

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوْتَادَ مِنْ  
تَحْتِ الْأَرْضِ وَالْحَمْدُ  
لِلَّهِ الَّذِي يَتَقَدَّسُ  
عَنِ الْمَلَكُوتِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
يَتَقَدَّسُ عَنِ الْمَلَكُوتِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
يَتَقَدَّسُ عَنِ الْمَلَكُوتِ



دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی عمران

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران گرایش سازه

موضوع:

بررسی تاثیر نانورس بر عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح تحت بارهای بهره-  
برداری و تهاجم کلراید

استاد راهنما:

دکتر حمید رحمانی

استاد مشاور:

دکتر شهاب الدین حاتمی

پژوهشگر:

طالب رودیان

تیرماه ۱۳۹۳

رساله‌ی حاضر، حاصل پژوهش‌های نگارنده در دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران گرایش سازه است که در تیرماه سال ۱۳۹۳ در دانشکده‌ی فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج به راهنمایی جناب آقای دکتر حمید رحمانی و مشاوره‌ی جناب آقای دکتر شهاب‌الدین حاتمی از آن دفاع شده و کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی آن متعلق به دانشگاه یاسوج است.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: کلیات

۱-۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	ضرورت انجام تحقیق	۲
۳-۱	اهداف تحقیق	۳
۴-۱	روش تحقیق	۳
۵-۱	مروری بر فصول پایان نامه	۴

### فصل دوم: خوردگی آرماتور در تیرهای بتن آرمه

۱-۲	مقدمه	۵
۲-۲	بتن مسلح و خوردگی میلگرد ها	۶
۱-۲-۲	بتن	۶
۲-۲-۲	بتن مسلح	۷
۱-۲-۲-۲	میلگرد های خمشی (طولی) و برشی (عرضی) در تیرهای بتن مسلح	۸
۳-۲-۲	دوام بتن مسلح در برابر تهاجم یون کلراید	۹
۱-۳-۲-۲	مکانیزم خوردگی میلگرد در بتن	۹
۲-۳-۲-۲	مکانیزم خوردگی آرماتور در حضور یون کلراید	۱۱
۳-۳-۲-۲	تاثیر خوردگی میلگردها بر روی مقاومت خمشی و خیز بتن مسلح	۱۳
۳-۲	کاهش نفوذپذیری بتن با استفاده از نانو مواد	۱۳
۴-۲	تاثیر مواد افزودنی بر دوام بتن مسلح در محیط خورنده کلرایدی	۱۵
۵-۲	دوام تیرهای بتن مسلح در محیط کلرایدی	۱۶
۱-۵-۲	خوردگی آرماتور در تیرها بدون در نظر گرفتن بارهای بهره‌برداری	۱۷
۲-۵-۲	خوردگی آرماتورها در تیرها با در نظر گرفتن بارهای بهره‌برداری	۲۳

### فصل سوم: مواد و مصالح مصرفی در تحقیق حاضر

۱-۳	مقدمه	۳۶
۲-۳	سیمان	۳۶
۳-۳	سنگدانه‌ها	۳۷
۴-۳	کاربرد نانو ذرات	۳۸
۱-۴-۳	رس‌ها	۳۹
۲-۴-۳	روش‌های تولید نانو مواد	۴۲
۳-۴-۳	نانوذرات رس (Nano-Clay)	۴۲

۴۴	۵-۳ فوق‌روان‌کننده.....
۴۴	۶-۳ بتن.....
۴۴	۷-۳ فولاد.....

#### فصل چهارم: روش انجام کار

۴۶	۱-۴ مقدمه.....
۴۶	۲-۴ طراحی تیرها.....
۵۶	۳-۴ محاسبه سختی فنر مورد استفاده جهت بارگذاری تیرها.....
۵۷	۴-۴ شرایط محیطی قرارگیری نمونه‌ها.....
۵۸	۵-۴ طرح اختلاط‌های مورد استفاده.....
۵۸	۶-۴ اعمال بار بهره‌برداری به تیرها.....
۵۹	۷-۴ نحوه‌ی ثابت نگهداشتن بارهای بهره‌برداری در مدت زمان آزمایش.....
۶۱	۸-۴ انجام سیکل تر و خشک.....
۶۲	۹-۴ چگونگی انجام آزمایش خمش تیرها.....
۶۳	۱۰-۴ برنامه‌ی آزمایشگاهی.....
۶۳	۱۱-۴ قالب‌بندی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری.....

#### فصل پنجم: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

۶۷	۱-۵ مقدمه.....
۶۷	۲-۵ مشاهدات بصری.....
۶۹	۳-۵ نتایج آزمایش‌های مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی طرح اختلاط‌ها.....
۶۹	۱-۳-۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها.....
۷۳	۲-۳-۵ نتایج آزمایش جذب آب نمونه‌های مکعبی.....
۷۷	۳-۳-۵ نتایج آزمایش تعیین درجه هیدراتاسیون.....
۷۹	۴-۵ نتایج مربوط به دوام تیرهای بتن مسلح.....
۷۹	۱-۴-۵ منحنی بار- تغییر مکان و مد گسیختگی تیرها.....
۸۱	۱-۴-۵ منحنی‌های بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب.....
۸۱	۲-۴-۵ منحنی‌های بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح بعد از ۶ ماه نگهداری در سیکل تر و خشک و محلول کلراید، بدون بار بهره‌برداری.....
۸۲	۳-۴-۵ منحنی‌های بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح بعد از ۶ ماه نگهداری در سیکل تر و خشک و محلول کلراید، تحت بار بهره‌برداری.....
۸۴	۴-۴-۵ تاثیر محلول کلراید و سیکل‌های تر و خشک بر عملکرد خمشی تیرها.....
۸۹	۵-۴-۵ تاثیر اعمال بارهای بهره‌برداری بر عملکرد خمشی تیرها.....
۹۲	۶-۴-۵ تاثیر نانورس بر عملکرد خمشی تیرها.....
۹۳	۵-۵ مقایسه‌ی سختی الاستیک تیرها.....
۹۵	۶-۵ مقایسه‌ی نتایج.....

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۷.....	۱-۶ مقدمه .....
۹۷.....	۲-۶ نتیجه‌گیری .....
۹۸.....	۳-۶ موارد پیشنهادی جهت مطالعات آتی .....
۱۰۰.....	فهرست منابع.....

