

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

گرایش سازه

عنوان:

# تحلیل اجزاء محدود ترک ناشی از خوردگی آرماتور در تیرهای بتن مسلح

استاد راهنما:

دکتر فرشید علایی

استاد مشاور:

دکتر وحیدرضا کلات جاری

تهیه و تدوین:

مرتضی حبیبی

تابستان ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مرتضی حبیبی

تحت عنوان: تحلیل اجزاء محدود ترک ناشی از خوردگی آرماتور در تیرهای بتن مسلح

در تاریخ ۸۸/۶/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی

و با درجه خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور                                  | امضاء | اساتید راهنما                            |
|-------|-----------------------------------------------|-------|------------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر وحیدرضا کلاتجاری |       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر فرشید علایی |
|       | نام و نام خانوادگی :                          |       | نام و نام خانوادگی :                     |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی                   | امضاء | اساتید داور                             |
|-------|------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی :<br>مهندس عباس محمدی |       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر احمد احمدی |
|       |                                          |       | نام و نام خانوادگی :<br>دکتر علی کیهانی |

... در هر حرفه ای که هستید نه اجازه بدهید که به بد بینیهای بی حاصل آلوده شوید و نه بگذارید که بعضی لفظات تاسف بار، که برای هر ملتی پیش می آید، شما را به یاس و ناامیدی بکشاند. در آرامش ماکم بر آزمایشگاهها و کتابخانه هایتان زندگی کنید. نفست از خود پیرسید «برای یادگیری و خود آموزی چه کرده ام؟» سپس همپنان که پیشتر می روید، پیرسید «من برای کشورم، چه کرده ام؟» و این پرسش را آنقدر تکرار کنید تا با این احساس شاد بخش و هیجان انگیز برسید که شاید سووم کوچکی در پیشرفت و اعتلای بشریت داشته اید. اما هر پاداشی که زندگی به تلاشهایمان بدهد یا ندهد هنگامی که به پایان تلاشهایمان نزدیک می شویم هر کدام مان باید حق آن را داشته باشیم که با صدای بلند بگوییم «من آنچه در توان داشته ام انجام داده ام.»

لوئی پاستور

(۱۸۹۵-۱۸۲۲)

تقدیم به

پدر و مادرم

## تشکر و قدردانی

فراز و فرودهایی که در سلوک علمی پیش روی دانشجویست، گاه چنان سهمناک می نماید که بی مدد استاد و اشارت های راهبردی او کار به انجام نخواهد رسید.

این پایان نامه، پس از عنایت حق بیش از هر چیز، وامدار لطف، درایت و تذکر های کارگشای استاد ارجمندم جناب آقای دکترفرشید علایی است.

با اخلاص تمام از ایشان که بر من حق حیات معنوی دارند، سپاسگزاری می کنم و از خداوند می خواهم سایه شان را بر سر فرهنگ، علم و پویندگان دانش در این مرز و بوم مستدام بدارد

همچنین برخورد وظیفه میدانم ازجناب آقای دکتر وحید رضا کلات جاری استاد راهنمای ارجمندم تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب **مرتضی حبیبی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران- سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تحلیل اجزاء محدود ترک ناشی از خوردگی آمارتور در تیرهای بتن مسلح تحت راهنمایی دکتر فرشید علایی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام <<دانشگاه صنعتی شاهرود>> و یا <<shahrood university of technology>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

عمر مفید سازه های بتن آرمه با آسیب دیدن این سازه ها در اثر خوردگی آرماتور محدود می گردد. خورده شدن آرماتور به معنی اکسیده شدن فولاد وتشکیل محصولاتی نظیر زنگ قرمز و هیدروکسید فروس می باشد ، که این مواد حجمی بیشتر از فولاد مصرف شده اشغال نموده و این افزایش حجم باعث ایجاد فشار داخلی در پوشش بتنی وآسیب دیدن آن می گردد. پایان عمر مفید سازه های بتنی معمولاً ترک خوردن وشکست پوشش در نظر گرفته می شود ، چرا که با شکست پوشش ، آرماتور در معرض خوردگی شدید قرار گرفته و ظرفیت باربری سازه به شدت کاهش می یابد. لذا تخمین زمان ترک خوردن در سازه های بتنی در طراحی این سازه ها براساس عمر مفید از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این پایان نامه در ابتدا با به کاگیری نرم افزار Ansys ، یک نمونه آزمایشگاهی با مشخصات مکانیکی موجود، مدل سازی گردیده وپس از بارگذاری به صورت فشارداخلی به سوراخهای تعبیه شده در نمونه به تحلیل تنش های ایجاد شده در پوشش بتنی به منظور بدست آوردن فشار لازم جهت بروز ترک نهایی در مدل پرداخته شد. در این مدل رفتار بتن به صورت ایزوتروپ چند خطی سخت شونده در فشار و ترک نواری پخش شده در کشش در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت و نشان داد که در نمونه های با هندسه ومشخصات مکانیکی یکسان ضخامت پوشش بتنی نسبت مستقیم با فشار لازم جهت بروز ترک نهایی دارد. در ادامه از نتایج بدست آمده از تحلیل و روابط ارائه شده توسط دیگر محققین ، زمان لازم جهت بروز ترک نهایی بررسی گردید و مشخص شد که پارامترهای اصلی مؤثر بر زمان ترک خوردن شامل ضخامت پوشش ، قطر آرماتور ، مدول الاستیسیته بتن ، نوع محصولات خوردگی و شدت خوردگی می باشد.

کلمات کلیدی: خوردگی، تحلیل اجزاء محدود، بتن مسلح، عمر مفید، زمان ترک خوردگی



## فهرست مطالب

| عنوان .....                                                    | صفحه |
|----------------------------------------------------------------|------|
| فصل اول: مقدمه.....                                            | ۲    |
| ۱-۱- خوردگی آرماتور .....                                      | ۲    |
| ۲-۱- لزوم طراحی بر اساس دوام .....                             | ۴    |
| ۳-۱- تاثیر خوردگی بر رفتار سازه.....                           | ۵    |
| فصل دوم : خوردگی کلروی در سازه‌های بتن آرمه.....               | ۱۰   |
| ۱-۲- مقدمه.....                                                | ۱۰   |
| ۲-۲- مکانیزمهای خوردگی فولاد در بتن .....                      | ۱۰   |
| ۱-۲-۲- واکنش‌های خوردگی .....                                  | ۱۱   |
| ۳-۲- احتمال وقوع خوردگی .....                                  | ۱۵   |
| ۴-۲- میزان خوردگی .....                                        | ۱۷   |
| ۵-۲- تأثیر ساختار و خصوصیات بتن بر فرآیند خوردگی.....          | ۲۳   |
| ۱-۵-۲- ساختار بتن و خمیر سیمان.....                            | ۲۳   |
| ۶-۲- ساختار شیمیایی بتن .....                                  | ۲۵   |
| ۷-۲- منابع یونهای کلرید در بتن و مقادیر مجاز .....             | ۲۷   |
| ۸-۲- نفوذ یونهای کلرید.....                                    | ۲۸   |
| ۹-۲- یونهای کلرید پیوندی و آزاد .....                          | ۳۲   |
| ۱۰-۲- تأثیر سیمانهای آمیخته بر روی خوردگی آرماتور در بتن ..... | ۳۴   |

|        |                                                           |    |
|--------|-----------------------------------------------------------|----|
| ۱۱-۲   | عوامل دیگر مؤثر در خوردگی.....                            | ۳۵ |
| ۱۲-۲   | آزمایش نفوذپذیری کلرید.....                               | ۳۷ |
| ۱۳-۲   | پیشگیری از خوردگی.....                                    | ۳۸ |
| ۱۴-۲   | الزامات آئین نامه ای در طراحی.....                        | ۴۰ |
| ۱-۱۴-۲ | حداکثر مقدار مجاز کلرید در بتن.....                       | ۴۰ |
| ۲-۱۴-۲ | ضخامت و ترکیب بتن پوشش.....                               | ۴۲ |
| ۳-۱۴-۲ | حداکثر عرض ترک.....                                       | ۴۲ |
| ۱۵-۲   | نتیجه گیری.....                                           | ۴۳ |
| ۴۴     | فصل سوم : خرابیهای ناشی از خوردگی و اثرات سازه ای آن..... | ۴۴ |
| ۱-۳    | مقدمه.....                                                | ۴۴ |
| ۲-۳    | ترک خوردگی پوشش.....                                      | ۴۸ |
| ۳-۳    | تأثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی بتن و فولاد.....           | ۵۸ |
| ۴-۳    | نتیجه گیری.....                                           | ۷۳ |
| ۷۵     | فصل چهارم : مدل های موجود.....                            | ۷۵ |
| ۱-۴    | مقدمه.....                                                | ۷۵ |
| ۲-۴    | مدل های سرعت خوردگی.....                                  | ۷۷ |
| ۳-۴    | مدل های تخمین آسیب های ناشی از خوردگی.....                | ۸۲ |
| ۱-۳-۴  | مدل ارائه شده توسط Bhargava et al, 2006.....              | ۸۵ |
| ۲-۳-۴  | مدل ارائه شده توسط Pantazopoulou 2001.....                | ۹۰ |

|     |                                                         |
|-----|---------------------------------------------------------|
| ۹۴  | .....coronelli 2002 مدل مقاومت پیوستگی                  |
| ۱۰۲ | .....نتیجه گیری                                         |
| ۱۰۴ | .....فصل پنجم: تحلیل ترک ناشی از خوردگی توسط ANSYS      |
| ۱۰۴ | .....مقدمه                                              |
| ۱۰۶ | .....مکانیک شکست بتن                                    |
| ۱۰۷ | .....مدل ترک چسبنده                                     |
| ۱۰۸ | .....مدل ترک مجازی                                      |
| ۱۰۹ | .....مدل ترک الاستیک موثر                               |
| ۱۰۹ | .....رفتار غیر خطی بتن                                  |
| ۱۱۲ | .....مکانیک شکست غیر خطی                                |
| ۱۱۳ | .....الگوی ترک پخش شده                                  |
| ۱۲۱ | .....نمونه آزمایشگاهی                                   |
| ۱۲۴ | .....مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS |
| ۱۲۴ | .....SOLID 65: نوع المان                                |
| ۱۲۵ | .....مروری بر مفهوم آنالیز غیر خطی:                     |
| ۱۲۶ | .....معیار شکست حاکم بر رفتار بتن در نرم افزار Ansys:   |
| ۱۳۰ | .....ابعاد و هندسه مدلها                                |
| ۱۳۱ | .....مش بندی مدل                                        |
| ۱۳۲ | .....بارگذاری و شرایط تکیه گاهی                         |

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| ۱۳۳..... | ۷-۵-۵- روش تحلیل                                  |
| ۱۳۵..... | ۶-۵- مقایسه نتایج                                 |
| ۱۳۵..... | ۱-۶-۵- مقایسه الگوی ترک                           |
| ۱۳۷..... | ۲-۶-۵- مقایسه فشارداخلی لازم جهت شکست نهایی       |
| ۱۳۷..... | ۷-۵- ساده سازی مدل                                |
| ۱۳۹..... | ۱-۷-۵- مقایسه نتایج مدل ساده سازی شده با مدل اصلی |
| ۱۴۰..... | ۸-۵- موقعیت قرار گیری آرماتور                     |
| ۱۴۲..... | ۹-۵- محاسبه عمر مفید                              |
| ۱۴۳..... | ۱-۹-۵- مدت زمان پیشروی خوردگی                     |
| ۱۴۸..... | ۲-۹-۵- بررسی حساسیت روش نسبت به پارامتر های مختلف |
| ۱۵۰..... | ۱۰-۵- نتیجه گیری                                  |
| ۱۵۲..... | فصل ششم : نتیجه گیری                              |

## فهرست اشکال

| عنوان .....                                                                                                                                     | صفحه |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| شکل ۱-۲ فرآیند خوردگی در سطح فولاد .....                                                                                                        | ۱۲   |
| شکل ۲-۲ توصیف شماتیک دو عامل کندگیر کننده سرعت خوردگی فولاد در بتن .....                                                                        | ۱۸   |
| شکل ۳-۲ توصیف شماتیک تشکیل و ثبات لایه غیر فعال اکسید روی فولاد .....                                                                           | ۱۹   |
| شکل ۴-۲ خوردگی فولاد در محل آبی در رابطه با غلظت یون $\text{OH}^-$ .....                                                                        | ۲۰   |
| شکل ۵-۲ توصیف شماتیک شکل‌گیری ساختار خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان کم و زیاد .....                                                             | ۲۴   |
| شکل ۶-۲ پروفیل نمونه مقدار کل کلرید بر حسب درصد وزنی سیمان، برای دو نوع بتن با کیفیت معمولی و کیفیت عالی .....                                  | ۳۱   |
| شکل ۱-۳ شرح شماتیک انواع ترک ناشی از خوردگی به عنوان تابعی از محل آرماتور. نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور. C : ضخامت پوشش D : قطر آرماتور ..... | ۴۷   |
| شکل ۲-۳ رابطه فشار حداکثر ترک خوردن نمونه ها ومقاومت کششی بتن .....                                                                             | ۵۱   |
| شکل ۳-۳ مقایسه حداکثر فشار شکست مشاهده شده توسط محققان مختلف .....                                                                              | ۵۲   |
| شکل ۴-۳ مقایسه نسبت $P_{\max}/f_t$ مشاهده شده توسط محققان مختلف .....                                                                           | ۵۲   |
| شکل ۵-۳ تأثیر نسبت $c/d$ بر $P_{\max}$ محاسبه شده توسط ویلیامسون وهمکاران .....                                                                 | ۵۳   |
| شکل ۶-۳ تأثیر قطر آرماتور در فشار شکست ویلیامسون و همکاران .....                                                                                | ۵۴   |
| شکل ۷-۳ : هندسه نمونه های آزمایشی در آزمایش Ghandehari et al .....                                                                              | ۵۵   |
| شکل ۸-۳ زمان ترک خوردگی ومقاومت الکتریکی اندازه گیری شده درآزمایش Ghandehari et al .....                                                        | ۵۶   |
| شکل ۹-۳ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰ mm تحت اثر خوردگی (سرعت اعمال خوردگی $2 \text{ mA/cm}^2$ ) .....                                   | ۶۱   |

- شکل ۳-۱۰ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰mm تحت اثر خوردگی (سرعت اعمال خوردگی  $4 \text{ mA/cm}^2$ ) ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۱ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰mm تحت اثر خوردگی (درصد خوردگی:  $2/5$ ) ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۲ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰mm تحت اثر خوردگی (درصد خوردگی:  $7/5$ ) ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۳ تأثیر سرعت و در صد خوردگی در مقاومت خمشی تیرها (B : درصد باقیمانده) ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۴ نمودار مقاومت نهایی در مقابل درجه خوردگی ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۵ تنش پیوستگی نسبی در مقابل کاهش وزن ترکها ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۶ تغییرات مقاومت پیوستگی با درصد خوردگی برای دو نوع بتن . opc بتن باسیمان معمولی و pfa بتن باسیمان پوزولانی ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۷ تأثیر خوردگی در نمودار بار - خیز در تیرهای بتن معمولی ..... ۷۲
- شکل ۴-۱ مدل عمر مفید سازه های در معرض خوردگی ..... ۷۵
- شکل ۴-۲ نمودار تغییرات حجم فولاد نسبت به محصولات خوردگی مختلف ..... ۷۷
- شکل ۴-۳: مدل ارائه شده توسط Andrate et al ..... ۸۳
- شکل ۴-۴ تأثیر مقاومت کششی و نوع محصولات خوردگی در زمان ترک خوردن ..... ۸۹
- شکل ۴-۵ تأثیر سرعت خوردگی و ضخامت پوشش بر زمان ترک خوردن ..... ۹۰
- شکل ۴-۶ نحوه انتخاب ضخامت جداره استوانه در مدل ..... ۹۱
- شکل ۴-۷ حساسیت مدلبه پارامترهای مختلف هندسی و مصالح ..... ۹۴
- شکل ۴-۸ عمق خوردگی (X) و افزایش ضخامت آرماتور (t) ..... ۹۶
- شکل ۴-۹ الگوی ترک و نیروهای موجود در پوشش و خاموت ..... ۹۷

- شکل ۴-۱۰ مدل تیر برای پوشش ..... ۹۸
- شکل ۴-۱۱ مشخصات هندسی آجها و مساحت آنها ..... ۹۹
- شکل ۴-۱۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱ منحنی رفتار بتن و مواد تشکیل دهنده آن ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۲ منحنی تنش تغییر مکان نمونه بتنی تحت کشش ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳ مکانیزم های مختلف جذب انرژی در نوک ترک بتن ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۴: الگوی ترک پخش شده ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۵ الگوی تنش و کرنش بتن ترک خورده ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۶ نمونه های آزمایشگاهی ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۷ نحوه اعمال فشار به نمونه های آزمایشگاهی ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۸ تأثیر  $c/d$  بر  $p_{max}$  ..... ۱۲۲
- شکل ۵-۹ مقایسه بین فشار شکست و مقاومت کششی نمونه ها ..... ۱۲۳
- شکل ۵-۱۰ هندسه و ابعاد Solid65 ..... ۱۲۴
- شکل ۵-۱۱ سطح شکست محاسباتی ویلیام-وارنک ..... ۱۲۷
- شکل ۵-۱۲ منحنی تنش-کرنش تک محوری فشاری ..... ۱۳۰
- شکل ۵-۱۳ کاهش حجم نمونه در مدل سازی ..... ۱۳۱
- شکل ۵-۱۴ تأثیر تعداد المان ها در دقت پاسخ به دست آمده در روش اجزاء محدود ..... ۱۳۲
- شکل ۵-۱۵ شبکه بندی مدل ..... ۱۳۲
- شکل ۵-۱۶ نحوه گیر دار نمودن مدل در جهت صفحات تقارن ..... ۱۳۳
- شکل ۵-۱۷: فن تکراری نیوتن رافسون ..... ۱۳۴
- شکل ۵-۱۸ ترک نهایی ناشی از فشار داخلی ..... ۱۳۶
- شکل ۵-۱۹ مقایسه نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی ..... ۱۳۷

- شکل ۵-۲۰ نحوه ساده سازی مدل در راستای ضخامت کم..... ۱۳۸
- شکل ۵-۲۱ کانتور تغییرات کرنش در جهت Z..... ۱۳۸
- شکل ۵-۲۲ مدل ساده شده انتخابی برای  $c/d=1$ ..... ۱۳۹
- شکل ۵-۲۳ مقایسه نتایج مدل استوانه ای و مکعبی..... ۱۳۹
- شکل ۵-۲۴ نمای شماتیک از ترک خوردن نمونه های استوانه ای..... ۱۴۰
- شکل ۵-۲۵ مدل موقعیت آرماتور به همراه مش بندی..... ۱۴۱
- شکل ۵-۲۶ الگوی ترک برای نمونه با موقعیت قرار گیری آرماتور مختلف..... ۱۴۲
- شکل ۵-۲۷ تکراری: مدل ارائه شده توسط Andrate et al..... ۱۴۶
- شکل ۵-۲۸ اثرات نسبت  $c/d$  و سرعت خوردگی بر زمان ترک خوردگی نهایی..... ۱۴۷
- شکل ۵-۲۹ بررسی تأثیر  $c/d$  بر زمان ترک خوردگی..... ۱۴۹
- شکل ۵-۳۰ بررسی تأثیر مدول الاستیسیته بر زمان ترک خوردگی..... ۱۴۹
- شکل ۵-۳۱ بررسی تأثیر ضریب افزایش حجم بر زمان ترک خوردگی..... ۱۵۰



## فهرست جداول

عنوان ..... صفحه

جدول ۱-۲- طبقه‌بندی نفوذپذیری یون کلرید براساس شار عبوری ..... ۳۷

جدول ۱-۳ : مشخصات نمونه ها، جریان خوردگی اعمال شده و درصد های خوردگی مورد نظر در

آزمایش Ghandehari et al ..... ۵۶

جدول ۲-۳ : خلاصه نتایج مقاومت پیوستگی نسبی بدست آمده از نمونه های کششی ..... ۶۷

جدول ۱-۵ : میانگین فشار لازم جهت شکست در آزمایش شبیه سازی شده ..... ۱۲۳

جدول ۲-۵- مشخصات بتن ..... ۱۳۰

# فصل اول

## مقدمه

## فصل اول: مقدمه

بتن مسلح نوعی مصالح ترکیبی است که در قرن بیستم توسعه فراوانی یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده روز افزون از بتن مسلح تنها به علت عملکرد مکانیکی خوب آن نیست، بلکه به علت دوام و پایداری طولانی مدت آن نیز می‌باشد. بتن نسبت به فولاد از دوام بالاتری برخوردار است و هنگامیکه فولاد توسط بتن احاطه می‌گردد محیط مقاوم نسبتاً خوبی برای فولاد ایجاد شده و فولاد می‌تواند به عنوان مسلح کننده در بتن تا مدت طولانی مورد استفاده قرار گیرد. از لحاظ تئوری، بتن مسلح باید یک مصالح با دوام بسیار بالا باشد، این در صورتی است که بتن احاطه کننده آرماتور بتواند از نظر فیزیکی و شیمیایی آرماتور را محافظت نموده و از خوردگی آرماتور جلوگیری کند.

### ۱-۱- خوردگی آرماتور<sup>۱</sup>

علی رغم تئوری و عملکرد مطلوب بتن در بسیاری از سازه‌ها، خوردگی آرماتور در سه دهه گذشته مهمترین مسئله دوام بتن در محیطهای خورنده شدید و حتی متوسط بوده است، به عنوان مثال در سازه‌های دریایی<sup>۲</sup> خوردگی آرماتور قبل از هر گونه هجوم سولفات‌ها صورت گرفته و در چنین محیطهایی به عنوان مسأله بحرانی و اساسی دوام عمل می‌کند. خوردگی آرماتور در اثر نفوذ یون کلرید در سازه‌های بتن آرمه اثرات مخربی داشته و باعث کاهش عمر مفید و سرویس دهی این سازه‌ها می‌گردد و سالانه خسارات بسیار زیادی را موجب می‌شود، به عنوان مثال هزینه تعمیر پایه پلها در آمریکا سالانه بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار می‌باشد. کشور ما نیز سالانه متحمل خسارات زیادی ناشی از این نوع خوردگی در سازه‌های بتن آرمه دریایی در خلیج فارس و دریای عمان و همچنین پل‌های راه و راه آهن می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Corrosion of Reinforcement

<sup>۲</sup> Marine structures

آلودگی سازه‌های بتن آرمه به یون کلرید عمدتاً در محیط‌های دریایی و یا در اثر استفاده از نمک‌های یخ زدا در پلها به وجود می‌آید. این آلودگی باعث نوعی خوردگی الکتروشیمیایی می‌شود که این خوردگی رفتار سازه‌ای را به سرعت تنزل داده و موجب کاهش سریع مقاومت و سرویس دهی سازه می‌گردد.

در گذشته اکثر تحقیقات دوام بر روی عملکرد خود بتن نظیر مقاومت بتن در برابر حمله سولفات‌ها متمرکز شده بود. در حال حاضر بیشتر خرابیهای ناشی از دوام، مربوط به خوردگی فولاد در بتن در سازه‌های دریایی و پلها می باشد. علت افزایش مشکلات دوام ناشی از خوردگی فولاد در سازه‌های بتن مسلح تغییرات متنوعی است که در تکنولوژی بتن و شرایط محیطی به وجود آمده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد.

۱- از آنجائیکه در بسیاری از موارد عملی، تنها مقاومت ۲۸ روزه ملاک ارزیابی کیفیت بتن قرار می‌گیرد. لذا سیمانهای جدیدی به منظور به دست آوردن مقاومت بالاتر ساخته شده‌اند که دارای  $C_3S$  بالاتر و نرمی بیشتری می‌باشند، به کارگیری این سیمانها باعث افزایش نسبت آب به سیمان و تضعیف روند کسب مقاومت دراز مدت بتن می‌گردد. این دو عامل باعث کاهش اثر حفاظتی پوشش بتنی می‌شوند.

۲- برای دستیابی به طرحی اقتصادی و بهینه سعی می‌شود که ضخامت پوشش بتنی تا حد امکان کاهش یابد، لذا در صورتیکه این عمل با دقت کافی صورت نگیرد اثر حفاظتی پوشش بتنی کاهش می‌یابد.

۳- به علت متداول شدن استفاده بتن در نمای ساختمان<sup>۱</sup>، هیچگونه اندود دیگری بر روی سطح بتن اجرا نگردیده و پوشش بتن کاملاً در معرض نفوذ یونهای کلر می‌باشد.

۴- به علت افزایش استفاده از بتن در سازه‌های دریایی و ساحلی که در محیط اطراف آنها غلظت یون کلر بیش از حد معمول بوده، آسیب‌پذیری سازه‌های بتن آرمه در اثر خوردگی افزایش یافته است.

خرابی ناشی از خوردگی در ابتدا به صورت ترکهای ریز و لکه‌های زنگ<sup>۲</sup> بر روی سطح بتن دیده می‌شود، در صورت ادامه روند خوردگی ترکهایی با امتداد قائم و موازی با میلگردهای اصلی مقطع بتن آرمه ایجاد شده و موجب کنده شدن پوشش بتنی و در معرض قرار گرفتن فولاد می‌شود. این ترکها به علت فشارهای ناشی از افزایش حجم محصولات خوردگی می‌باشد. این خرابیها معمولاً در بخشهایی از سازه که رطوبت در آنها به مدت طولانی باقی می‌ماند و یا اعضای که در مجاورت خاکهایی قرار دارند که تمایل زیادی به تجمع نمکها در اثر خاصیت موئینگی دارند و یا در معرض تر و خشک شدنهای متوالی قرار می‌گیرند مشاهده می‌گردد.

در نتیجه با ترک خوردن و متلاشی شدن پوشش، فولاد در معرض تهاجم مستقیم یونهای خورنده<sup>۳</sup> قرار می‌گیرد و با ادامه خوردگی مقاومت پیوستگی و سطح مؤثر آرماتور به شدت کاهش یافته و زمانی فرا می‌رسد که سازه بتن آرمه کاملاً کارایی خود را از دست می‌دهد.

## ۱-۲- لزوم طراحی بر اساس دوام

---

<sup>۱</sup> Architectural concrete

<sup>۲</sup> Rust

<sup>۳</sup> Corrosive Ion

امروزه با توجه به اهمیتی که استفاده از سازه‌های بتن آرمه در سواحل، خصوصاً در اسکله‌ها، سازه‌های دریایی و میدانهای اکتشاف نفت و گاز پیدا کرده، نیاز استفاده از سازه بتن آرمه با دوام در برابر خوردگی آرماتور که بتواند عمر مفید<sup>۱</sup> مورد نیاز در این سازه‌ها را تامین کند، به شدت احساس می‌شود. بنابراین باید تمامی عوامل مؤثر در این پدیده به طور کامل بررسی شده و با کنترل این عوامل، سازه‌ای طراحی نمود که عمر مفید لازم را داشته باشد. لذا مشاهده می‌شود که امروزه آئین نامه‌های طراحی به سمت طراحی بر اساس دوام تمایل پیدا کرده و خصوصاً در سازه‌هایی که در محیطهای خورنده شدید ساخته می‌شوند توصیه‌ها و محدودیتهای سختگیرانه‌ای اعمال کرده‌اند.

نظریه عمر مفید سازه‌های بتن مسلح بر اساس محافظت آرماتور از خوردگی و بتن اطراف آرماتور از آسیبهای ناشی از خوردگی استوار است.

### ۱-۳- تاثیر خوردگی بر رفتار سازه

غیر فعال بودن آرماتور در بتن که به علت محیط قلیایی بتن اطراف آرماتور می‌باشد در اثر نفوذ یون کلرید و دی اکسید کربن از بین رفته و خوردگی آغاز می‌شود. مهمترین اثرات خوردگی که باعث کاهش عمر مفید سازه می‌گردند عبارتند از:

الف- ترک خوردن پوشش بتنی

ب- از بین رفتن مقاومت پیوستگی

ج- کاهش سطح مقطع آرماتور

خوردگی آرماتور عبارت است از اکسیداسیون آهن و تبدیل شدن آن به اکسیدهای محلول، که اصطلاحاً زنگ نامیده می‌شوند. ترکیب شیمیایی زنگ آهن تولید شده به تامین اکسیژن و دیگر شرایط

---

<sup>1</sup> Service life

محیطی مؤثر بر واکنشهای خوردگی بستگی دارد. از میان محصولات خوردگی زنگ قرمز پایدارتر بوده و دانسیته کمتری دارد و دارای حجم بیشتری از آهن مصرف شده می باشد و لذا تجمع این اکسید در اطراف آرماتور باعث ایجاد فشار داخلی در بتن شده و به پوشش بتنی آسیب می رساند (البته این در حالتی است که خوردگی یکنواخت رخ دهد).

فشار داخلی ایجاد شده در اثر این فرآیند باعث ترک خوردن بتن از داخل به سمت خارج شده و در صورت ادامه روند خوردگی موجب نمایان شدن ترکهایی در امتداد آرماتور در سطح بتن می شود و در مراحل بعدی باعث ورقه شدن و متلاشی شدن پوشش در ناحیه وسیعی می گردد.

شکل دیگر خوردگی، خوردگی حفره ای می باشد که در این نوع خوردگی تا زمانی که درصد بالایی از آرماتور خورده نشده باشد هیچ نشانه خارجی مشاهده نمی شود. در بررسی اثرات سازه ای خوردگی لازم است که بین این دو نوع خوردگی تفاوت قایل شد، چرا که در خوردگی یکنواخت که در این پایان نامه مد نظر است هم پکیدن بتن و کاهش مقاومت پیوستگی و هم کاهش سطح مقطع آرماتور رخ می دهد، در صورتی که در خوردگی حفره ای تنها کاهش سطح مقطع و ترد شدگی آرماتور مشاهده می شود. تاثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی با چند مکانیزم مختلف صورت می گیرد. با توجه به اینکه انتقال نیرو بین بتن و آرماتور هم از طریق قفل و بست بین آجهای آرماتور و بتن و هم از طریق اصطکاک بین آرماتور و بتن صورت می گیرد لذا خورده شدن آرماتور و به تبع آن، کاهش ارتفاع آجهای آرماتور، پوشیده شدن سطح آرماتور از محصولات خوردگی و ترک خوردن بتن باعث کاهش مقاومت پیوستگی می شوند. در صورت ترک خوردن و پکیدن پوشش بتن اثر محصور کنندگی بتن از بین رفته و مؤلفه اصطکاکی مقاومت پیوستگی ناچیز می شود. لذا می توان گفت که ترک خوردن و پکیدن پوشش بتنی گام بلندی به سوی پایان عمر مفید سازه های بتن مسلح می باشد.

همه تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بیانگر این مطلب می باشند که ترک خوردن پوشش قبل از آنکه کاهش سطح مقطع و ظرفیت باربری آرماتور تاثیر قابل توجهی در ظرفیت باربری سازه بگذارد،

رخ می‌دهد. بنابراین کاهش سطح مقطع آرماتور در مقایسه با دیگر آسیبهای سازه‌ای ناشی از خوردگی از اهمیت بالایی برخوردار نبوده و کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مشخص شده است که مدت زمان ترک خوردن پوشش با کاهش قطر، افزایش ضخامت پوشش و افزایش در مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. همچنین مدت زمان ترک خوردن و پکیدن پوشش به شدت وابسته به نوع محیط خورنده بوده و تخمین مشخصات و شدت محیط خورنده اولین گام در ارائه مدل مکانیکی مناسب برای بررسی آسیبهای وارده به سازه می‌باشد.

هدف از انجام این تحقیق تشخیص میزان اثر پارامترهای مختلف در ترک خوردن و ارائه مدلی تحلیلی برای پیش بینی اثرات خوردگی در سازه‌های مختلف می‌باشد. چرا که با داشتن مدلی تحلیلی می‌توان جنبه‌های مختلف خوردگی را برای سازه‌های مختلف بررسی نموده و به یک دستورالعمل جامع برای طراحی سازه‌های جدید در محیطهای با شرایط خورنده شدید و متوسط دست یافت.

تحقیقات آزمایشگاهی در چند سال اخیر جهت پیش بینی انبساط شعاعی آرماتورهای خورده شده و تاثیرات آن بر روی بتن با تاکید بر ترک خوردگی سطح بتن و مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور انجام شده است که عمدتاً بر دو نوع خوردگی تسريع شده<sup>۱</sup> و خوردگی شبیه سازی شده<sup>۲</sup> استوار می باشند.

در آزمایشات خوردگی تسريع شده ، نمونه بتنی و آرماتور تعبیه شده توسط عوامل محیطی خارجی و یا خوردگی الکترو شیمیایی داخلی تحت شارش جریان الکتریکی به آرماتور ، به درصد های مختلف خوردگی رسیده و به بررسی عوامل مختلف پرداخته می شود. ولیکن در آزمایشات خوردگی

---

<sup>۱</sup> Accelerated corrosion test

<sup>۲</sup> Simulated corrosion test



شبه سازی شده که در این پایان نامه استفاده گردیده ، با اعمال فشار داخلی توسط پمپ های هیدرولیکی در سوراخهای تعبیه شده در نمونه ، به بررسی فشار لازم جهت بروز ترک و نمایان شدن آن در روی سطح نمونه پرداخته می شود.

در این پایان نامه با هدف تحلیل نتایج آزمایشات دیگر محققین، مدلی تحلیلی ارائه شده است، که با در نظر گرفتن پارامتر های موجود در این آزمایشات به بررسی عوامل مؤثر بر بروز ترک پرداخته می شود.

در فصل دوم به بررسی مکانیزم خوردگی کلروی در سازه های بتن آرمه پرداخته شده ،در فصل سوم به بررسی اثرات سازه ای خوردگی با استناد به تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در چند سال اخیر می پردازیم و در فصل چهارم مدلهای ارائه شده برای پیش بینی سرعت خوردگی، ترک خوردگی و مقاومت پیوستگی را بررسی می کنیم.

## فصل دوم

خوردگی کلروی

درسازه‌های بتن آرمه

## فصل دوم : خوردگی کلروی در سازه‌های بتن آرمه

### ۲-۱- مقدمه

بتن مسلح، مصالح ساختمانی است که فناوری و کاربرد آن در قرن بیستم بطور چشمگیری توسعه یافته است. استفاده از آرماتورهای فولادی در بتن ترکیب بهینه‌ای ایجاد می‌کند که عملکرد مکانیکی و دوام مناسبی را دارا می‌باشد. عمده‌ترین مصالح بادوامی بوده که دوام آن بیشتر از فولاد می‌باشد. هنگامی که فولاد در داخل بتن قرار می‌گیرد، بتن محیط مناسبی جهت محافظت از فولاد را فراهم می‌آورد. از نظر تئوری، این ترکیب باید دارای دوام زیادی باشد، بتنی که روی فولاد را پوشانده یک مانع و حفاظ محسوب می‌شود تا فولاد را از خرابیهای فیزیکی و شیمیایی محافظت کند و احتمال خوردگی فولاد را کاهش دهد [۱].

پتانسیل فولاد برای خوردگی و روشهای محافظت آن نظیر زنگ زدن و استفاده از روشهای الکتروشیمیایی مانند حفاظت کاتدی تا حدودی شناخته شده است. علیرغم آن با انجام این محافظت‌های وقت‌گیر و پرهزینه نیز نمی‌توان از خوردگی فولاد بطور کامل جلوگیری نمود. تجربه نشان داده است که پوشش بتنی روی فولاد می‌تواند دوام و محافظت سازه را در برابر خوردگی به جز در شرایط محیطی خاص تأمین نماید.

### ۲-۲- مکانیزمهای خوردگی فولاد در بتن

خوردگی فولاد در هر محیطی یک فرآیند پیش‌رونده می‌باشد که در اثر انتقال یونهای آهن از فولاد صورت می‌گیرد. انتقال یونها بوسیله واکنش الکتروشیمیایی و حل شدن یونهای  $Fe^{2+}$  در محلول منفذی بتن انجام می‌شود. این حل شدن در حجم محدود محلول آبی منافذ

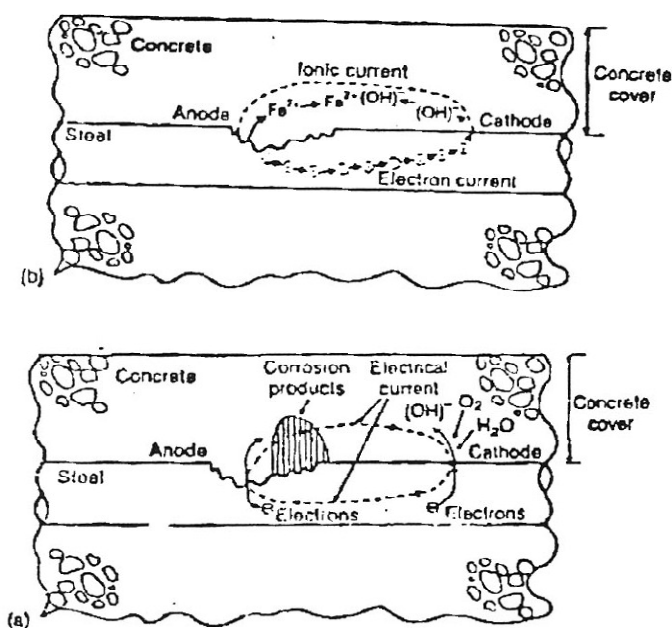
بتن اطراف فولاد اتفاق می‌افتد. نتیجه فرآیند حل شدن کاهش وزن فولاد می‌باشد و در نتیجه قطر میلگرد کاهش می‌یابد.

اگر فولادی که دچار خوردگی شده بخشی از یک سازه بتن مسلح تحت بار باشد، تنش بوسیله سطح مقطع باقیمانده تحمل می‌شود و این تنش برای این سطح مقطع الزاماً افزایش می‌یابد. در حالت‌های شدید اینچنین افزایشی ممکن است ایمنی سازه را به خطر اندازد یا حتی ممکن است منتهی به انهدام آن شود. بنابراین خوردگی فولاد در بتن به صورت یک ریسک در ایمنی سازه مشخص می‌شود. یونهای آهن حل شده در محلول آبی منافذ بتن با یونهای هیدروکسید ( $\text{OH}^-$ ) و مولکولهای اکسیژن ( $\text{O}_2$ ) واکنش انجام می‌دهند که محصولات متنوعی را بصورت جامد بوجود می‌آورند. این محصولات خوردگی در یک مکان محدود در بتن اطراف فولاد به جا می‌ماند. تشکیل این محصولات خوردگی در یک مکان محدود باعث ایجاد فشارهای انبساطی می‌شود. مخصوصاً وقتی بتن در معرض یخ‌زدگی و آب شدگی یا تحت تأثیر عوامل محیطی دیگری قرار دارد میزان این تخریب شدیدتر می‌باشد.

## ۲-۱-۲- واکنش‌های خوردگی

خوردگی فولاد در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد و در این فرآیند واکنشهایی باعث ایجاد جریان الکتریکی می‌شوند. فرایندهای شیمیایی و الکتریکی به هم وابسته هستند. برای بررسی شرایط خوردگی فولاد در بتن، باید با مفاهیم اصلی هر دو واکنش شیمیایی و فرایندهای الکتریکی آن آشنا شویم. برای طراحی یک سازه بتن مسلح داشتن چنین اطلاعاتی به منظور کاهش مشکلات ناشی از خوردگی آرماتور در سازه ضروری می‌باشد.

فرآیند خوردگی در دو محل مجزا ولی وابسته به هم اتفاق می‌افتد. واکنشهای شیمیایی بطور همزمان در دو محل مختلف هر چند بسیار نزدیک به هم در سطح آرماتور انجام می‌شود. همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است جریان الکتریکی باید بصورت یک حلقه بسته بین دو محل جریان داشته باشد تا واکنشها پیشرفت کنند. این فرآیند کاملاً شبیه فرآیندی است که در یک باتری خشک اتفاق می‌افتد و تولید برق می‌کند، این چنین باطریهایی را پیل‌های گالوانیکی می‌نامند و بر همین مبنا فرآیند خوردگی نیز گاهی خوردگی گالوانیکی نامیده می‌شود.



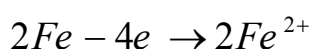
شکل ۱-۲ فرآیند خوردگی در سطح فولاد [۱]

الف) واکنشها در مناطق کاتدی و آندی و شار جریان خوردگی

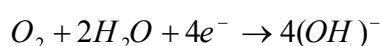
ب) جریان الکتریکی ذرات باردار در حلقه جریان در فرآیند خوردگی

برای خوردگی آرماتورها دو واکنش الکتروشیمیایی اتفاق می‌افتد که به واکنشهای آندیک و کاتدیک موسومند و مناطقی از فولاد که این واکنشها در آن مناطق اتفاق می‌افتد مناطق آندیک و کاتدیک یا بطور ساده آند و کاتد نامیده می‌شوند (شکل ۱-۲).

این دو واکنش عبارتند از:



(۱-۲-الف) واکنش آندی



(۱-۲-ب) واکنش کاتدی

الکترونیایی که در اثر واکنش آندیک بوجود آمده‌اند به نواحی کاتدیک جریان پیدا می‌کنند و در این نواحی مطابق واکنش کاتدیک مصرف می‌شوند و این جابجایی متقابل یونی در محلول منافذ بتن جریان دارد که جریان خوردگی نامیده می‌شود. ایجاد چنین جریانی لازمه فرآیند خوردگی می‌باشد و با قطع این جریان فرآیند خوردگی متوقف می‌شود.

در این فرآیند، خوردگی فلز در مناطق آندی اتفاق می‌افتد. همچنانکه در واکنش (۱-۲-الف) دیده می‌شود اتم‌های آهن به یونهای  $Fe^{2+}$  یونیزه می‌شوند. این یونها در محلول منافذ بتن حل شده و الکترونیایی در سطح فولاد بجا می‌گذارند که در اثر آن پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد، سپس این الکترونها در طول آرماتور جریان می‌یابند و به کاتد رفته و در آنجا مطابق واکنش (۱-۲-ب) مصرف می‌شوند و بدین ترتیب فرآیند خوردگی ادامه می‌یابد. به ازای هر ملکول اکسیژن حل شده در ناحیه کاتدی دو اتم آهن باید یونیزه شود. فرآیند حل شدن فلز مطابق واکنش (۱-۲-الف) تا زمانی ادامه می‌یابد که واکنش کاتدی فعال بوده و الکترونها تولید شده در ناحیه آندی در کاتد مصرف گردند. بنابراین می‌توان به این نکته مهم

رسید که اگر اکسیژن و آب در مناطق کاتدی وجود نداشته باشند ، فرآیند خوردگی ادامه نخواهد یافت.

فرآیند الکتروشیمیایی خوردگی در شکل ۱-۲ بصورت مسیر جریان در یک حلقه بسته نشان داده شده است. جریان الکتریکی در داخل آرماتور فولادی نتیجه حرکت الکترون‌ها از آند به کاتد می‌باشد. همزمان یک جریان یونی از داخل محلول منافذ بین اطراف میلگرد بدلیل حرکت یونهای حامل بار ایجاد می‌گردد، این جریان شامل حرکت یونهای هیدروکسید (بار منفی) که از کاتد به آند و همچنین حرکت یونهای آهن (بار مثبت) از آند به کاتد می‌باشد. باید توجه نمود که آب داخل منافذ بتن یک محلول رقیق قلیایی و حاوی هیدروکسید کلسیم بوده که حرکت یونها توسط این محلول انجام می‌گیرد. در صورتی که این منافذ خشک شوند و یا بتن به حدی متراکم شود که منافذ آن به هم ارتباط نداشته باشند، جریان یونی به سختی انجام می‌گیرد و در نتیجه فرآیند خوردگی کند شده و یا متوقف می‌شود.

فرآیند فوق را می‌توان از لحاظ الکتریکی چنین بیان نمود که اگر مقاومت الکتریکی در بتن (مقاومت در برابر جریان یونها) زیاد باشد، شدت جریان ایجاد شده در اثر حرکت یونها کاهش یافته و واکنشهای آندی و کاتدی به کندی انجام می‌گیرد و در نتیجه سرعت خوردگی کاهش می‌یابد. در ادامه فرآیند خوردگی با حرکت یونهای  $Fe^{2+}$  و  $OH^-$  به طرف یکدیگر، هیدروکسید آهن  $Fe(OH)_2$  تشکیل می‌گردد که این نیز در مرحله بعدی با یونهای هیدروکسید اضافی و بعضاً با اکسیژن ترکیب شده و ماده‌ای نامحلول تولید می‌کند که همان زنگ آهن می‌باشد.

