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

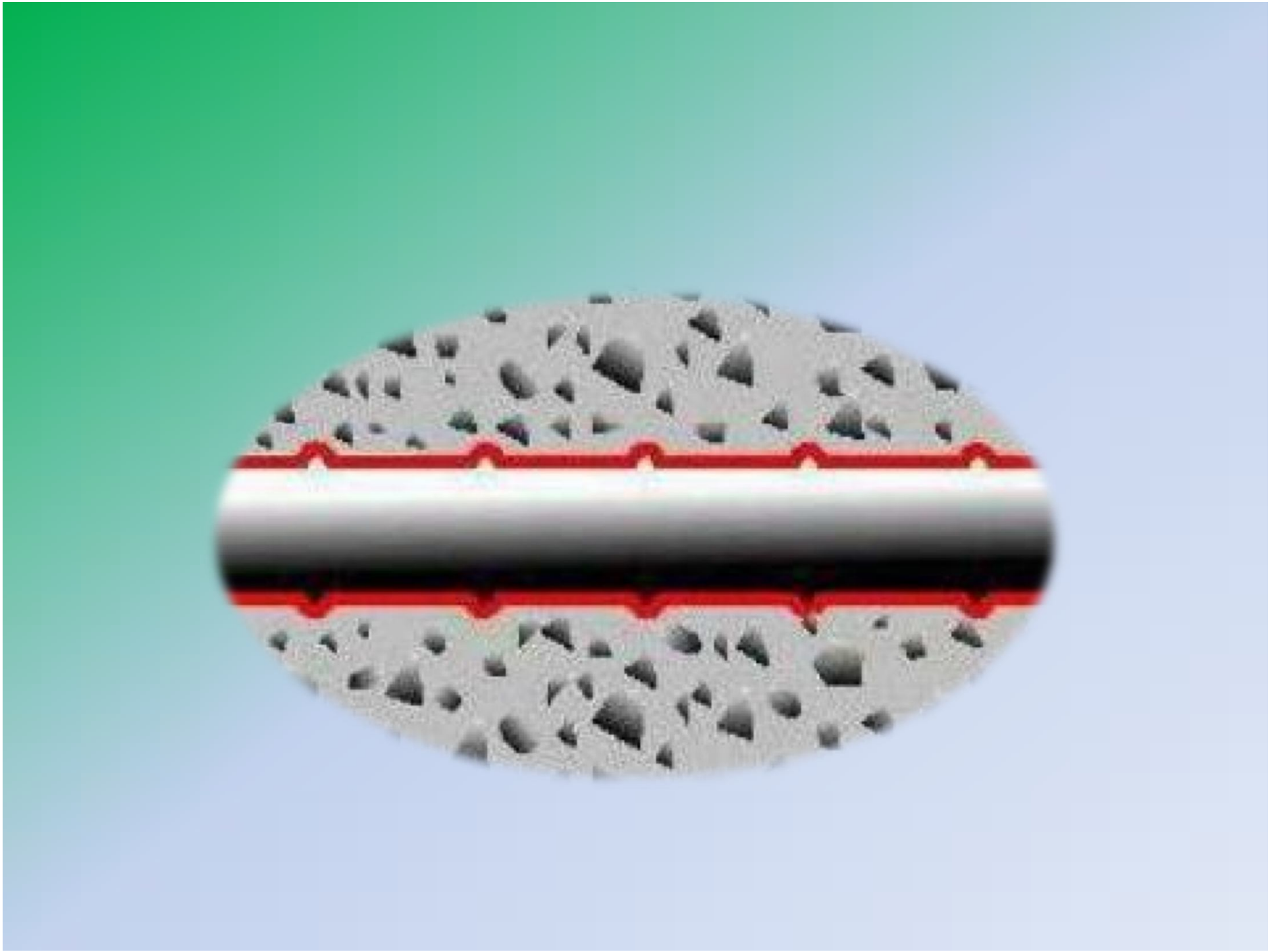
خوردگی آرماتور

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 سطع مقطع میلگردها نیز محتمل است.

