



## بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر پوشش، مقاومت فشاری و فشار ناشی از خوردگی آرماتور بر شروع ترک خوردگی در سازه‌های بتن آرمه

محمود میری<sup>۱</sup>، مهراله رخسانی مهر<sup>۲\*</sup>، فهیمه میری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران

<sup>۲</sup> گروه عمران، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد سازه، زاهدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ آذر ۱۳۹۳  
بازنگری: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۲۱ اسفند ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

خوردگی آرماتور  
پوشش بتن  
ترک خوردگی بتن  
مدل‌های عددی

**چکیده:** سازه‌های بتن مسلح در مناطق خورنده، معمولاً از خرابی به علت خوردگی آرماتورها، که می‌تواند ناشی از کربنات و یا نفوذ یون‌های کلر باشد، رنج می‌برند. افزایش حجم محصولات خوردگی نسبت به فولاد اولیه باعث ایجاد ترک در سازه شده، که می‌تواند منجر به تسریع کاهش عمر مفید آن شود. در نتیجه زمان شکل‌گیری ترک‌ها یک پارامتر اصلی در عملکرد سازه بوده و مهم است که بتوان آن را با دقت کافی پیش بینی کرد. به منظور بررسی دقت مدل‌های تحلیلی مبتنی بر مدلسازی رفتار غیرخطی بتن و تعیین محل خوردگی آرماتور، در این تحقیق از مدل اجزاء محدود استفاده شده است. در ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی ساخته شده و پس از نگهداری اولیه، تحت شرایط خوردگی تسریع شده قرار گرفته‌اند. محل و الگوی ترک مدل‌ها در حین آزمایش و تا مرحله شکست کامل نمونه‌ها بطور دقیق ثبت شده‌اند. در مرحله بعد مدل عددی نمونه‌های فوق با استفاده از اجزای محدود ساخته شده و نتایج حاصل از روش‌های آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پس از اطمینان از صحت مدل‌های عددی ساخته شده، اثر پارامترهای مختلف بر ترک خوردگی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که پوشش آرماتور و مقاومت فشاری بتن از عوامل موثر در شروع ترک خوردگی می‌باشند و با افزایش این پارامتر فشار داخلی ناشی از محصولات جهت شروع ترک خوردگی بیشتر خواهد شد.

### ۱- مقدمه

خوردگی آرماتور یکی از عوامل عمده زوال سازه‌های بتن آرمه، مانند پل‌ها، پارکینگ خودرو و سازه‌های ساحلی است. این پدیده می‌تواند باعث کاهش سطح مقطع آرماتور، ترک خوردگی، پوسته‌شدن بتن، کاهش مقاومت چسبندگی و تغییر در رفتار چسبندگی لغزشی<sup>۱</sup> بین بتن و آرماتور شود که تمامی این موارد در نهایت منجر به عملکرد نامناسب سازه بتنی می‌شوند [۱،۲].

مشهودترین نتیجه خوردگی آرماتور کاهش سطح مقطع آرماتور است. هر چند در محیط‌های کربناتی خوردگی به صورت یکنواخت رخ می‌دهد اما خوردگی کلیدی معمولاً به صورت موضعی است که به خوردگی حفره‌ای<sup>۲</sup> معروف بوده و باعث کاهش چشمگیر در سطح مقطع آرماتور می‌شود، که بعضاً بدون مشاهده اثر قابل ملاحظه‌ای از خوردگی در سطح بتن، رخ می‌دهد [۳].

علاوه بر آن خوردگی آرماتور باعث کاهش چسبندگی بین بتن و آرماتور و اثر آن سبب کاهش مقاومت تیرها، دال‌ها، و سایر اجزای سازه‌های

بتن آرمه می‌گردد [۴،۵]. در واقع این مسئله در دو گام رخ می‌دهد: در گام اول محصولات خوردگی روی سطح آرماتور جمع شده و باعث افزایش قطر آن می‌شوند که منجر به افزایش تنش‌های شعاعی بین بتن و آرماتور و در نتیجه افزایش مولفه اصطکاکی چسبندگی می‌گردد [۲]. اما در گام بعدی ترک‌های طولی ایجاد می‌شود که محصورشدگی آرماتور را کاهش داده و در نتیجه مقاومت چسبندگی را کاهش می‌دهد. با افزایش خوردگی، مقاومت چسبندگی نیز به میزان بیشتری کاهش می‌یابد.

به طور کلی می‌توان گفت در خصوص خوردگی تحقیقات به سه شیوه کلی آزمایشگاهی، تئوری و شبیه‌سازی عددی انجام شده است. برخی مطالعات با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با بکارگیری نرم‌افزارهای رایج اجزا محدود، با هدف بررسی اثرات پدیده خوردگی آرماتور در بتن، انجام گرفته است. در اینگونه مطالعات خاصیت انبساطی محصولات خوردگی با به کارگیری فشار داخلی یکنواخت و یا جابجایی شعاعی یکنواخت و یا غیر یکنواخت و یا مدل‌سازی حرارتی مدل می‌شود [۶-۸].

Berra و همکاران با استفاده از نرم افزار ABAQUS اثر خوردگی بر کاهش چسبندگی بین بتن و آرماتور، در سطوح مختلف محصورشدگی را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. همچنین Lundgren

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.rakshanimehr@alzahra.ac.ir

<sup>۱</sup> Bond-Slip

<sup>۲</sup> Pitting

### ۳-۳- مدل تحلیلی

یکی از اولین مدل‌های تحلیلی برای بررسی ترک ناشی از خوردگی به وسیله بازانت [۱۴] پیشنهاد شد. در این مدل بتن اطراف آرماتور در حال خوردگی یک ماده الاستیک خطی و هموزن در نظر گرفته شده و انبساط ناشی از افزایش حجم محصولات خوردگی بر اساس افزایش قطر میلگرد و اطراف آن  $(\Delta d)$  مدل می‌شود. فلذا  $(\Delta d)$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\pi}{4} \left[ (d + \Delta d)^2 - d^2 \right] = \frac{W_{rust}}{\rho_{rust}} - \frac{W_{steel}}{\rho_{steel}} \quad (1)$$

که در آن  $W_{steel}$  و  $W_{rust}$  به ترتیب جرم محصولات خوردگی و جرم فولاد تلف شده در واحد طول آرماتور و مقادیر  $\rho_{rust}$  و  $\rho_{steel}$  به ترتیب چگالی محصولات خوردگی و فولاد هستند. با توجه به اینکه  $(\Delta d < d)$  با صرفنظر از  $\Delta d^2$  می‌توان گفت:

$$\Delta d = \frac{2W_{rust}}{\pi d} \left( \frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\gamma}{\rho_{steel}} \right) \quad (2)$$

علاوه بر آن در مدل تحلیلی بازانت نرخ تولید محصولات خوردگی  $(J_{rust})$  ثابت فرض شده و داریم:

$$W_{rust} = J_{rust} \cdot t \quad (3)$$

که در آن،  $t$  از لحظه شروع خوردگی اندازه‌گیری می‌شود. رابطه بین انبساط  $\Delta d$  و فشار  $P$  ایجاد شده بوسیله آن نیز، با استفاده از متوسط جواب‌های حاصل از حل مسئله کلاسیک لامه در دو حالت الف) استوانه جدار ضخیم توخالی تحت تنش صفحه‌ای

$$W_{steel} = \gamma W_{rust} \quad (4)$$

و ب) برای سوراخ گرد در یک محیط نامحدود

$$\Delta d = \frac{d}{E_{c,df}} [1 + V_c] P \quad (5)$$

به دست می‌آید. به این معنی که  $\Delta d$  برابر متوسط مقادیر حاصل از روابط فوق در نظر گرفته می‌شود.

$$\Delta d = \frac{d}{E_{c,\ell}} \left[ 1 + \nu_c + \frac{d^2}{4_c(c+d)} \right] P \quad (6)$$

که در آن  $\nu_c$  ضریب پواسون،  $E_{c,\ell} = \frac{E_c}{1 + \phi_t}$  مدول الاستیسیته موثر

و  $\phi_t$  ضریب خزش بتن است. فرض می‌شود که ترک خوردگی پس از مدت زمان طولانی رخ دهد، به نحوی که  $\phi_t = 2$  معمولاً مطابق با  $t = \infty$  فرض می‌شود.

