

بِسْمِ تَعَالَى

خرابی ها و دوام بتن

مدرس: دکتر حمیدرضا انصاری

گروه مهندسی عمران



hamidrezaansarijoveini



Ansarijoveini.Blogfa.com

منبع : کتاب دوام بتن - ترجمه دکتر رمضان پور و مهندس مصطفی جلال - انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دوام بتن

Durability of Concrete



مقدمه

- طراحان سازه‌های بتنی بیشتر به مشخصات مقاومتی این ماده توجه دارند.
- خرابی زودرس سازه‌های بتنی در مواردی که مشخصات مقاومت نیز رعایت شده درسه‌های ارزشمندی را در مورد کنترل عامل‌های موثر در عدم دوام سازه‌های بتنی به ما می‌دهند.
- این موضوع پذیرفته شده است که در طراحی سازه‌ها، می‌باید مشخصات دوام مصالح مورد نظر، همانند سایر مشخصات و ویژگی‌های آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

تعریف

- منظور از دوام سازه عمر خدمت‌دهی طولانی آن است.

- بر طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انیستیتوی بتن آمریکا (ACI)، دوام بتن

سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی،

حمله شیمیایی، سایش، و یا هر فرآیندی که موجب آسیب‌دیدگی

شود، گفته می‌شود.

- بنابراین، بتن بادوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت

خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطیش حفظ کند.

اهمیت

- هیچ مصالحی ذاتاً با دوام نیست؛ یک ماده وقتی به انتهای عمر خدمت‌دهی خود می‌رسد که، خواصش، تحت شرایط مفروض استفاده از آن، به حدی آسیب دیده باشد که ادامه استفاده از مصالح نایمن یا غیر اقتصادی شناخته شود.
- هزینه‌های تعمیر و جایگزینی سازه‌ها، ناشی از خرابی مصالح، بخش عمده‌ای (تا ۴۰٪) از کل بودجه ساختمان سازی را به خود اختصاص می‌دهد.
- حفاظت از منابع طبیعی از طریق بادوام‌تر ساختن مصالح در هر حال یک اقدام زیست‌محیطی می‌باشد.

مشاهدات کلی

- آب، عنصر اولیه به وجود آوردن و تخریب کننده بسیاری از مصالح طبیعی و همچنین منشأ اغلب مسایل مربوط به دوام بتن می باشد (عامل تخریب فیزیکی و یا به عنوان وسیله‌ای برای انتقال یونهای مهاجم).
- پدیده‌های فیزیکی - شیمیایی مرتبط با حرکات آب در اجسام متخلخل را نفوذپذیری جامدات کنترل می کند.
- میزان آسیب دیدگی، تحت تأثیر نوع و غلظت یونهای داخل آب و ترکیب شیمیایی جسم است.

اهمیت آب

- بسته به شرایط محیطی و ضخامت قطعه بتنی، به تدریج، اکثر آب قابل تبخیر بتن از بین رفته و منافذ بتن به صورت خالی یا اشباع نشده در می‌آیند.
- از آنجا که این آب قابل تبخیر است، لذا قابلیت یخ‌زدگی دارد و همچنین برای جابه‌جایی داخلی آزادی دارد.
- بنابراین، بتنی که پس از خشک شدن آب قابل تبخیر نداشته و یا کم داشته باشد و منافذ آن دوباره اشباع نشوند، در مقابل رویدادهای مخرب وابسته به آب، آسیب‌پذیر نخواهد بود.

نفوذپذیری (Permeability)

- نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی خاصیتی است که کنترل کننده نرخ نفوذ یک سیال به داخل یک جسم جامد متخلخل می باشد.
- برای جریان پایا، ضریب نفوذپذیری (K) از معادله دارسی به دست می آید.

$$\frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta H A}{l \mu}$$

که در آن dq/dt آهنگ جریان مایع، μ لزجت مایع، ΔH گرادیان فشار،
A مساحت سطح و l ضخامت جسم می باشد.

نفوذپذیری خمیر سیمان

- در خمیر هیدراته شده، اندازه و پیوستگی منافذ در هر نقطه در حین فرآیند هیدراتاسیون، ضریب نفوذپذیری را کنترل خواهد نمود.
- آب مخلوط به طور غیر مستقیم مسئول نفوذپذیری خمیر سیمان هیدراته شده می‌باشد.
- میزان این آب، در ابتدا نشان دهنده کل فضای خالی است، و پس از انجام هیدراتاسیون، این آب نشان دهنده فضای پر نشده پس از مصرف آب (برای هیدراتاسیون یا تبخیر) است.

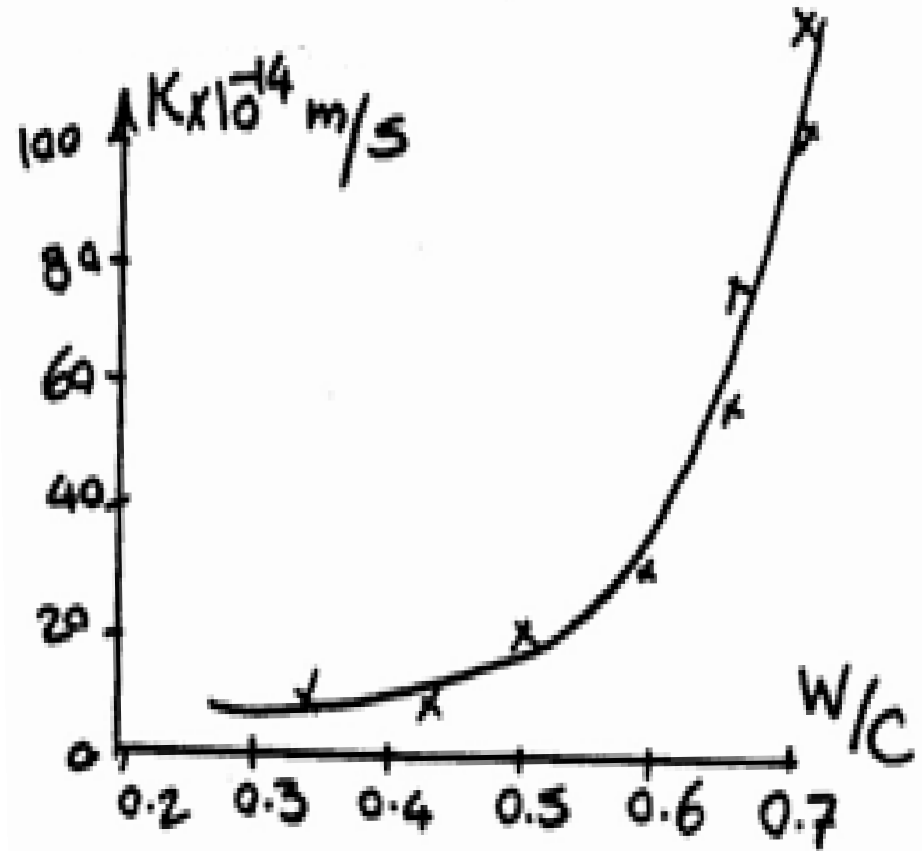
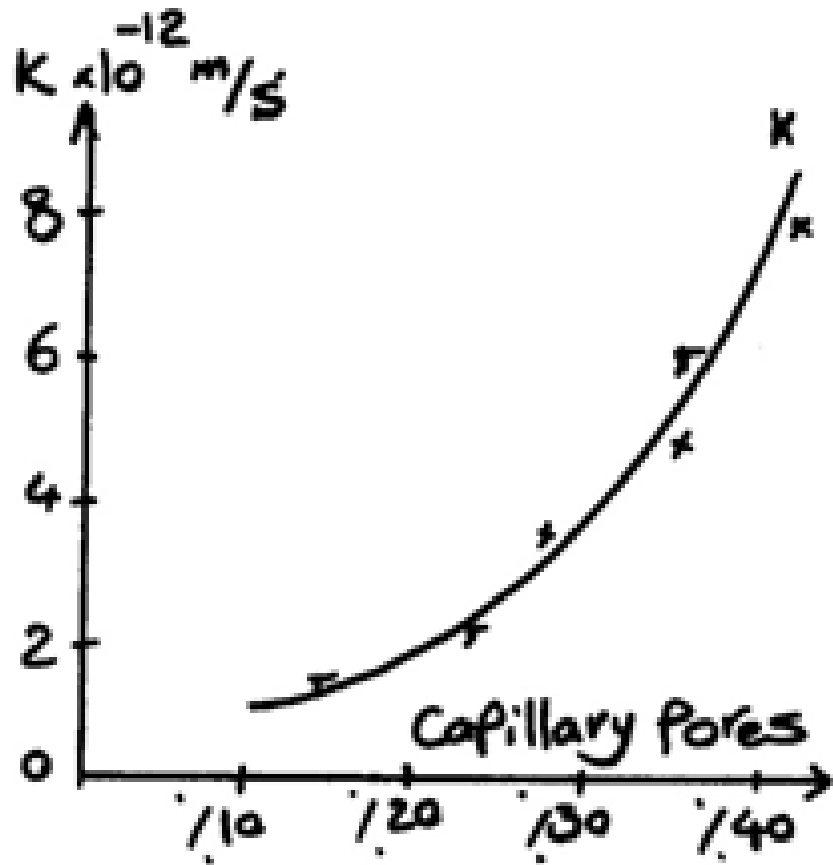
نفوذپذیری خمیر سیمان

- ضریب نفوذپذیری خمیر سیمان تازه در حدود 10^{-4} تا 10^{-5} سانتیمتر بر ثانیه می باشد.
- در حین فرآیند هیدراتاسیون به تدریج که تخلخل موپینگی کاهش می یابد، ضریب نفوذپذیری نیز کمتر می شود، ولی تناسب مستقیمی بین این دو وجود ندارد.
- برای مثال هنگامی که تخلخل موپینگی از ۴۰٪ به ۳۰٪ کاهش می یابد، نفوذپذیری به مقدار خیلی زیاد (از حدود 10^{-12} * ۱۱۰ به 10^{-12} * ۲۰ سانتیمتر بر ثانیه) افت می کند، در صورتی که بر اثر کاهش بیشتر تخلخل از ۳۰٪ به ۲۰٪، افت خیلی کمی در نفوذپذیری بوجود می آید.

نفوذپذیری خمیر سیمان

- علت این امر آن است که در ابتدا، با پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان، حتی مقدار کم کاهش تخلخل موئینگی کل، با تقسیم قابل توجه منافذ بزرگ همراه است، بنابراین اندازه و تعداد کانالهای جریان در خمیر سیمان به میزان زیادی کاهش میابد.
- به طور متعارف، تخلخل موئینگی در حدود ۳۰ درصد، نشان دهنده آن زمانی است که اتصال زنجیری بین منافذ، بقدری پیچ در پیچ و یا قطع شده است که کاهش بیشتر تخلخل خمیر سیمان تاثیر زیادی در ضریب نفوذپذیری ندارد.

نفوذ پذیری خمیر سیمان



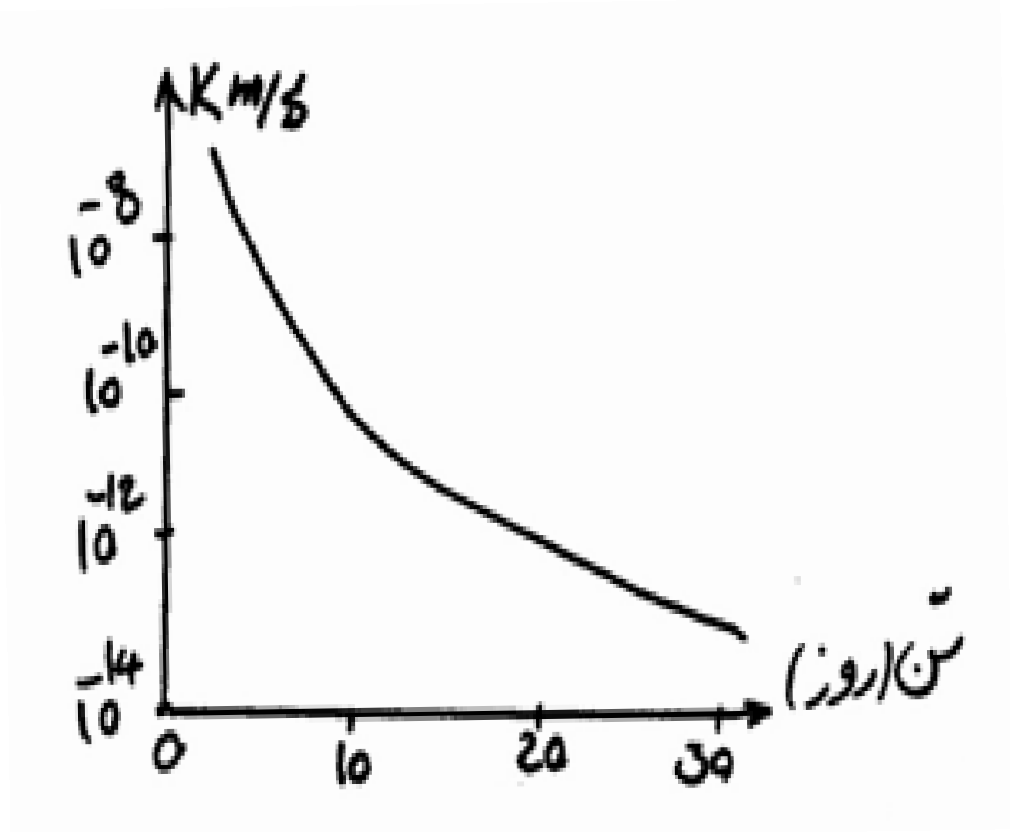
نفوذپذیری خمیر سیمان

- تاثیر تقسیم شدن موئینه‌ها روی نفوذپذیری نشان میدهد نفوذپذیری تابع ساده‌ای از تخلخل نمی‌باشد (دو جسم با تخلخل یکسان اما نفوذپذیری متفاوت).
- در واقع یک مسیر عبور بزرگ که حفره‌های موئینه را به هم متصل می‌سازد باعث نفوذپذیری زیاد می‌شود، در حالی که ممکن است مقدار تخلخل واقعاً تغییری نکند.
- در خمیر سیمان معمولی، **انفصال در شبکه موئینه** وقتی اتفاق می‌افتد که **تخلخل موئینه در حدود ۳۰ درصد** باشد. (برای خمیرهای با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ بعد از ۳، ۷، ۱۴، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز عمل‌آوری مرطوب).

نفوذپذیری خمیر سیمان

تغییرات ضریب نفوذپذیری خمیر سیمان با زمان (آب به سیمان ۰/۷)

ضریب نفوذپذیری (10^{-11} cm/sec)*	سن (روز)
۲۰۰۰۰۰۰۰	تازه
۴۰۰۰	۵
۱۰۰۰	۶
۴۰۰	۸
۵۰	۱۳
۱۰	۲۴
۶	نهایی



نفوذپذیری سنگدانه

- در مقایسه با تخلخل موینگی ۳۰٪ تا ۴۰٪ در خمیرهای سیمان، حجم منافذ در اغلب سنگدانه‌های طبیعی معمولاً زیر ۳٪ بوده و بندرت از ۱۰٪ تجاوز می‌کند.
- بنابراین انتظار می‌رود نفوذپذیری سنگدانه از نفوذپذیری خمیر سیمان خیلی کمتر باشد.
- اما نتایج نشان می‌دهد ضریب نفوذپذیری سنگدانه‌ها هم به همان نسبت خمیرهای سیمان هیدراته شده با آب به سیمانهای در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۷۱ متغیر می‌باشند.

نفوذپذیری سنگدانه

نسبت آب به سیمان خمیر عمل آمده با ضریب نفوذپذیری یکسان	ضریب نفوذپذیری (cm/sec)	نوع سنگ
۰/۳۸	$۲/۴۷ * ۱۰^{-۱۲}$	سنگ بازالتی سنگین
۰/۴۲	$۸/۲۴ * ۱۰^{-۱۲}$	دیوریت کوارتزی
۰/۴۸	$۲/۳۹ * ۱۰^{-۱۱}$	مرمر ۱
۰/۶۶	$۵/۷۷ * ۱۰^{-۱۰}$	مرمر ۲
۰/۷	$۵/۳۵ * ۱۰^{-۹}$	گرانیت
۰/۷۱	$۱/۲۳ * ۱۰^{-۸}$	ماسه سنگ
۰/۷۱	$۱/۵۶ * ۱۰^{-۸}$	گرانیت

نفوذپذیری سنگدانه

- دلیل اینکه نفوذپذیری بعضی از سنگدانه‌های با تخلخل پایین (حدود ۱۰٪) ممکن است خیلی بیشتر از خمیرهای سیمان باشد این است که اندازه منافذ مویینه در این سنگدانه‌ها در مقایسه با خمیر سیمان بسیار بزرگتر است.
- ابعاد منافذ مویینه خمیر سیمان عمل‌آوری شده در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است، در صورتی که اندازه منافذ سنگدانه‌ها بطور متوسط بزرگتر از 10μ می‌باشند.
- اما در بعضی سنگ‌های آهکی، منافذ از نظر اندازه، شامل مقدار بسیار زیادی منافذ ریز می‌شوند و در نتیجه نفوذپذیری آنها کم است.

نفوذپذیری بتن

- انتظار می‌رود که اضافه کردن ذرات سنگدانه با نفوذپذیری کم به خمیر سیمان، نفوذپذیری کل سیستم را کاهش دهد.
- این بیان در مورد خمیرهای با نسبت زیاد آب به سیمان و در سنین اولیه آن، که تخلخل موینگی زیاد است صادق است، چراکه ذرات سنگدانه‌ها کانالهای جریان داخل ماتریس خمیر سیمان را قطع می‌نمایند.
- اما داده‌های حاصل از آزمایشها دلالت بر آن دارند که در عمل اضافه نمودن سنگدانه به خمیر سیمان یا ملات، نفوذپذیری را در حالت کلی به میزان زیادی افزایش می‌دهد.

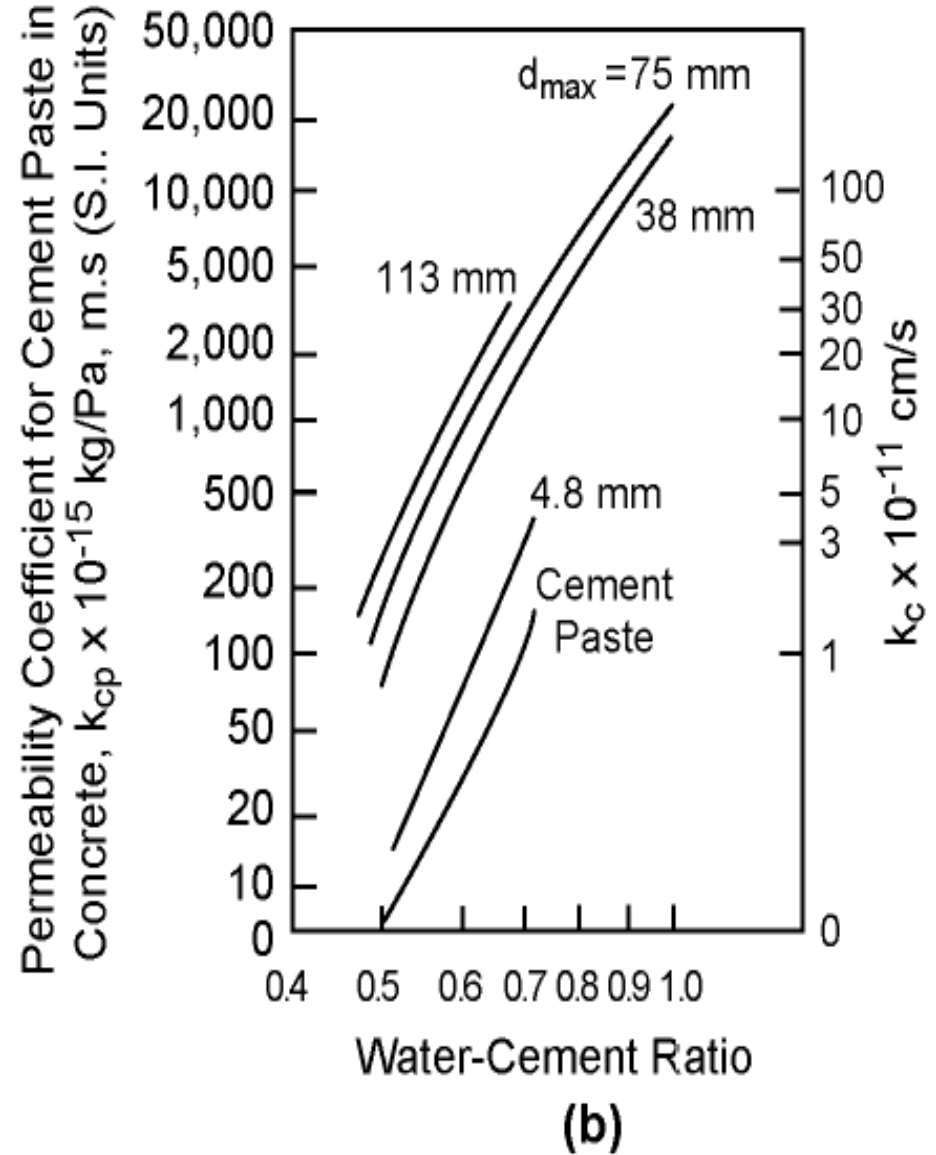
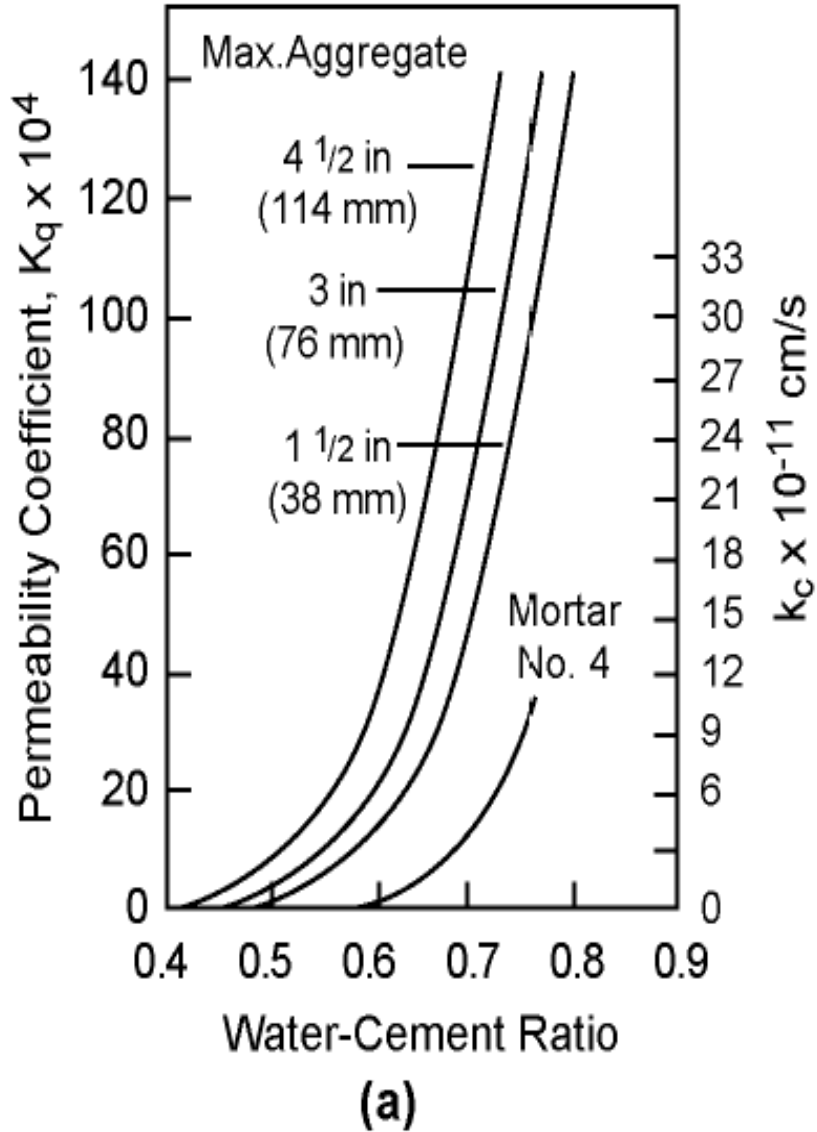
نفوذپذیری بتن

- به طور متعارف، ضرایب نفوذپذیری بتن با مقاومت متوسط (آب به سیمان ۰/۵، سنگدانه ۳۸ mm و عیار 356 kg/m^2) و بتن با مقاومت کم (آب به سیمان ۰/۷، سنگدانه ۱۵۰ mm و عیار 148 kg/m^2) به ترتیب در حدود $1 * 10^{-10} \text{ cm/sec}$ و $30 * 10^{-10}$ می باشند.
- هر چه که اندازه سنگدانه بزرگتر باشد، ضریب نفوذپذیری بیشتر می شود.

نفوذپذیری بتن

- توضیح این پدیده به ریزترکهای موجود در ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر مربوط می شود.
- ترکهای ناحیه انتقال بسیار کوچکند اما عرضشان بزرگتر از عرض حفره های مویینه موجود در ماتریس خمیر سیمان می باشد و بنابراین با افزایش ارتباطات داخلی سیستم، نفوذپذیری آن را افزایش می دهند.
- اندازه سنگدانه و دانه بندی آن بر روی مشخصات آب انداختگی مخلوط بتن تأثیر می گذارند که این نیز به نوبه خود روی ترک ها و مقاومت ناحیه انتقال تأثیر می گذارد.

نفوذ پذیری بتن



نفوذپذیری بتن

- نفوذپذیری بتن را می‌توان با استفاده از آزمایشهای متعددی بدست آورد، لیکن نتایج بیشتر نسبی می‌باشند.
- در اغلب این آزمایشها اطراف نمونه بتنی پوشانده می‌شود و آب تحت فشار به سطح بالایی آن اعمال می‌شود.
- وقتی شرایط جریان پایدار پدید آمد، که این امر در بتن‌های کم نفوذ ممکن است چندین روز طول بکشد، مقدار آبی را که از ضخامت معینی بتن در مدت زمان مشخص عبور می‌کند، اندازه‌گیری می‌کنند.
- نفوذپذیری بتن در مقابل آب بصورت ضریب نفوذپذیری با قرار دادن مقادیر اندازه‌گیری شده در رابطه داری محاسبه می‌گردد.

نفوذپذیری بتن

- آزمایش دیگری جهت تعیین جذب آب سطحی ارائه شده است (ISAT)
- جذب آب سطحی به صورت مقدار جریان آب در واحد سطح بتن، بعد از زمانی معین و تحت اثر بار ثابت و دمای مشخص تعریف می‌گردد.



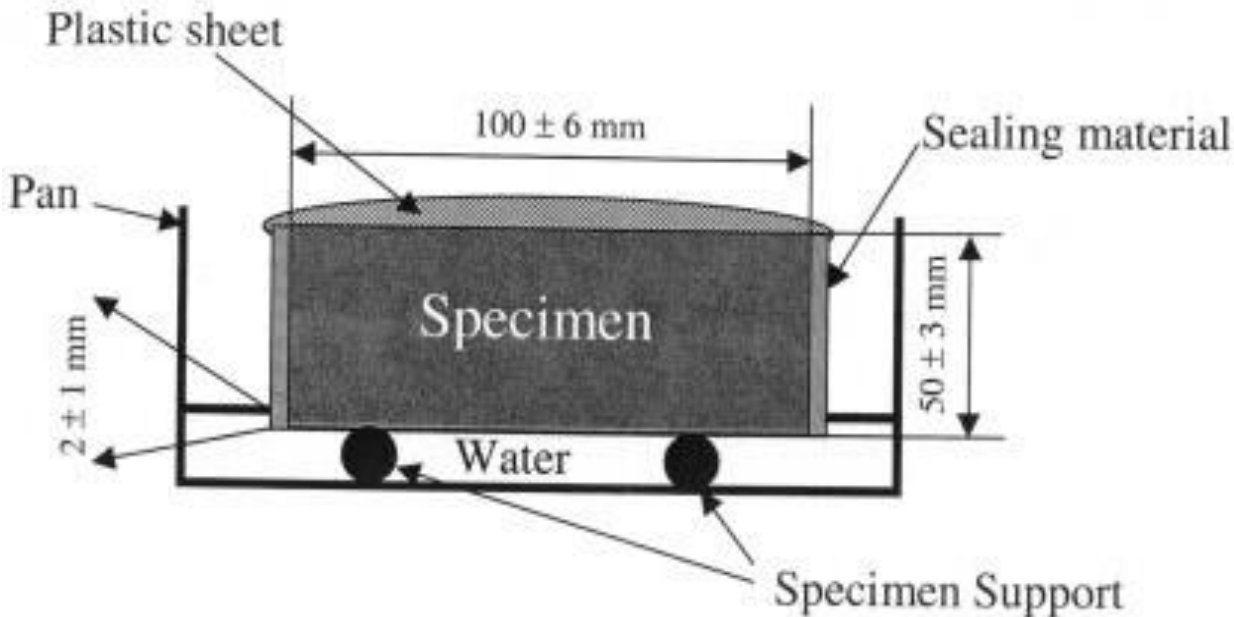
نفوذپذیری بتن

- در روش دیگری مقدار جذب آب حجمی بتن اندازه گیری می شود.
- بدین منظور نمونه بتنی ابتدا خشک شده و سپس در داخل آب کاملاً غوطه ور می شود.
- مقدار آب جذب شده توسط نمونه از روی تغییر در وزن آن در فواصل زمانی مشخص اندازه گیری می شود.
- دمای خشک کردن نمونه، طول مدت خشک کردن، و فواصل زمانی اندازه گیری در استانداردهای مختلف متفاوت است.