خوردگی آرماتور

- طبیعت فوق‌العاده قلیایی بتن با تشکیل یک لایهٔ 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، لایهٔ محافظ اکسید آهن از بین می‌رود و به اکسیداسیون یا خوردگی فولاد منجر می شود.
- تبدیل آهن به زنگ همراه با افزایش حجمی است که علت اصلی انبساط و ترک‌خوردگی بتن می‌باشد.



تعاریف

- **فرآیند الکتروشیمیایی:**

واکنش‌های شیمیایی که در اثر عبور جریان الکتریکی انجام می‌شوند یا انجام یافتن آن‌ها سبب ایجاد جریان الکتریکی می‌شود.

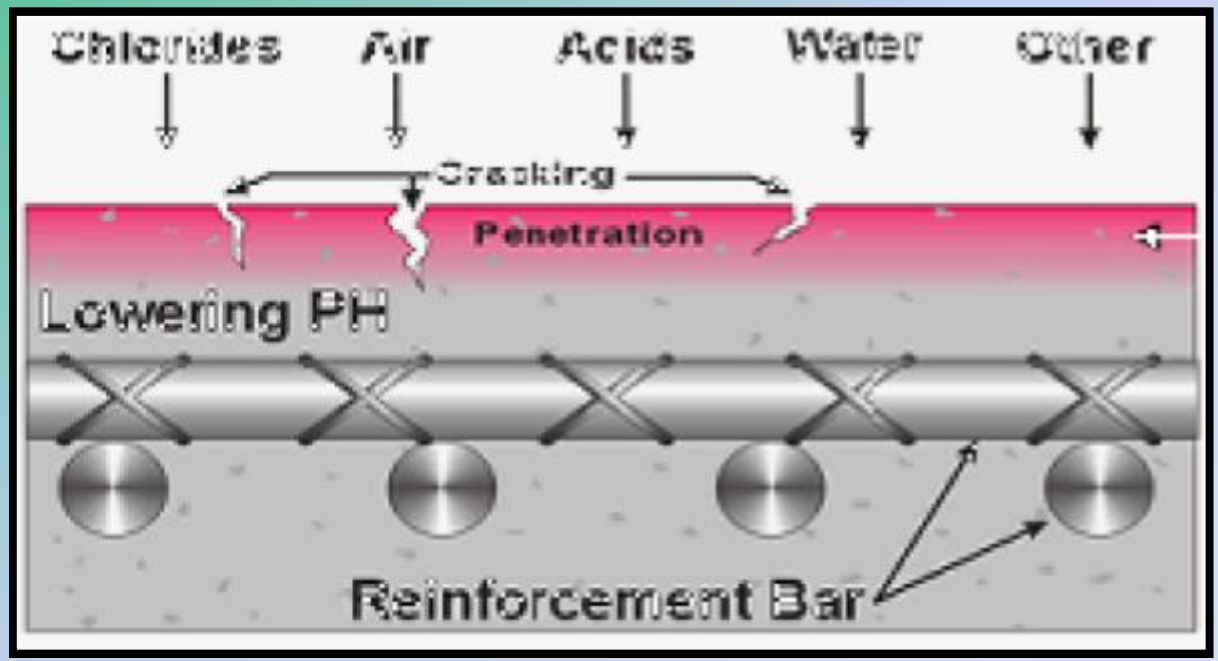
- **الکترولیت:**

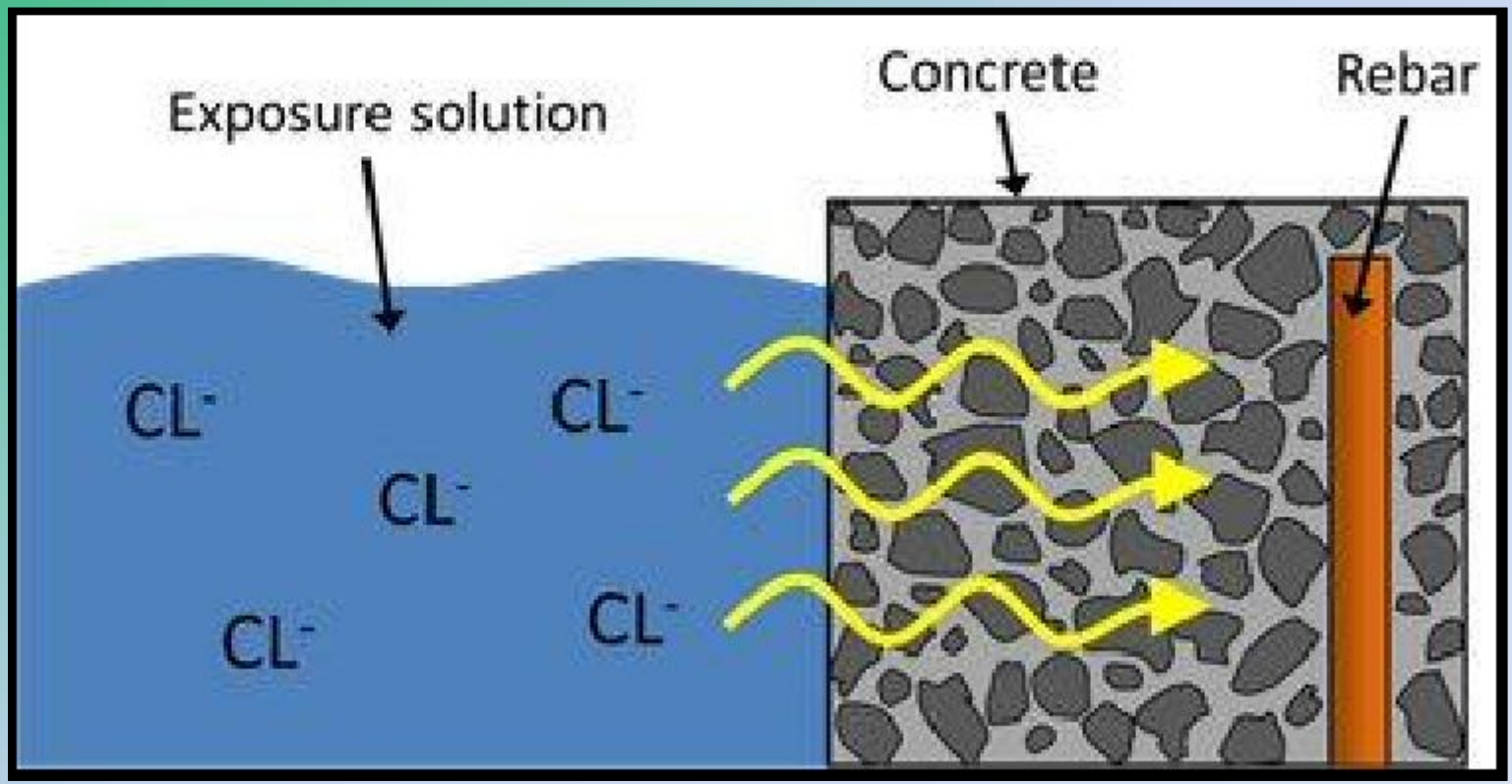
الکترولیت ماده حل‌شده یک محلول است که رسانایی الکتریکی آن بیشتر از حلال به تنهایی است. این نوع ماده حل‌شده در محلول (تمام یا قسمتی از آن) به صورت یون وجود دارد.

چند نمونه از الکترولیت های قوی، عبارتند از NaCl، MgSO4، Na2SO4

مکانیزم خوردگی آرماتور

- خوردگی فولاد به دلیل فرایند الکتروشیمیائی 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 می آید 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 بوسیلهٔ اجزاء الکترولیت جذب شده و پس از ترکیب با آب و اکسیژن، یونهای $(OH)^{-}$ را تشکیل می‌دهند.


Chlorides
Air
Acids
Water
Other
Cracking
Penetration
Lowering PH
Reinforcement Bar