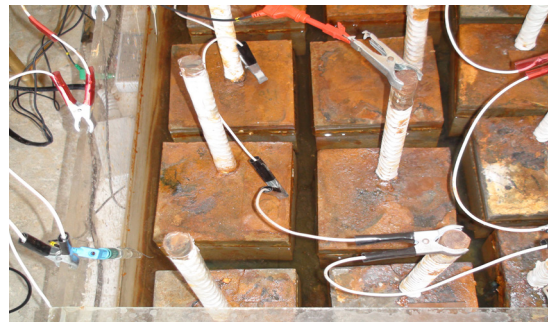
علاوه بر آن در مدل بازانت فرض بر این است که وقتی تنش متوسط کششی به مقاومت کششی بتن برسد، پوشش بتن بطور کامل ترک می‌خورد. متوسط تنش کششی در پوشش بتن نیز با استفاده از تنش مماسی در جداره استوانه تخمین زده می‌شود (شکل ۲-ا). در نتیجه فشار داخلی که باعث ترک خوردگی پوشش بتن می‌شود  $P_{cr}$  از معادله

با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود DIANA به تحلیل ترک خوردگی ناشی از خوردگی و آزمایش بیرون کشیدن آرماتورهای خورده شده، پرداخت [۱۰]. علاوه بر این‌ها Sand و Saether هم یک تیر، تحت اثر خوردگی آرماتور را با استفاده از نرم‌افزار DIANA مدل‌سازی نموده و نتایجی مشابه با نمونه مورد آزمایش به دست آوردند [۱۱].

در این تحقیق ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده و تحت آزمایش خوردگی قرار گرفته‌اند، پس از آن با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل عددی نمونه‌های فوق تهیه شده و نتایج با نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از تایید صحت مدل، با استفاده از مدل عددی و روابط تحلیلی که برای خوردگی بتن پیشنهاد شده، تاثیر پارامترهای پوشش بتن، قطر میلگرد، افزایش محصولات خوردگی و مقاومت بتن بر روی روند گسترش ترک مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه

جهت انجام آزمایش خوردگی مطابق استاندارد ASTM C۸۷۶ از ۱۵ نمونه  $20 \times 20 \times 20$  سانتی‌متری که در داخل آن‌ها میلگرد  $\Phi 20$  قرار گرفته، استفاده شده است [۱۲]. در این آزمایش ابتدا میلگردها بر اساس استاندارد ASTM G۱ در محلول اسید HCl، آب مقطر و هگزامتیل تترامین به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شده‌اند، سپس خشک و به دقت وزن شده و در بتن قرار گرفته‌اند. پس از آن نمونه‌ها در محیط تسریع شده (حوضچه آب مقطر حاوی ۳٪ وزنی کلسیم کلراید) قرار داده شده‌اند به طوری که یک سوم ارتفاع نمونه‌ها جهت سهولت ورود اکسیژن بیرون آب قرار داشته است. با برقراری جریان، میزان خوردگی بر اساس استاندارد فوق با استفاده از دستگاه Autolab ۳۰۲N به مدت ۶۰ روز اندازه‌گیری شده است. پس از اتمام آزمایش میلگردها از بتن بیرون آورده شده و میزان کاهش وزن آن‌ها اندازه‌گیری شده است [۱۳]. در شکل ۱ تصویری از این نمونه‌ها در حین آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه‌های بتن مسلح تحت آزمایش خوردگی

Fig.1. Reinforced concrete samples under corrosion test

#### ۴- مدل‌سازی اجزاء محدود و صحت‌سنجی آن

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این نرم‌افزار مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی قدرتمند مهندسی است که بر پایه روش اجزای محدود بنا نهاده شده و می‌تواند مسایلی با طیف گسترده از تحلیل‌های غیرخطی را حل کند. مدل‌سازی با تعریف هندسه، اختصاص مصالح تشکیل دهنده جسم و سپس تعریف نوع تحلیل و بارگذاری صورت می‌گیرد. در تحلیل‌های غیرخطی، به صورت خودکار نمو بار و رواداری مناسب همگرایی انتخاب می‌شود تا از بدست آوردن نتایج دقیق اطمینان حاصل گردد.

مدل‌سازی پیوسته بتن می‌تواند بر مبنای مدل الاستیک ترک باشد، در این صورت یک معیار ساده رانکین برای مشخص کردن آغاز ترک در مدل استفاده می‌شود. در این حالت شروع ترک وقتی است که حداکثر تنش اصلی از مقاومت کششی بتن تجاوز نماید. جهت ترک نیز در راستای عمود بر امتداد حداکثر تنش‌های کششی اصلی بوده و ترک جدید در همان نقطه تنها می‌تواند در راستای عمود بر ترک ایجاد شده قبلی شکل گیرد. لازم به یادآوری است که جزء محدود وقتی به حد الاستیک خود می‌رسد ترک خورده فرض می‌شود.

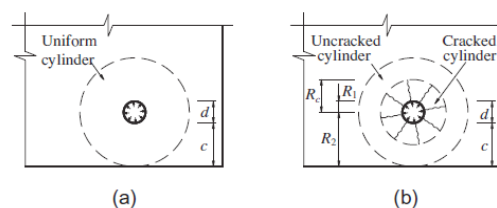
نسبت حداکثر تنش فشاری در حالت دو محوره به حداکثر تنش فشاری تک محوره بتن ( $F_{b0}/F_{co}$ ) برابر با  $1/16$  در نظر گرفته شده و خاصیت پلاستیسیته بتن با استفاده از تابع پتانسیل جریان پلاستیک یا تابع هیپربولیک دراکر-پراگر مدل شده که به پارامترهای  $\xi$  (خروج از مرکزیت) و  $\Psi$  (زاویه اتساع) وابسته است. در این پژوهش، مقادیر مذکور به ترتیب برابر  $0/1$  و  $30$  معرفی شده‌اند. مقادیر کمتر از  $0/1$  برای خروج از مرکزیت، ممکن است در شرایطی که محصورشدگی سازه کم است منجر به واگرایی در تحلیل شود. پارامتر  $K_c$  تعیین‌کننده شکل مقطع عرضی سطح تسلیم بوده و در بازه  $0/5$  تا  $1$  تغییر می‌کند. در این تحقیق مطابق توصیه راهنمای نرم افزار مقدار  $K_c = 0/75$  در نظر گرفته شده است. به منظور پرهیز از واگرایی تحلیل که ممکن است در اثر ایجاد ترک یا خردشدن بتن در مدل به وجود آید، پارامتر ویسکوزیته معرفی شده است. انتخاب مقدار کم برای این پارامتر علاوه بر آنکه تاثیری در جواب‌ها ندارد، به همگرایی تحلیل کمک می‌کند. در این پژوهش مقدار ویسکوزیته برابر  $2 \text{ aP.s}$  در نظر گرفته شده است. نمودار تنش کرنش بتن در فشار و کشش نیز به صورت شکل ۳ معرفی شده است.

