, Essen, Germany, pp. 133-145.*

Sha'at, A. A.; Long, A. E.; Montgomery, F. R.; and Basheer, P. A. M., 1993, "Influence of Controlled Permeability Formwork Liner on the Quality of the Cover Concrete," *Durable Concrete in Hot Climates, SP-139, C. MacInnis, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 91 -106.* Shayan, A., and Quick, G. W., 1992, "Microscopic Features of Cracked and Uncracked Concrete Railway Sleepers," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 4, July-Aug., pp. 348-361 .

Shayan, A.; Quick, G. W.; and Lancucki, C. J., 1993, "Morphological, Mineralogical and Chemical Features of Steam-Cured Concretes Containing Densified Silica Fume and Various Alkali Levels," *Advances in Cement Research*, V. 5, No. 20, pp. 151 -162. doi: 10.1680/adcr.1993.5.20.151

Shayan, A.; Sanders, J. V.; and Lancucki, C. J., 1988, "Hydrothermal Alterations of Hisingerite Material from a Basalt Quarry near Geelong, Victoria, Australia," *Clays and Clay Minerals*, V. 36, pp. 327-336. Shehata, M. H., and Thomas, M. D. A., 2002, "Use of Ternary Blends Containing Silica Fume and Fly Ash to Suppress Expansion Due to Alkali-Silica Reaction in Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 3, Mar., pp. 341 -349. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00680-9

Shehata, M.; Thomas, M. D. A.; and Bleszynski, R. F., 1999, "The Effects of Fly Ash Composition on the Chemistry of Pore Solution in Hydrated Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 12, Dec., pp.1915-1920. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00190-8

Sherman, M. R.; McDonald, D.; and Pfeifer, D., 1996, "Durability Aspect of Precast

*Prestressed Concrete Part 2: Chloride Permeability Study,* PCI Journal, V. 41, No. 4, July-Aug, pp. 76-95. doi: 10.15554/pcij.07011996.76.95

Shi, C., 2003, "Corrosion Resistance of Alkali-Activated Slag Cement," *Advances in Cement Research*, V. 15, No. 2, Apr., pp. 77-81 . doi: 10.1680/adcr.2003.15.2.77

Shi, C., 2004, "Effect of Mixing Proportions of Concrete on its Electrical Conductivity and the Rapid Chloride Permeability Test (ASTM C 1202 or AASHTO T 277) Results," *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 3, Mar., pp. 537-545. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.09.007

Shi, C., and Stegemann, J. A., 2000, "Acid Corrosion Resistance of Different Cementing Materials," *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 5, May, pp. 803-808. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00234-9

Shimada, Y., 2005, "Chemical Path of Ettringite Formation in Heat-Cured Mortar and its Relationship to Expansion," SN2526, Portland Cement Association, Skokie, IL, 507 pp.

Shimada, Y. E.; Tennis, P. D.; and Johansen, V. C., 2007, "Ettringite Formation in Heat-Cured Mortars and its Relationship to Expansion," *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*, National Research Council of Canada, Montreal, QC, Canada, 13 pp.

Shurpali, A. A.; Van Dam, E.; Edwards, J. R.; Lange, D. A.; and Barkan, C. P. L., 2012, "Laboratory Investigation of the Abrasive Wear Mechanism of Concrete Cross-tie Rail Seat Deterioration (RSD)," *Proceedings of the 2012 Joint Rail Conference*, Philadelphia, PA, 10 pp.

Simon, M. J.; Jenkins, R. R.; and Hover, K. C., 1992, "The Influence of Immersion Vibration on the Void System of Air Entrained Concrete," *Durability of Concrete: Proceedings of the G. M. Idorn International Symposium*, SP-131, J. Holm and M. Geiker, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 99-127.

Şimşek, O., 2005, "Effects of Vacuum Processing on Strength and Surface Hardness Properties of Concrete," *Journal of ASTM International*, V. 2, No. 2, Paper ID JAI11870 8 pp.

Skalny, J., and Locher, F. W., 1997, "Curing Practices and Internal sulphate Attack—The European Experience," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 21, No. 1, pp. 59-63.

Skalny, J.; Diamond, S.; and Lee, R. J., 1998, "Sulfate Attack, Interfaces and Concrete Deterioration," *Proceedings of the RILEM 2nd International Conference on the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, A. Katz, A. Bentur, M. Alexander, and G. Arliguie, eds., NBRI Technion, Haifa, Israel, pp. 141 -151 .

