وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه فنی و حرفه ای
دانشکده دارالفنون پسران بجنورد

خرابی و دوام بتن

بیژن اجتماعی
کارشناس ارشد مهندسی عمران و مدرس دانشگاه

درس: خرابی و دوام بتن
پاییز۹۶

دوام بتن

Durability of Concrete

خرابیهای شیمیایی (Chemical Deterioration)

- مقاومت بتن در مقابل فرآیندهای آسیب دیدگی که به وسیله واکنشهای شیمیایی شروع می‌شود، به طور کلی اما نه لزوماً متضمن فعل و انفعالات شیمیایی مابین مواد مهاجم موجود در محیط خارجی و اجزا خمیر سیمان می‌باشد.
- موارد استثناء:
  - واکنشهای قلیایی سنگدانه‌ها
  - 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 زمرهٔ 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 پایایی 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 ۰/۰۵٪ 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 عموما 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 نسبتا 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 می شود.

– **کاهش مستمر مقاومت و جرم** : ناشی از بین رفتن چسبندگی بین محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان

انواع حملات 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 عمدتا 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 آسیب‌پذیری بیشتری در برابر حمله یونهای سولفات دارند.
- در هیدراتاسیون سیمانهای پرتلند با بیش از ۵٪ C_3A، بیشتر آلومین به صورت منوسولفات $C_3A.C\bar{S}.H_{18}$ می‌باشد.
- 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

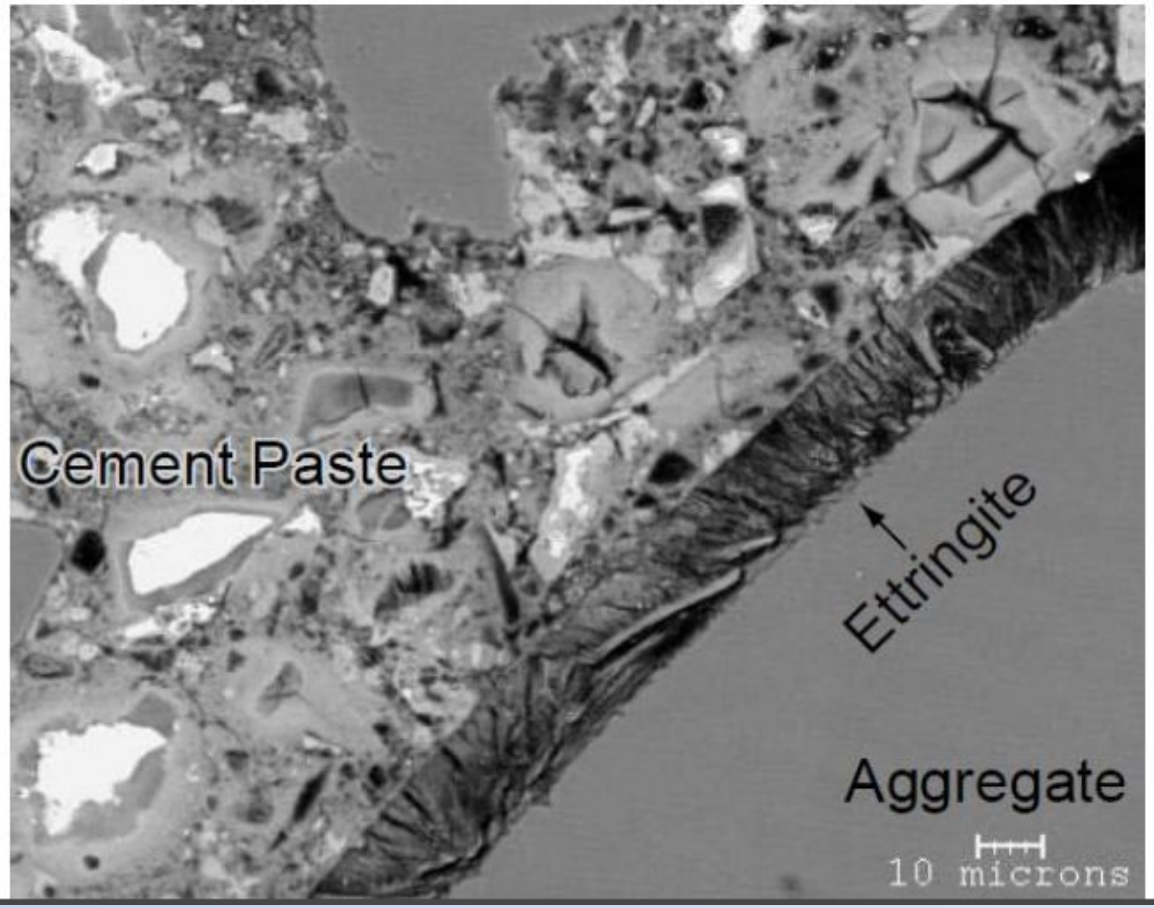
- یونهای سولفاتی در حضور آب و هیدروکسید کلسیم با فاز آلومین دار خمیر سیمان وارد واکنشهای شیمیایی می شوند:

$$C_3A\cdot C\bar{S}\cdot H_{18} + 2CH + 2\bar{S} + 12H \rightarrow C_3A\cdot 3C\bar{S}\cdot H_{32}\ (\text{ettringite})$$

$$C_3A\cdot CH\cdot H_{18} + 2CH + 3\bar{S} + 11H \rightarrow C_3A\cdot 3C\bar{S}\cdot H_{32}\ (\text{ettringite})$$

- 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.

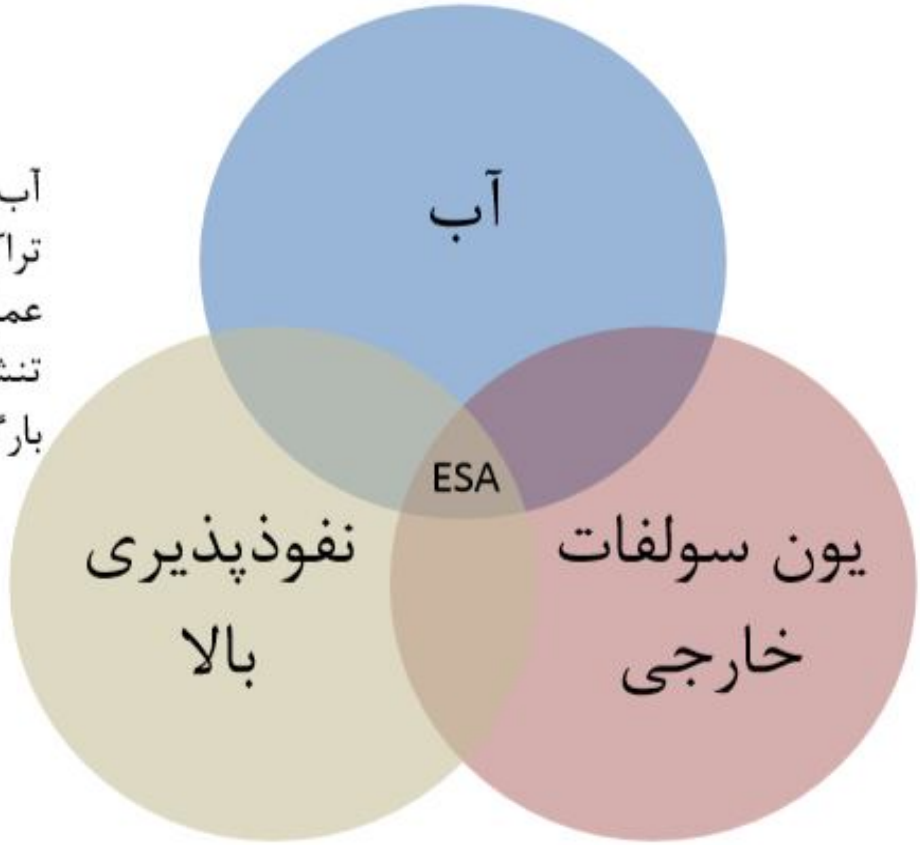
$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + CaSO_4.2H_2O \text{ (gypsum)}$$

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4.2H_2O \text{ (gypsum)}$$

- 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.