تعداد نصف استوانه به شکل زیر بدست می‌آید:

$$P_{er} = \frac{2cf_{ct}d}{d} \quad (7)$$

که در آن  $f_{ct}$  مقاومت کششی بتن است. بنابراین اگر  $J_{rust}$ ،  $\rho_{rust}$  و  $\gamma$  معلوم باشند، آنگاه زمان آغاز ترک خوردگی پوشش بتن را می‌توان با استفاده از روابط فوق بدست آورد. برای تعیین  $J_{rust}$  بازانت یک مدل فیزیکی پیشنهاد نمود. مقادیر  $\rho_{rust}$  و  $\gamma$  بستگی به ترکیب محصولات خوردگی دارد. بازانت فرض کرد که این محصولات عمدتاً شامل  $Fe(OH)_2$  هستند و بر این اساس  $\gamma = 0.523$ ،  $\rho_{rust} = \frac{\rho_{steel}}{4}$  نظر گرفته شد.

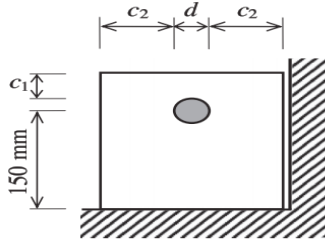
در مقایسه با اطلاعات آزمایشگاهی مشاهده شده است که مدل بازانت زمان آغاز ترک را به میزان قابل توجهی، دست پایین محاسبه می‌کند. این نتیجه عمدتاً ناشی از نفوذ قسمتی از محصولات خوردگی به داخل منافذ بتن و ترک‌های ریزی که در تعدادی از آزمایشات مشاهده می‌شود و باعث کم شدن فشار اعمالی بر بتن می‌گردد، می‌باشد. در مطالعات بعدی به منظور توسعه مدل‌های تحلیلی برای در نظر گرفتن ترک‌ها در پوشش بتن، تیفر [۱۵] همانند شکل ۲ بتن را به دو قسمت استوانه ترک‌خورده داخلی و ترک‌خورده خارجی تقسیم نمود.



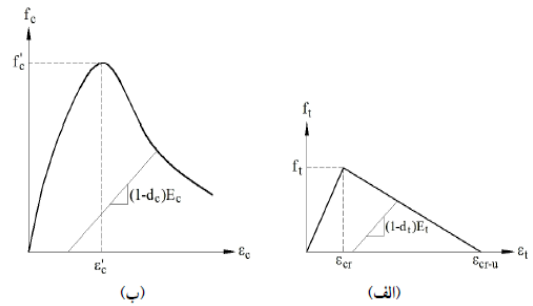
شکل ۲: مدل تحلیلی خوردگی ناشی از ترک خوردن پوشش (a) مدل استوانه یکنواخت (b) مدل استوانه با ترک خوردگی [۱۵]

Fig.2. Analytical modelling due to cover cracking [15]

با استفاده از تئوری الاستیسیته و محاسبه تنش در استوانه جدار ضخیم، نوشتن معادلات کرنش بر حسب تنش، و جایگذاری آن‌ها در معادله تعادل تنش، می‌توان جابجایی را محاسبه و سپس فشار در مرز استوانه داخلی  $P_{cr} = -\sigma_{r(i)}$  به ازای  $(r=R_1)$  را به دست آورد. نیلسن [۱۶] به منظور محاسبه تنش‌های مماسی در استوانه داخلی تغییر مکانی که با استفاده از راه حل خطی برای استوانه جدار ضخیم مورد محاسبه قرار می‌گیرد را به همراه رابطه غیر خطی تنش-کرنش بکار گرفت. باگاوا و همکاران [۱۷]، ژنگ و لی [۱۸] نیز مدل‌هایی برای ترک‌خوردگی پوشش بتن ناشی از تنش‌های مرزی بین آرماتور تغییر شکل یافته و بتن اطراف ارائه دادند.



شکل ۴: ابعاد مدل ارائه شده جهت صحت‌سنجی [۱۹]  
Fig.4. Dimensions of model for testing [19]



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش بتن معرفی شده

Fig.3. Stress- Strain curve of concrete

مشخصات به کاررفته جهت مدل‌سازی این نمونه در نرم‌افزار به صورت زیر است:

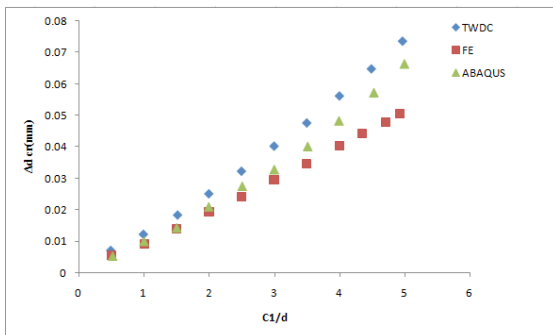
- ۱- مدل مورد نظر به صورت ۲ بعدی و شکل‌پذیر انتخاب شده است.
- ۲- مدول الاستیسیته برابر با  $19000 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است.
- ۳- پارامتر ویسکوزیته برابر  $0.05 E$  در نظر گرفته شده است.
- ۴- کرنش ترک خوردگی از ۰ شروع شده و به  $0.01$  ختم می‌شود.

۵- فشار اولیه که از روش‌های تحلیلی بدست می‌آید، برابر با  $P=2/5 \text{ MPa}$  فرض شده است.

۶- شرایط مرزی در سمت راست و پایین مدل به صورت گیردار در نظر گرفته شده است.

۷- تعداد المان‌ها جهت تحلیل در حدود ۲۰۰۰ و نوع المان آزاد در نظر گرفته شده است. تعداد المان بر حسب نوع مسئله متفاوت بوده و حداقل تعداد المان‌هایی که با افزایش آن تغییری در جواب‌های حاصله مشاهده نشده، انتخاب شده است.

پس از انجام مراحل فوق مدل مورد نظر تحلیل و نتایج حاصله با مرجع مورد نظر مقایسه شد. شکل ۵ مقایسه بین ضخامت لایه زنگ‌زدگی ( $\Delta d$ ) نسبت به  $(c/d)$  برای مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است مدل ساخته شده تطبیق مناسبی با نتایج تحلیلی (TWDC) و عددی ارائه شده قبلی (FE) دارد.



شکل ۵: مقایسه افزایش لایه زنگ‌زدگی برای پوشش‌های متفاوت جهت صحت‌سنجی

Fig.5. An increase of corrosion layer for different covers

پارامترهای  $d_c$  و  $d_t$  به نوعی بیانگر سختی بتن در نقاط مختلف نمودار تنش-کرنش است. حداکثر این پارامترها برابر یک بوده و در صورتی که مقدار آنها صفر فرض شود به معنی آن است که سختی مصالح در چرخه‌های بارگذاری و باربرداری تغییر نمی‌کند. همچنین مقادیر  $E_c$  و  $E_t$  در این شکل به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته بتن در فشار و کشش هستند. همانطور که در شکل نشان داده شده رفتار بتن در کشش به صورت دوخطی فرض شده است. که در آن  $f_t$  تنش نظیر ترک خوردگی بتن در کشش تک محوری،  $\epsilon_{cr}$  کرنش نظیر ترک خوردگی بتن در کشش و  $\epsilon_{cr-u}$  کرنش متناظر با تنش کششی صفر است که به علت باز شدن بیش از حد دهانه ترک حاصل می‌شود. مقادیر این پارامترها به صورت زیر فرض شده‌اند.