در تجزیه و تحلیل خوردگی فولاد در بتن لازم است دو موضوع بررسی شود:

الف) خوردگی تحت چه شرایطی می‌تواند اتفاق بیافتد؟

ب) در صورت شروع خوردگی سرعت پیشرفت آن به چه میزانی می‌باشد؟

## ۲-۳- احتمال وقوع خوردگی

نواحی آندی و کاتدی در سطح فولاد یا فلزهای دیگر در صورتی ایجاد می‌شوند که یا ترکیب فولاد از محلی به محل دیگر تغییر کند و یا تنشهای موضعی و یا اختلاف تنش در نواحی مختلف فولاد بوجود آمده باشد و یا مناطق مختلف از نظر شرایط محیطی و رطوبتی با همدیگر تفاوت داشته باشند. اینچنین شرایطی باعث می‌شود که بعضی از نقاط از نظر شیمیایی فعالتر از نقاط دیگر شوند و همین نقاط است که مناطق آندی و کاتدی را ایجاد می‌کنند. اختلاف در فعالیتهای شیمیایی از محلی به محل دیگر باعث ایجاد اختلاف در پتانسیل الکتریکی شده و این اختلاف پتانسیل الکتریکی نیروی لازم برای شروع واکنشهای خوردگی را فراهم می‌کند. وقتی دو فلز مختلف با هم در تماس باشند اختلاف زیادی در پتانسیل الکتریکی بوجود آمده و یکی از آنها آند و دیگری کاتد می‌شود، در صورتیکه محیط مرطوب باشد فرآیند خوردگی تسریع می‌شود. همچنین خوردگی می‌تواند در اثر اختلاف پتانسیل بین نواحی مختلف یک قطعه فلز نیز بوجود آید که این اختلاف در ترکیبات در آن نواحی بوجود می‌آید.

در بررسی مقطع میکروسکوپی فولاد معمولی نیز ناهمگونی دیده می‌شود، بدین ترتیب که آلیاژ کربن آهن شامل دو کریستال مختلف می‌باشد، ولی کریستال آهن که فریت نام دارد و دیگری کربید آهن ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) که سمنتیت نامیده می‌شود. باید دانست که فاز فریت پتانسیل فعالتری نسبت به فاز سمنتیت دارد [۱].



اختلاف پتانسیل می‌تواند در نواحی مختلف یک فلز که از یک نوع کریستال ساخته شده و ترکیب آن از هر جهت یکنواخت می‌باشد نیز بوجود آید. اتم‌های بافت سطحی فلز و مجاور آن تمایل دارند که بیشتر از اتم‌های داخل جسم فعال شوند. این مناطق آندی می‌شوند و پیل‌های تشکیل شده در این حالت در ابعاد میکروسکوپی مجاور هم قرار می‌گیرند. ممکن است یک محل بطور دائم آند یا کاتد باشد البته بعضی اوقات نیز محل آند و کاتد روی سطح فلز بطور دائم تغییر می‌کنند.

بنابراین سطح زیادی از فلز را مناطق آندی و کاتدی مجاور هم اشغال می‌کنند. تا هنگامی که فلز خشک می‌باشد جریان‌های موضعی بوجود نمی‌آید و خوردگی انجام نمی‌شود ولی وقتی فلز در معرض آب یا الکترولیتها قرار گرفت این جریانها ایجاد شده و پیل‌های موضعی فعال می‌شوند و در نتیجه جریان‌های الکتریکی بوجود آمده و خوردگی آغاز می‌شود [۱].

خوردگی انواع مختلفی دارد: یکی از انواع خوردگی به این صورت است که فرآیندهای خوردگی بطور یکنواخت انجام می‌شود و خوردگی روی سطح فلز بصورت منظم کم و زیاد می‌شود، این خوردگی «خوردگی یکنواخت»<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این خوردگی در اثر سردکاری به فلزات وارد می‌شود می‌تواند سبب ناهماهنگی در بافت سطوح فلز گردیده و بنابراین فلز در ناحیه تحت تنش فعالیت خوردگی بیشتری نشان داده و خورده می‌شود (آند) و آن قسمت از فلز که تحت تنش نمی‌باشد همانند کاتد عمل می‌کند.

خوردگی آرماتور ممکن است در اثر اختلاف تنشها در نقاط مختلف میلگرد بوجود آید که این موضوع سبب اختلاف پتانسیل الکتریکی گردیده و سبب ایجاد آند در نواحی دارای

---

<sup>۱</sup> Uniform corrosion

تنشهای بیشتر می‌گردد. همانطور که قبلاً گفته شد خوردگی می‌تواند در اثر اختلافاتی در محیط اطراف یک قطعه فلز نیز بوجود آید. حتی اگر فلز کاملاً همگن باشد، این اختلاف در محیط اطراف باعث ایجاد خوردگی در آن فلز می‌شود. این نوع خوردگی بیشتر وقتی بوجود می‌آید که اختلاف موضعی در غلظت اکسیژن حل شده وجود داشته باشد. اگر مناطقی در طول میلگرد وجود داشته باشد که بیشتر از جاهای دیگر در معرض هوا قرار داشته باشند، این مناطق تمایل دارند که کاتد باشند و نواحی که کمتر در معرض هوا قرار دارند آنند می‌شوند. این نوع خوردگی «خوردگی پیل هوادهی»<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

خوردگی هوادهی، خوردگی غلظتی نیز نامیده می‌شود. زیرا این نوع خوردگی وقتی بوجود می‌آید که اختلاف غلظت یونی در محلهای مجاور هم وجود داشته باشد. حتی اختلاف میزان رطوبت بخشهای مختلف پوشش بتنی اطراف میلگرد نیز می‌تواند در ایجاد پتانسیل خوردگی غلظتی مؤثر باشد.

## ۲-۴- میزان خوردگی

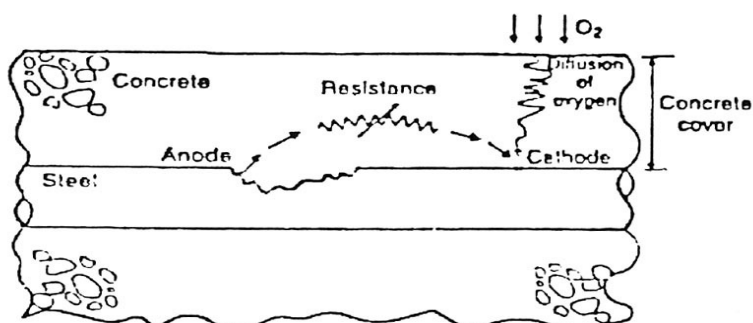
در بخش ۲-۳ در مورد احتمال وقوع خوردگی، بخصوص در اثر ایجاد اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی بین مناطق بالقوه آندی و کاتدی روی فولاد، بحث گردید. وجود چنین پیل‌هایی الزاماً دلیل بر انجام فعالیت خوردگی قابل توجهی در عمل نمی‌باشد بلکه اگر میزان خوردگی کنترل شود و در حد پایین نگه داشته شود عملاً خوردگی مشکلات قابل ملاحظه‌ای را بوجود نمی‌آورد. یکی از عوامل مهم جهت کنترل خوردگی، اکسیژن حل شده در اطراف

---

<sup>۱</sup> Aeration cell Corrosion

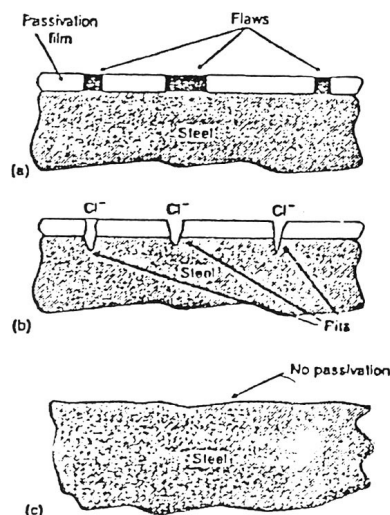
ناحیه کاتدی می‌باشد. اکسیژن طی واکنش کاتدی (رابطه ۲-۱-ب) مصرف می‌شود و بنابراین اگر اکسیژن به مقدار کافی به منطقه کاتدی نرسد واکنشهای خوردگی به تأخیر خواهد افتاد.

یکی از روشها برای کنترل دسترسی اکسیژن این است که سطح فولاد با پوششی نظیر پوشش بتن حفاظت شود تا اکسیژن چه بصورت گاز از محیط اطراف به کندی نفوذ کند. این موضوع در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. این چنین حالتی از کنترل خوردگی را دیفیوژن می‌نامند که به معنای کنترل خوردگی از طریق کنترل میزان نفوذ اکسیژن از میان پوشش بتن می‌باشد. کنترل شروع خوردگی و میزان آن از طریق کند کردن نفوذ اکسیژن سبب کاهش زیادی در اختلاف پتانسیل بین مناطق آندی و کاتدی می‌گردد. این چنین اثری، اثر پلاریزاسیون و فرآیند مربوطه را پلاریزاسیون می‌نامند. محدود کردن نفوذ اکسیژن تنها یکی از حالت‌های مختلف پلاریزاسیون می‌باشد که پلاریزاسیون غلظتی نامیده می‌شود. کند کردن فرآیند خوردگی فولاد در بتن با محدود کردن جریان یونها (نه الکترونها) از میان منافذ بتن پوشش فولاد نیز امکان‌پذیر است و این در صورتی می‌باشد که مقاومت الکتریکی بین آند و کاتد زیاد باشد (شکل ۲-۲). بنابراین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن پوشش فولاد می‌تواند نشان‌دهنده سرعت پیشرفت واکنشهای خوردگی باشد.



شکل ۲-۲ توصیف شماتیک دو عامل کندگیر کننده سرعت خوردگی فولاد در بتن که بصورت دسترسی به اکسیژن در منطقه کاتد و مقاومت الکتریکی بتن در مقابل جریان یونی می‌باشد [۱].

عامل دیگری که سبب کند شدن فرآیند خوردگی می‌گردد لایه نازک (در حدود  $0.01 \mu\text{m}$ ) از اکسید فلز است که در اثر واکنش فولاد با اکسیژن بوجود آمده است و این لایه روی سطح فلز را پوشانده و بصورت نامحلول می‌باشد. اگر این لایه در تماس با آب منفذی بتن با ثبات باقی بماند فلز از لحاظ الکتروشیمیایی غیرفعال خواهد بود و مقدار تجزیه آندی آن کاهش می‌یابد [۱]. در واقع تا زمانی که این لایه محافظ روی سطح فلز با ثبات بماند مقدار خوردگی کم خواهد بود. وضعیت این لایه محافظ در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در چنین شرایطی حالت غیرفعال فلز نباید با پلاریزاسیون غلظتی اشتباه شود زیرا دو پدیده کاملاً مجزا هستند و در این حالت عامل اصلی، مقاومت فولاد در برابر خوردگی می‌باشد. این اثر انفعالی می‌تواند تا زمانی که فولاد در تماس با آب منفذی بتن که غلظت یون  $\text{OH}^-$  آن به اندازه کافی باشد، باقی بماند.



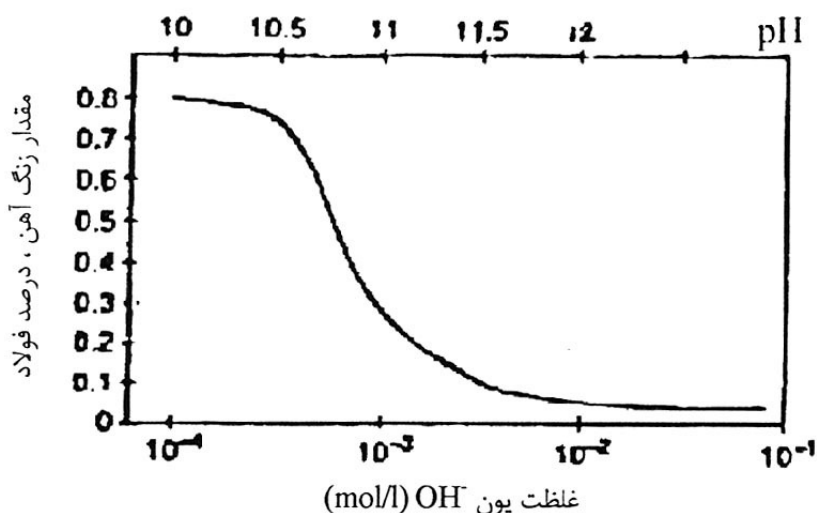
شکل ۲-۳ توصیف شماتیک تشکیل و ثبات لایه غیر فعال اکسید روی فولاد [۱]

الف) لایه اکسید چسبیده روی فولاد از خوردگی عملاً جلوگیری می‌کند.

ب) تشکیل نقاط موضعی خوردگی در اثر شکسته شدن لایه اکسید غیر فعال

ج) فعال شدن غیر یکنواخت لایه غیر فعال در اثر کربناسیون و کاهش pH

در شکل ۲-۴ منحنی میزان خوردگی فولاد (برحسب درصد وزن زنگ تشکیل شده) در برابر غلظت یون هیدروکسید که به منظور حفظ حالت انفعالی لازم است، ثابت نمی‌ماند و در اثر وجود یونهای مختلفی مخصوصاً یونهای کلرید، تغییر می‌کند. در حالت محلول به دلیل بالا بودن غلظت یون  $\text{OH}^-$  در آب منفذی بتن اطراف آرماتور این لایه غیرفعال با ثبات باقی می‌ماند.

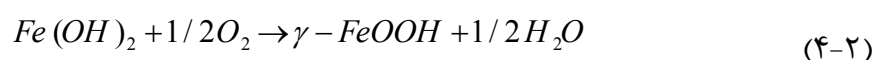


شکل ۲-۴ خوردگی فولاد در محل آبی در رابطه با غلظت یون  $\text{OH}^-$  [1] کاهش خوردگی در pH بالای ۱۲/۵ نشانه تشکیل لایه اکسید غیر فعال می‌باشد

با توجه به اهمیت لایه محافظ تشکیل شده روی سطح فولاد قرار گرفته در بتن در ادامه به بررسی واکنشهای مربوط به تشکیل این لایه محافظ و شرایطی که باعث بی‌ثباتی این لایه می‌شود، می‌پردازیم.

شرایطی که باعث بی‌ثباتی این لایه می‌شود شامل کربناسیون بتن (که باعث کاهش غلظت یون  $\text{OH}^-$  در آب منفذی بتن می‌شود) و وجود یونهای  $\text{CL}^-$  است که به داخل آب منفذی بتن اطراف فولاد نفوذ می‌کند.

لایه‌های اکسید که بطور طبیعی بر روی فولاد تشکیل می‌شوند از نوع فروس ( $Fe^{2+}$ ) و یا فریک ( $Fe^{3+}$ ) هستند. باید دانست اکسید فریک در حضور کلرید دارای ثبات بیشتری است و اکسید فروس به مرور زمان تبدیل به اکسید فریک ( $FeOOH$ ) می‌شود. البته فرآیند تبدیل اکسید فروس به اکسید فریک هرگز بطور کامل انجام نمی‌شود. نحوه شکل‌گیری لایه محافظ در شکل ۲-۳-الف نشان داده شده است و پیشرفت واکنشها مطابق معادلات زیر است:



وقتی غلظت یون  $OH^{-}$  به اندازه کافی نباشد (pH کمتر از ۱۱/۵) اکسید فروس و اکسید فریک حالت محافظت کننده خود را از دست می‌دهند لازم به ذکر است که در مقادیر کم  $OH^{-}$  نیز اکسیدها تشکیل می‌شوند ولی روی سطح فلز باقی نمی‌مانند، بنابراین نقش حفاظتی نخواهند داشت. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که در اثر کربناسیون غلظت یون  $OH^{-}$  در محلول منفذی بتن پوشش میلگرد کاهش یافته باشد.

همانطور که قبلاً گفته شد، لایه‌هایی که عمده‌تاً از اکسید فریک تشکیل شده‌اند نسبت به لایه‌هایی که از اکسید فروس تشکیل شده‌اند ثبات بیشتری در برابر کلریدها دارند. کلریدها با اکسید فروس تشکیل کمپلکس می‌دهند که در محلول منفذی اطراف آرماتور حل شده و بنابراین نقش حفاظتی لایه اکسید از بین می‌رود.

بنابراین در صورت وجود یونهای کلرید در محلول منافذ بتن مجاور آرماتور در نقاطی که در آن اکسید فروس تبدیل به اکسید فریک نشده دچار خوردگی خواهد شد که در شکل ۲-۳-ب نشان داده شده است. فرآیند خوردگی با فرآیند تبدیل لایه اکسید فروس به اکسید فریک (معادله ۲-۴)، رقابت می‌کند و پیشرفت آن فقط در صورتی است که مقدار یون  $OH^-$  بیشتر باشد. بنابراین برای استحکام لایه اکسید فریک لازم است که غلظت یون  $OH^-$  زیاد باشد. از طرف دیگر اکسیژن حل شده در محلول منفذی بتن اطراف آرماتور تبدیل اکسید فروس به اکسید فریک را تسریع می‌نماید، بنابراین خوردگی حفره‌ای در مناطق خاصی اتفاق می‌افتد که مقدار اکسیژن حل شده در این مناطق کم باشد. به این علت است که میزان نسبت یونهای کلرید به  $OH^-$  در کنترل نمودن شروع خوردگی حفره‌ای دارای اهمیت می‌باشد.

بعلت اهمیت مکانیزم ایجاد لایه غیرفعال در حفاظت فولاد در بتن و تأثیر ترکیب و غلظت محلول منافذ بتن و عناصر موجود در آب بتن در ثبات این لایه حائز اهمیت می‌باشد. این بررسی مقادیر غلظت یونها مخصوصاً غلظت یونهای هیدروکسید و هیدروژن می‌باشد. بطور خلاصه باید گفت که ثبات لایه محافظ روی سطح فولاد در رابطه با pH محلول منفذی اطراف آرماتور می‌باشد. اگر pH بیشتر از حدود ۱۱/۵ باشد و یونهای همچون  $Cl^-$  وجود نداشته باشد، لایه غیرفعال بطور طبیعی باقی می‌ماند و مقدار خوردگی خیلی کند می‌باشد. زمانی که pH از این مقدار کمتر شد و یا اینکه یونهای  $Cl^-$  در محلول منافذ موجود باشند، این لایه محافظ دچار آسیب می‌شود. در صورت زیاد بودن غلظت یون کلرید حتی اگر pH بیشتر از ۱ هم باشد این لایه محافظ ثبات خود را از دست خواهد داد. این موضوع در شکل ۲-۳-ب نشان داده شده است بی‌ثباتی لایه محافظ فولاد در مناطق مجزا از هم اتفاق افتاده و در نتیجه

خوردگی حفره‌ای بوجود می‌آید در حالیکه در اثر کاهش یکنواخت مقدار pH، لایه محافظ فولاد از بین رفته و خوردگی یکنواخت پیش می‌آید.

## ۲-۵- تأثیر ساختار و خصوصیات بتن بر فرآیند خوردگی

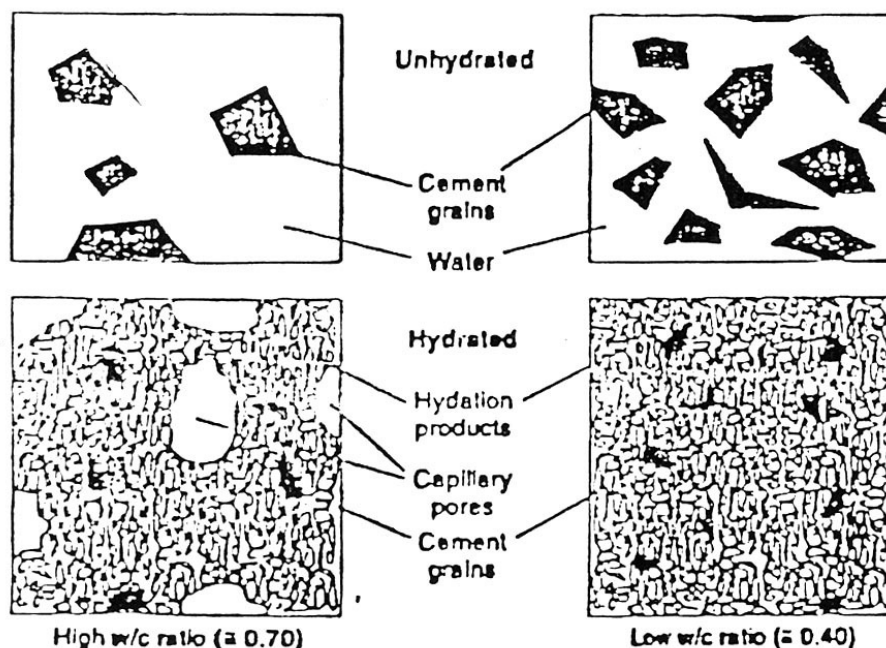
خوردگی فولاد در بتن مسلح بطور عمده، با خوردگی فولاد قرار گرفته در معرض هوا تفاوت دارد زیرا اساساً پوشش بتنی خصوصیات شیمیایی محیط اطراف فولاد را تغییر می‌دهد.

عملکرد عمده پوشش بتن در برابر خوردگی، تأمین یک لایه پوشش محافظ است و کارایی و مؤثر بودن این پوشش بتنی، تابعی از ترکیبات شیمیایی و ساختار فیزیکی آن می‌باشد. از جمله جنبه‌های مهم ساختار فیزیکی این پوشش بتنی می‌توان کل منافذ آن، نحوه توزیع منافذ و ارتباط آنها را ذکر نمود. بنابراین لازم است که قبل از بررسی فرآیند جزئیات خوردگی فولاد در بتن به بیان برخی از مشخصه‌های بتن بپردازیم:

### ۳-۵-۱- ساختار بتن و خمیر سیمان

ساختار خمیر سیمان در نتیجه واکنش بین ذرات سیمان پرتلند و آب اختلاط شکل می‌گیرد. گیرش سیمان در زمانهای اولیه شروع می‌شود و بعد از آن مرزهای خارجی کم و بیش ثابت می‌شود. با توجه به اینکه حجم محصولات تولید شده در اثر هیدراسیون بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حجم ذرات موجود سیمان است، بنابراین در ادامه فرآیند هیدراسیون این محصولات منافذ خالی را پر نمایند. این موضوع در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.





شکل ۲-۵ توصیف شماتیک شکل‌گیری ساختار خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان کم و زیاد [۱]

تأثیر این پدیده برای نسبت آب به سیمان کم بیشتر از نسبت آب به سیمان زیاد می‌باشد. هر چند در هر دو مورد خلل و فرج با پیشرفت هیدراسیون کاسته می‌شود. در هر حال با توجه به تحقیقات Powers می‌توان منافذ موجود در بتن را به دو دسته متداول تقسیم نمود [۱]، دسته اول منافذ بزرگ‌ترند که «منافذ موئین» نامیده می‌شوند که توسط محصولات هیدراسیون به فضاهای کوچک‌تر تقسیم می‌شوند هرچند این منافذ توسط محصولات هیدراسیون کاملاً پر نمی‌شوند. دسته دوم منافذ کوچک‌ترند که اغلب در بین محصولات حاصل از هیدراسیون شکل می‌گیرند و به «منافذ ژل» موسومند. در بتن با نسبت آب به سیمان کم بعد از گذشت مدت زمان کافی از فرآیند هیدراسیون، میزان کل منافذ خمیر سیمان کاهش یافته و ساختار خمیر سیمان چگال‌تر و میزان نفوذپذیری آن کمتر از ساختار خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان زیاد می‌گردد. در حالیکه در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان زیاد نه تنها

میزان کل حجم منافذ زیادتر می‌باشد بلکه ارتباط زیادی بین منافذ موبین حتی بعد از گذشت مدت طولانی از واکنش باقی خواهد ماند.

با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که بتن‌های با نسبت  $w/c$  کم ذاتاً دارای نفوذپذیری کمتر از بتن‌های با  $w/c$  زیاد می‌باشند ضمن اینکه مقاومت آنها نیز بیشتر می‌باشد. به همین دلیل در اکثر مراجع محدودیت حداکثر نسبت آب به سیمان به منظور کنترل فرآیند خوردگی در سازه‌های بتن مسلح قرار گرفته در معرض شرایط محیطی شدید، در نظر گرفته می‌شود. البته باید دانست که تنها کنترل نسبت آب به سیمان برای جلوگیری از خوردگی کافی نیست. بلکه ضروری است مخلوط بتن دارای مقدار کافی سیمان باشد به طوری که حجم کافی از خمیر سیمان تولید شود، تا فضاهای بین ذرات سنگدانه را پر کند. علاوه بر این کارایی بتن باید به حدی باشد که بتوان آن را بطور مؤثر متراکم نمود. به همین دلیل مقدار حداقل سیمان موردنیاز باید مشخص شود و این مقدار حداقل سیمان براساس رسیدن بتن به تراکم و دانسیته زیاد تعیین می‌گردد تا بتن به مقاومت موردنظر برسد.

همچنین روشهای اجرایی دقیق و مناسبی لازم است تا پوشش بتن، مقاومت لازم و کیفیت مناسب را بدست آورد. در صورت عدم تراکم بتن و عمل‌آوری رضایتبخش آن حتی اگر طرح اختلاط بتن نیز دقیق باشد نفوذپذیری آن مطابق آنچه براساس طرح اختلاط بتن پیش‌بینی شده، نخواهد بود.

## ۲-۶- ساختار شیمیایی بتن

دو محصول عمده بدست آمده از هیدراسیون عبارتند از: کریستالهای نسبتاً بزرگ هیدروکسید کلسیم  $[Ca(OH)_2]$  و ذرات خیلی کوچک (کلوئیدی) سیلیکات کلسیم هیدراته که

به اختصار C-S-H نامید می‌شود. عموماً ترکیب این ژل در اغلب بتن‌ها  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  می‌باشد. همچنین ممکن است انواع مختلف سولفات‌های آلومینات کلسیم هیدراته و محصولات دیگر نیز به میزان کم از این واکنش بدست آید. در تمامی سیمانهای پرتلند حداقل چند دهم درصد قلیایی موجود می‌باشد که بصورت ترکیبی از  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  معادل می‌گردند. این کاتیون‌ها اغلب در ترکیب نمک‌های سولفاتی می‌باشند که پس از اضافه نمودن آب بلافاصله در آب اختلاط حل می‌شوند. وقتی بتن سفت می‌شود، باقیمانده آب اختلاط در منافذی که به تازگی در ساختار مواد تازه سخت شده شکل گرفته محصور می‌شود. با ادامه عمل‌آوری مقداری از این آب برای تشکیل ترکیبات هیدراسیون مصرف می‌شود. بسته به شرایط محیطی و نفوذپذیری بتن، ممکن است آب اضافی از بیرون جایگزین شود. آب محلول منافذ، شامل یونهای حل شده‌ای است که در سیمان وجود داشته است. بنابراین آن را بجای آب منفذی، «محلول منفذی» می‌نامند. بعد از گذشت چند روز از شروع هیدراسیون، غلظت قلیایی‌ها و یونهای هیدروکسید کلسیم در محلول منافذ بتن زیاد می‌گردد البته محلول منافذ شامل یونهای کلسیم و سولفات با غلظت کمتر نسبت به یونهای هیدروکسید کلسیم و مقدار خیلی ناچیزی از یونهای دیگر نیز می‌باشد. معمولاً غلظت یون بین ۰/۵ تا ۱ مولار می‌باشد حتی اگر منافذ بتن با محلول منفذی بتن با محلول منفذی اشباع نیز شده باشد غلظت یون هیدروکسید در همین حدود می‌باشد. در بتن نیمه خشک میزان غلظت بالاتر از این حد می‌باشد. مقدار pH در این حالت حدود عدد ۱ می‌باشد.

در صورتی که آرماتور واقع در بتن، در تماس با محلول منفذی با قلیائیت زیاد باشد لایه‌های مستحکم و با ثبات بر روی آرماتور تشکیل می‌شود که از آن در برابر خوردگی محافظت می‌کند.

مقدار pH محلول منفذی بتن تحت تأثیر عوامل متعددی است، که مهمترین آنها مقدار قلیائیت و عیار سیمان مورد استفاده در بتن می‌باشد. عوامل دیگری نظیر نسبت آب به سیمان مقدار قلیائی شسته و خارج شده که توسط آب در سازه‌های بتنی مغروق و میزان قلیائی که در واکنش با سنگدانه‌های فعال شرکت کرده ممکن است بر روی pH محیط تأثیر بگذارند. فاکتور مهم دیگری سبب کاهش شدید pH پوشش بتن می‌گردد، کربناسیون می‌باشد.

همانطور که قبلاً گفته شد، معمولاً لایه‌های غیرفعال روی آرماتور در بتن مسلح تشکیل و بصورت زنگ‌زدگی باقی می‌ماند. در مواردی وجود یونهای دیگر در محلولی منفذی بتن سبب تخریب این لایه غیرفعال می‌گردد و این یونها ممکن است توسط مواد افزودنی یا سنگدانه‌های آلوده و یا از طریق پدیده نفوذ به محلول منفذی بتن وارد شوند. مهمترین این یونها یون کلرید است که در صورت بالا بودن غلظت آن موجب بی‌ثباتی و تخریب لایه غیرفعال می‌گردد. آلودگی به یون کلرید و پدیده کربناسیون دو عامل عمده ایجاد خوردگی در سازه‌های بتن مسلح می‌باشند. منابع عمده یونهای کلرید در بتن کاربرد سنگدانه‌های آلوده به نمک در بتن، استفاده از آب دریا بعنوان آب اختلاط و یا عمل آوری بتن، ریختن نمکهای یخ‌زدا روی سطح بتن یا استفاده از افزودنیهای حاوی کلرید کلسیم در بتن بعنوان تندگیر کننده می‌باشند که در ادامه به بررسی تفصیلی منابع یونهای کلرید آزاد پیوندی و تأثیر انواع سیمانها و عوامل مؤثر دیگر بر خوردگی می‌پردازیم.

## ۷-۲- منابع یونهای کلرید در بتن و مقادیر مجاز

از جمله منابع ورود یونهای کلرید در بتن مواد تشکیل‌دهنده بتن یعنی آب، سنگدانه‌ها، مواد شیمیایی و مواد افزودنی می‌باشند که آئین‌نامه‌ها محدودیت‌هایی را برای میزان کل یون

کلرید در بتن مسلح مجاز داشته‌اند. طبق آیین‌نامه‌های BS 110 مقدار کل یون کلرید مجاز در بتن ۰/۴ درصد وزنی سیمان می‌باشد. در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) کلرید محلول در آب در نظر گرفته شده و مقدار مجاز آن در بتن مسلح به ۰/۱۵ درصد وزنی سیمان محدود گردیده است که این مقدار معادل ۰/۴ درصد وزنی سیمان برای مقدار کل یون کلرید می‌باشد ، زیرا کلرید محلول در آب تنها بخشی از کل کلرید می‌باشد. مقدار کل کلرید بعنوان مقدار کلرید محلول در اسید با استفاده از استاندارد ASTM C 1152 یا BS 1881 تعیین می‌شود.

منبع دیگر کلرید در بتن سیمان پرتلند است که دارای مقدار خیلی کمی کلرید می‌باشد. ولی اگر در فرآیند کوره آهنگدازی برای سرد کردن سریع فولاد بعد از عملیات حرارتی از آب دریا استفاده گردد سرباره حاصل دارای مقدار زیادی یون کلرید خواهد بود.

طبق آیین‌نامه BS مقدار ماکزیمم کلرید در سنگدانه‌های بکار رفته در بتن مسلح نباید از ۰/۰۵ درصد وزنی سنگدانه تجاوز کند. آیین‌نامه آبا مقدار مجاز کلرید قابل حل در سنگدانه‌های بکار رفته در بتن مسلح را به ۰/۰۴ درصد وزنی سنگدانه محدود می‌کند. منبع دیگر کلرید در بتن، آب است آیین‌نامه بتن ایران مقدار مجاز کلرید در آب مصرفی بتن بعنوان آب اختلاط بتن به 500 ppm محدود می‌نماید.

## ۲-۸- نفوذ یونهای کلرید

خوردگی در اثر نفوذ یون کلرید یکی از عوامل اصلی و مهم در تخریب سازه‌های بتن مسلح که در معرض آب دریا یا نمکهای یخزدا قرار دارند می‌باشد. همچنین این کلریدها می‌توانند روی سطح بتن رسوب کنند. این رسوبها بوسیله قطرات بسیار ریز آب دریا در گرد و غبار معلق در هوا تشکیل می‌شود. فاصله‌ای که کلرهای معلق در هوا طی می‌کنند تا ۲km نیز

گزارش شده است [۱] و حتی ممکن است مسافت بیشتر از این نیز کله‌ها حمل شوند که بستگی به سرعت باد و ویژگی‌های جغرافیایی منطقه دارد. همچنین وضعیت سازه‌ها در حرکت و جابجایی نمک‌های معلق در هوا مؤثر می‌باشد. وقتی گردباد در هوا بوجود می‌آید نمک‌ها می‌توانند حتی به بخشهایی از سازه که به سمت خشکی می‌باشد، برسند. آب‌های شور زیرزمینی که در تماس با بتن می‌باشند منبع دیگر ورود کلریدها می‌باشند. راه دیگر ورود کلریدها به بتن وقتی است که آتش سوزی‌های بزرگ در انبار مواد معدنی که دارای کلرید می‌باشند اتفاق بیافتد.

بدون توجه به منبع خارجی تأمین کننده یون کلرید از طریق جابجایی و حرکت آب حاوی کلرید در بتن و یا توسط انتشار یون کلرید، کلریدها همچنین از طریق جذب از خارج بدخل بتن وارد می‌شوند. ادامه و تکرار ورود این یونها در هر حال باعث افزایش یون کلرید روی سطح فولاد می‌شود. در بتنی که دائماً در آب حاوی کلر غوطه‌ور باشد، کلر وارد شده به بتن در حد قابل توجهی می‌باشد اما بدلیل فقدان اکسیژن در کاتد خوردگی اتفاق نخواهد افتاد.

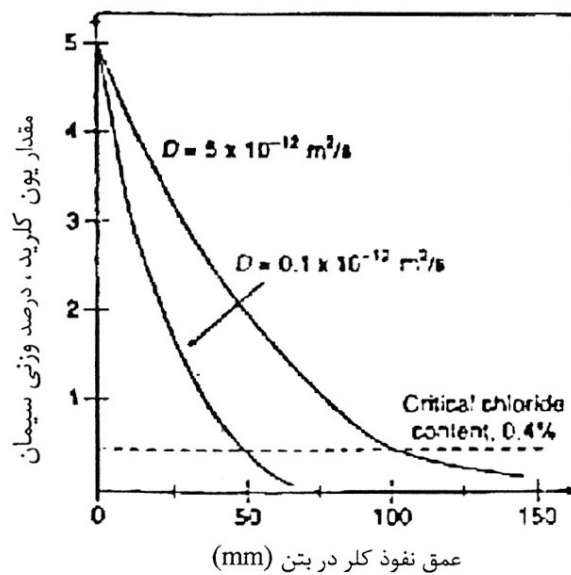
در بتنی که مرتباً در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن با آب دریا قرار می‌گیرد، ورود کلریدها بدخل بتن سرعت افزایش یابنده خواهد یافت، در ادامه وضعیتی که اغلب برای سازه‌های ساحلی در آب و هوای گرم بوجود می‌آید شرح داده می‌شود.

بتن در حالتی که خشک است، آب نمک را جذب کرده و تحت بعضی شرایط ممکن است این جذب ادامه یابد تا بتن به حد اشباع برسد، سپس اگر شرایط خارجی تغییر کند و بتن خشک شود جهت حرکت آب معکوس خواهد شد و آب از طرف منافذ مجاور هوا تبخیر خواهد شد. با تبخیر آب منفذی نمک‌ها باقی‌مانده و غلظت آن در نزدیکی سطح بتن افزایش می‌یابد. بدین طریق گرادیان غلظت سبب حرکت نمک‌ها توسط آب نزدیک سطح بتن به طرف نواحی با غلظت کمتر می‌شود. این امر براساس پدیده انتشار صورت می‌گیرد. بسته به رطوبت نسبی

خارجی و مدت دوره خشک شدن این امکان وجود دارد که بیشتر آب مناطق خارجی بتن تبخیر شده و آب باقیمانده داخل بتن از نمک اشباع شود و نمک اضافی بصورت کریستالی رسوب نماید.

این جریان را به این صورت می‌توان بیان کرد که آب به طرف خارج و نمک به طرف داخل حرکت می‌کند. در سیکل بعدی تر شدن با آب نمک، نمک موجود در محلول منافذ موئین زیادتر می‌شود. در این صورت گرادیان غلظت تا عمق مشخصی از سطح بتن کم شده و مقداری از نمکها به طرف سطح بتن انتشار می‌یابند. اگر دوره تر شدن کوتاه باشد و دوره خشک زود شروع شود، وضع بحرانی تر می‌شود. در این حالت نمک بخوبی توسط آب نمک وارد بتن شده و در دوره خشک شدن آب منافذ تبخیر و نمکها باقی می‌مانند. میزان دقیق انتقال نمکها بستگی به طول دوره‌های تر و خشک شدن دارد. این نکته باید در نظر گرفته شود که تر شدن خیلی سریع اتفاق می‌افتد و خشک شدن به کندی صورت می‌گیرد و داخل بتن هرگز خشک نخواهد شد. همچنین به این نکته باید توجه کرد انتشار یونها در طول دوره تر شدن نسبتاً کند می‌باشد.

این موضوع کاملاً روشن است که ورود و پیشرفت آنها به طرف فولاد تحت دوره‌های بعدی سیکلهای تر و خشک شدن بطور فزاینده‌ای صورت می‌گیرد. نمونه‌ای از پروفیل کلر در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. پروفیل کلر بوسیله تجزیه شیمیایی نمونه‌های پودری که بوسیله دریل کردن عمق‌های مختلف از سطح بتن بدست می‌آید، تعیین شود. همچنانکه در شکل ۲-۶ دیده می‌شود بعد از اینکه بتن ۱۰ سال در معرض آب قرار گرفت مقدار غلظت یون کلرید در منافذ بتن به بیش از مقدار غلظت بحرانی می‌رسد.



شکل ۶-۲ پروفیل نمونه مقدار کل کلرید بر حسب درصد وزنی سیمان، برای دو نوع بتن با کیفیت معمولی و کیفیت عالی پس از ۱۰ سال نفوذ یون کلرید در محلول آبی با غلظت  $CL^-$  به میزان ۰.۵٪ وزنی سیمان [۱]

بعضی اوقات اختلاف قابل توجهی در میزان خوردگی بخشهای مختلف یک سازه وجود دارد. علت این مسئله را می‌توان به اینصورت توضیح داد که ورود کلریدها به داخل بتن به شدت تحت تأثیر ترتیب دقیق دوره‌ها تر و خشک می‌باشد و این دوره‌های تر و خشک شدن به علت عواملی از جمله جابجایی آب دریا، باد و قرار گرفتن در معرض نور خورشید می‌باشد، بنابراین بخشهای مختلف یک سازه ممکن است از نظر ترتیب تر و خشک شدن با هم اختلاف داشته باشند در نتیجه اختلافات قابل توجهی در میزان خوردگی بخشهای مختلف دیده خواهد شد.

باید توجه داشت که تنها خشک و تر شدن سطح بتن نیست که روی ورود کلریدها تأثیر می‌گذارد بلکه، اگر دوره خشک شدن طولانی باشد و خشک شدن بتن تا اعماق بیشتری اتفاق بیافتد باعث می‌شود که در تر شدن بعدی کلریدها به میزان بیشتری وارد بتن شود و در اینصورت نفوذ یونهای کلر به بخشهای داخلی بتن بسرعت انجام می‌گیرد، به این علت بتن



مسلح در نواحی جزر و مدی (جایی که دوره خشک شدن کوتاه است) آسیب پذیری کمتری در برابر خوردگی نسبت به بتنی که تر شدن آن توسط ترشح و پاشیده شدن آب اتفاق می افتد (جایی که تر شدن در اثر بالا آمدن آب دریا در طول زمان یا در اثر پاشیدن و ترشح آب به علت بادهای شدید اتفاق می افتد) دارد. بنابراین بیشترین آسیب دیدگی بتن جایی است که بتن فقط گاهگاهی با آب دریا تر می شود و یا در مجاورت با آب دریا شسته شده و بعداً در معرض نور خورشید با درجه حرارت بالا، خشک می شوند.

## ۹-۲- یونهای کلرید پیوندی و آزاد

مهمترین پیوند یونهای کلرید واکنش آنها با  $C_3A$  می باشد که تشکیل کلروآلومینات کلسیم  $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$  می دهد که نمک فریدل نامیده می شود. یون کلرید با  $C_4AF$  نیز واکنش مشابهی انجام می شود که تشکیل کلروفریت کلسیم می دهد. بنابراین وقتی مقدار  $C_3A$  سیمان بالا باشد و همچنین وقتی مقدار سیمان در مخلوط بالا باشد، یونهای کلر بیشتری پیوند برقرار می کنند. بنابراین اینطور استنباط می شود که استفاده از سیمان با  $C_3A$  بالا منجر به ایجاد مقاومت مناسب در برابر خوردگی می شود. هر چند این مسئله ممکن است وقتی یونهای کلر از ابتدا در مخلوط موجود باشند صدق کند و یونهای کلر با سرعت با  $C_3A$  واکنش دهند، ولی وقتی یونهای کلر از خارج وارد بتن می شود مقدار کمتری کلروآلومینات تشکیل می شود. همچنین ممکن است که تحت شرایطی کلروآلومینات تفکیک شده و یونهای کلرید آزاد شوند و توسط آب منافذ به سطح فولاد منتقل گردند. عامل دیگری که تعیین کننده مقدار مطلوب  $C_3A$  در سیمان می باشد مشکل حمله سولفاتها است. همانطور که می دانیم برای مقاومت در برابر سولفات لازم است مقدار  $C_3A$  در سیمان پایین باشد به این دلیل آئین نامه ASTM سیمان تیپ II را که دارای مقاومتی متوسط در برابر سولفات می باشد سازگارترین

سیمان برای سازه‌های بتنی قرار گرفته در معرض حمله سولفات‌ها معرفی می‌کند. در مورد سیمانهای سرباره آهنگدازی، عقیده بر این است که کلرها با آلومینات سرباره تشکیل پیوند می‌دهند، این مطلب کاملاً تایید نشده است. هر چند در مورد استفاده از سیمان با  $C_3A$  بالا یادآوری کرد که مقدار  $C_3A$  بالا باعث افزایش گرمای هیدراسیون می‌شود و بنابراین درجه حرارت افزایش می‌یابد. این موضوع برای سازه‌های بتنی نسبتاً حجیم که در معرض شرایط محیطی خورنده می‌باشد، مضر می‌باشد [۱].

بعضی استانداردها از جمله استاندارد BS 8110 part 1 محدودیتهای شدیدی را برای مقدار کلرید وقتی که سیمان ضد سولفات (تیپ ۵) استفاده می‌شود اعمال نموده‌اند، چرا که در این حالت مقداری یون کلرید آزاد می‌شود و ضمن مهیا کردن شرایط برای خوردگی در ادامه، سولفوآلومینات کلسیم تشکیل می‌شود [۱].

کربناسیون در خمیر سیمان سخت شده، در جایی که کلرهای پیوندی وجود دارد باعث شکستن پیوندهای کلرید می‌شود بنابراین خطر خوردگی افزایش می‌یابد. Ho و Lewis [۱] دریافتند که غلظت یون کلرید حتی در جایی که خود دچار کربناسیون نشده و ۱۵ میلیمتر با محل کربناسیون فاصله دارد افزایش می‌یابد. علاوه بر این کربناسیون باعث کاهش مقدار pH در منافذ بتن می‌شود که بدنبال آن ممکن است خوردگی شدیدی اتفاق افتد. همچنین آزمایشها نشان می‌دهند که حتی وجود مقدار کمی یون کلر در بتن کربناته باعث افزایش مقدار خوردگی می‌شود چون قلیائیت بتن کربناته کاهش یافته است.