عوامل لازم برای حمله سولفاتی خارجی

آب به سیمان بالا
تراکم ناکافی
عمل آوری نامناسب
تنشهای حرارتی
بارگذاری سازه ای



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

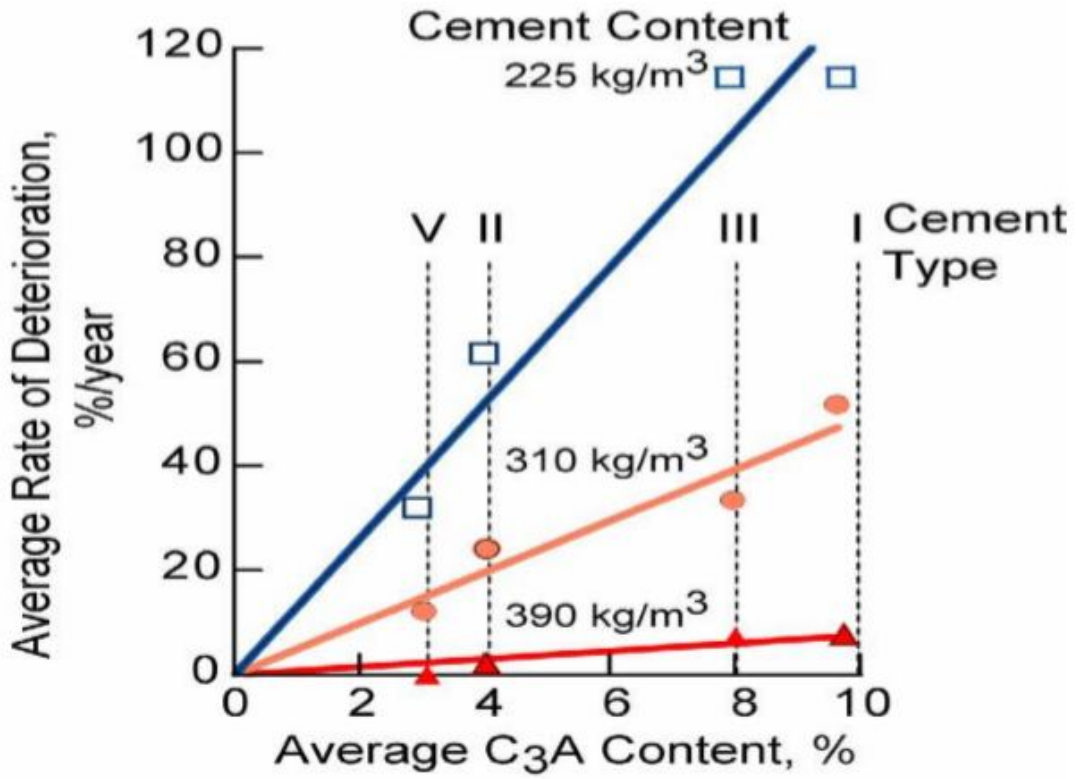
کنترل حمله سولفاتی خارجی

- **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

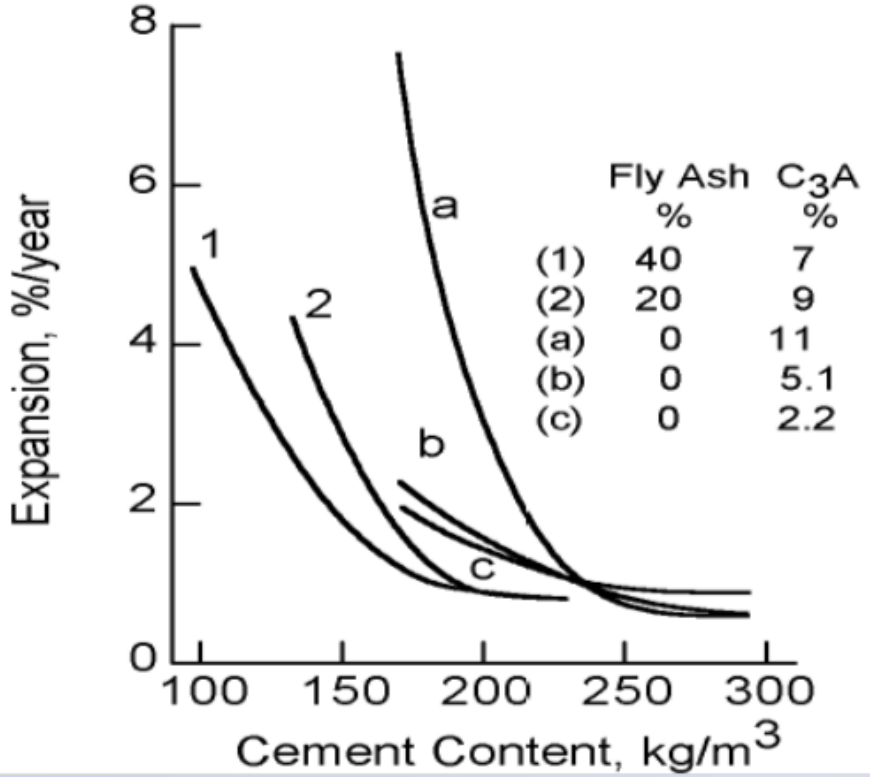
کنترل حمله سولفاتی خارجی

- 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 حمله سولفاتی خارجی (نوع سیمان)



کنترل حمله سولفاتی خارجی (افزودنی ها)



کنترل حمله سولفاتی خارجی (افزودنی ها)