نفوذپذیری بتن

- در روش جذب آب موئینه نمونه بتنی ابتدا خشک شده، سپس همه وجوه آن بجز یکی کاملاً پوشانده شده و وجه آخر تا ۳ میلیمتر داخل آب قرار داده می شود.

- مقدار آب جذب شده توسط نمونه از روی تغییر در وزن آن در فواصل زمانی مشخص اندازه گیری می شود.

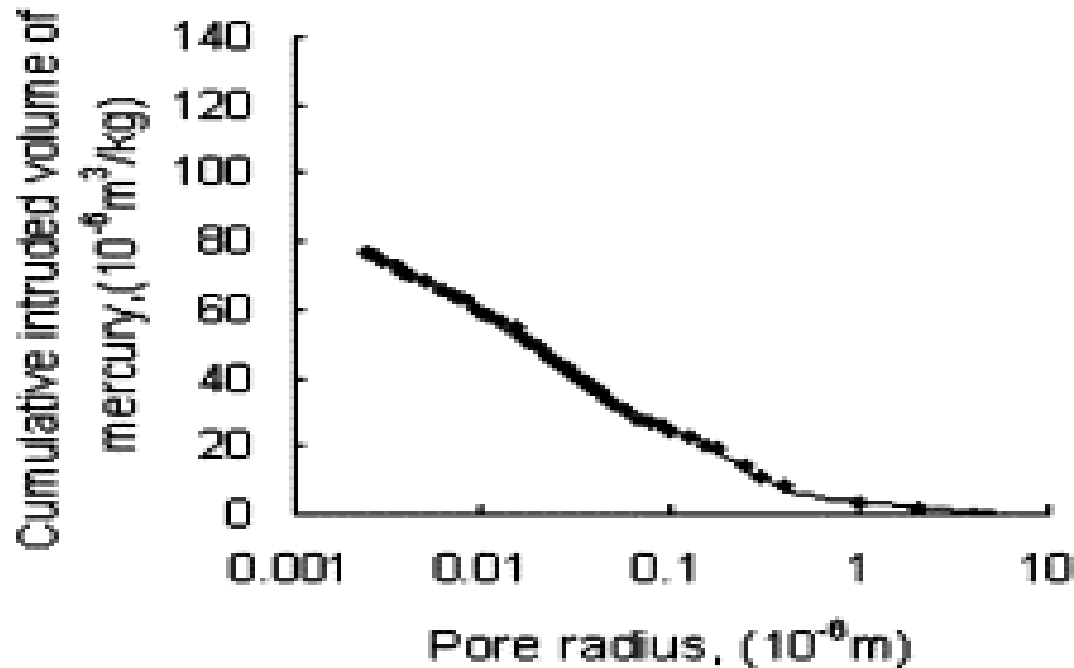


نفوذپذیری بتن

- بدلیل آنکه آب بر روی ریزساختار بتن تاثیر گذاشته و آنرا تغییر می دهد، لذا آزمایشهای تعیین نفوذپذیری به وسیله آب ذاتا دارای خطا هستند.
- بدین منظور در بعضی آزمایشهای تعیین نفوذپذیری از سیالات دیگر نظیر هوا یا گاز نیتروژن استفاده می شود.
- یکی از روشهای متداول برای اندازه گیری نفوذپذیری و تخلخل خمیر سیمان یا بتن روش تخلخل سنجی نفوذ جیوه (MIP) است.

نفوذپذیری بتن

- در روش MIP جیوه با فشار بالا به داخل فضاهای مویینه داخل بتن وارد می شود.
- ابعاد و اندازه فضاهای خالی از روی فشار لازم برای وارد کردن مقدار مشخصی جیوه به داخل آنها و نیز کشش سطحی جیوه تعیین می شود.



خرابی بتن

- در یک تقسیم بندی کلی، عوامل خرابی بتن به دو دسته **عوامل فیزیکی و عوامل شیمیایی** تقسیم می شوند.
- تمایز بین علل فیزیکی و شیمیایی آسیب دیدگی بتن کاملاً اختیاری است و در عمل، این دو اغلب مکمل هم می شوند.
- مثلاً فرسودگی سطحی و ترک خوردگی، نفوذپذیری بتن را افزایش می دهد که علت اصلی یک یا چند فرآیند آسیب دیدگی شیمیایی می شود و یا نشتی مایعات اسیدی به درون اجزای خمیر سیمان سخت شده، موجب افزایش تخلخل بتن شده و بنابراین مصالح را در برابر سایش و فرسایش، بیشتر آسیب پذیر می سازد.

خرابیهای فیزیکی (Physical Deterioration)

- در یک تقسیم‌بندی علل فیزیکی آسیب‌دیدگی بتن به دو گروه طبقه‌بندی شده است.

– فرسودگی سطحی یا کاهش جرم : ناشی از سایش، فرسایش و خلأزایی

– ترک‌خوردگی : ناشی از گرادیان معمولی دما و رطوبت، فشارهای ناشی از

تبلور نمکها در منافذ، بارگذاری سازه‌ای، و قرارگیری در معرض شرایط

دمایی شدید، نظیر یخ‌زدگی و آتش‌سوزی

فرسودگی سطحی (Surface Wear)

- **سایش (Abrasion):** ساییدگی اصطکاکی خشک، مانند سایش روسازیها و کفهای صنعتی بر اثر عبور و مرور وسایل نقلیه
- **فرسایش (Erosion):** فرسودگی ناشی از عملکرد سایشی مایعات محتوی ذرات جامد معلق در سازه‌های هیدرولیکی، مانند روکش کانالها، سرریزها و لوله‌های انتقال آب یا فاضلاب
- **خلأزایی (Cavitation):** کاهش جرم ناشی از تشکیل حبابهای بخار و گسیختگی متعاقب آن بر اثر تغییر جهت ناگهانی در آبهای با جریان سریع

سایش

- خمیر سیمان مقاومت زیادی در برابر ساییدگی ندارد و مخصوصا اگر خمیر سیمان دارای تخلخل زیاد یا مقاومت کم بوده و سنگدانه‌ها مقاومت سایشی کمی داشته باشند منجر به خرابی می شود.
- بر طبق رابطه کمیته دوام (ACI) برای تهیه سطوح بتنی مقاوم در مقابل سایش، مقاومت فشاری بتن هیچ‌گاه نباید کمتر از ۲۸ MPa شود.
- روشهای دستیابی به مقاومتهای مناسب عبارتند از : استفاده از نسبت کم آب به سیمان، دانه‌بندی سنگدانه، حداقل روانی تراکم مناسب و حداقل هوای محبوس شده متناسب با شرایط محیطی.

سایش



فرسایش

- هنگامی که مایعی محتوی ذرات جامد معلق در تماس با بتن است، تصادم، لغزش یا غلتیدن ذرات باعث فرسایش سطح بتن می‌گردد.
- میزان فرسایش سطح، به تخلخل یا مقاومت بتن و نیز به مقدار، اندازه، شکل، چگالی، سختی و سرعت ذرات در حال حرکت بستگی دارد.
- وقتی که شرایط فرسایش شدید وجود دارد پیشنهاد شده است که علاوه بر مصرف سنگدانه‌های سخت، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن باید حداقل 41 MPa باشد و نیز قبل از در معرض محیط مهاجم قرار گرفتن به طور مناسبی عمل آورده شود.

فرسایش



خلأزایی (Cavitation)

- در سرعت‌های بیش از ۱۲ متر در ثانیه (۷ متر در ثانیه در مجرای بسته)، جریان غیرخطی ممکن است سبب فرسایش شدید بتن بر اثر خلأزایی بشود.

- در مقایسه با فرسایش یا سایش، یک بتن قوی ممکن است لزوماً برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی ناشی از خلأزایی مؤثر نباشد.

- بهترین راه‌حل برای مواجهه با این شکل از خرابی، از بین بردن علل بوجود آمدن خلأزایی، مانند ناترازی سطح و یا تغییرات ناگهانی شیب می‌باشد.

فرسودگی سطحی

- عمل ساییدگی فیزیکی بتن، بر روی سطح آن اتفاق می‌افتد ← لایه سطحی با کیفیت بالا
- برای کاهش میزان تشکیل سطح ضعیف (شیره بتن) تا زمانی که بتن آب انداختگی سطحی خود را از دست نداده است، ماله‌کشی آن با ماله فلزی و تخته ماله به تعویق انداخته شود.
- طراحی کفهای صنعتی یا روسازیهای با مقاومت زیاد برای لایه رویی: نسبت کم آب به سیمان و سنگدانه‌های سخت، مواد افزودنی لاتکس یا روان‌کننده
- همچنین مصرف مواد جایگزین سیمان مرغوب، مانند دوده سیلیسی متراکم و مواد پوزولانی ویژه با عمل‌آوری مرطوب مفید است

تبلور نمک ها (Salt Crystallization)

- تحت شرایط محیطی خاص تبلور نمکهای مختلف در داخل منافذ بتن، می تواند باعث آسیب بسیار زیادی در بتن بشود.
- تبلور نمکهای حاصل از محلولهای فوق اشباع در داخل حفره های مصالح متخلخل می توانند موجب ایجاد تنشهای فشارهای بشود که باعث ترک خوردگی گردد.
- مثال: وقتی که یک طرف یک دیوار حایل یا یک دال بتنی با محلول نمک در تماس باشد و طرف دیگر آن تحت تبخیر قرار گیرد، یا خرابی ناشی از تبلور نمکهای موجود در آب دریا (سولفات و کلرید) در پای بسیاری از ستونها و دیوارهای بتنی سازه های نزدیک دریا

هیدراتاسیون MgO و CaO متبلور

- هیدراتاسیون MgO و CaO متبلور، هنگامی که مقادیر معتنا بهی از آنها در سیمان موجود باشند، می‌توانند باعث انبساط و ترک‌خوردگی بتن شوند.
- استاندارد ASTM C 150 لازم می‌داند که مقدار MgO موجود در سیمان نباید از ۶٪ تجاوز نماید (آزمایش سلامت سیمان).
- کنترل‌های تولیدی بهتر، به ما این اطمینان را می‌دهند که مقدار CaO ترکیب نشده یا متبلور در سیمان پرتلند به ندرت از ۱٪ تجاوز می‌نمایند.

خرابی ناشی از یخ زدگی (Deterioration by Frost Action)



خرابی ناشی از یخ زدگی

- در اقلیمهای سرد، آسیب دیدگی رو سازه های بتنی، دیوارهای حایل، عرشه های پل ها و نرده ها، که به عمل یخ زدگی (دوره های یخ زدن و آب شدن) نسبت داده می شوند، یکی از مشکلات اصلی است.
- در هر حال، تأثیرات زیان آور، نه تنها به مشخصات بتن، بلکه به شرایط محیطی ویژه آن نیز بستگی دارد.
- بنابراین، بتنی که تحت یک شرایط یخ زدگی و آب شدگی مشخص در برابر یخ زدگی مقاوم باشد می تواند تحت شرایط دیگر تخریب گردد.

خرابی ناشی از یخ زدگی

• آسیب ناشی از یخ زدگی در بتن می تواند به چند شکل بوجود آید:

– عمومی ترین نوع آن ترک خوردگی بتن در اثر انبساط پیشرونده ماتریس خمیر سیمان بر اثر دوره های یخ زدن و آب شدن مکرر است.

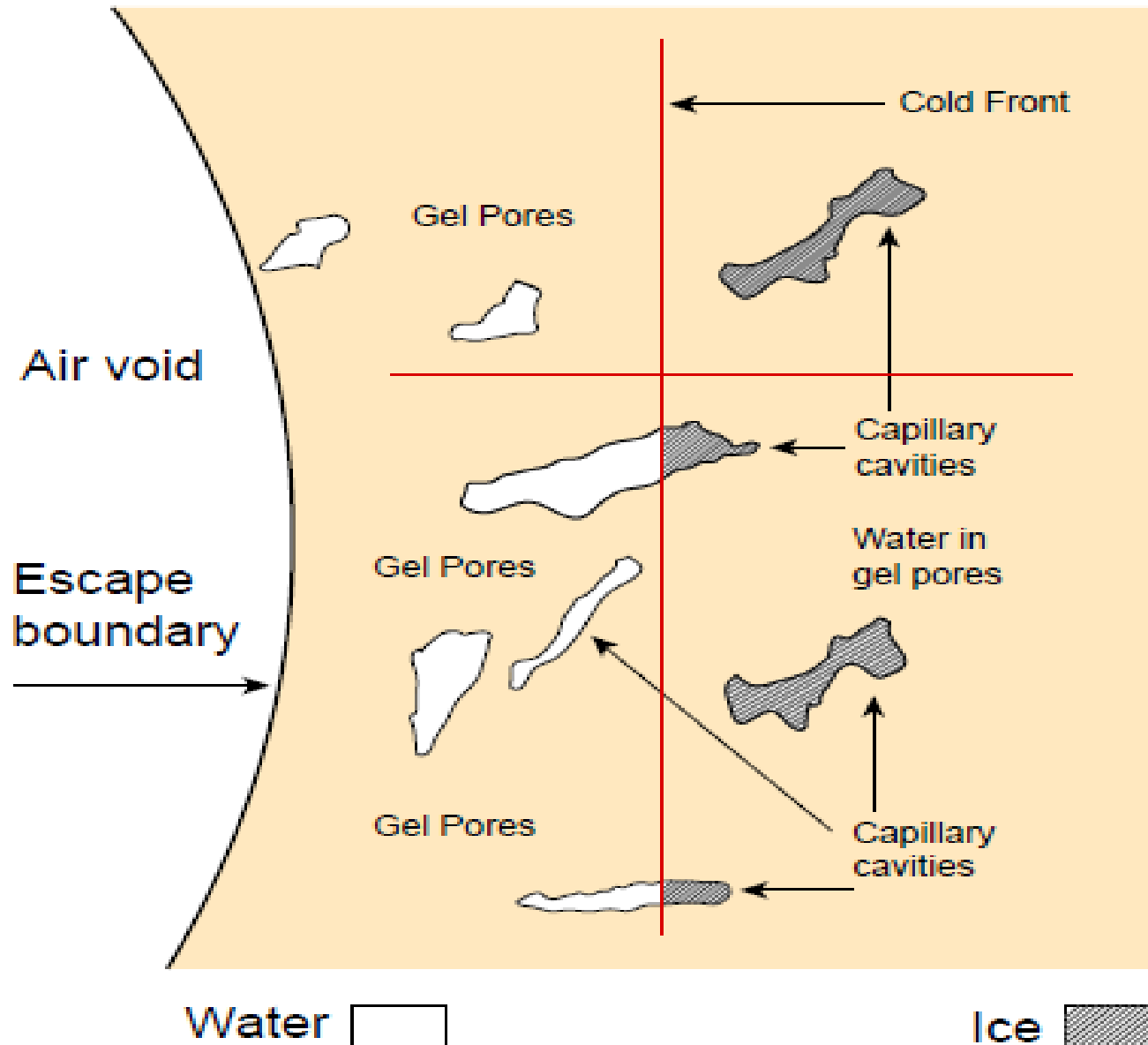
– پوسته شدن (ورقه ورقه شدن سطح پرداخت شده): در دالهای بتنی ای که در معرض یخ زدن و آب شدن همراه با حضور رطوبت و مواد شیمیایی یخ زدا قرار می گیرند

– بعضی از سنگدانه های درشت در دالهای بتنی باعث ترک خوردگی (معمولاً موازی درزها و لبه ها) می شوند و نهایتاً شکلی را که شبیه حرف D بزرگ لاتین است ایجاد می کنند. (یعنی این که در دو گوشه از چهار گوشه دال، ترکها انحنای پیدا می کنند.)

مکانیزم خرابی ناشی از یخ زدگی

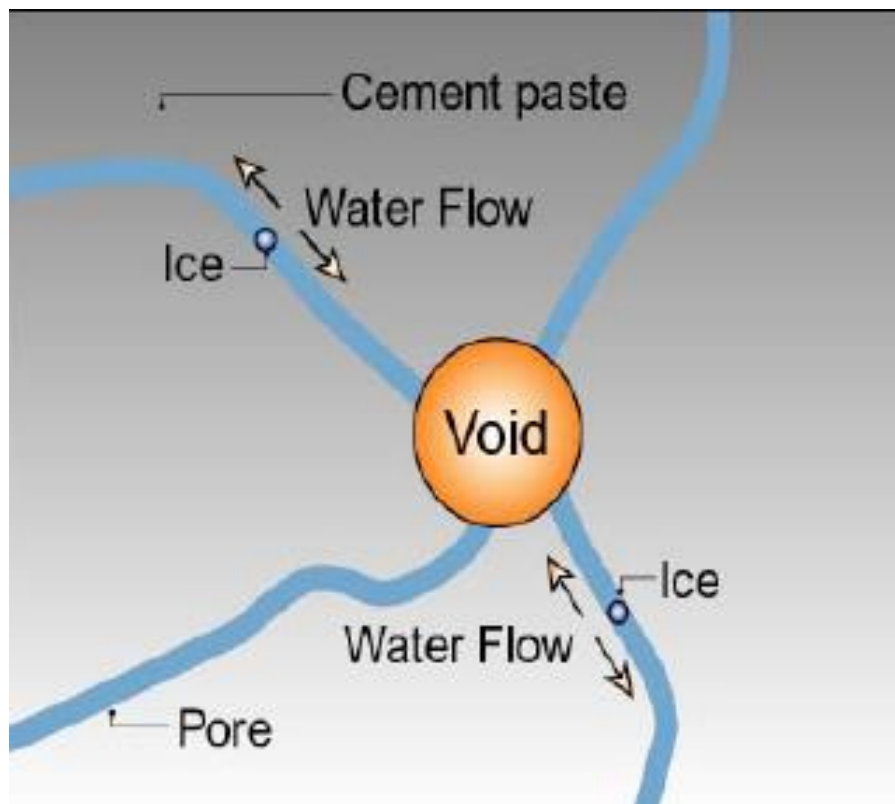
- وقتی آب یخ می زند، افزایش حجمی برابر ۹٪ پیدا می کند.
- یخ زدن آب در یک حفره موئینه و افزایش حجم همراه با یخ زدگی آب، نیاز به انبساط حفره و یا نیاز به بیرون راندن مقدار آب اضافی از سطوح مرزی نمونه، و یا نیاز به هر دو اثر دارد.
- در ضمن این فرآیندها، فشار هیدرولیکی تولید می شود و مقدار این فشار بستگی به نرخ یخ زدگی، نفوذپذیری مصالح، و فاصله تا «سطح مرزی فرار» دارد.

مکانیزم خرابی ناشی از یخ زدگی



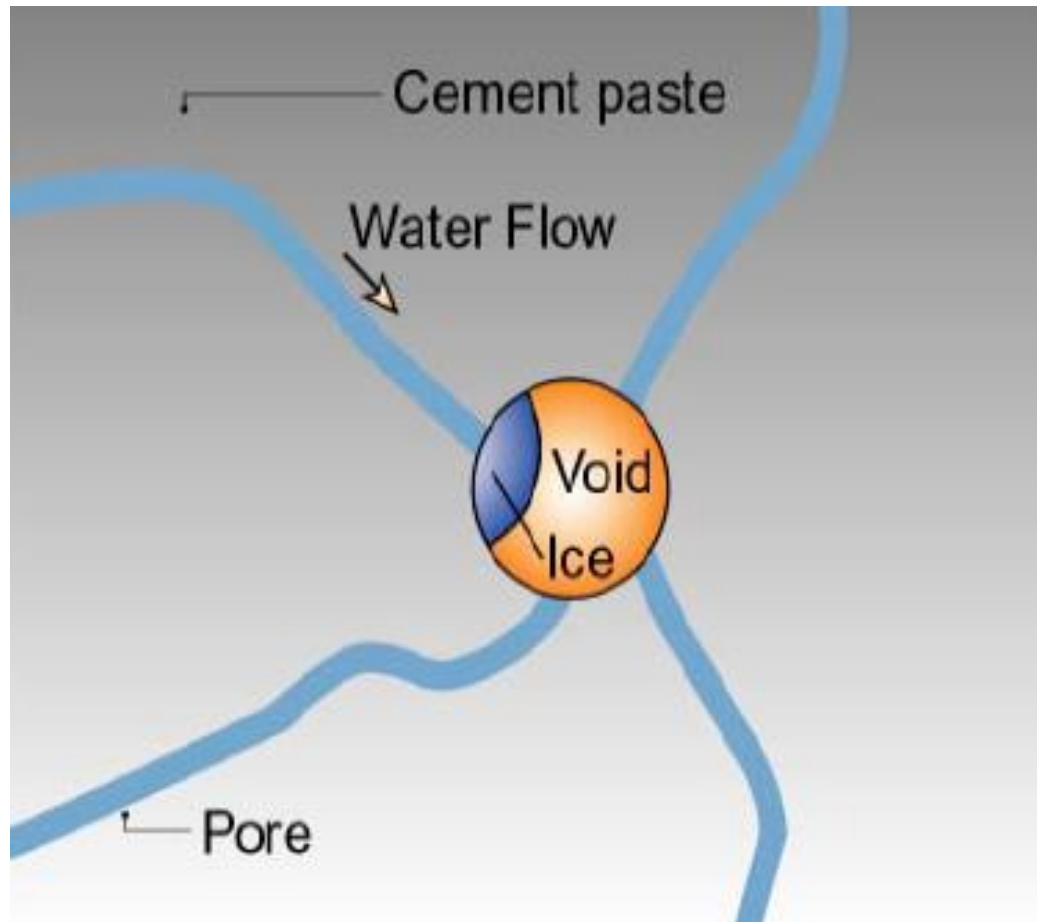
مکانیزم خرابی ناشی از یخ زدگی

- فشارهای گسیختگی در نمونه اشباع شده خمیر توسعه خواهند یافت مگر آنکه تمام حفرات مویینه از نزدیکترین سطح مرزی فرار بیش از یک دهم تا هفت صدم میلیمتر فاصله نداشته باشند.

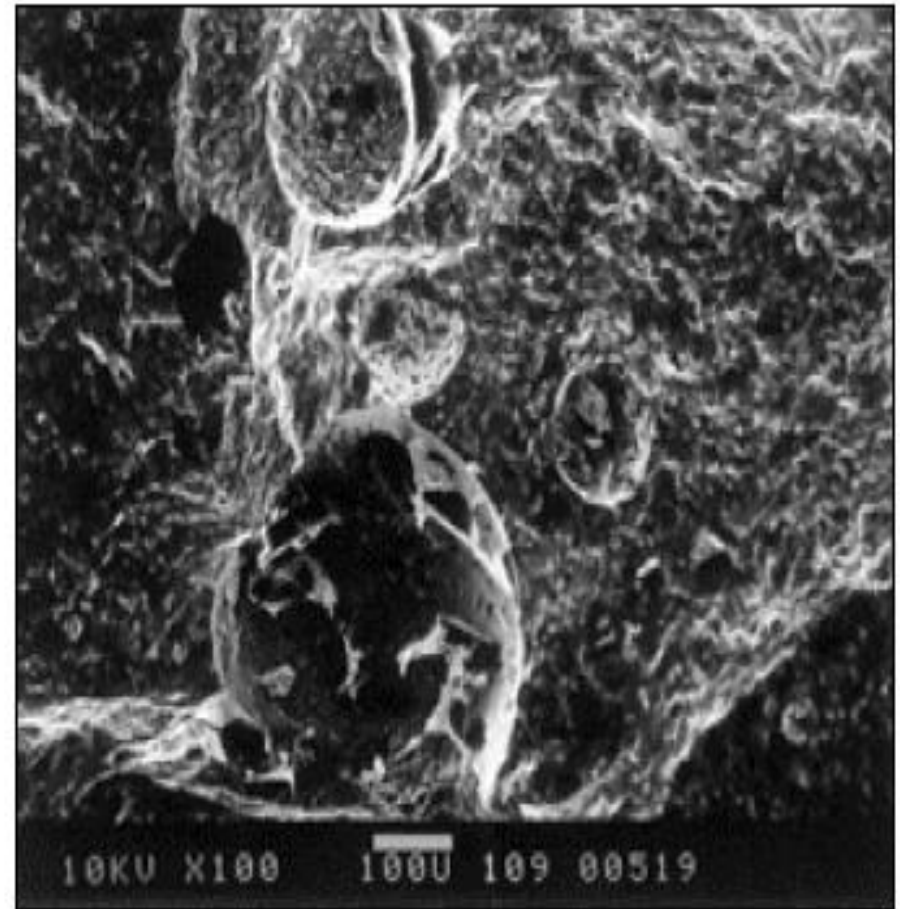
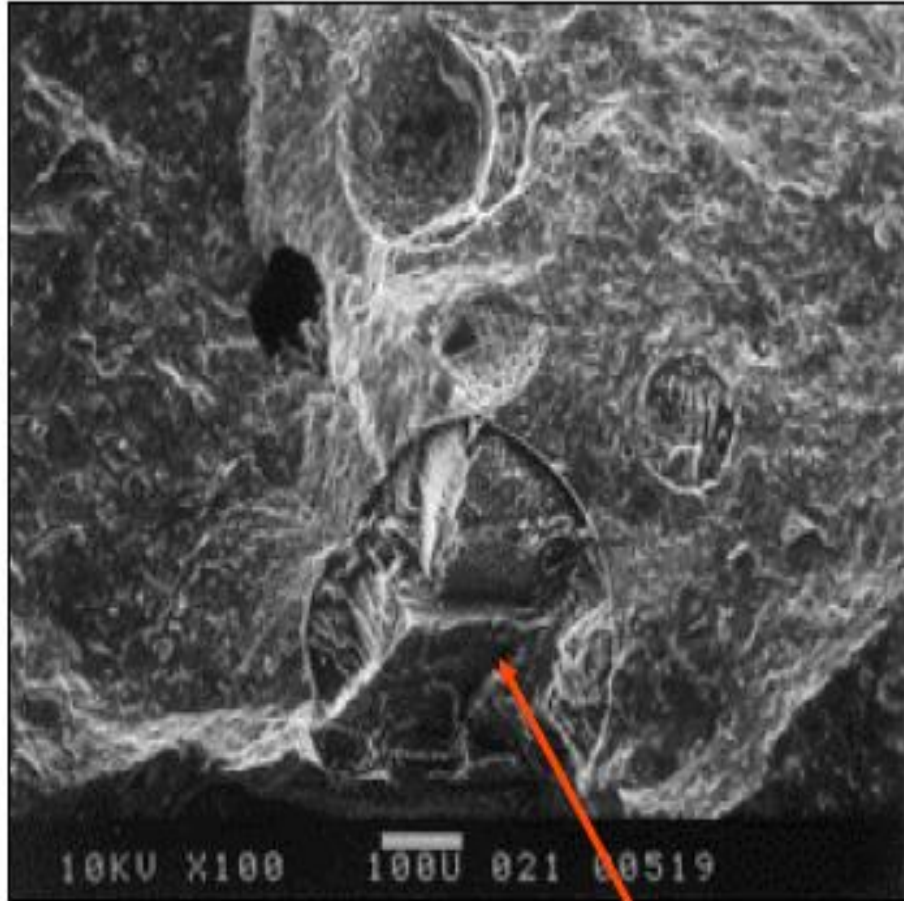


مکانیزم خرابی ناشی از یخ زدگی

- این چنین سطوح مرزی نزدیک به هم، از طریق استفاده صحیح از مواد هوازای مناسب میسر می شود.