با توجه به کربناسیون و همچنین ورود یونهای کلرید، باید به این مطلب توجه نمود که رطوبت نسبی بهینه برای کربناسیون بین ۵۰٪ تا ۷۰٪ است از طرف دیگر خوردگی در رطوبت‌های زیاد سریعاً پیشرفت می‌کند. امکان وقوع چنین شرایط رطوبتی برای سازه‌های بتنی

که در معرض دوره‌های طولانی خشک و تر شدن قرار دارند، مفید می‌باشد نمونه دیگر از ورود کلریدها همراه با کربناسیون در پانلهای نازک بتنی که برای ساختمانها بکار می‌روند، مشاهده می‌شود. از یک طرف کلریدهای حمل شده توسط هوا وارد بتن می‌شوند و به سطح فولاد می‌رسند و کربناسیون از طرف نسبتاً خشک عضو از طرف داخل ساختمان به بیرون شروع به پیشروی می‌نماید.

باید توجه نمود که غلظت یون کلرید به وجود یونهای دیگر موجود در منافذ نیز بستگی دارد. بعنوان مثال برای یک مقدار مشخص یون کلرید، هر چه غلظت یون هیدروکسیل بالاتر باشد یونهای آزاد کلر بیشتر خواهد بود. به این علت نسبت  $Cl^- / OH^-$  در پیشرفت خوردگی مؤثر است. اما بطور کلی یک رابطه مستدل و مشخصی نمی‌توان برای آن ارائه نمود.

به علت این عوامل مختلف، نسبت یونهای کلرید پیوند یافته از ۸۰٪ تا کمتر از ۵۰٪ کل یونها کلرید تغییر می‌کند. بنابراین، یک مقدار واقعی و مشخصی برای کل یونهای کلرید وجود ندارد که بتوان گفت کمتر از این خوردگی اتفاق نمی‌افتد.

آزمایشها نشان می‌دهند که به علت اختلال در شرایط تعادل آب منافذ، مقدار کلریدهای پیوندی با وزن سیمان رابطه داشته و مستقل از نسبت آب به سیمان می‌باشد [۱].

## ۲-۱۰- تأثیر سیمانهای آمیخته بر روی خوردگی آرماتور در بتن

در این مبحث تأثیر نوع سیمان آمیخته بر روی ساختار منفذی خمیر سیمان سخت شده و نفوذپذیری آن و همچنین تأثیر آن بر روی مقاومت الکتریکی بتن بررسی می‌گردد. مطلب مورد بحث تأثیر ترکیبات سیمانی بر روی تحرک یونهای کلرید می‌باشد. باید اضافه کرد که همان خواص از فیبر سیمان سخت شده که بر روی انتقال یونهای کلرید تأثیر می‌گذارد، بر

دسترسی اکسیژن و رطوبت که هر دوی آنها برای وقوع خوردگی ضروری می‌باشند نیز تأثیرگذار است. هر چند که حضور یونهای کلرید در منطقه آندی و اکسیژن در منطقه کاتدی که در منطقه جداگانه بر روی آرماتور می‌باشند مورد نیاز است.

مصالح سیمانی نظیر خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی، هر سه وقتی به مقدار مناسبی در مخلوط به کار روند نفوذپذیری بتن را کاهش داده و مقاومت الکتریکی آن را افزایش می‌دهند و بدین طریق نرخ خوردگی کاهش می‌یابد. در مورد سیلیس این اثر مثبت از طریق بهبود ساختار منافذ خمیر سیمان سخت شده انجام می‌گیرد که باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود هرچند که دوده سیلیس pH محلول منافذ را به علت واکنش با  $\text{Ca(OH)}_2$  کمی کاهش می‌دهد [۱].

مصالح سیمانی مختلف اثرات سودمند قابل توجهی بر روی خوردگی دارند بطوریکه بکارگیری آنها در بتن مسلح قرار گرفته در معرض خوردگی در آب و هوای گرم تقریباً ضروری می‌باشد و سیمان پرتلند نباید به تنهایی به کار برده شود. آزمایشهایی که روی انتشار یون کلرید در ملات انجام شده حاکی از آن است که پرکننده‌ها به تنهایی تأثیری بر روی تحرک کلریدها ندارند. یونهای کلرید در بتن ساخته شده با سیمان پرتلند با همان مقدار یون کلرید فراهم می‌نماید. چون مقدار pH بتن با سیمان پرآلومین پائین‌تر از بتن با سیمان پرتلند می‌باشد و به این دلیل حالت غیرفعال ثبات کمتری خواهد داشت [۱].

## ۲-۱۱- عوامل دیگر مؤثر در خوردگی

بحث قبلی در مورد اثر ترکیبات بتن بر روی مقاومت در برابر خوردگی آماتور بود که این مطلب با اهمیت عمل‌آوری مناسب تکمیل می‌شود. در واقع اثر عمل‌آوری بر روی ناحیه پوشش

بتن تأثیر می‌گذارد. با افزایش مدت عمل‌آوری زمان شروع خوردگی به تعویق می‌افتد، فقط باید از آب تازه برای عمل‌آوری استفاده نمود زیرا که آب شور به میزان زیادی ورود کلریدها را افزایش می‌دهد.

وقتی خوردگی آغاز شد امکان توقف آن نیز وجود دارد. پیشرفت خوردگی تحت تأثیر مقاومت الکتریکی بتن بین مناطق آند و کاتد و همچنین فراهم بودن اکسیژن برای کاتد می‌باشد که می‌توان با ایجاد غشاء از رسیدن اکسیژن جلوگیری نمود هر چند این مطلب کاملاً واقعی نیست. مقاومت بتن بستگی به شرایط رطوبتی دارد بطوریکه اگر خشک شدن باشد توقف خوردگی رخ می‌دهد و به مجرد مرطوب شدن دوباره خوردگی آغاز می‌شود.

ترک خوردن پوشش بتن ورود کلریدها را آسان می‌کند و بنابراین خوردگی افزایش می‌یابد. با اینکه همه بتن‌های مسلح مقداری ترک می‌خورند، ترک خوردن را می‌توان بوسیله طراحی مناسب سازه و دقت در جزئیات مراحل ساخت کنترل کرد. ترکهای عریض‌تر از حدود 0/2-0/4 mm زیانبخش می‌باشند. ذکر این مطلب مهم است گرچه بتن پیش تنیده ترک نمی‌خورد ولی فولاد پیش تنیدگی در برابر خوردگی آسیب‌پذیر می‌باشد. علت این مسئله طبیعت فولاد پیش تنیدگی می‌باشد. همچنین فولاد پیش تنیدگی دارای سطح مقطع کمتری است. بنابراین خوردگی باعث می‌شود که ظرفیت تحمل بار به شدت کاهش یابد. درجه حرارت‌های بالا اثرات متعددی روی خوردگی دارند. این عامل سبب می‌شود که اولاً مقدار کلرید آزاد موجود در آب منافذ افزایش یابد. این اثر بیشتر در سیمانهای دارای  $C_3A$  بالا و غلظت پائین کلرید در مخلوط اصلی دیده شده است [۱]. ثانیاً در درجه حرارت‌های بالا، واکنشهای خوردگی همانند بعضی واکنشهای شیمیایی سریعتر انجام می‌شود، افزایش دما در حد ۱۰ درجه سانتیگراد باعث می‌شود که سرعت واکنشهای خوردگی دو برابر شود. هر چند بعضی

آزمایشها نشان داده‌اند که این افزایش فقط ۱/۶ برابر بوده است. این اثر تسریع‌کنندگی واکنشها توسط درجه حرارت، افزایش خرابیهای ناشی از خوردگی سازه‌های بتنی در مناطق گرم ساحلی را نسبت به مناطق معتدل روشن می‌سازد. اثر دیگر درجه حرارت بر روی خوردگی به این ترتیب است که سخت شدن اولیه بتن در برابر نفوذ یونهای کلرید می‌باشد. همچنین اختلاف درجه حرارت بین سطح بتن و داخل آن نیز مکانیزم نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باید توجه نمود که تابش مستقیم نور خورشید باعث افزایش درجه حرارت سطح بتن می‌شود [۱].

## ۲-۱۲- آزمایش نفوذپذیری کلرید

آئین‌نامه‌های ASTM C1202 و AASHTO آزمایشی سریع را برای تعیین نفوذپذیری بتن در برابر یونهای کلرید بیان نموده‌اند. این آزمایش هدایت الکتریکی بتن را برای تعیین سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید تعیین می‌کند و در بیشتر موارد تطابق خوبی را با روش طولانی مدت حوضچه کلرید بر روی دالهای بتنی AASHTO R227 نشان می‌دهد با استفاده از جدول ۲-۱ قابلیت نفوذ یون کلرید براساس شارژ عبوری بدست می‌آید. این آزمایش برای ارزیابی مخلوطهای مختلف بتنی مناسب می‌باشد.

جدول ۲-۱- طبقه‌بندی نفوذپذیری یون کلرید براساس شار عبوری

| شار عبور کرده (کولمب) | قابلیت نفوذ یون کلرید |
|-----------------------|-----------------------|
| < 4000                | زیاد                  |
| 2000 - 4000           | متوسط                 |
| 1000-2000             | کم                    |

شار عبور کرده (کولمب)

قابلیت نفوذ یون کلرید

100-1000

خیلی کم

< 1000

ناچیز

در این آزمایش جریان الکتریکی از استوانه‌ها یا مغزه‌ها با قطر اصلی 4 inch و ضخامت 2 inch (51mm) به مدت ۶ ساعت عبور داده می‌شود. اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت به دو انتهای نمونه اعمال می‌شود یک طرف نمونه در محلول مستقیم کلرید و طرف دیگر در محلول هیدروکسید سدیم فرو می‌رود. کل شارژ عبوری (کولمب) به مقاومت نمونه در برابر نفوذ یون کلر بستگی دارد. با استفاده از جدول (۱-۲) قابلیت نفوذ یون کلر براساس شارژ عبوری بدست می‌آید

## ۲-۱۳- پیشگیری از خوردگی

جلوگیری از پیشرفت خوردگی می‌تواند بوسیله خشک نمودن بتن و یا جلوگیری از دسترسی اکسیژن به فولاد با استفاده از پوشش‌های محافظ سطحی انجام گیرد. کاربرد این گونه پوشش‌ها باید با دقت خاصی انجام شود و حتی در مواردی می‌تواند مضر باشد. برای مثال بکار بردن یک پوشش محافظ در آند بجای کاربرد آن در کاتد، نسبت اندازه کاتد به آند را افزایش می‌دهد که باعث افزایش میزان خوردگی خواهد شد.

این سؤال پیش می‌آید که آیا بازدارنده‌هایی برای خوردگی وجود دارند که بدون جلوگیری از ورود یون کلرید، از خوردگی فولاد جلوگیری کنند؟ نیتريت سدیم و کلسیم در آزمایشات مختلف این اثر را نشان داده‌اند. عملکرد نیتريت بصورت تبدیل یونهای فروس درآند به یک لایه غیرفعال مستحکم از  $Fe_2O_3$  می‌باشد. وجود یون نیتريت به طور ترجیحی با یون

کلرید واکنش می‌دهد. در واقع عملکرد بازدارنده‌ها جلوگیری کامل از خوردگی نمی‌باشد، بلکه تا زمان معینی خوردگی را به تأخیر می‌اندازد. اثر تسریع کنندگی نیتراتها می‌تواند بوسیله یک ماده دیرگر کننده جبران شود، تحقیقات در جهت یافتن بازدارنده‌های دیگری برای جلوگیری از خوردگی فولاد در بتن وجود دارد [۱].

با اینکه استفاده از بازدارنده‌ها در مخلوط بتن، فولاد را محافظت می‌کند اما در بتن با بعد پائین نباید از بازدارنده‌ها استفاده کرد چون آنها نیز به منظور ایجاد یک پوشش مضاعف و ایمنی بیشتری به کار می‌روند. علاوه بر این، نیتريت سدیم غلظت یونهای هیدروکسید را در آب منفذی افزایش می‌دهد و ممکن است خطر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را افزایش دهد. بنابراین اثر مثبت افزایش غلظت یون هیدروکسید بر اثر خوردگی فولاد به اثر منفی خطر واکنشی قلیایی سنگ دانه‌ها همراه است. البته این مسئله زمانی پیش می‌آید که سنگدانه از ابتدا دارای پتانسیل واکنش قلیایی باشد.

بحث و پیشگیری از خوردگی فولاد در بتن با استفاده از روشهای حفاظت فولاد بوسیله پوشش اپوکسی و روکش حفاظت کاتدی که در آن تمام سطح فولاد به کاتد تبدیل می‌شود، تکمیل خواهد شد. پوشش اپوکسی فولاد یک روش خاص است که در صورتیکه ضخامت پوشش بتنی کافی بوده و نفوذپذیری بتن پائین باشد، بسیار مفید خواهد بود. مسئله‌ای که امروزه با آن مواجه هستیم بیرون کشیدن یونهای کلرید از سطح فولاد به خارج از بتن می‌باشد. در سالهای اخیر این تکنیک پیشرفت زیادی داشته و پروژه‌های متعددی انجام گرفته است. در این روش با اعمال یک جریان مستقیم در حدود  $5-1 \text{ A/m}^2$  سطح فولاد و قرار دادن یک آند خارجی و ایجاد یک میحط الکترولیتی مناسب جهت تماس سطح بتن و آند خارجی، یونهای کلرید به طرف خارج بتن مهاجرت می‌نمایند و غلظت آنها در مجاورت فولاد کاهش قابل



ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. در این روش عموماً در حدود بیش از ۵۰ درصد از کل کلرید موجود در بتن به خارج از بتن مهاجرت می‌نماید. نکات مهمی در مورد تأثیر این روش بر روی بعضی خواص بتن نظیر مقاومت چسبندگی فولاد و بتن و اثرات افزایش واکنشهای سیلیسی قلیائی وجود دارد که هنوز محققین به نظر واقعی و واحدی دست نیافته‌اند.

## ۲-۱۴- الزامات آئین‌نامه‌ای در طراحی

با توجه به مکانیزم خوردگی و روش‌های پیشگیری آن اکثر آئین‌نامه‌ها سه پارامتر عمده را در مورد بتن مورد توجه قرار داده‌اند که عبارتند از:

- حداکثر مقدار یون کلرید مجاز در بتن

- ضخامت، ترکیب و خصوصیات بتن پوشش آرماتور

- حداکثر عرض ترک مجاز ترک که در طراحی عضو در نظر گرفته می‌شود

البته برخی آئین‌نامه‌ها انواع مختلف بتن با بتن مسطح نظیر بتن درجا ریخته شده و بتن پیش ساخته و دسته‌بندی شرایط محیطی را نیز در نظر می‌گیرند. سازه‌های دریایی و روسازیهای بتنی و رویه پلها در مناطق سردسیر برای ذوب یخ و برف از نمکهای یخ زدا استفاده می‌شود، که به لحاظ شرایط محیطی بحرانی‌ترین سازه‌ها می‌باشند.

## ۲-۱۴-۱- حداکثر مقدار مجاز کلرید در بتن

تأثیر یون کلرید در فعال نمودن فولاد حتی در pH بالا ممکن است مشاهده گردد. این مسئله در رابطه با رقابت  $Cl^-$  به عنوان تخریب کننده لایه غیرفعال و  $OH^-$  به عنوان پایدار کننده آن و تعادل این دو قابل بررسی می‌باشد. این موضوع که مقدار آستانه یون کلرید جهت

شروع فعال شدن فولاد نسبت به  $Cl^-/OH^-$  بستگی دارد، مورد قبول اکثر محققین می‌باشد، لیکن در مقدار آن اختلاف نظر وجود دارد.

Hausman [۱] این نسبت را در تحقیقات خود ۰/۶ و Diamond [۱] این مقدار را ۰/۳ ذکر کرده است.

از دیدگاه عملی کنترل نسبت  $Cl^-/OH^-$  بسهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین مقدار کل یون کلرید در بتن برحسب درصد وزنی سیمان بعنوان مقدار مجاز بیان گردیده است. بطور خلاصه در اکثر آئین‌نامه‌ها مقدار یون کلرید در حدود ۰/۲ درصد وزنی سیمان مقدار بی‌خطر و محدوده ۰/۲-۰/۴ درصد وزنی سیمان خطر زیادی برای خوردگی وجود دارد. بعضاً این مقدار حدی به صورت وزن یون کلرید در مترمکعب بتن نیز بیان گردیده است که مقدار  $1/2 \text{ kg/m}^3$  - ۰/۹ می‌باشد.

باید توجه نمود که تنها یون کلرید حل شده در آب منفذی بتن است که فعال شدن و خوردگی فولاد را موجب می‌گردد. عوامل مختلفی نظیر جذب یون کلرید در داخل محصولات مختلف هیدراسیون نظیر  $C_3A$  و تشکیل نمک فریدل، محصور شدن یون کلرید در داخل محصولات هیدراسیون و جذب فیزیکی یون کلرید و سنگدانه‌ها، مقدار آزاد آن را نسبت به مقدار کل کاهش می‌دهد. Diamond نشان داده است که برای سیمان پرتلند معمولی نسبت  $w/c=0/5$  پس از گذشته چند هفته از سن بتن مقدار  $Cl^-$  در آب منفذی بتن در حد کمتر از ۵۰ درصد مقدار اولیه تثبیت شده است و در مقادیر کمتر یون کلرید این نسبت حتی کمتر می‌باشد [۱].

## ۲-۱۴-۲- ضخامت و ترکیب بتن پوشش

تأثیر پوشش بتنی بعنوان یک لایه محافظ فولاد در رابطه با ضخامت و کیفیت آن می‌باشد که کیفیت آن نیز در رابطه با نسبت  $w/c$ ، مقدار سیمان مقاومت فشاری و نفوذپذیری آن می‌باشد. که این مقادیر در رابطه با شرایط محیطی مختلف به صورت الزامات و مقادیر حدی و توصیه‌هایی بیان گردیده است.

## ۲-۱۴-۳- حداکثر عرض ترک

با توجه به تأثیر ترکهای ایجاد شده در بتن پوشش در اثر بارگذاری سازه و ایجاد تنش‌های کششی در آن بر تسریع روند خوردگی، با توجه به شرایط محیطی و شرایط اعضای بتن آرمه آئین‌نامه‌ها حداکثر عرض ترک را تحت اثر بارگذاری محدود می‌نمایند.

البته ترکهای ناشی از بارگذاری سازه تنها منبع ایجاد ترک نبوده بلکه عواملی نظیر ذوب و یخبندان، جمع شدگی پلاستیک، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، حمله سولفات‌ها و واکنش‌های قلیایی می‌توانند ترکهایی را ایجاد کنند. البته در درجه اول فرض بر این است که با رعایت نکات اجرایی و طرح اختلاط مناسب بتوان از وقوع چنین ترکهایی جلوگیری نمود. نکته قابل توجه دیگر در مورد نقش ترکها در تسریع خوردگی علاوه بر عرض ترک موقعیت قرارگیری آن نیز می‌باشد. بحرانی‌ترین ترکها آنهایی هستند که در راستای آرماتور طولی و عمده‌تاً در اثر تجمع محصولات خوردگی اتفاق می‌افتند. این ترکها موجب می‌گردند تا سطح وسیعتری از آرماتور در معرض قرار گرفته و خوردگی تسریع گردد.

## ۲-۱۵- نتیجه‌گیری

با شناخت مکانیزم خوردگی فولاد در بتن مسلح و عوامل مؤثر خوردگی و شرایط محیطی، روشهای پیشگیری و تدوین روشهای محاسباتی جهت پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح این امکان وجود دارد که طراحی موفقیت‌آمیزی در مورد سازه بتن مسلح در معرض خوردگی و عمر مفید آنها انجام می‌شود. با این حال اگر بتن در معرض شرایط محیطی ساخت از لحاظ دما و رطوبت متناوب خشک و تر شدن در آب دریا قرار گیرد، استفاده از بتن مسلح بدون استفاده از تمهیدات اضافی نظیر پوشش آرماتور، پوشش سطحی بتن، بازدارنده‌ها و یا حفاظت کاتدیک مورد سؤال می‌باشد و نفوذ یونهای کلرید اجتناب‌ناپذیر است.

# فصل سوم

خرابیهای ناشی از خوردگی و

اثرات سازه‌ای آن

## فصل سوم : خرابیهای ناشی از خوردگی و اثرات سازه‌ای آن

### ۳-۱ - مقدمه

دلیل اهمیت مسئله خوردگی آسیب‌هایی است که در اثر آن بر سازه‌ها وارد می‌گردد. این آسیب‌ها شامل دو نوع سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌باشند که آسیب‌های سازه‌ای به علت کاهش ضریب اطمینان سازه در مقابل بارهای وارده، از اهمیت بیشتری برخوردارند. آسیب‌های غیرسازه‌ای شامل بد نما شدن سطح بتن به علت ترک خوردگی و قهوه‌ای شدن آن و همچنین ایجاد ترک و بادکردگی در نازک کاری ساختمان می‌باشد که در ساختمانهای معمولی از اهمیت چندانی برخوردار نیستند.

خرابی‌های سازه‌ای خوردگی به دو بخش خرابی‌های مستقیم و غیرمستقیم، تقسیم می‌شوند.

خرابی‌های مستقیم آنهایی هستند که مستقیماً بر ظرفیت باربری سازه تأثیر گذاشته و ضریب اطمینان سازه را در تحمل بارهای وارده کاهش می‌دهند. این نوع خرابی‌ها شامل کاهش سطح مقطع مؤثر آرماتور و همچنین تغییر در مشخصات مکانیکی فولاد می‌باشد.

خرابی‌های بخش دوم خرابی‌های غیرمستقیم می‌باشد که به طور غیرمستقیم بر ظرفیت باربری سازه اثر گذاشته و باعث کاهش ضریب اطمینان می‌گردند. این نوع خرابی‌ها شامل کاهش مقاومت پیوستگی آرماتور و بتن و همچنین ترک خوردن و پوکیدن پوشش بتنی روی آرماتور می‌باشد.

واضح ترین آسیبی که در اثر خوردگی فولاد بر سازه‌های بتن آرمه وارد می‌گردد کاهش قطر آرماتور و متعاقب آن کاهش سطح مقطع مؤثر فولاد می‌باشد. به علت این کاهش سطح، طبعاً فولاد باقیمانده تحت اثر تنش بیشتری قرار خواهد گرفت و لذا بسته به میزان کاهش سطح فولاد (درصد خوردگی) ضریب اطمینان سازه کاهش می‌یابد، بنابراین در سازه‌هایی که شدت خوردگی در آنها بالا بوده و تنش‌های اولیه تحمیل شده توسط اعضای سازه بالا باشد، احتمال فروریختگی سازه در اثر این نوع آسیب وجود دارد.

اطلاعات دقیق و مشخص در مورد میزان کاهش قطر آرماتور در اثر خوردگی موجود نیست لیکن با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده در این زمینه می‌توان گفت که حداکثر سرعت خوردگی فولاد در بتن حدود  $50 \mu\text{m}/\text{year}$  می‌باشد. البته باید توجه نمود که در خوردگی ناشی از حمله یون کلرید، معمولاً خوردگی از نوع حفره‌ای بوده و در این نوع خوردگی، سرعت خوردگی به مراتب بالاتر می‌باشد.

تحقیقات زیادی در زمینه برآورد آسیب‌های سازه‌ای غیرمستقیم انجام شده، لیکن به علت پیچیدگی این نوع خرابی‌ها و تأثیر پارامترهای فراوان در آنها، هنوز دستورالعمل مدونی برای کنترل این نوع خرابی‌ها و یا کاهش اثرات آنها ارائه نشده است. اثرات این نوع خرابی‌ها پیچیده بوده و در اعضای سازه‌ای مختلف و با مشخصات متفاوت، نتایج به دست آمده متفاوت می‌باشد.

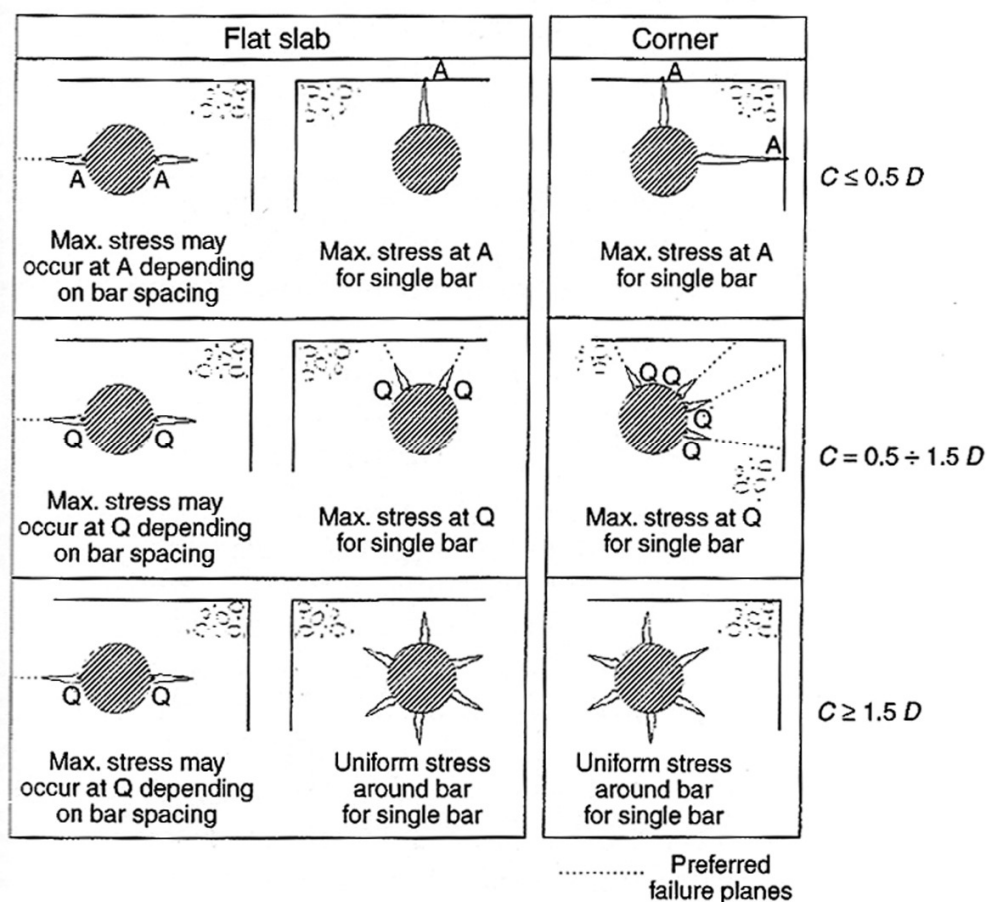
کاهش مقاومت پیوستگی بتن و فولاد در درصد خوردگی‌های بالا کاملاً مشخص بوده و باعث افزایش خیز و تغییر شکل اعضای سازه‌ای شده و نتیجتاً در خدمت‌پذیری و کارایی سازه ایجاد اختلال می‌کند. کاهش مقاومت پیوستگی به علت از بین رفتن چسبندگی

بین بتن و فولاد در سطح مشترک و همچنین کاهش قفل و بست بین بتن و آجهای آرماتور به علت از بین رفتن آجهای آرماتور می‌باشد. همچنین به علت جمع شدن زنگ آهن بر روی آرماتور، یک لایه ضعیف سطح آرماتور را پوشانده و امکان انتقال نیرو از آرماتور به بتن فوق‌العاده کاهش می‌یابد.

خرابی دیگری که در اثر خوردگی ایجاد می‌شود ترک خوردن پوششی بتنی می‌باشد. این نوع خرابی آسیبی جدی است، چرا که با متلاشی شدن پوشش، تنها مانع نفوذ یونهای مهاجم در رسیدن آنها به سطح آرماتور از بین رفته و سرعت خوردگی تا ده برابر افزایش می‌یابد. این ترک خوردگی ناشی از تولید زنگ آهن به علت خوردگی می‌باشد، چرا که محصولات خوردگی بر سطح آرماتور رسوب کرده و از آنجایی که حجم محصولات خوردگی حداقل دو برابر حجم فولاد مصرف شده می‌باشد، در پوشش ایجاد تنش کششی نموده و باعث ترک خوردگی در بتن می‌گردد. لازم به ذکر است که این تنش‌های کششی به علت محصور شدگی محصولات خوردگی در سطح مشترک بتن و فولاد ایجاد شده به آن حد می‌رسند که حتی باعث پوکیدن پوشش بتنی میشوند.

بسته به مقاومت بتن پوشش و موقعیت قرارگیری آرماتورها در مقطع بتن آرمه، ترکها ممکن است به صورت طولی نمایان شوند و یا باعث پوکیدن بتن روی آرماتور شوند و یا اینکه ورقه ورقه شده بتن گردند. شکل (۳-۱) [۱]





شکل ۱-۳ شرح شماتیک انواع ترک ناشی از خوردگی به عنوان تابعی از محل آرماتور، نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور،  $C$  : ضخامت پوشش  $D$  : قطر آرماتور [۱]

در واقع می‌توان گفت که اولین نشانه خوردگی فولادهای طولی، ترک‌هایی است که به موازات آرماتورهای اصلی مقطع بر سطح بتن نمایان می‌شوند، در بتن‌های با کیفیت خوب ترک‌های ایجاد شده در اطراف آرماتور تا سطح بتن توسعه نمی‌یابند و لذا با افزایش پوشش بتنی و استفاده از فولاد با قطر پایین تر می‌توان ترک خوردگی پوشش را محدود نمود. در این فصل با مطالعه تحقیقات اخیر بر روی اثرات سازه‌ای خوردگی، جنبه‌های مختلف تأثیر خوردگی بر رفتار سازه بررسی می‌شود.

### ۲-۳ ترک خوردگی پوشش

تحقیقات انجام شده بر روی دوام سازه‌های بتن آرمه عمدتاً با تحقیقات بر روی ترک خوردگی بتن همراه می‌باشد. در این زمینه تحقیقات مختلفی انجام شده که در ادامه به بحث و مقایسه نتایج آنها می‌پردازیم.

در سال ۲۰۰۰ ویلیامسون و کلارک [۲] با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی 150mm که دارای سوراخ‌های به قطرهای 8mm و 16 mm در محل‌های مختلف بودند، سعی کردند تأثیر نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور و همچنین نسبت حداکثر اندازه سنگدانه به قطر آرماتور در فشار لازم برای ترک خوردن بتن پوشش را مطالعه می‌کنند.

شبیه سازی افزایش حجم آرماتور خورده شده در آزمایشات برای تعیین فشار لازم برای ترک خوردن پوشش، معمولاً با ایجاد حفره در نمونه و اعمال فشار داخلی توسط پمپ هیدرولیکی انجام می‌شود.

پیش از این نیز محققان دیگری به مطالعه در این زمینه پرداخته‌اند. به عنوان مثال McLeish در سال ۱۹۸۶ آزمایشات خود را بر روی قطعات بتنی به ضخامت ۱۵۰mm و با فرض مقاومت کششی ۵ Mpa برای بتن انجام داد. این قطعات دارای سوراخی به قطر ۲۲mm بودند که این سوراخ برای تامین نسبت‌های ضخامت پوشش به قطر آرماتور متفاوت در موقعیت‌های مختلف قطعه قرار داشت. در واقع موقعیت سوراخ در قطعه چنان تغییر می‌کرد که نسبت  $c/d$  در این قطعات در یک محدوده بین ۱ تا ۳ قرار می‌گرفت. این سوراخ‌ها نشان دهنده محل آرماتور بوده و در این آزمایش نیز، شبیه سازی فشار ناشی از افزایش حجم با ایجاد فشار توسط پمپ هیدرولیک انجام شد.

Morinaga با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به قطرهای ۱۰۰mm و ۱۵۰mm و ۲۰۰mm که هر کدام دارای سوراخ‌هایی به قطرهای ۹mm و ۱۹mm و ۲۵mm بودند آزمایش خود را انجام داد. این ابعاد نسبت پوشش به قطر آرماتور بین ۱/۵ تا ۳/۵ را تامین می‌نمود.

مقاومت کششی بتن که از آزمایش شکافت بتن (آزمایش برزیلی) بدست آمده بود بین ۱/۱ Mpa تا ۳/۳Mpa برآورد شده بود. در این آزمایش نیز اثر خوردگی با فشار داخلی ایجاد شده توسط پمپ هیدرولیکی شبیه سازی شده است.

این محقق با استفاده از نتایج خود رابطه‌ای تجربی برای پیش بینی فشار لازم برای ترک خوردگی ارائه داد که در این رابطه فشار لازم تابع مقاومت کششی بتن و نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور می‌باشد [۳]:

$$P_{\max} = f_t(1+2c/d)^{0.85} \quad (1-3)$$

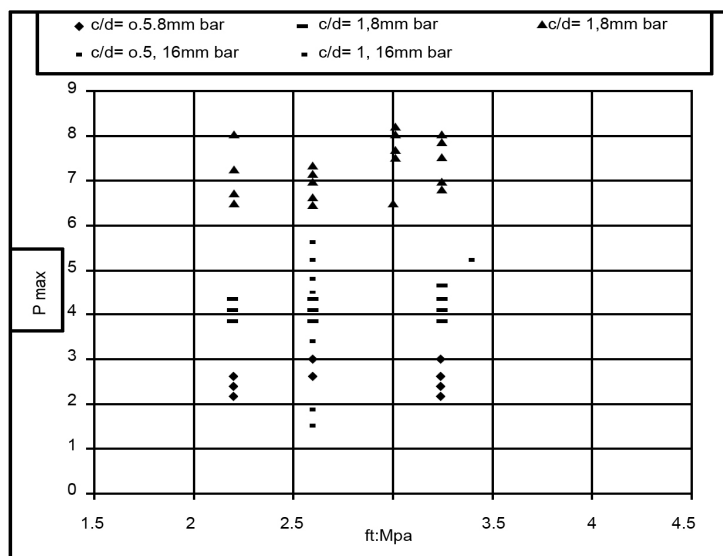
Allan & Cherry ترک خوردگی ناشی از خوردگی حفره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. روش آزمایش این محققین به این صورت بود که برای شبیه سازی خوردگی حفره‌ای سعی کردند فشار اعمالی به پوشش بتنی را موضعی اعمال کنند، لذا با سوراخ کردن مرکز آرماتور و سپس با سوراخ کردن موضعی سطح آرماتور و سپس با اعمال فشار داخلی توسط پمپ هیدرولیکی به این هدف دست یافتند.

Ghandehari et al نیز با اعمال خوردگی تسریع شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطرهای ۱۰۰mm و ۱۵۰mm که دارای سوراخ به قطرهای ۹/۵mm و ۲۰mm بودند زمان

لازم برای ترک خوردگی و درصد خوردگی ترک خوردن را برای نمونه‌های مختلف اندازه گیری نمودند. در ادامه به بحث در مورد نتایج این آزمایشات می‌پردازیم [۴].

در آزمایش Williamson & Clark سه نوع بتن به کار برده شد به طوری که مقاومت کششی بتن‌ها از ۲/۲ Mpa تا ۴/۱ Mpa متغیر بود. رابطه بین مقاومت کششی و فشار لازم برای ترک پوشش به دست آمده از این آزمایش در شکل ۲-۳ آمده است. از شکل ۲-۳ مشخص است که در نمونه‌های با هندسه یکسان، مقاومت کششی تأثیر چندانی در فشار لازم برای ترک خوردن ندارد.

این نتیجه با رابطه ارائه شده توسط Moringa در تناقض می باشد چرا که در رابطه Moringa فشار لازم با مقاومت کششی رابطه خطی دارد. علت این تناقض را می‌توان اینگونه بیان کرد که هر دو محقق آزمایش برزلی را برای به دست آوردن مقاومت کششی بتن مورد استفاده قرار دادند در صورتی که نمونه‌های آزمایشی آنها متفاوت بود. Moringa از نمونه‌های استوانه‌ای با یک سوراخ در وسط استفاده کرد که به طبع، نسبت پوشش به قطر بالایی را تأمین می‌نمود، در صورتی که در آزمایش Williamson et al از نمونه‌های مکعبی استفاده شد که سوراخ آن به وجوه نزدیک بوده و نسبت  $c/d$  کوچکی داشتند.

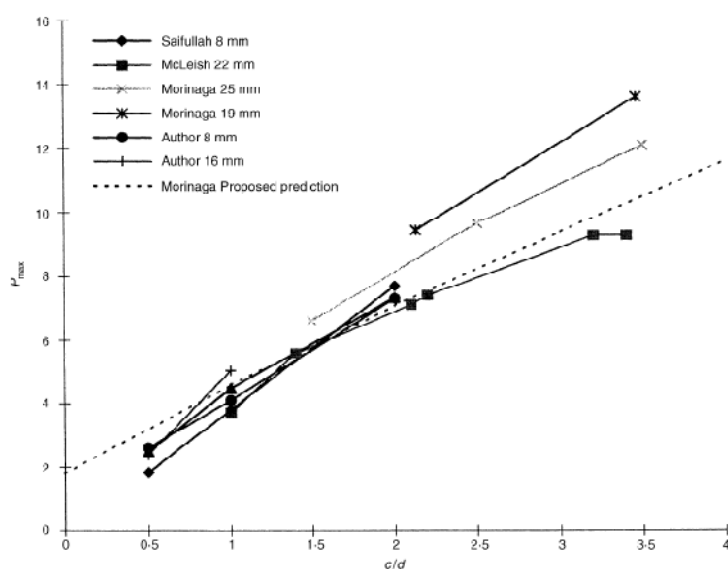


شکل ۳-۲ رابطه فشار حداکثر ترک خوردن نمونه ها ( $P_{max}$ ) و مقاومت کششی بتن  $f_t$  [۲]

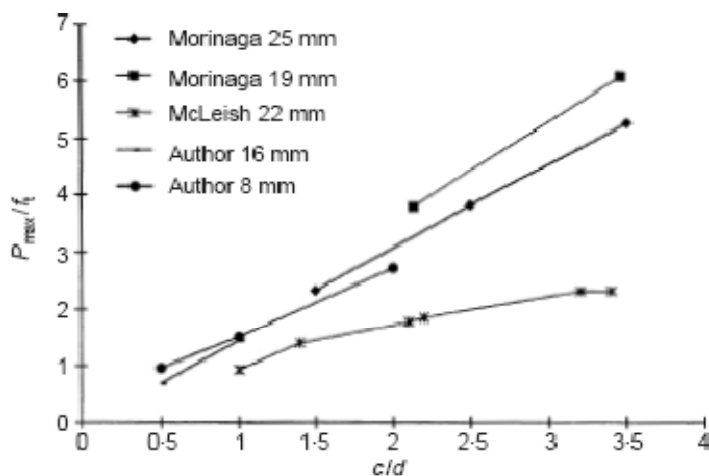
علت این امر را میتوان چنین بیان نمود که مقاومت کششی معیاری مناسب برای شکست نمی باشد چرا که پروسه شکست در این حالت با توسعه ترک صورت می گیرد و نه تسلیم. اگرچه مقاومت کششی در شکل گیری ترک مؤثر می باشد ولی تنها زمانی شکست رخ می دهد که ترک تا سطح بتن گسترش یابد. بنابراین می توان گفت که معیار انرژی شکست می تواند معیار مناسب تری برای ترک خوردن پوشش بتنی که تحت فشار داخلی است، باشد. البته پیش از این توسط Allan & Cherry 1992 نیز این مطلب عنوان شده و پیشنهاد شده است که شکست پوشش بتنی بهتر است با معیار انرژی شکست سنجیده شود.

با بررسی نتایج دیگر محققان پستوانه مناسبی برای پیشنهاد اینکه مقاومت کششی معیار مناسبی نمی باشد به دست می آید. در شکل ۳-۳ و ۴-۳ نتایج محققان با یکدیگر مقایسه شده است، علی رغم تفاوت زیاد بین مقاومت کششی نمونه های آزمایشی در آزمایش های مختلف، دیده می شود که بین فشارهای مورد نیاز برای ترک خوردن که توسط

محققان به دست آمده تفاوت زیادی وجود ندارد. زمانی که نسبت بدون بعد ( $P_{max}/f_t$ ) برای مقایسه نتایج آزمایشات استفاده می گردد این همگرایی کاهش یافته و اختلاف زیاد میشود. همچنین در این حالت دیده می شود که نتایج McLeish پراکندگی بیشتری نسبت به نتایج دیگر محققان دارد و این بدان علت است که این محقق، مقاومت کششی بتن را به جای انجام آزمایش برزیلی به صورت فرضی انتخاب نمود.

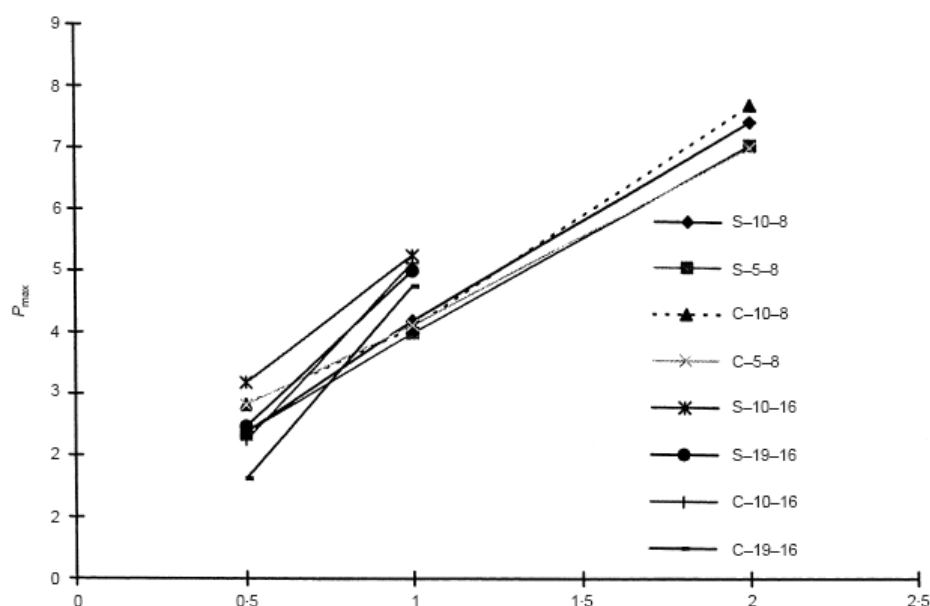


شکل ۳-۳ مقایسه حداکثر فشار شکست مشاهده شده توسط محققان مختلف [۲]



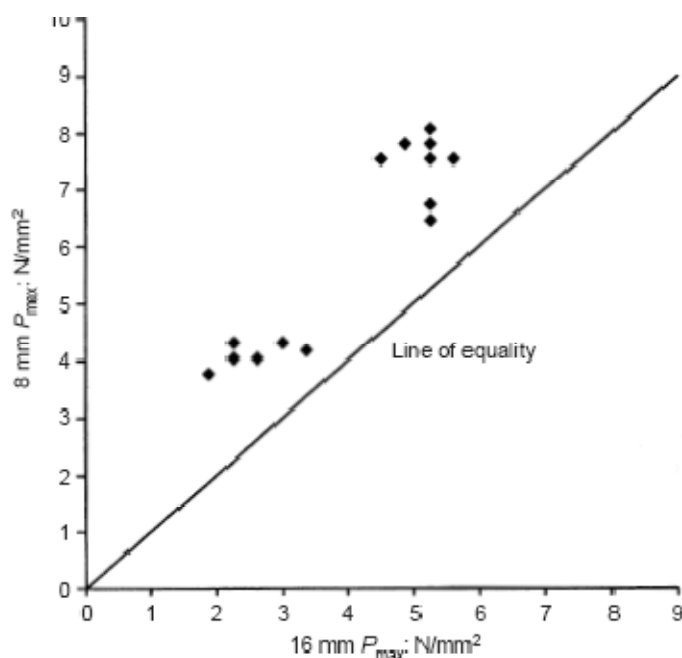
شکل ۳-۴ مقایسه نسبت  $P_{max}/f_t$  مشاهده شده توسط محققان مختلف [۲]

همچنین تغییرات فشار لازم در مقابل نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور که توسط ویلیامسون به دست آمده است در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. در این شکل هر نقطه از میانگین گیری شش آزمایش به دست آمده است. پارامترهای  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  که در شکل در کنار هر نقطه آمده است عبارتند از  $\alpha$  : (S) وجه یا (C) گوشه  $\beta$  حداکثر اندازه سنگدانه (میلیمتر) و  $\gamma$  قطر آرماتور (میلی متر). مشاهده می گردد که برای آرماتور با قطر 8mm فشار لازم به طور خطی با افزایش c/d افزایش می یابد. در مورد آرماتور به قطر 16mm نیز با افزایش نسبت c/d فشار لازم افزایش می یابد لیکن به علت اینکه تنها دوسری نتیجه آزمایش برای این نمونه موجود بود نمی توان تشخیص داد که آیا فشار لازم برای افزایش نسبت c/d به طور خطی تغییر می کند یا نه.