## فهرست جدول‌ها

عنوان و شماره	صفحه
جدول ۱-۲: مشخصات خوردگی در تیرهای مورد آزمایش [۳۸].	۱۹
جدول ۲-۲: برنامه آزمایش‌ها [۴۲].	۲۹
جدول ۱-۳: نتایج آزمایش شیمیایی سیمان	۳۷
جدول ۲-۳: مشخصات مصالح مصرفی	۳۸
جدول ۳-۳: طرح اختلاط بتن‌های استفاده شده	۴۴
جدول ۱-۴: شرح آزمایش‌های مربوطه و تعداد نمونه‌ها	۶۵
جدول ۲-۴: جزئیات تیرهای تحت بررسی	۶۶
جدول ۱-۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری	۷۰
جدول ۲-۵: درصد مقاومت فشاری کسب شده نمونه‌ها نسبت به نمونه ۲۸ روزه	۷۱
جدول ۳-۵: درصد مقاومت فشاری کسب شده نمونه‌ها نسبت به نمونه ۱۴ روزه	۷۲
جدول ۴-۵: درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد در سنین مختلف	۷۲
جدول ۵-۵: درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب	۷۴
جدول ۶-۵: درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۹۰ روز عمل‌آوری در آب	۷۴
جدول ۷-۵: درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۱۰ روز عمل‌آوری در آب	۷۵
جدول ۸-۵: میزان کاهش جذب آب ۲۱۰ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه	۷۶
جدول ۹-۵: نتایج آزمایش درجه هیدراتاسیون خمیر سیمان	۷۹
جدول ۱۰-۵: نتایج آزمایش خمش تیرها	۸۰
جدول ۱۱-۵: مقایسه نمودارهای شکل ۵-۱۳	۸۲
جدول ۱۲-۵: مقایسه عددی نمودارهای شکل ۵-۱۵	۸۴
جدول ۱۳-۵: مقایسه نمودارهای شکل ۵-۱۵	۸۶
جدول ۱۴-۵: حداکثر تغییر مکان و بار متحمله	۸۹
جدول ۱۵-۵: حداکثر تغییر مکان و بار متحمله	۹۲
جدول ۱۶-۵: مقایسه‌ی شیب ناحیه‌ی الاستیک نمودار بار- تغییر مکان تیرها	۹۴

## فهرست شکل‌ها

عنوان و شماره	صفحه
شکل ۱-۲: فرآیند خوردگی میلگرد در بتن [۱۵].....	۱۰
شکل ۲-۲: افزایش حجم محصولات خوردگی فولاد مدفون در بتن [۱۵].....	۱۰
شکل ۳-۲: مکانیزم خوردگی آرماتور در حضور یون کلراید [۱۶].....	۱۱
شکل ۴-۲: حالت‌های مختلف پوشش میلگرد در فرآیند خوردگی.....	۱۲
شکل ۵-۲: ترک‌های مشهود بر اثر خوردگی آرماتورها [۳۸].....	۱۹
شکل ۶-۲: سیستم بارگذاری نمونه‌ها (اندازه‌ها به سانتیمتر) [۳۸].....	۱۹
شکل ۷-۲: سیکل‌های بارگذاری در نمونه‌ها [۳۸].....	۲۰
شکل ۸-۲: چرخه‌های هیسترسیس در حالت خمیری (سیکل دوم) [۳۸].....	۱۹
شکل ۹-۲: چرخه‌های هیسترسیس در حالت خمیری (مقاومت نهایی) [۳۸].....	۲۱
شکل ۱۰-۲: الف) نرخ کاهش سختی در بارگذاری نیمه اول سیکل‌ها ب) نرخ کاهش سختی در بارگذاری نیمه دوم سیکل‌ها [۳۸].....	۲۱
شکل ۱۱-۲: جزئیات آرماتورگذاری تیرهای گروه A و B [۴۱].....	۲۴
شکل ۱۲-۲: نحوه بارگذاری و نگهداری نمونه‌ها در محیط خورنده [۴۱].....	۲۵
شکل ۱۳-۲: نقشه ترک‌ها در تیر B2 بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری [۴۱].....	۲۵
شکل ۱۴-۲: نقشه ترک‌ها در تیر B2 بعد از ۶ سال [۴۱].....	۲۶
شکل ۱۵-۲: نقشه ترک‌ها در تیر B2 بعد از ۱۴ سال [۴۱].....	۲۶
شکل ۱۶-۲: نقشه ترک‌ها در تیر B2 بعد از ۱۷ سال [۴۱].....	۲۷
شکل ۱۷-۲: میزان کلراید کل در عمق قرارگیری میلگرد (۱۶ میلیمتر) در نواحی بتن فشاری و کششی تیرهای خورده شده در سنین مختلف [۴۱].....	۲۷
شکل ۱۸-۲: تغییر شکل وسط تیرها بعد از ۱۴ و ۱۷ سال نگهداری [۴۱].....	۲۸
شکل ۱۹-۲: نحوه بارگذاری و قرارگیری نمونه‌ها در محلول نمک [۴۲].....	۲۸
شکل ۲۰-۲: تاثیر میزان خاکستر بادی بر نفوذ کلراید به صورت یک بعدی [۴۲].....	۲۹
شکل ۲۱-۲: تاثیر میزان خاکستر بادی بر نفوذ کلراید به صورت دو بعدی [۴۲].....	۳۰
شکل ۲۲-۲: تاثیر نسبت آب به مواد پودری بر نفوذ کلراید به صورت یک بعدی [۴۲].....	۳۰
شکل ۲۳-۲: تاثیر نسبت آب به مواد پودری بر نفوذ دو بعدی [۴۲].....	۳۱
شکل ۲۴-۲: تاثیر نسبت تنش اعمالی بر نفوذ یک بعدی یون کلراید در نمونه‌های ۴۰٪ خاکستر بادی [۴۲].....	۳۱
شکل ۲۵-۲: تاثیر نسبت تنش اعمالی بر نفوذ دو بعدی یون کلراید در نمونه‌های ۴۰٪ خاکستر بادی [۴۲].....	۳۲
شکل ۲۶-۲: نمونه تیرهای بتن مسلح [۴۳].....	۳۲