مکانیزم خرابی ناشی از یخ زدگی



Ice inside the air void

یخ زدگی سنگدانه ها

- بسته به اینکه سنگدانه‌ها چطور در مقابل یخ‌زدگی واکنش نشان دهند، بتنی که در ماتریس خمیر سیمان آن حباب هوا ایجاد شده باشد هنوز هم می‌تواند آسیب‌پذیر باشد.
- مکانیزمی که در توسعه فشار داخلی ناشی از یخ‌زدگی خمیر سیمان اشباع شده حاکم است، برای سنگدانه‌های متخلخل نیز صادق است.
- رفتار سنگدانه در دوره‌های یخ‌زدن و آب‌شدن اساساً بستگی به اندازه، تعداد و پیوستگی منافذ (یعنی به توزیع اندازه منافذ و نفوذپذیری) آن دارد.

یخ زدگی سنگدانه ها

• از نقطه نظر دوام در مقابل یخ زدگی، سه گروه سنگدانه موجود است:

– سنگدانه‌های با نفوذپذیری کم و مقاومت زیاد: بر اثر یخ زدن آب، کرنش ارتجاعی در دانه‌ها بدون بروز شکستگی انجام می‌گیرد.

– سنگدانه‌های با نفوذپذیری متوسط: عمده تخلخل آنها شامل منافذ کوچک در حد 500 nm یا کمتر می‌شوند.

– سنگدانه‌های با نفوذپذیری زیاد: امکان دارد که ناحیه انتقالی بین سطح سنگدانه و ماتریس خمیر سیمان، وقتی که آب تحت فشار از سنگدانه به بیرون رانده می‌شود، آسیب ببیند.

یخ زدگی سنگدانه ها

- در سنگدانه‌های با نفوذپذیری متوسط، نیروهای حفره‌ای در منافذ کوچک باعث راحت اشباع شدن و سهولت نگهداری آب در سنگدانه می‌شوند.

- در هنگام یخ زدگی، مقدار فشار بوجود آمده بستگی به نرخ یخ زدگی و نیز فاصله تا سطح مرزی فرار دارد.

- این سطح مرزی می‌تواند منافذ خالی داخل سنگدانه (مشابه حباب هوا در خمیر سیمان) و یا در سطح سنگدانه باشد.

یخ زدگی سنگدانه ها

- با توجه به آنکه سطح مرزی فرار در سطح سنگدانه است، می توان مفهوم «اندازه بحرانی سنگدانه» را در نظر گرفت.
- با یک میزان مشخص از توزیع اندازه منافذ، نفوذپذیری، درجه اشباع و میزان یخ زدگی، سنگدانه بزرگ ممکن است باعث آسیب شود ولی ذرات کوچکتر از همان سنگدانه باعث آسیب بتن نشوند.
- فاصله بحرانی برای آزاد شدن فشار در خمیر سیمان سخت شده در حدود ۰/۲ میلیمتر می باشد، که به خاطر تراوایی بیشتر سنگدانه ها نسبت به خمیر سیمان، در اکثر سنگها فاصله بحرانی بیشتر از این حد می باشد.

عوامل موثر در مقاومت یخ زدگی

- مقاومت یک بتن در مقابل آسیب دیدگی ناشی از عمل یخ زدگی بستگی به مشخصات هم خمیر سیمان و هم سنگدانه ها دارد:
 - محل سطح های مرزی فرار (فاصله ای که آب برای آزاد شدن فشار باید بپیماید)
 - ساختمان منفذی سیستم (اندازه، تعداد و پیوستگی منافذ)
 - درجه اشباع (مقدار موجود آب قابل یخ زدن)
 - نرخ سردشدگی
 - مقاومت کششی مصالح

حباب های هوا

- حجم حفره‌های در حد ۰/۱ تا ۰/۲ میلیمتر در هر نقطه از خمیر سیمان که برای محافظت بتن در مقابل آسیب‌دیدگی ناشی از یخ‌زدگی لازم است.
- با اضافه کردن مقدار کمی افزودنی حباب هوازا (مثلاً پنج صدم درصد وزنی سیمان) می‌توان حبابهای ۰/۰۵ تا یک میلیمتر را در خمیر بوجود آورد.
- برای یک حجم مشخص هوا، تعداد حفره‌های خالی و فاصله آنها و در نتیجه درجه محافظت در مقابل عمل یخ‌زدگی می‌تواند به مقدار زیادی تفاوت کند.

حباب های هوا

- با آنکه حجم هوای بتن، ملاک کافی برای محافظت بتن در برابر عمل یخ زدگی نمی باشد، ولی حجم هوای بتن راحت ترین معیار بمنظور کنترل کیفیت مخلوطهای بتنی می باشد.
- از آنجا که کلاً مقدار سیمان به حداکثر اندازه سنگدانه ها ارتباط دارد، لذا بتنهای کم عیار با سنگدانه های بزرگ، دارای خمیر سیمان کمتری نسبت به بتن های پر عیار با سنگدانه های کوچک می باشند.
- بنابراین بتنهای پر عیار دارای سنگدانه های کوچک نیاز به حباب هوای بیشتری برای کسب درجه مقاومت یکسان در برابر یخ زدگی، دارند.

حباب های هوا

درصد هوای لازم (%)		حداکثر اسمی اندازه سنگدانه
شرایط محیطی معتدل	شرایط محیطی شدید	
۶	۷/۵	۹
۵/۵	۷	۱۲/۵
۵	۶	۱۹
۴/۵	۶	۲۵
۴/۵	۵/۵	۳۷/۵
۴	۵	۵۰
۳/۵	۴/۵	۷۶

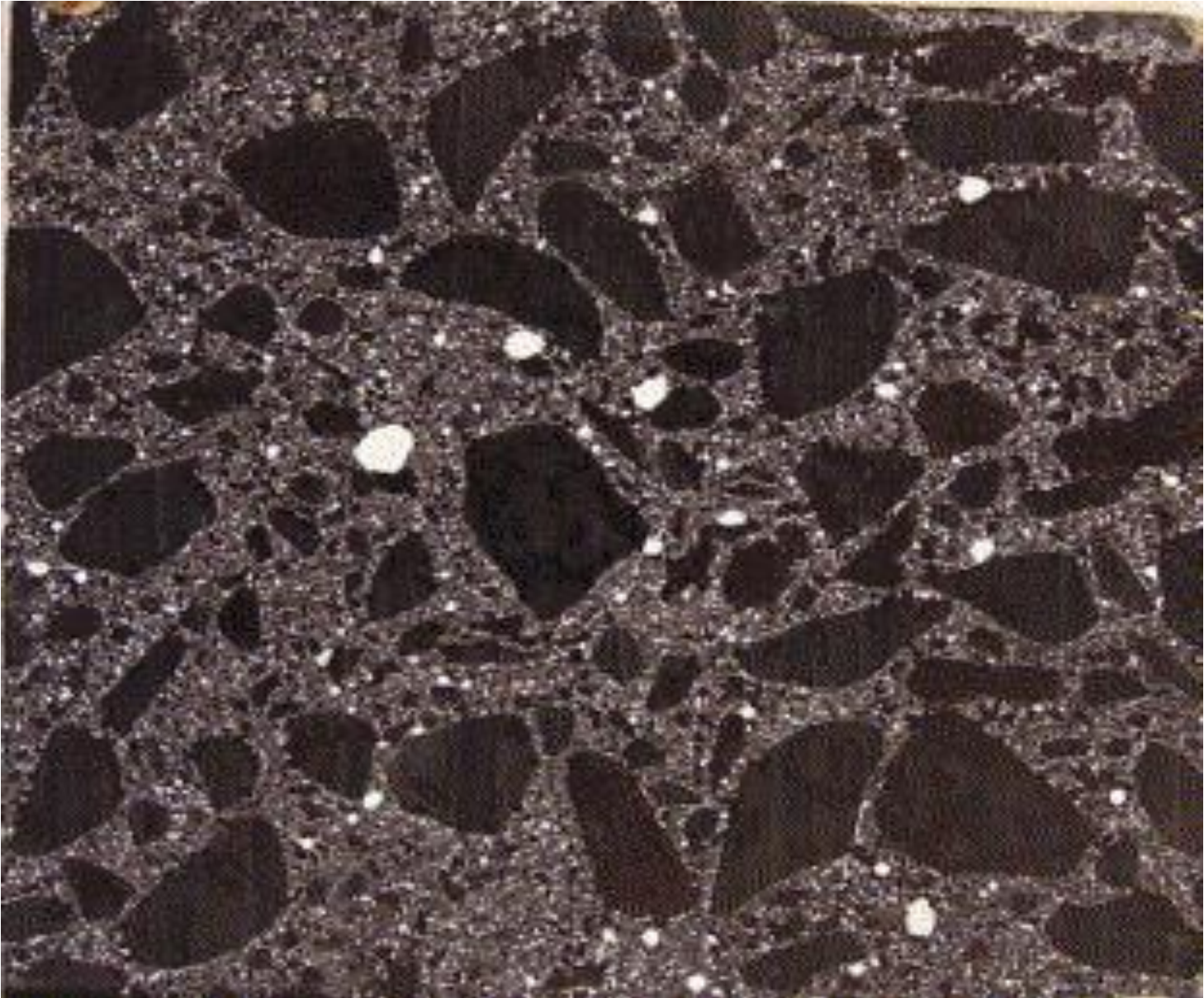
حباب های هوا

- دانه بندی سنگدانه ها همچنین بر روی حجم حباب هوا، تأثیر می گذارد. (ماسه خیلی ریز ← کاهش حباب هوا)
- اضافه کردن مواد افزودنی معدنی مثل خاکستر بادی، یا استفاده از سیمان خیلی ریز آسیاب شده نیز تأثیر مشابهی دارد.
- مخلوط کردن ناکافی یا بیشتر از حد مخلوط کردن، زمان زیادتری صرف جابه جایی یا حمل و نقل بتن تازه کردن و ارتعاش بیش از حد دادن، موجب کاهش یافتن مقدار هوای بتن می شود.

حباب های هوا

- کفایت حباب‌زایی در بتن را می‌توان با ضریب فاصله ارزیابی نمود.
- این ضریب شاخصی از بیشترین فاصله هر نقطه در خمیر سیمان از سطح خارجی حباب هوای مجاور می‌باشد.
- با مشاهده میکروسکوپی تعداد متوسط حبابهای هوا در واحد طول و حجم خمیر سیمان در بتن محاسبه می‌شود (ASTM C 457)
- برای ایجاد محافظتی رضایت بخش در مقابل یخ زدن، بیشترین مقدار ضریب فاصله می‌تواند برابر $0/2$ میلیمتر باشد.

حباب های هوا

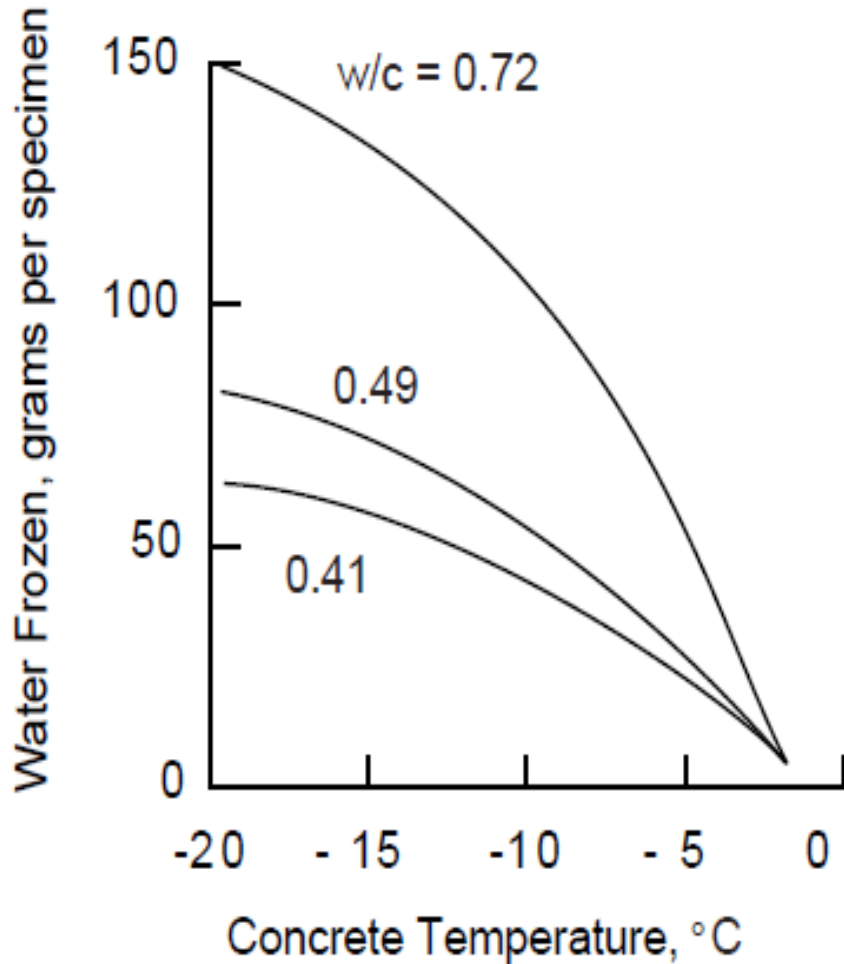


تأثیر آب به سیمان

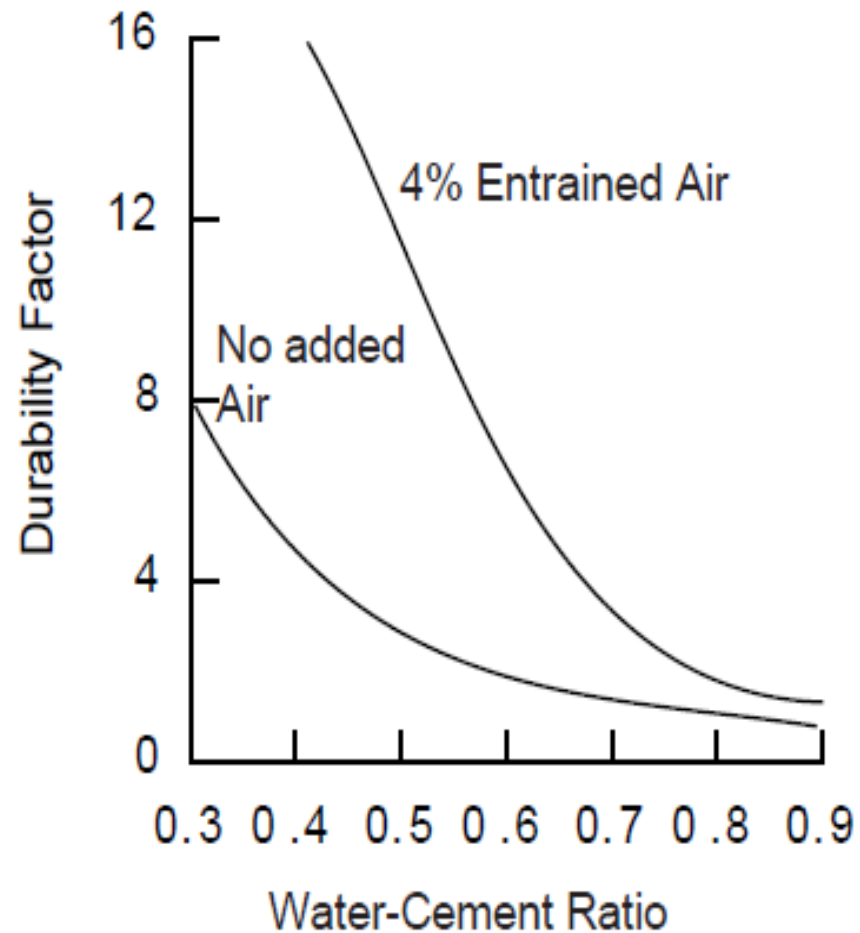
- برای یک درجه هیدراتاسیون مشخص هرچه که نسبت آب به سیمان بیشتر باشد و یا برای یک نسبت مشخص آب به سیمان هرچه که درجه هیدراتاسیون کمتر باشد، حجم منافذ بزرگ در خمیر سیمان هیدراته بیشتر می شود.
- از آنجا که آب قابل یخ زدن به آسانی در منافذ بزرگ ته نشین می شود، بنابراین در یک دمای یخ زدگی مشخص، مقدار آب قابل یخ زدن برای نسبتهای آب به سیمان بالاتر و در زمانهای اولیه عمل آوری بیشتر خواهد بود.
- آیین نامه ها حداکثر نسبت نسبت آب به سیمان برای بتنهایی که در معرض یخ زدن و آب شدن در شرایط مرطوب قرار می گیرند مشخص کرده اند.

تأثير آب به سیمان

Concrete moist-cured for 7 days before freezing



Concrete with 19 mm aggregate



درجه اشباع

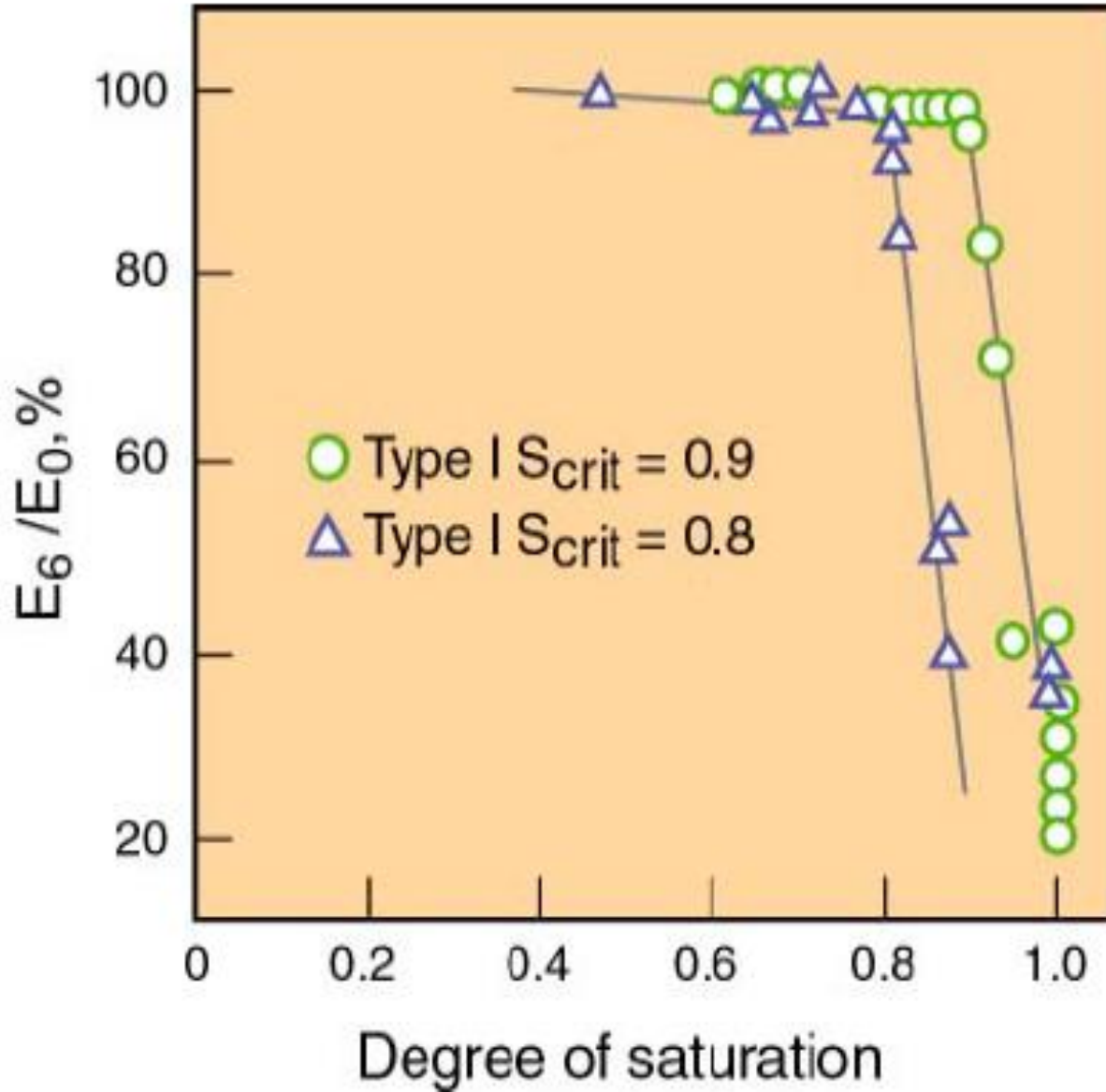
- احتمال آسیب دیدگی در اثر یخ زدن به مقدار رطوبت موجود در نمونه بستگی دارد.
- اگر رطوبت موجود یا درجه اشباع واقعی از حدی بیشتر شود، احتمال دارد که بتن وقتی در معرض دماهای پایین قرار می‌گیرد، آسیب ببیند. این حد، «**درجه اشباع بحرانی**» نام دارد.
- در حقیقت این تفاوت بین درجه اشباع بحرانی و واقعی است که مقاومت یخ‌زدگی بتن را تعیین می‌کند.

درجه اشباع

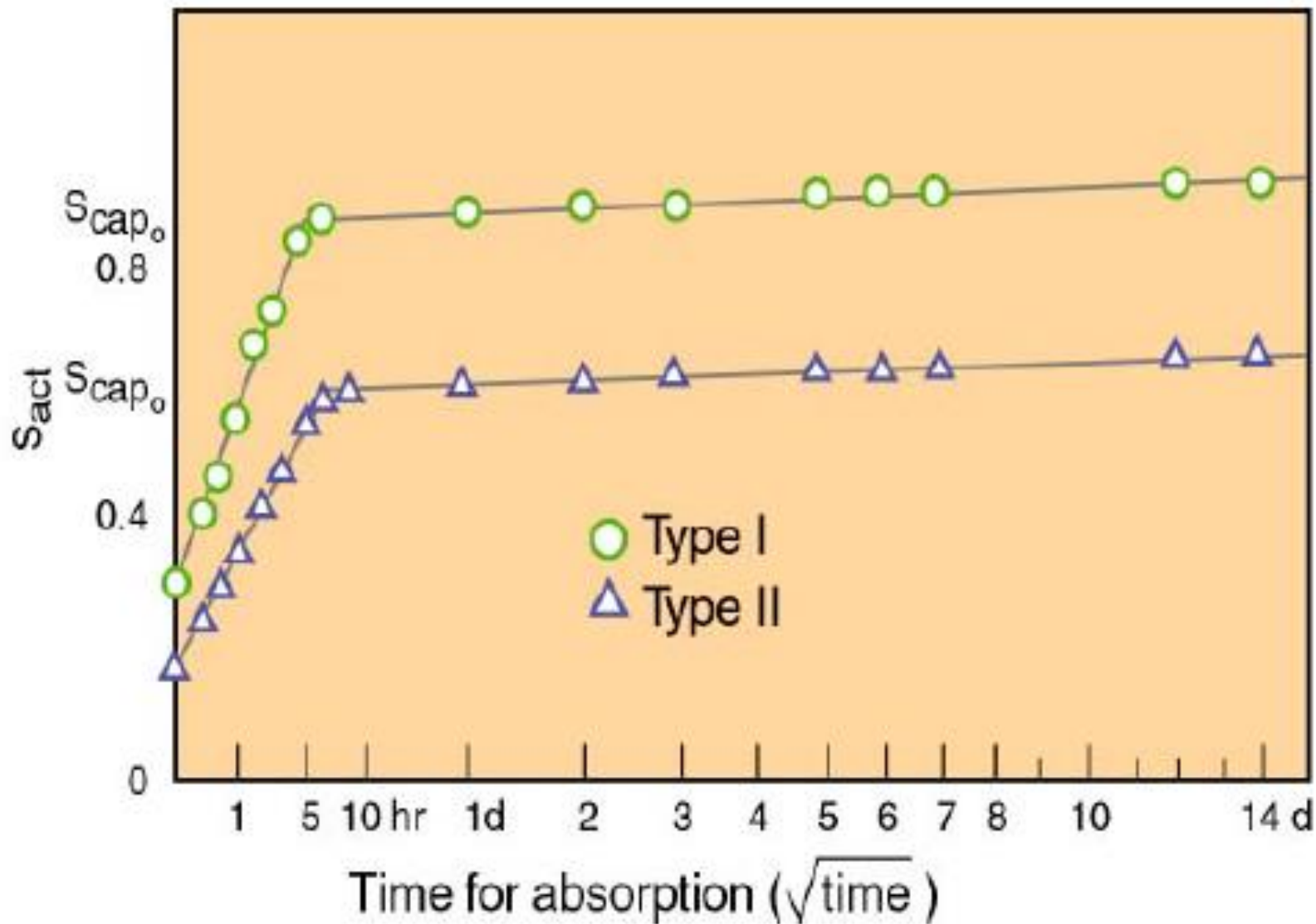
- بتن ممکن است بعد از عمل‌آوری کافی به زیر درجه اشباع بحرانی بیافتد، ولی بسته به تراوایی آن ممکن است وقتی که در معرض شرایط محیطی مرطوب قرار می‌گیرد، دوباره به درجه اشباع بحرانی رسیده یا از آن تجاوز نماید.

- بنابراین نفوذپذیری بتن در عمل یخ زدن اهمیت دارد، زیرا نه تنها فشار هیدرولیکی مربوط به حرکت آب داخلی در موقع یخ‌زدگی را کنترل می‌کند، بلکه درجه اشباع بحرانی قبل از یخ‌زدگی را نیز کنترل می‌نماید.

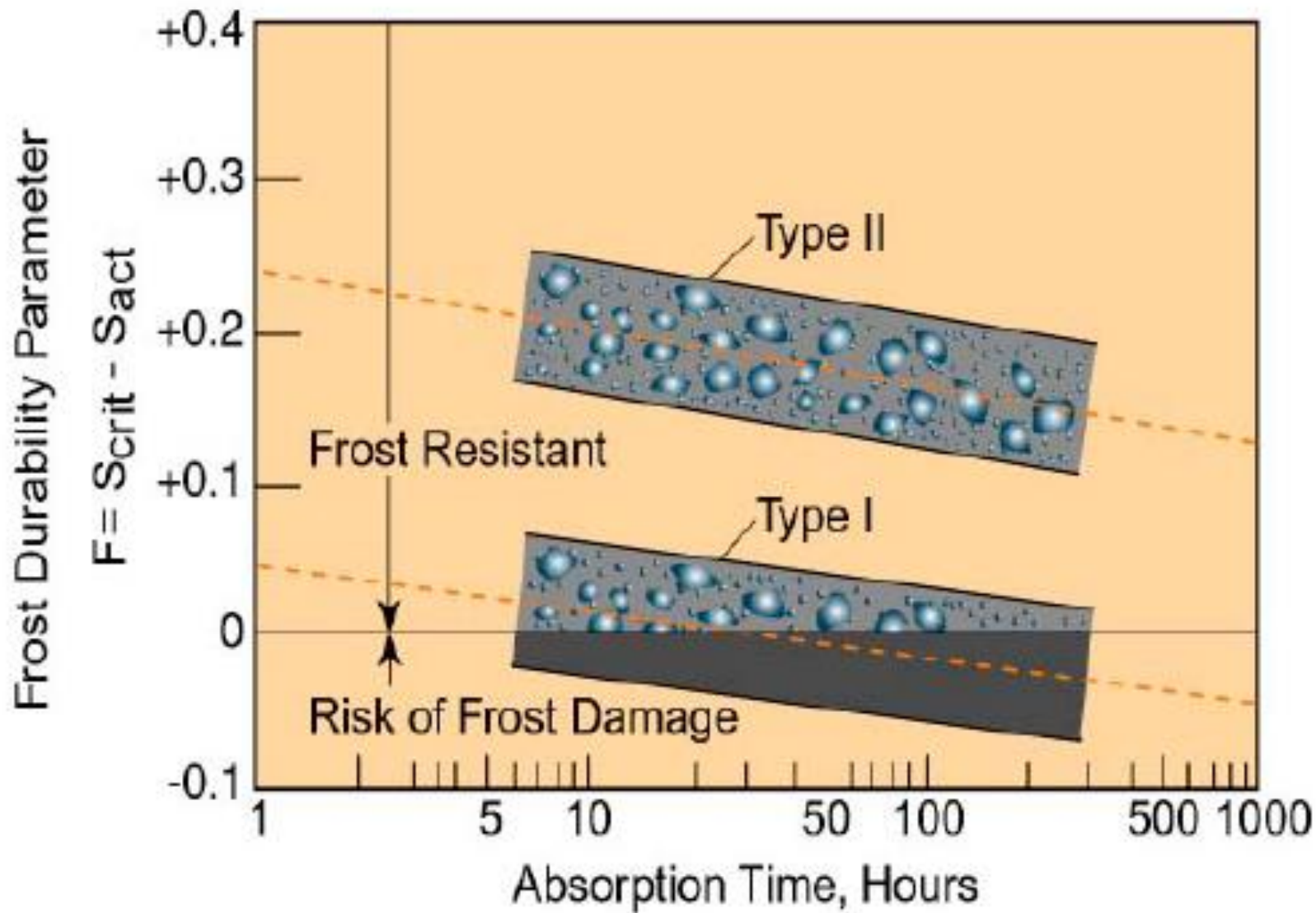
درجه اشباع



درجه اشباع



درجه اشباع



اثر مقاومت

- رابطه مستقیمی بین مقاومت و دوام بتن در برابر یخزدگی صادق نیست.
- بتن بدون حباب هوا از بتن با هوا مقاومت بیشتری داشته اما دوام بهتری در مقابل عمل یخزدگی از خود نشان نمی دهد.
- به دلیل بهتر شدن کارایی در نتیجه هوازایی، می توان مقاومت کاهش یافته در اثر هوا را از طریق کم کردن جزیی نسبت آب به سیمان جبران نمود.
- داشتن **حداقل مقاومت** پیش از قرارگیری در معرض یخ زدگی ضروری است.