شکل ۳-۵ تأثیر نسبت c/d بر  $P_{max}$  محاسبه شده توسط ویلیامسون و همکاران [۲]

در رابطه با تأثیر قطر آرماتور در فشار مورد نیاز برای ترک خوردن می‌توان به نمودار شکل ۳-۶ مراجعه نمود. اگر نتایج به دست آمده برای نمونه‌های با پوشش مساوی اما با قطر آرماتور متفاوت را با هم مقایسه نماییم مشاهده می‌کنیم که برای نمونه با قطر آرماتور بزرگتر فشار لازم کمتر می‌باشد. این کاهش در فشار شکست با افزایش قطر آرماتور توسط Morinaga نیز گزارش شده است. علت این امر را می‌توان چنین بیان کرد که در قطر بالاتر، به علت سطح تماس بیشتر آرماتور با بتن، نیروی انبساطی ایجاد شده بیشتر بوده و همچنین سختی بتن پوشش کمتر می‌باشد. بنابراین با اعمال فشار مساوی به نمونه‌های با پوشش مساوی و قطرهای آرماتور متفاوت، تغییر شکل ایجاد شده در بتن در نمونه با قطر آرماتور بزرگتر، بیشتر بوده و این تغییر شکل زیاد باعث می‌شود که در این نمونه‌ها ترک خوردگی زودتر رخ دهد.



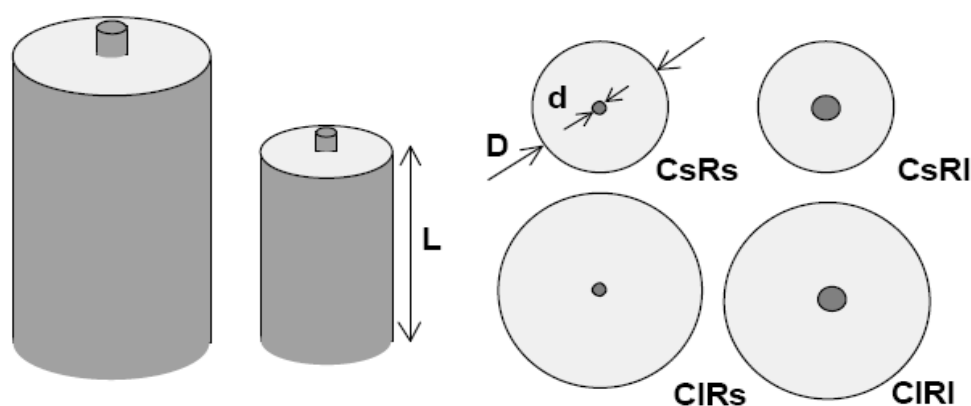
شکل ۳-۶ تأثیر قطر آرماتور در فشار شکست ویلیامسون و همکاران [۲]



از نتایج آزمایشات مشاهده می‌گردد که حداکثر اندازه سنگدانه‌ها تأثیر کمی بر روی فشار شکست می‌گذارد. در حالتی که نسبت  $c/d$  کوچکتر از ۱ باشد فشار گسیختگی برای نمونه با حداکثر اندازه دانه بزرگتر، اندکی کمتر از نمونه با سنگدانه ریزتر می‌باشد، لیکن در حالتی که نسبت  $c/d$  برابر ۲ می‌باشد برای حداکثر دانه  $10\text{mm}$  فشار شکست اندکی بیشتر از این فشار برای حداکثر سنگدانه  $5\text{mm}$  می‌باشد.

موقعیت قرارگیری آرماتور تنها زمانی که ضخامت پوشش کم باشد در فشار شکست مؤثر است. همچنین مشاهده می‌گردد که در حالتی که ضخامت پوشش کم باشد مخصوصاً در آرماتور با قطر بزرگتر، پوشش در آرماتورهای گوشه بسیار شکننده تر از پوشش آرماتورهای جانبی می‌باشد.

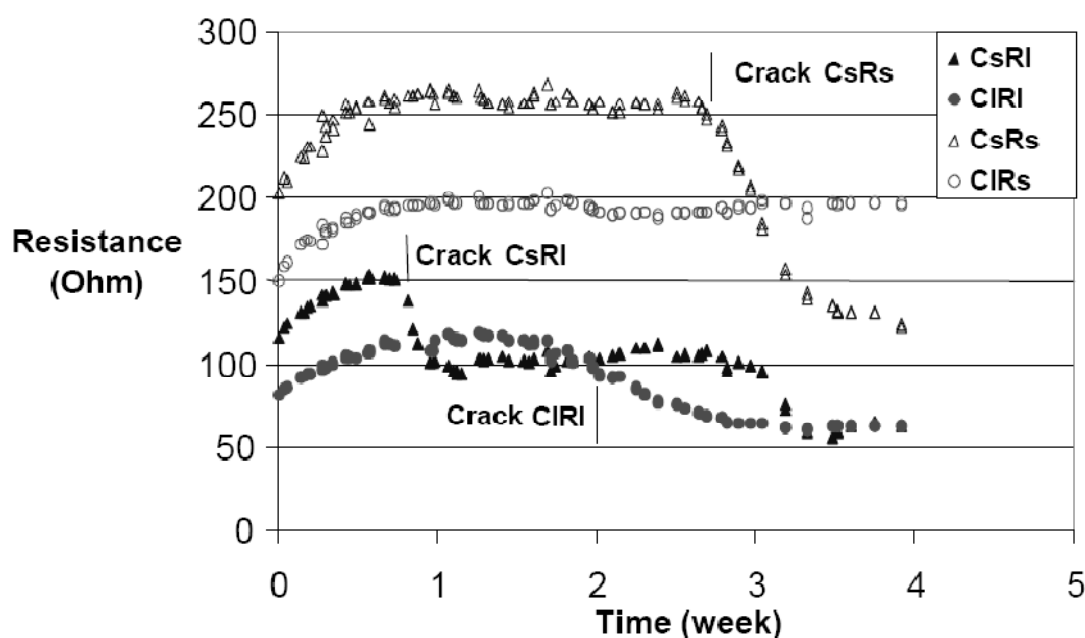
همچنانکه ذکر شد ChandeHari et al نیز با اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه نتایجی در مورد ترک خوردگی نمونه‌های مختلف به دست آوردند که در شکل‌های ۷-۳ و ۸-۳ هندسه نمونه‌ها و نمودارهای به دست آمده توسط این محققین مشاهده می‌گردد.



شکل ۷-۳: هندسه نمونه‌های آزمایشی در آزمایش Ghandehari et al

جدول ۳-۱ مشخصات نمونه ها، جریان خوردگی اعمال شده و درصد های خوردگی مورد نظر در آزمایش Ghandehari et al

| TABLE 1 – SPECIMEN DIMENSIONS AND CORROSION CURRENT LEVELS |                       |                    |                     |         |      |                        |        |        |        |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------|------|------------------------|--------|--------|--------|
|                                                            | dimensions            |                    |                     | current |      | design corrosion level |        |        |        |
| specimen                                                   | Cylinder diameter (D) | Rebar diameter (d) | Cylinder Length (L) | I       | i    | 1 week                 | 2 week | 3 week | 4 week |
|                                                            | mm                    | mm                 | mm                  | mA      | A/m2 | %                      | %      | %      | %      |
| CsRI                                                       | 102                   | 19                 | 203                 | 75      | 6.16 | 2..5                   | 5      | 7.5    | 10     |
| CIRI                                                       | 152                   | 19                 | 304                 | 115     | 6.16 |                        |        |        |        |
| CsRs                                                       | 102                   | 9.5                | 203                 | 20      | 3.29 |                        |        |        |        |
| CIRs                                                       | 152                   | 9.5                | 304                 | 30      | 3.29 |                        |        |        |        |
| Corrosion level (weight loss) according to Faraday's law   |                       |                    |                     |         |      |                        |        |        |        |



شکل ۳-۸ زمان ترک خوردگی و مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده در آزمایش Ghandehari et al

همانگونه که در شکل ۳-۸ مشاهده می گردد نمونه با قطر ۱۰۲mm و قطر آرماتور

۱۹mm در کمتر از یک هفته اعمال خوردگی ترک می خورد، و باتوجه به جدول ۳-۱ این به

آن معنی است که با اعمال کمتر از ۲/۵ درصد خوردگی وزنی این نمونه ترک می خورد.

همچنین نمونه با قطر ۱۵۲mm و قطر آرماتور ۱۹mm در دومین هفته اعمال خوردگی

ترک می‌خورد و دو هفته اعمال خوردگی در این آزمایش معادل ۵ درصد خوردگی وزنی می‌باشد.

نمونه با قطر کوچک و قطر آرماتور کوچک نیز در حدود چهارده روز پس از شروع خوردگی ترک می‌خورد که معادل اعمال حدود ۷ درصد خوردگی می‌باشد. همانگونه که از نمودار مشخص است نمونه با قطر بزرگ و قطر آرماتور کم، حتی با اعمال ۱۰ درصد خوردگی نیز ترک نخورده و سالم باقی مانده است.

Saeki et al با پیشنهاد اندیس ترک خوردگی و ارتباط دادن این اندیس با خوردگی در شرایط خورنده ملایم و شدید به مطالعه ترک ناشی از خوردگی پرداختند. این اندیس ترک خوردگی نسبت عرض ترک‌ها به فاصله بین آنها بوده و با رابطه زیر بیان می‌شود [۵]:

$$\gamma = w/L \quad (2-3)$$

که در آن، W: عرض ترک و L: فاصله بین ترکها می باشد

نتیجه‌ای که Saeki et al از تحقیقات خود گرفتند به این صورت است که برای به حداقل رسیدن ترک خوردگی ناشی از انبساط زنگ آهن بایستی سعی شود از ترک خوردگی سازه در شرایط بهره برداری جلوگیری نمود. بنابراین با تعریف تنش مجاز برای فولاد سعی کردند که تنش بهره برداری در فولاد را برای جلوگیری از ایجاد ترک در شرایط بهره برداری محدود نمایند.

### ۳-۳ - تأثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی بتن و فولاد

تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای برای تشخیص اثر خوردگی بر مقاومت پیوستگی بتن و فولاد انجام شده که در هر کدام از این آزمایشات نمونه‌های مورد مطالعه مشخصات مخصوص به خود داشته و پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده نیز متفاوت می‌باشند. در بعضی از این آزمایشات مقاومت خمشی مطالعه شده و در برخی دیگر، از نمونه‌های کششی استفاده شده است. در بعضی از این آزمایشات اثر آرماتورهای عرضی در نظر گرفته نشده است و همچنین به علت اعمال خوردگی تسریع شده به نمونه‌ها، شبیه سازی خوردگی در آزمایشگاه با شرایط عملی اندکی متفاوت است. در اینجا به بررسی چند نمونه از این آزمایشات و جمع بندی نتایج آنها می‌پردازیم.

Mangat et al با تنظیم یک برنامه آزمایشی گسترده تلاش کردند که مقاومت خمشی باقیمانده تیرهای بتنی با آرماتورهای کششی را در درجات مختلف خوردگی به دست آورند، نمونه‌های آزمایشی آنها شامل ۱۱۱ نمونه تیر بتنی به طول ۹۱۰mm و مقطع مستطیلی ۱۰۰mm در ۱۵۰mm بود که با دو آرماتور طولی به قطر ۱۰mm یا ۸mm مسلح شده بودند. روش اعمال خوردگی، روش خوردگی تسریع شده بود و با مستغرق کردن نمونه‌ها در محلول ۳/۵ درصدی آب نمک و اعمال دانسیته جریانی برابر  $I = ۱ و ۲ و ۳ و ۴ \text{ A/cm}^2$  با استفاده از تخمین مدت زمان اعمال جریان به وسیله قانون فارادی به صورت زیر توانستند با حدود ده درصد خطا به درصد خوردگی‌های موردنظر خود دست یابند [۶].

$$\Delta\omega = \frac{AIt}{ZF}$$

قانون فارادی: (۳-۴)

که در آن :

$\Delta\omega$ : وزن فلز از دست رفته در اثر خوردگی

A: وزن اتمی آهن (۵۶ گرم)

I: جریان خوردگی (آمپر)

t: زمان سپری شده (زمان اعمال خوردگی) (ثانیه)

Z: ظرفیت واکنشی الکتروود (برای آهن = ۲)

F: ثابت فارادی می باشد

همچنین می توان برای فلز از دست رفته رابطه زیر را نوشت:

$$\Delta\omega = a\delta\gamma \quad (۵-۳)$$

که در آن :

$\alpha$ : سطح جانبی آرماتور

$\delta$ : ضخامت زنگ آهن

$\gamma$ : چگالی فولاد (گرم بر سانتیمتر مربع)

همچنین می توان نوشت:

$$I = ia \quad (۶-۳)$$

i: دانسیته جریان (آمپر بر سانیمتر مربع)

بنابراین داریم:

$$\delta = \frac{Ait}{\gamma ZF} \quad (۷-۳)$$

اگر R را به عنوان فلز از دست رفته در سال تعریف نماییم داریم:

$$R = 1156i \left( \frac{cm}{year} \right) \quad (۸-۳)$$

در این رابطه مشخص است که در یک پروسه خوردگی با دانسیته جریان ۱ آمپر بر سانتیمتر مربع ضخامت فولاد خورده شده ۱/۱۵۶ سانتیمتر در سال می باشد. بنابراین می توان گفت که درصد کاهش در قطر آرماتور برابر است با:

$$\text{درصد خوردگی} = 2 \frac{RT}{D} \times 100 \quad (۹-۳)$$

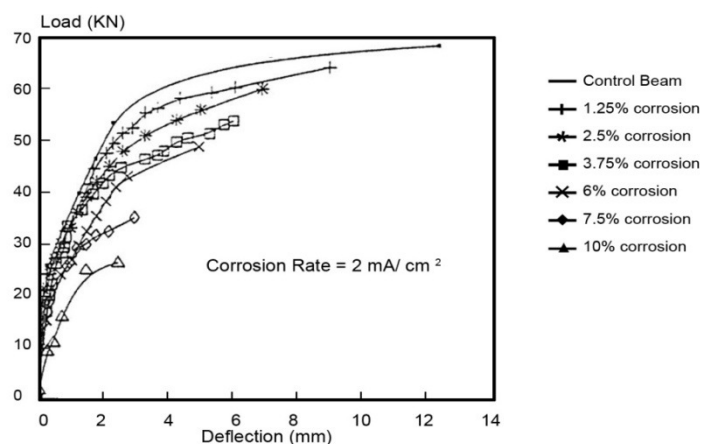
با جایگذاری مقدار R از رابطه قبلی در این رابطه ، رابطه ۳-۱۰ بدست می آید که با استفاده از این رابطه می توان برای یک دانسیته جریان مشخص و قطر آرماتور داده شده، مدت زمان لازم برای دست یافتن به درصد خوردگی موردنظر را به دست آورد:

$$\text{درصد خوردگی} = 2312i \frac{T}{D} \quad (۱۷-۳)$$

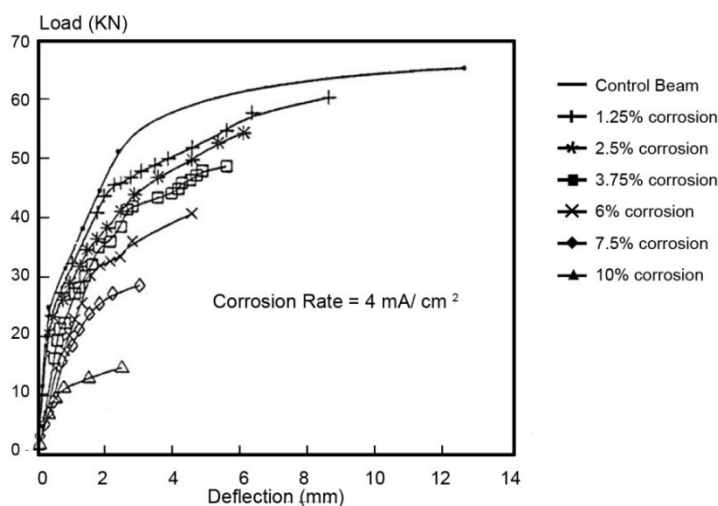
با استفاده از این رابطه Mangat et al توانستند با حدود ۱۰ درصد خطا ، خوردگی

مورد نظر خود را به نمونه ها اعمال نمایند.

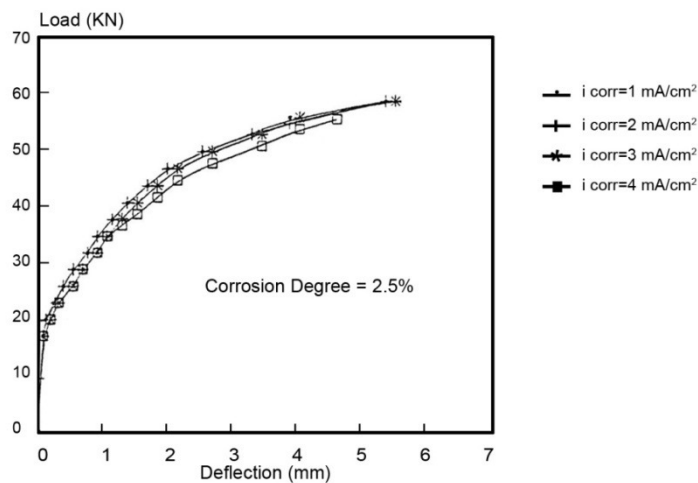
درصدهای خوردگی اعمال شده در این آزمایش ۱/۲۵، ۲/۵، ۳/۷۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ بود. اثرات درصدهای خوردگی مختلف با سرعتهای خوردگی متفاوت بر نمودار بار - خیز تیرها در نمودارهای شکلهای ۳-۹ و ۳-۱۰ و ۳-۱۱ و ۳-۱۲ آمده است.



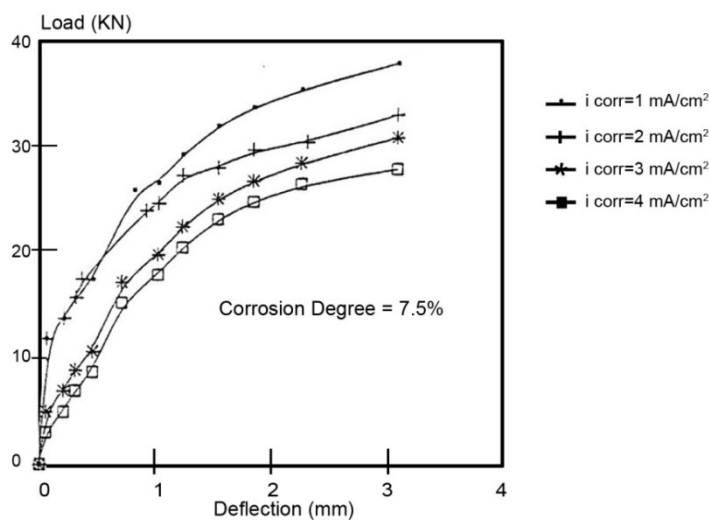
شکل ۳-۹ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰ mm تحت اثر خوردگی (سرعت اعمال خوردگی ۲ mA/cm<sup>2</sup>) [۶]



شکل ۳-۱۰ تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰ mm تحت اثر خوردگی (سرعت اعمال خوردگی ۴ mA/cm<sup>2</sup>) [۶]



شکل ۳-۱۱ تأثیر بار-خیز تیرهای با آرماتور ۱۰ mm تحت اثر خوردگی (درصد خوردگی: ۲/۵) [۶]



شکل ۳-۱۲: تأثیر بار - خیز تیرهای با آرماتور ۱۰ mm تحت اثر خوردگی (درصد خوردگی: ۷/۵) [۶]

با بررسی شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ دیده می‌شود که با افزایش درصد خوردگی، شیب

منحنی کاهش می‌یابد و در نتیجه سختی نیز به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین در شکل

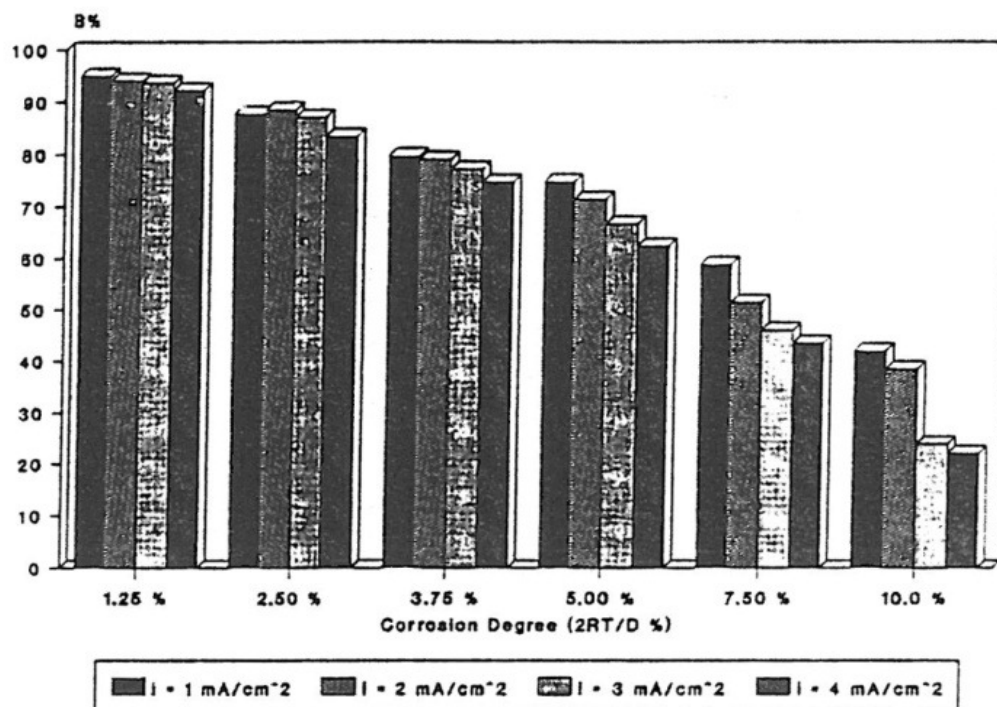
۳-۱۱ دیده می‌شود که اعمال سرعت‌های خوردگی مختلف برای درصد خوردگی، کم

اختلاف زیادی در نمودار بار - خیز ایجاد نمی‌کند. در صورتی که در شکل ۳-۱۲ دیده



می‌شود که اعمال سرعت بالای خوردگی در درصد‌های خوردگی بالا بر منحنی تأثیر می‌گذارد.

این محققین [۶] با اندازه‌گیری مقاومت خمشی تیرها در درصد‌های مختلف خوردگی و همچنین مطالعه‌ی الگوی شکست خمشی نشان دادند که مهمترین عامل در کاهش مقاومت خمشی تیرها، کاهش مقاومت پیوستگی بین بتن و فولاد می‌باشد. این محققین مشاهده نمودند که در تیرهای تحت خوردگی، ترکها فاصله زیادی از یکدیگر داشته و لغزش آرماتور در بتن باعث افزایش خیز تا مرز شکست تیر می‌شود. در شکل ۳-۱۳ روند کاهش مقاومت تیرها در درصد‌های مختلف خوردگی و با سرعت‌های اعمال خوردگی متفاوت نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۱۳ : تأثیر سرعت و در صد خوردگی در مقاومت خمشی تیرها ( B : درصد باقیمانده ) [۶] .

از شکل ۳-۱۳ می‌توان دید که سرعت اعمال خوردگی در درجات پایین خوردگی تأثیر زیادی در کاهش مقاومت تیرها ندارد ولی در درجات بالای خوردگی، با افزایش سرعت اعمال خوردگی، میزان آسیب در تیرها افزایش می‌یابد. این محققین با استفاده از نتایج آزمایش خود در پایان رابطه‌ای برای مقاومت خمشی باقیمانده تیرهای بتن مسلح پیشنهاد نمودند که به شکل زیر است:

$$B \langle Percent \rangle = \{1 - \sin^2 \left( 2.312 \frac{T}{D} i \ln i \right)\} * 100 \quad (3-11)$$

که در آن B: مقاومت خمشی باقیمانده تیرها به صورت درصدی از مقاومت اولیه می‌باشد.

رابطه ۳-۱۱ نتایج محافظه کارانه‌ای به دست می‌دهد. این بدان علت است که در به دست آوردن این رابطه آرماتورهای عرضی در نظر گرفته نشده است. همچنین در خوردگی تسریع شده خرابی‌های ایجاد شده در مقایسه با خوردگی طولانی با سرعت کم، دارای شدت بیشتری می‌باشد. لذا این اختلاف در سرعت خوردگی می‌تواند تأثیر زیادی در مقاومت باقی مانده بگذارد.

نتیجه دیگری که این محققین [۶] از آزمایشاتشان به دست آوردند این بود که در درجات پایین خوردگی (در حد ۵/۰ درصد وزنی) مقاومت خمشی نمونه‌ها از مقاومت خمشی نمونه کنترل تجاوز می‌کند. این امر به علت محدود شدگی ناشی از تنش شعاعی ایجاد شده به وسیله محصولات خوردگی می‌باشد. چرا که پوشش هنوز ترک نخورده و به عنوان عامل محدود کننده عمل می‌کند. در درصدهای خوردگی بالاتر مقاومت پیوستگی به سرعت کاهش می‌یابد، تا آنجاییکه به ۶۰ درصد مقاومت پیوستگی نمونه کنترل می‌رسد.

این کاهش زیاد در مقاومت پیوستگی به علت تبدیل لایه‌های سطحی فولاد به لایه ضعیف زنگ آهن می‌باشد. این لایه ضعیف باعث از بین رفتن پیوستگی شیمیایی بین بتن و فولاد در سطح تماس آن دو می‌گردد. زمانی که انبساط محصولات خوردگی فشار لازم برای ایجاد ترک در پوشش را تولید کند، پوشش ترک خورده و محدود شدگی آرماتورهای طولی از دست می‌رود و محصولات خوردگی به سمت ترک‌ها حرکت می‌کنند، این مطلب باعث کاهش مقاومت پیوستگی اصطکاکی نیز می‌شود. همچنین کاهش قطر آرماتور طولی باعث کاهش قفل و بست بین آرماتور و بتن در سطح تماس نیز می‌شود. مجموعه این پارامترها باعث کاهش در مقاومت پیوستگی می‌شود.

نتایج نهایی که این محققین [۶] از آزمایشات خود ارائه دادند به صورت زیر قابل بیان است:

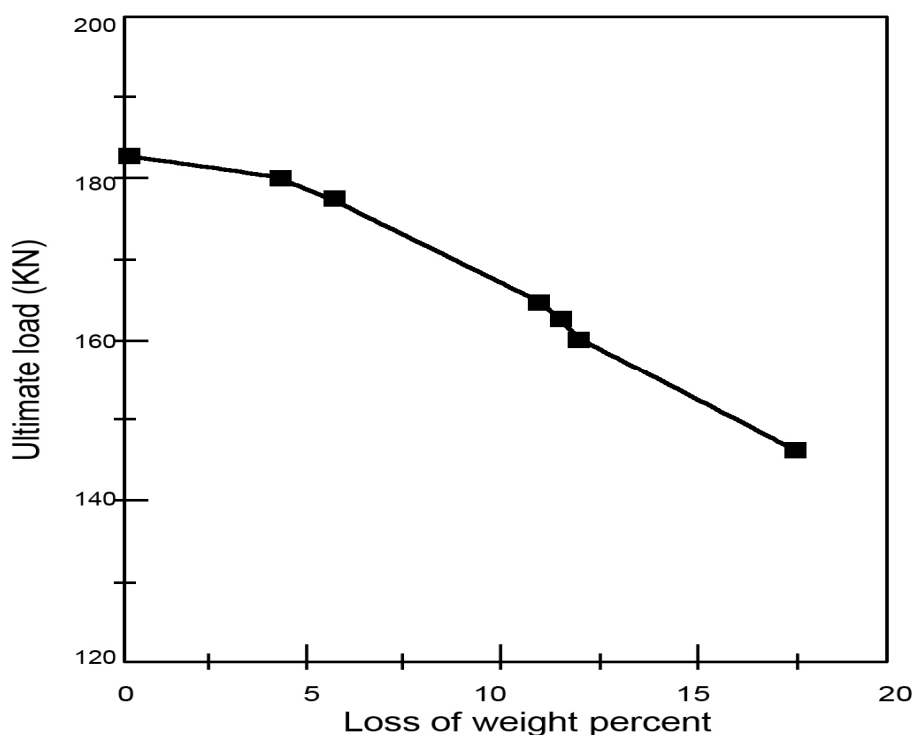
خوردگی آرماتور اثرات کاملاً مشخصی هم روی مقاومت خمشی تیر و هم روی خیز تیر دارد' به عنوان مثال در میزان خوردگی ۱۰ درصد، مقاومت نمونه تا ۲۵ درصد نمونه کنترل کاهش می‌یابد.

مدت زمان عمل آوری قبل از اعمال خوردگی تأثیر چندانی در مقاومت خمشی باقیمانده ندارد.

کاهش در مقاومت خمشی نمونه‌ها عمدتاً ناشی از کاهش مقاومت پیوستگی می‌باشد و کاهش سطح مؤثر فولاد تأثیر مهمی در مقاومت نمی‌گذارد.

نموداری برای پیش بینی مقاومت باقیمانده دراز مدت اعضای خمشی خورده شده و برای قطرهای مختلف آرماتور می‌توان رسم نمود.

تحقیق دیگری که در زمینه تأثیر خوردگی بر مقاومت پیوستگی انجام شده در سال ۱۹۹۹ توسط Amleh & Mirza می‌باشد. این محققین با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به طول یک متر و قطر ۱۰۰ mm مطالعات خود را انجام دادند. در این آزمایش نیز محققین با قراردادن نمونه‌ها در محلول ۵٪ آب نمک و اعمال خوردگی سریع به درجات مختلف خوردگی دست یافتند. کنترل درجه خوردگی به سه روش انجام شده است: عرض ترک، درصد کاهش وزن فولاد و درصد کاهش سطح مقطع فولاد. نتایج به دست آمده توسط این محققین [۷] در شکل ۳-۱۴ آمده است.



شکل ۳-۱۴ نمودار مقاومت نهایی در مقابل درجه خوردگی [۷]

جدول ۲-۳ خلاصه نتایج مقاومت پیوستگی نسبی بدست آمده از نمونه های کششی [۷]

| Specimen                             | ss1  | ss2  | cs1  | cs2 | cs3 | cs4  | cs5  | cs6  |
|--------------------------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| Corrosion level                      | 0    | 0    | 1    | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    |
| Percentage loss of weight            | 0    | 0    | 4    | .5  | 1   | 11.5 | 12   | 17.5 |
| Ultimate load capacity               | 185  | 185  | 180  | 177 | 164 | 162  | 160  | 146  |
| Percentage loss of Ultimate capacity | 0    | 0    | 1.6  | 3   | 7.4 | 11.5 | 12.6 | 20   |
| Average crack spacing<br>Mm          | 85.5 | 89.5 | 90.9 | 100 | 167 | 200  | 238  | —    |
| Nominal bond stress*                 | 100  | 100  | 91   | 85  | 50  | 42   | 35   | 8    |

\* Percent of bond stress in uncorroded specimen

از نمودار شکل ۳-۱۴ مشخص می شود که برای درصدهای پایین خوردگی، به عنوان مثال ۴ یا ۵/۵ درصد کاهش در مقاومت نهایی محسوس نیست و در حدود ۱/۷ درصد می باشد، در صورتی که برای کاهش وزن فولاد ۱۷/۵ درصد، کاهش در مقاومت ۲۰ درصد مشاهده می گردد. همچنین از جدول ۲-۳ مشاهده می شود که در درجات بالای

خوردگی یا کاهش وزن آرماتور، مقاومت پیوستگی فوق العاده کاهش یافته و به ۸ درصد مقاومت اولیه می‌رسد.

با مطالعه رفتار ترک خوردگی در نمونه‌های کششی در این آزمایش (جدول ۲-۳) می‌توان به روند کاهش مقاومت پیوستگی پی برد. با توجه به الگوی ترکها در نمونه‌های مختلف با درجات مختلف خوردگی یعنی تعداد و فاصله ترکها مشاهده می‌شود که با افزایش درجه خوردگی، فاصله ترکها افزایش یافته که این نشانه کاهش مقاومت پیوستگی می‌باشد. در نمونه های کنترل متوسط فاصله ترکها به طور تقریبی ۸۳mm می‌باشد که تقریباً دو برابر ضخامت پوشش می‌باشد. بار ترک خوردگی اولیه برای نمونه کنترل ۱۸KN می‌باشد در صورتی که این نیرو برای نمونه‌های شماره ۳ برابر ۲۳KN می‌باشد، همچنین این بار برای نمونه‌های شماره ۴ و ۵ به ترتیب ۱۰KN و ۵KN می‌باشد به علاوه در نمونه شماره ۶ هیچگونه ترک عرضی مشاهده نمی‌شد. این نتایج را اینچنین می‌توان تحلیل نمود که در نمونه‌های شماره ۴ و ۵ ترک عرضی بیشتر ناشی از باز شدگی ترکهای طولی به سمت عرض بوده تا اینکه ناشی از زایل شدن مقاومت کششی بتن باشد. بار ترک خوردگی برای نمونه شماره ۳ که دارای ترک طولی به عرض ۶mm می‌باشد از بار ترک خوردگی نمونه کنترل بیشتر است و این نشان می‌دهد که مقاومت پیوستگی بتن و فولاد کاهش یافته و سهم بتن در تحمل بارها کاهش یافته است.[۷]

با توجه به تحقیقاتی که Goto در سال ۱۹۷۱ انجام داد می‌توان گفت که در شکل گیری ترکهای اولیه در نمونه‌های کششی، بعد از ایجاد اولین ترک و با ادامه بارگذاری، چسبندگی بین بتن و آرماتور از بین می‌رود و بارها به آج‌های آرماتور منتقل می‌شوند و سپس با افزایش بار، ترکهای ریز در اطراف آرماتور اصلی شکل می‌گیرند و افزایش

بارگذاری باعث افزایش ترک خوردگی داخلی می‌شود. بنابراین کاهش چسبندگی و ترک خوردگی داخلی باعث کاهش سرعت انتقال نیرو از آرماتور به بتن می‌گردد. در ادامه روند خوردگی کاهش قفل و بست بین آجهای آرماتور و بتن به علت کاهش سطح آرماتورها و کوچک شدن آجها باعث کاهش ناگهانی مقاومت پیوستگی میشود. به علاوه ترکهای طولی و عریض شدن آنها نیز در کاهش پیوستگی سهم می‌باشند چرا که در این حالت سطح کمتری از آرماتور توسط بتن احاطه می‌شود. این کاهش مقاومت پیوستگی در نمونه‌های کششی در افزایش فاصله ترکها خود را نشان می‌دهد [۷].

در پایان این دو محقق [۷] با ارائه رابطه‌ای بین تنش پیوستگی فاصله ترکها درصد مقاومت پیوستگی نسبی در آرماتورهای خورده شده را به دست آوردند. این رابطه به صورت زیر است:

$$U = \frac{d_b f_y}{4L} = \frac{K}{L} \quad K: \text{const} \quad (3-12)$$

که در آن :

$d_b$  : قطر آرماتور

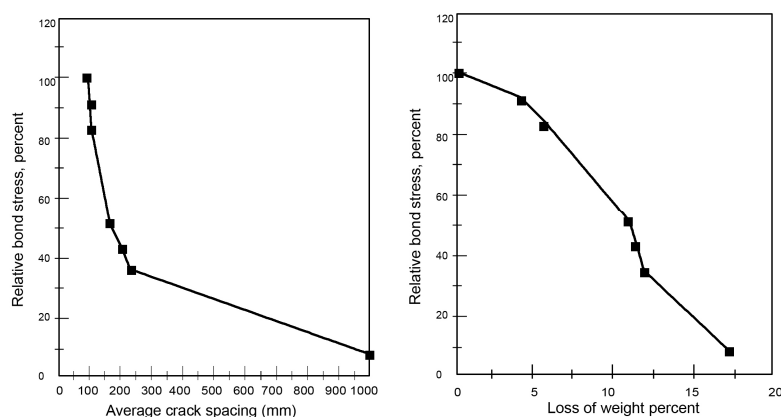
$f_y$  : مقاومت کششی فولاد

$L$  : فاصله ترکهای مجاور می باشد.

لازم به ذکر است که رابطه ۳-۱۲ با این فرض که تنش پیوستگی به طور یکنواخت در

طول  $L$  بین دو ترک توزیع شده، ارائه شده است.

یعنی تنش پیوستگی متوسط با فاصله ترکها نسبت معکوس دارد. اگر تنش پیوستگی در نمونه کنترل برابر ۱۰۰٪ باشد از این رابطه می توان درصد مقاومت پیوستگی نسبی را در نمونه های خورده شده محاسبه نمود. نمودار درصد مقاومت پیوستگی نسبی در مقابل درصد کاهش وزن آرماتور و همچنین در مقابل فاصله ترکها در شکل ۳-۱۵ آمده است.



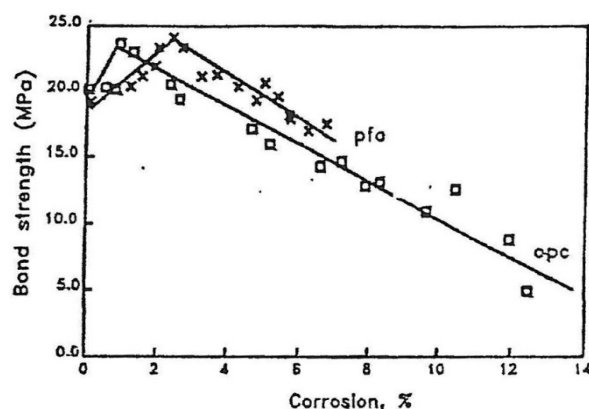
شکل ۳-۱۵ تنش پیوستگی نسبی در مقابل کاهش وزن ترکها [۷]

از تحقیقات دیگری که در رابطه با کاهش مقاومت پیوستگی در اثر خوردگی انجام شده است می توان به آزمایش Cabrera & Ghoddussi اشاره نمود. این آزمایش شامل دو بخش: آزمایش بیرون کشیدن آرماتور و آزمایش خمشی دو سری تیر با طول مهاری آرماتور متفاوت می باشد. همچنین این محققین از دو نوع سیمان معمولی و پوزولانی در آزمایش خود استفاده نمودند. تیرهای مورد استفاده در این آزمایش دارای آرماتور عرضی نیز می باشند [۸].

در این تحقیق [۸] نیز از خوردگی تسریع شده برای اعمال خوردگی استفاده شده است. لازم به ذکر است که درصد خوردگی هایی که در نتایج این محققین آمده است درصد خوردگی وزنی می باشد. نتیجه آزمایش بیرون کشیدن آرماتور برای دو نوع بتن مصرفی در

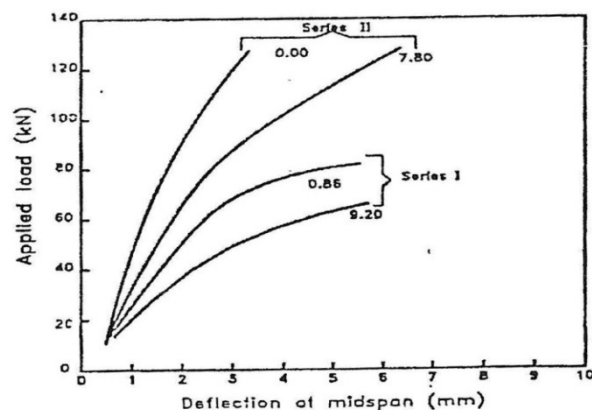


شکل ۳-۱۶ آمده است. در این شکل مشخص است که کاهش مقاومت پیوستگی در بتن با سیمان معمولی شدید تر بوده و با اعمال حدود ۸ درصد خوردگی مقاومت پیوستگی برای این نوع بتن به نصف کاهش می‌یابد. در صورتی که برای همین درصد خوردگی در بتن با سیمان پوزولانی کاهش مقاومت کمتر می‌باشد، همچنین از این مهمتر اینکه زمان لازم برای اعمال خوردگی در بتن با سیمان پوزولانی سه برابر این زمان برای بتن معمولی می‌باشد.



شکل ۳-۱۶ تغییرات مقاومت پیوستگی با درصد خوردگی برای دو نوع بتن . opc بتن باسیمان معمولی و pfa بتن باسیمان پوزولانی [۸]

همچنین در گزارش آزمایش این دو محقق تغییرات خیز تیرها در مقابل بار وارده و در درصد خوردگیهای مختلف نشان داده شده است. این نمودار در شکل ۳-۱۷ آمده است. آنچه که از این نمودار می‌توان فهمید این است که خوردگی در خیز تیرها اثر فراوانی دارد خصوصا در تیرهای سری ۲ به علت کم بودن طول مهاری افزایش خیز در اثر خوردگی بسیار شدید می‌باشد.



شکل ۳-۱۷ تأثیر خوردگی در نمودار بار - خیز در تیرهای ساخته شده از بتن معمولی [۸]

نتایجی که از این تحقیق [۸] می توان بیان کرد بدین شرح است:

مقاومت پیوستگی اندازه گیری شده در آزمایش بیرون کشیدن ، به شدت متاثر از

درصد خوردگی می باشد.

کاهش مقاومت پیوستگی در اثر خوردگی در تیرهای سری ۱ به طور قابل ملاحظه‌ای

کمتر از این کاهش در آزمایش بیرون کشیدن میباشد به طوری که در درصد خوردگی

۹/۲٪ کاهش مقاومت پیوستگی ۱۲٪ می باشد.

کاهش مقاومت پیوستگی در تیرهای سری ۲ که طول مهاری آرماتورها در آنها نصف

مقدار توصیه شده توسط BS 8110 می باشد به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از این کاهش در

تیرهای سری ۱ می باشد به طوری که در درصد خوردگی ۷/۸٪ مقاومت پیوستگی به میزان

۲۷٪ کاهش می یابد.

خیز در وسط دهانه در تیرها در اثر خوردگی افزایش می یابد به طوری که در درصد

خوردگی ۹٪ خیز تیر در وسط دهانه ۱/۵ برابر خیز تیر کنترل می شود.

بتن با سیمان پوزولانی مقاومت بهتری در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد چرا که مدت زمان لازم برای رسیدن به درصد مشخص خوردگی در این نوع بتن به مراتب بیشتر از بتن معمولی است.

در هر سه حالت بدون ترک، ترک خوردگی اولیه و حالت ترک خوردگی نهایی مشخص است که خاموتها و آرماتورهای عرضی در مقاومت پیوستگی سهیم می‌باشند لیکن در آزمایشات تسریع شده خاموتها خیلی کند خورده می‌شوند، چرا که به جریان متصل نمی‌باشند، در صورتیکه در عمل این حالت برعکس است و فولادهای عرضی بیش از فولادهای طولی خورده می‌شوند بنابراین مطالعات آزمایشگاهی کاملاً مطابق واقعیت نمی‌باشند، با این وجود سهم آرماتورهای عرضی در مقاومت پیوستگی قابل صرف نظر نمی‌باشد.

### ۳-۴- نتیجه گیری

از بررسی آزمایشات و تحقیقاتی که در بالا به آن پرداختیم و همچنین تحقیقات دیگر، می‌توان به صورت زیر جنبه های مختلف خرابی ناشی از خوردگی را خلاصه نمود:

مهمترین آسیب های ناشی از خوردگی ترک خوردن پوشش و کاهش مقاومت پیوستگی می باشد چرا که قبل از آنکه کاهش سطح مقطع آرماتور اهمیت عملی پیدا نموده و باعث ضعف در قدرت باربری عضو سازه ای شود پوشش ترک خورده و مقاومت پیوستگی نیز کاهش می یابد و لذا کاهش در سطح مقطع آرماتور تأثیر قابل توجهی در کاهش ظرفیت باربری سازه ندارد.

در ترک خوردن پوشش بتنی مهمترین فاکتور نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور (c/d) می باشد. اگر این نسبت به اندازه کافی بزرگ باشد (بزرگتر از ۳)، می توان انتظار داشت که در درصدهای بالای خوردگی هم پوشش مقاومت کرده و ترک نخورد.