Skjølvold, O.; Jusnes, H.; Hammer, T. A.; and Fidjestøl, P., 2007, "Long-Term Chloride Intrusion in Field-Exposed Concrete with and without Silica Fume," *Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference*, SP-242,

V. M. Malhotra, ed. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Smeaton, J., 1791, *Narrative of the Building of the Eddystone Lighthouse*, London, printed for the author by H. Hughs.

Smith, F. L., 1958, "Effect of Aggregate Quality on Resistance of Concrete to Abrasion," *Cement and Concrete*, STP-205, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 91 -106.

Smith, P., and Schonfeld, R., 1970, "Pavement Wear Due to Studded Tires and the Economic Consequences in Ontario," *Highway Research Record No. 331*, Highway Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 54-79.

Smith, P., and Schonfeld, R., 1971, "Studies of Studded- Tire Damage and Performance in Ontario During the Winter of 1969-70," *Highway Research Record No. 352*, Highway Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 1 -15.

Smith, K. M.; Schokker, A. J.; and Tikalsky, P. J., 2004, "Performance of Supplementary Cementitious Materials in Concrete Resistivity and Corrosion Monitoring Evaluations," *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 5, Sept.-Oct., pp. 385-390.

Snyder, K. A., 2001, "The Relationship between the Formation Factor and the Diffusion Coefficient of Porous Materials Saturated with Concentrated Electrolytes: Theoretical and Experimental Considerations," *Concrete Science Engineering*, V. 3, No. 12, pp. 216-224.

Snyder, K. A., and Marchand, J., 2001, "Effect of Speciation on the Apparent Diffusion Coefficient in Nonreactive Porous Systems," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 12, Dec., pp. 1837-1845. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00679-2

Sommer, H.; Nixon, P. J.; and Sims, I., 2005, "AAR-5: Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates," *Materials and Structures*, V. 38, No. 8, Oct., pp. 787-792. doi: 10.1007/BF02479292

Spragg, R.; Castro, J.; Li, W.; Pour-Ghaz, M.; Huang, P.-T.; and Weiss, W. J., 2011, "Wetting and Drying of Concrete Using Aqueous Solutions Containing Deicing Salts," *Cement and Concrete Composites*, V. 33, No. 5, May, pp. 535-542. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.009

Stanton, T. E., 1940a, "Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion," *Engineering News Record*, Feb, pp. 59-61.

Stanton, T. E., 1940b, "Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate," *ASCE Proceedings*, V. 66, No. 10, Dec., pp. 1781-1812.

Stanton, T. E., 1950, "Studies of Use of Pozzolans for Counteracting Excessive Concrete Expansion Resulting from Reaction between Aggregates and the Alkalies in Cement," *Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes*, STP 99, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 178-203.

Stark, D., 1976, "Characteristics and Utilization of Coarse Aggregates Associated with D-Cracking," *Research and Development Bulletin RD047.01P*, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Stark, D., 1978, "Alkali-Silica Reactivity in the Rocky Mountain Region," *Proceedings of the 4th International Conference on Effects of Alkalies in Cement and Concrete*, Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 235-243.

Stark, D., 1980, "Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 2, No. 2, Jan., pp. 92-94. doi: 10.1520/CCA10189J

Stark, D., 1982, "Longtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils," *Sulfate Resistance of Concrete*, SP-77, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 21-40.

Stark, D., 1989a, "Effect of Length of Freezing Period on Durability of Concrete," *Research and Development Bulletin RD096.01T*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 9 pp.

Stark, D., 1989b, "Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils," *Research and Development Bulletin RD097*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 14 pp.

Stark, D., 2002, "Performance of Concrete in Sulfate Environments," *Research and Development Bulletin RD129*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 28 pp.

Stark, D., and Bhatti, M. S. Y., 1986, "Alkali-Silica Reactivity: Effect of Alkali in Aggregate on Expansion," *Alkalies in Concrete*, STP-930, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 16-30.

Stark, D., and Klieger, P., 1973, "Effects of Maximum Size of Coarse Aggregate on D-Cracking in Concrete Pavements," *Highway Research Record*, V. 441, pp. 33-43.

Stark, D., and Perenchio, W., 1975, "The Performance of Galvanized Reinforcement in Concrete Bridge Decks," *Final Report*, Portland Cement Association, Skokie, IL, Oct.

Stark, D.; Morgan, B.; Okamoto, P.; and Diamond, S., 1993, "Eliminating or Minimizing

*Alkali-Silica Reactivity*," SHRP-C-343, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 226 pp.