- شکل ۲-۲۷: آماده کردن تیرها جهت ایجاد خوردگی تسریع شده [۴۳]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۸: نمودار بار تغییر شکل تیر تحت تاثیر همزمان بار و خوردگی میلگرد [۴۳]..... ۳۴
- شکل ۲-۲۹: نمودار تغییر شکل افزایش یافته بر حسب زمان تحت بارگذاری و خوردگی [۴۳]..... ۳۴
- شکل ۲-۳۰: اثرات همزمان بارگذاری و خوردگی بر رفتار (عملکرد خمشی) تیرها [۴۳]..... ۳۵
- شکل ۳-۱: نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده و حدود استاندارد..... ۳۷
- شکل ۳-۲: نمودار دانه‌بندی شن مورد استفاده و حدود استاندارد..... ۳۸
- شکل ۳-۳: (a) آلومین هشت وجهی و (b) ورقه هشت وجهی آلومینا (گیسیست) [۵۳]..... ۴۰
- شکل ۳-۴: (a) سیلیس چهار وجهی و (b) ورقه چهار وجهی سیلیکا [۵۳]..... ۴۱
- شکل ۳-۵: (الف) کائولینیت (ب) ایلیت (ج) مونت موریلونیت [۵۵]..... ۴۱
- شکل ۳-۶: نانورس مونت موریلونیت..... ۴۳
- شکل ۳-۷: توزیع اندازه ذرات نانورس مصرفی در تحقیق حاضر..... ۴۳
- شکل ۳-۸: نمودار تنش- کرنش میلگرد کششی ( $\emptyset 12$ ) مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۴۵
- شکل ۴-۱: ابعاد تیرهای مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۴۷
- شکل ۴-۲: چگونگی قرارگیری میلگردها در مقطع..... ۴۷
- شکل ۴-۳: دیاگرام تنش و کرنش مقطع در حالت بالانس (تعادل)..... ۴۷
- شکل ۴-۴: دیاگرام تنش و کرنش مقطع در حالتی که فولاد فشاری جاری می‌شود..... ۴۹
- شکل ۴-۵: دیاگرام تنش و کرنش مقطع در حالتی که فولادهای کششی جاری می‌شوند و فولاد فشاری جاری نمی‌شود..... ۵۰
- شکل ۴-۶: چگونگی بارگذاری تیر..... ۵۲
- شکل ۴-۷: مقطع معادل جهت محاسبه‌ی لنگر ترک خوردگی..... ۵۳
- شکل ۴-۸: مقطع معادل برای محاسبه‌ی بار بهره‌برداری..... ۵۴
- شکل ۴-۹: نحوه اندازه‌گیری سختی فنر..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: نحوه فشرده شدن کامل فنر توسط دستگاه تست خمش..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱: نحوه‌ی اعمال بار بهره‌برداری به تیرها (الف) دید از پهلو (ب) دید از بالا..... ۵۹
- شکل ۴-۱۲: ترک خمشی ایجاد شده در اثر بار بهره‌برداری..... ۵۹
- شکل ۴-۱۳: شکل شماتیک حوضچه‌های نگهداری نمونه‌ها در محلول کلراید..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴: نحوه قرارگیری نمونه‌ها در محلول کلراید..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵: چگونگی آزمایش خمش تیرهای بتن مسلح (الف) شماتیک (ب) واقعی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۶: عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی در آب..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷: آرماتوربندی تیرها..... ۶۴
- شکل ۴-۱۸: قالب‌های چوبی مورد استفاده..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹: نحوه قرارگیری میلگردها در قالب‌ها..... ۶۴
- شکل ۴-۲۰: بتن‌ریزی تیرهای بتن مسلح..... ۶۵
- شکل ۴-۲۱: لایه‌ی نازک نانورسی تشکیل شده بر روی نمونه‌های حاوی نانورس..... ۶۸
- شکل ۴-۲۲: ترک‌های ایجاد شده در تیرها پس از آزمایش خمش (الف) تیر در سن ۲۸ روز (ب) تیر پس از ۶ ماه قرارگیری در محیط خورنده..... ۶۹
- شکل ۴-۲۳: لکه‌های زنگ ایجاد شده در تیرهای تحت بار بهره‌برداری در محلول کلراید و سیکل تر خشک..... ۶۹
- شکل ۴-۲۴: مد گسیختگی نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری..... ۷۰

- شکل ۵-۵: مقاومت فشاری طرح اختلاطها..... ۷۰
- شکل ۵-۶: درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه ۱۴ روزه..... ۷۲
- شکل ۵-۷: نمودار جذب آب ۰/۵ ساعته نمونه‌ها..... ۷۵
- شکل ۵-۸: نمودار جذب آب ۲۴ ساعته نمونه‌ها..... ۷۶
- شکل ۵-۹: کاهش جذب آب ۲۱۰ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه..... ۷۷
- شکل ۵-۱۰: نمونه خمیری قرار داده شده در استون جهت توقف واکنش هیدراتاسیون..... ۷۸
- شکل ۵-۱۱: قرار دادن نمونه های خمیر سیمان در کوره..... ۷۸
- شکل ۵-۱۲: مد گسیختگی تیرها..... ۸۰
- شکل ۵-۱۳: نمودار بار- تغییر مکان برای تیرهای حاوی درصدهای مختلف نانورس پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب..... ۸۲
- شکل ۵-۱۴: مقایسه نمودار آزمایش خمشی تیرهای بدون بار بهره‌برداری قرار گرفته در سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید به مدت ۶ ماه..... ۸۳
- شکل ۵-۱۵: منحنی‌های بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک تحت بار بهره‌برداری پس از ۶ ماه..... ۸۵
- شکل ۵-۱۶: تاثیر سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید به مدت ۶ ماه بر روی عملکرد خمشی تیرهای بدون نانورس..... ۸۷
- شکل ۵-۱۷: تاثیر سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید به مدت ۶ ماه بر روی عملکرد خمشی تیر حاوی ۰/۵ درصد نانورس..... ۸۷
- شکل ۵-۱۸: تاثیر سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید به مدت ۶ ماه بر روی عملکرد خمشی تیر حاوی ۰/۵ درصد نانورس..... ۸۸
- شکل ۵-۱۹: نمودار بار- تغییر مکان تیر با بار بهره‌برداری (B3) و تیر بدون بار بهره‌برداری (B1)..... ۹۰
- شکل ۵-۲۰: نمودار بار- تغییر مکان تیر با بار بهره‌برداری (B9) و تیر بدون بار بهره‌برداری (B1)..... ۹۰
- شکل ۵-۲۱: نمودار بار- تغییر مکان تیر با بار بهره‌برداری (B3) و تیر بدون نانورس (B2)..... ۹۱
- شکل ۵-۲۲: نمودار بار- تغییر مکان تیر با بار بهره‌برداری (B9) و تیر بدون بار بهره‌برداری (B8)..... ۹۱
- شکل ۵-۲۳: نمودار بار- تغییر مکان تیر بدون نانورس و تیر حاوی ۰/۱ نانورس پس از ۶ ماه قرارگیری در محلول و سیکل تر و خشک..... ۹۳
- شکل ۵-۲۴: نمودار بار- تغییر مکان تیر بدون نانورس و تیر حاوی ۰/۱ نانورس پس از ۶ ماه قرارگیری در محلول و تحت بار بهره‌برداری و سیکل تر و خشک..... ۹۳