حداکثر اندازه سنگدانه در ترک خوردگی پوشش تأثیر چندانی نمی گذارد مگر زمانی که ضخامت پوشش به حداکثر اندازه دانه ها نزدیک باشد که در این صورت به علت ضعف در اتصال سنگدانه و ملات، ممکن است ترک خوردگی سریعتر رخ دهد.

به علت اینکه مکانیزم گسیختگی در ترک خوردن پوشش، مکانیزم گسترش ترک می باشد، لذا مقاومت کششی بتن معیار مناسبی برای ترک خوردن نبوده و معیار انرژی شکست معیار مناسب تری می باشد.

موقعیت قرارگیری آرماتور در قطعه تنها زمانی که قطر آرماتور زیاد بوده و ضخامت پوشش نیز کم باشد در ترک خوردن پوشش مؤثر می باشد [۱۰].

اگر بتوان سازه را طوری طرح کرد که در شرایط بهره برداری ترک نخورد می توان امیدوار بود که در شرایط خورنده معمولی و حتی شدید در مقابل خوردگی مقاومت خوبی از خود نشان دهد.

کاهش در مقاومت پیوستگی مهمترین نقش را در کاهش ظرفیت اعضای سازه ای ایفا می کند.

در صورت تامین طول مهاری کافی در محل های آرماتور و تکیه گاهها در آرماتورهای اصلی، کاهش مقاومت پیوستگی و نتیجتاً روند کاهش باربری سازه کندتر می گردد.

استفاده از بتنهای با کیفیت خوب و همچنین سیمانهای پوزولانی در کاهش اثرات خوردگی مؤثر است.

آرماتورهای عرضی کاهش مقاومت پیوستگی را کند می کنند و بنابراین نتایجی که از آزمایشات بدون در نظر گرفتن اثر خاموتها به دست آمده اند محافظه کارانه می باشند.

با تامین پوشش کافی و طول مهاری مناسب، استفاده از بتنهای پوزولانی با کیفیت خوب، استفاده از خاموتهای حداقل در سراسر طول اعضاء و استفاده از آرماتورهای با قطر پایین تر می توان سازه ای مقاوم در برابر خوردگی طرح نمود.

## فصل چهارم

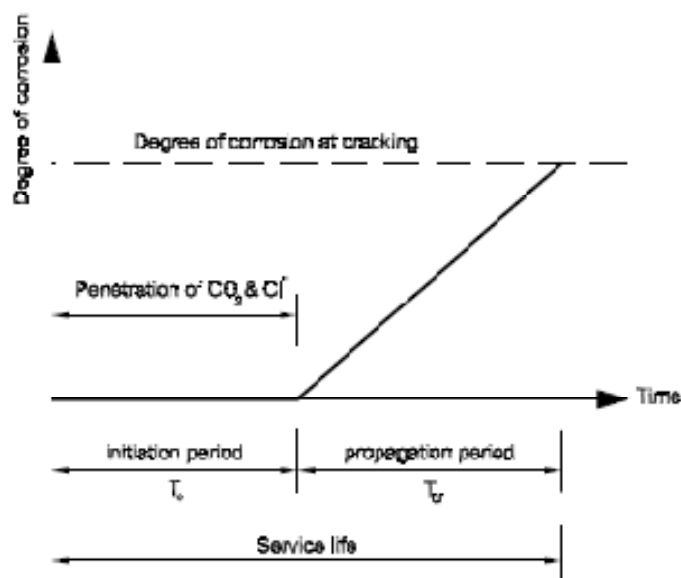
### مدلهای موجود

## فصل چهارم : مدل‌های موجود

### ۱-۴-مقدمه

به علت اهمیت مسئله خوردگی در سازه‌های بتن مسلح و لزوم طراحی این سازه‌ها بر اساس دوام، در چند سال اخیر تحقیقات زیادی برای ارائه مدل‌های پیش بینی سرعت خوردگی و همچنین تخمین میزان خسارات ناشی از خوردگی در سازه‌های بتن آرمه انجام شده است. در واقع سعی شده که با استفاده از این مدل‌ها، عمر مفید سازه‌های جدید و عمر باقی مانده سازه‌های موجود تخمین زده شود.

بیشتر مدل‌های پیش بینی عمر مفید سازه‌های بتن آرمه که مربوط به خوردگی آرماتور می‌باشند به نوعی دنباله رو مدل ساده ارائه شده توسط Tutti 1982 که مکانیزم خوردگی سازه‌های بتن آرمه را به دو بخش شروع خوردگی و پیشروی خوردگی تقسیم می‌کند می‌باشند [۱۱].



شکل ۱-۴ مدل عمر مفید سازه‌های در معرض خوردگی [۱۱]

مرحله شروع خوردگی مدت زمانی است که یونهای خورنده به سطح آرماتور می‌رسند و باعث فعال شدن آرماتور می‌شوند و مرحله پیشروی خوردگی مدت زمانی است که سازه کارایی خود را در اثر آسیبهای ناشی از خوردگی از دست می‌دهد.

مدت زمان مرحله شروع خوردگی بستگی به سرعت نفوذ یون کلرید و عمق پوشش دارد و مدت زمان مرحله پیشروی خوردگی بستگی به سرعت خوردگی و مدت زمان ترک خوردن پوشش و چگونگی کاهش مقاومت پیوستگی دارد. سرعت خوردگی خود متأثر از عواملی مانند مشخصات بتن و آرماتور و درصد رطوبت و مقاومت الکتریکی است. Tutti پایان عمر سازه‌های بتن آرمه در معرض خوردگی آرماتور را نمایان شدن ترکهای به عرض حدود  $0/1$  تا  $0/2$  میلیمتر در پوشش بتنی در نظر گرفت. در مدل‌های ریاضی که توسط (maage et al 1998, Tang & Milsson 1996, Fanahashi 1990, Browne 1982) تنها مرحله شروع خوردگی مد نظر قرار گرفته و شروع خوردگی آرماتور را پایان عمر مفید سازه‌ها در نظر گرفته‌اند. علت ارائه چنین مدل‌هایی را می‌توان این گونه بیان کرد که مشخص کردن فاکتورهای موثر بر مرحله پیشروی خوردگی مانند سرعت تولید و نوع محصولات خوردگی و همچنین مشخصات بتن و محل قرار گرفتن آرماتور در بتن بسیار پیچیده بوده و میزان تاثیر هر یک از این فاکتورها نیز مشخص نیست. با این وجود بعضی از محققین نظیر (Rasheeduzzafar et al 1992, Andrade & Alonso 1996) پایان عمر مفید سازه را زمانی می‌دانند که ظرفیت باربری فولاد در مقطع از نیروی موجود در مقطع کمتر شده و مقاومت پیوستگی فولاد و بتن نیز کاهش چشمگیری داشته باشد.

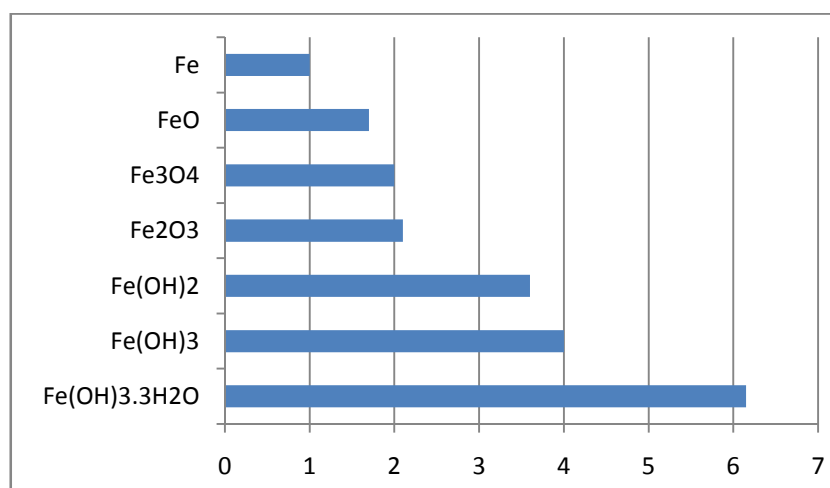
بنابراین چنین به نظر می‌رسد که مدل‌هایی که عمر مفید سازه‌ها را پیش بینی می‌کنند بایستی بر هر دو مرحله خوردگی استوار باشند چرا که برای طراحی سازه‌های جدید مرحله شروع خوردگی و اطمینان از مدت زمان نسبتاً طولانی شروع خوردگی و همچنین برای سازه‌های موجود کنترل ادامه خوردگی در مرحله پیشروی از اهمیت بیشتری برخوردارند.



بحث در مورد مدل‌های پیش بینی شروع خوردگی در این مجال نمی‌گنجد چرا که هدف ما تعیین عوامل موثر بر زمان ترک خوردن پوشش و در نهایت ارائه مدل تحلیلی برای پیش بینی ترک خوردگی است که به مرحله پیشروی خوردگی مربوط می‌باشد. لذا در این فصل با تاکید بیشتر به بررسی مدل‌هایی که خرابی سازه‌های در معرض خوردگی را در مرحله پیشروی خوردگی پیش بینی می‌کنند می‌پردازیم.

#### ۲-۴- مدل‌های سرعت خوردگی

همانگونه که گفته شد اکثر مدل‌های ارائه شده مربوط به شروع خوردگی می‌باشند، با این وجود مدل‌هایی برای پیش بینی سرعت خوردگی بر اساس نفوذ اکسیژن در بتن و سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی که در نواحی آندی و کاتدی رخ می‌دهد توسط محققین مختلف (Yokozeki et al 1997, Matsushima et al 1996, Walton et al 1990, Krance & sagues 1994, Walton & Sagar 1987, Harker et al 1987, Bazant 1979) ارائه شده است. بسته به سطح اکسیداسیون، آهن ممکن است تا شش برابر افزایش حجم داشته باشد. تولیدات معمول خوردگی مواد زیر هستند که نسبت‌های حجمی زیر را دارند (شکل ۲-۴) :



شکل ۲-۴ نمودار تغییرات حجم فولاد نسبت به محصولات خوردگی مختلف

افزایش حجم واقعی ناشی از خوردگی به سهمی که هر یک از محصولات فوق در تولیدات خوردگی دارند بستگی دارد. تولید هر یک از مواد فوق بستگی به شرایط محیطی اطراف یعنی تمرکز یون کلرید، اکسیژن در دسترس و رطوبت دارد. بنابراین مشخصاً نمی‌توان گفت که افزایش واقعی حجم به چه میزان می‌باشد. در مدلسازی اثرات مکانیکی خوردگی رسم بر این است که چگالی محصولات خوردگی ( $\rho_r$ ) را کسر ثابتی از چگالی فولاد می‌گیرند [۱۲].

$$\rho_r = \rho_s / \gamma \quad 2 < \gamma < 4 \quad (۱-۴)$$

نرخ مصرف آهن بستگی به شدت جریان خوردگی دارد، این فرآیند توسط رابطه فارادی بیان می‌شود:

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{I_{corr} A}{nF} \quad (۲-۴)$$

که در آن

$I_{corr}$ : جریان به آمپر

$dM_s$ : میزان کاهش جرم

$A$ : جرم اتمی آهن به گرم

$n$ : شارش یونی

$F$ : ثابت فارادی به آمپر ثانیه

با توجه به اینکه  $A=55.85$  و  $F=96500$  و  $n=2$  داریم:

$$\frac{dM_s}{dt} = 2.893 * 10^{-4} I_{corr} \quad (۳-۴)$$

با انتگرالگیری از رابطه فوق جرم کل آهن مصرف شده از ابتدای خوردگی تا زمان  $t$  به دست می‌آید. جرم کل زنگ تولید شده نیز با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_r = \frac{M_s}{r_m} \quad (4-4)$$

که در آن  $r_m = 0.523 \approx 0.622$

قانون فارادی پایه و اساس مدلهایی است که با فرض سرعت ثابت مصرف آهن و تولید زنگ ارائه شده‌اند که برای  $I_{corr}$  ثابت، قانون فارادی افزایش خطی جرم محصولات خوردگی در مقابل زمان را به دست می‌دهد.

ساده‌ترین روش، برای تخمین سرعت خوردگی، بررسی میزان دسترسی به اکسیژن در کاتد می‌باشد. در این روش فرض بر این است که تمام اکسیژن نفوذ کرده به سطح آراماتور در کاتد مصرف می‌شود. همچنین فرض می‌شود که محصولات خوردگی  $Fe(OH)_3$  (هیدروکسید فریک) می‌باشد. با این فرضیات رابطه زیر ارائه شده است:

$$r_{corr} = \frac{4}{3} J_o \frac{mFe}{\rho} \quad (Kg.m / (mol.S)) \quad (5-4)$$

که در آن

$r_{corr}$ : سرعت خوردگی (کیلوگرم-متر بر ثانیه)

$J_o$ : میزان شارش اکسیژن (کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه)

$mFe$ : وزن مولکولی آهن (کیلوگرم بر مول)

$\rho Fe$ : چگالی آهن (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشند.

معادله ۴-۵ نشان می‌دهد که سه چهارم مول اکسیژن در تولید یک مول هیدروکسید فریک  $Fe(OH)_3$  مصرف می‌شود. در این رابطه  $J_0$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$J_o = -D_o \frac{\partial C_o}{\partial x} \quad [kg/(m^2.s)] \quad (۴-۶)$$

که در آن:

$D_o$  = ضریب نفوذ اکسیژن ( متر مربع در مجذور ثانیه)

$C_o$  = میزان اکسیژن حل شده در عمق  $x$  می‌باشد.

Bazant در سال ۱۹۷۹ مدلی پیچیده را فرمولبندی کرد که شامل هر دو مرحله شروع و پیشروی خوردگی بود. در این مدل جنبه‌های زیر در نظر گرفته شده بود [۱۴]:

- حرکت ذرات  $CR$  و  $H_2O$  و  $O_2$  از درون پوشش بتن و تولید  $Fe(OH)_2$  در سطح آرماتور بر اساس معادلات جرم

- تولید محصولات خوردگی در سطح آرماتور با استفاده از قانون فارادی

- جریان الکتریکی از درون محلول منفذی با استفاده از رابطه  $\nabla i = 0$

- تولید محصولات خوردگی بر اساس سینتیک واکنشهای انجام شده

Martin – perez بر اساس فرض سرعت ثابت خوردگی و با اصلاح مدل Andrade et al رابطه

زیر را برای محاسبه میزان کاهش حجم و کاهش جرم فولاد در اثر خوردگی ارائه نمود [۱۲]:

$$\Delta V_s = 3.6466 * 10^{-11} \pi D_b i_{corr} \Delta t \quad (۷-۴)$$

$$\Delta M_s = 2.862 * 10^{-7} \pi D_b i_{corr} \Delta t \quad (۸-۴)$$

که در این روابط

$D_b$ : قطر آرماتور به متر

$i_{corr}$ : دانسیته جریان به آمپر بر متر مربع

$t$ : زمان به ثانیه می‌باشد.

همچنین Martin-Perez با استفاده از نتایج Bazant ، تولید زنگ آهن قرمز  $Fe(OH)_3$  در

واحد سطح آند را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$J_r = \frac{dM_r}{dt} = 5.536 * 10^{-7} . i_{corr} \quad (9-4)$$

سپس با استفاده از این رابطه و با فرض نسبت جرم فولاد مصرف شده به جرم زنگ تولید شده

به صورت  $r_m = \frac{\Delta M_s}{\Delta M_r} = 0.523$  روابط ۴-۱۰ و ۴-۱۱ را برای محاسبه میزان کاهش جرم و حجم در

فولاد ارائه نمود:

$$\Delta M_s = 2.895 * 10^{-7} \pi D_b \Delta t . i_{corr} \quad (10-4)$$

$$\Delta V_s = 3.68 * 10^{-11} \pi D_b \Delta t . i_{corr} \quad (11-4)$$

$I_{corr}$  = دانسیته جریان خوردگی به آمپر بر متر مربع

$D_b$ : قطر آرماتور به متر می‌باشد.

می‌توان دید که روابط ارائه شده توسط Martin-Perez تفاوت چندانی با قانون فارادی ندارد.

همچنین Liu & Weyers با فرض سرعت متغیر برای تولید زنگ و بر اساس برآزش درجه دوم نتایج

آزمایشات خود و دیگر نتایج موجود رابطه زیر را ارائه نمودند [۱۶]:

$$J_r = \frac{dM_r}{dt} = \frac{\beta}{M_r} \rightarrow \int M_r dr = \beta \int dt \quad (12-4)$$

$$\Rightarrow M_r = (2\beta t)^{\frac{1}{2}} \quad (13-4)$$

که در آن  $\beta$  از رابطه ۱۲-۴ محاسبه می‌شود:

$$\beta = 3.328 * 10^{-10} . \pi . D_b . i_{corr} \quad (14-4)$$

### ۳-۴- مدل‌های تخمین آسیب‌های ناشی از خوردگی

مهمترین خسارات ناشی از خوردگی به سازه عبارتند از:

- کاهش سطح مقطع آرماتور

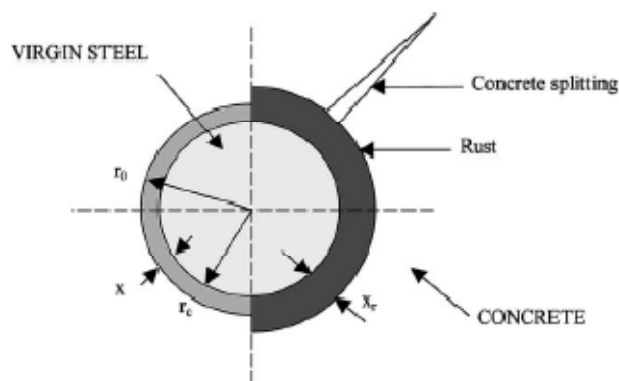
- کاهش شکل پذیری فولاد

- ترک خوردن و پوکیدن پوشش بتنی

- کاهش مقاومت پیوستگی

اگر چه بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی شروع خوردگی و نفوذ یون کلرید به داخل بتن می‌باشد لیکن در چند سال اخیر توجه محققین به سمت تحلیلی خرابی بتن آرمه در اثر پیشرفت خوردگی معطوف شده است. لذا در این زمینه محققینی سعی نمودند که برای ترک خوردگی و مقاومت پیوستگی در سازه‌ها روابطی ارائه کنند که از جمله می‌توان به (Coronelli et al 2002, Pantazopoulou & Papiula 2001, Liu & Weyers 1998, Andrade & Alonso 1996a, b, Rodriguez et al 1994) اشاره نمود.

همانگونه که گفته شد فرآیند آسیب دیدن بتن در اثر خوردگی در کاهش عمر مفید سازه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است و برای تخمین عمر مفید این سازه‌ها بایستی این فرآیند شناخته شود. Anderade et al با استفاده از نتایج آزمایشاتی که برای به دست آوردن میزان خوردگی لازم برای ایجاد ترک در پوشش انجام دادند رابطه‌ای بین سرعت خوردگی و میزان کاهش مقطع آرماتور ارائه نمودند که این رابطه به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۴-۳: مدل ارائه شده توسط Andrate et al [۱۶]

$$d' = d - .023.i_{corr}(t - t_i) \quad (mm) \quad (۱۵-۴)$$

که در آن:

$d'$  = قطر آرماتور در زمان  $t$  به میلیمتر

$d$ : قطر اولیه آرماتور به میلیمتر

$i_{corr}$ : سرعت خوردگی به میکرو آمپر بر سانتیمتر مربع

$t-t_i$ : زمان سپری شده از آغاز خوردگی به سال

در رابطه ۱۵-۴  $i_{corr}$  ثابت فرض شده است یعنی فرض بر این است که سرعت خوردگی با توجه

به شرایط محیطی و دما و درصد رطوبت ثابت می‌ماند.

محققین زیادی به تلاش در ارائه رابطه ریاضی بین سرعت خوردگی و خرابی در سازه‌ها پرداختند که در محاسبه عمر باقی مانده سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرد چرا که در سازه‌های موجود با دقت خوبی می‌توان در محل، سرعت خوردگی را اندازه گرفت. همچنین رابطه Andrade et al بایستی برای طراحی سازه‌های جدید بر اساس خصوصیات مصالح و شرایط محیطی توسعه داده می‌شد. با این دیدگاه Andrade and Alonso مدت زمان مرحله پیشروی خوردگی مدل Tutti را با استفاده از رابطه ۴-۱۵ مشخص کردند، همچنین میزان ریسک خوردگی را به چهار سطح تقسیم نمودند که با توجه به سرعت خوردگی به صورت زیر بیان شده است.

|       |                                 |
|-------|---------------------------------|
| ناچیز | $i_{corr} < 0.1 \mu A / cm^2$ - |
|-------|---------------------------------|

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| پایین | $0.1 < i_{corr} < 0.5 \mu A / cm^2$ - |
|-------|---------------------------------------|

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| متوسط | $0.5 < i_{corr} < 1.0 \mu A / cm^2$ - |
|-------|---------------------------------------|

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| بالا | $i_{corr} > 1.0 \mu A / cm^2$ - |
|------|---------------------------------|

بر پایه فرمولاسیون بسیار پیچیده‌ای که Bazant برای فرآیند خوردگی انجام داد رابطه تئوریکی زیر را برای به دست آوردن زمان ترک خوردن پوشش ارائه داد [۱۴]:

$$t_{cr} = \rho_{corr} \frac{d\Delta d}{sJ_r} \quad (۴-۱۶)$$

که در آن:

$t_{cr}$ : زمان ترک خوردن بتن به ثانیه

$\rho$ : تابع چگالی فولاد و زنگ آهن به کیلوگرم بر متر مکعب



d: قطر آرماتور به متر

S: فاصله بین آرماتورها به متر

Jr: سرعت تولید زنگ آهن به کیلوگرم بر متر مربع - ثانیه می باشند.

در این رابطه Jr ثابت فرض شده است.

Bazant با فرض رفتار الاستیک و ایزوتروپ برای بتن و اعمال فشار یکنواخت به اطراف آرماتور،

افزایش حجم محصولات خوردگی را شبیه سازی نمود.

Rodrigues et al با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه‌ای ارائه نمودند که میزان خوردگی لازم

برای پدیدار شدن اولین ترک را بر اساس پارامترهای نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور و مقاومت

کششی بتن بیان می کرد [۱۵]:

$$x_0 = 83.8 + 7.4 \frac{c}{d} - 22.6 f_t^r \quad (۱۷-۴)$$

که در آن:

$X_0$ : کاهش شعاع آرماتور به میکرومتر

C/d: نسبت پوشش به قطر آرماتور

$f_t^r$ : مقاومت کششی بتن به مگاپاسکال می باشند.

#### ۴-۳-۱- مدل ارائه شده توسط Bhargava et al, 2006

Bhargava et al با انجام آزمایشات گسترده‌ای بر روی نمونه‌های دال بتن آرمه که در شرایط

خورنده شدید محیطی قرار گرفته بودند و مطالعه زمان ترک خوردن این نمونه‌ها مدلی برای محاسبه

زمان ترک خوردن سازه‌ها ارائه دادند. در مدل پیشنهادی این محققین ترک خوردن پوشش از سه گام تشکیل شده است. گام اول انبساط آزاد محصولات خوردگی می‌باشد که در این مرحله افزایش کل محصولات خوردگی تنها فضای خالی موجود در بتن و آرماتور را پر نموده و تنش ایجاد نمی‌کند. گام دوم مدل، مرحله ایجاد تنش می‌باشد که در این مرحله کل محصولات خوردگی ( $W_T$ ) از مقدار مورد نیاز برای پر نمودن فضای خالی اطراف آرماتور ( $W_p$ ) تجاوز نموده و باعث انبساط بتن پوشش و در بتن پوشش تولید تنش می‌نماید. در گام سوم جرم که محصولات خوردگی ( $W_T$ ) به حد بحرانی ( $W_{crit}$ ) رسیده و بتن پوشش ترک می‌خورد [۱۳].

بنابراین در این مدل پارامترهای  $W_T$  و  $W_p$  بایستی محاسبه شوند. محاسبه حجم حفرات آرماتور و جرم محصولات خوردگی بحرانی فوق‌العاده پیچیده می‌باشد و این محققین تنها روابطی برای تخمین این مقادیر به صورت زیر پیشنهاد نمودند:

$$W_p = \pi \rho_{rust} d_0 D \quad (۱۸-۴)$$

که در آن:

$\rho_{rust}$ : چگالی محصولات خوردگی به پوند بر فوت مکعب

$d_0$ : ضخامت فضای خالی اطراف آرماتور به اینچ

$D$ : قطر آرماتور به اینچ می‌باشد.

همچنین رابطه پیشنهادی برای جرم بحرانی محصولات خوردگی به صورت زیر می‌باشد:

$$W_{crit} = \rho_{rust} \left( \pi (d_s + d_0) D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right) \quad (۱۹-۴)$$

که در آن

$\rho_{st}$ : چگالی فولاد به پوند بر فوت مکعب

$D_s$ : ضخامت محصولات خوردگی که باعث تولید تنش‌های کششی بحرانی می‌شود.

$W_{st}$ : جرم فولاد خورده شده می‌باشد.

برای محاسبه جرم بحرانی محصولات خوردگی بایستی میزان خوردگی که باعث ایجاد تنش

کششی بحرانی در بتن می‌شود، محاسبه گردد. لذا برای محاسبه  $d_s$  روابطی به صورت زیر ارائه شد:

$$d_s = \frac{Cf'_t}{E_{eff}} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + v_c \right) \quad (۲۰-۴)$$

که در آن

$C$ : ضخامت پوشش به اینچ

$V_c$ : ضریب پواسون

$f'_t$ : مقاومت کششی بتن به پوند بر اینچ مربع می‌باشد.

و پارامترهای  $E_{eff}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{eff} = \frac{E_c}{(1 + \phi_{cr})} \quad (۲۱-۴)$$

که در آن

$E_{eff}$  = مدول الاستیسیته موثر بتن به پوند بر اینچ مربع

$\phi_{cr}$ : ضریب خزش بتن

$E_c$ : مدول الاستیسیته بتن می‌باشد.

همچنین a و b از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a = \frac{(D + 2d_0)}{2} \quad (22-4)$$

$$b = C + \frac{(D + 2d_0)}{2} \quad (23-4)$$

بنابراین رابطه نهایی برای محاسبه جرم بحرانی محصولات خوردگی به صورت زیر ارائه شده است:

$$W_{crit} = \rho_{rust} \left( \pi \left[ \frac{Cf_t}{E_{eff}} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + v_c \right) + d_0 \right] D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right) \quad (24-4)$$

پس از محاسبه جرم بحرانی محصولات خوردگی در این مدل زمان ترک خوردگی پوشش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{cr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p} \quad (25-4)$$

که در آن  $k_p$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

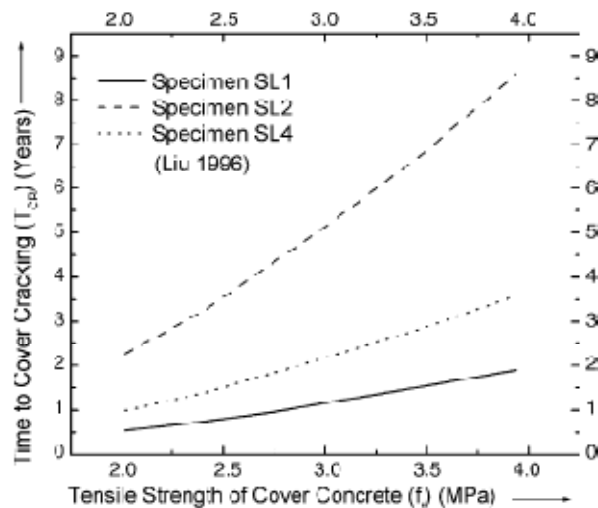
$$k_p = 2.59 * 10^{-6} \left( \frac{1}{a} \right) \pi D i_{corr} \quad (26-4)$$

که در آن

D: قطر آرماتور به اینچ

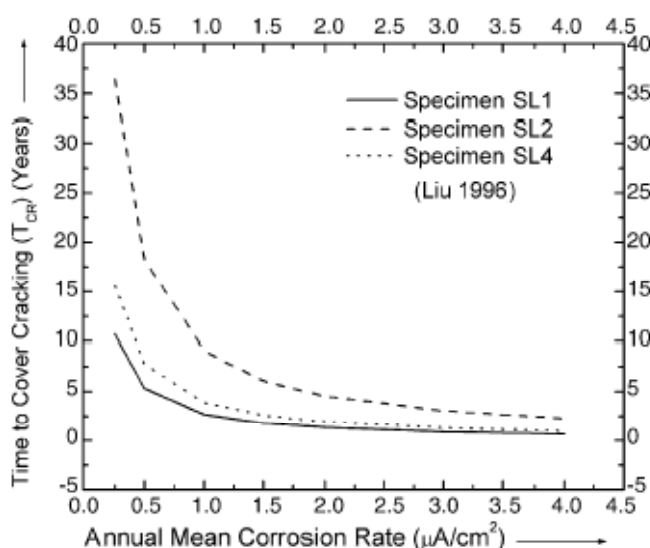
$i_{corr}$ : متوسط سالیانه سرعت خوردگی به میلی آمپر بر فوت مربع بوده

و  $\alpha$  بین ۵۲۳/۰ و ۶۲۲/۰ انتخاب می‌گردد. مدت زمان ترک خوردگی به دست آمده از این مدل برای بتن‌های با مقاومت کششی مختلف و با فرض مقادیر مختلف  $\alpha$  در شکل ۴-۴ آمده است:



شکل ۴-۴ تأثیر مقاومت کششی و نوع محصولات خوردگی در زمان ترک خوردن [۱۳]

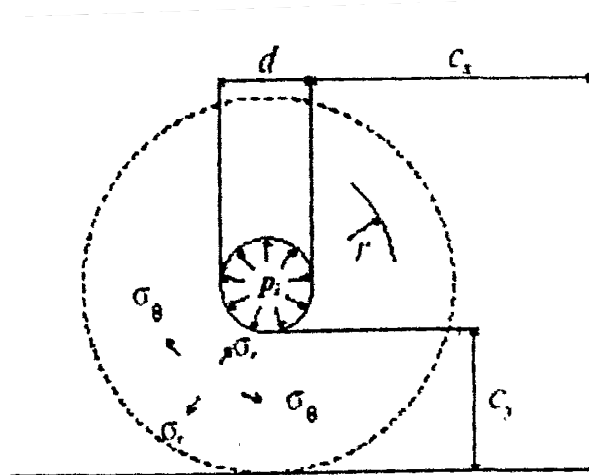
همانگونه که در شکل ۴-۴ مشخص است. در این مدل زمان ترک خوردن پوشش رابطه خطی با مقاومت کششی بتن داشته و با افزایش مقاومت کششی بتن زمان ترک خوردن افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که مدت زمان ترک خوردن به نوع محصولات خوردگی نیز وابسته می‌باشد. تاثیر سرعت خوردگی و ضخامت پوشش بر مدت زمان ترک خوردگی محاسبه شده توسط مدل در شکل ۴-۵ آمده است:



شکل ۴-۵ تأثیر سرعت خوردگی و ضخامت پوشش بر زمان ترک خوردن [۱۳]

#### ۴-۳-۲ مدل ارائه شده توسط Pantazopoulou 2001

این محقق با فرمول بندی یک مدل تحلیلی، زمان ترک خوردن پوشش بتن را در اثر تولید محصولات خوردگی در اطراف آرماتور به دست آورد. این مدل برای پیش بینی میزان گسترش ترک در پوشش و تخمین زمان پوکیدن پوش مناسب بوده و نتایج منطقی به دست می‌دهد. در این مدل با شبیه سازی بتن پوشش به صورت استوانه جدار ضخیم و فرض رفتار ارتوتروپ برای بتن و همچنین استفاده از مدل ترک نواری پخش شده برای فرآیند گسترش ترک در بتن زمان ترک خوردن پوشش محاسبه می‌شود. ضخامت جداره این استوانه همانگونه که در شکل ۴-۶ مشاهده می‌گردد برابر با کمترین پوشش روی آرماتور در دو جهت x,y انتخاب شده است.



شکل ۴-۶ نحوه انتخاب ضخامت جداره استوانه در مدل [۱۸]

در این مدل حالت کرنش مسطح برای تشکیل معادلات تعادل و شرایط سازگاری در نظر گرفته شده است ولی از تنش طولی موجود در بتن صرف نظر شده است.

#### ۴-۳-۲-۱- فرمول بندی تولید محصولات خوردگی:

در فرمول بندی تولید محصولات خوردگی و نتیجتاً فشار ایجاد شده در اثر تجمع این محصولات در اطراف آرماتور از دو مدل ارائه شده توسط Martin-Perez , Liu & Weyers 1998 استفاده شده است.

در مدل panatazopoulou برای در نظر گرفتن اثر متغیر بودن سرعت تولید محصولات خوردگی از رابطه Liu & Weyers که به صورت زیر می باشد استفاده شده است:

$$\Delta M_r (6.656 * 10^{-10} \pi D_b \Delta t)^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۲۹)$$

در مدل pantazopoulou با استفاده از هر دو مدل فوق تولید محصولات خوردگی را محاسبه نموده و نتایج با یکدیگر مقایسه می شود.

#### ۴-۳-۲- نحوه محاسبه ضخامت محصولات خوردگی جمع شده در اطراف آرماتور:

در این مدل از دو روش برای محاسبه تجمع محصولات خوردگی در اطراف آرماتور استفاده شده است. در روش اول فرض بر این است که همه محصولات خوردگی در اطراف آرماتور جمع می‌شوند و لذا ضخامت زنگ آهن در اطراف آرماتور از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$t_r = \sqrt{\left(R_{rb}^2 + \frac{\nabla V_r}{\pi}\right)} - R_{rb} \quad (۴-۳۰)$$

که در آن:

$$R_{rb} = \sqrt{\left(R_{rb}^2 + \frac{\Delta V_s}{\pi}\right)}^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۳۱-الف)$$

$$R_r = R_{rb} + t_r \quad (۴-۳۱-ب)$$

$R_{rb}$ : قطر کاهش یافته آرماتور (متر) می‌باشد.

در روش دوم نفوذ محصولات خوردگی به داخل ترکها نیز در نظر گرفته شده است و رابطه زیر ارائه شده است:

$$t_r = \frac{\left(\frac{\Delta V_r}{\pi}\right) - (R_{rb} - R_b)(R_c - R_{rb})}{(R_c + R_b)} \quad (۴-۳۲)$$

که در آن:

$R_c$ : میزان گسترش ترک (از مرکز آرماتور تا نوک ترک (متر))



$R_b$ : قطر آرماتور (متر)

$t_f$ : ضخامت زنگ آهن جمع شده در اطراف آرماتور (متر) می‌باشند.

#### ۴-۳-۲-۳- روش شبیه سازی فشار ناشی از افزایش حجم محصولات خوردگی:

در این مدل با اعمال یک تغییر مکان به مرز داخلی استوانه جدار ضخیم و وارد کردن این تغییر مکان در شرایط مرزی حل مسئله، فشار ناشی افزایش حجم محصولات خوردگی شبیه سازی شده است. با اعمال این تغییر مکان، در جهت‌های حلقوی شعاعی به ترتیب تنشهای  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_r$  ایجاد می‌شوند که به علت تقارن مرکزی مسئله این تنشها تنشهای اصلی می‌باشند. همچنین  $\sigma_r$  فشاری بوده و  $\sigma_\theta$  کششی می‌باشد.

#### ۴-۳-۲-۴- مدلسازی رفتار مصالح:

همانگونه که قبلاً ذکر شد در این مدل رفتار بتن ارتوتروپ در نظر گرفته شده است و این فرض به این دلیل است که بتن در کشش و فشار رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. خصوصاً زمانی که بتن در کشش ترک می‌خورد، میزان بازشدگی ترک در رفتار تنش - کرنش بتن پارامتر موثری است و در میزان تنش کششی قابل انتقال توسط بتن تاثیر می‌گذارد.

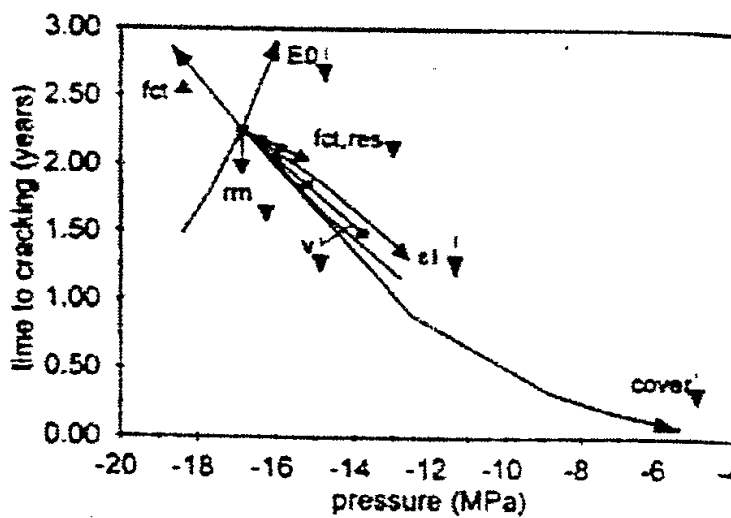
روش مدلسازی رفتار مصالح در این مدل به این صورت می‌باشد که منحنی تنش - کرنش در فشار به صورت الاستیک غیر خطی سهموی فرض شده و مدول الاستیسیته اولیه برای بتن در فشار برابر  $E_o = \frac{2f_c}{\epsilon_o}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳-۲-۵- کارآیی مدل

برای بررسی کارآیی مدل و کنترل نتایج به دست آمده، نتایج مدل با نتایج آزمایشات Liu & Weyers 1998 کنترل شده است. همانگونه که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود زمان ترک خوردن

پوشش برای نمونه با مقاومت مشخصه ۳۱ مگاپاسکال و ضخامت پوشش ۷۶ میلیمتر و قطر آرماتور ۱۶ میلیمتر که تحت خوردگی با دانسیته جریان ۰/۰۱۸ آمپر بر متر مربع قرار گرفته، با فرض عدم نفوذ محصولات خوردگی به درون ترکها، ۳/۵ سال به دست می‌آید.

نتایج مدل در حالات مختلف در شکل ۷-۴ مشاهده می‌گردد.



شکل ۷-۴ حساسیت مدلبه پارامترهای مختلف هندسی و مصالح [۱۸]

#### ۴-۳-۳- مدل مقاومت پیوستگی coronelli 2002

coronelli با ارائه مدلی برای مقاومت پیوستگی، میزان کاهش مقاومت پیوستگی را با توجه به میزان خوردگی محاسبه نمود.

در این مدل نیز مانند آزمایشات بیرون کشیدن آرماتور که ابتدا خوردگی اعمال شده و سپس آرماتور تحت کشش قرار می‌گیرد، ابتدا انبساط محصولات خوردگی و شکل گیری ترکها مدلسازی شده و سپس نیروی کششی اعمال می‌شود.

در آرماتورهای آجدار شکست پیوستگی ممکن است با پوکیدن پوشش و یا شکست برشی و قفل و بست بتن و آجهای آرماتور همراه باشد. البته در سازه‌های در معرض خوردگی ممکن است قبلاً

پوشش به علت فشار ناشی از افزایش حجم محصولات خوردگی متلاشی شده باشد که در این صورت کل یا بخشی از مقاومت پیوستگی ناشی از اثر محدود کنندگی بتن از بین می‌رود [۱۹].

#### ۴-۳-۱- محاسبه ضخامت محصولات خوردگی

در این مدل با استفاده از رابطه ارائه شده توسط Molina et al و با در نظر گرفتن نفوذ محصولات خوردگی به درون ترکها، ضخامت محصولات خوردگی و عرض ترک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{cr} = \sum W_2^{corr} = 2\pi(v_{rs} - 1)X \quad (4-40)$$

$$t = \frac{Xr_b}{(r_b + C)} \quad (4-41)$$

که در آن:

$V_{rs}$ : نسبت حجمی محصولات خوردگی به فولاد = ۲

$X$ : عمق خوردگی

$r_b$ : شعاع آرماتور

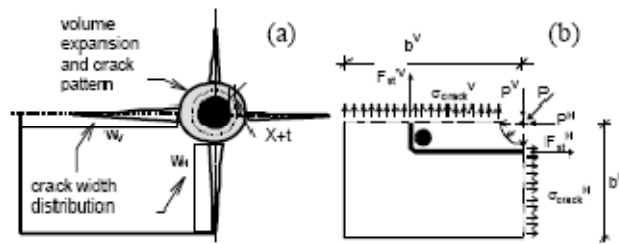
$C$ : ضخامت پوشش

$t$ : افزایش ضخامت آرماتور (انبساط آرماتور)



$$\sigma_{crack}^{(w)} = f_{ct} \frac{1 - \frac{W}{W_c}}{1 + \frac{KW}{d_a}} \quad (44-4)$$

$$\sigma_{st}^{(W)}(w) = E_s \sqrt{\frac{a_2}{d_{st}^2} \left(\frac{W}{a}\right)^2 + \frac{a_1}{a_{st}} \left(\frac{W}{a}\right) + a_0} \quad (45-4)$$



شکل ۴-۹ الگوی ترک و نیروهای موجود در پوشش و خاموت [۱۹]

با فرض ایجاد دو ترک در پوشش و همچنین فرض اعمال فشار محصولات خوردگی با زاویه

۴۵° روابط فوق به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$P^H = \sigma_{st}^H(W^H)A_{st} + \sigma_{crack}^H(W^H)\Delta Z(b^H - r_b) \quad (46-4)$$

$$P^V = \sigma_{st}^V(W^V)A_{st} + \sigma_{crack}^V(W^V)\Delta Z(b^V - r_b) \quad (47-4)$$

$$2W^H + 2W^V = 2\pi \quad (48-3)$$

$$P^H = P^V \quad (49-4)$$

از حل گام به گام از معادلات  $W^H, W^V, P^V, P^H$  برای هر عمق خوردگی  $X$  به دست خواهد

آمد.

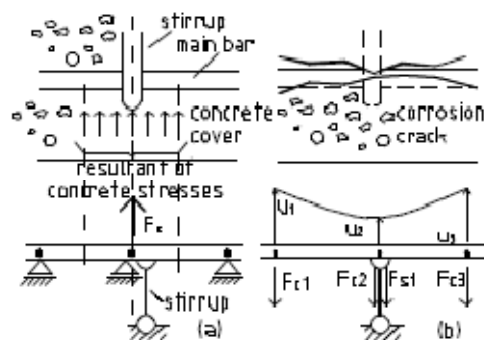
در حالتی که فاصله خاموتها زیاد می‌باشد بازشدگی ترک در بین دو خاموت متوالی ثابت نبوده

و لذا توزیع تنش در ترک نیز یکنواخت نمی‌باشد. در این حالت برای به دست آوردن فشار ایجاد شده

در اثر محصور شدگی آرماتور، پوشش به صورت یک تیر روی بستر الاستیک غیر چسبنده مدل می‌شود که تحت تاثیر یک فشار یکنواخت قرار گرفته است.

مقطع این تیر برابر ضخامت پوشش در دو جهت عمود بر هم و طول تیر برابر فاصله خاموتها در نظر گرفته می‌شود. بستر تیر از دو که شامل فنرهایی که جانشین خاموتها می‌باشند و فنرهایی که نشان دهنده اثر چسبندگی ترک می‌باشند تشکیل شده است.

با فرض چند گره در طول تیر فرضی و اعمال نیروهای وارد بر تیر و محاسبه نیرو در خاموتها با استفاده از رابطه ۴-۴۴ و میزان نیرو در ترک با استفاده از رابطه ۴-۴۵، میزان فشار تولید شده در اطراف آرماتور به دست خواهد آمد.

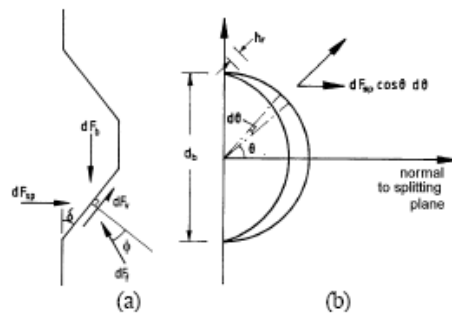


شکل ۴-۱۰ مدل تیر برای پوشش [۱۹]

#### ۴-۳-۳-۳- مدل مهار آرماتور خورده شده و ظرفیت پیوستگی

در مدل Coronelli برای بیان مکانیزم مهار آرماتور خورده شده در بتن از مدل اصلاح شده

Cairns & Abdullah 1996 استفاده شده است.