Exposure solution
Concrete
Rebar
CL-
CL-
CL-
CL-
CL-

مکانیزم خوردگی آرماتور

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

$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$

$4e^{-} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^{-}$

$Fe^{++} + 2(OH)^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$

$2Fe^{+++} + 6(OH)^{-} \rightarrow 2Fe(OH)_3$

$2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O$

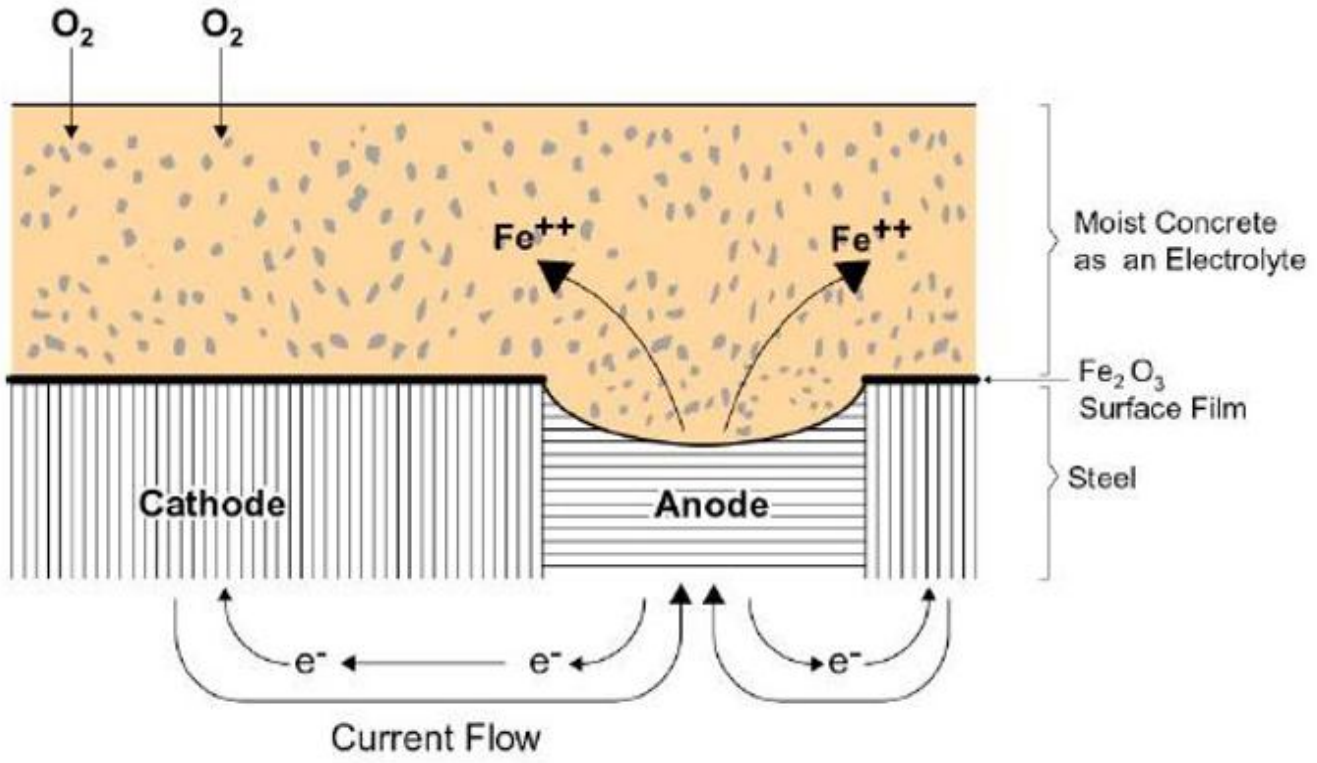
مکانیزم خوردگی آرماتور

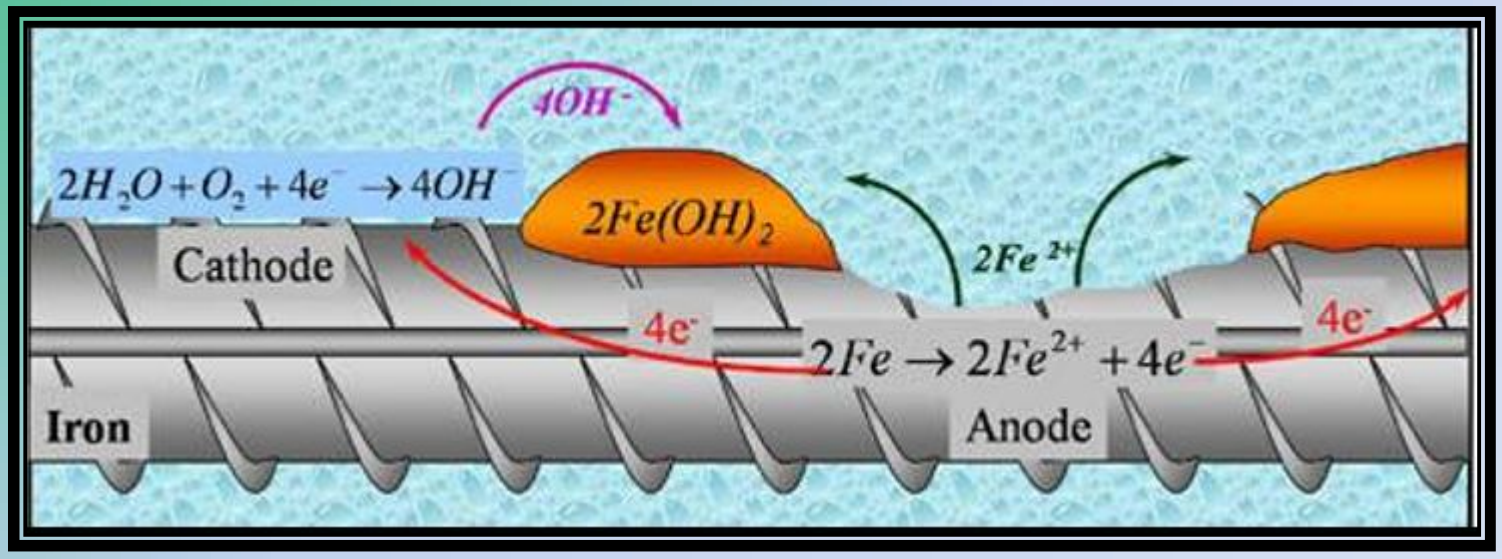
- ملاحظه می‌شود که اکسیژن مصرف شده، ولی آب دوباره تولید می‌شود و تنها برای ادامهٔ فرآیند ضروری می‌باشد.
- بنابراین در یک فضای کاملاً خشک و احتمالاً در رطوبت نسبی زیر ۴۰درصد، خوردگی وجود نخواهد داشت.
- همچنین در بتن‌های کاملاً غرق شده در آب، خوردگی زیادی وجود ندارد، مگراینکه هوا وارد آب شود. تحقیقات نشان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

مکانیزم خوردگی آرماتور

Cathode Process
$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Anode Process
$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$




4OH⁻
2H₂O + O₂ + 4e⁻ → 4OH⁻
2Fe(OH)₂
Cathode
2Fe²⁺
4e⁻
4e⁻
2Fe → 2Fe²⁺ + 4e⁻
Iron
Anode