Stark, D. C., 2002, "Performance of Concrete in Sulfate Environments," Research and Development Bulletin RD129, Portland Cement Association, Skokie, IL, 28 pp.

Stark, J., and Bollmann, K., 1999, "Delayed Ettringite Formation in Concrete," Proceedings of XVII Symposium on Nordic Concrete Research, Norsk Betongforening, Oslo, Norway, V. 23, pp. 4-28.

Stauffer, D., and Aharony, A., 1992, *Introduction to Percolation Theory*, second edition, Taylor and Francis, London, UK, 192 pp.

Stempihar, J.; Medina, J.; Schmalzer, P.; and Van Dam, T., 2018, "Field Evaluation of PCC Surface Hardeners and Polyester Inlays for 03-NEV-80," Final Report No. 56A0418-001, 46 pp.

Storebælt Technical Publications, 1999, *Concrete Technology*, 271 pp.

Streicher, P. E., and Alexander, M. G., 1994, "A Critical Evaluation of Chloride Diffusion Test Methods for

Concrete," Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, Nice, France, pp. 517-530.

Struble, L., and Brockman, M., 1989, "Standard Aggregate Materials for Alkali-Silica Reaction Studies," Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, pp. 433-437.

Stumm, W., and Morgan, J., 1995, *Aquatic Chemistry— An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*, third edition, John Wiley and Sons, New York, 1040 pp.

Sturup, V. R.; Hooton, R. D.; and Clendenning, T. G., 1983, "Durability of Fly Ash Concrete," Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 71-86.

Suleiman, A. R., and Nehdi M. L., 2017, "Exploring Effects of Supplementary Cementitious Materials in Concrete Exposed to Physical Salt Attack," Magazine of Concrete Research, V. 69, No. 11, pp. 576-585.

Sutter, L. L.; Peterson, K. R.; Touton, S. H.; Van Dam, T. J.; and Johnston, D., 2006, "Petrographic Evidence of Calcium Oxychloride Formation in Mortars Exposed To Magnesium Chloride Solution," Cement and Concrete Research, V. 36, No. 8, Aug., pp. 1533-1541. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.05.022

Swenson, E. G., 1957, "A Reactive Aggregate Undetected by ASTM Tests," Bulletin No. 266, ASTM International, West Conshohocken, PA, V. 57, pp. 48-51.

Swenson, E. G., and Gillott, J. E., 1964, "Alkali-Carbonate Rock Reaction," Highway Research Record, HRR45, Highway Research Board, Washington, DC, pp. 21-40.

Sydney, R.; Esfandi, E.; and Surapaneni, S., 1996, "Control Concrete Sewer Corrosion via the Crown Spray

Process," Water Environment Research, V. 68, No. 3, May/ June, pp. 338-347. doi: 10.2175/106143096X127785

Tanesi, J.; Drimalas, T.; Chopperla, K.; Beyene, M.; Ideker, J.; Kim, H.; Montanari, L.; and Ardani, A., 2020,

"Divergence between Performance in the Field and Laboratory Test Results for Alkali-Silica Reaction," Transportation Research Record, V. 2674, No. 5, pp. 120-134.

Tang, M.; Liu, Z.; and Han, S., 1987, "Mechanism of Alkali-Carbonate Reaction," Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, P.

E. Grattan-Bellew, ed., Noyes Publications, New Jersey, pp. 275-279.

Tarr, S. M., and Farny, J. A., 2008, *Concrete Floors on Ground, EB075, fourth edition*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 252 pp.

Taylor, H. F. W., 1997, *Cement Chemistry, second edition*, Thomas Telford, London, 459 pp.

Taylor, H. F. W.; Famy, C.; and Scrivener, K. L., 2001, "Delayed Ettringite Formation," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 5, May, pp. 683-693. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00466-5

Taylor, P.; Sutter, L. L.; and Weiss, J., 2012, "Investigation of Deterioration of Joints in Concrete Pavements—Final Report," FHWA Contract No. DTFH61 -06-H-00011, Work Plan 26, Prepared for the Federal Highway Administration, Washington, DC, Aug.

Tepponen, P., and Eriksson, B., 1987, "Damages in Concrete Railway Sleepers in Finland," *Nordic Concrete Research*, No. 6, pp. 199-209.

Terzaghi, R. D., 1948, "Concrete Deterioration in a Shipway," *ACI Journal Proceedings*, V. 44, No. 10, June, pp. 977-1005.