## فصل اول

### کلیات

#### ۱-۱ مقدمه

مقاومت بالا و دسترسی آسان به اجزا تشکیل دهنده بتن، این ماده را به عنوان یکی از اجزا شاخص و کلیدی سازه‌ها و ابنیه معرفی می‌کند. یکی از دغدغه‌های مهندسين سازه، استفاده بهینه و ایمن از بتن مسلح است. از عواملی که استفاده از بتن مسلح را با چالش مواجه کرده و ایمنی و کاربری آن را در طول زمان و به خصوص در محیط‌های خورنده به خطر انداخته است، خوردگی آرماتور در بتن توسط یون کلراید می‌باشد. در این میان نفوذپذیری بتن نقش بسزایی در خوردگی آرماتورها و نهایتاً تخریب بتن داشته است. نفوذپذیری با تخلخل رابطه مستقیمی دارد، یعنی هر چقدر بتن تخلخل بیشتری داشته باشد نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد و در نتیجه اگر این بتن در معرض یون‌های کلراید قرار گیرد، خوردگی میلگردها سریع‌تر رخ می‌دهد. در سازه‌های واقعی به علت بارهای بهره‌برداری عضو بتن آرمه ترک می‌خورد. وجود این ترک‌ها باعث می‌شود یون‌های کلراید به آسانی وارد بتن شوند و در نتیجه خوردگی میلگردها بیشتر شده و عملکرد عضو بتن آرمه کاهش یابد. همچنین در سال‌های اخیر تحقیقاتی بر روی نقش افزودنی‌های مختلف بر دوام بتن مسلح در محیط‌های خورنده نیز انجام گرفته است. به دلیل اینکه ذرات رس دارای بار مثبت و منفی در سطح خود می‌باشند، این احتمال وجود دارد که یون‌های کلر که دارای بار منفی هستند توسط بار مثبت موجود بر سطح ذرات رس جذب شده و باعث کاهش خوردگی آرماتورها گردد.

## ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

در سال‌های اخیر، خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن به عنوان یکی از مهمترین دلایل اصلی خرابی‌های زودرس در سازه‌های بتن‌آرمه شناخته شده است. در محیط‌های دریایی معمولاً انتشار یون کلراید و یون سولفات به داخل بتن و خوردگی ناشی از آن‌ها عامل اصلی خرابی‌ها و کاهش عمر مفید سازه‌های بتن‌آرمه می‌باشد. امروزه به دلیل گسترش و اهمیت فعالیت‌های نفتی و حمل و نقل دریایی و همچنین توجه به استخراج معدن در بستر دریاها، فعالیت‌های ساختمانی مانند ساخت اسکله‌ها، سکوها و سازه‌هایی مانند آن‌ها در مناطق ساحلی و اقیانوسی افزایش چشمگیری داشته است. هر چند بتن به عنوان یک ماده با دوام در محیط دریا محسوب می‌گردد، اما خرابی‌های زیادی از سازه‌های بتنی کنار ساحل گزارش شده است. هنگام طراحی سازه‌های بتنی که در مجاورت آب دریا قرار می‌گیرند، در نظر گرفتن اثر عوامل محیطی مخربی که بتن طی سالیان دراز عمر بهره‌برداری در معرض آن قرار می‌گیرد ضروری بوده و به نظر می‌رسد طراحی بر اساس معیار مقاومت برای این‌گونه سازه‌ها کافی نبوده و لازم است علاوه بر معیار مقاومت، به دوام بتن نیز در این نواحی توجه گردد. شرایط حاکم در خلیج فارس چه از نظر املاح موجود در آب دریا و چه از نظر شرایط اقلیمی حاکم در آن، این محیط را به یکی از مهاجم‌ترین محیط‌های دریایی از دیدگاه خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی مبدل ساخته است [۱]. خرابی‌های زودرس سازه‌های بتنی منطقه خلیج فارس در اثر خوردگی آرماتور، تاکنون هزینه‌های تعمیراتی زیادی را به کشورهای منطقه اعمال نموده است [۱]. به همین خاطر، تحقیقات زیادی در خصوص پایایی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس انجام شده است [۵-۱]. وجه اشتراک تحقیق حاضر با محیط خلیج فارس، وجود عامل مهاجم، یعنی یون کلراید و ایجاد سیکل تر و خشک می‌باشد. همچنین در رویه‌های بتنی به دلیل استفاده از نمک‌های یخ‌زدا در زمستان، رویه‌ی بتنی نیز در معرض نفوذ یون‌های کلراید قرار گرفته و به آن آسیب جدی وارد می‌سازد. در شبکه‌های فاضلاب نیز یون‌های کلراید به داخل بتن نفوذ کرده و خسارت‌های قابل توجهی به این شبکه‌ها وارد می‌سازند. از آنجا که بتن در کشش ضعیف بوده و به علت بارهای بهره‌برداری ترک می‌خورد، لذا یون‌های کلر به راحتی از طریق این ترک‌ها وارد بتن می‌شوند و موجب خوردگی میلگردها خواهند شد. لازم به ذکر است که قرارگیری بتن مسلح در محلول حاوی یون کلراید به تنهایی باعث خوردگی آرماتور نمی‌شود و برای آن که میلگرد بتن مسلح قرار گرفته شده در محلول کلراید دچار خوردگی شود، باید اکسیژن کافی در سطح میلگرد موجود باشد. لذا وقوع چرخه تر و خشک شدن به منظور تامین اکسیژن لازم جهت خوردگی آرماتور در عضو بتن‌آرمه، امری اجتناب‌ناپذیر است.