$$f_t = 0.6\sqrt{f_c} \text{ (Mpa)} \quad (7)$$

$$\epsilon_{cr} \approx 0.0001 \quad (8)$$

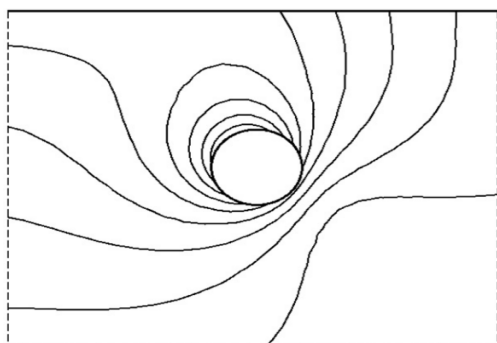
$$\epsilon_{cr-u} \approx 10\epsilon_{cr} = 0.001 \quad (9)$$

هر چند به دلیل نفوذ محصولات خوردگی در منافذ و ترک‌های بتن و عدم امکان اندازه‌گیری فشار و تغییر مکان در نمونه‌های مورد آزمایش، با استفاده از امکانات در دسترس، نتایج حاصل از مدل نمی‌تواند بصورت دقیق و کمی با نتایج خوردگی واقعی مقایسه شود، اما می‌توان آن‌ها را با نتایج کیفی آزمایش خوردگی تسریع شده در نمونه مکعبی بتن آرمه مقایسه کرد. به منظور اطمینان از صحت خروجی‌های نرم‌افزار قسمتی از دال بتنی تحلیل شده توسط لئون چرنین و دیمیتری وال انتخاب و پس از مدلسازی نتایج تغییر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. مشخصات مدل مورد بحث که در شکل ۴ نشان داده شده به شرح زیر است.

- ۱- قطر آرماتورها  $16 \text{ mm}$
- ۲- طول قطعه بتنی  $300 \text{ mm}$  و عرض قطعه  $150 \text{ mm}$  می‌باشد.

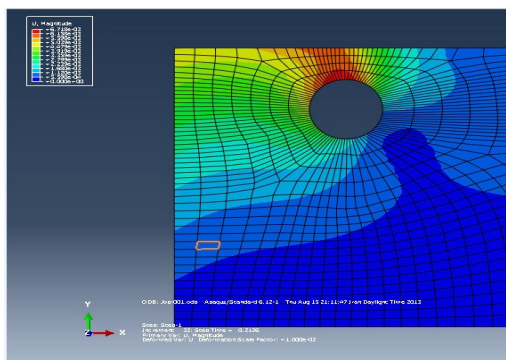
۳- محاسبات برای  $\nu_c = 0.2$  و ضخامت‌های مختلف جداره استوانه  $8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80$  میلی‌متر انجام شده است.

۴- مقاومت فشاری نمونه  $f_c^0 = 20 \text{ MPa}$  منظور شده است.



شکل ۹: توزیع جابجایی شعاعی اطراف آرماتور [۱۹]

Fig.9. Distribution of radial displacement of the reinforcement [19]



شکل ۱۰: توزیع جابجایی شعاعی اطراف آرماتور (مدل عددی)

Fig.10. Distribution of radial displacement of the reinforcement (numerical model)

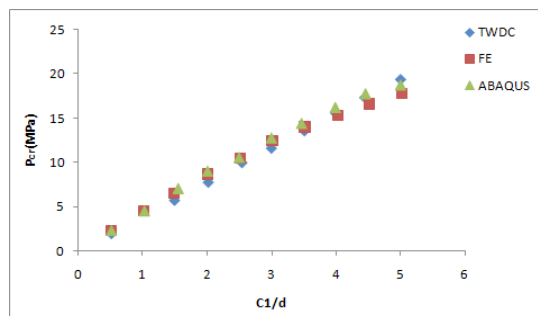
پس از اطمینان از صحت مدلسازی در حالت دو بعدی، مدل سه بعدی از نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه ایجاد و اثر تغییر پارامترهای مختلف با استفاده از این مدل نیز مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که قبلاً گفته شد نمونه‌های آزمایشی، مکعب  $20 \times 20 \times 20$  cm با یک آرماتور در نقاط مختلف نمونه، مقاومت فشاری  $30 \text{ MPa}$  است که در شرایط تسریع شده قرار گرفته و آرماتور آن خورده شده است. در شکل ۱۱ وضعیت برخی از نمونه‌ها پس از آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه

Fig.11. Reinforced samples for verification after test

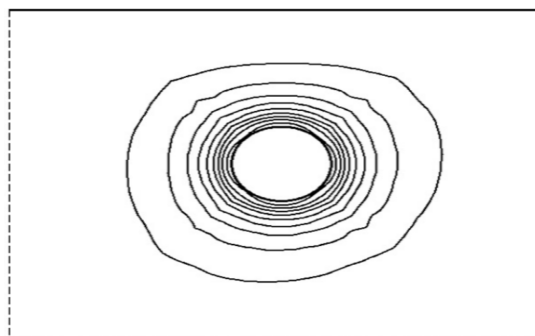
در شکل ۶ تأثیر پارامتر فشار ترک خوردگی در برابر نسبت پوشش به قطر آرماتور نشان داده شده است. ملاحظه نتایج باز هم بیانگر عملکرد مناسب مدل عددی ساخته شده است. و لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل ساخته شده تغییر در فشار ترک خوردگی را نیز به خوبی مدل می‌کند.



شکل ۶: مقایسه فشار ترک خوردگی در پوشش‌های متفاوت

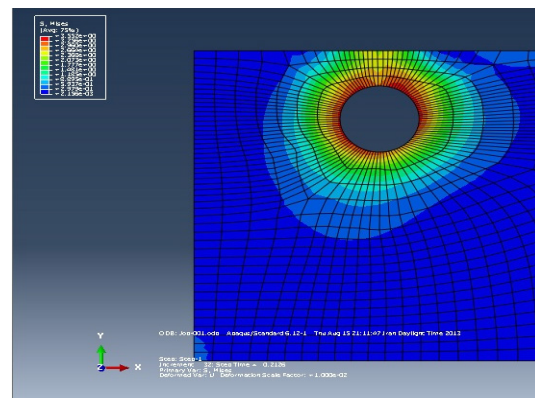
Fig.6. Cracking pressure of different covers

در ادامه صحت‌سنجی مدل ساخته شده، مقایسه‌ای بین تنش‌های موجود در اطراف آرماتور و پارامتر جابجایی صورت گرفته است که این پارامترها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده‌اند. بررسی نتایج باز هم صحت مدل ساخته شده و تطابق مناسب نتایج حاصله با نتایج قبلی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: توزیع تنش شعاعی اطراف آرماتور [۱۹]

Fig.7. Distribution of radial tension around the reinforcement [19]



شکل ۸: توزیع تنش شعاعی اطراف آرماتور (مدل عددی)

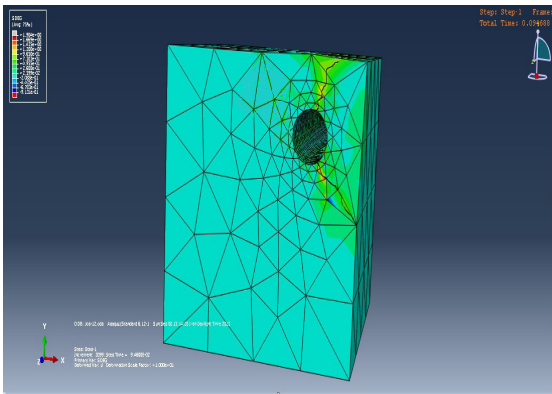
Fig.8. Distribution of radial tension around the reinforcement (numerical model)

است، رشد ترک سریعتر رخ داده است.