یخ زدن و پوسته شدن بتن

- مقاومت بتن در مقابل تأثیر توأم یخ زدگی و نمکهای یخزدا از مقاومت در برابر یخ زدگی تنها کمتر است.
- تأثیر نمک:

– مثبت: پایین آوردن دمای تشکیل یخ

– منفی: (۱) افزایش درجه اشباع بتن بدلیل خصوصیت رطوبتی نمکها

(۲) افزایش اثر گسیختگی هنگام یخ زدن آب

(۳) توسعه تنشهای متفاوت با یخ زدن لایه ای بتن بر اثر گرادیان غلظت نمک

(۴) رشد بلوری در محلولهای فوق اشباع موجود در منافذ

خرابیهای شیمیایی (Chemical Deterioration)

- مقاومت بتن در مقابل فرآیندهای آسیب دیدگی که به وسیله واکنشهای شیمیایی شروع می شود، به طور کلی اما نه لزوماً متضمن فعل و انفعالات شیمیایی مابین مواد مهاجم موجود در محیط خارجی و اجزا خمیر سیمان می باشد.

- موارد استثناء:

- واکنشهای قلیایی سنگدانه ها
- هیدراتاسیون به تعویق افتاده CaO و MgO متبلور
- خوردگی الکتروشیمیایی فولاد در بتن

خرابیهای شیمیایی

- در یک خمیر سیمان پرتلند خوب هیدراته شده، فاز جامد که اساساً از هیدراتهای نسبتاً نامحلول کلسیم (مانند C-S-H و CH و C-A-S-H) تشکیل شده است، با pH زیاد مایع منفذی، در حدود ۱۲/۵ تا ۱۳/۵، در حالت تعادل پایدار قرار دارد.
- لذا اگر خمیر سیمان در تماس با محیط اسیدی قرار بگیرد، در حالت نامتعادل شیمیایی خواهد بود.
- از نظر تئوری، هر محیطی با pH کمتر از ۱۲/۵ ممکن است مهاجم باشد، زیرا کاهش درجه قلیایی مایع منفذی، نهایتاً منجر به ناپایدار سازی محصولات سیمانی ناشی از هیدراتاسیون می‌گردد.

خرابیهای شیمیایی

- بنابراین اغلب آبهای صنعتی و طبیعی می‌توانند در زمره گروه مهاجم قرار گیرند.
- CO_2 آزاد در آب سبک و آبهای راکد، یونهای اسیدی مثل SO_4^{2-} و Cl^- در آب زیرزمینی و آب دریا و H^+ در بعضی از آبهای صنعتی که اغلب عامل پایین آوردن pH به زیر ۶ می‌باشند، برای بتن سیمان پرتلند زیان‌آور محسوب می‌شوند.
- میزان حمله شیمیایی به بتن، تابعی از pH مایع مهاجم و نفوذپذیری بتن خواهد بود.

حمله سولفاتی (Sulfate Attack)



حمله سولفاتی

- یکی از مباحث مهم مربوط به دوام و پایداری بتن، مقاومت آن در برابر حملات سولفاتی است.
- خرابی در بتن و کاهش کیفیت آنرا که ناشی از واکنش شیمیایی بین خمیر سیمان و یونهای سولفات باشد در اصطلاح «حمله سولفاتی» می نامند.
- خرابی ناشی از حمله سولفاتی یکی از رایج ترین انواع خرابی در بتن در سطح دنیاست.

منشا حملات سولفاتی

- بسیاری از انواع خاکهای موجود در طبیعت دارای مقادیری یون سولفات به صورت سنگ گچ هستند که در صورتی که غلظت آن 0.05% فراتر رود می تواند اثر مخرب در بتن مجاور داشته باشد.
- عمده کودهای شیمیایی مورد استفاده در کشاورزی دارای سولفات آمونیم می باشند.
- پساب برخی واحدهای صنعتی حاوی می تواند حاوی یونهای سولفات باشد.

منشا حملات سولفاتی

- فساد مواد آلی در زمینهای مسطح، دریاچه های کم عمق، لوله های فاضلاب، و معادن زیرزمینی منجر به تولید گاز H_2S شده که می تواند در نهایت به **اسید سولفوریک** تبدیل شود.
- آب دریاها عموماً دارای مقادیر قابل توجهی از یونهای سولفات است.
- آبهای زیرزمینی می توانند حاوی مقادیر زیادی سولفات قلیایی ها باشد.
- بنابراین قرارگیری بتن در معرض آبهای طبیعی یا صنعتی حاوی یونهای سولفات پدیده ای نسبتاً فراگیر است.

نمونه های حملات سولفاتی

- در بسیاری از مناطق جهان غلظت یونهای سولفات در خاک بالاست (۹۵۲ میلیون هکتار) و منجر به خرابی پایه پلها شده است (سازه های ۵ تا ۲۰ ساله در جنوب آمریکا و اروپا)
- سازه های دریایی در معرض حملات سولفاتی هستند (جنوب ایران، ۴۲ مورد خرابی در سازه های دریایی ۱۰ تا ۱۵ ساله در عربستان)

اثرات حمله سولفاتی

- اثرات حمله به دو شکل مشخصاً متفاوت صورت می‌گیرد که بستگی به

غلظت و منبع یونهای سولفات مهاجم دارد:

– انبساط بتن : که منجر به ترک خوردگی و افزایش نفوذپذیری و تسریع فرآیند

آسیب‌دیدگی می‌شود.

– کاهش مستمر مقاومت و جرم : ناشی از بین رفتن چسبندگی بین محصولات

حاصل از هیدراتاسیون سیمان

حمله سولفاتی



انواع حملات سولفاتی

- حمله سولفاتی به دو دسته اصلی تقسیم بندی می شود:

– حمله سولفاتی خارجی External Sulfate Attack

– حمله سولفاتی داخلی Internal Sulfate Attack

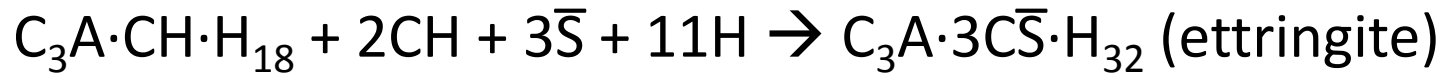
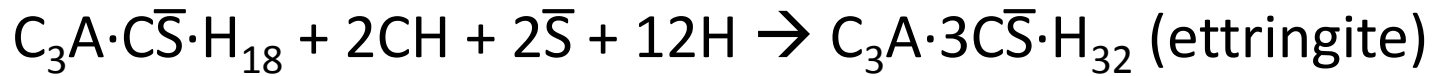
- مبنای این تقسیم بندی عمدتاً به منشا یونهای سولفات مهاجم بر می گردد، هر چند که مکانیزم و اثرات تخریبی آنها بر بتن نیز با هم تفاوت دارد.

حمله سولفاتی خارجی

- فازهای آلومین دار خمیر سیمان و هیدروکسید کلسیم آسیب پذیری بیشتری در برابر حمله یونهای سولفات دارند.
- در هیدراتاسیون سیمانهای پرتلند با بیش از ۵٪ C_3A ، بیشتر آلومین به صورت منوسولفات $C_3A.C\bar{S}.H_{18}$ می باشد.
- اگر مقدار C_3A سیمان بیش از ۸٪ باشد، محصولات هیدراتاسیون نیز شامل $C_3A.CH.H_{18}$ خواهد بود.
- هیدروکسید کلسیم نیز در خمیر سیمان در اثر هیدراتاسیون فازهای سیلیکاتی موجود است.

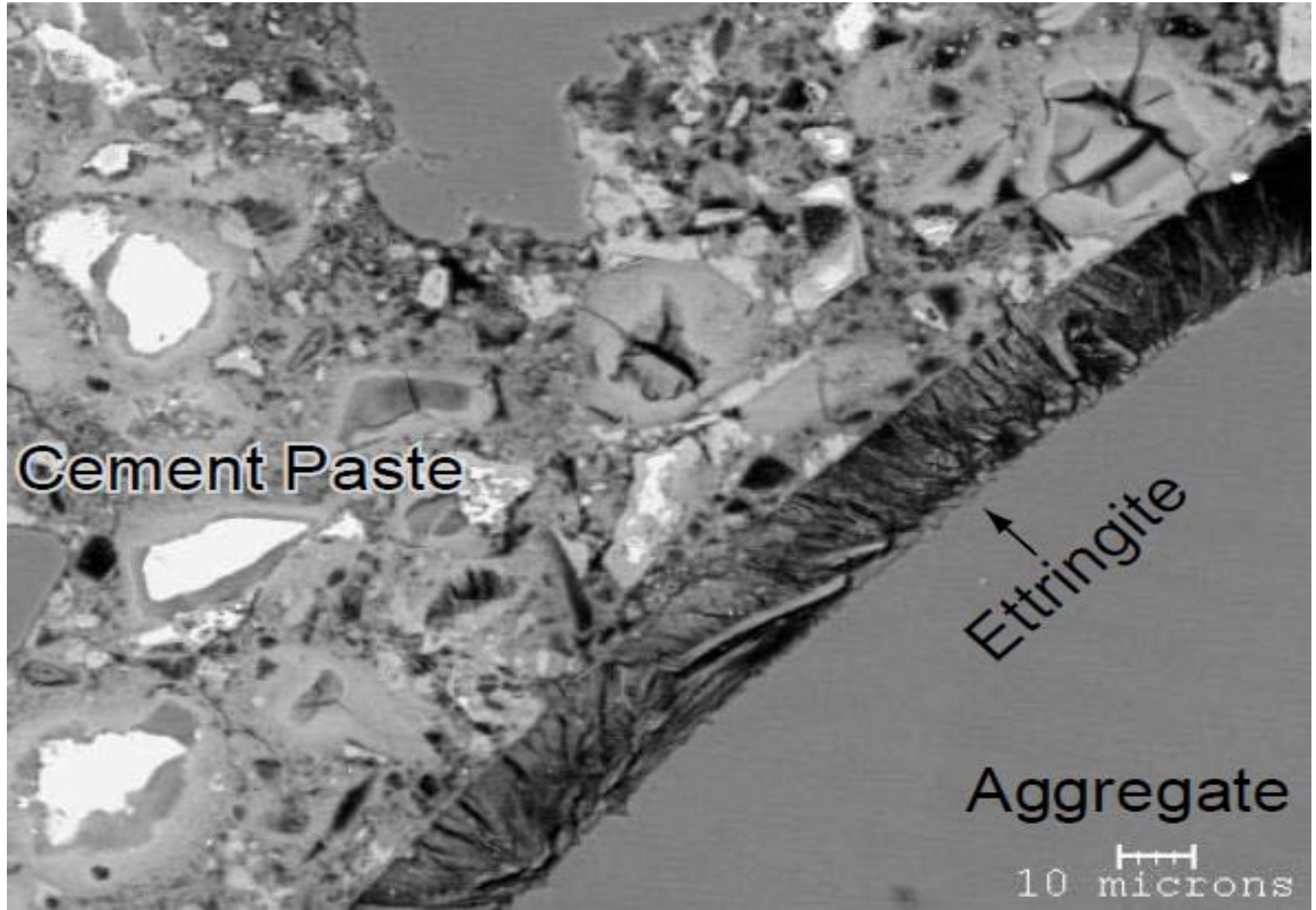
حمله سولفاتی خارجی

- یونهای سولفاتی در حضور آب و هیدروکسید کلسیم با فاز آلومین دار خمیر سیمان وارد واکنشهای شیمیایی می شوند:



- تشکیل اترینگایت موجب افزایش حجم می شود که در صورتی که از مقاومت فشاری خمیر سیمان تجاوز کند، موجب ترک خوردگی می گردد.
- اعمال فشار ناشی از بلورهای در حال رشد اترینگایت و متورم شدن ناشی از جذب آب در محیط قلیایی توسط اترینگایت کم متبلور شده مکانیزمهای محتمل هستند.

حمله سولفاتی خارجی



حمله سولفاتی خارجی

- بسته به نوع کاتیون موجود در محلول سولفات (Na^+ یا Mg^{2+})، هم هیدروکسید کلسیم و هم C-S-H خمیر سیمان پرتلند ممکن است بر اثر حمله سولفاتی به گچ تبدیل شود.

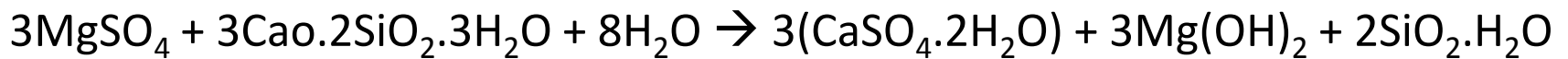


- تشکیل سنگ گچ ابتدا منجر به کاهش سختی و مقاومت، سپس به انبساط و ترک خوردگی و تبدیل نهایی مصالح به خمیر نرم و جسم غیرچسبنده می‌باشد.

حمله سولفاتی خارجی

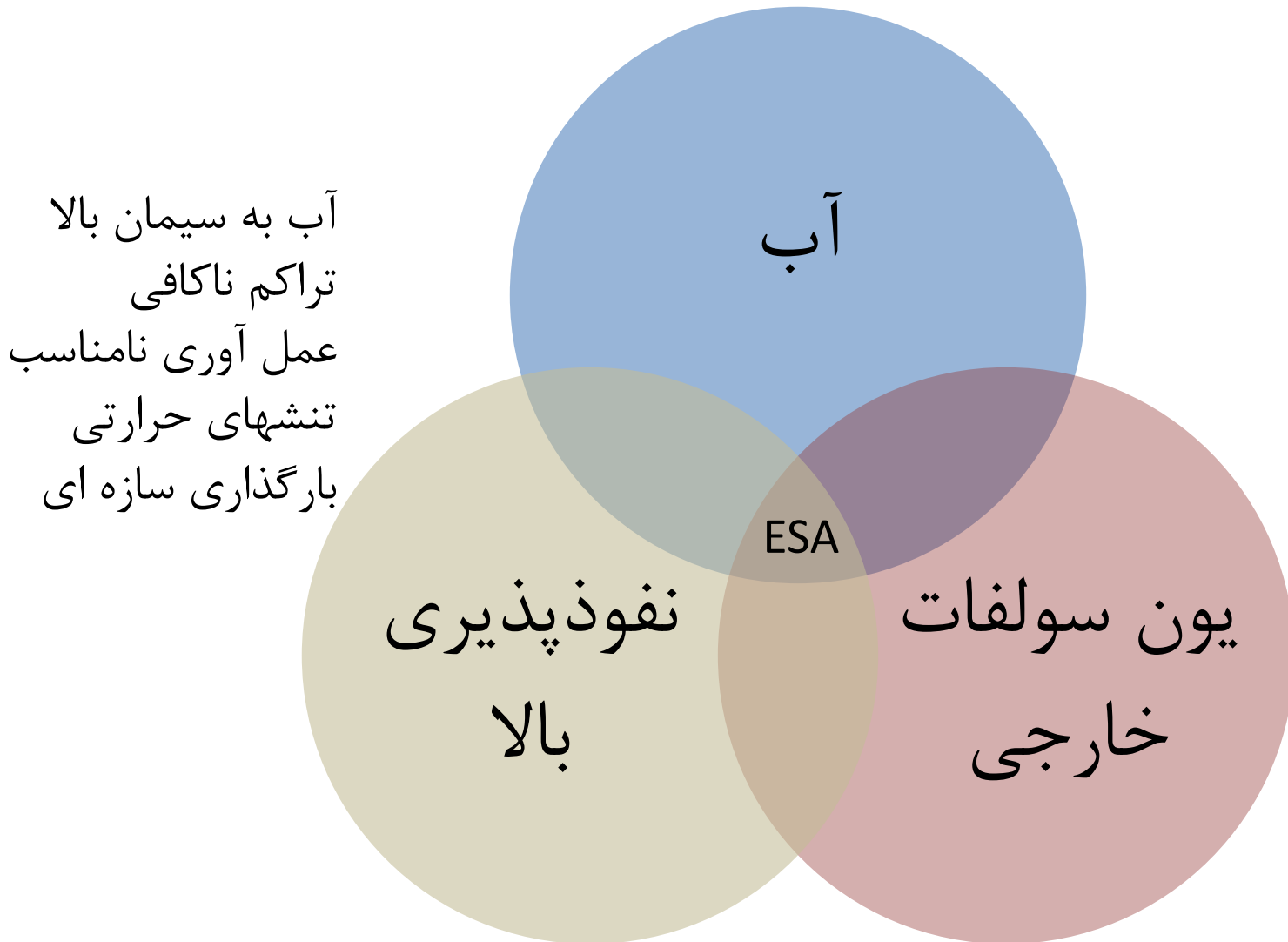
- در حمله سولفات سدیم، تشکیل هیدروکسید سدیم تداوم درجه قلیائیت زیاد را در سیستم تضمین می کند.

- در مورد سولفات سدیم منیزیم، واکنش با تشکیل هیدروکسید منیزیم نسبتاً نامحلول و با قلیائیت کم همراه است. در نتیجه پایداری C-S-H در سیستم کاهش یافته و تحت تهاجم سولفات نیز قرار می گیرد.



- بنابراین، حمله سولفات منیزیم به بتن خیلی شدیدتر می باشد.

عوامل لازم برای حمله سولفاتی خارجی



عوامل موثر در حمله سولفاتی خارجی

- نوع و غلظت یونهای سولفاتی مهاجم
- سطح آب زیرزمینی و تغییرات فصلی آن
- جریان آب زیرزمینی و نفوذپذیری خاک
- کیفیت بتن

کنترل حمله سولفاتی خارجی

• بتن با نفوذپذیری پایین بهترین و موثرترین عامل در کنترل حمله

سولفاتی خارجی است:

– نسبت آب به سیمان پایین

– مقدار سیمان مصرفی بالا

– تراکم مناسب بتن در هنگام بتن ریزی

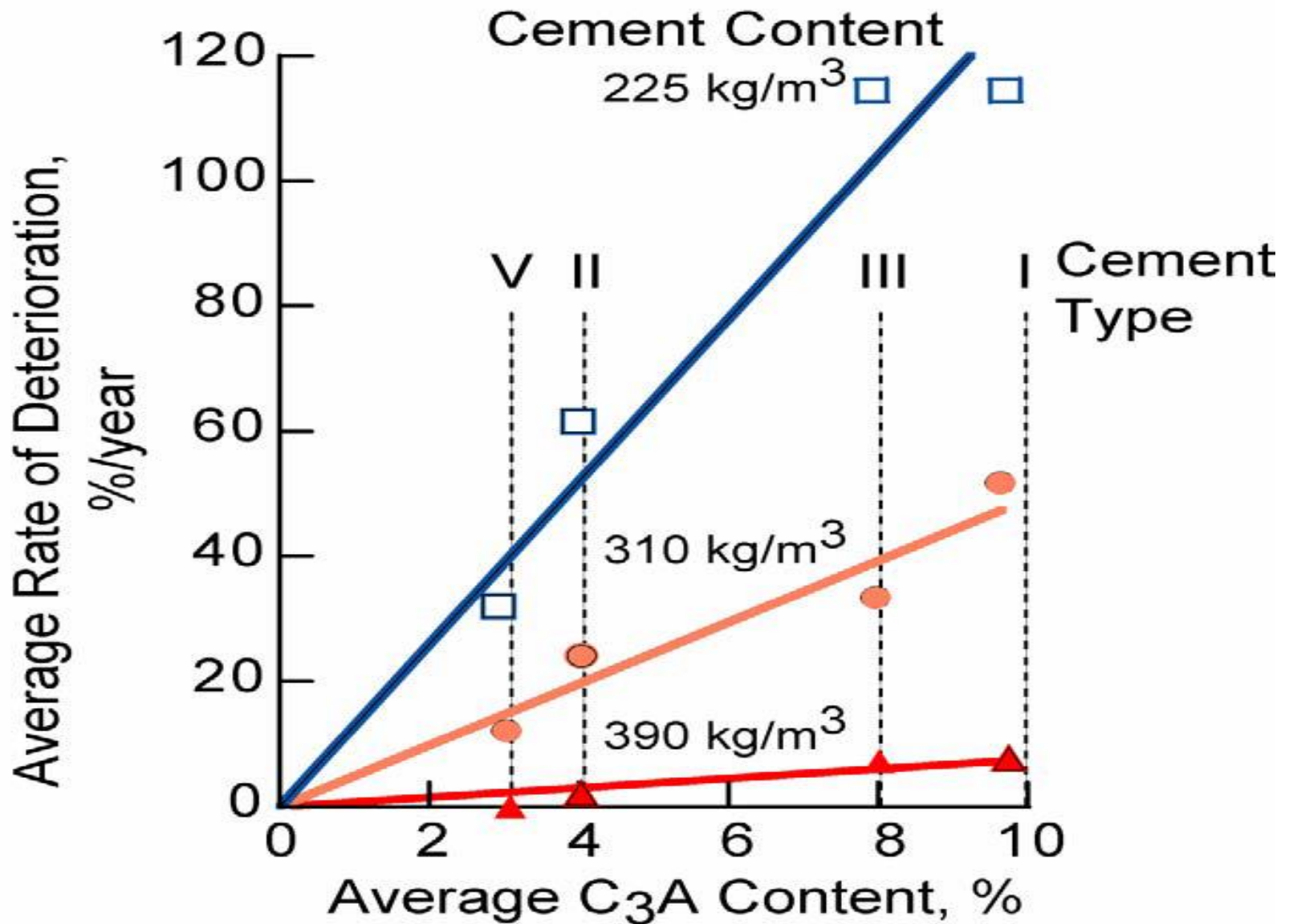
– عمل آوری مناسب و کافی پس از بتن ریزی

– ضخامت کافی مقطع بتنی

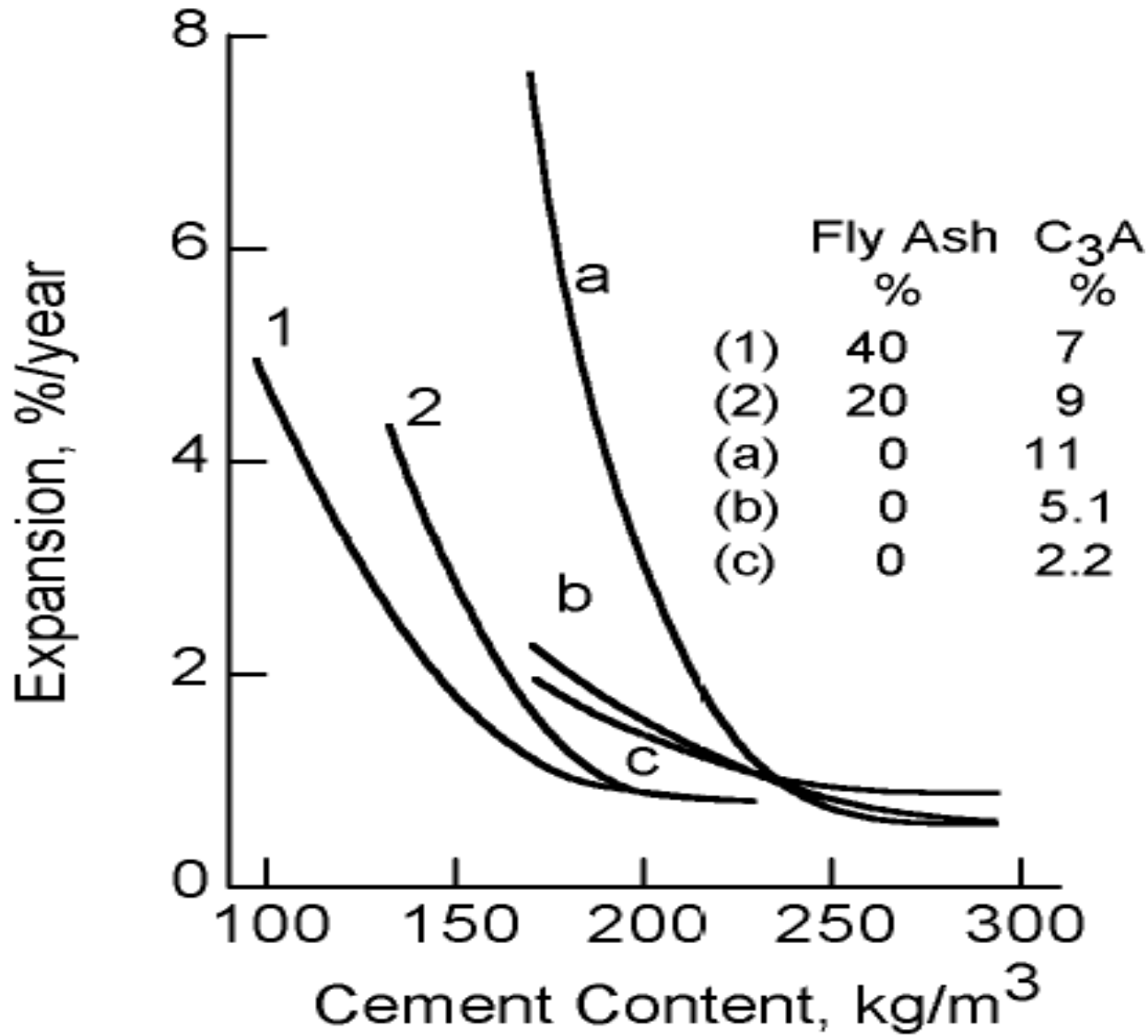
کنترل حمله سولفاتی خارجی

- استفاده از سیمانهای با مقاومت سولفاتی متوسط (سیمان تیپ ۲) یا سیمانهای با مقاومت سولفاتی بالا (سیمان تیپ ۵) (درصد C_3A موجود در سیمان کاهش یابد).
- استفاده از سیمانهای مرکب یا مواد مکمل سیمانی نظیر پوزولانها، سرباره، خاکستر بادی...
 - کاهش نفوذپذیری
 - کاهش C_3A آزاد و همچنین CH تولیدی

کنترل حملہ سولفاتی خارجی (نوع سیمان)



کنترل حملہ سولفاتی خارجی (افزودنی ہا)



کنترل حملہ سولفاتی خارجی (افزودنی ها)

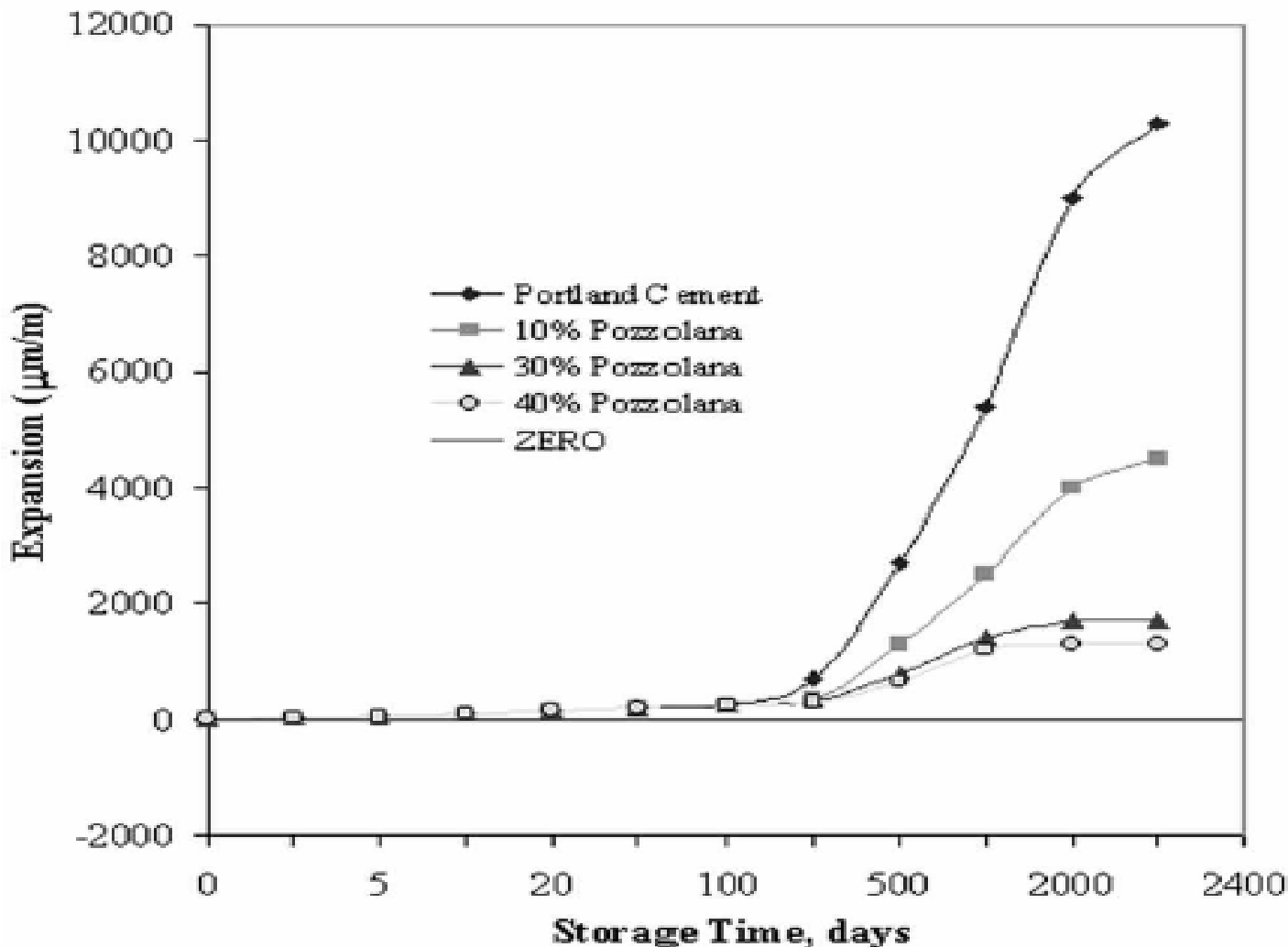


Fig. 2.12—Effect of substituting Italian natural pozzolan for portland cement on expansion of 1:3 mortar. Samples 2 x 4 x 25 cm stored in 1% MgSO₄ solution (Massazza and Costa 1979).