سازه‌های بتن مسلح واقعی، به منظور تحمل بارهای بهره‌برداری، طراحی و ساخته شده‌اند. بنابراین جهت بررسی رفتار سازه‌ای این اعضا که در معرض محیط‌های خورنده قرار گرفته‌اند، نیاز به شبیه‌سازی کامل شرایط آن‌ها در آزمایشگاه می‌باشد. اما تحقیقات بسیار محدودی در خصوص تاثیر همزمان بارگذاری و تهاجم یون‌های کلراید انجام شده است. لذا در این تحقیق به علت اعمال بارهای بهره‌برداری به تیرها، نمونه‌ها دچار ترک خمشی در ضخامت پوشش شده و یون‌های کلراید به راحتی به داخل پوشش بتنی روی میلگرد نفوذ می‌کنند. برای تامین اکسیژن کافی جهت خوردگی میلگردها، از چرخه‌ی تر و خشک شدن استفاده شده است. یکی از راه‌های جلوگیری از ایجاد خوردگی در

میلگردهای عضو بتن مسلح تحت بار بهره‌برداری، مهار کردن یون کلراید می‌باشد. انتظار می‌رود استفاده از مواد افزودنی همچون نانورس که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، بتواند موجب جذب یون‌های کلراید در طول ضخامت پوشش و در نتیجه کاهش خوردگی میلگردها و جلوگیری از ضعف در باربری عضو بتن مسلح گردد. این امر بر اهمیت تحقیق حاضر می‌افزاید.

### ۳-۱ اهداف تحقیق

در این تحقیق اهداف زیر مورد نظر می‌باشد:

- ۱- بررسی تاثیر نانورس در مشخصات مکانیکی بتن معمولی.  
نانورس با درصدهای ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ با بتن معمولی مخلوط شده و برای هر طرح اختلاط ۱۴ نمونه مکعبی ۱۰ سانتیمتری به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری و درصد جذب آب در سنین مختلف ساخته شده است.
- ۲- تعیین میزان تأثیر نانورس بر میزان خوردگی آرماتورهای تیر بتن مسلح تحت بارهای بهره‌برداری و سیکل‌های تر و خشک.  
برای هر چهار طرح اختلاط با درصدهای مختلف نانورس، ۶ عدد تیر بتن مسلح بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی و ساخته می‌شود. تیرها از نظر شرایط نگهداری به گروه‌های مختلف دسته‌بندی شده و در سنین مختلف تحت آزمایش خمشی قرار می‌گیرند.

### ۴-۱ روش تحقیق

برای انجام این پایان‌نامه نیاز به ساخت و آزمایش نمونه‌های تیر بتن مسلح با طرح اختلاط‌های لازم می‌باشد. طرح اختلاط‌های استفاده شده در این تحقیق شامل چهار طرح با ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی سیمان نانورس جایگزین سیمان می‌باشد. ۲۴ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد  $120 \times 150 \times 1000$  میلیمتر قالب‌بندی و بتن‌ریزی گردید و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب به سه گروه تقسیم‌بندی شدند. گروه اول شامل ۸ عدد تیر است که پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند که همان نمونه‌های شاهد می‌باشند. گروه دوم شامل ۸ عدد تیر بدون بارگذاری به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و تحت چرخه تر و خشک قرار گرفتند و گروه سوم شامل ۸ عدد تیر بارگذاری شده است که به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و تحت چرخه تر و خشک قرار گرفتند. پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، مطابق برنامه زمانی مشخص، آزمایش‌ها انجام شده و نتایج ثبت گردید. همچنین جهت ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی طرح اختلاط‌ها، به ازای هر طرح اختلاط ۱۴ نمونه مکعبی ۱۰ سانتیمتری به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری و جذب آب در سنین مختلف ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند.

## ۵-۱ مروری بر فصول پایان نامه

مباحث و موضوعات مطرح شده در این پایان نامه به تفکیک فصل به شرح زیر می‌باشد:

پس از بیان کلیات در فصل اول، در فصل دوم مکانیزم خوردگی آرماتور در تیرهای بتن‌آرمه تشریح شده و سپس به مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. در فصل سوم خصوصیات مصالح مصرفی (سیمان، مصالح سنگی، فولاد و ...) تشریح خواهد شد. در فصل چهارم روش انجام کار از قبیل چگونگی ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های مربوطه تشریح می‌شود. در فصل پنجم نیز، نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها ارائه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در فصل آخر، نتیجه‌گیری کلی از تحقیق حاضر و همچنین جهت مطالعات و تحقیقات آینده پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

## فصل دوم

### خوردگی آرماتور در تیرهای بتن آرمه

#### ۱-۲ مقدمه

مهم‌ترین خرابی سازه‌های بتنی ناشی از خوردگی آرماتور بر اثر کربناتاسیون یا از بین رفتن لایه‌ی محافظ آن‌ها بر اثر نفوذ یون کلراید به درون سازه بتن آرمه است [۶]. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که یون‌های کلراید، که منشأ آن‌ها عمدتاً آب دریا یا مواد یخ‌زدا است، علت اصلی خوردگی فولاد درون بتن‌های روسازی‌های بتنی، پل‌ها و سازه‌های دریایی می‌باشد [۶]. در بعضی مواقع نفوذ کلراید فقط از طریق منافذ انجام شود. اما در سازه‌های واقعی بارهای بهره‌برداری باعث ایجاد ترک در سازه شده و در نتیجه نفوذ یون کلراید در بتن از طریق این ترک‌ها نیز صورت می‌گیرد. یون‌های کلراید وارده به بتن از طریق ساختار منفذی بتن و ریزترک‌های آن، موجب آن می‌شود که لایه‌ی نازک غیر فعال آرماتور فولادی از بین رفته و واکنش خوردگی فولاد شروع شده و یا آن را تشدید کند. حتی بتن‌های با کیفیت بالا نیز ممکن است در چنین شرایط سختی از دوام درازمدتی برخوردار نباشند. همچنین در سال‌های اخیر به منظور بهبود دوام و خواص مکانیکی بتن، از افزودنی‌های مختلفی استفاده شده است. در تحقیق حاضر، تاثیر استفاده از نانورس مونت موریلونیت به عنوان افزودنی، بر روی دوام و خواص مکانیکی بتن بررسی شده است. در زمینه کاربرد نانو مواد در بتن و همچنین دوام بتن و استفاده از افزودنی‌های مختلف به بتن در محیط‌های دریایی، کارهای تحقیقاتی فراوانی انجام شده که در ادامه این فصل ابتدا مکانیزم خوردگی آرماتور در بتن تشریح شده و سپس به برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه اشاره خواهد شد.