Terzaghi, R. D., 1949, "Concrete Deterioration Due to Carbonic Acid," *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, V. 36, No. 2, Apr., pp. 136-160.

Thaumasite Expert Group, 1999, "The Thaumasite Form of Sulfate Attack: Risks, Diagnosis, Remedial Works and Guidance on New Construction," Report of the Thaumasite Expert Working Group, DETR, London, UK, 180 pp.

Thomas, M. D. A., 1996, "Field Studies of Fly Ash Concrete Structures Containing Reactive Aggregates," *Magazine of Concrete Research*, V. 48, No. 177, Dec., pp. 265-279. doi: 10.1680/mac.1996.48.177.265

Thomas, M. D. A., 1997, "Laboratory and Field Studies of Salt Scaling in Fly Ash Concrete," *Frost Resistance of Concrete*, M. J. Setzer and R. Auberg, eds., E&FN Spon, Essen, Germany.

Thomas, M. D. A., 2001, "Delayed Ettringite Formation in Concrete: Recent Developments and Future Directions," *Materials Science of Concrete*, American Ceramics Society, Westerville, OH.

Thomas, M. D. A., 2006a, "The Role of Calcium in Alkali-Silica Reaction," *Materials Science of Concrete—The Sidney Diamond Symposium*, American Ceramics Society, Westerville, OH, pp. 325-331.

Thomas, M. D. A., 2006b, "The Role of Calcium Hydroxide in Alkali Recycling in Concrete," *Materials Science of Concrete Special Volume on Calcium Hydroxide in Concrete*, J. Skalný, J. Gebauer, and I. Odler, eds., American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 269-280.

Thomas, M. D. A., 2011, "The Effect of Supplementary Cementing Materials on Alkali-Silica Reaction: A Review," *Cement and Concrete Research*, V. 41, No. 3, Mar., pp. 209-216. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.001

Thomas, M. D. A., and Bleszynski, R. F., 2001, "The Use of Silica Fume to Control Expansion Due to Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete—A Review," *Materials Science of Concrete VI*, J. Skalný and S. Mindess, eds., American Ceramics Society, Westerville, OH, pp. 377-434.

Thomas, M. D. A., and Folliard, K. J., 2007, "Concrete Aggregates and the Durability of Concrete," *Durability of Concrete and Cement Composites*, C. L. Page and M. M.

Page, eds., Woodhead, Cambridge, UK, pp. 247-281. Thomas, M. D. A., and Innis, F. A., 1998, "Use of the Accelerated Mortar Bar Test for Evaluating the Efficacy of Mineral Admixtures for Controlling Expansion due to Alkali-Silica Reaction," *Cement, Concrete and Aggregates*, V. 21, No. 2, pp. 157-164.

Thomas, M. D. A.; Hooton, R. D.; Scott, A.; and Zibara, H., 2012, "The Effect of

*Supplementary Cementitious*

*Materials on Chloride Binding in hardened Cement Paste,*” *Cement and Concrete Research*, V. 42, No. 1, Jan., pp. 1 -7. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.001

Thomas, M. D. A., and Skalny, J., 2006, “Chemical Resistance of Concrete,” *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169D, J. F.

Lamond and J. H. Pielert, eds., *ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 253-273.

Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; and Folliard, K. J., 2008a, “Report on Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction,” *Federal Highways Administration, Report FHWAHIF-09-001, National Research Council, Washington, DC*.

Thomas, M. D. A.; Folliard, K.; Drimalas, T.; and Ramlochan, T., 2008b, “Diagnosing Delayed Ettringite Formation in Concrete Structures,” *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 6, pp. 841 -847. doi: 10.1016/j.cemconres.2008.01.003

Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K. J.; Ideker, J. H.; and Shehata, M., 2006, “Test Methods for Evaluating Preventive Measures for Controlling Expansion Due to Alkali-Silica Reaction in Concrete,” *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 10, Oct., pp. 1842-1856. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.014

Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K. J.; Shehata, M. H.; Ideker, J. H.; and Rogers, C., 2007, “Performance Limits for Evaluating Supplementary Cementing Materials Using Accelerated Mortar Bar Test,” *ACI Materials Journal*, V. 104, No. 2, Mar.-Apr., pp. 115-122.