کنترل حملہ سولفاتی خارجی (افزودنی ها)

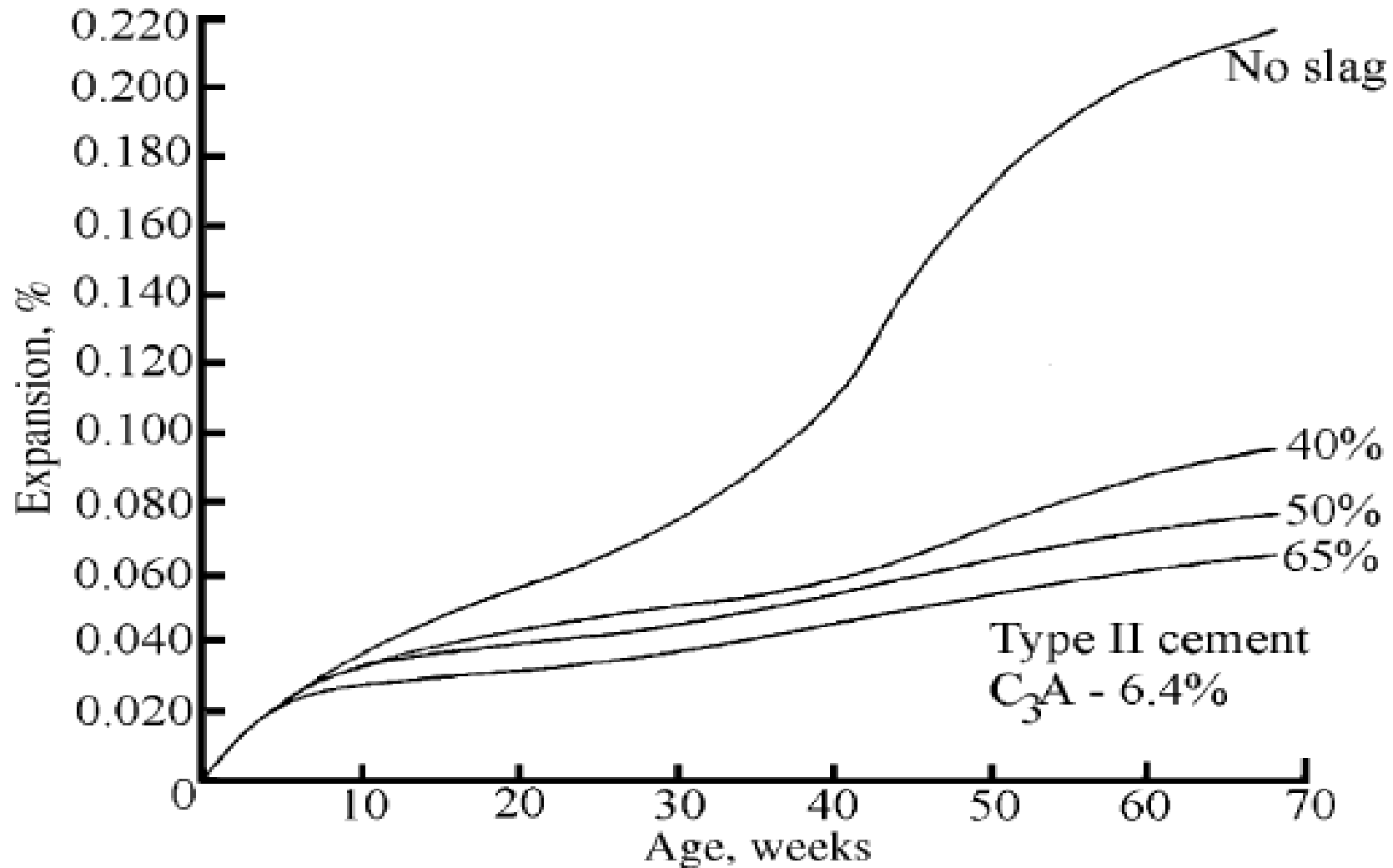


Fig. 5.10—Sulfate resistance of mortar bars, Wolochow test, Type II (Hogan and Meusel 1981).

تقسیم بندی خطر حمله سولفاتی خارجی

- **حمله قابل چشم پوشی:** وقتی غلظت یون سولفات موجود در خاک یا آب به ترتیب کمتر از ۱/۰٪ یا ۱۵۰ mg/l باشد ← محدودیتی برای نوع سیمان یا نسبت آب به سیمان وجود ندارد
- **حمله متوسط:** وقتی غلظت یون سولفات موجود در خاک بین ۱/۰٪ تا ۲/۰٪ و در آب بین ۱۵۰۰-۱۵۰ mg/l باشد ← سیمان تیپ ۲ یا مرکب پوزولانی با نسبت آب به سیمان کمتر از ۵/۰

تقسیم بندی خطر حمله سولفاتی خارجی

- **حمله شدید:** وقتی غلظت یون سولفات موجود در خاک بین ۰/۲٪ تا ۲٪ و در آب بین ۱۰۰۰۰-۱۵۰۰۰ mg/l باشد ← **سیمان تیپ ۵** با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵
- **حمله خیلی شدید:** وقتی غلظت یون سولفات موجود در خاک بیش از ۲٪ و در آب بیش از ۱۰۰۰۰ mg/l باشد ← **سیمان تیپ ۵** به همراه **پوزولان** با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵

تعیین مقاومت سولفاتی

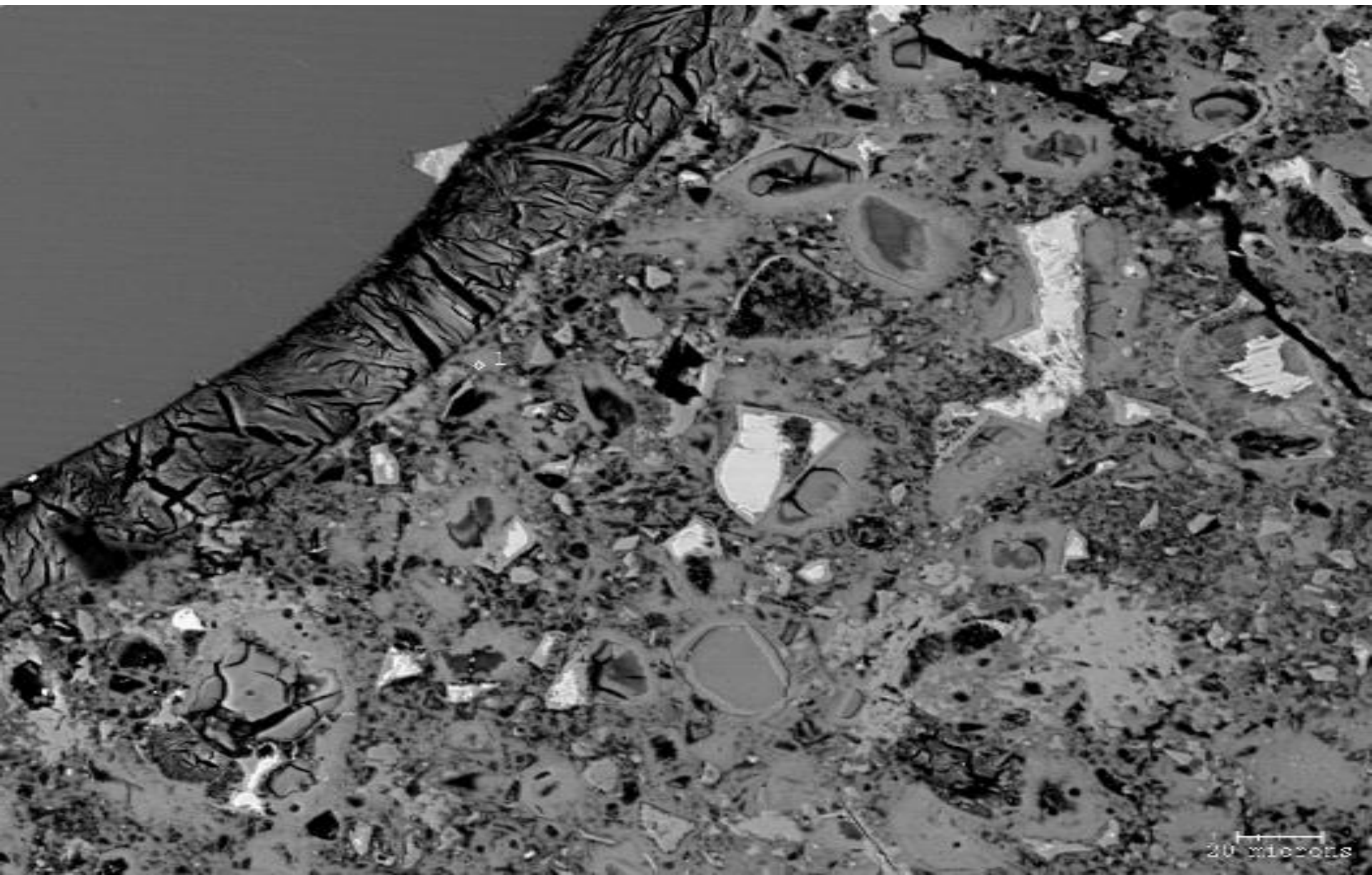
- آزمایش تعیین مقاومت سولفاتی طبق استاندارد ASTM C 1260 انجام می شود.
- در این آزمایش ۶ نمونه منشوری ملات سیمان ساخته می شود.
- نمونه ها پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در داخل محلول ۰.۵٪ سولفات سدیم قرار داده می شوند.
- میزان تغییر طول نمونه ها در فواصل زمانی معین اندازه گیری می شود.

تعیین مقاومت سولفاتی



- آزمایش در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد انجام می شود.
- سیمان تیپ ۲: افزایش طول کمتر از ۰/۱٪ بعد از ۶ ماه
- سیمان تیپ ۵: افزایش طول کمتر از ۰/۱٪ بعد از ۱۲ ماه

حمله سولفاتی داخلی



20 microns

حمله سولفاتی داخلی

- در دهه ۱۹۸۰، محققین آلمانی از وقوع حمله سولفاتی در بتنهایی که در دماهای بالا عمل آوری شده بودند گزارش دادند.
- نشانه رایج این نوع خرابی وجود حفراتی در اطراف سنگدانه هاست که با بلورهای اترینگایت پر شده اند و موجب انبساط در خمیر سیمان می شود.
- این خرابی مشابه حمله سولفاتی خارجی است اما یونهای سولفات نه از محیط بلکه از داخل موجب خرابی می شوند.

حمله سولفاتی داخلی

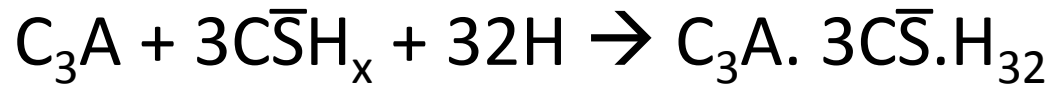
- نام دیگر رایج این نوع خرابی «تشکیل تاخیری اترینگایت» است

Delayed Ettringite Formation

- تشکیل تاخیری اترینگایت به مفهوم تشکیل این ماده در بتن در زمانهای بعد از عمل آوری اولیه است.
- این پدیده در بتنهایی اتفاق می افتد که در دماهای بالا (خصوصا بالای ۷۰ درجه) عمل آوری اولیه شده باشند.
- تشکیل تاخیری اترینگایت لزوما موجب خرابی نمی شود.

مکانیزم حمله سولفاتی داخلی

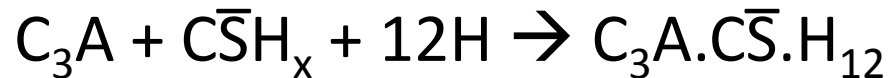
- اترینگایت یکی از محصولات طبیعی واکنشهای هیدراسیون سیمان است که در گیرش و کسب مقاومت موثر است:



- به دلیل وجود فضای کافی در زمان گیرش سیمان، این تشکیل اولیه اترینگایت به هیچ وقت مخرب نیست. لذا صرف تشکیل و وجود این ماده نشانه خرابی نیست.

مکانیزم حمله سولفاتی داخلی

- اما اگر مخلوط بتن با حرارت بالای ۷۰ درجه عمل آوری شده باشد، بجای تشکیل اترینگایت، بلورهای مونوسولفات تشکیل می شود.

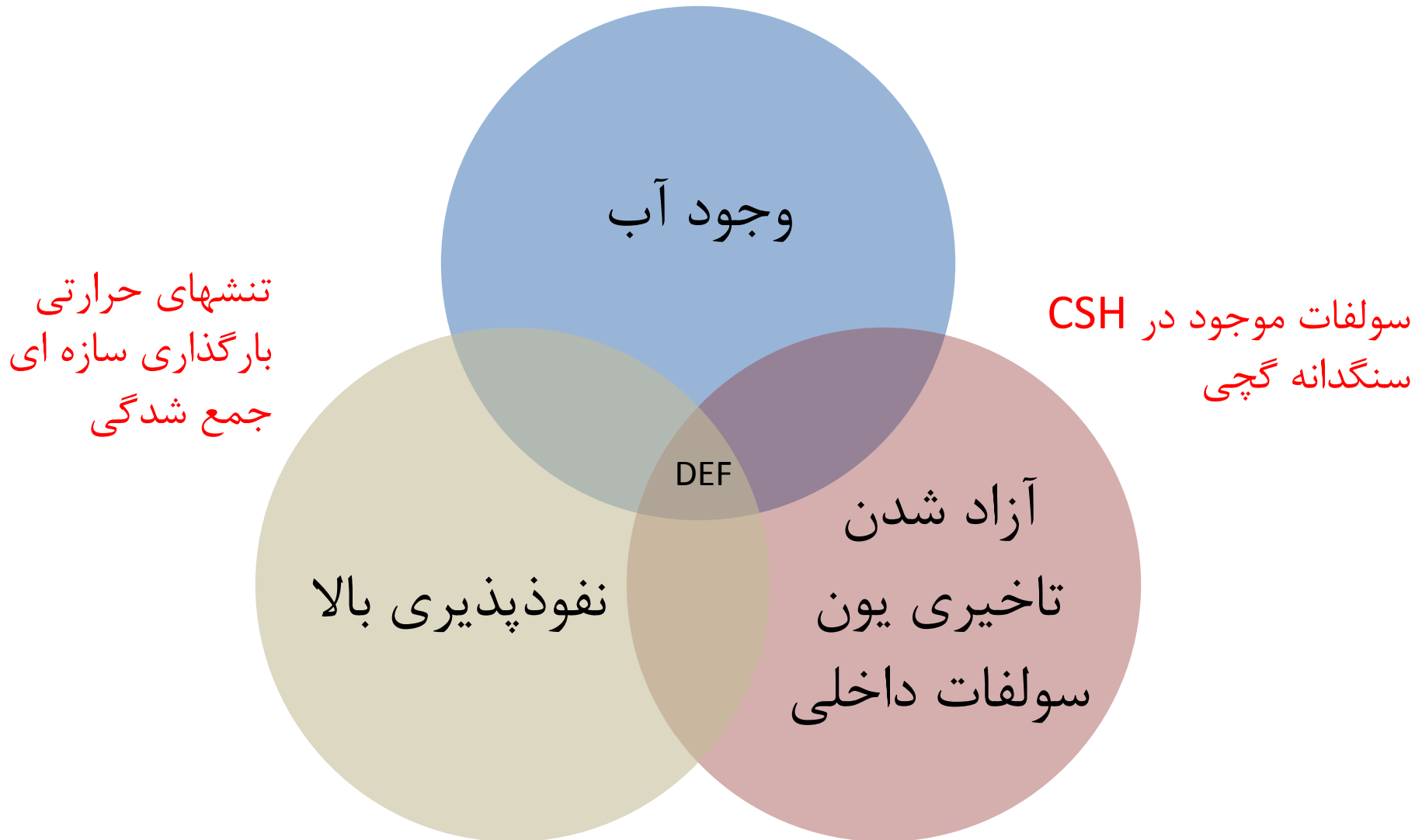


- در عین حال در اثر حرارت بالا، یونهای سولفات در بین لایه های CSH (محصولات اصلی واکنشهای هیدراسیون) قرار می گیرند.

مکانیزم حمله سولفاتی داخلی

- هنگامی که بتن به دمای معمولی بازگشت، یونهای سولفات داخل CSH و یا سنگدانه با مونوسولفات واکنش داده و آنرا تبدیل به اترینگایت می کنند.
- اترینگایت تشکیل شده (تاخیری) در مجاورت رطوبت متورم می شود که این انبساط به دلیل نبود فضای کافی منجر به ایجاد ترک می شود.
- این ترک ها عمدتاً در خمیر سیمان و در ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان اتفاق می افتد.

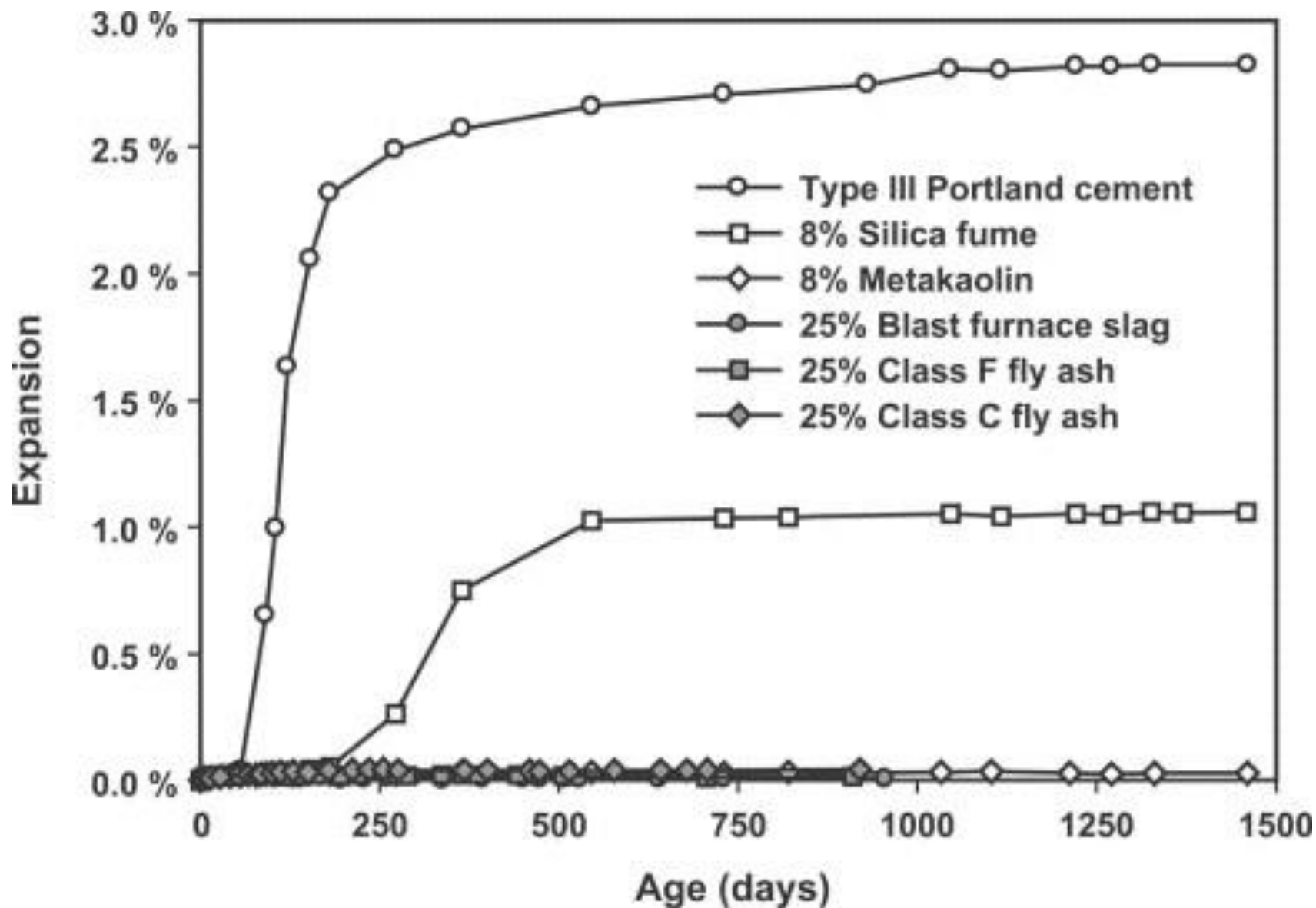
عوامل لازم برای حمله سولفاتی داخلی



کنترل حمله سولفاتی داخلی

- عدم حرارت دهی بتن در دوره عمل آوری با دماهای بالاتر از ۷۰ درجه سانتیگراد
- استفاده از افزودنیهای معدنی، خصوصا مواد با سیلیکات بالا نظیر پوزولانها، سرباره و خاکستر بادی (کنترل تشکیل اترینگایت و کاهش نفوذپذیری)
- کنترل مقدار یون سولفات موجود در مواد اولیه بتن (سیمان، آب، سنگدانه)

کنترل حمله سولفاتی داخلی



واکنش قلیایی - سیلیسی

Alkali-Silica Reaction



واکنش قلیایی - سیلیسی

- انبساط و ترک خوردگی بتن می‌تواند به علت واکنشهای شیمیایی بین یونهای قلیایی سیمان پرتلند (یا منایع دیگر)، یونهای هیدروکسیل، و بعضی از مواد متشکله سیلیسی که عمدتاً در برخی سنگدانه‌ها موجود است، باشد.
- این پدیده بنام واکنش قلیایی - سیلیسی نام دارد، هر چند چون اکثراً منبع سیلیس از سنگدانه می‌باشد، به نام واکنش قلیایی سنگدانه نیز شناخته می‌شود.
- البته واکنش قلیایی ها با سنگدانه ممکن است در اثر وجود کربناتها باشد (واکنش قلیایی - کربناتی)

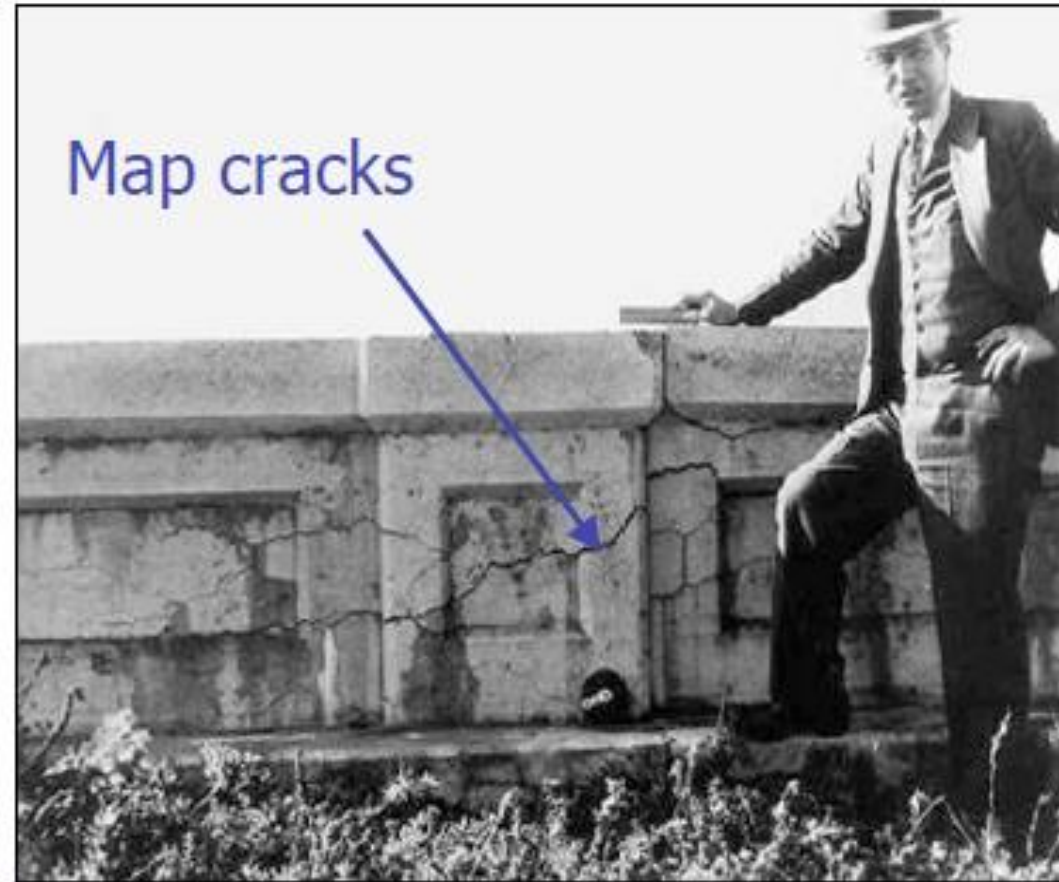
واکنش قلیایی - سیلیسی

- این پدیده اولین بار به وسیله استنتون (Stanton) در سال ۱۹۴۰ از بررسیهای سازه‌های بتنی ترک‌خورده در کالیفرنیا، انتشار یافت.
- از آن موقع تاکنون، موارد متعددی از آسیب‌دیدگی بتن از جاهای دیگر دنیا گزارش شده‌اند که نشان می‌دهند که واکنش قلیایی-سیلیسی، حداقل یکی از علل آسیب‌دیدگی سازه‌های واقع در محیط‌های مرطوب، مانند سدها، پایه‌های پل‌ها، و دیوارهای دریایی، می‌باشد.

واکنش قلیایی - سیلیسی



Vertical cracks



California, 1936

مکانیزم واکنش قلیایی - سیلیسی

- به دلیل قلیایی بودن خمیر سیمان، سیلیس موجود در سنگدانه های واکنش زا هیدرولیز می شود. در حقیقت دی-پلیمریزاسیون یا شکست ساختمان سیلیسی سنگدانه توسط یونهای هیدروکسیل اتفاق می افتد:



- سپس Si-OH با خمیر سیمان وارد واکنش شده و تولید Si-O- می نماید.
- به دنبال آن Si-O- یونهای قلیایی (Na, K, Ca) را به خود جذب می نماید و تشکیل ژل می دهد.