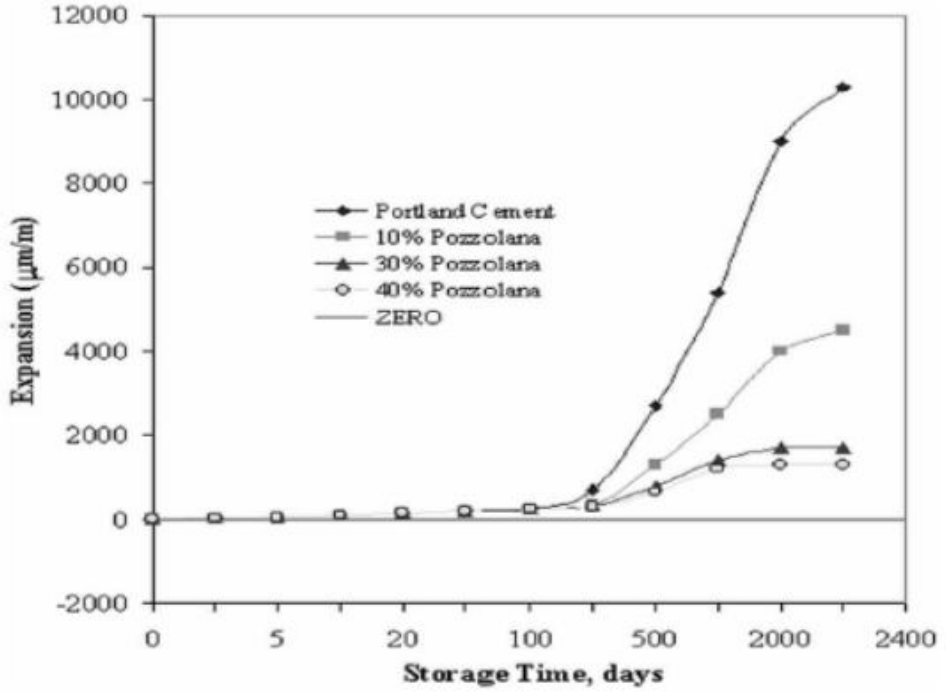


Fig. 2.12—Effect of substituting Italian natural pozzolan for portland cement on expansion of 1:3 mortar. Samples 2 x 4 x 25 cm stored in 1% $MgSo_4$ solution (Massazza and Costa 1979).

کنترل حمله سولفاتی خارجی (افزودنی ها)

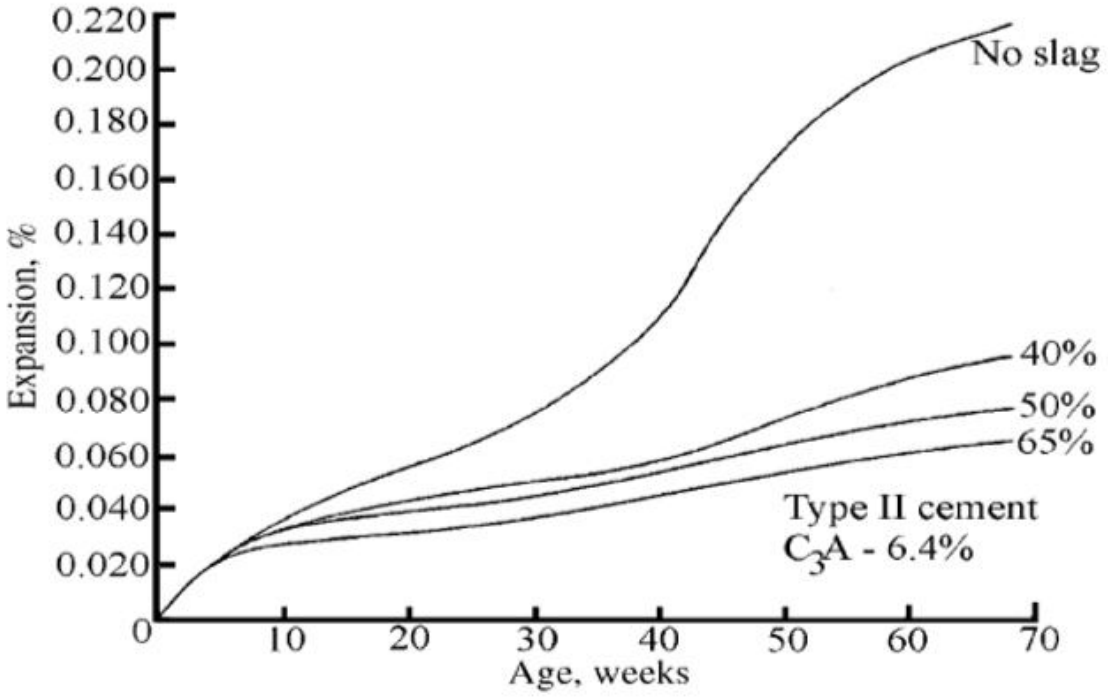


Fig. 5.10—Sulfate resistance of mortar bars, Wolochow test, Type II (Hogan and Meusel 1981).