Thomas, M. D. A.; Hooton, R. D.; and Rogers, C. A., 1997, “Prevention of Damage Due to Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in Concrete Construction—Canadian Approach,” *Cement, Concrete and Aggregates*, V.19, No. 1, June, pp. 26-30. doi: 10.1520/CCA10018J

Thomas, M. D. A.; Hooton, R. D.; Scott, A.; and Zibara, H., 2012, “The Effect of Supplementary Cementitious Materials on Chloride Binding in hardened Cement Paste,” *Cement and Concrete Research*, V. 42, No. 1, Jan., pp. 1 -7. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.01.001

Thomas, M. D. A.; Nixon, P. J.; and Pettifer, K., 1991, “The Effect of PFA on Alkali-Silica Reaction,” *Second*

*CANMET/ACI Conference on the Durability of Concrete*, SP-126, V. M. Malhotra, ed., V. II, *American Concrete Institute, Farmington Hills, MI*, pp. 919-940.

Thornton Jr., H. T., 1978, “Acid Attack of Concrete Caused by Sulfur Bacteria Action,” *ACI Journal Proceedings*, V. 75, No. 11, Nov., pp. 577-584.

Thorvaldson, T., 1954, “Chemical Aspects of the Durability of Cement Products,” *Proceedings, Third International Symposium on the Chemistry of Cement*, *Cement and Concrete Association, London*, pp. 436-466.

Thorvaldson, T.; Lamour, R. K.; and Vigfusson, V. A., 1927, “The Expansion of Portland Cement Mortar Bars During Disintegration in Sulphate Solution,” *English Journal*, V. 10, pp. 199-206.

Thorvaldson, T.; Wolochow, D.; and Vigfusson, V. A., 1929, “Studies on the Action of Sulphates on Portland Cement: I. The Use of the Expansion Method in the Study of the Action of Sulphates on Portland Cement Mortar and Concrete,” *Canadian Journal of Research*, V. 1, No. 3, pp. 273-284. doi: 10.1139/cjr29-017

Thurmann, M. T., 1969, *Pavement Wear Caused by Studded Tires (Piggdekkenes Slitasje på Vegdekker)*, *Norwegian State Highway Laboratory, Oslo, Norway*.

Torii, K., and Kawamura, M., 1994, “Mechanical and Durability-Related Properties of High-Strength Concrete Containing Silica Fume,” *High-Performance Concrete, Proceedings*

of the Second ACI International Conference, SP-149, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 461 -474.

Touma, W. E.; Fowler, D. W.; and Carrasquillo, R. L., 2001, "Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives," Report ICAR 301-1F, International Center for Aggregates Research, Austin, TX, 520 pp.

Transportation Research Board, 2006, "Control of Cracking of Concrete, State of the Art," Transportation Research Circular, E-C107, Transportation Research Board, Washington, DC, 46 pp.

Trejo, D., and Pillai, R., 2004, "Accelerated Chloride Threshold Testing: Part II - Corrosion Resistant Reinforcement," ACI Materials Journal, V. 101, No. 1, Jan.-Feb., pp. 57-64.

Trejo, D., and Reinschmidt, K., 2007, "Justifying Material Selection for Reinforced Concrete Structures. I: Sensitivity Analysis," Journal of Bridge Engineering, V. 12, No. 1, Jan.-Feb., pp. 31 -37. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:1(31)

Tremblay, C.; Bérubé, M. A.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A.; and Folliard, K. J., 2007, "Effectiveness of Lithium- Based Products in Concrete Made with Canadian Natural Aggregates Susceptible to Alkali-Silica Reactivity," ACI Materials Journal, V. 104, No. 2, Mar.-Apr., pp.195-205.

Tremblay, C.; Bérubé, M. A.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A.; and Folliard, K. J., 2010, "Experimental Investigation of the Mechanisms by which LiNO<sub>3</sub> is Effective against ASR," Cement and Concrete Research, V. 40, No. 4, pp. 583-597. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.022

Truc, O.; Ollivier, J.-P.; and Nilsson, L.-O., 2000, "Numerical Simulation of Multi-Species Transport through Saturated Concrete during a Migration Test - MsDif Code," Cement and Concrete Research, V. 30, No. 10, Oct., pp. 1581 -1592. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00305-7

Turk, K., and Karatas, M., 2011, "Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete with Different Dosages of Fly Ash/Silica Fume," Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, V. 18, No. 1, pp. 49-60.

Tuthill, L., 1936, "Resistance of Cement to the Corrosive Action of Sodium Sulphate Solutions," ACI Journal Proceedings, V. 33, No. 11, Nov., pp. 83-106.

Tutti, K., 1982, "Corrosion of Steel in Concrete," S-100 44, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.