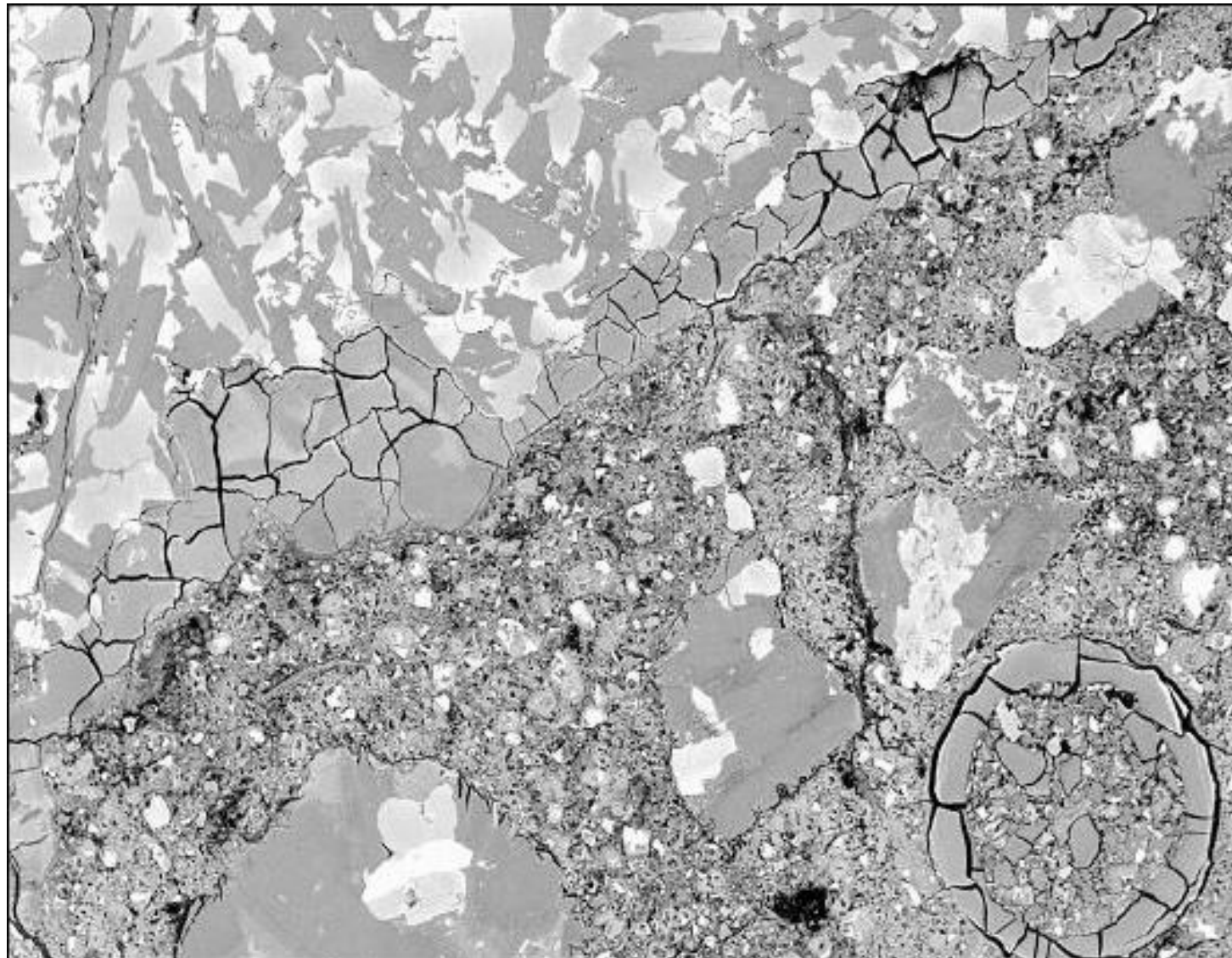
مکانیزم واکنش قلیایی - سیلیسی

- وقتی که ژلهای سیلیکات قلیایی در تماس با آب قرار می‌گیرد، بر اثر جذب مقدار زیادی آب از طریق اسمزی، متورم می‌شوند.
- فشار هیدرولیکی که به این صورت توسعه می‌یابد ممکن است منجر به انبساط و ترک خوردگی سنگدانه، خمیر سیمان و بتن شود.
- در دسترس بودن پیوسته آب در داخل بتن، باعث بزرگ شدن و توسعه یافتن این ریزترکها می‌شود تا آنکه نهایتاً به سطح بیرونی بتن برسند. شکل ترک، نامنظم و بی‌قاعده است و در نتیجه به آن ترک نقشه‌ای (map cracking) گفته می‌شود.

واکنش قلیایی - سیلیسی



واکنش قلیایی - سیلیسی



Mag= 250 X 100µm
4-Sep-1998 Detector= QBSD EHT=20.00 kV

ترک نقشه ای (Map Cracks)



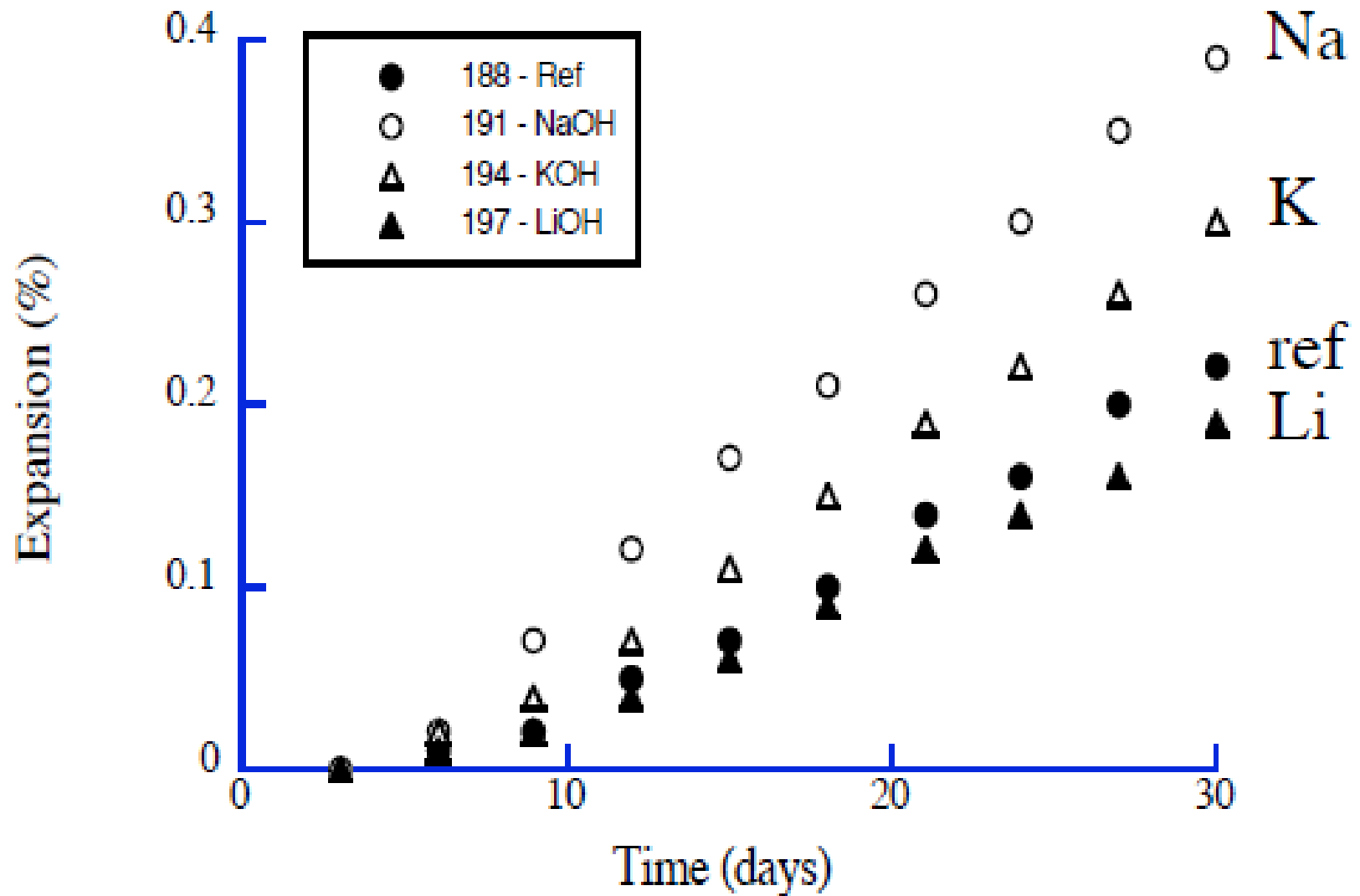
واکنش قلیایی - سیلیسی

- وجود هم یون هیدروکسیل و هم فلز قلیایی برای پدیده انبساط لازم است.
- غلظت یون هیدروکسیل در مایع منفذی، حتی در سیمانهای با قلیائیت کم، در حد بالا است.
- بنابراین، پدیده انبساطزایی با توجه به مقدار یونهای فلز قلیایی محدود خواهد شد، مگر اینکه این یونها به وسیله منبع دیگری مانند مواد افزودنی محتوی قلیا، سنگدانه‌های آلوده به نمک و نفوذ آب دریا یا محلولهای یخزدای دارای کلرید سدیم به داخل بتن، فراهم گردند.

واکنش قلیایی - سیلیسی

- مصالح خام استفاده شده در ساخت سیمان پرتلند، علت وجود قلیاییها (Na, K, Ca) در سیمان می باشند که در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ درصد معادل Na_2O می باشند.
- سیمانهای پرتلند دارای بیش از ۰/۶ درصد معادل Na_2O ، وقتی که به صورت مخلوط با سنگدانه های واکنش زا استفاده شوند، موجب انبساطهای زیاد ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه ها می شوند.
- استاندارد ASTM C ۱۵۰، سیمانهایی با کمتر از ۰/۶ درصد معادل Na_2O را به عنوان با قلیائیت کم و سیمانهای با بیشتر از ۰/۶ درصد معادل Na_2O را به عنوان با قلیائیت زیاد معرفی می کند.

واکنش قلیایی - سیلیسی



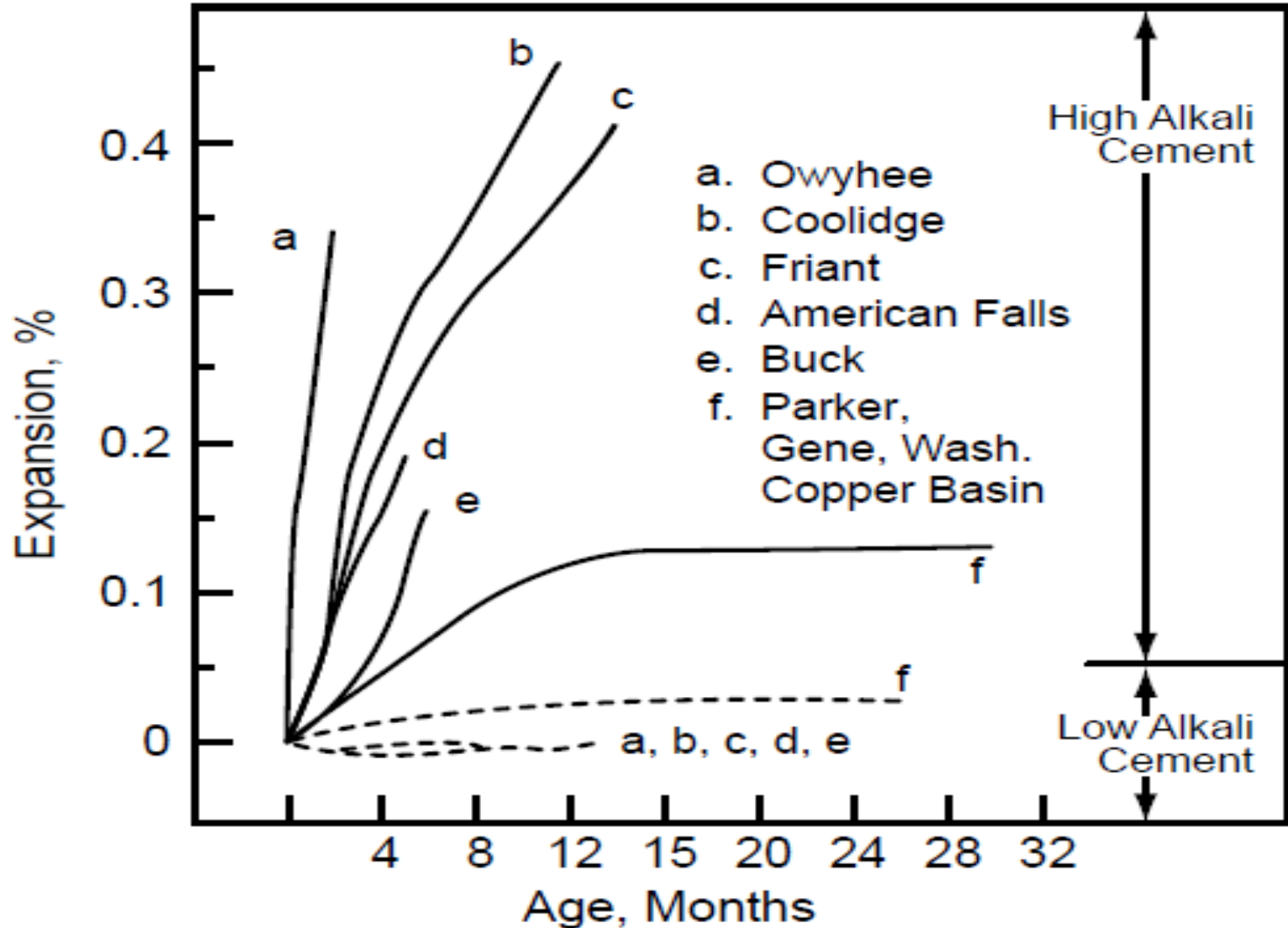
واکنش قلیایی - سیلیسی

- در عمل، مقادیر ۰/۶ درصد یا کمتر برای قلیایی سیمان، معمولاً برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، صرف‌نظر از نوع سنگدانه‌های واکنش‌زا، کافی شناخته شده‌اند.
- در بتن‌های دارای مقدار سیمان خیلی زیاد، حتی مقادیر کمتر از ۰/۶ درصد قلیایی در سیمان نیز ممکن است مضر باشد.
- بررسی‌های انجام شده نشان داده‌اند که اگر مقدار کل قلیایی بتن حاصل از همه منابع کمتر از ۳ کیلوگرم در متر مکعب باشد، احتمالاً آسیب‌دیدگی اتفاق نخواهد افتاد.

واکنش قلیایی - سیلیسی

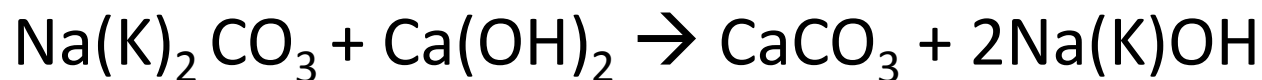
- اگر چه تعداد زیادی از مواد معدنی فقط تا درجه خیلی کمی واکنش انجام می‌دهند. میزان این واکنش، به زمان، دما، و اندازه ذره بستگی دارد.
- فلدسپارها، پیروکسینها، آمفیبولها، میکاها و کوارتز، که مواد معدنی متشکله گرانیتها، گنایسها، شیستها، ماسه سنگها، و بازالتها هستند، جزء مواد معدنی بی‌ضرر طبقه‌بندی شده‌اند.
- اپال، شیشه سنگ، کریستوبالیت، تری‌دیمیت، کلسدون، چرت، سنگهای آتشفشانی نهان بلورین (آندزیتها و ریولیتها)، و کوارتز فشرده یا کوارتز دگرگونی به عنوان مواد مستعد واکنش قلیایی شناخته شده‌اند.

واکنش قلیایی - سیلیسی



واکنش قلیایی - کربناتی

- نوع دیگری از واکنشهای مضر قلیایی سنگدانه، بین سنگدانه‌های دولومیتی و قلیایی‌های سیمان به وقوع می‌پیوندد که بنام قلیایی کربناتی معروف است.



- تفاوت‌های مهمی بین واکنشهای قلیایی - سیلیسی و قلیایی - کربناتی وجود دارد

– الف) موجود نبودن مقادیر قابل توجهی از ژل قلیایی - کربنات

– ب) وجود خاک رس در تقریباً اکثر واکنشهای انبساط‌زا

– ج) عدم اطمینان در پاره‌ای موارد نسبت به عملکرد پوزولانها در کنترل این واکنش

نمونه های واکنش قلیایی - سیلیسی

پلی در شرق کالیفرنیا



نمونه های واکنش قلیایی - سیلیسی

باند فرودگاهی در شمال کالیفرنیا



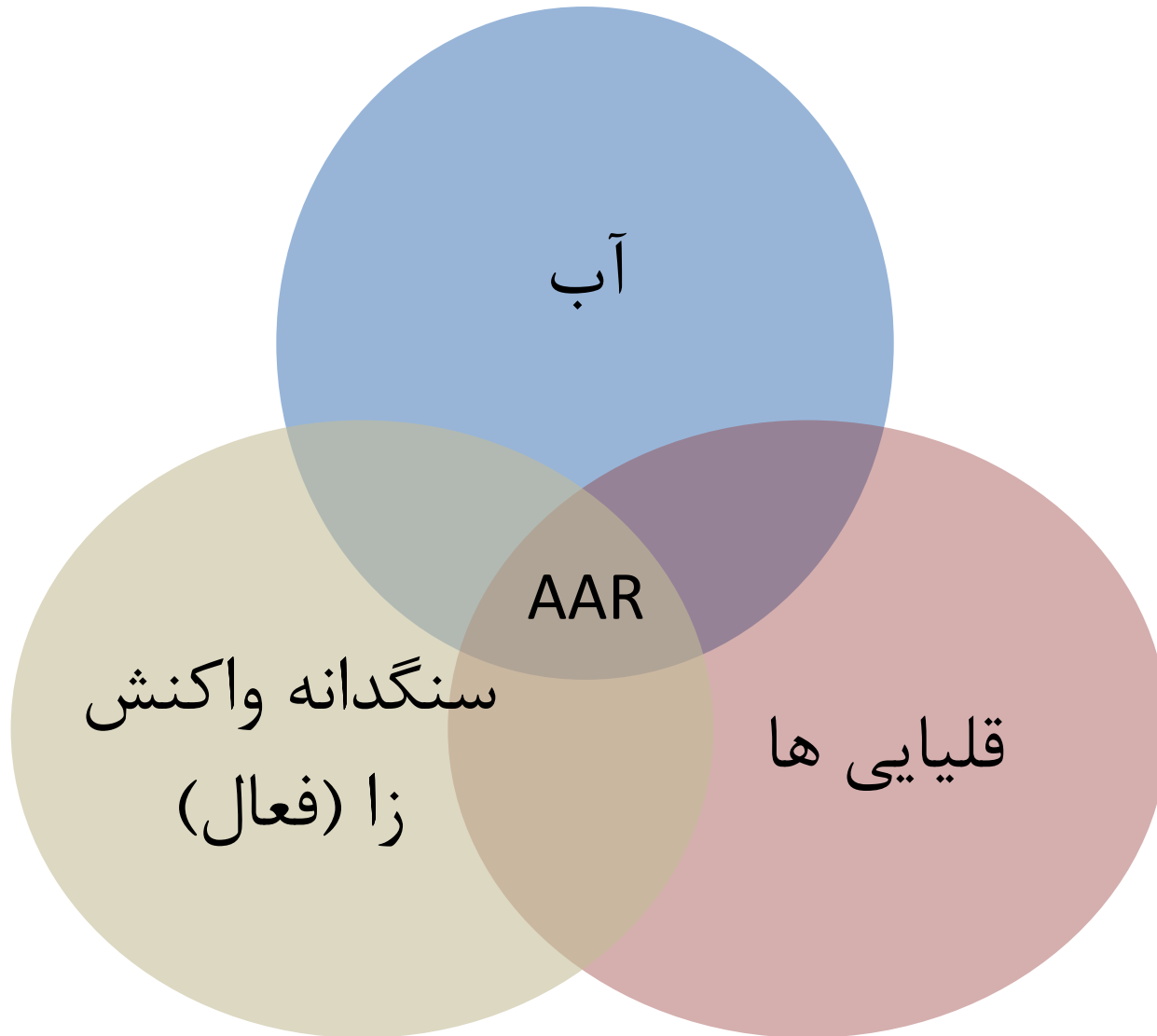
نمونه های واکنش قلیایی - سیلیسی

سد Van -de-la-Mar در انگلستان



This view shows the Alkali Silica Reaction (ASR) damage at Blocks 6 and 7 - Courtesy of Jersey Water

عوامل لازم برای واکنش قلیایی سنگدانه ها



کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی

• مهمترین عامل‌های موثر در واکنش قلیایی - سیلیسی عبارتند از:

– (۱) مقدار قلیایی سیمان و مقدار سیمان در بتن

– (۲) شرکت یون قلیایی از منابعی به غیر از سیمان پرتلند، مانند مواد

افزودنی، سنگدانه‌های آلوده به نمک، و نفوذ آب دریا یا محلول نمک یخ

زدا به داخل بتن

– (۳) مقدار، اندازه و واکنش‌زایی اجزای تشکیل دهنده واکنش‌زای سنگدانه

– (۴) دسترسی رطوبت به سازه بتنی

– (۵) دمای محیط

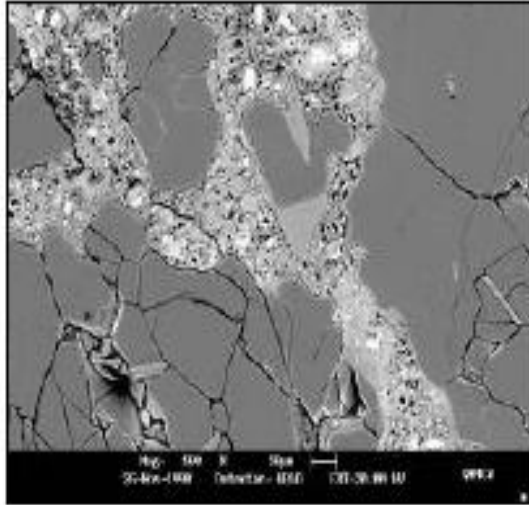
کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی

- هنگامی که سیمان تنها منبع یونهای قلیایی بتن باشد و ضمناً به وجود اجزای تشکیل دهنده قلیایی واکنش‌زا در سنگدانه مشکوک باشیم، استفاده از سیمان پرتلند با قلیایی کم (کمتر از ۰/۶ درصد معادل Na_2O)، بهترین روش محافظت در برابر حمله قلیایی می‌باشد.
- اگر قرار است که از ماسه ساحلی یا ماسه و شن لایروبی شده از دریا استفاده شود، سنگدانه‌ها بایستی با آب شیرین شسته شوند تا این اطمینان حاصل شود که مقدار کل قلیاییها ناشی از سیمان و سنگدانه‌ها، از ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بتن تجاوز نمی‌کند.

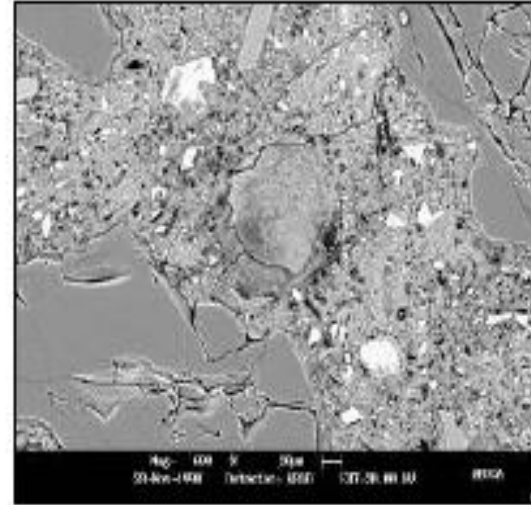
کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی

- در صورتی که سیمان پرتلند با قلیایی کم، در دسترس نباشد، برای کاهش مقدار کل قلیاییهای بتن می‌توان مقداری از سیمان با قلیایی زیاد را با مواد افزودنی سیمانی یا پوزولانی، نظیر روباره آهنگدازی دانه‌ای شده، شیشه آتش‌فشانی، رس کلسینه، خاکستر بادی یا دوده سیلیس متراکم جایگزین کرد.
- قلیاهای موجود در سرباره‌ها و پوزولانها در اسید حل نمی‌شوند و لذا برای انجام واکنش با سنگدانه‌ها در دسترس نیستند.
- استفاده از مواد افزودنی پوزولانی، علاوه بر کاهش مقدار مؤثر قلیاییها، موجب تشکیل محصولات قلیایی-سیلیکاتی با انبساط کم و نسبت سیلیس به قلیایی بالا می‌شود.

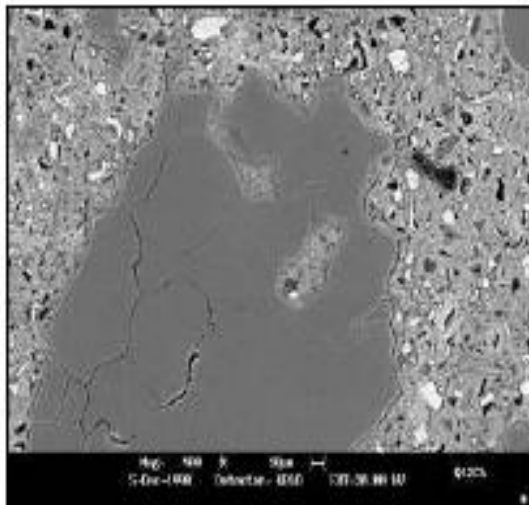
کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی



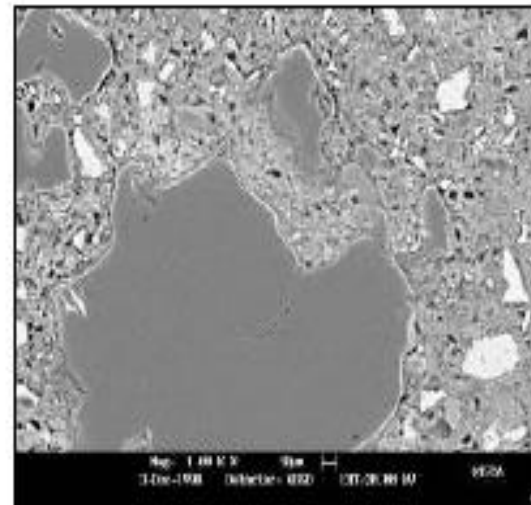
4% RHA



8% RHA



12% RHA



15% RHA

کنترل واکنش قلیایی - سیلیسی

- در سنگدانه‌های با استعداد واکنش‌زایی ملایم، یک راه برای کاهش انبساط بتن، در صورت اقتصادی بودن، شیرین کردن سنگدانه‌های واکنش‌زا با ۲۵ تا ۳۰ درصد سنگ آهک یا هر سنگدانه غیر واکنش‌زای دیگر می‌باشد.

- برای صورت پذیرفتن انبساط، دسترسی به رطوبت، متعاقب یا همزمان با پیشرفت واکنش، ضروری است. بنابراین، کنترل امکان دسترسی آب به بتن، از طریق تعمیر فوری درزهایی که آب را از خود عبور می‌دهند، به منظور جلوگیری از انبساط‌های بیش از حد بتن بسیار مطلوب می‌باشد.

آزمایش واکنش قلیایی

- قلیایی - سیلیسی:

- روشهای سنگ شناسی و پتروگرافی

- روشهای شیمیایی (حل شدن سیلیس سنگدانه در سود)

- روشهای منشور ملاتی

- روشهای منشور بتنی

- قلیایی - کربناتی :

- تعیین واکنش پذیری بر حسب درصدهای CaO ، MgO ، و Al_2O_3

موجود در سنگدانه و استفاده از نمودار CSA A 23.2-26A

آزمایش واکنش قلیایی - سیلیسی

- آزمایشات بررسی واکنش قلیایی سنگدانه ها مطابق ASTM C 1567 (تسریع شده) یا ASTM C 1293 (دراز مدت) انجام می شود.
- این آزمایشات به منظور ارزیابی واکنش پذیری و فعالیت سنگدانه ها کاربرد دارند.
- همچنین می توان با به کار بردن سنگدانه های فعال، حساسیت یک سیمان و یا میزان مناسب استفاده از مواد افزودنی جهت کنترل واکنش قلیایی را سنجید.

آزمایش واکنش قلیایی - سیلیسی

- در آزمایش تسریع شده، نمونه های منشوری ملات در داخل محلول ۱ مولار هیدروکسید سدیم در دمای ۸۰ درجه قرار گرفته و میزان انبساط آنها تا ۳۵ روز اندازه گیری می شود.
- در آزمایش درازمدت، نمونه های منشوری بتن در رطوبت ۵۰٪ و دمای ۳۸ درجه قرار داده شده و انبساط آنها تا ۱ سال اندازه گیری می شود.
- مقادیر مرزی انبساط ها معادل ۰/۱٪ در ۱۴ روز برای حالت تسریع شده و ۰/۰۴٪ در ۱ سال برای حالت درازمدت است.