شکل ۴-۱۱ مشخصات هندسی آجها و مساحت آنها [۱۹]

رابطه ارائه شده برای تنش پیوستگی در آرماتور خورده نشده به صورت زیر می‌باشد:

$$T_{bu} = KP_b^{\max} + \tau_b^o \quad (۵۰-۴)$$

که در آن:

$$\tau_b^o = \frac{nA_r f_{coh} [\cot \delta + \tan(\phi + \delta)]}{(\pi d_b S_r)} \quad (۵۱-۴)$$

$$K = \frac{nA_r \tan(\phi + \delta)}{(\pi I_r)} \quad (۵۲-۴)$$

$$(۵۳-۴)$$

$$A_r = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} h_r(\theta) r_b d\theta$$

$$I = \int h_r(\theta) \cos \theta r_b d\theta \quad (۵۴-۴)$$

که در آن:

$d_b$ : قطر آرماتور

$S_r$ : فاصله آجهای آرماتور

$A_r$ : مساحت زائده آج آرماتور در صفحه عمود بر امتداد آرماتور

$I_r$ : مساحت زائده آج آرماتور در صفحه پکیدی

$\delta$ : جهت آجها

$\Phi$ : ضریب اصطکاک بین و فولاد و بتن

$N$ : تعداد زائده‌های هر آج می‌باشند.

بنابراین مقاومت پیوستگی تابعی از جهت آجها و سطح آنها و همچنین اصطکاک و خواص چسبندگی سطوح بتن و آرماتور می‌باشد.

برای تطبیق این مدل برای آرماتورهای خورده شده بایستی با اصلاح ضرایب اصطکاک و چسبندگی و همچنین تغییر ابعاد آجها مدل اصلاح شود. بنابراین رابطه تنش پیوستگی برای آرماتور خورده شده به صورت زیر می‌باشد.

$$\tau_b^{\max} = K(X)P_B^{\max}(X) + \tau_b^0(X) + \phi(X)P_{corr}(X) \quad (۵۳-۴)$$

که در آن

$P_{\max}(X)$ : فشار حداکثر در شکست مهاری

$\tau_h^0$ : توزیع مقاومت پیوستگی (تنش پیوستگی)

$P_{corr}(X)$ : فشار ایجاد شده در اثر خوردگی

با توجه به نتایج دیگر محققین و اصلاحات ارائه شده در CEB 1998 در حالت آرماتور خورده

شده ضریب اصطکاک و مقاومت پیوستگی از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\mu = \tan \phi = 0.3 - 0.2(X - X_{cr}) \quad (۵۵-۴)$$



$$f_{coh} = 2 - 10(X - X_{cr}) \quad (۵۶-۴)$$

که در آن:

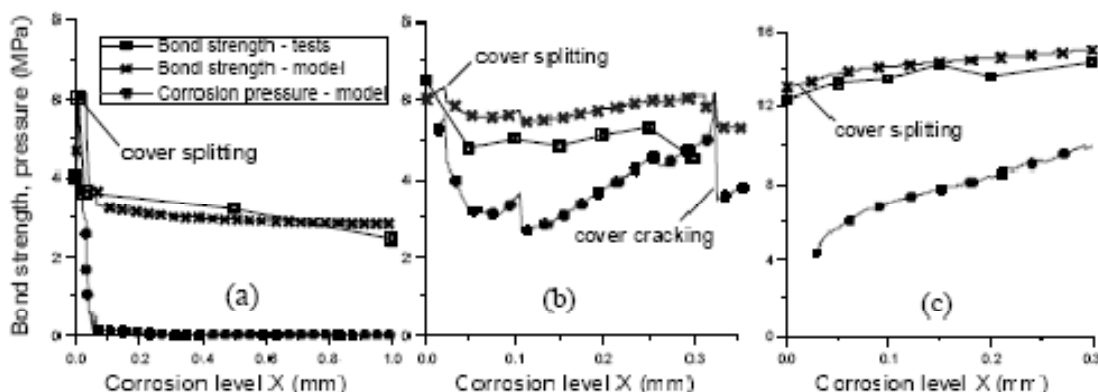
$X_{cr}$ : عمق خوردگی مربوط به ترک خوردن پوشش است.

افزایش ضریب اصطکاک در مراحل اولیه خوردگی در این مدل در نظر گرفته نشده است. همچنین تغییر در مشخصات هندسی آجهای آرماتور با تغییر در پارامترهای  $A_r$  و  $I_r$  و  $\delta$  مدل می‌شود. به طوریکه نسبت  $A_r$  به  $I_r$  ثابت و برابر با  $0/8$  در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع آجهای آرماتور در اثر خوردگی کاهش می‌یابد و همچنین حدود  $5\%$  کاهش در تانژانت  $(\delta + \Phi)$  برای هر  $100 \mu m$  خوردگی در نظر گرفته می‌شود:

$$\tan(\delta + \phi) = 1.57 - 0.785X \quad (۵۷-۴)$$

با استفاده از این مدل، نتایج به دست آمده است که با ملاحظه شکل ۴-۱۲ میزان کارایی

مدل و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی : الف- نمونه بدون آرماتور عرضی. ب- نمونه با آرماتور عرضی (خاموت). ج- نمونه با آرماتور عرضی و محصور کننده اضافی. [۱۹]

همانگونه که از شکل ۴-۱۲ مشخص است در این مدل افزایش اولیه در مقاومت پیوستگی که در نتایج آزمایشات گزارش شده در نظر گرفته نشده است ولی با این وجود نتایج به دست آمده از مدل تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشات نشان می‌دهد.

#### ۴-۴- نتیجه‌گیری

در این فصل تعداد قابل توجهی مدل ریاضی و تحلیلی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. این مدل‌ها با هدف مشخص نمودن مکانیزم خرابی‌های خوردگی و چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان خرابی‌ها برای تخمین عمر مفید سازه‌های در معرض خوردگی ارائه شده‌اند. همچنین این مدل‌ها بایستی قادر باشند در فرمول‌های طراحی آئین نامه‌ها و ضوابط آئین نامه‌ای وارد شده و در طراحی سازه‌ها بر اساس دوام مورد استفاده قرار گیرند.

از مطالعه مدل‌های مختلف مشخص می‌شود که هر کدام از این مدل‌ها جنبه‌های مختلفی از خوردگی را در نظر گرفته و جنبه‌های دیگری را نیز در نظر نگرفته‌اند و لذا نتایج به دست آمده از آنها اکثراً برای آزمایشاتی که توسط ارائه دهندگان این مدل‌ها انجام شده قابل اعتماد می‌باشد. بنابراین بایستی از جمع بندی نتایج این مدل‌ها و مقایسه آنها و در نهایت با ارائه مدلی جامع و قابل اعتماد راه را برای تکمیل آئین نامه‌ها در طراحی بر اساس دوام آسان نمود.

همچنانکه از نتایج آزمایشات و مدل‌های ارائه شده مشاهده می‌گردد پارامترهایی نظیر نسبت ضخامت پوشش به قطر آرماتور، نفوذ پذیری بتن، سرعت خوردگی و محصور شدگی بتن در طولانی شدن عمر مفید این سازه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردارند. لذا در آئین نامه‌های طراحی بایستی ضوابط حداقل و حداکثر برای این پارامترها ارائه شود تا بتوان با انتخاب این پارامترها در طراحی سازه به عمر مفید مورد نظر دست یافت.

## فصل پنجم:

تحلیل ترک ناشی از خوردگی توسط

ANSYS

## فصل پنجم: تحلیل ترک ناشی از خوردگی توسط ANSYS

### ۵-۱- مقدمه

روش اجزاء محدود، روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، خطی یا غیر خطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال به کار برد. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه ۱۹۰۰ میلادی بر می‌گردد، عملاً در دهه ۶۰ میلادی به صورت نظام یافته، مدون و وارد مباحث مهندسی به خصوص مهندسی مکانیک و عمران شد و در دهه پایانی هزاره دوم به طور شگفت‌آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود.

بدون شک روش اجزاء محدود، انقلابی در صنعت جهان و نحوه نگرش به تحلیل و طراحی به وجود آورد. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیر ممکن می‌نمود، قابلیت مدل سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کمترین ساده‌سازی‌ها، توانمندی روش در ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه‌های سنگین تست‌های عملی در فرآیندهای طراحی، سرعت بالای روش در حل مسائل و بالاخره افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی در طراحی باعث گردید تا این روش به عنوان جزء لاینفک پیشرفت صنعتی درآید. نرم‌افزارهای تجاری اجزاء محدود با هدف پاسخ به نیازمندی‌های علمی و صنعتی، طراحی و به بازار ارائه گردیدند. تعداد و تنوع این نرم‌افزارها امروزه به حدی رسیده که کاربر نمی‌تواند به راحتی یکی را انتخاب کند. گرچه قابلیت‌ها و توانمندی‌های این نرم‌افزارها متفاوت است، اما در بسیاری از تحلیل‌ها مشابه و یکسان می‌باشند.

نرم افزارهای مورد استفاده برای تحلیل ترک دو دسته اند. دسته نخست نرم افزارهای تخصصی تحلیل ترک و دسته دوم نرم افزارهای اجزاء محدود هستند که قابلیت مدل سازی ترک نیز در آنها

وجود دارد. نرم افزارهای FRANC2D/L, MERLIN, CRACKER در دسته نخست و نرم افزارهایی نظیر ABAQUS, ADINA, ANSYS و NASTRAN در دسته دوم جای دارند.

نرم افزار ANSYS که توسط جمعی دانشگاهی در شرکت Swanson به عنوان یکی از پیشگامان نرم افزارهای اجزاء محدود طراحی شد، اولین بار در سال ۱۹۷۱ در اختیار عموم قرار گرفت و با قدمتی حدود ۳۳ سال تکامل قابل توجهی یافت. این نرم افزار با بیش از یک صد هزار خط کد کامپیوتر به زبان APDL، قابلیت تحلیل مسائل مختلف در زمینه‌هایی مانند هوافضا، خودرو، هسته‌ای، نیروگاهی و الکترونیک را دارا می‌باشد.

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است [۲۲]:

۱- روش تحلیلی دقیق (Exact solution)

۲- روش عددی (Numerical solution)

۳- روش تجربی (Experimental Method)

در حل دقیق همان‌طور که از نام آن مشخص است، به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان حرارتی، میدان تنش، میدان الکتریکی و ... می‌پردازند. در حالی که در روش دوم به حل تقریبی و عددی این مسائل پرداخته می‌شود. روش تجربی یا آزمایشگاهی نیز با توجه به اینکه مبتنی و برگرفته از خود واقعیت می‌باشد، روشی مناسب محسوب می‌گردد. در این میان روش حل عددی که اجزاء محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، جزء یکی از پرکاربردترین روش‌ها، در حل مسائل مهندسی است. در روش اجزاء محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و یا به کمک کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. روش کار بدین صورت است که کل مدل هندسی به اجزاء ریزتری به نام المان، تقسیم می‌شود. هر المان خود دارای گره‌هایی است که مقادیر ورودی (بارگذاری و شرایط مرزی) و خروجی (نتایج) به آنها

اختصاص داده می‌شود [۲۲]. به طور کلی می‌توان گفت حل عددی اجزای محدود بر ارکان زیر استوار است [۲۳]:

۱- گسسته‌سازی و تفکیک یک عضو یا کل سازه به اجزای کوچکتر

۲- بدست آوردن معادلات حاکم بر یک جزء

۳- بدست آوردن معادلات کلی سیستم و سرهم‌سازی

۴- اعمال شرایط مرزی و قیود تکیه‌گاهی

۵- حل دستگاه معادلات سیستم و به‌دست آوردن متغیر مجهول

۶- پس‌پردازش و به دست آوردن سایر مجهولات

استفاده از آنالیز المان محدود برای تأیید نتایج آزمایشگاهی و نیز تکمیل و ارزیابی نتایج به دست آمده مربوط به ترک خوردگی تیرهای بتن‌آرمه، به دلیل رفتار پیچیده بتن امری بسیار مشکل می‌باشد. از جمله کارهای صورت گرفته می‌توان به مدل اجزاء محدود Clark et al در سال ۲۰۰۶ اشاره نمود [۲۱].

## ۵-۲- مکانیک شکست بتن

اولین مطالعه جدی روی ترک های بتن و شکست ناشی از آنها در سال ۱۹۲۸ توسط ریچارد<sup>۱</sup>، براندزاگ<sup>۲</sup> و بروان<sup>۳</sup> انجام شد. کاپلن<sup>۴</sup> تلاش نمود که از اصول مکانیک شکست خطی در بتن استفاده

---

<sup>۱</sup> Richardt

<sup>۲</sup> Brandzaeg

<sup>۳</sup> Brown

<sup>۴</sup> Caplan

نماید. تحقیقات تعدادی از محققین مانند شاه<sup>۱</sup> و مک گری<sup>۲</sup> نشان داد که استفاده از مکانیک شکست خطی در بتن منجر به نتایج نادرستی می‌شود. والش<sup>۳</sup> با انجام آزمایش روی تیرهای شکافدار با هندسه مشابه و اندازه‌های متفاوت نمودار مقاومت اسمی در مقابل اندازه این تیرها را رسم نمود. این نمودارها با استفاده از مکانیک شکست خطی توجیه نمی‌شدند و بدین ترتیب آزمایشات وی تأکیدی بر نظریه عدم امکان استفاده از مکانیک شکست خطی در بتن بود. اولین مدل مکانیک شکست غیر خطی بتن مدل ترک مجازی هیلربورگ<sup>۴</sup> است که براساس مدل ترک چسبنده<sup>۵</sup> می‌باشد. از این مدل بعنوان مدل اصلی شکست بتن در صنعت و نرم‌افزارهای تجاری مانند DIANA، SBETA و ATANA استفاده می‌شود. برای مدل کردن رفتار غیر خطی بتن از روش دیگری بنام ترک الاستیک موثر<sup>۶</sup> استفاده می‌شود یکی از مدل‌های مهم بر مبنای این روش مدل ترک دو پارامتری جنک و شاه می‌باشد. این مدل بر مبنای اصول مکانیک شکست خطی است. مدل دیگر ترک الاستیک موثر که امروزه بسیار استفاده می‌شود مدل اثر اندازه بازانت و کاظمی<sup>۷</sup> باشد. [۲۴]

## ۵-۲-۱- مدل ترک چسبنده

برای شبیه‌سازی پاسخ غیر الاستیک مصالح موجود در منطقه صدمه دیده نوک ترک می‌توان از یک توزیع تنش چسبنده که مایل به بستن سطوح ترک در طول این ناحیه می‌باشد استفاده نمود.

تنش چسبنده  $\sigma(w)$  تابعی از میزان بازشدگی ترک چسبنده  $w$  می‌باشد. در نوک ترک چسبنده یا بعبارتی در انتهای ناحیه صدمه دیده ( $w_t = 0$ ) این تنش چسبنده برابر با حداکثر مقدار

<sup>۱</sup> Shah

<sup>۲</sup> Mc Garry

<sup>۳</sup> Walsh

<sup>۴</sup> Hillerborg

<sup>۵</sup> Cohesive Crack Model

<sup>۶</sup> Effective Elastic Crack

<sup>۷</sup> Kazemi

خود یعنی مقاومت کششی مواد  $f_t'$  می‌باشد. با افزایش بازشدگی ترک چسبنده، تنش کاهش می‌یابد و در بازشدگی بحرانی  $w_c$  به مقدار صفر می‌رسد. در سازه‌های بتنی تحت بارگذاری خارجی نرخ آزادسازی انرژی کرنشی در نوک ترک  $G_q$  از دو مولفه نرخ آزادسازی انرژی برای ایجاد سطوح جدید شکست  $G_{IC}$  و انرژی لازم برای غلبه بر تنش‌های چسبنده  $G_\sigma$  تشکیل شده است. پس می‌توان نوشت:

$$G_q = G_{IC} + G_\sigma \quad (1-5)$$

در عبارات بالا  $G_{IC}$  همان نرخ آزادسازی انرژی در حالت بحرانی است که با استفاده از اصول مکانیک شکست خطی بدست می‌آید.  $G_\sigma$  نیز در واحد طول ترک برای جسم با ضخامت واحد عبارت است از:

$$G_\sigma = \frac{1}{\Delta a} = \int_0^{\Delta a} \int_0^w \sigma(w) dx dw = \frac{1}{\Delta a} \int_0^{\Delta a} dx \int_0^w \sigma(w) dw = \int_0^{w_t} \sigma(w) dw \quad (2-5)$$

برای تعریف مدل‌های مختلف رفتار بتن، از یکی از دو عبارت مستقل سمت راست معادله (1-5) در مقابل دیگری صرفنظر شده و دو مدل شکست کلی برای بتن پیشنهاد شده است:

الف- مدل ترک مجازی (Fictitious crack model)

ب- مدل ترک الاستیک موثر (Effective elastic crack model)

## ۵-۲-۲- مدل ترک مجازی

در این مدل انرژی آزاد شده در نوک ترک تنها صرف غلبه بر تنش‌های چسبنده در ناحیه صدمه دیده نوک ترک شده و از  $G_{IC}$  صرفنظر می‌گردد و در نتیجه  $G_\sigma = \int_0^{w_t} \sigma(w) dw$  می‌باشد. در



این مدل فرض می‌شود هنگامی که تنش‌های اصلی کششی به مقاومت ماده  $f_t'$  می‌رسد ترک مجازی شکل می‌گیرد و گسترش می‌یابد.

### ۵-۲-۳- مدل ترک الاستیک موثر

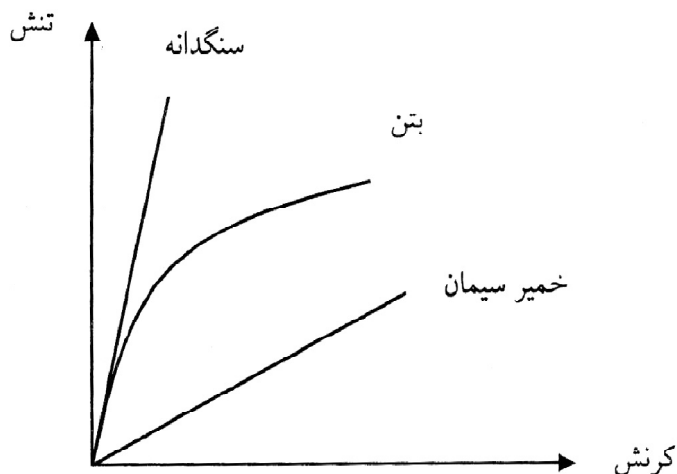
در این مدل از اثر تنش‌های چسبنده در منطقه صدمه دیده نوک ترک صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه معادله (۵-۱) بصورت زیر خواهد شد:

$$G_q = G_{IC} \quad (۵-۳)$$

در این مدل طول منطقه صدمه دیده نوک ترک با افزودن مقدار معینی به طول ترک بدون تنش‌های چسبنده در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به این دلیل که در این روش تنها از یک ترک الاستیک موثر استفاده می‌شود می‌توان از معیارهای مکانیک شکست الاستیک خطی بهره جست. معادله (۵-۳) شرط رشد ترک الاستیک موثر ناشی از افزایش بار می‌باشد. در این معادله  $G_q$  تابعی از اندازه و هندسه سازه، بار وارده و طول ترک الاستیک موثر می‌باشد؛ حال آنکه  $G_{IC}$  نرخ رهایی انرژی بحرانی است که به عنوان ثابت مواد پنداشته می‌شود. از آنجا که طول ترک با افزایش بار هنگام رشد ترک پایدار افزایش می‌یابد، یک معادله اضافی برای تعیین طول ترک لازم است. در مدل‌های ارائه شده بر مبنای ترک الاستیک موثر از دو پارامتر برای بررسی شکست استفاده می‌نمایند. [۲۴]

### ۵-۳- رفتار غیر خطی بتن

رفتار مواد براساس منحنی تنش- کرنش آنها تعریف می‌شود (شکل ۵-۱). با وجود اینکه مواد تشکیل دهنده بتن یعنی سنگدانه‌ها و سیمان تا حدود ۸۰٪ از مقاومت نهایی خود دارای رفتار خطی می‌باشند اما در بتن معمولی زمانی که تنش به ۴۰٪-۳۰٪ ظرفیت نهایی می‌رسد شاهد شروع رفتار غیر خطی هستیم [۲۴].



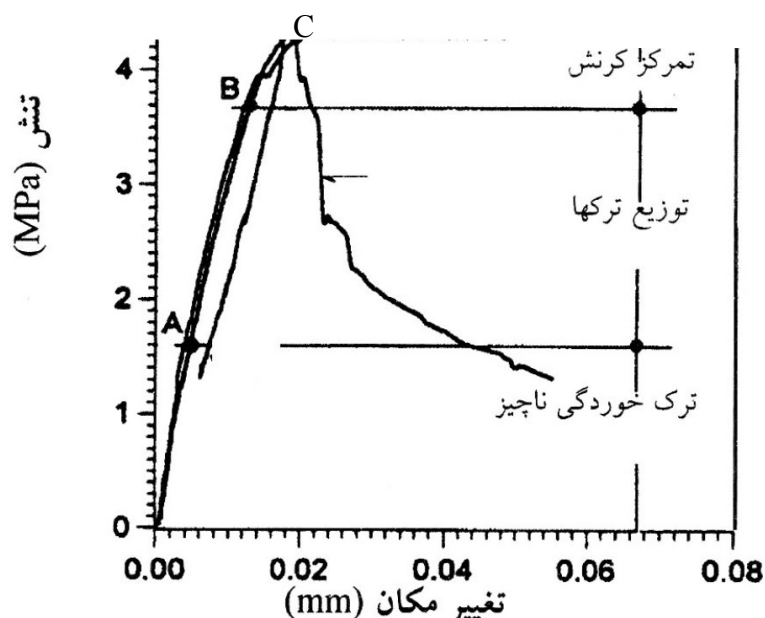
شکل ۵-۱ منحنی رفتار بتن و مواد تشکیل دهنده آن [۲۴]

علت شروع سریعتر رفتار غیر خطی بتن در مقایسه با مواد تشکیل دهنده آن وجود منطقه‌ای تحت عنوان منطقه انتقال<sup>۱</sup> (TZ) می‌باشد. TZ منطقه واکنش سیمان و سنگدانه با ضخامت  $15\mu\text{m}$  - ۱۰ در اطراف دانه‌های سنگدانه است که ضعیف‌تر از سنگدانه و سیمان می‌باشد. لازم به ذکر است که در منطقه TZ قبل از اعمال بار خارجی بدلیل وجود تنش‌های حرارتی و تنش‌های انقباض ناشی از خشک شدن بتن<sup>۲</sup>، ترک‌های بسیار ریزی وجود دارند. بدلیل تخلخل بالا و مقاومت پایین این منطقه ترک‌ها به سرعت در آن گسترش پیدا می‌کنند در حالیکه سیمان و سنگدانه هنوز بدون ترک هستند و همین امر باعث شروع زودتر انحنا در منحنی رفتار بتن می‌گردد. رفتار تنش-کرنش در کشش در بارگذاری‌های مختلف دارای چهار مرحله می‌باشد. شکل ۵-۲ رفتار یک صفحه بتنی تحت بارهای کششی یک محوری را نشان می‌دهد. مرحله اول (OA): در این مرحله در اثر افزایش بار تا نقطه A که حد تناسب نامیده می‌شود رابطه تنش-کرنش کاملاً بصورت خطی است. تا نقطه A تنها شاهد ترک‌های بسیار ریز در بتن خواهیم بود. این مرحله ۳۰٪ از ظرفیت نهایی بتن می‌باشد. مرحله دوم (AB): در این مرحله ترک‌های داخلی ایجاد شده و به تدریج گسترش می‌یابند. وجود این ترک‌ها

<sup>۱</sup> Transition Zone

<sup>۲</sup> Shrinkage Stresses

باعث افزایش سریعتر کرنش یا بعبارتی شروع انحنای تنش-کرنش می‌گردند. این مرحله ۸۰٪ از ظرفیت نهایی بتن است. مرحله سوم (BC): در این مرحله ترک‌های اولیه مرحله قبل به هم پیوسته و ایجاد ترک عموده در سازه می‌نمایند که به این پدیده تمرکز کرنش<sup>۱</sup> می‌گویند. این ترک اصلی با افزایش بار تا نقطه C گسترش می‌یابد. پس در این مرحله رشد ترک پایدار می‌باشد. این مرحله باعث رفتار غیر خطی بتن می‌شود. بدلیل وجود نقطه تمرکز کرنش می‌توان باند خرابی موضعی شامل ترک‌های ریز را به صورت فیزیکی با یک ترک مدل نماییم و به این ترتیب قادر به استفاده از مکانیک شکست در بتن خواهیم بود. مرحله چهارم: این مرحله بعد از نقطه C (حداکثر بار) تا زمان گسیختگی را شامل می‌شود. در این مرحله ترک به صورت ناپایدار گسترش می‌یابد یعنی با ثابت بودن بار و یا حتی کاهش بار باز هم ترک گسترش می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود تنش پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود به صورت تدریجی کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. به این کاهش تدریجی اصطلاحاً نرم‌شوندگی کرنش<sup>۲</sup> می‌گویند [۲۴].



شکل ۵-۲ منحنی تنش تغییر مکان نمونه بتنی تحت کشش [۲۴]

<sup>۱</sup> Strain Localization

<sup>۲</sup> Strain Softening

### ۵-۳-۱- مکانیک شکست غیر خطی<sup>۱</sup>

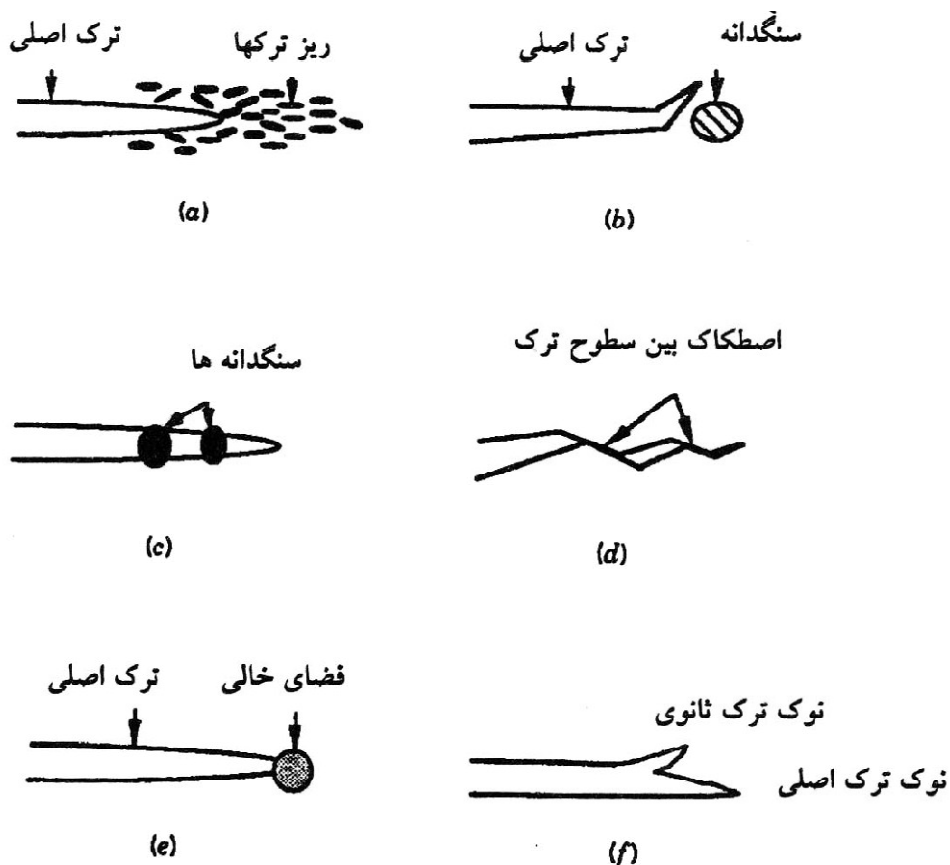
از آنجا که تنش در نوک ترک تیز برای هر نوع مصالحی به سمت بینهایت میل می‌کند و با توجه به اینکه هیچ نوع مصالحی نمی‌تواند تنش بینهایت را تحمل کند لذا طول معینی از مصالح در جلوی نوک ترک رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد. در فولاد این منطقه بصورت یک ناحیه جاری شده ظاهر می‌گردد ولی در بتن بدلیل ماهیت غیرهمگن آن و وجود فازهای مختلف مصالح، ناحیه غیرخطی جلوی نوک ترک بصورت یک منطقه صدمه دیده نوک ترک<sup>۲</sup> ظاهر می‌گردد. پس در بتن تنش تکین وجود ندارد و فرضیات مکانیک شکست خطی<sup>۳</sup> LEFM قابل استفاده نمی‌باشد و باید از مکانیک شکست غیر خطی NLFM استفاده نمود. بدلیل آنکه در منطقه صدمه دیده نوک ترک مقدار زیادی انرژی جذب می‌شود. یک ترک می‌تواند قبل از بار حداکثر دارای رشد پایدار باشد. همچنین این منطقه توجیهی برای نرم شوندگی کرنش در منحنی رفتار بتن پس از بار حداکثر می‌باشد. از آنجا که قسمت‌هایی از سطوح ترک بعد از بار حداکثر دوباره در یکدیگر قفل می‌شوند شکست ناگهانی رخ نمی‌دهد و تنش به تدریج صفر می‌گردد. در شکل ۵-۳ مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در نوک ترک بتن نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Non-Linear Fracture Mecanics (NLFM)

<sup>۲</sup> Fracture Process Zone

<sup>۳</sup> Linear Fracture Mechanics



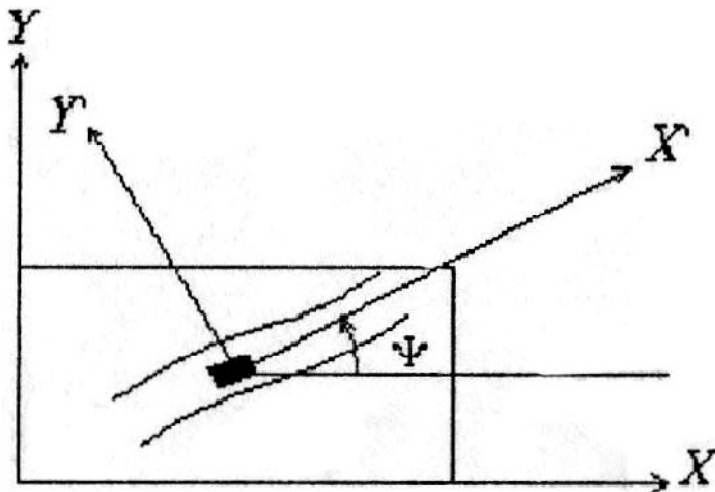
شکل ۵-۳ مکانیزم های مختلف جذب انرژی در نوک ترک بتن [۲۴]

### ۵-۳-۲-الگوی ترک پخش شده<sup>۱</sup>

این الگو برای نشان دادن ترک در جسم، ساده و مناسب می باشد. در این الگو فرض می شود که ترک ها بتوانند در تمام سازه پخش شوند. رشید<sup>۲</sup> نخستین کسی بود که این الگو را ارائه نمود. می دانیم که ترک هنگامی ایجاد خواهد شد که تنش کششی اصلی از مقاومت کششی جسم بیشتر شود. پس از پیدایش ترک، جسم به صورت ناهمسان رفتار می کند. شکل ۵-۴ جسمی را نشان می دهد که در جهت محور محلی  $x'$  ترک خورده است. در شکل ۵-۴،  $\psi$  زاویه امتداد ترک با محور  $x$  می باشد.

<sup>1</sup> Smeared crack

<sup>2</sup> Rashid



شکل ۴-۵: الگوی ترک پخش شده [۲۴]

مزایای الگوی ترک پخش شده به شرح زیر است:

- ۱- براساس اینکه جهت ترک به تنش‌های اصلی بستگی دارد و این تنش‌ها در هنگام تحلیل به دست می‌آیند، این روش توانایی الگوسازی ترک در هر جهتی را دارد.
  - ۲- به وجود آمدن ترک‌ها مستقل از شبکه‌بندی اجزای محدود می‌باشد.
- از سوی دیگر، کاستی‌های این الگو به شرح زیر است:
- ۱- در این شیوه چون ترک در کل جزء به وجود می‌آید، طول ترک به اندازه شبکه‌بندی بستگی دارد که این نادرست می‌باشد. به سخن دیگر، این الگو توانایی تخمین طول واقعی ترک را ندارد.
  - ۲- دقت این الگو به اندازه شبکه‌بندی اجزای محدود بستگی دارد. زیرا، پخش ترک‌ها در طول جزء را به طور یکنواخت می‌پندارند.

۵-۳-۲-۱- بازپخش تنش‌ها پس از ایجاد ترک

پس از بوجود آمدن ترک‌ها، تنش‌های  $\sigma_{y'}$  و  $\tau_{x'y'}$  در مختصات محلی ترک صفر خواهند شد و باید تنش‌ها را اصلاح نمود. تنش‌های رها شده، در مختصات محلی  $x'y'$  به شکل زیر درمی‌آیند:

$$\{\sigma'\}_{rel} = \{\sigma_{x'} \quad \sigma_{y'} \quad \tau_{x'y'}\}^T - \{\sigma_{x'} \quad 0 \quad 0\}^T \quad (4-5)$$

تنش‌های رها شده، پس از انتقال به مختصات محلی جزء به صورت زیر خواهند بود:

$$\{\sigma\}_{rel} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}^T - \{b(\psi)\}\sigma_{x'} \quad (5-5)$$

بردار انتقال،  $b(\psi)$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(6-5)$$

$$b(\psi) = \{c^2 \quad s^2 \quad cs\}^T$$

از سوی دیگر، با نوشتن معادله ایستایی جزء در جهت  $x'$ ، می‌توان تنش  $\sigma_{x'}$  را برحسب تنش‌های کلی درآورد:

$$\sigma_{x'} = \{b'(\psi)\}^T \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}^T \quad (7-5)$$

$$b'(\psi) = \{c^2 \quad s^2 \quad 2cs\}^T \quad (8-5)$$

در روابط فوق  $c = \cos(\psi)$  و  $s = \sin(\psi)$  می‌باشد. با جایگذاری رابطه (7-5) در رابطه (5-5)، تنش رها شده در مختصات  $xy$  را می‌توان از رابطه زیر یافت:

$$\{\sigma\}_{rel} = ([I] - \{b(\psi)\}\{b'(\psi)\}^T)\{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}^T \quad (9-5)$$

$$\{\sigma\}_{rel} = [r]\{\sigma\} \quad (10-5)$$

در رابطه (10-5) ماتریس  $[r]$ ، از رابطه زیر حساب می‌گردد:

$$[r] = \begin{bmatrix} (1-c^4) & -c^2s^2 & -2c^3s \\ -c^2s^2 & (1-s^4) & -2cs^3 \\ -c^3s & -cs^3 & (1-2c^2s^2) \end{bmatrix} \quad (11-5)$$

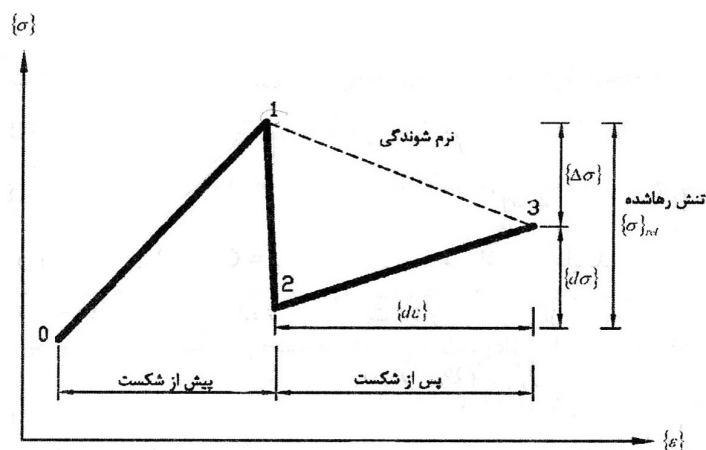
هنگامی که قسمتی از تنش‌ها در اثر ترک‌خوردگی رها می‌شوند، تنش در سایر قسمت‌ها افزایش می‌یابد. بازپخش تنش‌ها در مواد مجاور سبب سخت‌شوندگی مجدد جسم می‌گردد. شیب خط‌های ۰-۱ و ۲-۳ در شکل ۵-۵، سختی مواد را پیش و پس از شکست نشان می‌دهند. رابطه افزایشی تنش و کرنش پس از ترک‌خوردگی به وسیله رابطه زیر در دسترس قرار می‌گیرد:

$$\{d\sigma\} = [D]_c \{d\varepsilon\} \quad (12-5)$$

$$[D]_c = E \begin{bmatrix} c^4 & c^2s^2 & c^3s \\ c^2s^2 & s^4 & cs^3 \\ c^3s & cs^3 & c^2s^2 \end{bmatrix} \quad (13-5)$$

سرانجام، تغییرات تنش به وجود آمده در فرایند ترک‌خوردگی به دست می‌آید.

$$\{\Delta\sigma\} = \{d\sigma\} - \{\sigma\}_{rel} = [D]_c \{d\varepsilon\} - \{\sigma\}_{rel} \quad (14-5)$$



شکل ۵-۵ الگوی تنش و کرنش بتن ترک خورده [۲۴]



### ۵-۳-۲- دگرگونی ماتریس مواد

هنگامی که جسم ترک می‌خورد، باید ماتریس مواد اصلاح گردد. ساده‌ترین رابطه ای که می‌تواند رفتار جسم را پس از ترک مشخص نماید به شکل زیر است [۲۴].