شکل ۱۴: نمونه‌های آزمایشگاهی ترک خورده با آرماتور در گوشه

Fig.14. Reinforced samples after test (bars in corner)



شکل ۱۵: مسیر رشد ترک در مدل‌های طراحی شده (آرماتور در گوشه)

Fig.15. Numerical model of samples after test (bars in corner)

با توجه به موارد فوق و پس از اطمینان از صحت مدل، نمونه‌های عددی دیگری با استفاده از نرم افزار ساخته شد و تاثیر پارامترهای مختلف در خوردگی آرماتور مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد استفاده در مدل فوق به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در مدل اجزای محدود

Table 1. Parameters used in FE model

مقدار	پارامتر مورد نظر
$f_c = 20, 30, 40, 50$	مقاومت فشاری نمونه‌ها (MPa)
$C = 6, 12, 24, 48$	پوشش‌های بتنی (mm)
۱۹۰۰۰	مدول الاستیسیته
۰/۰۰۰۰۲	ویسکوزیته
$P = 2/5 - 5$	فشار اولیه از روش‌های تحلیلی MPa

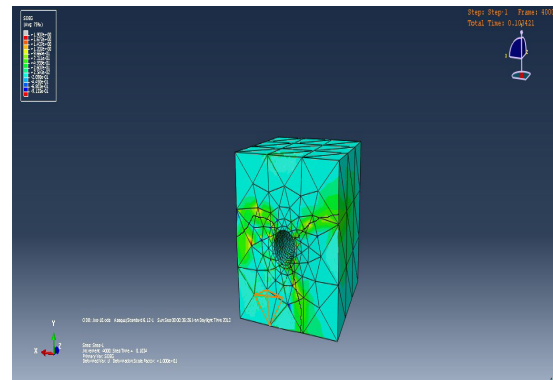
تعداد المان جهت تحلیل از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ (بسته به فاصله پوشش) و

با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری فشار داخل نمونه‌ها در حین آزمایش و همچنین نحوه رشد ترک در آزمایشگاه وضعیت نهایی نمونه‌ها پس از اتمام آزمایش خوردگی با نتایج حاصل از نرم افزار مقایسه شده است. در شکل ۱۲ وضعیت نمونه‌هایی که آرماتور در وسط آن‌ها قرار گرفته، در پایان آزمایش خوردگی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت نمونه به صورت تقریباً متقارن ترک خورده و دچار شکستگی شده است. شکل ۱۳ وضعیت همین نمونه را با استفاده از مدل اجزای محدود نشان می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل ۱۲ نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود ساخته شده بخوبی وضعیت نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: نمونه آزمایشگاهی ترک خورده ناشی از خوردگی آرماتور در بتن (آرماتور در وسط)

Fig.12. Reinforced samples after test ( bars in the middle)



شکل ۱۳: مقایسه نمونه ترک خورده آزمایشگاهی با روند رشد ترک در مدل طراحی شده (آرماتور در وسط)

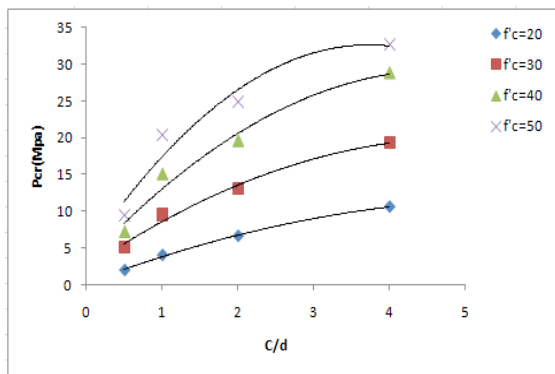
Fig.13. Numerical model of samples after test (bars in the middle)

در نمونه‌های بتنی ساخته شده دیگر، آرماتور در یکی از گوشه‌های بتن جانمایی شده است. همانطور که در مدل طراحی شده با نرم‌افزار مشاهده می‌شود در این حالت نیز روند رشد و مسیر ترک مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، به گونه‌ای که در قسمتی از بتن که پوشش آرماتور کمتر

همانطور که در نمودارها قابل مشاهده است با افزایش پارامتر  $c/d$  فشار در زمان شروع ترک خوردگی بیشتر خواهد شد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش  $c/d=2$  به  $c/d=4$  فشار ترک خوردگی تقریباً ۳۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار در زمان ترک خوردگی، پارامتر  $\Delta d$  نیز افزایش می‌یابد. ضمناً افزایش پوشش آرماتور، تاثیر خود را بر قطر لایه زنگ زدگی نشان داده و می‌توان دریافت که با افزایش پوشش، قطر لایه زنگ زدگی نیز بیشتر خواهد شد. به نحوی که با افزایش دو برابری نسبت پوشش به قطر، ضخامت لایه زنگ زدگی حدود ۲۵ درصد افزایش یافته و همین نسبت تقریبی برای هر دو فشار اولیه بر قرار است.

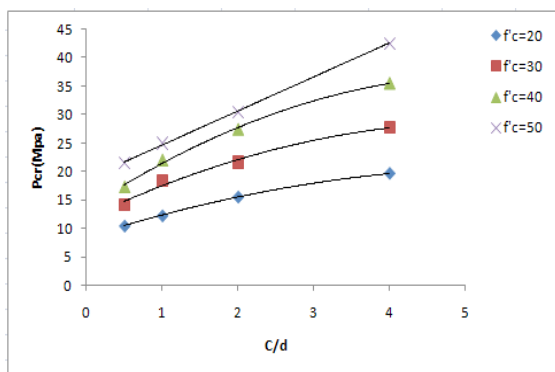
#### ۴-۲- تاثیر پارامتر $f_c$ (مقاومت فشاری بتن)

یکی از عوامل مهمی که بر ترک خوردگی نمونه تاثیر خواهد گذاشت، مقاومت فشاری نمونه است. همانطور که گفته شد مدل ۴ با مقاومت‌های فشاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ تاثیر پارامتر مقاومت فشاری نمونه را بر فشار ترک خوردگی برای پوشش‌های متفاوت آرماتور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: تاثیر مقاومت فشاری بر نمونه در  $P=2.5$  MPa

Fig.19. The effect of initial pressure at  $P=2.5$  MPa

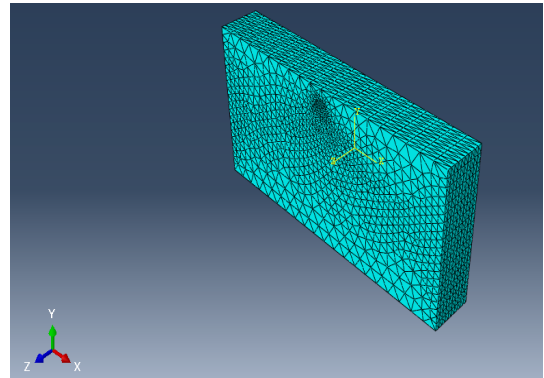


شکل ۲۰: تاثیر مقاومت فشاری بر نمونه در  $P=5$  MPa

Fig.20. The effect of initial pressure at  $P=5$  MPa

همان‌گونه که در این نمودارها مشخص است هر اندازه مقاومت فشاری نمونه کمتر باشد، نمونه در فشار پایین‌تری ترک خواهد خورد اما در پوشش‌های بیشتر میلگرد تاثیر مقاومت فشاری نمونه بیشتر

نوع المان‌بندی آزاد در نظر گرفته شده است. نمونه‌های طراحی شده از این مدل در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند.