آزمایش واکنش قلیایی - سیلیسی

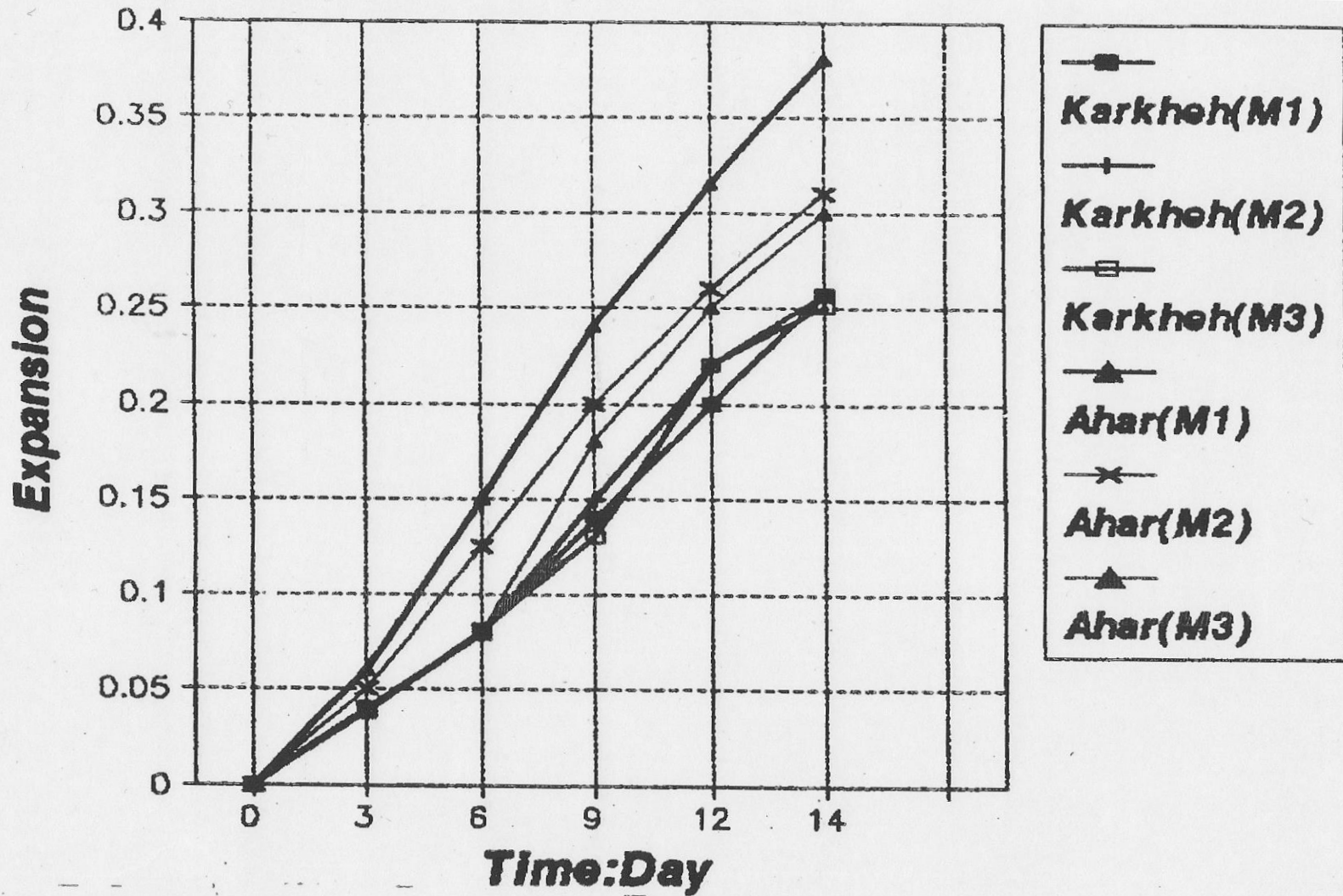
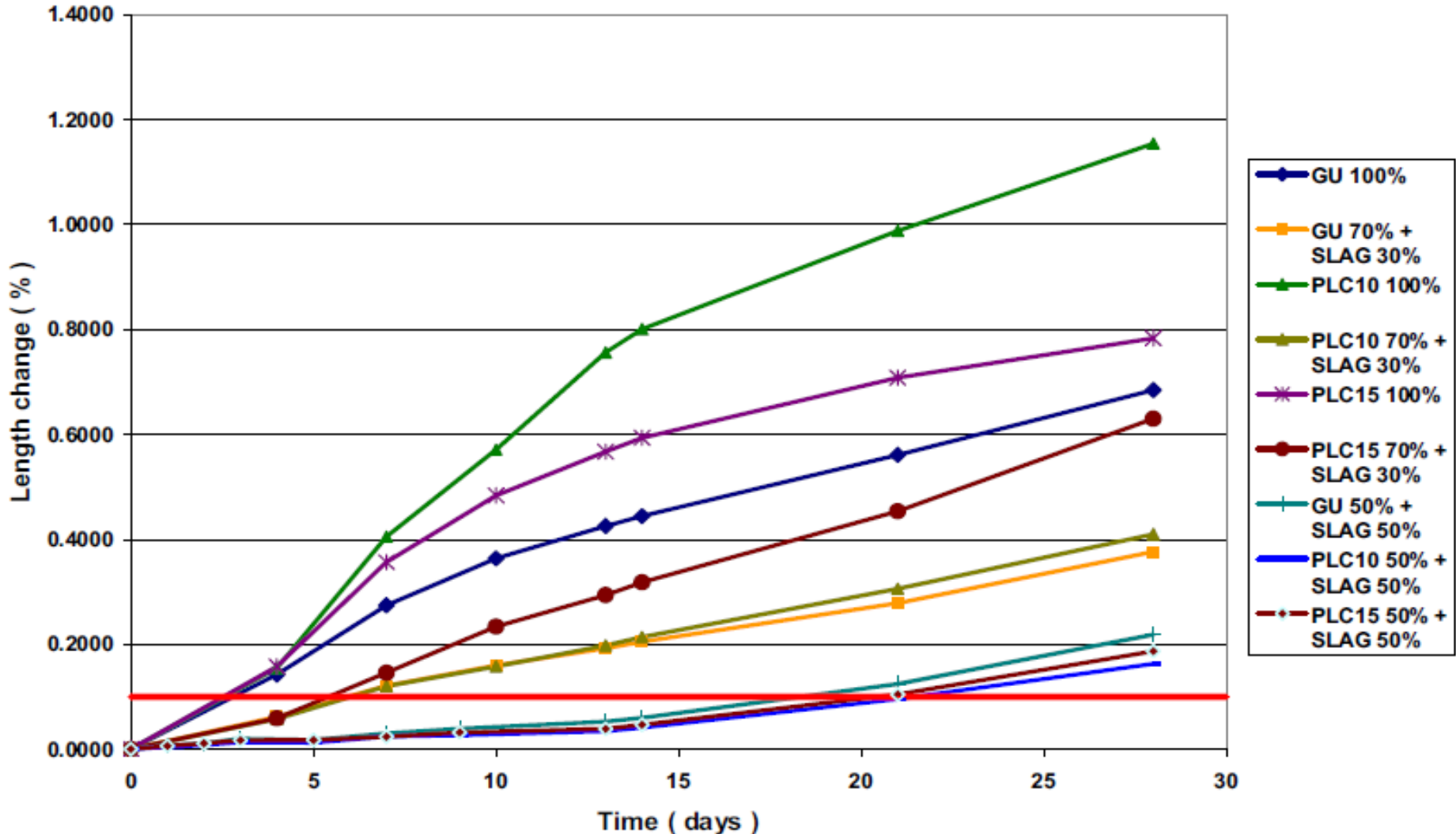


Fig5 :Results of the CSA accelerated Mortar bar testing of 3. Karkheh ; 4. Ahar aggregates According to CSA A23.2-25A.

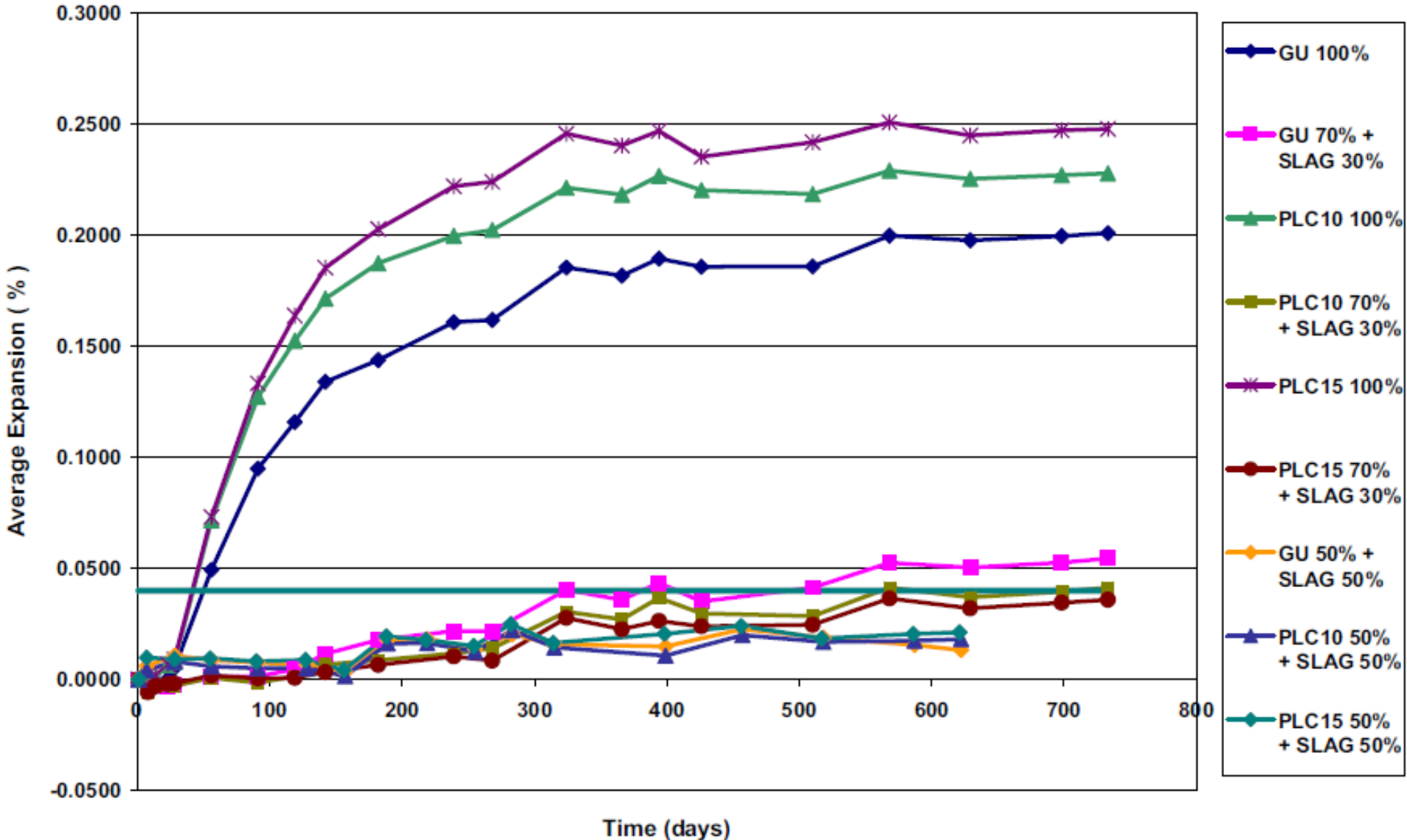
آزمایش واکنش قلیایی - سیلیسی

Length change vs Time



آزمایش واکنش قلیایی - سیلیسی

Length Change vs. Time



آزمایش واکنش قلیایی - کربناتی

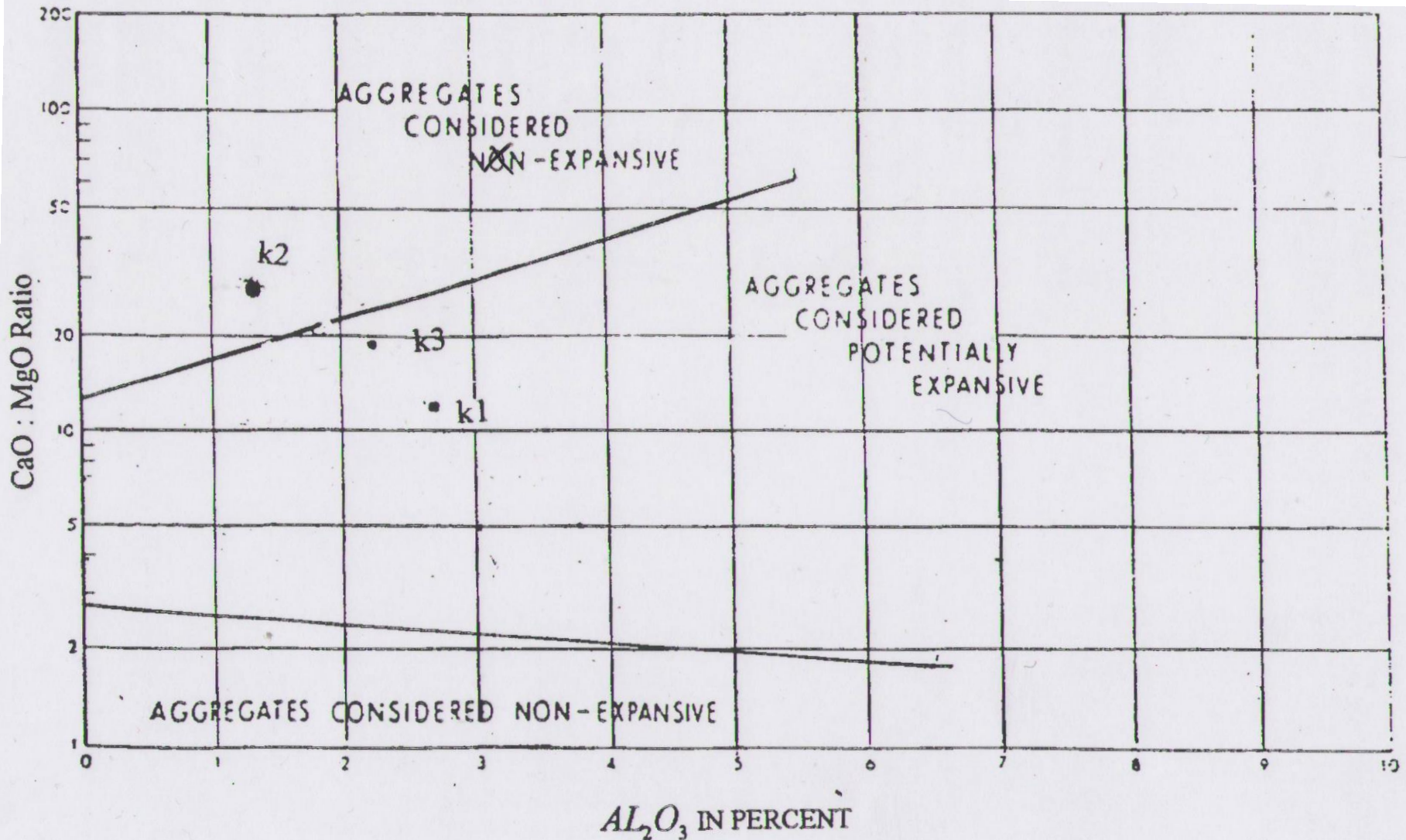


Fig3 : Results of the CSA A 23.2-26A chemical test

خوردگی آرماتور

Corrosion of Reinforced Concrete



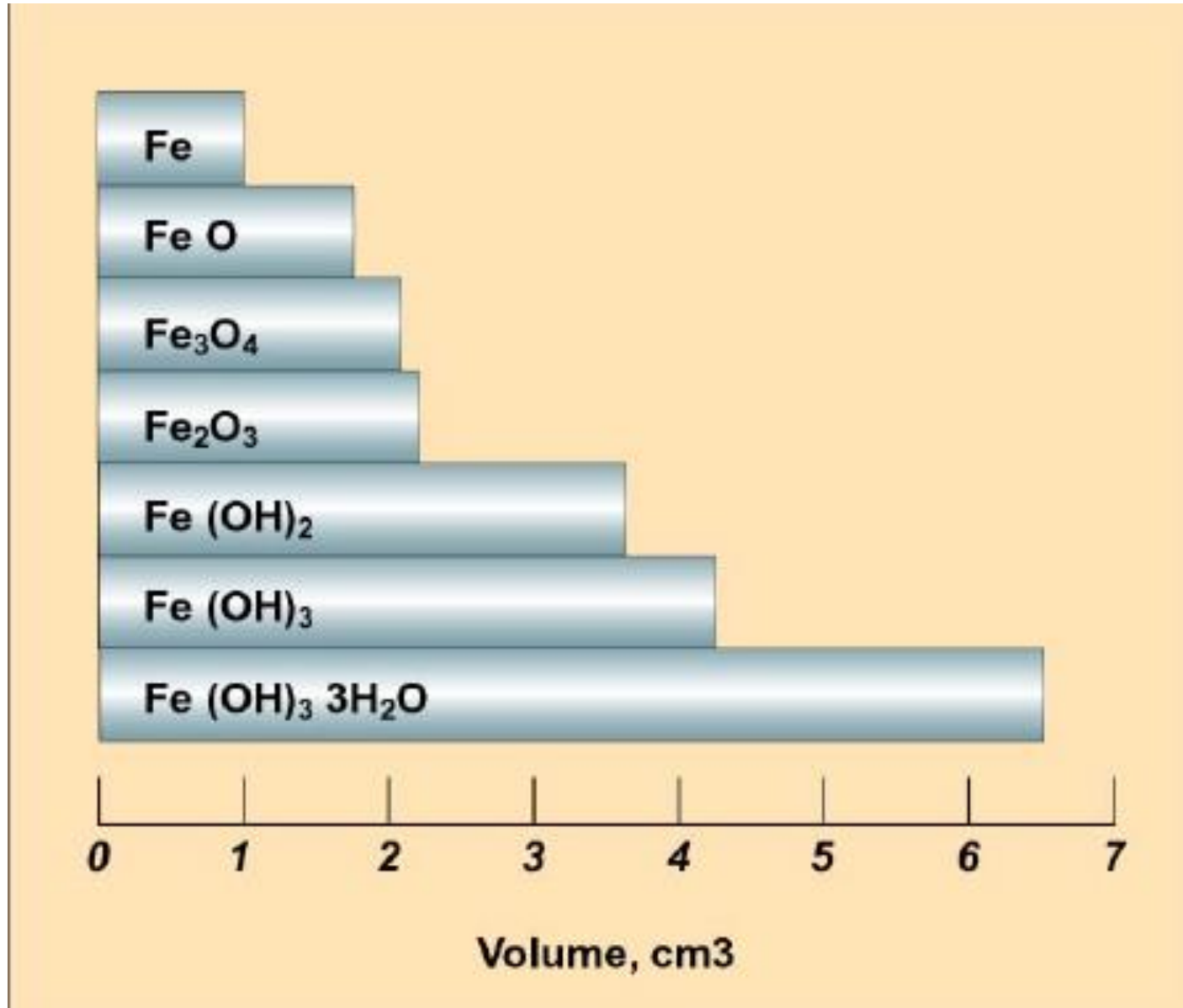
خوردگی آرماتور

- آسیب دیدگی بتن در اثر خوردگی فولاد مدفون در بتن آرمه یکی از رایج ترین انواع خرابی بتن است.
- این پدیده معمولا همراه با انبساط، ترک خوردگی (معمولا در امتداد آرماتورها) و نهایتا بیرون پریدگی پوشش بتن روی میلگردها همراه است.
- به علاوه آسیب دیدگی سازه ای ناشی از کاهش چسبندگی بین فولاد و بتن و کاهش سطح مقطع میلگردها نیز محتمل است.

خوردگی آرماتور

- طبیعت فوق‌العاده قلیایی بتن با تشکیل یک لایه محافظ نازک از دی اکسید آهن روی سطح فلز، از خوردگی آرماتورهای فولادی جلوگیری می‌کند.
- این محافظت به عنوان تشکیل لایه غیر فعال (passive) معروف است.
- هنگامی که pH بتن تحت شرایطی کاهش یابد، لایه محافظ اکسید آهن از بین می‌رود و به اکسیداسیون یا خوردگی فولاد منجر می‌شود.
- تبدیل آهن به زنگ همراه با افزایش حجمی است که علت اصلی انبساط و ترک خوردگی بتن می‌باشد.

خوردگی آرماتور

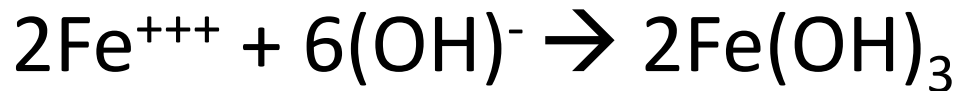
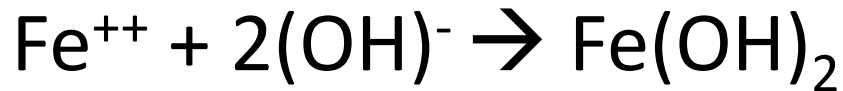
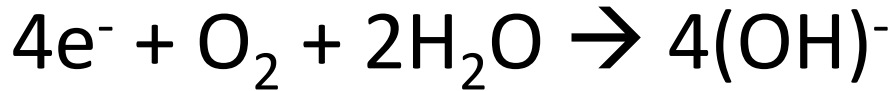


مکانیزم خوردگی آرماتور

- خوردگی فولاد به دلیل فرایند الکتروشیمیایی در سطح فولاد در حضور **رطوبت و اکسیژن** رخ می‌دهد.
- چون پتانسیل الکتروشیمیایی در سطح فولاد در نقاط مختلف متفاوت است، نواحی آندی و کاتدی در آن بوجود می‌آید که توسط الکترولیتی به شکل محلول نمک در سیمان هیدراته شده به هم مرتبط هستند.
- یونهای آهن با بار مثبت Fe^{++} در آند به داخل محلول حرکت می‌کنند، در حالیکه الکترونهای با بار منفی e^{-} از داخل فولاد بطرف کاتد حرکت کرده و بوسیله اجزاء الکترولیت جذب شده و پس از ترکیب با آب و اکسیژن، یونهای $(OH)^{-}$ را تشکیل می‌دهند.

مکانیزم خوردگی آرماتور

- این یونها سپس با یونهای آهن ترکیب شده و هیدروکسیدفریک را تشکیل می‌دهند و این به زنگ تبدیل می‌شود:

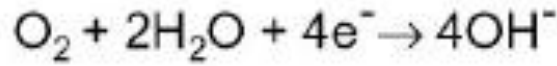


مکانیزم خوردگی آرماتور

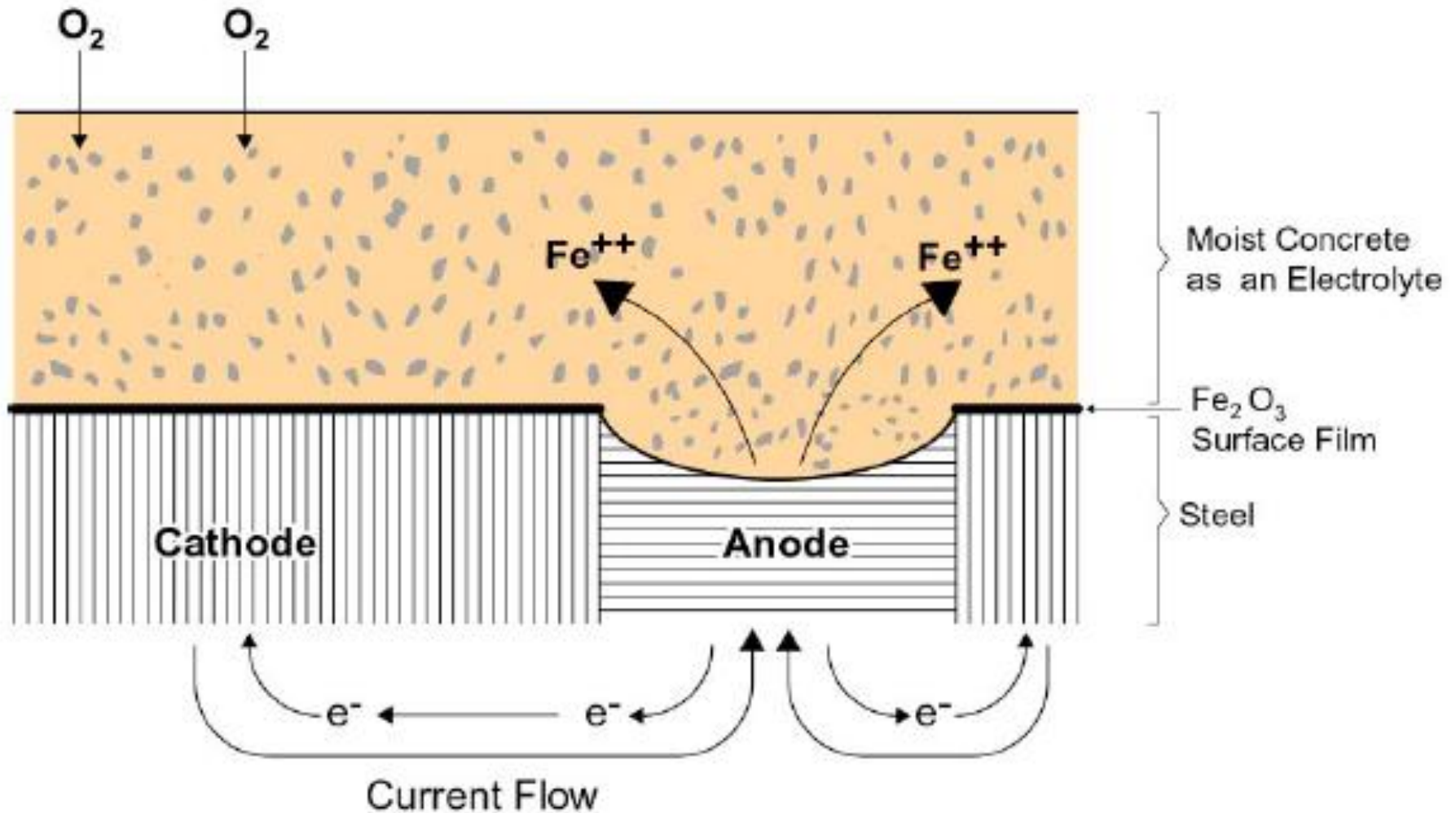
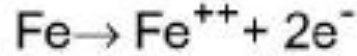
- ملاحظه می‌شود که اکسیژن مصرف شده، ولی آب دوباره تولید می‌شود و تنها برای ادامه فرآیند ضروری می‌باشد.
- بنابراین در یک فضای کاملاً خشک و احتمالاً در رطوبت نسبی زیر ۴۰ درصد، خوردگی وجود نخواهد داشت.
- همچنین در بتن‌های کاملاً غرق شده در آب، خوردگی زیادی وجود ندارد، مگر اینکه هوا وارد آب شود. تحقیقات نشان داده که در رطوبت نسبی ۷۰٪ تا ۸۰٪، خوردگی حداکثر می‌باشد.