## ۲-۲ بتن مسلح و خوردگی میلگردها

بشر در طول تاریخ همواره به دنبال رفع نیازهای خود به کمک طبیعت بوده است. یکی از این نیازها، ساخت بناهای مختلف برای اهداف مشخص می‌باشد. یکی از مواد پرکاربرد در صنعت ساخت و ساز بتن می‌باشد که به دلیل اقتصادی بودن و همچنین کارایی مناسب، روز به روز استفاده از این ماده‌ی ارزشمند بیشتر می‌شود. در کنار این مزایا بتن در کشش به شدت دچار ضعف بوده که برای حل این مشکل، از میلگرد، پلیمرهای مسلح شده با الیاف<sup>۱</sup> (FRP) و غیره استفاده می‌شود که ضعف مقاومت کششی بتن را از بین می‌برد. اما اگر سازه‌ی بتن مسلح در مجاورت عوامل مهاجم همچون یون کلراید قرار گیرند، ممکن است یون‌های کلراید به میلگردهای فولادی برسند و باعث خوردگی و در نتیجه عدم کارکرد مناسب میلگردها در کشش شود و در سازه خرابی ایجاد شود. در این بخش پس از ارائه کلیاتی در مورد بتن و بتن مسلح، مکانیزم خوردگی میلگردهای فولادی در مجاورت یون کلراید تشریح می‌شود.

### ۲-۲-۱ بتن

امروزه بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته شده است. وجود منابع فراوان مواد متشکل، سازگاری با محیط و مقاومت مطلوب دلایل مصرف روزافزون این ماده می‌باشد. مواد تشکیل دهنده بتن شامل: الف) سیمان ب) سنگدانه ج) آب و د) مواد افزودنی می‌باشد که در ادامه به شرح مختصری از مواد متشکله پرداخته می‌شود.

**الف) سیمان:** سیمان فراورده‌ای است شیمیایی که دارای خاصیت چسبندگی است و در اثر تماس با آب سخت شده و محصول حاصله در برابر آب و رطوبت از دوام بالایی برخوردار است. سیمان در بتن نقش چسباننده دانه‌های سنگی را دارد. بسترین ماده تشکیل دهنده سیمان را آهک و سیلیس تشکیل می‌دهد. خاصیت چسبندگی سیمان به خاطر وجود این دو ماده است. سیمان از حدود سه هزار سال پیش شناخته و به کار رفته است. رومی‌ها آن را به مقدار زیادی در ابنیه خود به کار برده‌اند. سیمانی که در گذشته استفاده شده است نوعاً، سیمان طبیعی و یا پوزولان بوده است که در آن از اختلاط سنگ آهک و خاک رس و یا خمیر آهک و خاکسترهای آتشفشانی حاوی سیلیس بدست می‌آمده است [۷]. ایرانیان نیز با مخلوط کردن خمیر آهک و خاکستر ساروج را تهیه می‌کردند که چیزی شبیه سیمان بوده است. در سال ۱۸۲۴ اولین قدم برای ساخت سیمان به مفهوم امروز برداشته شد [۷]. اسپدین<sup>۲</sup> از کلسینه کردن مخلوط سنگ آهک و خاک پودری را تهیه کرد که پس از مخلوط کردن با آب، ماده سخت و سنگی را ایجاد می‌نمود که شبیه سنگ معدن منطقه پرتلند واقع در انگلستان بود به همین خاطر به آن سیمان پرتلند می‌گفتند. تهیه و تولید سیمان به مرور زمان اصلاح و بهتر شد اما اساس کار هیچ تغییری نکرده است.

**ب) سنگدانه‌ها:** حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد از حجم بتن را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد. از این رو سنگدانه‌ها در رفتار بتن نقش قابل توجهی را ایفا می‌کنند. سنگدانه‌ها به دو گروه درشت دانه (شن) و

<sup>۱</sup> Fibre Reinforced Polymer

<sup>۲</sup> Aaspdin



ریزدانه (ماسه) تقسیم می‌شوند. هر چه ترکیب این ذرات با دقت بیشتری انجام گیرد، میزان فضای خالی در بتن کاهش یافته و در نتیجه مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.

**ج) آب:** یکی از اجزای اصلی بتن محسوب می‌شود و فقط به سبب وجود آب است که واکنش شیمیایی در بتن انجام می‌شود. کیفیت آب در بتن از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است در گیرش سیمان اثر گذاشته و موجب به وجود آمدن اختلالاتی شود.

**د) مواد افزودنی:** مواد شیمیایی خاصی هستند که به صورت گرد یا مایع برای اصلاح بعضی از خواص بتن به مخلوط بتن اضافه می‌شود. برخی از این مواد مضاف عبارت‌اند از: (۱) زودگیر کننده‌ها (۲) دیرگیرکننده‌ها (۳) روان کننده‌ها (۴) حباب سازها (۵) ضد یخ‌ها (۶) مواد پوزولانی. در این تحقیق از نانورس به عنوان مواد افزودنی در بتن معمولی استفاده خواهد شد.

## ۲-۲-۲ بتن مسلح

بتن سنگی مصنوعی بوده و مانند سنگی طبیعی ماده‌ای ترد (یا شکننده) قوی از نظر فشار و ضعیف از لحاظ کشش می‌باشد. از قدیم گاهی برای تقویت یا تسلیح مصالح سنگی و بتن از فلزات استفاده می‌کردند. بام یک گرمابه رومی از نوع بتن با مصالح سنگی درشت احداث شده که توسط میله‌های برنزی و آهنی تقویت گردیده است. معماری به نام رن<sup>۱</sup> برای ایجاد مقاومت در گنبد کلیسای سن پال در برابر فشارهای جانبی زنجیری آهنی قرار داده و معماری دیگر به نام سوفلو<sup>۲</sup> [۸] از میله‌های آهن کار شده در بنای سنگی کلیسای سن سولپیس<sup>۳</sup> پاریس استفاده نموده است. ولی تا قرن نوزدهم اصول تقویت به صورت علمی امروزی ناشناخته بود و تنها در اواخر قرن نوزدهم بود که روش‌های محاسباتی ابداع شد. یکی از اولین نمونه‌های بتن مسلح در نمایشگاه بین‌المللی پاریس به نمایش گذارده شد. این نمونه یک قایق آبی بود که توسط یک پیمانکار فرانسوی به نام لامبو<sup>۴</sup> طراحی و با بتن آهنی تقویت شده توسط شبکه‌ای از میله‌های آهنی ساخته شد. در سال ۱۸۵۴، یک کارگر گچ‌کار انگلیسی به نام ویلکینسون<sup>۵</sup> [۸] روشی را برای احداث تاوله‌های بتنی که به کمک یک شبکه گسترده از میله‌های آهنی و یا سیم‌های فرعی تقویت می‌شدند به ثبت رساند. روش وی در قرار دادن فولادهایی برای تحمل تنش‌های کششی نشان می‌دهد که او اصول مربوط به اجرای بتن مسلح را درک می‌کرده است. روش‌های بسیاری در طی قرن نوزدهم به ثبت رسیدند که در این تاریخچه به تعداد محدودی از این روش‌ها اشاره می‌شود. ژوزف موینه<sup>۶</sup> فرانسوی که یک باغبان و نیز سازنده وسایل ساده باغبانی بود، ایده استفاده از گلدان‌هایی از جنس بتن به جای گلدان‌های چوبی برای نگهداری نهال‌ها و درختان کوچک را در فکر خود پروراند ولی پس از آن که دریافت بتن بیش از حد حالت شکنندگی دارد با شبکه‌ای از آهن گلدان‌های خود را مسلح نمود. این روش در سال ۱۸۶۷ به ثبت رسید و در پی آن