تقسیم بندی خطر حمله سولفاتی خارجی

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

تقسیم بندی خطر حمله سولفاتی خارجی

- **حمله شدید**: وقتی غلظت یون سولفات موجود در خاک بین ۰/۲٪ تا ۲٪ و در آب بین mg/l ۱۰۰۰۰-۱۵۰۰ 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 mg/l ۱۰۰۰۰ 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 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**

واکنش قلیایی – سیلیسی

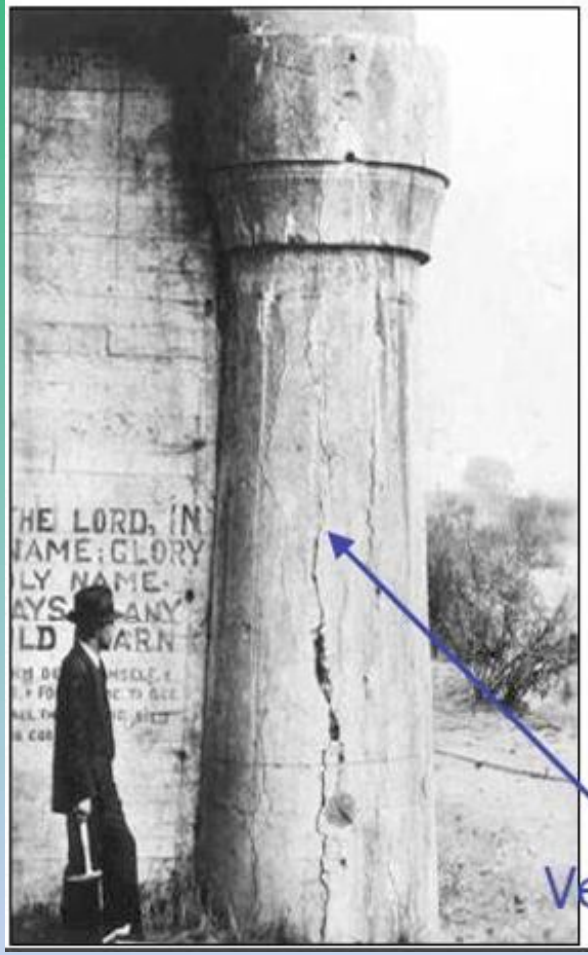
واکنش قلیایی – سیلیسی

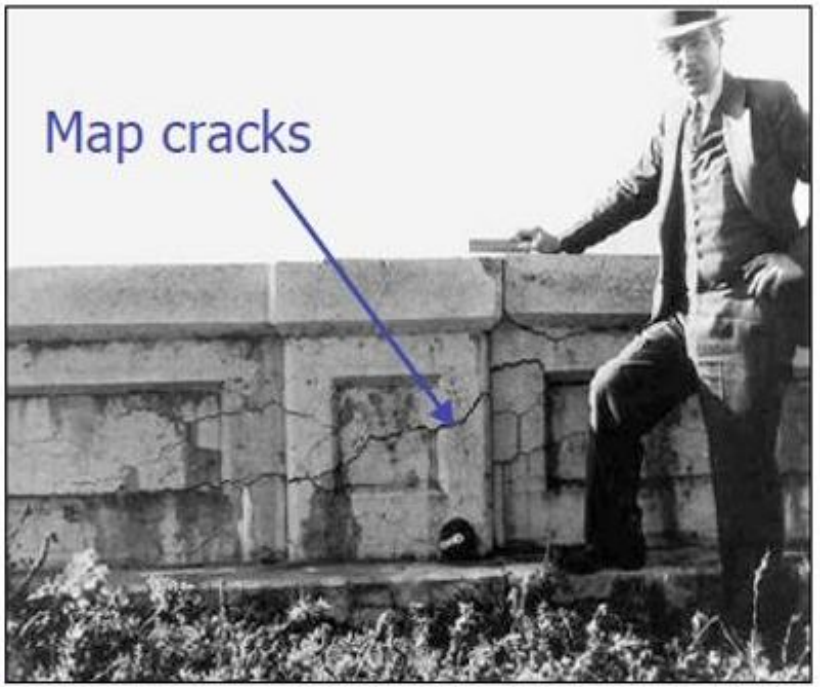
- انبساط و ترک‌خوردگی بتن می‌تواند به علت واکنشهای شیمیایی بین یونهای قلیایی سیمان پرتلند (یا منابع دیگر)، یونهای هیدروکسیل، و بعضی از مواد متشکله سیلیسی که عمدتا در برخی سنگدانه‌ها موجود است، باشد.
- این پدیده بنام واکنش قلیایی- سیلیسی نام دارد، هر چند چون اکثرا منبع سیلیس از سنگدانه می باشد، به نام واکنش قلیایی سنگدانه نیز شناخته می شود.
- 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