Uchikawa, H.; Uchida, S.; and Hanehara, S., 1989, "Relationship between Structure and Penetrability of Na Ion in Hardened Blended Cement Paste Mortar and Concrete," Proceedings of the 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction, K. Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura, eds., The Society of Materials Science, Kyoto, Japan, pp. 121 -128.

Urhan, S., 1987, "Alkali Silica and Pozzolanic Reactions in Concrete. Part 1 : Interpretation of Published Results and a Hypothesis Concerning the Mechanism," Cement and Concrete Research, V. 17, pp. 141 -152.

U.S. Bureau of Reclamation (USBR), 1963, Concrete Manual: A Manual for the Control of Concrete Construction, seventh edition, U.S. Department of the Interior, Denver, CO., pp. 12-13.

U.S. Bureau of Reclamation (USBR), 1975, Concrete Manual, eighth edition, U.S. Department of the Interior, Denver, CO, 627 pp.

U.S. Bureau of Reclamation (USBR), 2015, Guide to Concrete Repair, second edition, U.S. Department of the Interior, Washington, DC, 376 pp.

Uytenbogaardt, W., and Burke, E. A. J., 1971, *Tables for Microscopic Identification of Ore Minerals*, Dover, New York.

Valenza II, J. J., and Scherer, G. W., 2007, "A Review of Salt Scaling: I. Phenomenology," *Cement and Concrete Research*, V. 37, No. 7, July, pp. 1007-1021 . doi: 10.1016/j.cemconres.2007.03.005

van Aardt, J. H. P., and Visser, S., 1977, "Calcium Hydroxide Attack of Feldspars and Clays: Possible Relevance to Cement-Aggregate Reactions," *Cement and Concrete Research*, V. 7, No. 6, Nov., pp. 643-648.

Van Dam, E., 2014, "Abrasion Resistance and Nanoscratch Behavior of an Ultra-High-Performance Concrete," master's thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 97 pp.

Van Daveer, J. R., and Sheret, G. D., 1975, "Concrete Cover Study," Final Report No. FHWA-DP-15, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Van Til, C. J.; Carr, B. J.; and Vallerga, B. A., 1976, "Waterproof Membranes for Protection of Concrete Bridge Deck—Laboratory Phase," NCHRP Report No. 165, Transportation Research Board, Washington, DC, 70 pp.

Vanden Bosch, V. D., 1980, "Performance of Mortar Specimens in Chemical and Accelerated Marine Exposure," *Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 487-507.

Verbeck, G. J., 1958, "Carbonation of Hydrated Portland Cement," *Cement and Concrete*, STP-205, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 17-36.

Verbeck, G. J., 1968, "Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete," *Performance of Concrete—Resistance of Concrete to Sulphate and Other Environmental Conditions*, Thorvaldson Symposium, University of Toronto Press, Toronto, ON, Canada, pp. 113-124.

Verbeck, G. J., 1975, "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete," *Corrosion of Metals in Concrete*, SP-49, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 21 -38.

Verbeck, G. J., and Helmuth, R. A., 1969, "Structures and Physical Properties of Cement Paste," *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo, pp. 1 -32.

Villani, C.; Nantung, T.; and Weiss, W. J., 2014b, "The Influence of Deicing Salt Exposure on the Gas Transport in Cementitious Materials," *Construction & Building Materials*, V. 67, Part A, Sept., pp. 108-114.

Villani, C.; Spragg, R.; Pour-Ghaz, M.; and Weiss, W. J., 2014a, "The Influence of Pore Solution Properties on Drying in Cementitious Materials," *Journal of the American Ceramic Society*, V. 97, No. 2, Feb., pp. 386-393. doi: 10.1111 /jace.12604 Vitousova, L., 1991, "Concrete Sleepers in CSD Tracks," *International Symposium on Precast Concrete Sleepers*, Madrid, Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, pp. 253-264.