خوردگی آرماتور

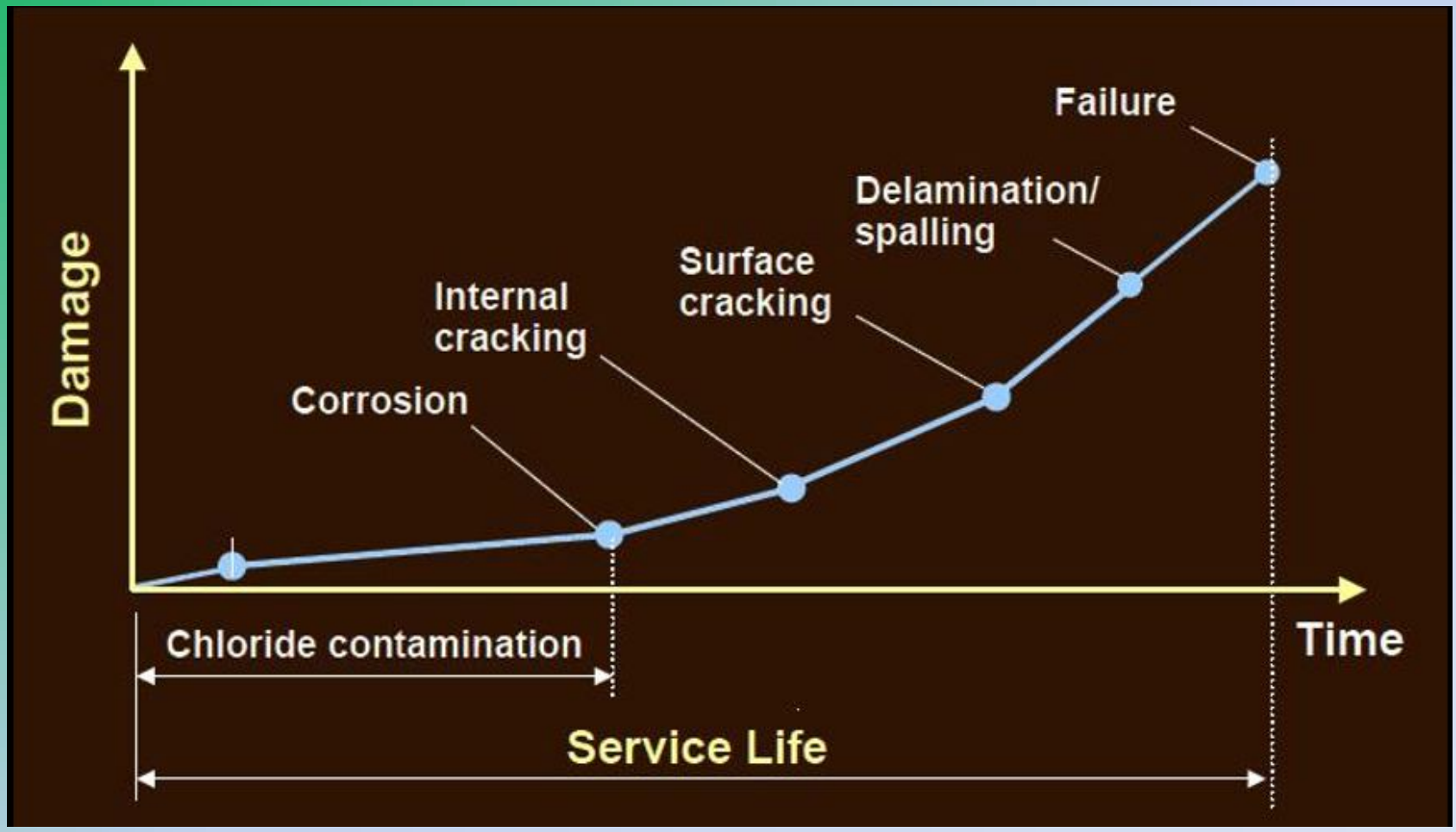
- دو عامل اصلی که موجب از بین رفتن لایه محافظ آرماتور می باشند عبارتند از **یون کلر و کربناتاسیون**.
- اگر بتن به اندازه‌ای نفوذپذیر باشد که کربناتاسیون به بتنی که در تماس با فولاد است برسد، یا کلریدهای محلول بتوانند تا محل آرماتورها نفوذ کنند، و آب و اکسیژن وجود داشته باشند، خوردگی آرماتورها حتمی خواهد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

تاثیر یون کلر

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

$$Cl^- + H_2O \rightarrow HCl + OH^-$$

$$Fe(OH)_2 + HCl \rightarrow Fe^{++} + Cl^- + H_2O$$


Damage
Failure
Delamination/
spalling
Surface
cracking
Internal
cracking
Corrosion
Time
Chloride contamination
Service Life

- 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.

تاثیر 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.

تاثیر 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 می‌تواند مفید باشد، زیرا با کلریدها ترکیب شده و کلرید آلومینات کلسیم (نمک فریدل) را تشکیل می‌دهد.
- به این دلیل استفاده از سیمان ضد سولفات که مقدار کمی C_3A دارد، می‌تواند خوردگی توسط کلریدها را افزایش دهد.