مکانیزم خوردگی آرماتور

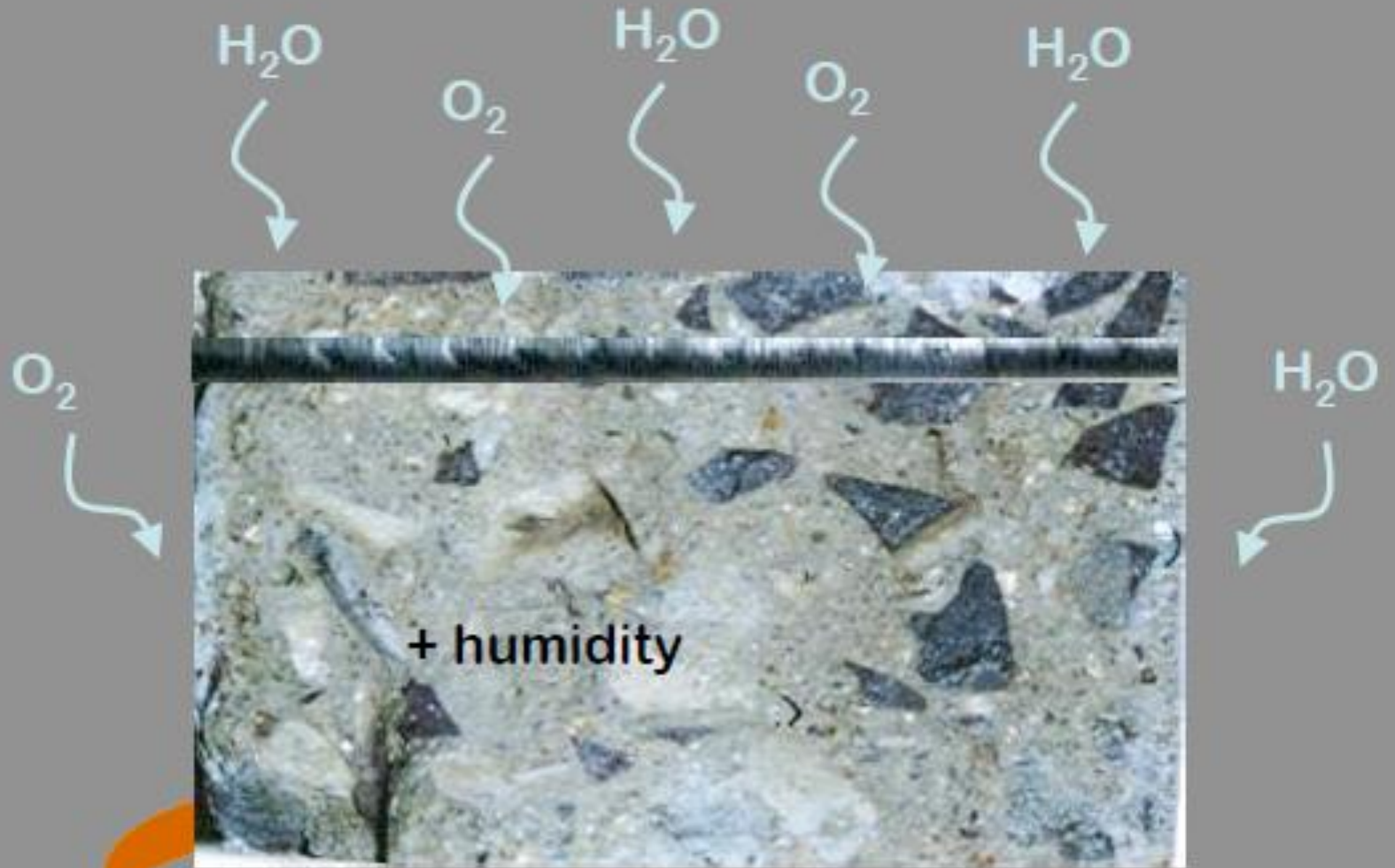
Cathode Process



Anode Process



خوردگی آرماتور



Corrosion of the rebar

خوردگی آرماتور

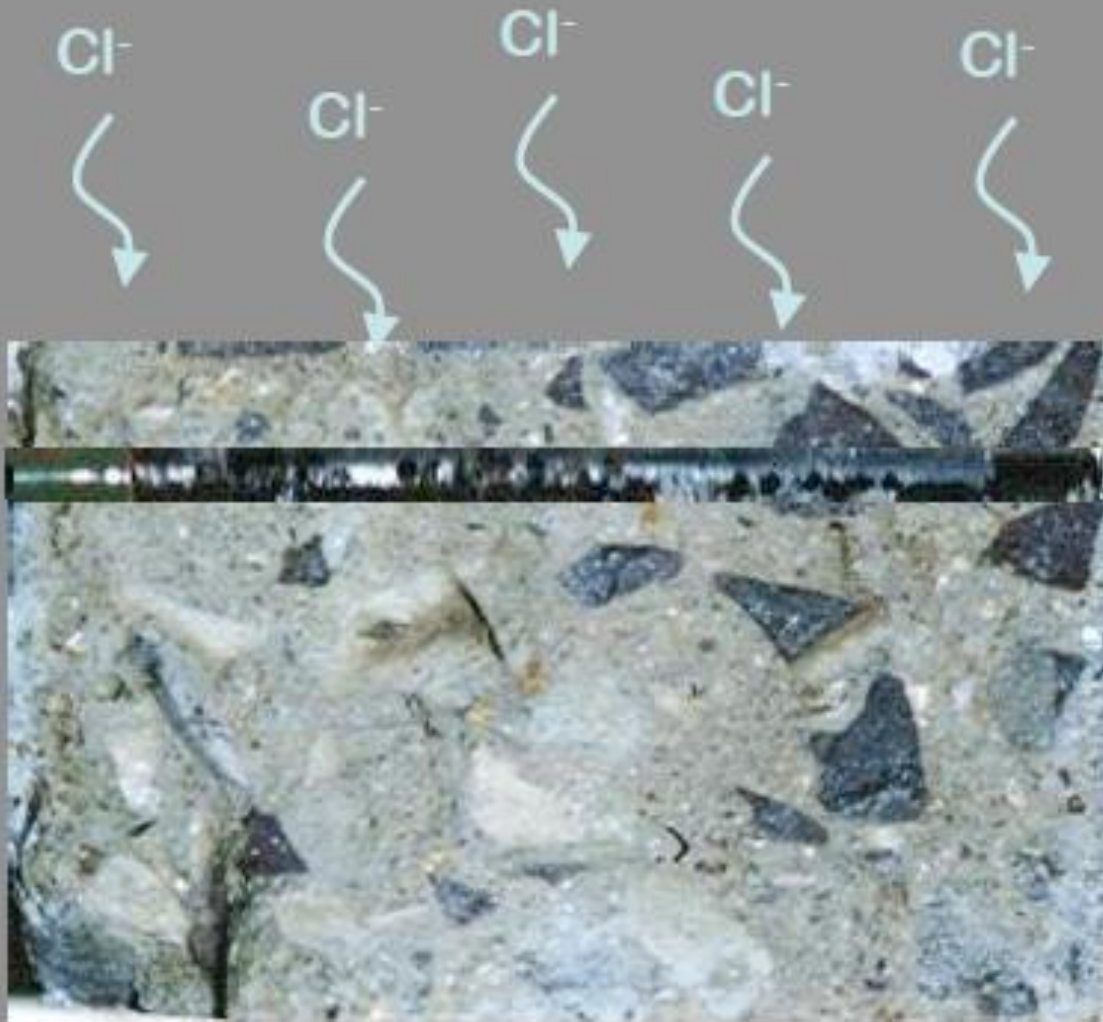
- دو عامل اصلی که موجب از بین رفتن لایه محافظ آرماتور می باشند عبارتند از **یون کلر و کربناتاسیون**.
- اگر بتن به اندازه‌ای نفوذپذیر باشد که کربناتاسیون به بتنی که در تماس با فولاد است برسد، یا کلریدهای محلول بتوانند تا محل آرماتورها نفوذ کنند، و آب و اکسیژن وجود داشته باشند، خوردگی آرماتورها حتمی خواهد بود.

تأثیر یون کلر

- یونهای کلرید موجود در خمیر سیمانی که آرماتورها را احاطه کرده، با آب ترکیب شده و اکسید کلریدریک را تشکیل می‌دهند که لایه نازک محافظ روی فولاد را از بین می‌برد.



تأثير يون كلر



تأثیر یون کلر

- در حضور یونهای کلرید، بسته به نسبت Cl^- / OH^- ، حتی برای مقادیر pH بالاتر از ۱۱/۵ نیز لایه محافظ ممکن است از بین برود.
- هنگامی که نسبت Cl^- / OH^- بیشتر از ۰/۶ باشند، به نظر می‌رسد که فولاد محافظت در برابر خوردگی نخواهد داشت
- این موضوع احتمالاً ناشی از آن است که یا لایه اکسید آهن نفوذپذیر می‌شود و یا اینکه تحت این شرایط غیرپایدار می‌گردد.
- برای یک نمونه متعارف از مخلوط بتنی، مقدار حدی یون کلراید (Cl^-) برای شروع خوردگی در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن گزارش شده است.

تأثیر یون کلر

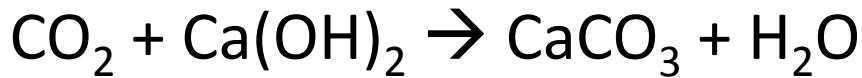
- هنگامی که مجموع یونهای کلرید کمتر از ۰/۴ درصد وزنی سیمان باشد، در بتن‌های ساخته شده یا سیمان پرتلند معمولی خوردگی آرماتورها توسط کلریدها کم می‌باشد.
- وقتی که مقادیر زیادی کلرید موجود باشد، بتن تمایل به حفظ رطوبت بیشتری دارد که این امر باعث افزایش احتمال خطر خوردگی فولاد بر اثر کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود.
- وقتی که انفعال فولاد مدفون از بین می‌رود، این مقاومت الکتریکی و دسترسی به اکسیژن است که میزان خوردگی را کنترل می‌کند.

تأثیر یون کلر

- تنها کلریدهای محلول در ارتباط با خوردگی فولاد مؤثر بوده و کلریدهای دیگر در محصولات هیدراتاسیون ثابت می باشند.
- برای نمونه حضور C_3A از این جنبه می تواند مفید باشد، زیرا با کلریدها ترکیب شده و کلرید آلومینات کلسیم (نمک فریدل) را تشکیل می دهد.
- به این دلیل استفاده از سیمان ضد سولفات که مقدار کمی C_3A دارد، می تواند خوردگی توسط کلریدها را افزایش دهد.
- اما ممکن است ثبات کلریدها دائمی نبوده و بعلاوه کربناتاسیون همزمان توانایی سیمان هیدراته شده در تثبیت کلریدها را کاهش دهد.

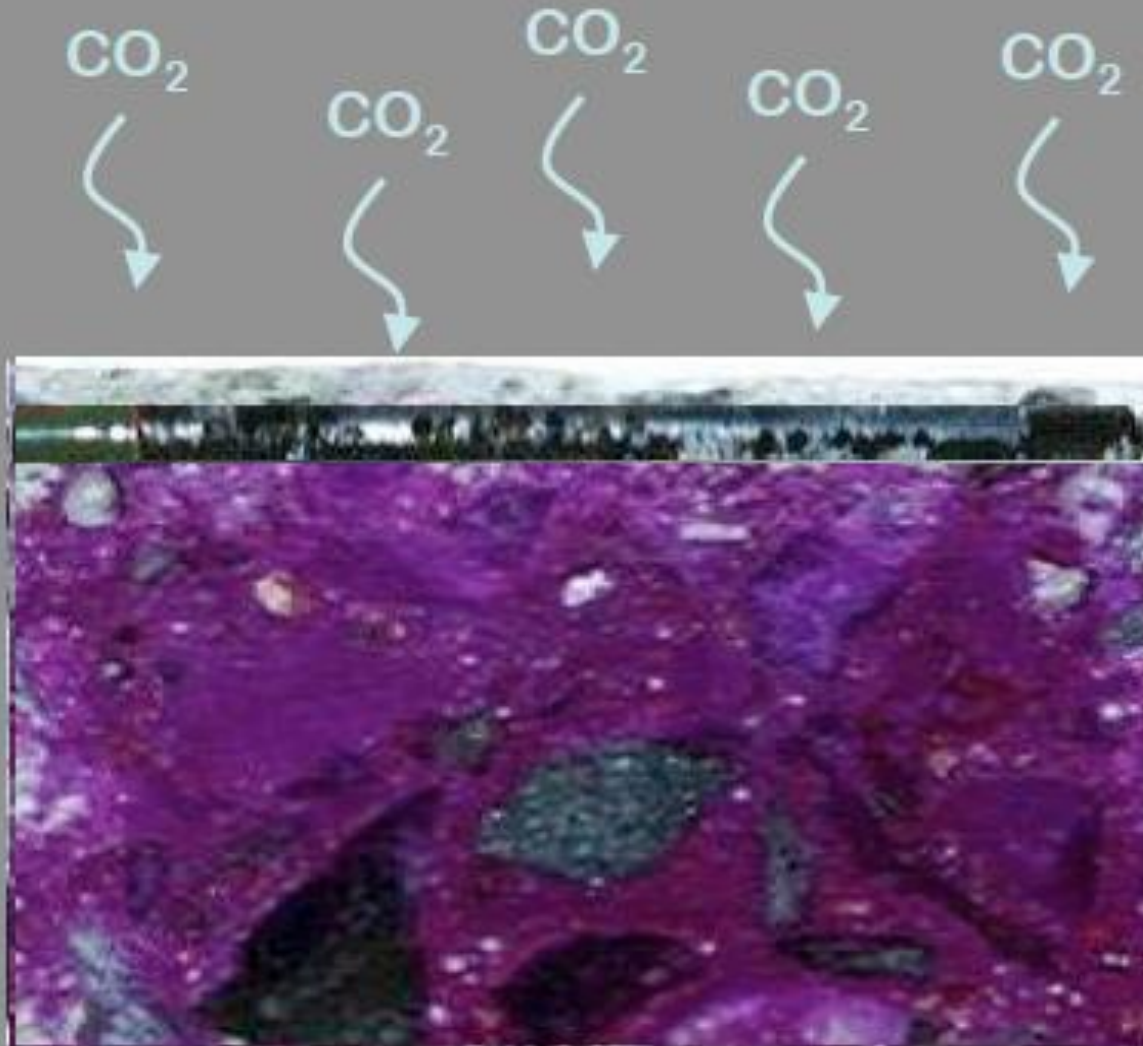
تاثیر کربناتاسیون

- به همین ترتیب تشکیل کربنات کلسیم از Ca(OH)_2 طی فرآیند کربناتاسیون خاصیت قلیایی را کاهش می‌دهد و در نتیجه لایهٔ محافظ از بین می‌رود.



- سپس سطح فولاد به صورت موضعی فعال شده و تشکیل آند می‌دهد و با تشکیل کاتد در سطح خنثی (قسمتهائی که لایهٔ محافظ آن تخریب شده)، خوردگی نقطه‌ای و موضعی بوجود می‌آید.
- به خاطر محیط اسیدی موجود در حفره (pit)، حفره فعال باقی می‌ماند و عمق آن افزایش می‌یابد.

تأثير كربناتاسيون



خوردگی آرماتور

- خوردگی نقطه‌ای در پتانسیل بخصوصی رخ می‌دهد که به آن پتانسیل خوردگی نقطه‌ای می‌گویند.
- در مقایسه با رطوبت‌های نسبی بالا، این پتانسیل در بتن‌های خشک بیشتر می‌باشد.
- به محض اینکه یک حفره شروع به شکل‌گیری می‌کند، پتانسیل فولاد در مجاورت آن پائین می‌آید. بنابراین برای مدتی حفره جدیدی ایجاد نمی‌شود.
- عاقبت ممکن است خوردگی با گسترش زیاد بوجود آید یا خوردگی عمومی و همه جانبه بوقوع پیوندد.

نمونه های خوردگی آرماتور



نمونه های خوردگی آرماتور



کنترل خوردگی

- از آنجا که آب، اکسیژن و یونهای کلرید نقش مهمی در خوردگی فولاد بازی می‌کنند، واضح است که **نفوذپذیری بتن کلید کنترل فرآیندهای مختلف** مربوط به این پدیده می‌باشد.
- **فرآیند خوردگی شیمیایی فقط هنگامی انجام می‌شود که آب و اکسیژن وجود داشته باشند.**
- **تنها اکسیژن است که طی این فرآیند مصرف می‌شود.**
- **حتی در حضور مقادیر زیادی کلرید در بتن خشک، هیچ خوردگی بوجود نمی‌آید.**

کنترل خوردگی

- استفاده از سیمانهای روبره‌ای و سیمانهای پوزولانی در محدود نمودن سهولت حرکت و بی‌ثباتی یونهای کلرید در داخل خمیر سیمان هیدراته شده، مفید می‌باشد.
- برای محافظت در برابر خوردگی، حداکثر مقدار مجاز کلرید در مخلوطهای بتنی (سیمان، آب اختلاط و عمل آوری، سنگدانه) نیز در آیین‌نامه‌های ساختمانی مشخص شده است.
- همچنین برای بتنهایی که در معرض محیط خورنده قرار دارند، آیین‌نامه‌های مختلف شرایط حداقل پوشش بتن را مشخص می‌نماید.

طبقه بندی شرایط محیطی (آبا)

شرایط	دسته بندی	شرایط
سازه‌های روزمینی که در معرض خطر نفوذ یون کلرید بر اثر وزش بادهای دارای یونهای نمک نیستند.	A	متوسط
سازه‌های روزمینی در نواحی نزدیک به ساحل و در معرض وزش بادهای حاوی یونهای کلرید.	B	شدید
قسمتهایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیه مویبندی خاک واقع شده است (به علت فشار کم آب یا وجود سیستم زهکشی خطر نفوذ. شدید آب از سطح به داخل بتن وجود ندارد) و یا قسمتهایی که دائماً در زیر آب دریا واقع‌اند	C	شدید
قسمتهایی از سازه که در تماس با خاک مهاجم است و در زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده است (آب براحتی می‌تواند از سطح به داخل نفوذ پیدا کند).	D	بسیار شدید
سازه‌های دریایی (دارای قسمتهایی در ناحیه جزر و مدی و. ناحیه پاشش)	E	فوق‌العاده شدید
سازه‌های نگهدارنده‌های آب و تصفیه‌خانه فاضلاب	F	فوق‌العاده شدید

الزامات شرایط محیطی (آب)

حداقل مقدار سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	حداقل مقاومت مشخصه بتن (مگاپاسکال)	حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی	شرایط محیطی یا موقعیت سازه
۳۰۰	۳۰	۰/۵	متوسط
۳۲۵	۳۰	۰/۴۵	شدید
۳۵۰	۳۵	۰/۴	بسیار شدید
۳۵۰	۴۰	۰/۴	فوق العاده شدید

پوشش بر اساس شرایط محیطی (آبا)

نوع شرایط محیطی					حداقل پوشش (میلیمتر)
بسیار شدید	بسیار شدید	شدید	متوسط	ملايم	عضو بتنی
۷۵	۶۵	۵۰	۴۵	۳۵	تیرها و ستونها
۶۰	۵۰	۳۵	۳۰	۲۰	دالها، دیوارها و تیرچهها
۵۵	۴۵	۳۰	۲۵	۲۰	پوستهها و صفحات پلیسه‌ای
۹۰	۷۵	۶۰	۵۰	۴۰	شالودهها

کنترل خوردگی

- تهیه لایه ضدآب یا روکش ضخیم مخلوط بتن غیر قابل نفوذ بر روی سطوح اعضای بتن آرمه و پیش‌تنیده تازه ساخته شده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- شاخص مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در روکش، از اسلامپ کم، و نسبت آب به سیمان خیلی کم (با فوق روان‌کننده) و مقدار زیاد سیمان برخوردار هستند.
- ملات‌های سیمان پرتلند دارای امولسیون‌های پلیمری (لاتکس) نیز نفوذناپذیری خوبی از خود نشان می‌دهند و برای مقاصد روکشی از آنها استفاده شده است.

کنترل خوردگی

- اندود کردن میلگردهای مسلح جزء روشهای نسبتاً پرهزینه‌تر برای جلوگیری از خوردگی است.
- اندودهای حفاظتی برای فولاد مسلح‌کننده از دو نوع هستند:
 - اندودهای آندی (مانند فولاد پوشیده شده با روی)
 - اندودهای راه‌بند (مانند فولاد با اندود اپوکسی)
- عملکرد درازمدت میگردهای اندود شده با اپوکسی در بسیاری از کشورها تحت بررسی جدی می‌باشد.

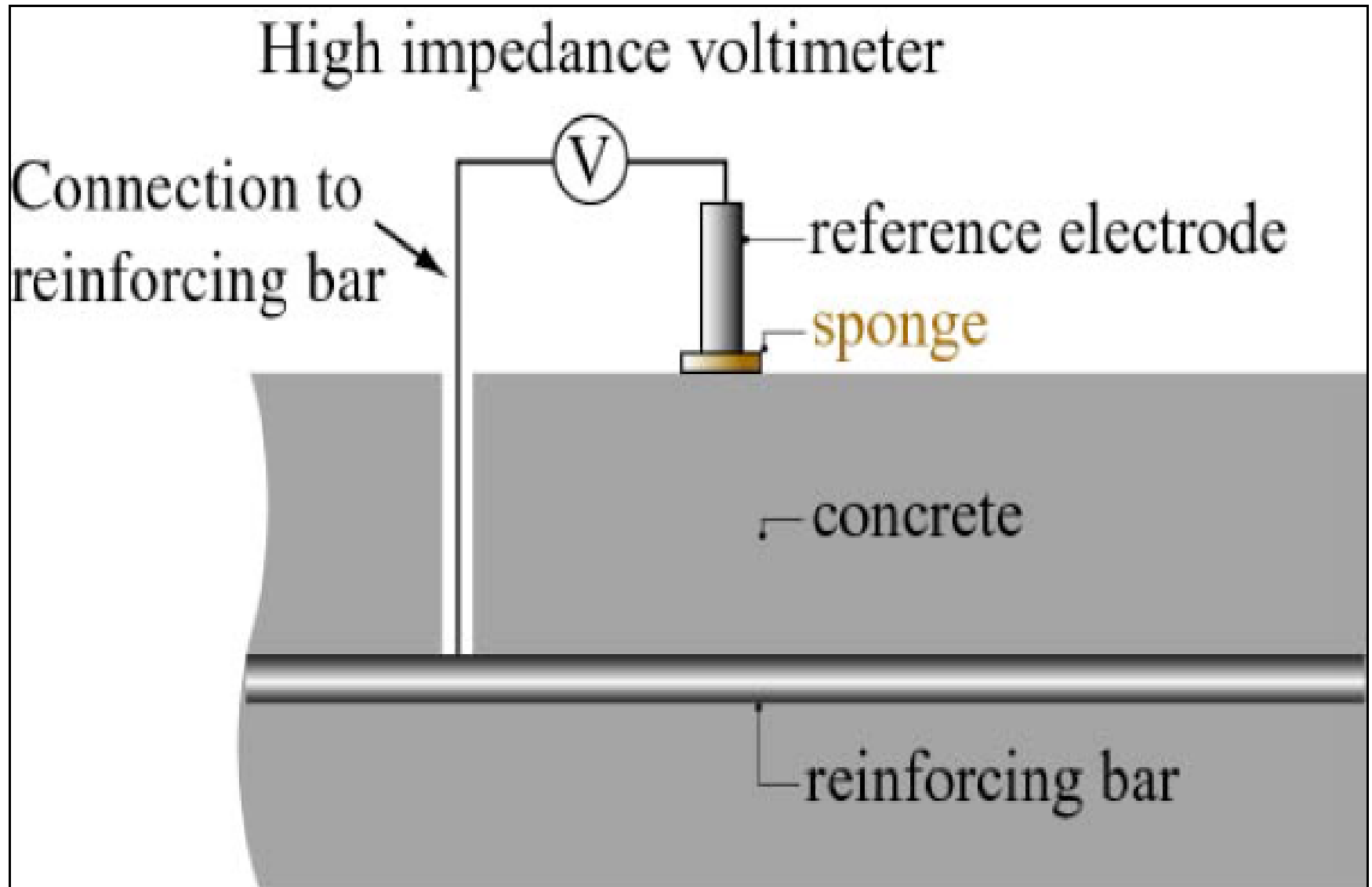
کنترل خوردگی

- روشهای **حفاظت کاتدی** نیز از روشهای پرهزینه کنترل خوردگی است.
- این روش شامل جلوگیری جریان در پیل خوردگی یا به وسیله ایجاد جریان از خارج در جهت مخالف و یا با استفاده از آندهای قربانی شونده می باشد.
- هر دو روش با نتایج نامشخص به صورت وسیع مورد استفاده قرار گرفته اند.
- **کاربرد مواد بازدارنده** نظیر نیترات و نیتريت کلسیم و نیتريت سدیم بصورت افزودنی در هنگام ساخت بتن در مسائل خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید تاحدی خوردگی را به تأخیر انداخته است.

آزمایش خوردگی

- آزمایش تعیین پتانسیل خوردگی مطابق روش نیم پیل (Half Cell) انجام می شود.
- در این آزمایش اختلاف ولتاژ بین آرماتور و یک الکتروود مبنا که در تماس با بتن قرار گرفته توسط یک ولت متر اندازه گیری می شود.
- الکتروود مبنا معمولاً از جنس مس - سولفات مس است.
- پتانسیل ثبت شده به عنوان نشانه ای از احتمال وقوع خوردگی در نظر گرفته می شود.

آزمایش خوردگی



آزمایش خوردگی

احتمال خوردگی	پتانسیل اندازه گیری شده بر حسب میلی ولت نسبت به الکتروود مس - سولفات مس
کم ، احتمال خوردگی زیر ۱۰٪	بزرگتر از ۲۰۰-
نامطمئن	بین ۲۰۰- و ۳۵۰-
زیاد ، احتمال خوردگی بالای ۹۰٪	کمتر از ۳۵۰-

آزمایش خوردگی

- عوامل مختلفی منجر به بروز خطا در آزمایش نیم پیل می شود:
 - درصد رطوبت بتن: اندازه گیری فوق العاده به رطوبت بتن حساس است و درجه اشباع بیشتر، ولتاژهای منفی تری را نتیجه می دهد.
 - جریان های القایی
 - مقدار اکسیژن در مجاورت آرماتور: نبود اکسیژن منجر به ولتاژهای منفی تر می شود.
 - ریزترک ها

آزمایش خوردگی (نفوذپذیری)

- این روش به آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلر (RCPT) شهرت دارد.
- در این آزمایش، نمونه اشباع بتنی در داخل محفظه ای قرار می گیرد که در یک طرف آن محلول نمک طعام ۳٪ و در طرف دیگر محلول ۰/۳ نرمال سود قرار دارد.
- با برقراری اختلاف پتانسیل برابر ۶۰ ولت بین دو سر نمونه، مقدار جریان الکتریکی عبوری در مدت ۶ ساعت اندازه گیری می شود.
- جریان عبوری بالاتر نشان دهنده سهولت جابجایی یونهای کلر و نفوذپذیری بالاتر است.

آزمایش خوردگی (نفوذ پذیری)



آزمایش خوردگی (نفوذپذیری)

مصادیق	نفوذپذیری یون کلر	شار عبوری (کولمب)
بتن معمولی با آب به سیمان بالای ۰/۶	زیاد	بزرگتر از ۴۰۰۰
بتن معمولی با آب به سیمان بین ۰/۴ و ۰/۵	متوسط	۴۰۰۰ - ۲۰۰۰
بتن معمولی با آب به سیمان کمتر از ۰/۴	کم	۲۰۰۰ - ۱۰۰۰
بتن کم نفوذ	خیلی کم	۱۰۰۰ - ۱۰۰
بتن نفوذناپذیر	قابل صرفنظر	کمتر از ۱۰۰

تاثیر کربناتاسیون

- پدیده در بتن‌های غیرمسلح مخرب شناخته نشده و حتی می‌تواند به سخت‌تر شدن و کاهش فضاهاى خالی بتن نیز منجر گردد.
- لیکن در خصوص بتن‌های مسلح با افت قلیائیت و کاهش pH آب حفره‌ای به مقادیر کمتر از ۹، لایه محافظ روی آرماتور دچار مخاطره قرار گرفته و با از بین رفتن آن خوردگی در آرماتور آغاز می‌گردد.
- در اغلب موارد این خوردگی توأم با نفوذ یون کلرید بوده و کربناتاسیون بعنوان عامل کاتالیزوری در خوردگی شدیدتر یون کلریدی عمل خواهد نمود.

عوامل مؤثر بر کربناتاسیون

- عوامل مؤثر بر پدیده کربناتاسیون را می‌توان به دو دسته عمده بتن و مشخصات آن و شرایط محیطی تقسیم‌بندی نمود.
- بتن : نفوذپذیری ← نسبت آب به سیمان، نوع و مقدار سیمان، نوع و مقدار سنگدانه، آب بتن، تراکم بتن، پوشش بتن روی آرماتور
- شرایط محیطی : غلظت گاز کربنیک موجود در محیط، رطوبت (رطوبتهای نسبی بین ۵۵ تا ۷۰ برای حداکثر کربناتاسیون) و تغییرات آن، دما

کنترل کربناتاسیون

- کاهش نفوذپذیری بتن
- ایجاد پوششی از بتن مناسب و با کیفیت و به ضخامت کافی بر روی آرماتور
- کاربرد پوزولان‌ها در این پدیده در پاره‌ای موارد و با کاهش تخلخل سبب کاهش و در بعضی موارد بعلت کاهش قلیائیت و Ca(OH)_2 سبب افزایش میزان کربناتاسیون در بتن‌ها شده است.

کربناتاسیون