Walder, J. S., and Hallet, B., 1985, "A Theoretical Model of the Fracture of Rock during Freezing," *Bulletin of the Geological Society of America*, V. 96, No. 3, pp. 336-346. doi: 10.1130/0016-7606(1985)96<336:ATMOTF>2.0.CO;2

Wang, H., and Gillott, J. E., 1991, "Mechanism of Alkali-Silica Reaction and the Significance of Calcium Hydroxide," *Cement and Concrete Research*, V. 21, No. 4, July, pp. 647-654. doi: 10.1016/0008-8846(91)90115-X

Warren, C. J., and Reardon, E. J., 1994, "The Solubility of Ettringite at 25°C," *Cement and Concrete Research*, V. 24, No. 8, Aug., pp. 1515-1524. doi: 10.1016/0008-8846(94)90166-X

- Way, S. J., and Cole, W. F., 1982, "Calcium Hydroxide Attack on Rocks," *Cement and Concrete Research*, V. 12, No. 5, Sept., pp. 611 -617. doi: 10.1016/0008-8846(82)90022-9
- Wehner, B., 1966, "Beanspruchung der Strassenoberflaeche durch Winterreifen mit Spikes," *Technische Universitaet Berlin, Institute fur Strassen und Verkehrswesen, Germany.*
- Weyers, R. E.; Pyc, W.; Sprinkel, M. M.; and Kirkpatrick, T. J., 2003, "Bridge Deck Cover Depth Specifications," *Concrete International*, V. 25, No. 2, Feb., pp. 61 -64.
- Whiting, D. A., and Nagi, M. A., 1998, *Manual on Control of Air Content in Concrete*, EB116, Portland Cement Association, Skokie, IL, 48 pp.
- Whiting, D. A., and Stark, D. C., 1983, "Control of Air Content in Concrete," NCHRP Report No. 258, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, May.
- Wiebenga, J. G., 1984, "Durability of 64 Concrete Constructions On-Shore and Of-Shore," *Cement (s-Hertogenbosch)*, V. 36, No. 4, Apr., pp. 215-218. (in Dutch)
- Wiens, U.; Breit, W.; and Schiessl, P., 1995, "Influence of High Silica Fume and High Fly Ash Contents on Alkalinity of Pore Solution and Protection of Steel against Corrosion," *Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-153, V. M. Malhotra, ed., V. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 741 -761 .
- Wig, R. J.; Williams, G. M.; and Finn, A. N., 1917, "Durability of Cement Drain tile and Concrete in Alkali Soils," *Technologic Papers of the Bureau of Standards No. 95*, US Department of Commerce, Washington, DC, 140 pp.
- Wilk, W., 1978, "Consideration of the Question of Skid Resistance of Carriageway Surfaces, Particularly of Concrete," *Betonstrassen AG, No. 117, Monograph, Wildegg, Switzerland.*
- Williams, G. M., and Furlong, I., 1926, "Durability of Cement Drain Tile and Concrete in Alkali Soils," *Fourth Progress Report, Technologic Papers of the Bureau of Standards No. 307*, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, pp.191 -240.
- Williamson, G. S.; Weyers, R. E.; Sprinkel, M. M.; and Brown, M. C., 2003, "Concrete and Steel Type Influence on Probabilistic Corrosion Service Life," *ACI Materials Journal*, V. 106, No. 1, Jan.-Feb., pp. 82-88.
- Willis, T. F., and Lord, G. W., 1951, "Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of Rosiwal Traverse of Aerated Concrete," *ASTM Bulletin 177*, Philadelphia, PA, pp. 56-61 .
- Winkler, E. M., 1997, *Stone in Architecture: Properties and Durability*, Springer, New York, 313 pp.
- Witte, L. P., and Backstrom, J. E., 1951, "Some Properties Affecting the Abrasion Resistance of Air-Entrained Concrete," *ASTM Proceedings*, V. 51, pp. 1141 -1155.
- Wolsiefer Sr., J. T., 1991, "Silica Fume Concrete: A Solution to Steel Reinforcement Corrosion in Concrete," *Durability of Concrete, Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference*, SP-126, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 527-558.
- Woods, H., 1968, *Durability of Concrete Construction*, Monograph No. 4, Iowa State University Press, Ames, IA, 187 pp.
- Wu, H.; Huang, B.; Shu, X.; and Dong, Q., 2011, "Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 23, No. 5, May, pp. 697-702. doi: 10.1061 / (ASCE)MT.1943-5533.0000210
- Xu, Z., and Hooton, R. D., 1993, "Migration of Alkali Ions in Mortar Due to Several Mechanisms," *Cement and Concrete Research*, V. 23, No. 4, Apr., pp. 951 -961 . doi:

10.1016/0008-8846(93)90049-F

Xu, Z.; Lan, X.; Deng, M.; and Tang, M., 2000, "A New Accelerated Method for Determining the Potential Alkali- Carbonate Reactivity," *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity*, M. A. Bérubé, B. Fournier, and B. Durand, eds., CRIB, Sainte-Foy Québec, Canada, pp. 129-138.