<sup>۱</sup> Renn

<sup>۲</sup> Soflo

<sup>۳</sup> Saint Sulpice

<sup>۴</sup> Lambo

<sup>۵</sup> Wilkinson

<sup>۶</sup> Joseph moyneh

موارد کاربرد دیگری از بتن مسلح نظیر مخازن بتنی و غیره توسط وی ارائه شد. سازه‌های بتن مسلح در اروپا معمولاً به روش موینه معروف بود [۸]. یک آمریکایی به نام هایت<sup>۱</sup> [۸] آزمایش‌هایی را بر روی تیرها انجام داد و یکی از نخستین کسانی بود که اصول اولیه مربوط به رفتار بتن مسلح را به صورتی که امروزه درک می‌شود شناخت. وی نتیجه یافته‌های خود را در سال ۱۸۸۷ در لندن انتشار داد ولی با استقبال روبه رو نشد. در اواخر قرن نوزدهم در آلمان و سایر کشورها نیز آزمایش‌هایی به عمل آمد که منجر به تدوین تئوری‌های طراحی بر اساس محاسبات ریاضی توسط اشخاصی چون کونن<sup>۲</sup>، مورش<sup>۳</sup> و سایرین گردید. اولین کتاب درباره بتن مسلح به زبان انگلیسی در سال ۱۹۰۴ توسط مارش<sup>۴</sup> و دون<sup>۵</sup> به چاپ رسید [۸]. در دهه‌ی اول قرن بیستم، آزمایش‌های متعددی توسط دانشمندان در آمریکا و در اروپا جهت تعیین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته‌ی بتن انجام گرفت [۹]. از سال ۱۹۱۶ تا ۱۹۳۵، بیشتر تحقیقات بر ستون‌های بتن‌آرمه تحت بار محوری متمرکز شد [۹]. در دو دهه‌ی ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰، ستون‌های بتن‌آرمه با بار خارج از محور، شالوده‌های بتن‌آرمه و نیز مقاومت نهایی تیرها بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفت [۹]. از آن به بعد تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه‌ی رفتار قطعات و سازه‌های بتن‌آرمه انجام گرفته است. هزاران رساله‌ی کارشناسی ارشد و دکترا در این زمینه در دهه‌های اخیر به رشته‌ی تحریر درآمده است. اما هنوز ناشناخته‌های فراوانی در زمینه‌ی رفتار اجزا بتن‌آرمه وجود دارد. از همین رو در حال حاضر نیز بسیاری از تحقیقات زنده‌ی دانشگاه‌های معتبر و مراکز تحقیقاتی دنیا در زمینه‌ی اجزا و قطعات بتن‌آرمه معطوف می‌گردد [۹].

## ۲-۲-۲-۱ میلگردهای خمشی (طولی) و برشی (عرضی) در تیرهای بتن مسلح

میلگردهای طولی میلگردهایی هستند که برای تحمل تنش‌های کششی ناشی از خمش در عضو بتن‌آرمه استفاده می‌شوند. میلگردهای عرضی نیز میلگردهایی هستند که برای تحمل تنش‌های کششی ناشی از برش و پیچش در عضو بتن‌آرمه استفاده می‌شوند. محاسبات این میلگردها مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ی انجام می‌شود. آنچه از اهمیت ویژه‌ی برخوردار می‌باشد پیوستگی بتن با این میلگردها می‌باشد. پیوستگی بتن و آرماتورهای مسلح کننده، نقش کلیدی را در رفتار اعضا سازه‌ای بتن مسلح در هنگام قرارگیری تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی ایفا می‌کند. مقاومت پیوستگی آرماتورهای مسلح کننده قرار گرفته در بتن به چسبندگی شیمیایی، پایداری اصطکاکی و پیوستگی برشی بستگی دارد. هنگامی که چسبندگی شیمیایی از بین می‌رود، مکانیزم پیوستگی وابسته به نوع آرماتورها خواهد بود. در آرماتورهای ساده، بسته به میزان مقاومت اصطکاکی آرماتورها، لغزش به سمت خارج اتفاق می‌افتد و در نتیجه شکست از نوع لغزشی خواهد بود. در آرماتورهای آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، چفت و بست مکانیکی بین بتن و آج‌های آرماتور سبب بالا رفتن مقاومت پیوستگی می‌گردد. در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی آرماتور آجدار با بتن از

<sup>۱</sup> Hyatt

<sup>۲</sup> Conan

<sup>۳</sup> Mureş

<sup>۴</sup> Marsch

<sup>۵</sup> Don

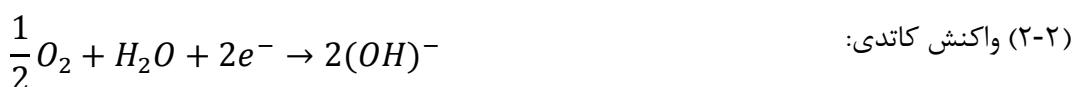
اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن آج‌های آرماتور و کلیدهای بتنی بین آن‌ها انجام می‌شود [۹]. در این تحقیق کلیه‌ی محاسبات مربوط به میلگردها و ضوابط اجرایی آنها مطابق با مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان انجام خواهد گرفت [۱۰].