$$.Ca_2Al(OH)_6(Cl, OH) \cdot 2\ H_2O$$

تاثیر کربناتاسیون

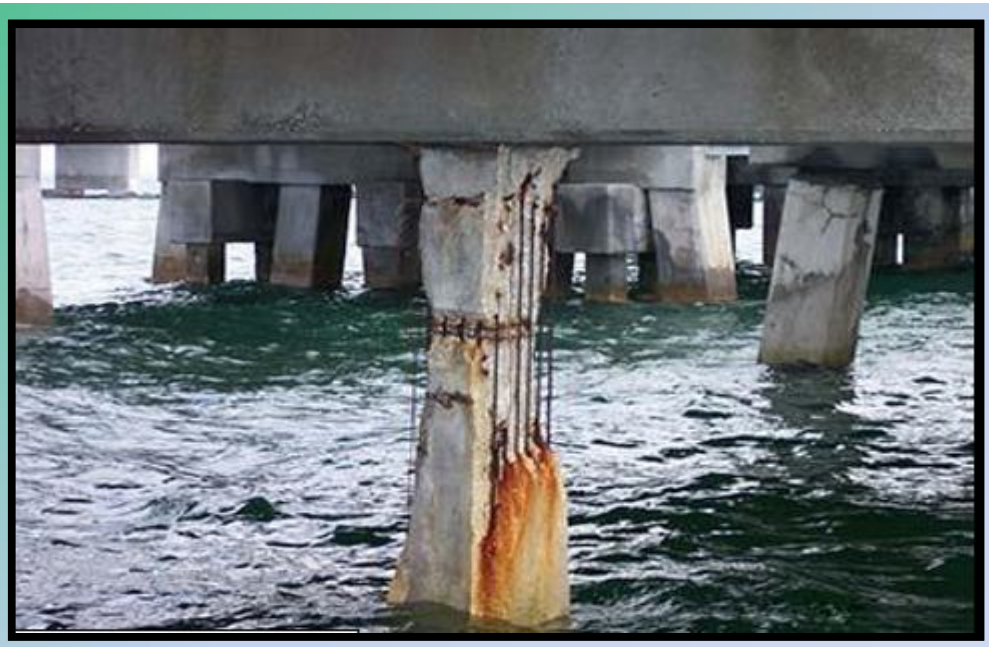
- به همین ترتیب تشکیل کربنات کلسیم از $Ca(OH)_2$ طی فرآیند کربناتاسیون خاصیت قلیایی را کاهش می‌دهد و در نتیجه لایهٔ محافظ از بین می‌رود.

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

- 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.

نمونه های خوردگی آرماتور

نمونه های خوردگی آرماتور



- ✓ عوامل موثر و نکات طراحی و اجرا
  - نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید
  - ضخامت بتن روی میلگرد
  - وجود درز و ترک در پوشش بتنی روی میلگرد
  - نوع میلگرد و شرایط سطحی آن
  - پوشش سطحی روی بتن
  - پوشش حفاظتی روی میلگرد
  - شرایط محیطی
  - وجود یون کلرید در بتن اولیه و مصالح مصرفی

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 روباره‌ای** 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 آیین‌نامه های ساختمانی مشخص شده است.
- همچنین برای بتنهایی که در معرض محیط خورنده قرار دارند، آیین‌نامه های مختلف شرایط حداقل **پوشش بتن** را مشخص می‌نماید.

طبقه بندی شرایط محیطی (آبا)

شرایط	دسته بندی	شرایط
متوسط	A	سازه‌های روزمینی که در معرض خطر نفوذ یون کلرید بر اثر وزش بادهای دارای یونهای نمک نیستند.
شدید	B	سازه‌های روزمینی در نواحی نزدیک به ساحل و در معرض وزش بادهای حاوی یونهای کلرید.
شدید	C	قسمتهایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیه موییننگی 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
بسیار شدید	D	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).
فوق‌العاده شدید	E	سازه‌های دریایی (دارای قسمتهایی در ناحیه جزر و مدی و. ناحیه پاشش)
فوق‌العاده شدید	F	سازه‌های نگهدارنده‌های آب و تصفیه‌خانه فاضلاب

الزامات شرایط محیطی (آبا)

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

پوشش بر اساس شرایط محیطی (آبا)

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

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 می گیرد.
- شاخص مخلوطهای بتنی مورد استفاده در روکش، از اسلامپ کم، و نسبت آب به سیمان خیلی‌کم (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 نسبتا 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)

کنترل خوردگی

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

تاثیر کربناتاسیون

- پدیده در بتن‌های غیرمسلح مخرب شناخته نشده و حتی می‌تواند به سخت‌تر شدن وکاهش فضاهای 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 موثر بر کربناتاسیون

- عوامل مؤثر بر پدیده کربناتاسیون را می‌توان به دو دسته عمده بتن ومشخصات 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 گازکربنیک 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

با تشکر از توجه و همراهی شما