Xu, Z.; Shen, Y.; Lu, D.; Deng, M.; Lan, X.; Hu, R.; and Tang, M., 1998, "Investigation on A New Test Method for Determining the Alkali Silica Reactivity of Aggregates," *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, V. 20, No. 2, pp. 1 -7.

Yen, B. C., and Bright, R. E., 1990, "Residential Foundation Deterioration Study for the Cities of Lakewood, La Palma, and Cypress, California," California State University, Long Beach, CA, Apr., 111 pp.

Yen, T.; Hsu, T.; Liu, Y.; and Chen, S., 2007, "Influence of Class F Fly Ash on the Abrasion-Erosion Resistance of High-Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 21, No. 2, Feb., pp. 458-463. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.051

Yilmaz, V. T., and Glasser, F. P., 1990, "Reaction of Alkali-Resistant Glass Fibres with Cement. Part 2. Durability in Cement Matrices Conditioned with Silica Fume," *Glass Technology*, V. 32, No. 4, pp. 138-147.

Yingling, J.; Mullings, G. M.; and Gaynor, R. D., 1992, "Loss of Air Content in Pumped Concrete," *Concrete International*, V. 14, No. 10, Oct., pp. 57-61 . Young, D., 2008, "Salt Attack and Rising Damp A guide to Salt Damp in Historic and Older Buildings," Heritage Council of NSW, Red Rover, Australia. Young, F. R., 1989, *Cavitation*, McGraw-Hill, London, UK, pp. 45-56.

Zhang, J., and Taylor, P., 2012, "Investigation of the Effect of the Interfacial Zone on Joint Deterioration of Concrete Pavements," *Proceedings of the International Conference on Long-Life Concrete Pavements*, Federal Highways Administration, Washington, DC.

Zhang, M.-H., and Gjorv, O., 1991, "Effect of Silica Fume on Pore Structure and Chloride Difusivity of Low-Porosity Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, V. 21, No. 6, Nov.-Dec., pp. 1006-1014. doi: 10.1016/0008-8846(91)90060-U

Zhao, S.; Van Dam, E.; Lange, D.; and Sun, W., 2017, "Abrasion Resistance and Nanoscratch Behavior of an Ultra-High-Performance Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 29, No. 2, pp. 1 -8. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001744

Zhong, R., Wille, K., 2018, "Deterioration of Residential Concrete Foundations: The Role of Pyrrhotite-Bearing Aggregate," *Cement & Concrete Composites*, V. 94, pp. 53-61. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.08.012

Zhutovsky, S., and Hooton, R. D., 2017, "Experimental Study on Physical Sulfate Salt Attack," *Materials and Structures*, V. 50, pp. 50-54.

Zivica, V., and Bajza, A., 2001, "Acid Attack of Cement Based Materials—A Review: Part I. Principle of Acidic Attack," *Construction & Building Materials*, V. 15, No. 8, Dec., pp. 331 -340. doi: 10.1016/S0950-0618(01)00012-5



**فهاب بتن**  
FAHAB BETON



SCAN ME!  
کد بالا را اسکن کنید

## دوام بتن، کلید توسعه پایدار

**فهاب بتن؛** اولین دارنده پروانه صنعتی و دارنده گواهی دانش بنیان برای محصول بتن خودتراکم (SCC) حاوی نانو ذرات در ایران، دارنده گواهی نانو مقیاس با محصول نانو بتن خودتراکم بر مقاومت، اولین تولیدکننده بتن سبک سازه ای با قابلیت پمپ شدن در ایران، تولیدکننده بیش از ۱۵ نوع بتن در تمامی رده‌های مقاومتی تا C۹۰ تولید کننده بتن فوق توانمند (مقاومت ۱۲۰ مگاپاسکال به بالا)، آزمایشگاه مجهز و به روز، دارای ایزو ۱۷۰۲۵ و با قابلیت آزمودن تمامی مصالح اولیه فرآورده‌ها و توسعه محصولات جدید و خاص، ارائه کلیه خدمات آزمایشگاهی، تحقیقاتی در موضوع سیمان و بتن، عقد تفاهم‌نامه با مراکز علمی-اجرایی معتبر کشور نظیر دانشگاه تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه علم و صنعت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و...

# Guide to Durable Concrete

Technical Report Of Committee No ICI-2010-1402 of the  
Iranian Concrete Institute as  
Part of the Iranian Manual Of Concrete Practice (IMCP)