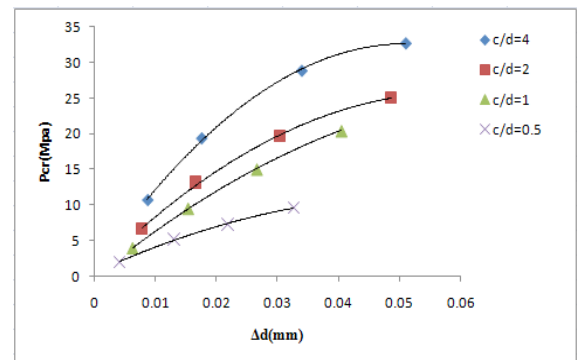
شکل ۱۶: مدل با  $c/d=0.5$

Numerical model with  $c/d=0.5$

در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف با استفاده از مدل فوق پرداخته‌ایم.

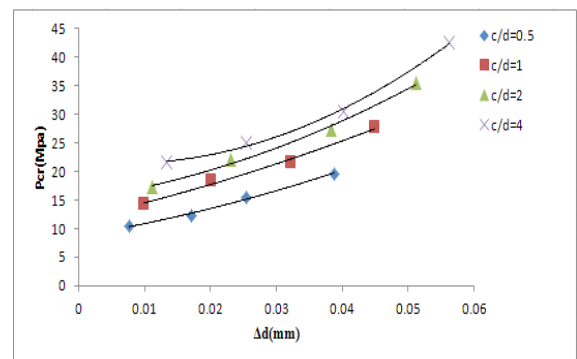
#### ۴-۱- تاثیر پارامتر $c/d$

همانطور که پیش‌تر گفته شد پارامتر  $d$  معرف قطر آرماتور بوده و پارامتر  $c$  معرف پوشش آرماتور از لبه آزاد نمونه است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ اثر متغیر فوق بر پارامترهای  $\Delta d$  و  $P_{cr}$ ، برای فشار اولیه ۲/۵ و ۵ MPa را نشان می‌دهد. در این اشکال  $P_{cr}$  فشار در لحظه شروع ترک و  $\Delta d$  میزان افزایش قطر آرماتور (ضخامت لایه زنگ زدگی) است.



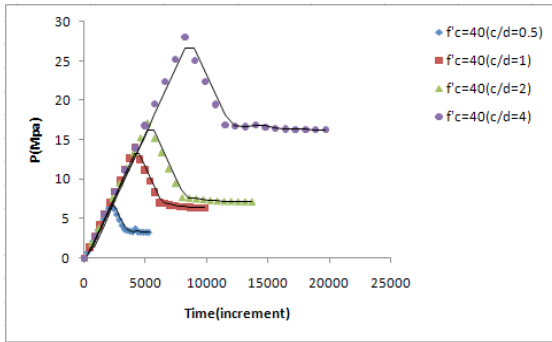
شکل ۱۷: مقایسه فشار ترک خوردگی در فشار  $P=2.5$  MPa

Fig.17. Cracking pressure at  $P=2.5$  MPa



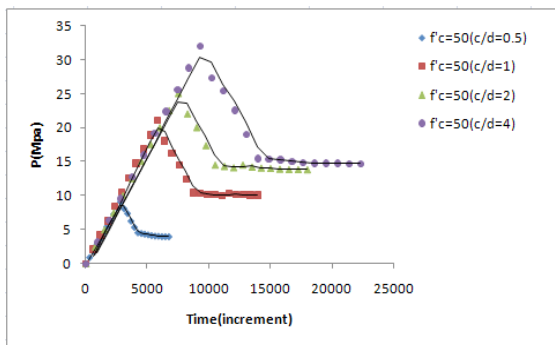
شکل ۱۸: مقایسه فشار ترک خوردگی در فشار  $P=5$  MPa

Fig.18. Cracking pressure at  $P=5$  MPa



شکل ۲۳: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=40$  و فشار اولیه MPa  $P=2/5$

Fig.23. Pressures on bars at  $f_c=40$  and  $P=2.5$  MPa



شکل ۲۴: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=50$  و فشار اولیه MPa  $P=2/5$

Fig.24. Pressures on bars at  $f_c=50$  and  $P=2.5$  MPa

همانطور که در نمودارها نشان داده شده زمانی که  $f_c$  ثابت باشد، با افزایش پوشش آرماتور، زمان رسیدن به مرحله ترک خوردگی بیشتر شده و متعاقباً  $P_{cr}$  نیز بیشتر خواهد شد. نقطه اوج تمام منحنی‌ها پارامتر فشار ترک خوردگی را نشان می‌دهد. نکته مهم در تمام نمودارها این است که پس از ترک خوردن مقطع فشار وارد بر نمونه کاهش پیدا می‌کند و این کاهش تا زمان خاصی ادامه خواهد یافت و پس از آن فشار وارد بر آرماتور ثابت خواهد بود. علت را می‌توان در ابتدا پر شدن منافذ ترک خورده از مواد زنگ‌زدگی دانست که موجب کاهش فشار بر میلگرد می‌شود اما پس از آن و با پر شدن منافذ، فشار ثابت می‌ماند. همانطور که در تمامی این نمودارها قابل مشاهده است فشار وارد بر آرماتور در لحظه ترک خوردگی بتن بسیار کمتر از مقاومت فشاری نمونه است. گرچه این فشار متناسب با میزان پوشش متغیر است اما در نسبت پوشش به قطر آرماتور برابر ۴ که عدد نسبتاً بالایی است، میزان فشار وارد بر آرماتور در لحظه ترک خوردگی به حدود ۶۰ درصد مقاومت فشاری بتن می‌رسد.

به منظور بررسی بیشتر در شکل‌های ۲۵ تا ۲۸ اثر تغییر مقاومت فشاری نمونه با فرض ثابت بودن پوشش آرماتور بر فشار ترک خوردگی نشان داده شده است.

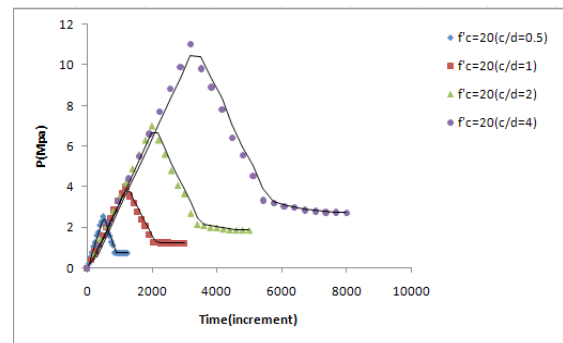
است. اما نکته جالب این است که در نسبت پوشش به قطر آرماتور ۰/۵ با افزایش مقاومت فشاری نمونه از ۲۰ به ۵۰ فشار ترک خوردگی به میزان ۲/۲ برابر افزایش یافته و به‌ازای همین میزان افزایش مقاومت اما در نسبت پوشش به قطر آرماتور ۴ فشار در لحظه ترک خوردگی داخل نمونه، باز هم همین مقدار رشد داشته است. با فرض فشار اولیه  $P=2/5$  MPa و برای مقادیر پارامترهای مشابه این مقدار رشد حدود ۳ بوده است.

### ۳-۴ تحلیل فشار $P_{cr}$

به منظور تحلیل فشار در ناحیه زنگ‌زدگی، در زمان‌های مختلف ۲ حالت زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

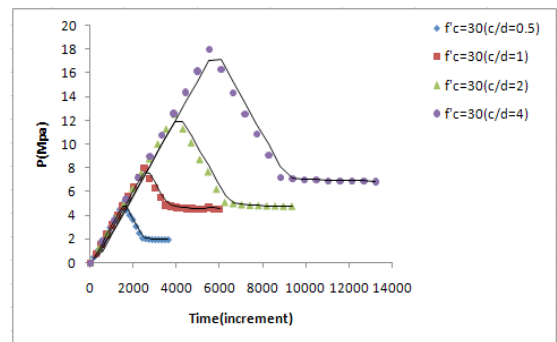
### ۳-۴-۱ فشار ۲/۵ MPa

جهت تحلیل  $P_{cr}$  در فشار اولیه فوق ابتدا باید فشار در زمان‌های مختلف برای وقتی که  $f_c$  ثابت است در پوشش‌های مختلف آرماتور بدست آید. از این رو نتایج در قالب شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ ارائه شده است.