## ۲-۲-۳ دوام بتن مسلح در برابر تهاجم یون کلراید

سالیان متمادی است که بتن به عنوان یکی از مصالح مصرفی ساخت دست بشر جایگاه ویژه‌ای در بین مهندسی عمران پیدا کرده است. در طول این سالها فاکتورهای گوناگونی در مورد بتن مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این عوامل می‌توان به دوام بتن، اشاره کرد که نقش مهم و موثری در طول عمر مفید سازه‌های بتنی دارد [۱۱]. امروزه کاهش عمر مفید، هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی آسیب دیده در اثر خوردگی و دیگر عوامل مخرب در مناطق خورنده مانند سواحل خلیج فارس صدمات جبران‌ناپذیری بر اقتصاد کشور و توسعه‌ی پایدار در این مناطق وارد کرده است [۱۲]. در آمریکا، بیش از ۴۰ درصد پلها در شاهراه‌ها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند. هزینه بازسازی و یا تعمیر سازه‌های پارکینگ در کانادا، ۴ تا ۶ میلیارد دلار تخمین زده شده است. هزینه تعمیر پل‌های شاهراه‌ها در آمریکا حدود ۵۰ میلیارد دلار برآورد شده است. چهار عامل محیطی خوردگی آرماتور، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، یخ زدگی و حمله سولفات‌ها، مهمترین عواملی بوده است که موجبات خرابی زودرس در سازه‌های بتنی را فراهم می‌نماید [۱۲]. بنابراین لزوم بررسی و شناخت رفتار بتن در چنین مناطقی برای افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی و جلوگیری از تخریب زودرس آنها ضروری می‌باشد. بدیهی است که از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب چنین سازه‌هایی، خوردگی آرماتور می‌باشد [۳]. اکثر قریب به اتفاق محققین بتن بر این عقیده‌اند که حضور یون کلر در سازه‌های بتنی، اصلی‌ترین عامل خوردگی شیمیایی در آرماتورهای فولادی و ایجاد ترک می‌باشد [۱۳]. پیش بینی شده است که برای بازسازی کلیه سازه‌های بتن آرمه آسیب دیده در آمریکا در اثر مساله خوردگی میلگردها، به بودجه نجومی ۱ تا ۳ تریلیون دلار نیاز می‌باشد [۱۴]. لذا یافتن روشی برای کاهش خوردگی سازه‌های بتن آرمه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

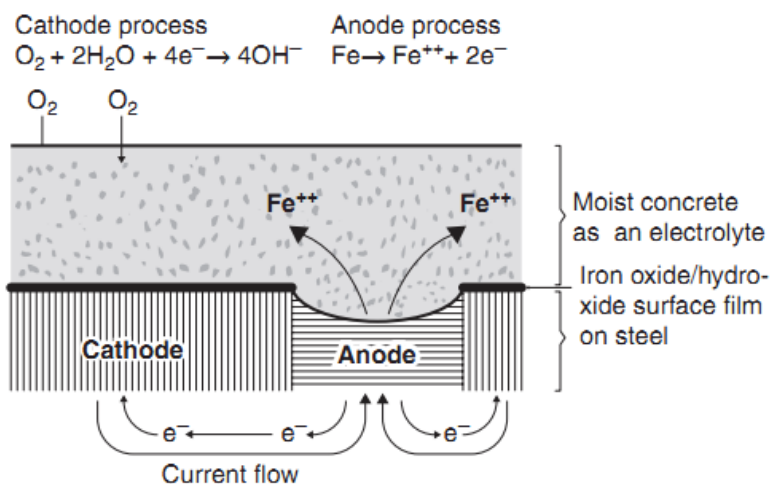
## ۲-۳-۱ مکانیزم خوردگی میلگرد در بتن

خوردگی فولاد در بتن یک فرایند الکتروشیمیایی است. پتانسیل الکتروشیمیایی‌ای که تشکیل پیل خوردگی می‌دهد به علت تفاوت تمرکز یون‌های حل شده در نزدیکی فولاد، نظیر یون‌های قلیایی، کلرایدها و اکسیژن به وجود می‌آید. در نتیجه قسمتی از فلز آند و قسمتی دیگر کاتد می‌شود که منجر به زنگ زدن آهن خواهد شد. واکنش‌های آندی و کاتدی به صورت معادلات (۲-۱) و (۲-۲) می‌باشند:



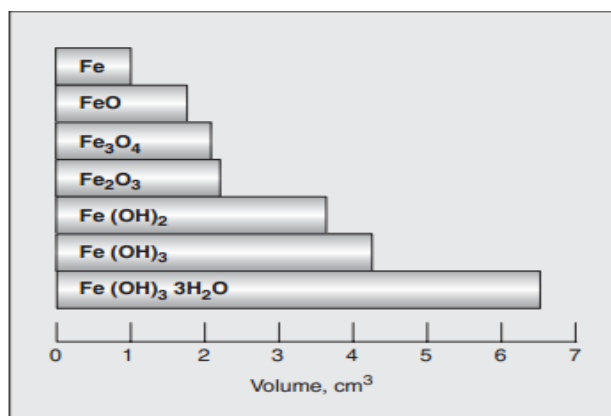
چنانچه در معادله (۲-۲) مشاهده می‌شود، حضور اکسیژن و رطوبت جهت شروع خوردگی آرماتور

ضروری است. اما فرایند آندی تا موقعی که قشر حفاظتی یا قشر اکسید آهن غیر فعال به علت اسیدی شدن محیط از بین نرفته باشد، نمی تواند اتفاق بیفتد. با انتقال یون های هیدروکسید به قسمت آندی، زنگ زدگی ایجاد می شود. این واکنش در معادله (۳-۲) ارائه شده است. این فرایند در شکل ۱-۲ نیز نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: فرآیند خوردگی میلگرد در بتن [۱۵].

تبدیل آهن به زنگ همراه با افزایش حجمی است که، بسته به حالت اکسیداسیون که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، ممکن است به اندازه ۶۰۰ درصد فلز اولیه باشد. این افزایش حجم علت اصلی انبساط و ترک خوردگی بتن می باشد. با ادامه فرآیند خوردگی، بتن پوشش میلگرد در اثر فشار انبساطی ناشی از این افزایش حجم، خراب شده و در نتیجه باعث کاهش مقطع عضو بتن مسلح و کاهش ظرفیت باربری عضو می شود.



شکل ۲-۲: افزایش حجم محصولات خوردگی فولاد مدفون در بتن [۱۵].