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:

$$Si\text{-}O\text{-}Si + H\ OH \rightarrow Si\text{-}OH + Si\text{-}OH$$

- 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.

هیدرولیز

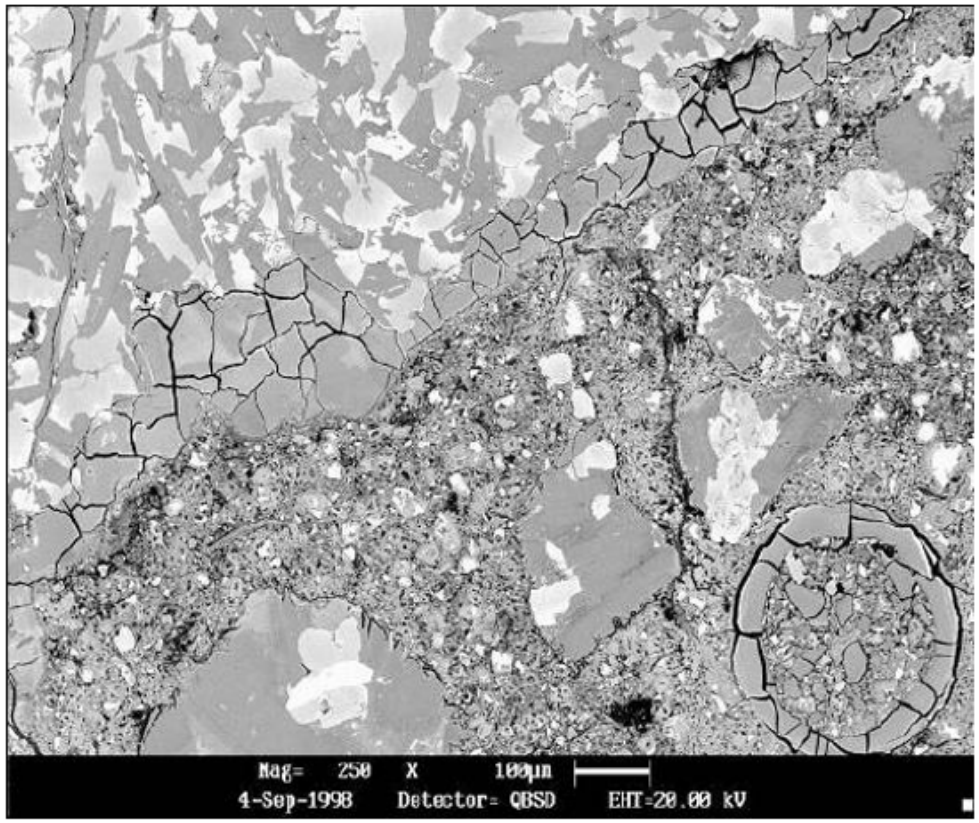
- هیدرولیز یک فرآیند تجزیه شیمیایی است که در آن از آب برای گسستن پیوندهای شیمیایی یک ماده استفاده می‌شود. این مشخصه واکنش هیدرولیز یا آب کافت با واکنشهایی است که مولکول آب به ترکیب اضافه شده ، اما تکمیلی صورت نمی‌گیرد. به عبارتی ترکیب شدن یک نمک با آب و تولید اسید و باز را *هیدرولیز* یا *آبکافت* گویند و به معنی تجزیه بوسیله آب است.

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 ترک‌خوردگی سنگدانه، خمیر سیمان و بتن شود.
- در دسترس بودن پیوسته آب در داخل بتن، باعث بزرگ‌شدن 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