شکل ۲۱: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=20$  در فشار MPa  $P=2/5$

Fig.21. Pressures on bars at  $f_c=20$  and  $P=2.5$  MPa



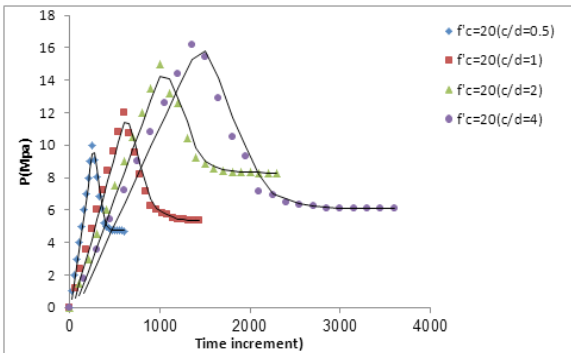
شکل ۲۲: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=30$  و فشار اولیه MPa  $P=2/5$

Fig.22. Pressures on bars at  $f_c=30$  and  $P=2.5$  MPa



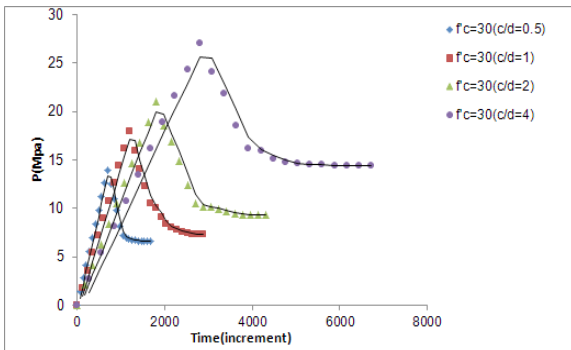
در این نمودارها نیز مشخص شد که با افزایش مقاومت نمونه فشار ترک خوردگی بیشتر شده و زمان بیشتری جهت رسیدن به مرحله ترک خوردگی مورد نیاز است. نقطه اوج تمام منحنی‌ها  $P_{cr}$  را نشان می‌دهد. بررسی نتایج فوق نشان می‌دهد در نسبت پوشش به قطر آرماتور برابر  $0/5$  با افزایش دو برابری مقاومت فشاری نمونه، فشار وارد بر آرماتور حدود ۳ برابر افزایش یافته است. همین حدود افزایش برای سایر پوشش‌ها نیز مشاهده شده است.

۴-۳-۲- فشار ۵ MPa

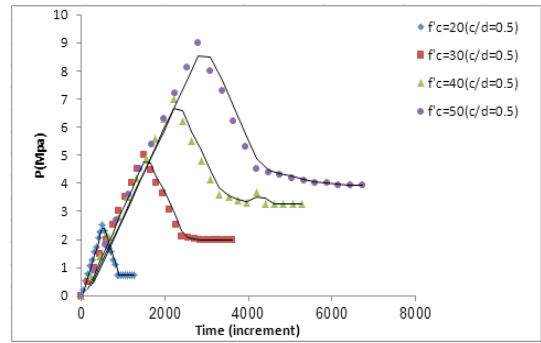


شکل ۲۹: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=20$  در فشار ۵ MPa  
Fig.29. Pressures on bars at  $f_c=20$  and  $P=5$  MPa

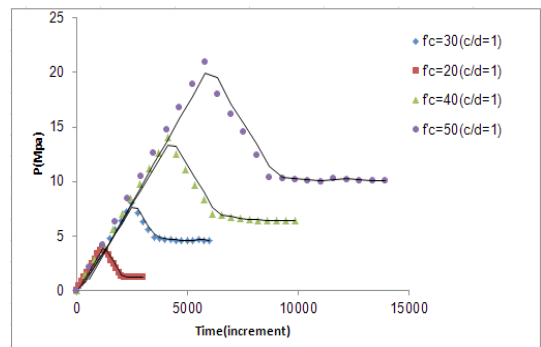
در این قسمت پارامترهای بررسی شده در بخش قبل برای فشار ۵ MPa هم ملاحظه شده و نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو شکل‌های ۲۹ تا ۳۲ ارائه شده‌اند. در این بخش فقط زمانی که مقاومت نمونه ثابت و پوشش آرماتور در حال تغییر باشد نمودارها تحلیل شده است.



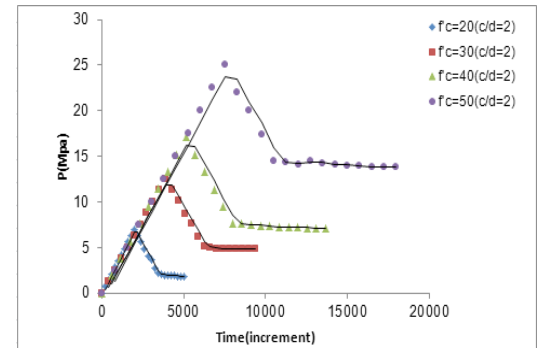
شکل ۳۰: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c=20$  در فشار ۵ MPa  
Fig.30. Pressures on bars at  $f_c=20$  and  $P=5$  MPa



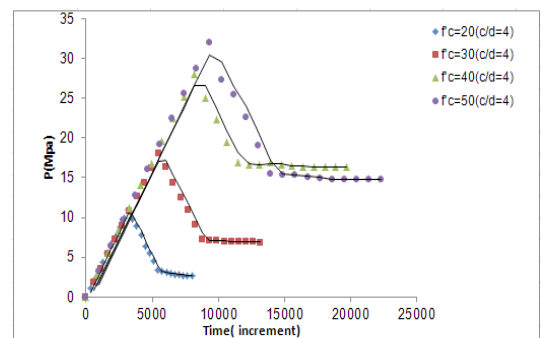
شکل ۲۵: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $c/d=0/5$  و فشار اولیه  $P=2.5$  MPa  
Fig.25. Pressures on bars at  $c/d=0.5$  and  $P=2.5$  MPa



شکل ۲۶: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $c/d=1$  و فشار اولیه  $P=2/5$  MPa  
Fig.26. Pressures on bars at  $c/d=1$  and  $P=2.5$  MPa



شکل ۲۷: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $c/d=2$  و فشار اولیه  $P=2.5$  MPa  
Fig.27. Pressures on bars at  $c/d=2$  and  $P=2.5$  MPa



شکل ۲۸: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $c/d=4$  و فشار اولیه  $P=2/5$  MPa  
Fig.28. Pressures on bars at  $c/d=4$  and  $P=2.5$  MPa

ترک در نمونه است و با افزایش پوشش آرماتورها فشار ترک خوردگی افزایش یافته و ترک خوردگی در فشار بالاتری صورت می‌گیرد. بطور کلی می‌توان گفت افزایش دو برابری در نسبت پوشش به قطر آرماتور باعث افزایش حدود ۳۵ درصدی فشار ترک خوردگی شده است.