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (۱۵-۵)$$

رابطه کنونی برحسب تنش‌های دکارتی به شکل زیر درمی‌آید:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{x'} \\ d\sigma_{y'} \\ d\tau_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{x'} \\ d\varepsilon_{y'} \\ d\tau_{x'y'} \end{Bmatrix} \quad (۱۶-۶)$$

در حالت کرنش مستوی، به جای  $E$  از  $\frac{E}{1-\nu^2}$  استفاده می‌گردد. رابطه تنش و کرنش نموی، به وسیله رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\{\Delta\sigma\} = [D_{cr}] \{\Delta\varepsilon\} \quad (۱۷-۵)$$

در این رابطه،  $[D_{cr}]$  ماتریس مواد جزء ترک خورده می‌باشد. با توجه به رابطه‌های کنونی، در این الگو پس از ایجاد ترک، تمام درایه‌های ماتریس سختی، بجز آنهایی که در امتداد موازی با ترک‌اند، برابر صفر می‌شوند. باید دانست، رابطه‌های مزبور نمی‌توانند رفتار ماده ترک خورده را بخوبی نشان دهند. زیرا هنگامی که پهنای ترک کم باشد، مقداری نیروی برشی، توسط آن انتقال می‌یابد. بر این اساس، درایه (3,3) ماتریس مواد با به کارگیری عامل  $\beta_1 \cdot G$  به شکل زیر اصلاح می‌گردد [۲۴]:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{x'} \\ d\sigma_{y'} \\ d\tau_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_t G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{x'} \\ d\varepsilon_{y'} \\ d\tau_{x'y'} \end{Bmatrix} \quad (18-5)$$

در رابطه کنونی، ضریب  $\beta_t$  اثر قفل و بست دانه‌ای را وارد تحلیل می‌کند. این ضریب در هنگام رشد ترک تغییر خواهد کرد، به گونه‌ای که در آغاز ترک خوردگی این ضریب یک و با گسترش پهنای ترک به سوی صفر نزدیک می‌شود. در حالت کلی،  $\beta_t$  بین صفر و یک تغییر می‌کند. انتخاب این مقدار به نوع سازه و دقت تحلیل بستگی دارد. با این همه، به طور معمول این ضریب برابر  $0/1$  انتخاب می‌شود. درباره چگونگی انتقال برش و ضریب برشی در بتن، نگره‌های متفاوتی وجود دارد. اشنوبریج<sup>۱</sup> این ضریب را ثابت فرض نمود. سدولین<sup>۲</sup> برای تعریف  $\beta_t$  از رابطه‌ای خطی استفاده نمودند. المهدی نیز رابطه‌ای به شکل زیر پیشنهاد نمود [۲۴]:

$$\begin{cases} \beta_t = \frac{0.4}{\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_t}\right)} & \varepsilon_i \geq \varepsilon_t \\ \beta_t = 1 & \varepsilon_i < \varepsilon_t \end{cases} \quad (19-5)$$

در اینجا  $\varepsilon_i$  کرنش در ترک و  $\varepsilon_t$  کرنشی است که سبب آغاز ترک خوردگی می‌شود. خاطرنشان می‌نماید. بازانت و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۳ میلادی، ماتریس مواد زیر را در محوره‌های محلی ترک پیشنهاد نمودند [۲۴]:

<sup>1</sup> Schnobrich

<sup>2</sup> Cedolin

<sup>3</sup> Bazant et al

$$[D_{cr}] = \begin{bmatrix} \frac{\mu E}{1-\mu v^2} & \frac{v\mu E}{1-\mu v^2} & 0 \\ \frac{v\mu E}{1-\mu v^2} & \frac{E}{1-\mu v^2} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_t G \end{bmatrix} \quad (20-5)$$

در این حالت اندرکنش مود یکم و دوم شکست در نظر گرفته شده است. عامل کاهش  $\mu$  تابعی از کرنش عمود بر لبه‌های ترک می‌باشد. در عمل این عامل با آزمایش به دست می‌آید. در رابطه‌های کنونی، ماتریس مواد جزء در محورهاى محلى ترک نشان داده شد. این ماتریس را باید به مختصات محلى جزء ترک خورده،  $(x,y)$  انتقال داد. برای این کار از ماتریس دوران کرنش‌ها بهره‌جویی می‌گردد.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \psi & \sin^2 \psi & (\sin \psi \cos \psi) \\ \sin^2 \psi & \cos^2 \psi & (-\sin \psi \cos \psi) \\ (-2 \sin \psi \cos \psi) & (2 \sin \psi \cos \psi) & (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (21-5)$$

$$\{\varepsilon'\} = [T_\varepsilon] \{\varepsilon\} \quad (22-5)$$

برای انتقال ماتریس مواد، از ماتریس دوران  $[T_\varepsilon]$  استفاده می‌گردد. این تبدیل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[D_{cr}] = [T_\varepsilon]^T [D_{cr}] [T_\varepsilon] \quad (23-5)$$

براساس رابطه‌های کنونی، با در دست بودن ماتریس کرنش جزء موردنظر  $[B]$  و نیز ماتریس مواد جزء ترک خورده  $[D_{cr}]$ ، ماتریس سختی  $[k]$  در مختصات محلى جزء به صورت زیر حساب می‌شود:

$$[k] = t \int_A [B]^T [D_{cr}] [B] dA \quad (24-5)$$

برای تحلیل غیر خطی سازه، نخست ماتریس سختی اجزای سالم و ترک خورده در محورهای محلی جزء نوشته می‌شوند. در ادامه، ماتریس سختی سازه در محورهای کلی سوار می‌گردد و نیروهای رها شده حساب می‌شوند. سرانجام، نمو تغییر مکان‌ها در هر تکرار به دست می‌آید.

$$\{F\}_{rel} = \int_V [B]^T \{\sigma\}_{rel} dV \quad (25-5)$$

$$[K]\{\delta D\} = \{\Delta R\} + \{F\}_{rel} \quad (26-5)$$

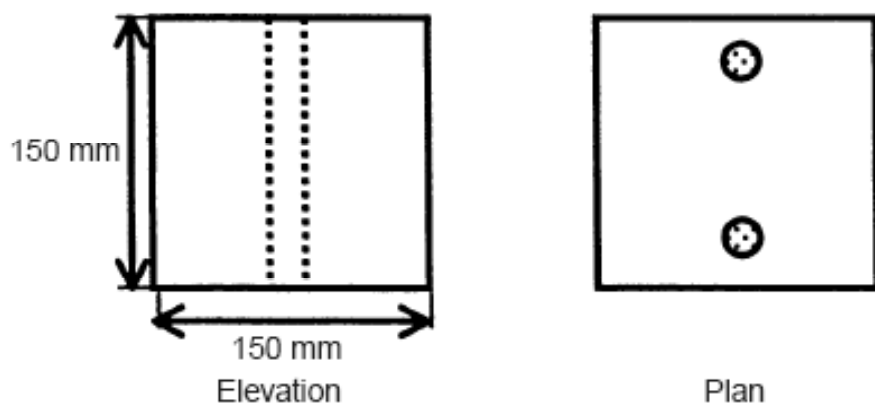
در رابطه کنونی،  $\{\Delta R\}$  نمو بارهای خارجی،  $\{F\}_{rel}$  بارهای رها شده و  $[K]$  ماتریس سختی به هنگام شده سازه می‌باشد. در هر تکرار نمو تغییر مکان به مقدار پیشین تغییر مکان‌ها افزوده می‌شود. برای تحلیل سازه‌های صفحه‌ای، الگوهای زیادی پیشنهاد شده است. این الگوها، براساس سازگاری تغییر شکل‌ها بنا شده‌اند و تابعی از مقدار بازشدگی و لغزش لبه‌های ترک می‌باشند. بلتی<sup>۱</sup> و همکاران با بکارگیری رویهم گذاری و سازگاری، مدلی غیر خطی، برای جزء غشایی بتن مسلح، پیشنهاد نمودند. آنها مؤلفه‌های تنش عامل‌های گوناگون سخت‌شوندگی کششی، غیر همسان شدن بتن، نرم شوندگی کرنشی، قفل و بست دانه‌ای، اثر شاخه‌ای میلگردها و مانند اینها را به دست آوردند. در ادامه کار، با برپاسازی رابطه میان بردار تنش و کرنش، ماتریس مواد جزء را در محورهای محلی ترک، تشکیل دادند. آنها پس از انتقال ماتریس مواد به محورهای کلی، ماتریس سختی جزء را برپا کردند [۲۴]. در سال ۲۰۰۳ میلادی نیز، فوستر و مارتی<sup>۲</sup>، اثر میلگردها و سخت‌شوندگی کششی را به ماتریس مواد افزودند. [۲۴]

<sup>1</sup> Belletti

<sup>2</sup> Foster and Marti

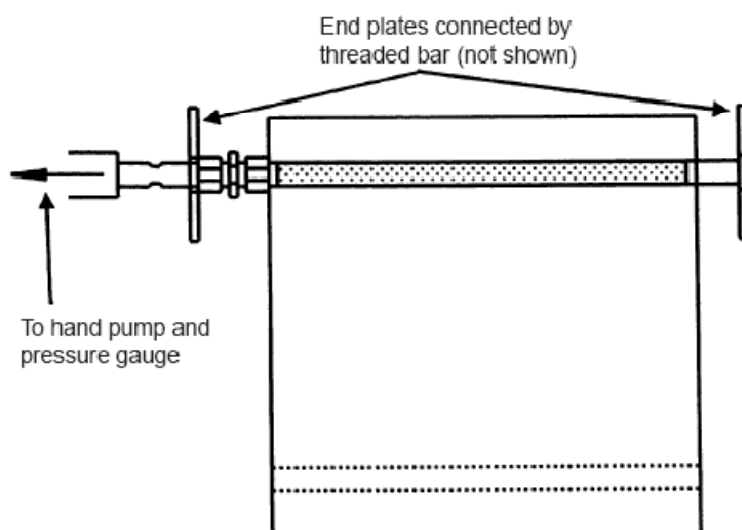
#### ۴-۵- نمونه آزمایشگاهی

ویلیامسون و کلارک در سال ۲۰۰۰ آزمایشی را بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر به همراه سوراخ تعبیه شده به قطر ۸ و ۱۶ میلیمتر جهت پیش بینی فشار لازم برای بروز ترک در سطح نمونه انجام دادند. (شکل ۵-۶)



شکل ۵-۶ نمونه های آزمایشگاهی [۲]

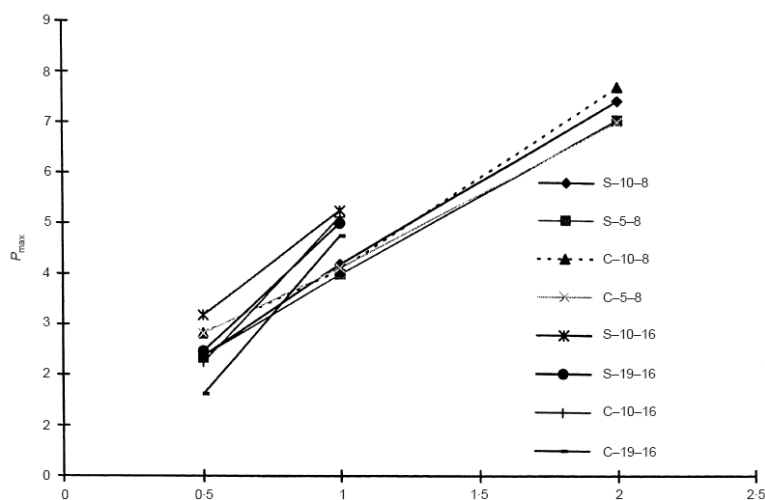
جهت شبیه سازی فشار ناشی از انبساط آرماتور در اثر خوردگی ، در داخل سوراخ های تعبیه شده ، توسط پمپهای هیدرولیکی و به صورت تدریجی فشار را به نمونه ها اعمال نمودند (شکل ۵-۷)



شکل ۵-۷ نحوه اعمال فشار به نمونه های آزمایشگاهی [۲]

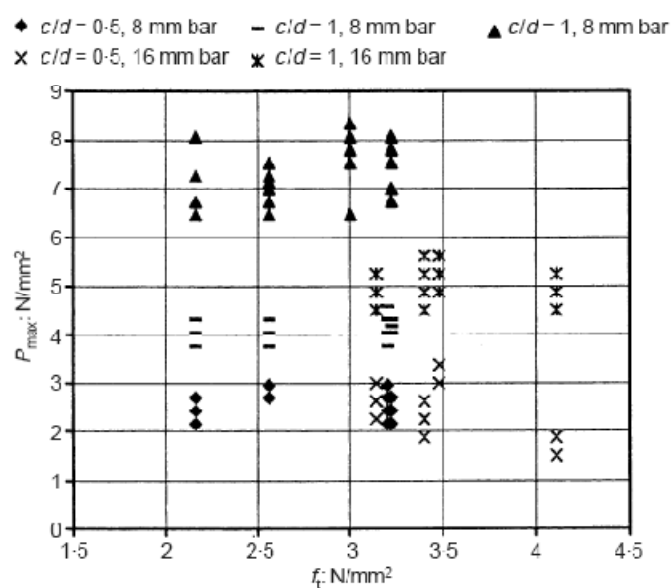
پس از انجام آزمایش بر روی نمونه ها با شرایط مکانیکی متفاوت ، به نتایج وپیش بینی هایی که در ذیل نام برده می شود اشاره شد:

فشار لازم جهت ترک خوردن نمونه ها ( $P_{max}$ ) با افزایش نسبت قطر میلگرد به ضخامت پوشش ( $C/d$ ) افزایش می یابد. (شکل ۵-۸)



شکل ۵-۸ تأثیر  $C/d$  بر  $P_{max}$

اگر چه مقاومت کششی بتن در بروز ترک اولیه مؤثر می باشد ، ولیکن معیار تنش کششی حد اکثر، معیار مناسبی جهت بدست آوردن میزان فشار لازم جهت شکست نمونه نمی باشد و باید از معیارهای انرژی شکست بهره جست. این نکته در شکل ۶-۹ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۵-۹ مقایسه بین فشار شکست و مقاومت کششی نمونه ها [۲]

در دو نمونه با ضخامت پوشش یکسان ، فشار لازم جهت شکست پوشش در نمونه با آرماتور بزرگتر کمتر از نمونه مشابه می باشد.

نتایج نهایی بر روی نمونه ها برای بتن با مقاومت کششی مشخصه ۳/۲ در جدول ذیل گنجانده شده است ، که در این پایان نامه سه نمونه اولیه مدلسازی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

جدول ۵-۱ میانگین فشار لازم جهت شکست در آزمایش شبیه سازی شده [۲]

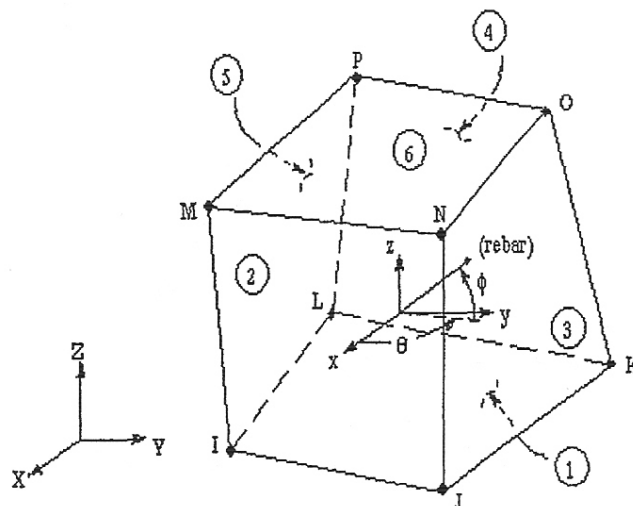
| Pour   | $c/d$ | Cover: mm | $P_{max}$ average,<br>8 mm: N/mm <sup>2</sup> | SD   | $P_{max}$ average,<br>16 mm: N/mm <sup>2</sup> | SD   | P16/P8 |
|--------|-------|-----------|-----------------------------------------------|------|------------------------------------------------|------|--------|
| S-10-8 | 0.5   | 4         | 2.38                                          | 0.2  | —                                              | —    | —      |
| S-10-8 | 1     | 8         | 4.2                                           | 0.1  | 3.19                                           | 0.22 | 0.76   |
| S-10-8 | 2     | 16        | 7.43                                          | 0.56 | 5.25                                           | 0.31 | 0.71   |
| C-10-8 | 0.5   | 4         | 2.65                                          | 0.31 | —                                              | —    | —      |
| C-10-8 | 1     | 8         | 4.08                                          | 0.31 | 2.25                                           | 0.31 | 0.55   |
| C-10-8 | 2     | 16        | 7.71                                          | 0.51 | 6.83                                           | 0.52 | 0.89   |

## ۵-۵-مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS

### ۵-۵-۱- نوع المان : SOLID 65

یک المان سازه‌ای سه بعدی است که دارای هشت گره با سه درجه آزادی در هر گره (۳ درجه جابجایی انتقالی در جهت  $(X,Y,Z)$  می‌باشد و برای مدل‌سازی بتن (با یا بدون آرماتور)، مواد ژئوتکنیکی مانند سنگ‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. این المان هر دو مسئله غیر خطی هندسی و مادی را در بر می‌گیرد. در سه راستا می‌توان در این المان میلگرد تعریف کرد. راستای میلگردها در المان Solid 65 با استفاده از دو زاویه  $\theta$  و  $\phi$  معرفی می‌شود. میلگردها تحمل کشش و فشار دارند ولی برش تحمل نمی‌کنند. قابلیت تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی در آن وجود دارد. حجم میلگردها را به صورت نسبتی از حجم المان‌ها معرفی می‌کنند.

این المان دارای قابلیت‌های تغییر شکل پلاستیک، ترک‌خوردگی در سه جهت عمود برهم، خردشدگی، خزش، تغییر شکل و کرنش‌های بزرگ و سخت‌شدگی تنش می‌باشد. هندسه و موقعیت گره‌ها برای این نوع المان در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است [۲۵].



شکل ۵-۱۰ - Solid65 [۲۵]



## ۵-۵-۲ مروری بر مفهوم آنالیز غیر خطی:

به طور کلی غیر خطی شدن یک مساله می تواند در دو شکل ظاهر شود:

۱- **غیر خطی هندسی:** این نوع غیر خطی بودن در برگیرنده تغییرات هندسه سازه است در

این نوع مسائل ماتریس سختی سازه  $[K]$  تابعی از بردار تغییر مکان ها  $[U]$  و مشتقات آن است.

۲- **غیر خطی بودن ماده:** این نوع مسائل ممکن است در اثر وجود یک رابطه غیر خطی بین

تنش و کرنش مواد به وجود آید در این مواد تنش تابع غیر خطی از کرنش است. از مصادیق این نوع مواد بتن است. در سازه های بتن آرمه هر دو ماده بتن و فولاد رفتار کاملاً غیر خطی دارند. در Ansys انواع مختلفی از مواد غیر خطی قابل تعریف هستند. از بین این مواد بتن به عنوان یک ماده غیر خطی مشخص شناخته شده است و می توان ماده ای را به نام بتن در فهرست مواد غیر خطی آن معرفی کرد.

در حل یک مساله غیر خطی عوامل بسیار مهمی دخالت دارند به طوری که عدم دقت در وارد کردن و معرفی آنها باعث می شود که حل کاملاً غلطی ارائه شود. از جمله این عوامل می توان بارگذاری را نام برد به طوری که تغییر در نحوه اعمال بار منجر به تغییر در روند حل و مقدار نتایج خواهد شد. در یک آنالیز غیر خطی بار به صورت تدریجی به سازه اعمال می گردد. این کار در Ansys طی دو روند کاملاً متمایز صورت می پذیرد. اول آنکه بار در مراحل مختلف تحت عنوان گام<sup>۱</sup> بارگذاری وارد می شود. در هر گام بارگذاری، زمان یک پارامتر نمادین برای نشان دادن زمان انتهای بارگذاری است. روند دومی که در اعمال بار طی می کنیم، تقسیم کردن هر گام بارگذاری است. به هر یک از

---

<sup>1</sup> step

این تقسیمات اعمال بار یک زیر گام<sup>۱</sup> می گوئیم. به مجموعه این تقسیمات بارگذاری که متوالیاً به سازه اعمال می شوند تاریخچه بارگذاری گفته می شود [۲۵].

### ۵-۵-۳- معیار شکست حاکم بر رفتار بتن در نرم افزار Ansys:

بتن یکی از موادی است که تئوری غیر ارتجاعی بسیار پیچیده ای بر رفتار آن حاکم است و معیارهای شکست مختلفی برای آن عرضه شده است. از آنجا که در عمل شکست بتن با ترک خوردگی و خرد شدگی آن همراه است مدل مورد استفاده در نرم افزار Ansys قابلیت در نظر گرفتن هر دو پدیده فوق را دارد. در Ansys معیاری که برای شکست بتن در نظر گرفته شده است معیار ۵ پارامتری ویلیام وارنک<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۴ است. در این معیار سطح شکست بتن به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\frac{F}{F_c} - S \geq 0 \quad 27-5$$

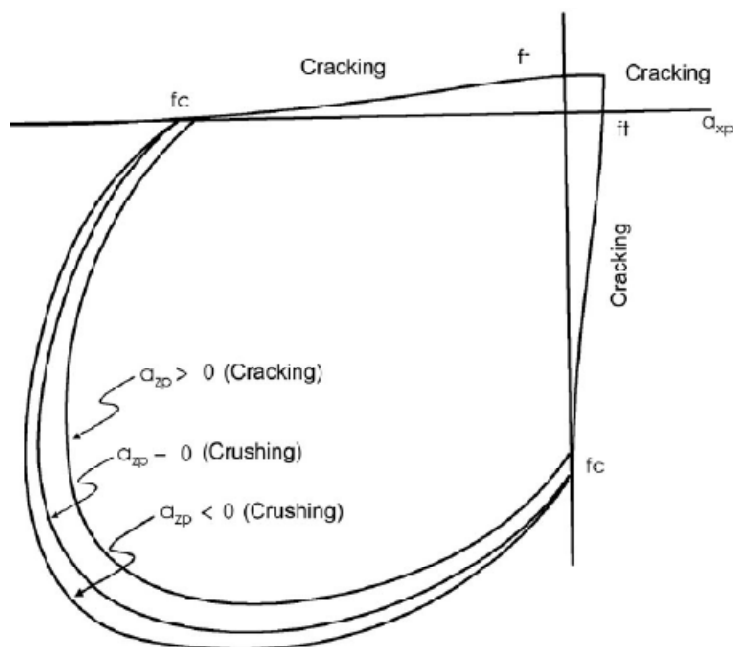
در این رابطه F تابعی از تنش های اصلی، S سطح شکست و  $F_c$  تنش خردشدگی تک محوری بتن است. پارامترهای مختلفی در تشکیل و محاسبه رابطه فوق دخالت دارند. در واقع این پارامترها پل ارتباط کاربر بین مدل ریاضی و یک مدل واقعی یک قطعه یا یک سازه بتن آرمه می باشد.

سطح شکست سه محوره بتن بر اساس این معیار در شکل ( ۵-۱۱ ) نشان داده شده است [۲۵] و [۲۶]. دو تنش اصلی در راستای X و Y با  $\sigma_{xp}$  و  $\sigma_{yp}$  معرفی شده اند. مدل شکست به صورت تابعی از  $\sigma_{zp}$  (تنش اصلی در راستای Z) محاسبه می گردد. به عنوان مثال اگر  $\sigma_{xp}$  و  $\sigma_{yp}$  هر دو منفی (فشاری) باشند و  $\sigma_{zp}$  مثبت (کششی) باشد، ترک خوردگی ممکن است در راستای عمود بر  $\sigma_{zp}$

<sup>1</sup> Sub step

<sup>2</sup> William and Warnke

ایجاد شود. اما اگر  $\sigma_{zp}$  نیز منفی باشد، المان ممکن است خرد گردد. به طور کلی در یک المان بتن ترک خوردگی زمانی اتفاق می افتد که تنش اصلی کششی در هر راستا بیرون از سطح شکست واقع شود. پس از ترک خوردگی، مدول الاستیسیته بتن در راستای موازی با آن تنش اصلی صفر منظور می شود. همچنین خرد شدگی المان زمانی اتفاق می افتد که هر سه تنش اصلی، فشاری بوده و خارج از سطح شکست محاسباتی واقع شوند. در چنین حالتی در تمام راستاها مدول الاستیسیته صفر منظور می شود و این به معنای حذف آن المان می باشد [۲۶].



شکل ۵-۱۱ سطح شکست محاسباتی ویلیام-وارنک [۲۶]

## ۵-۳-۲- پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی اجزاء محدود بتن آرمه:

نرم افزار Ansys بتن را با نام مشخص (concrete) و با رفتار اشاره شده در قسمت قبل می شناسد. برای معرفی بتن آرمه در نرم افزار Ansys پارامترهای زیر به عنوان پارامترهای ورودی مورد نیاز هستند.

مدول الاستیسیته بتن ( $E_c$ )

حداکثر تنش فشاری تک محوره بتن ( $f'_c$ )

حداکثر تنش کششی بتن (مدول گسیختگی ( $f_t$ )

ضریب پواسون ( $\nu$ )

ضریب انتقال برش ترک های باز و بسته ( $\beta_c, \beta_t$ )

منحنی تنش- کرنش تک محوره فشاری بتن

دو پارامتر حداکثر تنش کششی و حداکثر تنش فشاری بتن، بیشترین تاثیر را در شکل سطح شکست محاسباتی ویلیام وارنک دارند. در روند انجام این تحقیق مقدار مدول الاستیسیته بتن از رابطه (۶-۲۶) محاسبه شده برای محاسبه مقدار تنش کششی قابل تحمل برای بتن که معمولاً در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است از رابطه (۵-۲۹) استفاده شده و ضریب پواسون بتن هم ۰/۲ در نظر گرفته شده.

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (۵-۲۸)$$

$$f_t = 0.08f'_c \quad (۵-۲۹)$$

دو پارامتر  $\beta_c, \beta_t$  از مهمترین پارامترهای ورودی در مدل سازی بتن توسط نرم افزار Ansys می باشند.  $\beta_t$  ضریب انتقال برش در ترک های باز (در ناحیه کششی) و  $\beta_c$  ضریب انتقال برش در ترک های بسته در ناحیه فشاری است هر دو ضریب مقداری بین صفر و یک دارند. مقادیر متفاوتی برای  $\beta_t$  پیشنهاد شده است. محققین  $\beta_t$  را بین ۰/۰۵ تا ۰/۳ پیشنهاد کردند [۲۴]. با توجه به تحلیل های صورت گرفته مقادیر پایین  $\beta_t$  منجر به قطع آنالیز می شود که مقادیر  $\beta_t$  بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ برای  $\beta_t$  مناسب به نظر میرسد. برای  $\beta_c$  تحقیقات انجام شده عدد ۱ را توصیه می کنند اما در

راهنمای نرم افزار Ansys مقدار کمتر از ۱ توصیه شده است که در این تحقیق ۰/۹۹ در نظر گرفته شد.

در طول انجام این تحقیق مشاهده شد که اگر قابلیت خرد شدن در المانهای بتن وجود داشته باشد، مدل اجزاء محدود به کار رفته با مشکل شکست زود هنگام روبرو می شود. خرد شدگی بتن با افزایش بار اعمال شده توسعه پیدا می کند و المان های ناحیه فشاری یکی پس از دیگری خرد می شوند. این مسأله با کاهش چشمگیر در سختی موضعی این نواحی همراه است و مدول الاستیسیته المان های ناحیه فشاری در تمام راستاها یکی پس از دیگری صفر می گردد. در چنین حالتی مدل مورد بررسی یک تغییر مکان ناگهانی و بزرگ از خود نشان میدهد و سپس حل متوقف می گردد.

در یک مدل واقعی معمولاً شکست فشاری خالص چندان محتمل نیست [۲۶] حتی در یک آزمایش فشاری که نمونه ای از بتن تحت تنش فشاری تک محوره قرار می گیرد. تنش های ثانویه کششی در اثر پدیده پواسون ایجاد می گردند. و با توجه به ضعف بتن در کشش این مسئله سبب ترک خوردگی و شکست نمونه می گردد [۲۶]. بنابراین در طی انجام این تحقیق با ایده گرفتن از روش مرجع [۲۵] قابلیت خرد شدگی از المان های بتن گرفته شده.

این کار با قرار دادن عدد (۱-) به جای مقاومت فشاری بتن صورت می گیرد.

زمانی که قابلیت خرد شدن را از المان های بتن سلب می کنیم، لازم است، رفتار تک محوره ناحیه فشاری بتن را بر اساس یک منحنی شناخته شده برای نرم افزار تعریف کنیم این مسئله از قابلیت های بسیار مهم Ansys است که می توان ماده ای با نام مشخص بتن (concrete) داشت که منحنی رفتاری آن نیز در قالب یک پلاستیسیته مشخص مثلاً با نام MISO تعریف گردد [۲۵].

در این تحقیق، از معادلات زیر برای ساخت منحنی تنش-کرنش تک محوری و فشاری بتن که

در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است، استفاده شد [۲۷ و ۲۸].

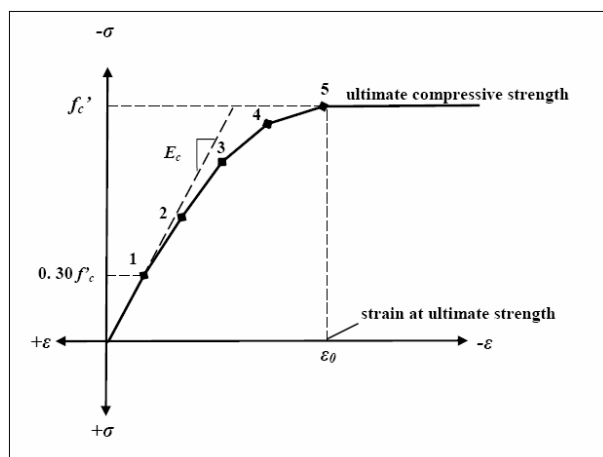
$$f = \frac{E_c \cdot \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (28-5)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (29-5)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (30-5)$$

در روابط فوق:

تنش در هر نقطه:  $f$  و کرنش در هر نقطه:  $\varepsilon$  کرنش در مقاومت فشاری نهایی ( $f'_c$ ):  $\varepsilon_0$



شکل ۵-۱۲ منحنی تنش-کرنش تک محوری فشاری [۲۸]

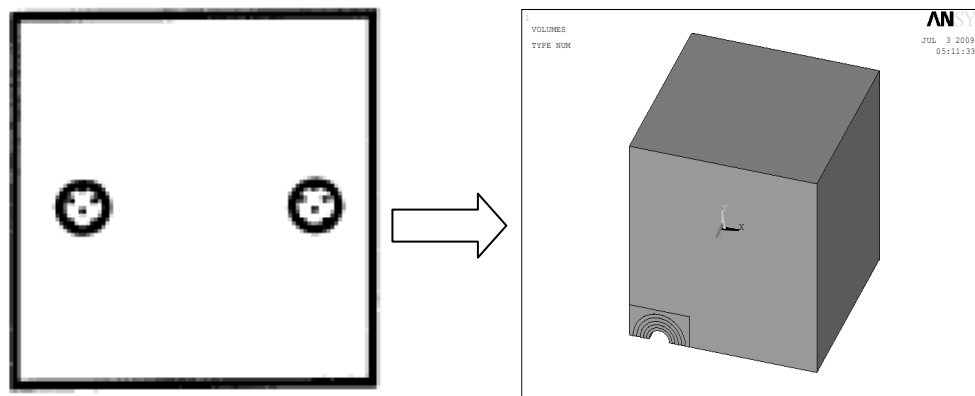
خلاصه ای از خواص بتن استفاده شده در مدل اجزاء محدود در جدول ۵-۲ آمده است

جدول ۵-۲ مشخصات بتن

|               | $E_c$<br>MPa | $f'_c$<br>MPa | $f_r$<br>MPa | $\nu$ | $\beta_t$ | $\beta_c$ |
|---------------|--------------|---------------|--------------|-------|-----------|-----------|
| مشخصات<br>بتن | 28000        | 35            | 3.2          | 0.2   | 0.3       | 0.99      |

۵-۴-۵ ابعاد و هندسه مدلها

به منظور صرفه جویی در میزان محاسبات ، و با توجه به اصول تقارن ، مدل ارائه شده در این پایان نامه به میزان ۱/۸ نمونه آزمایشگاهی کاهش حجم یافته است. جزییات بیشتر در شکل (۵-۱۳) مشخص گردیده است.

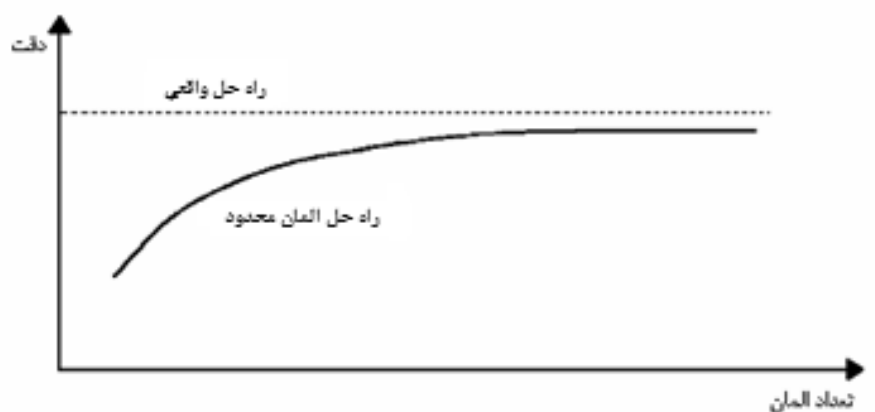


شکل ۵-۱۳ کاهش حجم نمونه در مدل سازی

در نتیجه ابعاد هندسه مدل به یک مکعب به بعد ۷۵ میلیمتر کاهش می یابد؛ همچنین محل تعبیه سوراخ به قطر ۸ میلیمتر در فواصل متفاوت از سطح کناری جهت دستیابی به نسبت های c/d متفاوت 0.5 , 1 و 2 قرار گرفته است .

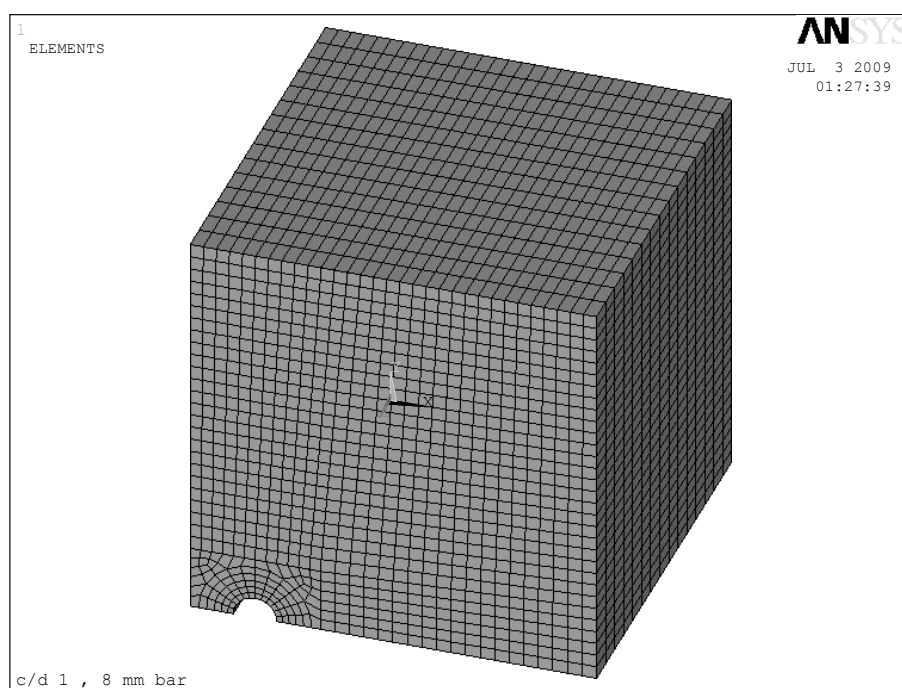
### ۵-۵-۵- مش بندی مدل

انتخاب تراکم شبکه یکی از مهمترین مسائل در مبحث مدل سازی با نرم افزارهای مختلف المان محدود است. زیرا همگرایی نتایج زمانی حاصل می شود که تعداد مناسبی از المان ها، مورد استفاده قرار گیرد. شکل (۵-۱۴) نمودار دقت نتایج با توجه به تعداد المان ها را نشان می دهد. همان طور که از نمودار بر می آید با افزایش تعداد المان ها، دقت نتایج در مدل اجزاء محدود افزایش می یابد، اما افزایش بیشتر تعداد المان ها اثر ناچیزی بر روی دقت نتایج خواهد داشت.



شکل ۵-۱۴ تاثیر تعداد المان‌ها در دقت پاسخ به دست آمده در روش اجزاء محدود [۲۳]

اندازه مش بندی انتخابی تا آن اندازه کوچک گردیده که اولاً حل مسأله بسیار زمانگیر نبوده ، ثانیاً پاسخ های گرفته شده در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی قابل قبول باشد.



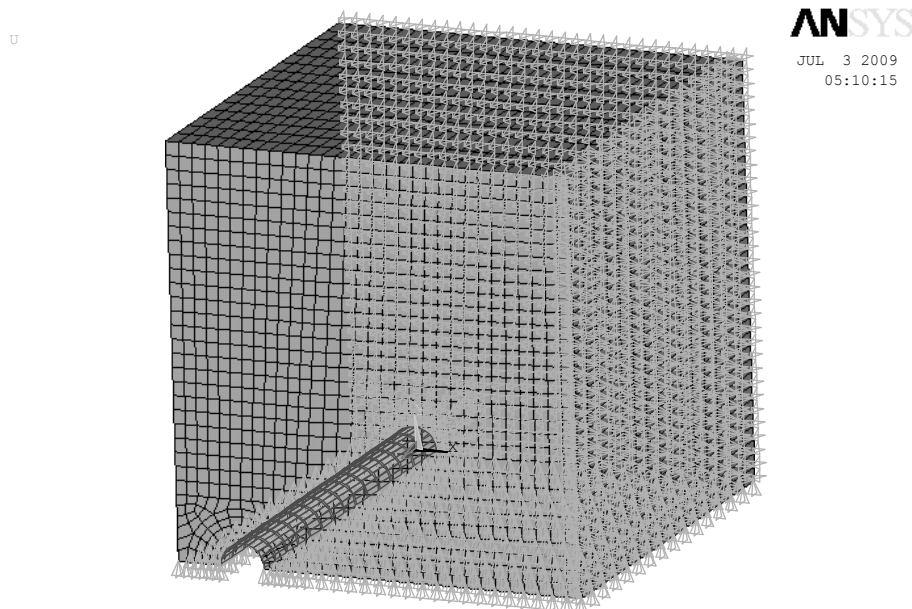
شکل ۵-۱۵ شبکه بندی مدل

## ۵-۵-۶- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی



به دلیل اینکه تنها ۱/۸ نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است ، صفحات تقارن مدل در

جهت عمود بر صفحات گیر دار شده اند. (شکل ۵-۱۶)



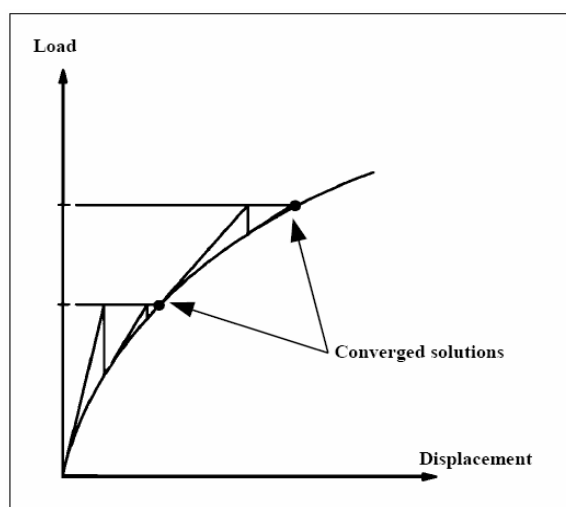
شکل ۵-۱۶ نحوه گیر دار نمودن مدل در جهت صفحات تقارن

#### ۵-۵-۷- روش تحلیل

یکی از مسائل مهمی که در بحث آنالیز امانهای بتن همواره مورد توجه بوده، رفتار متفاوت بتن تحت اثر بارهای خارجی به علت خواص غیر خطی و مقاومت کششی کم آن است. در شروع بارگذاری، به علت پایین بودن مقدار تنش‌های کششی و فشاری در بتن، قطعه به صورت الاستیک و خطی عمل می‌کند. در تحلیل خطی رفتار سازه را در این ناحیه می‌پندارند. در این بازه ماتریس‌های مواد و سختی ثابتند و بارگذاری بر روی آنها اثری ندارد. در برابر آن غیر خطی بودن رابطه تنش- کرنش سبب تغییر ماتریس مواد می‌شود. به عبارت دیگر این ماتریس تابعی از تغییر مکان‌های گرهی است. در نتیجه معادله حاکم بر رفتار سازه به صورت غیر خطی در می‌آید. موادی مانند بتن، خاک و فولاد نرم دارای رفتار غیر خطی هستند. در تحلیل‌های غیر خطی، کل بار خارجی در چند مرحله تحت عنوان گام‌های

بارگذاری بر سازه وارد می‌شود. روش‌های گوناگونی برای حل دستگاه معادلات غیر خطی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به فن تکراری نیوتن رافسون اشاره کرد. نرم افزار ANSYS نیز در تحلیل‌های غیر خطی از این روش استفاده می‌نماید. در روش مذکور، تحلیل غیرخطی با یک مجموعه از تحلیل‌های خطی صورت می‌گیرد. نخستین تحلیل، زیر اثر بار خارجی وارد به سازه انجام می‌پذیرد. در تحلیل‌های بعدی، نیروی نامیزان (اختلاف نیروی خارجی نخستین و نیروی داخلی کنونی) وارد تحلیل می‌گردد. هر گام تحلیل، یک گام تکراری خواهد بود. لازم است توجه شود که تغییر مکان به دست آمده در هر تکرار، با مجموع تغییر مکان تحلیل‌های پیشین جمع می‌گردد. تکرارها تا زمانی ادامه می‌یابند که نیروی نامیزان از مقدار مشخصی کمتر شود. به این میزان، مقدار خطا گویند [۲۵].

شکل (۵-۱۷) کارکرد این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۷: فن تکراری نیوتن رافسون [۲۵]

تحلیل مدل مورد بحث در این پایان نامه نیز به روش تحلیل غیر خطی هندسی استاتیکی انجام شد. در این روش نرم‌افزار بار را به تدریج افزایش می‌دهد تا جایی که سازه به مرز ناپایداری می‌رسد. در این حالت فعال کردن الگوریتم گام زمانی خودکار و دو نیمه‌سازی در حل قویاً توصیه می‌شود. الگوریتم گام اتوماتیک زمانی به طور خودکار به دنبال بار می‌گردد، در صورتی که بار خطی در تحلیل

استاتیکی غیرخطی اعمال شده باشد، و این الگوریتم نیز فعال باشد، هنگام حل مساله در صورتی که همگرایی در نقطه‌ای از بارگذاری ارضاء نشود، الگوریتم به طور خودکار نمو بارگذاری تعیین شده را نصف کرده و حل را دوباره ادامه می‌دهد، تا جایی که با اعمال کوچکترین نمو در بار همگرایی ایجاد نشود. برای حل عددی مسائل غیرخطی باید به موارد زیر توجه شود.

المان‌بندی مدل با دقت انجام شود، المان‌های با اخطارهای مربوط به شکل المان می‌تواند منجر به واگرایی در یک مساله غیرخطی شود.

تعداد نمو‌های بار متناسب با شرایط مساله به اندازه کافی انتخاب شود.

انحراف‌ها (تِلرانس‌ها)، نوع المان انتخاب شده، و مبنای همگرایی نیز در برخی موارد می‌تواند عاملی در همگرا شدن یا نشدن یک مساله غیر خطی باشد [۲۵].

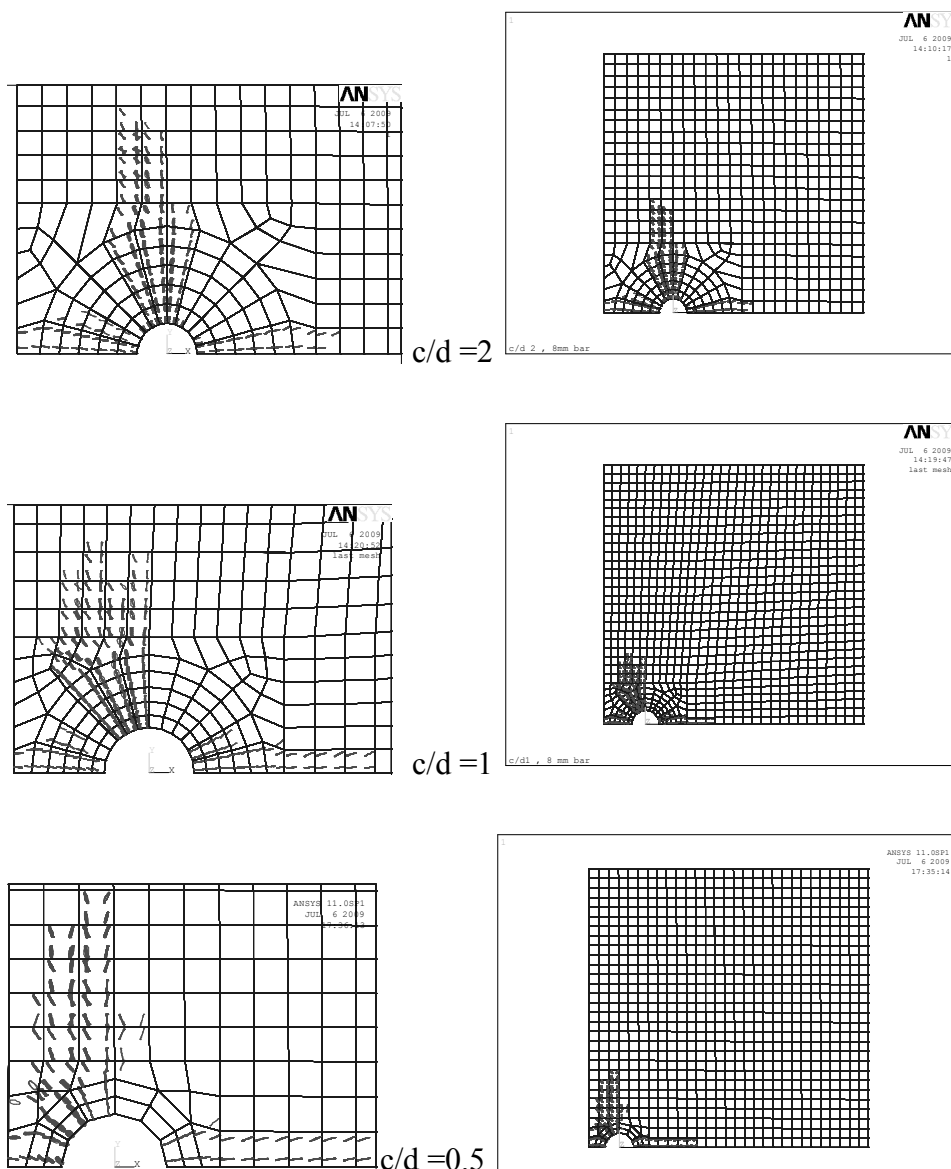
برای آنالیز، دو معیار همگرایی نیرو و تغییر مکان مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدای حل، حدود تِلرانس همگرایی همان مقادیر پیش فرض ANSYS در نظر گرفته شد، اما پس از ایجاد ترک، همگرایی برای آنالیز غیرخطی با معیارهای قراردادی بسیار مشکل بود، لذا همگرایی نیرو حذف شده و همگرایی تغییر مکان افزایش یافت.

#### ۵-۶- مقایسه نتایج

#### ۵-۶-۱ مقایسه الگوی ترک

نتایج تحلیل اجزاء محدود حاکی از این موضوع است که با افزایش بار اعمالی ( که نشان‌دهنده انبساط ناشی از خوردگی آرماتور می باشد ) ، ترک ها در سطوح داخلی و خارجی مدل یکی پس از دیگری اتفاق می افتند.

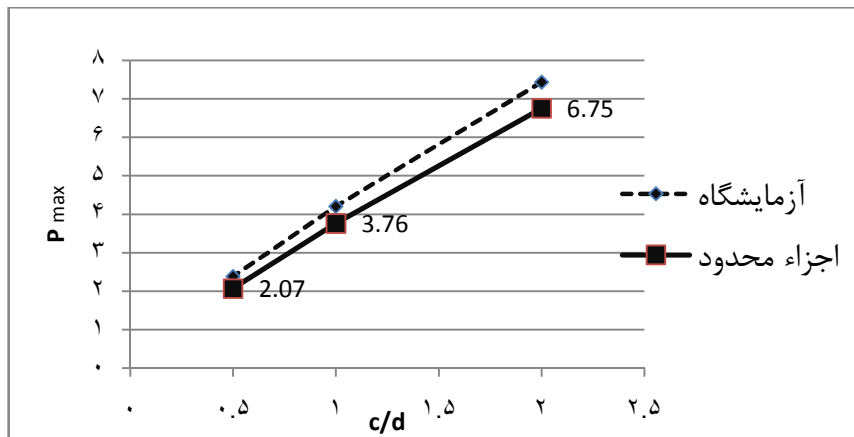
الگوهای ترک در حالت شکست نهایی ، برای سه مدل ارائه شده در شکل ۵- ۱۸ نمایش داده شده است. نکته قابل توجه حاکی از این موضوع است که با افزایش نسبت ضخامت پوشش بتنی به قطر میلگرد ، ترکها تمایل زیادی به پیشرفت در عمق نمونه را دارند ، که این موضوع با مود های شکست نمونه های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد.



شکل ۵-۱۸ ترک نهایی ناشی از فشار داخلی

## ۵-۶-۲- مقایسه فشار داخلی لازم جهت شکست نهایی

فشار لازم جهت بروز ترک نهایی در مدل اجزاء محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۹-۵ نمایش داده شده است. می توان پی برد که این فشار در مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی غالباً با افزایش نسبت ضخامت پوشش به قطر میلگرد به صورت خطی افزایش می یابد.