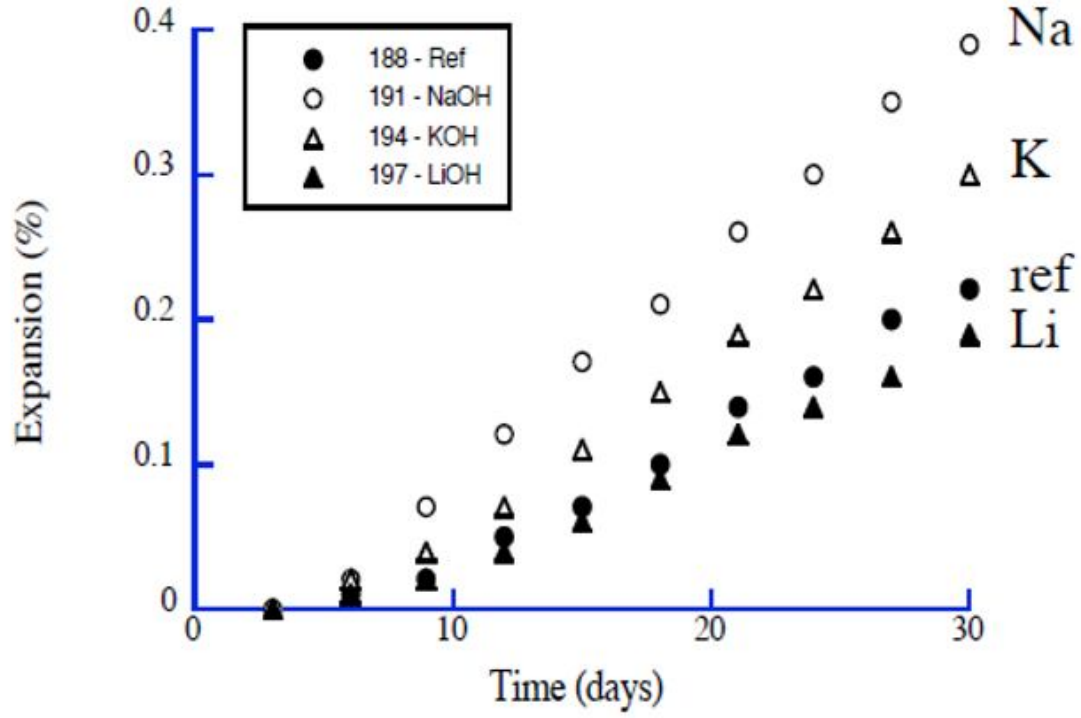
واکنش قلیایی – سیلیسی

- وجود هم یون هیدروکسیل و هم فلز قلیایی برای پدیده انبساط لازم است.
- غلظت یون هیدروکسیل در مایع منفذی، حتی در سیمانهای با قلیاییت 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 می‌باشند 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 سنگدانه‌های واکنش‌زا استفاده شوند، موجب انبساطهای زیاد ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها می‌شوند.
- استاندارد ASTM C ۱۵۰، سیمانهایی با کمتر از ۰/۶ درصد معادل Na_2O را به عنوان با قلیاییت کم و سیمانهای با بیشتر از ۰/۶ درصد معادل Na_2O را به عنوان با قلیاییت زیاد معرفی می‌کند.

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 اندازهٔ 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، کلسدونی، چرت، سنگهای آتش‌فشانی نهان بلورین (آندزیتها و ریولیتها)، و کوارتز فشرده یا کوارتز دگرگونی به عنوان مواد مستعد واکنش قلیایی شناخته شده‌اند.