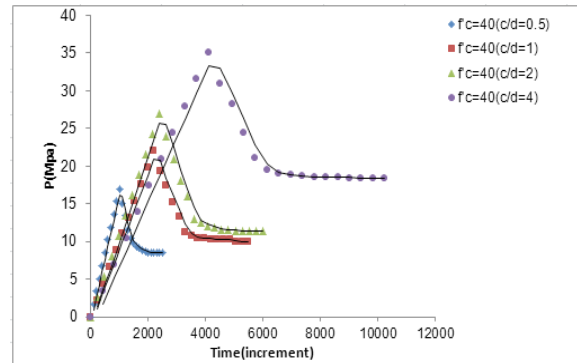
مقاومت فشاری بتن مورد استفاده نیز از عوامل بسیار موثر بر گسترش ترک ناشی از خوردگی آرماتور است. مشاهده می‌شود که با چند نمونه با نسبت پوشش به قطر یکسان، هر اندازه مقاومت فشاری نمونه بیشتر باشد فشار لازم جهت بوجود آمدن ترک در نمونه بیشتر خواهد بود. اما رابطه نسبتاً خطی بین مقاومت فشاری و نسبت پوشش به قطر آرماتور برقرار بوده است. به نحوی که افزایش مقاومت بتن به حدود دو برابر، افزایش دو برابری در فشار ترک خوردگی را نتیجه داده و همین افزایش دو برابری با افزایش نسبت پوشش به قطر مشابه نیز مشاهده شده است.

بطور دقیق‌تر می‌توان دید برای نمونه‌هایی با مقاومت فشاری MPa ۵۰ با افزایش  $c/d$  از ۱ به ۴، فشار ترک خوردگی ۸۵٪ افزایش می‌یابد و برای مقاومت فشاری MPa ۴۰ با افزایش  $c/d$  به همین میزان، فشار ترک خوردگی ۸۰٪ و برای مقاومت فشاری MPa ۲۰ این مقدار ۷۰٪ افزایش یافته است.

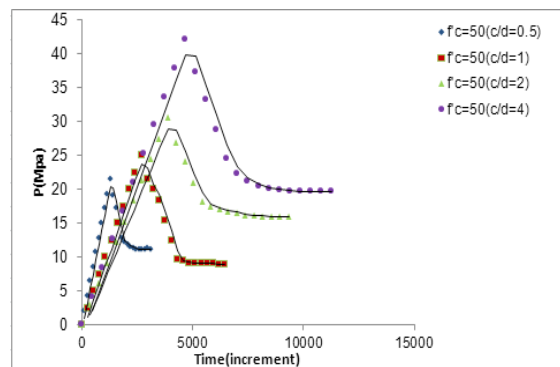
علاوه بر آن مشاهده شد که فشار اولیه در نظر گرفته شده بر روی آرماتور نیز بر فشار ترک خوردگی و سایر عوامل موثر است فلذا پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های عددی به این موضوع توجه گردد.

## مراجع

- [1] J. Rodriguez, L.M. Ortega, J. Casal, J.M. Diez, Assessing structural conditions of concrete structures with corroded reinforcement, in: R.K. Dhir, M.R. Jones (Eds.) Conference, Concrete repair, rehabilitation and protection; 1996;
- [2] J. Cairns, Consequences of reinforcement corrosion for residual strength of deteriorating concrete structures, in: Proc. 1st Int Conf on Behaviour of Damaged Structures, Brazil, 1998, pp. 21.
- [3] A.K.M. Farid Uddin, K. Numata, J. Shimasaki, M. Shigeishi, M. Ohtsu, Mechanisms of crack propagation due to corrosion of reinforcement in concrete by AE-SiGMA and BEM, *Construction and Building Materials*, 18(3) (2004) 181-188.
- [4] F. du béton, Bond of Reinforcement in Concrete: State-of-the-art report, *International Federation for Structural Concrete*, 2000.
- [5] ] L. Chung, H. Najm, P. Balaguru, Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars, *Cement and Concrete Composites*, 30(3) (2008) 184-193.



شکل ۳۱: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c = 40$  و فشار اولیه  $P = 5$  MPa  
Fig.31. Pressures on bars at  $f_c=40$  and  $P=5$  MPa



شکل ۳۲: فشارهای وارد بر آرماتور برای  $f_c = 50$  و فشار اولیه  $P = 5$  MPa  
Fig.32. Pressures on bars at  $f_c=50$  and  $P=5$  MPa

همانطور که از این نمودارها استنباط می‌شود در فشار جدید نیز با افزایش پوشش آرماتور فشار ترک خوردگی افزایش یافته و زمان رسیدن به این مرحله نیز افزایش می‌یابد. که امری طبیعی است اما در این فشار، افزایش نسبت پوشش از  $0.5/5$  به  $4$ ، باعث افزایش فشار دو برابری وارد بر آرماتور شده است که در مقایسه با افزایش ۶۰ درصدی (در فشار اولیه  $2/5$ ) که قبلاً بحث شد قابل توجه است. این امر بیانگر تاثیر فشار اولیه فرضی در محاسبات است. و لذا پیشنهاد می‌شود در اینگونه موارد محاسبات با چندین فشار اولیه صورت پذیرفته و نتیجه مناسب در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انتخاب شود. مطلب مهم در نمودارهای این بخش و بخش قبل این است که اگر فشار اولیه افزایش یابد زمان رسیدن به مرحله ترک خوردگی کاهش می‌یابد ولی در عوض فشار ترک خوردگی افزایش خواهد یافت. این مطلب را می‌توان با تنگ‌شدگی دهانه نمودارهای این بخش نسبت به بخش قبل استنباط نمود.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی ترک بوجود آمده در سازه‌های بتن‌آرمه ناشی از خوردگی آرماتورها که خود به علت بوجود آمدن لایه زنگ‌زدگی در اطراف آن‌ها می‌باشد، مدل‌های عددی توسط نرم افزار ABAQUS طراحی و تحلیل شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پوشش آرماتورها از عوامل بسیار تاثیر گذار در روند پیشرفت

- [13] ASTM G1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens, *American Society for Testing and Materials*, 2011.
- [14] Z. P. Bazant, *Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—theory*, 1979.
- [15] R. Tepfers, Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, *Magazine of Concrete Research*, 31(106) (1979) 3-12.
- [16] C.V. Nielsen, N. Bićanić, Radial fictitious cracking of thick-walled cylinder due to bar pull-out, *Magazine of Concrete Research*, 54(3) (2002) 215-221.
- [17] K. Bhargava, A.K. Ghosh, Y. Mori, S. Ramanujam, Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures, *Engineering Structures*, 28(8) (2006) 1093-1109.
- [18] C.Q. Li, R.E. Melchers, J.J. Zheng, Analytical model for corrosion-induced crack width in reinforced concrete structures, 2006.
- [19] L. Chernin, V.Val. Dimitri, Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures" *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1854-1869
- [6] Y.G. Du, A.H.C. Chan, L.A. Clark, Finite element analysis of the effects of radial expansion of corroded reinforcement, *Computers & Structures*, 84(13) (2006) 917-929.
- [7] F. Shaikh, M. Maalej, H. Mihashi, Cover cracking of reinforced concrete beams due to corrosion of steel, 2007.
- [8] F.J. Molina, C. Alonso, C. Andrade, Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—*Numerical model*, *Materials and Structures*, 26(9) (1993) 532-548.
- [9] M. Berra, A. Castellani, D. Coronelli, S. Zanni, G. Zhang, Steel-concrete bond deterioration due to corrosion: finite-element analysis for different confinement levels, *Magazine of Concrete Research*, 55(3) (2003) 237-247.
- [10] Lundgren, K., Bond between ribbed bars and concrete. Part 1: Modified model, *Magazine of Concrete Research*, (2005).
- [11] I. Saether, B. Sand, *FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion*, 2012.
- [12] ASTM C 876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *American Society for Testing and Materials*, 2000

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Miri, M. Rakhshanimehr, F. Miri, "The effect of Cover, Pressure Strength, and bars corrosion on Cracking of Reinforced Concrete Structures". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 251-261.

DOI:10.22060/ceej.2016.693