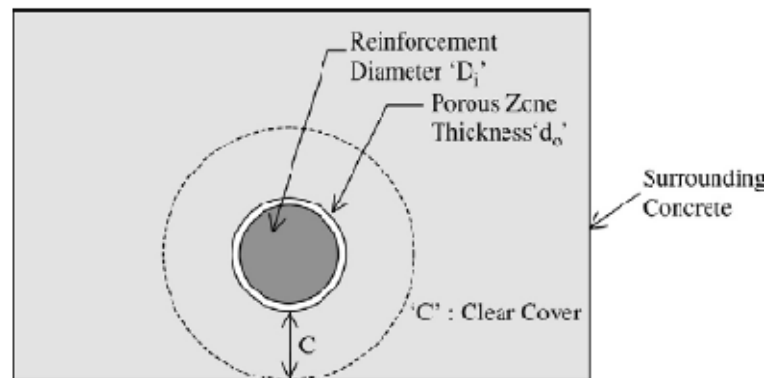


شکل ۱۹-۵ مقایسه نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی

همان طور که مشخص است نتایج به دست آمده از روش اجزاء محدود از مقادیر آزمایشگاهی کمتر می باشد. دلیل این موضوع را می توان اینطور بیان نمود که در عمل بدلیل وجود حباب های هوا در بتن ، یک انبساط آزاد محصولات خوردگی در فضاهای خالی وجود دارد که در مدل اجزاء محدود منظور نشده است.

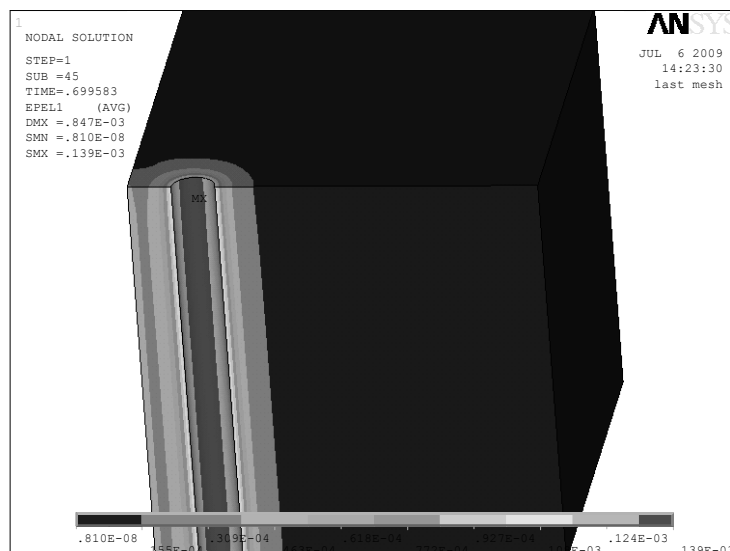
## ۵-۷- ساده سازی مدل

با توجه به نتایج تحلیل های مختلف صورت گرفته توسط محققین و نتایج آزمایشگاهی که همگی حاکی از آنست که شکست نهایی ناشی از انبساط خوردگی در جهت ضخامت کم ؛ که همان ضخامت پوشش بتنی است؛ اتفاق می افتد . پس به منظور ساده سازی در محاسبات می توان مدل انتخابی را یک استوانه جدار ضخیم در نظر گرفت که شعاع خارجی این استوانه نشاندهنده مقدار ضخامت پوشش بتن می باشد. (شکل ۵-۲۰)



شکل ۵-۲۰ نحوه ساده سازی مدل در راستای ضخامت کم [۱۸]

همچنین با مشاهده تغییرات کرنش در جهت Z برای مدل ، مشخص میشود تغییرات کرنش در گام نهایی بارگذاری بسیار ناچیز بوده و به جهت کم کردن حجم محاسبات می توان مسأله را به صورت کرنش مسطح حل کرد. شکل ۵-۲۱ نشان دهنده کانتور کرنش در جهت Z برای نمونه با نسبت  $C/d$  برابر یک می باشد.



شکل ۵-۲۱ کانتور تغییرات کرنش در جهت Z

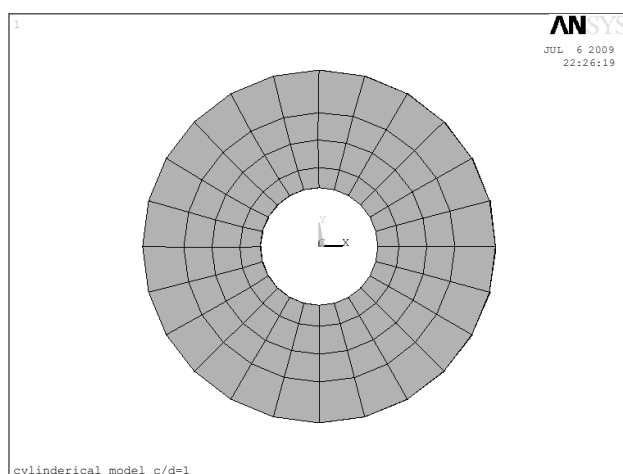
بدلیل اینکه هیچ المان دو بعدی که قابلیت ترک خوردن را داشته باشد ، در نرم افزار Ansys وجود ندارد ، پس برای فرضیه کرنش مسطح می توان ضخامت مدل را طوری در نظر گرفت که در راستای Z تعداد المان های سه بعدی solid 65 واحد بوده و سپس کلیه گره های مدل را در جهت Z

گیر دار کرد. در ادامه به آنالیز حساسیت مدل برای فرضیات ساده کننده تحلیل ، برای حالت استوانه ای می پردازیم.

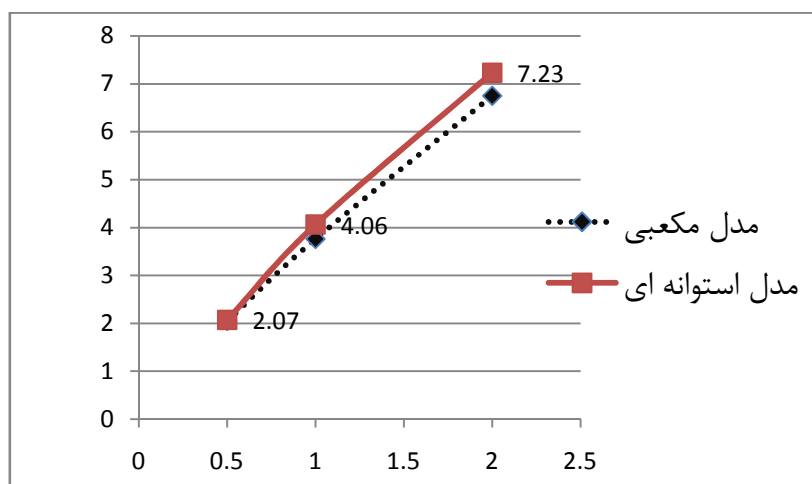
#### ۵-۷-۱- مقایسه نتایج مدل ساده سازی شده با مدل اصلی

#### ۵-۷-۱-۱- مدل ساده شده استوانه ای

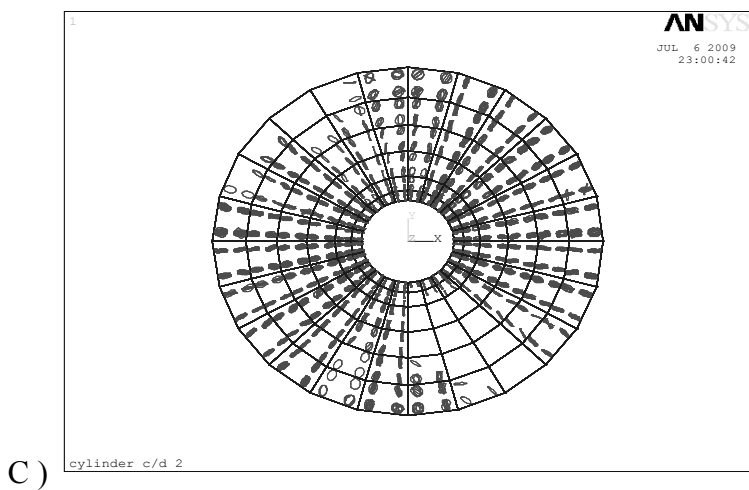
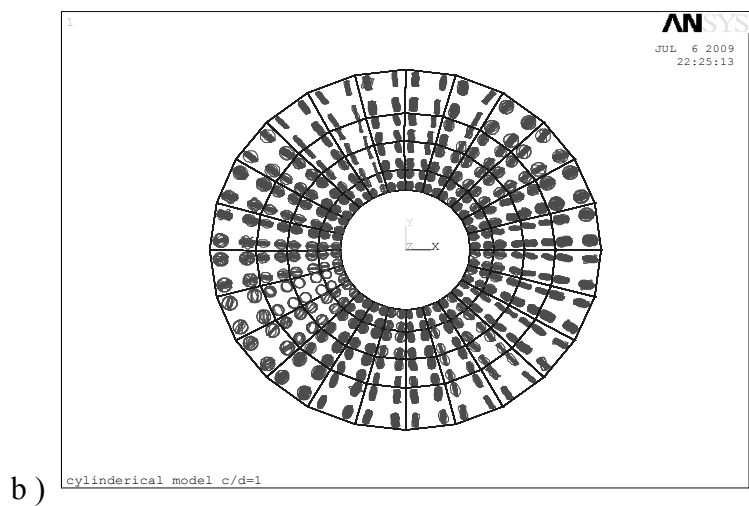
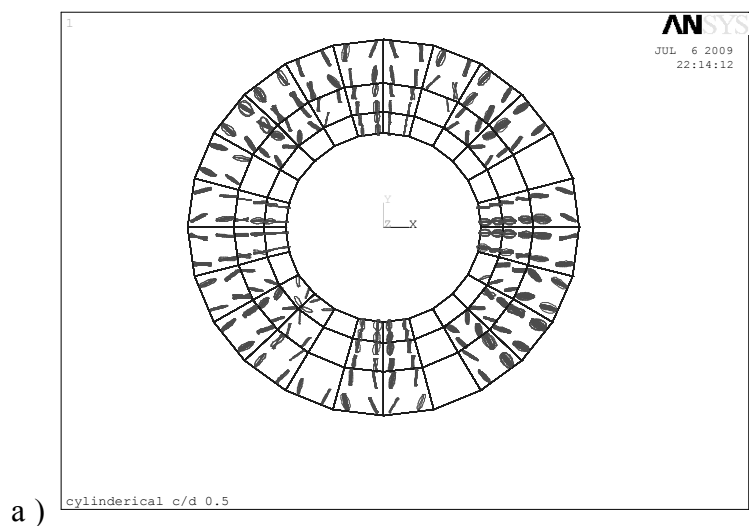
در این مدل بافرضیات ساده کننده ذکر شده ، به بررسی فشار لازم جهت بروز ترک نهایی پرداخته شد که نتایج زیر بدست آمد.



شکل ۵-۲۲ مدل ساده شده انتخابی برای  $c/d=1$



شکل ۵-۲۳ مقایسه نتایج مدل استوانه ای و مکعبی

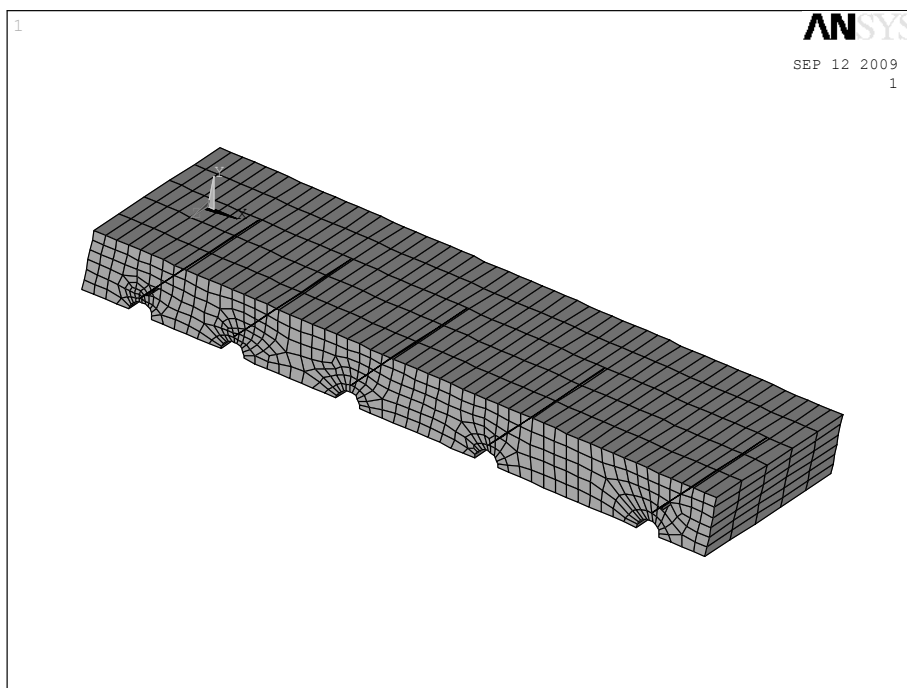


شکل ۵-۲۴ نمای شماتیک از ترک خوردن نمونه های استوانه ای (a, c/d=0.5 (b, c/d=1 (c, c/d=2

۵-۸- موقعیت قرار گیری آرماتور

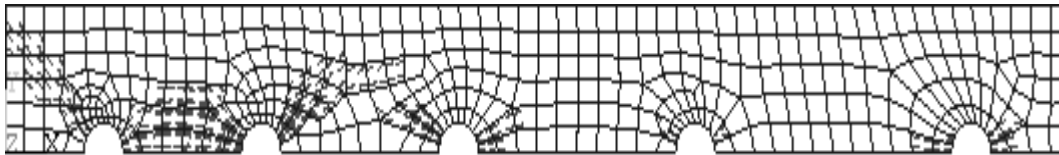


پس از بدست آمدن نتایج معتبر از مدل تحلیلی ارائه شده در قسمت پیشین ، اینک به بررسی موقعیت قرارگیری آرماتورها در کنار یکدیگر پرداخته می شود. بدین منظور یک نمونه بتنی به ابعاد ۲۱۶ در ۴۰ در ۱۵۰ میلیمتر و خواص مکانیکی مشابه قبل استفاده شده است. در این مدل سوراخهایی به قطر ۸ میلیمتر و ضخامت پوشش بتنی ۱۶ میلیمتر ( $c/d=2$ ) با فواصل باگامهای متغیر ۸ میلیمتر از ۲۴ الی ۴۸ در نظر گرفته شده است. همچنین مانند بخش قبلی جهت کم کردن حجم محاسبات و با توجه به تقارن مسأله در دو جهت  $Y$  و  $Z$  ربع نمونه مدلسازی شده است. جزییات بیشتر و همچنین نحوه مش بندی در شکل ۵-۲۵ آمده است.



شکل ۵-۲۵ مدل موقعیت آرماتور به همراه مش بندی

پس از اعمال بارگذاری مشابه بخش گذشته این نتیجه بدست آمد که میزان بار لازم جهت بروز ترک نهایی از میزان نمونه مشابه بانسبت  $c/d=2$  کمتر ( $p_{max}=5.95$ ) می باشد. همچنین در این مدل ترک نهایی ترک سطحی نبوده بلکه ترک حاصل بین دو آرماتور با فاصله ۲۴ می باشد. نحوه ترک خوردن نمونه در شکل ۵-۲۶ آمده است.



شکل ۵-۲۶ الگوی ترک برای نمونه با موقعیت قرار گیری آرماتور مختلف

از شکل ۵-۲۵ و نتایج بدست آمده از تحلیل اینگونه می توان استدلال نمود که در سازه های بتنی با فواصل آرماتور کم ، در اثر خوردگی آنچه که باعث به پایان رسیدن عمر مفید سازه ها می گردد ورقه ورقه شدن پوشش بدلیل بروز ترکها در فواصل بین آرماتور می گردد. استنباط کمی دیگری که می توان از تحلیل گرفت این است که جهت جلوگیری از ورقه شدن پوشش بتنی فاصله بین آرماتور ها باید حد اقل ۲ برابر ضخامت پوشش باشد.

#### ۵-۹- محاسبه عمر مفید

همان گونه که قبلاً ذکر گردید با توجه به مدل Tutti ، عمر مفید سازه های بتن آرمه در معرض خوردگی آرماتور شامل مدت زمان شروع خوردگی و مدت زمان پیشروی خوردگی تا رسیدن آسیبهای ناشی از خوردگی به حد قابل قبول می باشد . لذا با فرض زمان ترک خوردگی پوشش به عنوان پایان عمر مفید سازه ها می توان با توجه به نمونه های ارائه شده در این پایان نامه مدت زمان پیشروی خوردگی تا بروز ترک نهایی را تخمین زد و با اضافه نمودن این زمان به زمان شروع خوردگی که با استغاده از مدل های پیش بینی شروع خوردگی آمده است عمر مفید سازه ها را تخمین زد.

لذا با این هدف می توان با استفاده از مدلی تحلیلی ، بر ای سازه های مختلف با مشخصات سازه ای متفاوت و در معرض خوردگی با دانسیته جریان های متفاوت ، مجموعه نمودار هایی بدست آورد و با مراجعه به این نمودار ها برای هر سازه خاص با مشخصات مربوطه و تحت خوردگی با دانسیته جریان مشخص ، مدت زمان ترک خوردگی را بدست آورد . که با اضافه نمودن این زمان به

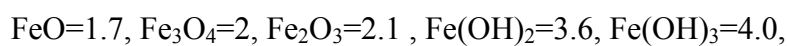
مدت زمان تخمین زده شده برای شروع خوردگی توسط مدل های ارائه شده پیش بینی خوردگی محققین می توان عمر مفید سازه را تخمین زد.

## ۵-۹-۱ مدت زمان پیشروی خوردگی

همان گونه که قبلاً ذکر گردید مرحله پیشروی خوردگی مدت زمانی است که سازه کارآیی خود را در اثر آسیبهای ناشی از خوردگی از دست می دهد. برای تعیین زمان ترک خوردگی از روابط مدل ارائه شده توسط Andrade et al که در فصل قبل توضیح داده شد استفاده می نماییم. وی و همکاران میزان ریسک خوردگی را به چهار سطح تقسیم نمودند که با توجه به سرعت خوردگی به صورت زیر بیان شده است.

|       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| ناچیز | $i_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$       |
| پایین | $0.1 < i_{corr} < 0.5 \mu A/cm^2$ |
| متوسط | $0.5 < i_{corr} < 1.0 \mu A/cm^2$ |
| بالا  | $i_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$       |

بسته به سطح اکسیداسیون، آهن ممکن است تا شش برابر افزایش حجم داشته باشد. تولیدات معمول خوردگی مواد زیر هستند که نسبتهای حجمی زیر را دارند:



افزایش حجم واقعی ناشی از خوردگی به سهمی که هر یک از محصولات فوق در تولیدات خوردگی دارند بستگی دارد. تولید هر یک از مواد فوق بستگی به شرایط محیطی اطراف یعنی تمرکز

یون کلرید، اکسیژن در دسترس و رطوبت دارد. بنابراین مشخصاً نمی‌توان گفت که افزایش واقعی حجم به چه میزان می‌باشد.

در مدلسازی اثرات مکانیکی خوردگی رسم بر این است که چگالی محصولات خوردگی (pr) را کسر ثابتی از چگالی فولاد می‌گیرند.

$$\rho_r = \rho_s / \gamma \quad 2 < \gamma < 4 \quad \text{تکراری}$$

نرخ مصرف آهن بستگی به شدت جریان خوردگی دارد، این فرآیند توسط رابطه فارادی بیان می‌شود:

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{I_{corr} A}{nF}$$

که از آن داریم:

$$\frac{dM_s}{dt} = 2.893 * 10^{-4} I_{corr}$$

با انتگرالگیری از رابطه فوق جرم کل آهن مصرف شده از ابتدای خوردگی تا زمان t به دست می‌آید. جرم کل زنگ تولید شده نیز با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_r = \frac{M_s}{r_m}$$

که در آن

$$r_m = 0.523 \approx 0.622$$

قانون فارادی پایه و اساس مدلهایی است که با فرض سرعت ثابت مصرف آهن و تولید زنگ ارائه شده‌اند که برای  $I_{corr}$  ثابت، قانون فارادی افزایش خطی جرم محصولات خوردگی در مقابل زمان را به دست می‌دهد.

مدل اصلاح شده Andrade et al رابطه زیر را برای محاسبه میزان کاهش حجم و کاهش جرم فولاد در اثر خوردگی ارائه نمود:

$$\Delta V_s = 3.6466 * 10^{-11} \pi D_b i_{corr} \Delta t$$

تکراری

$$\Delta M_s = 2.862 * 10^{-7} \pi D_b i_{corr} \Delta t$$

که در این روابط

Db: قطر آرماتور به متر

$i_{corr}$ : دانسیته جریان به آمپر بر متر مربع

t: زمان به ثانیه می‌باشد.

برای محاسبه کاهش حجم از نمونه های تحلیل شده استوانه ای استفاده می نماییم. بدین ترتیب که از روی کانتور تغییر مکان شعاعی اطراف سوراخ نمونه های تحت فشار داخلی میزان تغییر مکان شعاعی هر یک از نمونه ها بدست آمده که از روی آن با توجه به رابطه و شکل زیر می توان میزان کاهش حجم آرماتور را محاسبه نمود.

$$\pi (r_0^2 - r_c^2) \gamma = \pi (r_r^2 - r_c^2)$$

۳۱-۵

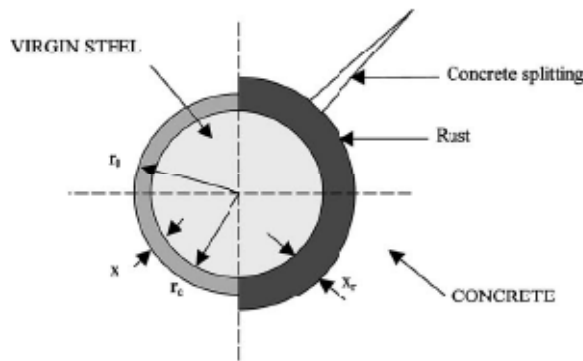
که در آن :

$r_0$  شعاع آرماتور اصلی

$r_c$  شعاع آرماتور کاهش یافته بعد از خوردگی

$r_r$  شعاع آرماتور بعد از افزایش حجم

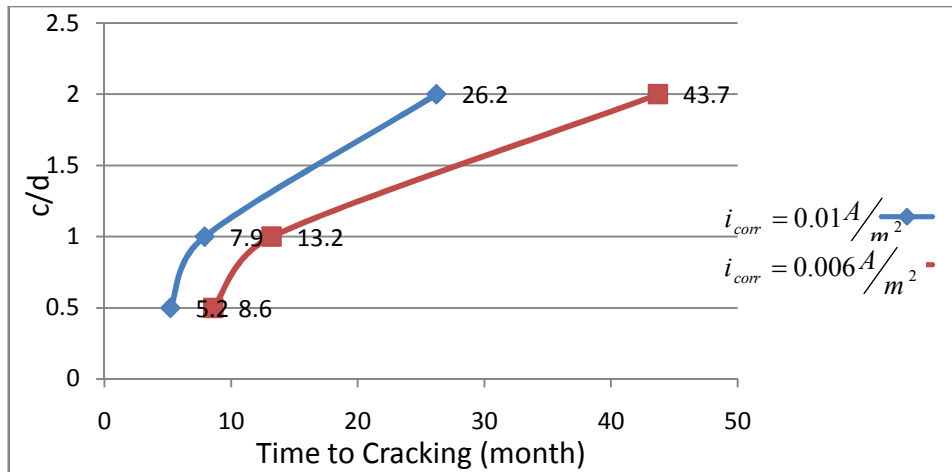
$\gamma$  و میزان تغییر حجم بسته به نوع اکسیداسیون



شکل ۵-۲۷ تکراری: مدل ارائه شده توسط Andrade et al

در رابطه با لا پس از قرار دادن  $r_r$  از روی کانتور تغییر مکان شعاعی نمونه ها با مشخصات مکانیکی متفاوت می توان اندازه  $r_c$  را بدست آورد ؛ که با در دست داشتن این مقدار میزن کاهش حجم آرماتور نیز مشخص گردیده و با توجه به رابطه ارائه شده توسط Andrade et al می توان به زمان لازم برای بروز ترک نهایی در نمونه ها رسید.

با در نظر گرفتن  $\gamma = 2$  می توان مدت زمان پیشروی ترک تا ترک خوردگی نهایی را برای نمونه های استوانه ای با قطر میلگرد ۸ میلیمتر و ضخامت پوشش ۴ الی ۱۶ میلیمتر برای ریسکهای خوردگی متفاوت بدست آورد.



شکل ۵-۲۸ اثرات نسبت c/d و سرعت خوردگی بر زمان ترک خوردگی نهایی

در شکل ۵-۲۸ تأثیر c/d و میزان ریسک خوردگی در مدت زمان ترک خوردگی نهایی نشان داده شده است. در این شکل در عنوان نمودارها  $i_{corr}$  نشاندهنده جریان به آمپر بر متر مربع می باشد که با توجه به تعاریف Andrate et al عدد ۰/۰۱ برای خوردگی با ریسک بالا و عدد ۰/۰۰۶ برای خوردگی با ریسک متوسط در نظر گرفته شده است. همانگونه که از شکل پیداست در نسبتهای c/d کمتر از ۲ در نظر گرفته شده، زمان ترک خوردگی برای سازه های در معرض خوردگی شدید و متوسط فوق العاده پایین می باشد که از این مطلب می توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش ضخامت پوشش بر زمان ترک خوردن بسیار اساسی می باشد. از مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین می توان به این نتیجه رسید که اندازه های بدست آمده توسط این روش به نسبت مقادیر آزمایشگاهی با مشخصات مکانیکی تقریباً مشابه اندکی محافظه کارانه تر می باشد که می توان این طور استنباط نمود که اولاً از انبساط آزاد محصولات خوردگی به دلیل وجود حباب های هوا در بتن صرف نظر شده و ثانیاً مقداری از محصولات خوردگی به داخل ترکها نفوذ می نماید که در روش در نظر گرفته در این پایان نامه تمامی محصولات خوردگی ایجاد شده از ابتدا در نمونه ایجاد تنش می نماید.

آنچه که مسلم است این است که زمان های بدست آمده از این روش در بر گیرنده مرحله پیشروی خوردگی بوده و در آن زمان مرحله اول یا مرحله شروع خوردگی در نظر نگرفته شده است . پس برای بدست آوردن عمر مفید این گونه سازه ها باید اطلاعات دقیقی نیز از زمان ذکر شده در دست باشد ، تابتوان عمر مفید این سازه ها را پیش بینی نمود.

#### ۵-۹-۲ بررسی حساسیت روش نسبت به پارامترهای مختلف

حال که میزان کارایی روش مشخص گردید باید دید که حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهای مختلف نظیر مدول الاستیسیته بتن ، ضریب پوآسون ، مقاومت کششی بتن و تغییر در نسبت  $c/d$  به چه اندازه می باشد . نحوه تغییر در پارامتر های فوق به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

نسبت  $c/d$  برای مقادیر ۳، ۴ و ۵ تغییر داده می شود.

مدول الاستیسیته بتن از مقدار ۲۸۰۰۰ مگا پاسکال به ۲۲۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ تغییر داده می شود.

ضریب پوآسون از مقدار اولیه ۰.۲ به ۰.۲۵ و ۰.۱۵ تغییر داده می شود.

مقاومت کششی بتن از مقدار اولیه ۳/۲ به ۲/۵ و ۳/۸ تغییر داده می شود.

مقدار ضریب افزایش حجم از ۲ به ۱/۶ و ۳ تغییر داده می شود.

آنالیز این تغییرات در اشکال ۵-۲۹ الی ۵-۳۱ آورده شده است. همانگونه که از اشکال مشخص

است روش نسبت به تغییر ضخامت پوشش به قطر آرماتور بسیار حساس می باشد

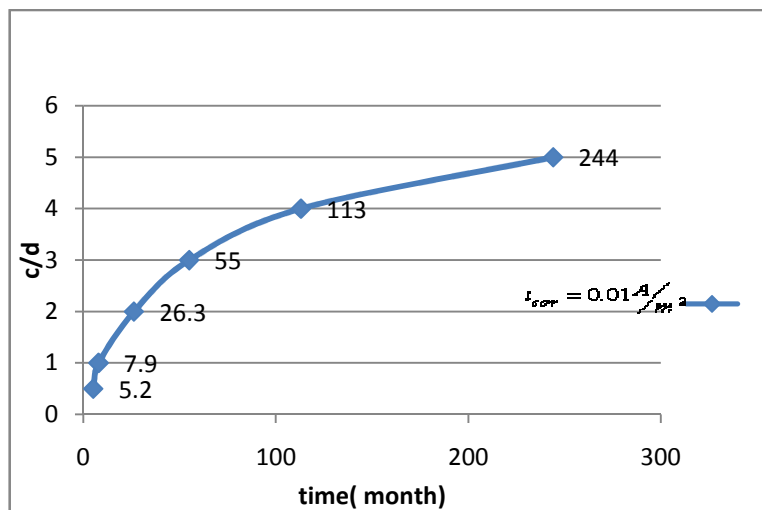
و هر چه ضخامت کمتر می شود مدت زمان ترک به شدت کاهش می یابد. مدل نسبت به تغییر

در مدول الاستیسیته اولیه نیز حساس می باشد و هر چه مدول الاستیسیته کاهش می یابد زمان

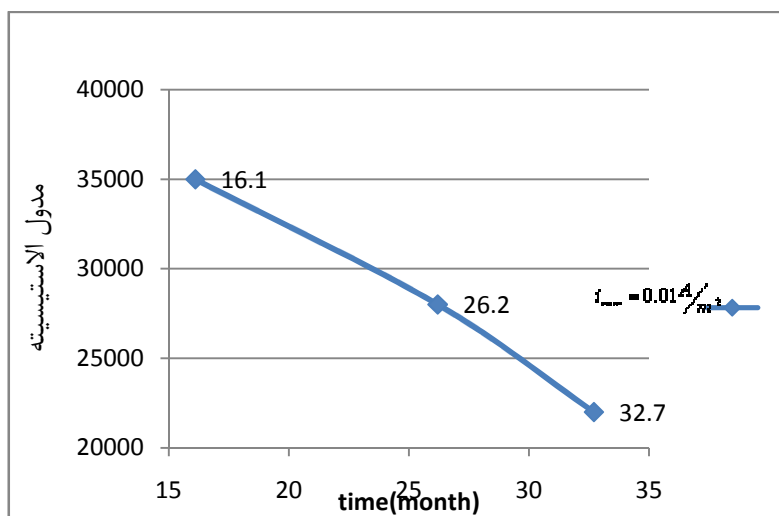
ترک خوردن افزایش می یابد. حساسیت مدل نسبت به ضریب افزایش حجم نیز قابل توجه بوده و هر



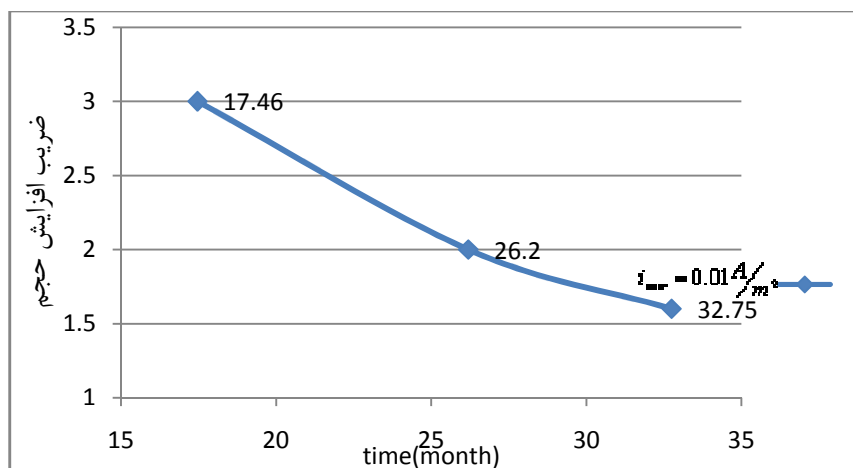
چه این ضریب کوپکتر در نظر گرفته می شود زمان ترک خوردگی افزایش می یابد. همچنین نتایج این روش نسبت به تغییر در مقاومت کششی بتن و ضریب پواسون حساسیت زیادی نشان نمی دهد که از آوردن اشکال آنها صرف نظر شده است.



شکل ۵-۲۹ بررسی تأثیر  $c/d$  بر زمان ترک خوردگی



شکل ۵-۳۰ بررسی تأثیر مدول الاستیسیته بر زمان ترک خوردگی



شکل ۵-۳۱ بررسی تأثیر ضریب افزایش حجم بر زمان ترک خوردگی

## ۵-۱۰- نتیجه گیری

در این فصل مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی تحت فشار داخلی جهت دستیابی به مکانیزم ترک خوردگی پوشش بتنی ارائه شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. از نتایج بدست آمده متوجه می شویم که ضخامت پوشش بتنی رابطه ای خطی با فشار لازم جهت شکست نمونه بتنی داشته ، و با در نظر گرفتن یک ضریب ثابت بین این دو پارامتر می توان نتایج را برای نمونه های با ضخامت های بیشتر یا کمتر نیز تعمیم داد. همچنین جهت سهولت در تحلیل می توان نمونه مکعبی را در راستای ضخامت کم به صورت استوانه جدار ضخیم در نظر گرفت که نتایج حاصل از آن تطابق خوبی با مدل مشابه مکعبی دارند. جهت مشاهده تأثیر موقعیت قرار گیری آرماتور مدلی ارائه گردید و از آن به این نتیجه رسیدیم که در سازه های بتنی با فاصله آرماتور کم ، خوردگی باعث ورقه ای شدن سازه می گردد. در ادامه به بررسی عمر مفید این نمونه ها با در دست داشتن روابط ارائه شده توسط دانشمندان و نتایج حاصل از تحلیل پرداخته شد. سپس آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف بدست آمد که از آن می توان به این نتیجه رسید که مهمترین عامل در بالابردن عمر مفید سازه های در معرض خوردگی با درجات خوردگی متفاوت طراحی سازه ها با نسبت ضخامت پوشش بتنی به قطر آرماتور (c/d) بالایی باشد.

## فصل ششم:

نتیجه گیری

## فصل ششم : نتیجه گیری

در این پایان نامه مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی تحت فشار داخلی جهت دستیابی به مکانیزم ترک خوردگی پوشش بتنی ارائه شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته و لذا از این نتایج به همراه یکسری روابط از پیش تعریف شده توسط محققین، می توان به پیش بینی زمان ترک خوردگی در درجات مختلف خوردگی در طراحی سازه های جدید و همچنین عمر مفید سازه های موجود استفاده نمود.

از نتایج بدست آمده متوجه می شویم که در ترک خوردن پوشش بتنی مهمترین عامل نسبت  $c/d$  یا بعبارت دیگر ضخامت پوشش به قطر آرماتور می باشد. با افزایش  $c/d$  فشار لازم جهت بروز ترک نهایی به طور خطی افزایش می یابد. به طوریکه با در نظر گرفتن یک ضریب ثابت با مقدار  $1/8$  می توان به فشار نهایی نمونه های با نسبت های  $c/d$  بالاتر با در صد خطای کمتر از ۱۰ درصد نیز دست یافت. اگر این نسبت به اندازه کافی بزرگ باشد ( بزرگتر از ۳ ) ، میتوان انتظار داشت که در درصدهای بالای خوردگی هم پوشش مقاومت کرده و ترک نخورد.

جهت دستیابی به مدلی که دارای حجم محاسبات کمتری باشد ، می توان نمونه های بتنی را به صورت یک استوانه جدار ضخیم مدلسازی کرد. به طوری که اندازه جداره این استوانه نشاندهنده ضخامت پوشش باشد.

همچنانکه از نتایج مدل ارائه شده مشاهده می گردد پارامترهایی نظیر نسبت ضخامت پوشش به قطر

آرماتور ، مدول الاستیسیته بتن ، سرعت خوردگی و نوع محصولات خوردگی در طولانی شدن عمر مفید این سازه ها از اهمیت زیادی برخوردارند. لذا در آیین نامه های طراحی بایستی ضوابط حد اقل و حد اکثر برای این پارامترها ارائه شود تا بتوان با انتخاب این پارامترها در طراحی سازه به عمر مفید مورد نظر دست یافت.

مهم ترین عامل در بالا بردن عمر مفید سازه های در معرض خوردگی شدید و یا متوسط تأمین ضخامت پوشش مناسب جهت آنها می باشد ؛ برای مثال برای مدل ارائه شده در این پایان نامه با فرض اینکه عمر نمونه در مرحله شروع خوردگی ۱۸ سال پیش بینی شود، عمر مفید نمونه ای با نسبت  $c/d=4$  در شرایط خورنده شدید به بیش از ۲۸ سال خواهد رسید

. بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق در طراحی سازه های بتنی علاوه بر انتخاب ضخامت پوشش مناسب می بایست فاصله بین آرماتور های طولی حداقل از ۲ برابر ضخامت پوشش بیشتر باشد تا خوردگی باعث ورقه ای شدن سازه نشود

راه کار های آینده :

- در نظر گرفتن انبساط آزاد محصولات خوردگی در فضای خالی بین آرماتور و بتن ، بدلیل وجود حباب های ریز هوا.

- در نظر گرفتن اثر آرماتور های عرضی در مدلسازی با تعریف المانی با مشخصات خاص در محل آرماتور عرضی.

- مطالعه مکانیزم ترک خوردن پوشش در محل آرماتور های نزدیک به هم.

- تلاش در متمرکز نمودن ترک ها در نقاط خاص و اعمال نرم شوندگی تنها در این نواحی.

- مطالعه مکانیزم مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور در درجات مختلف خوردگی.

- مدلسازی آزمایشات خوردگی تسریع شده توسط نرم افزار Ansys .

- مدل سازی نمونه های بتنی توسط نرم افزار های تخصصی تحلیل ترک مانند Franc2D ،

Cracker و .... .

## Reference.....مراجع

- [1]- Bentur .A, Diamond .n.s & Berke .n.s ***"Steel corrosion in concrete"*** E&FN SPON, 1997.
- [2]- Williamson, S.J, and Clark L.a , ***"Pressure to cause Cover Cracking of Concrete due to Reinforcement Corrosion"*** Magazine of Concrete Research, 2000, 52 , No.6 , Dec, 455-467.
- [3]-Morinaga,s., ***"Prediction of Service Life of Reinforced Concrete Building Based on The Rate of Corrosion"*** Institute of Technology , Shimuzu Corporation,1988 , Special Report No 23.Saeki, N., et al , ***"Control of Rust Damage of Reinforced Concrete in Corrosive Environment"*** , ACI Publication SP 109-8, 1980, pp 163-177.
- [4]- Ghandehari, M., Zulli, M., shah, s.p., ***"Influence of Corrosion on Bond Strength in Reinfoed Concrete"***, Proceeding of International Conference, 1999.
- [5]- Saeki, .N, et al ***"Control of Rust Damage of Reinforced Concrete in Corrosive Environment"***, ACI Publication Sp 109-8, 1980. Pp163-177.
- [6]- Mangat, Pritpal, S., Elgarf, Mahmoud, S., ***"Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement"*** ACI Structural Journal, V.96, NO.1, January-February 1999, 149-161.
- [7] – Amleh, L. and Mirza, S., ***"Corrosion Influence on Bond between Steel and Concrete"*** ACI Structural Journal, V.96, no.3, May-June 1999, 415-423.
- [8]- Cabera, J., and Ghoddussi, P., ***"The Effect of Reinforcement Corrosion on Strength of steel/Concrete Bond."*** Proceeding of International Conference,Riga-latvia, 1999, pp10-11 to 10-24.
- [9]- Coronelli, d., ***"Corrosion cracking and Bond Strength Modeling for Corroded Bar in Reinforced Concrete"***, ACI Structural Journal, V.99, no.3, May- June 2002.

[10] بابایی.حسین، ۱۳۸۵، "بررسی تأثیر میزان خوردگی آرماتور بر رفتار لرزه ای ستون های بتن مسلح تحت اثر بارهای رفت و برگشتی". رساله دکتری، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف

[11] Tutti, k, **"corrosion of Steel in Concrete"** (tech rep). StockholmSwedish st, Cement & Concrete Research Institute, 1983,469 pp.

[12] Martin-Perez, b, **"Service Life modeling of RC Highway Structures Exposed to Cholorides"** Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1999,

[13] Bhargava, K., Ghoshb, A.K., Yasuhiro M, Ramanujama, S, **"Model for Cover Cracking due to Rebar Corrosion in RC Structures"** Engineering Structures, Elsevier, 2006 , pp1093-1109.

[14] Bazant, z, **"Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures- Application"** ASCE Journal of the Sructural Division , 1979b, 105(st6), pp 1155-1166.

[15]Rodriguez, J, Ortega, L, Garcia, A, **"Corrosion of Reinforcing Bars and Service Life of R/C Structures: Corrosion & Bond Deterioration"**. Concrete across Borders, Proceeding Odense, Denmark, 1994, V2, pp.315-326.

[16]Liu, Y., Weyers, R.E., **" Modeling the Time to Corrosion Cracking in Chloride Contaminaed Reinforced Concrete Structures"** ACI Material Journal,1998, 95(6),pp.675-681.

[17] Liu, Y, **" Modeling the Time to Corrosion Cracking in Chloride Contaminaed Reinforced Concrete Structures"** Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, Virgina Polytechnic Institute and university, 1996.

[18]Panatazopoulou, S., J., and Papoulia, k., d., **"Modeling Cover Cracking due to Reinforcement Corrosion in RC Structures"** Journal of Engineering Mechanics, ASCE, vol 127, No. 4, April 2001, pp.342-351.

[19]Coronelli, d., Pietro, G.G., **"AMechanical Model for Bond Strength of Reinforcement in Concrete"** 2002

- [20] Li S., Wang M., Li, S., **"Model for cover cracking due to corrosion expansion And uniform stresses at infinity"** Applied Mathematical Modeling Journal, Vol 32, (2008), pp1436-1442.
- [21] Du Y.G., Chan A.H.C., Clark L.A. **" Finite element analysis of the effects of radial expansion of corroded reinforcement"** Computers and Structures Journal, Vol 84. (2006) pp 917-929.
- [22] جاہد مطلق. حمیدرضا، نوبان. محمد رضا و اشراقی. محمد امین، ۱۳۸۳، "اجزاء محدود (ANSYS) " چاپ دوم انتشارات دانشگاه تهران.
- [23] شعبانعلی، محمد رضا، ۱۳۸۲، "تحلیل المان محدود به کمک ANSYS. " ویرایش دوم
- [24] اصفهانی. محمد رضا، ۱۳۸۶، " مکانیک شکست بتن " چاپ اول
- [25] ANSYS User's Manual, 11th Ed., SAS IP Inc., 2007.
- [26] Chen, W. F., **"Plasticity in Reinforced Concrete"**, McGraw-Hill, 1982, New York.
- [27] Desayi, P. and Krishnan, S., 1964, **"Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete"** Journal of the American Concrete Institute, 61, pp. 345-350.
- [28] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1997, **"Mechanics of Materials"**, PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts.

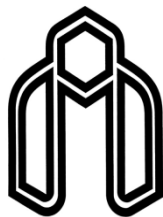


## **Abstract**

Service life of concrete structures in some environments is limited by the corrosion of rebars. In fact, the corrosion of reinforcement is the oxidation of steel and formation corrosion products such as hydrated magnetite and ferrous oxides, some of which occupy much greater volume than the original iron. These products cause internal pressure and cause cracking in concrete cover. The end of service life of concrete structures is usually considered as the cracking and spalling of concrete cover. At this stage, reinforcing steel is directly subjected to severe corrosion condition and bond strength is considerably decreased. It can be seen that the estimation of cracking time in concrete structures is very important in the design of these structures based on service life.

In this thesis first, a lab specimen is modeled using finite element method, in ANSYS software. After applying internal pressure, due to the formation of corrosion products, on the existing holes in the model, the required pressure to cause cracking is obtained. In this study concrete behavior was considered as multi linear isotropic hardening in compression and smeared crack in tension. The obtained results were in good agreement with the lab results and showed that in models with similar geometry and mechanical properties, the more the thickness of concrete cover, the more required pressure for cracks to appear. In the next step, based on some existing models and the FE model developed in the first step of study, the required time to produce a crack was evaluated. It was found that the main effective parameters on time to cracking is the thickness of concrete cover, rebar diameter, modulus of elasticity, kind of corrosive products and corrosion intensity.

**Keywords:** corrosion, finite element analysis, reinforced concrete, service life, time to cracking



Shahrood University of Technology

**Faulty of Civil Engineering**

Subject

# **Finite Element Analysis of Crack Due to Corrosion in Reinforced Concrete Beams**

By:

Morteza Habibi

Supervisor:

Dr. F. Alaei

Advisor:

Dr. V. Kalatjari

Summer 2009