نمونه های واکنش قلیایی – سیلیسی

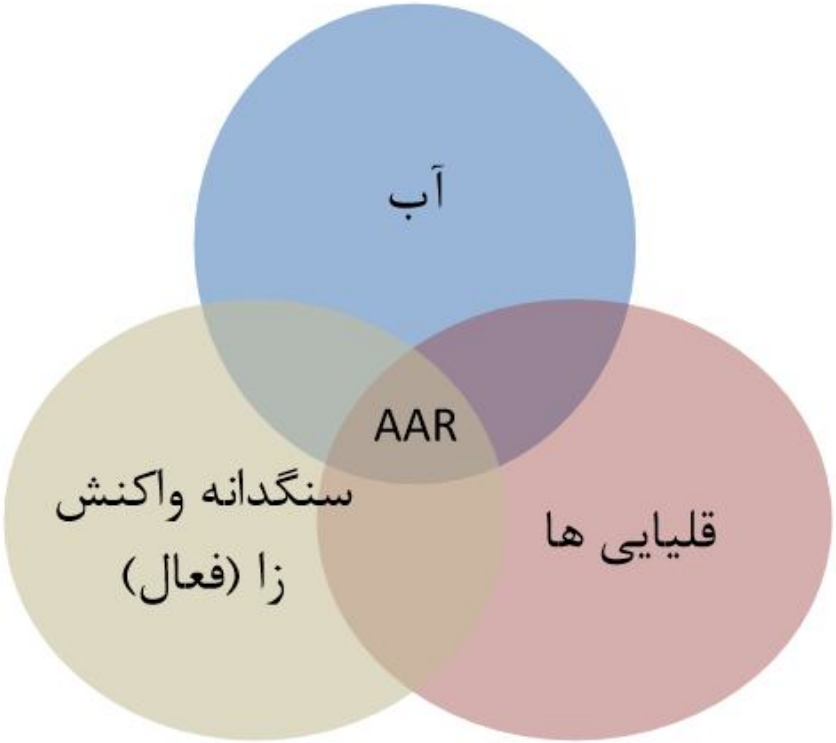
باند فرودگاهی در شمال کالیفرنیا

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

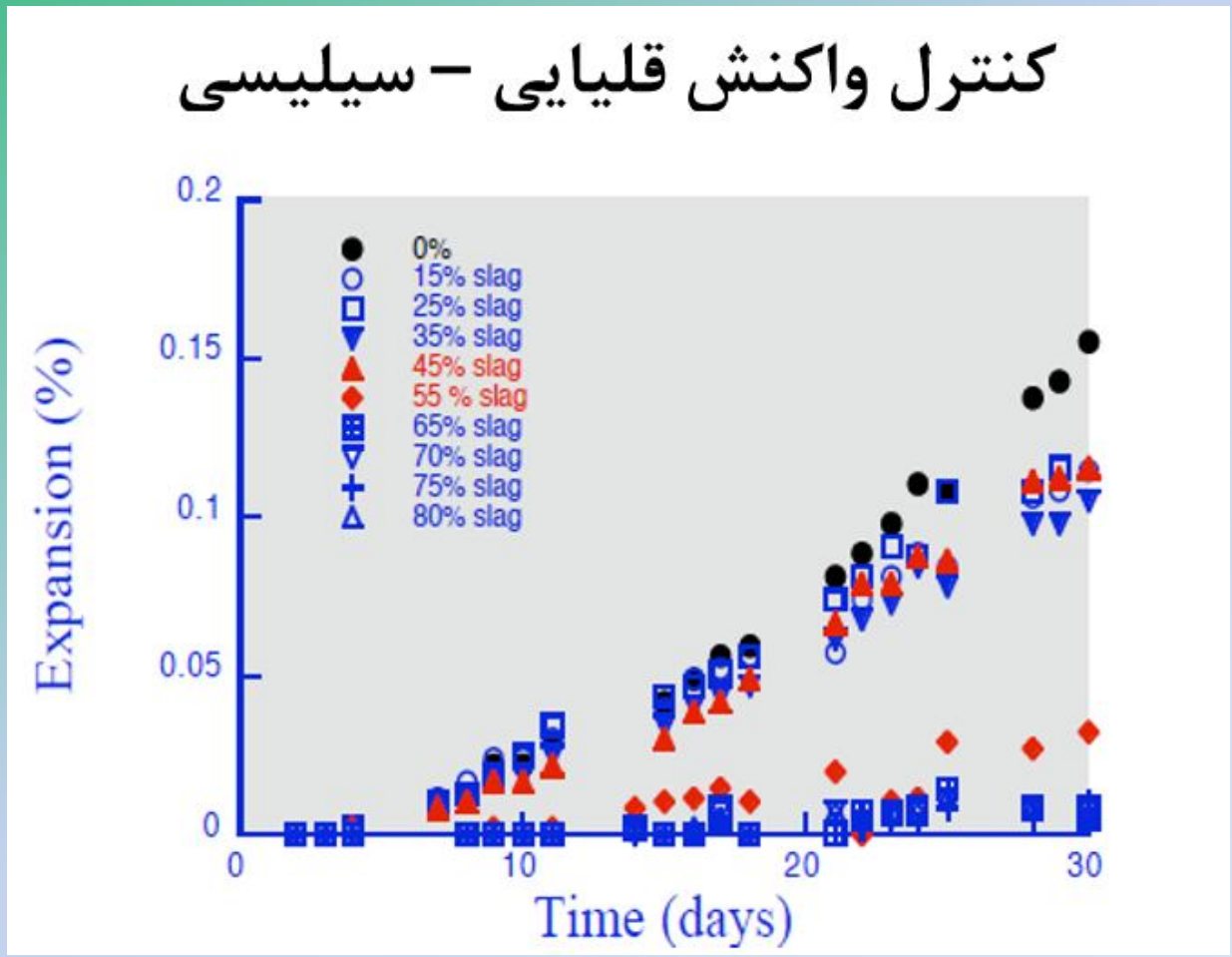
کنترل واکنش قلیایی – سیلیسی

- 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



- 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.

خوردگی آرماتور

با تشکر از توجه و همراهی شما