



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنج، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۳ تا ۲۹
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 13-29



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

مدل‌های رفتاری المان بتن مسلح ترمیم یافته با پوشش FRP پس از خوردگی آرماتور

مسعود سلطانی محمدی^{۱*}، امین صفائیانی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت ۱۳۸۹/۱۰/۲۹، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۹)

چکیده

یکی از مشکلات مطرح در دوام و رفتار سازه‌های بتن مسلح، خوردگی آرماتور است که بررسی تأثیر آن بر رفتار سازه‌ای به دلیل تغییراتی که در عملکرد سازه ایجاد می‌نماید، اهمیت دارد. درک کامل ماهیت خوردگی، عوامل مؤثر و چگونگی فرایند شروع خوردگی در یک سازه از جمله مواردی هستند که مطالعه آنها برای تعیین رفتار سازه پس از وقوع خوردگی لازم است. از طرفی در سال‌های اخیر استفاده از ورق‌های FRP در تقویت سازه‌های بتن مسلح خورده شده، مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس در این مقاله با مدلسازی المان بتن مسلح خورده شده که توسط FRP تقویت شده است و اعمال درصد خوردگی‌های مختلف، به بررسی رفتار فشاری و کششی آن پرداخته و در پایان روش‌ها و روابطی برای تعیین مدل رفتاری فشاری و کششی چنین المانی ارائه شده است. این مدل‌های رفتاری در شبیه‌سازی عددی اجزاء بتن مسلحی که دچار خوردگی شده و با پوشش FRP تقویت شده‌اند، کاربرد دارد. روش تحلیل به صورت غیرخطی و بر اساس در نظر گرفتن بتن مسلح به صورت یک محیط پیوسته با ترک‌های پخش شده در آن یا در اصطلاح ترک پخشی بوده که در این روش رفتار متوسط برای بتن، آرماتور و FRP مدنظر است.

کلمات کلیدی

بتن مسلح، خوردگی آرماتور، FRP، مدل رفتاری

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: msoltani@modares.ac.ir

۱- مقدمه

در پیوستگی بتن و آرماتور در روش ریز مدلسازی گفته شده، اعمال شده است.

۲- خوردگی آرماتور در بتن

فولاد، گرایش طبیعی به خورده شدن و بازگشت به حالت طبیعی خود به شکل سنگ آهن- به طور معمول اکسید آهن (Fe_2O_3) - را دارد. سرعت خوردگی فولاد به میزان در دسترس بودن آب، اکسیژن و یون‌های فعال و همچنین میزان pH و حرارت محیط و مشخصات ذاتی آن از جمله ترکیب، ساختار کریستال و تنش‌های اعمالی در هنگام تولید، بستگی دارد. حالت قلیایی بتن باعث شکل‌گیری یک لایه غیر فعال روی سطح فولاد می‌شود که البته این لایه برای همیشه در سطح فولاد حفظ نشده و توسط دو عامل کربناسیون و نفوذ یون کلرید امکان از بین رفتن آن وجود دارد. برای شروع خوردگی وجود یک پیل الکتروشیمیایی الزامی است. پیلی که یک آند و یک کاتد که توسط یک الکترولیت جدا شده و به وسیله یک رسانای فلزی به یکدیگر وصل شده باشند را شامل می‌شود. هنگامی که لایه غیر فعال روی فولاد وجود داشته باشد، به عنوان کاتد محسوب می‌شود و زمانی که لایه غیر فعال چه به صورت یکنواخت بر اثر کربناسیون و چه به صورت موضعی بر اثر نفوذ کلریدها از بین می‌رود، قسمتی از فولاد نقش آند را ایفا نموده و شروع به خورده شدن می‌نماید [۷].

۳- اثرات ناشی از خوردگی آرماتور در بتن

نتیجه خوردگی آرماتور، تولید ماده زنگ آهن (اکسید آهن) بر روی سطح آرماتور است. اکسید آهن بسیار متخلخل بوده و در حدود دو برابر فولاد حجم اشغال می‌نماید این افزایش حجم در محل تماس آرماتور و بتن رخ داده و باعث ایجاد تنش‌های داخلی در نقاطی که دچار خوردگی می‌شوند، خواهد شد. با توجه به این مطلب خوردگی آرماتور سه اثر عمده بر روی عضو بتن مسلح خواهد داشت، که عبارتند از:

- ۱- تغییر در مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن
- ۲- ایجاد ترک‌های طولی و عرضی در بتن
- ۳- کاهش سطح مقطع آرماتور

مقاومت پیوستگی، به وضعیت سطح تماس بین آرماتور و بتن بستگی دارد و هنگام خوردگی به دلیل بروز تغییر در این سطح تماس، مقاومت پیوستگی نیز دچار تغییر می‌شود. به این ترتیب که با شروع خوردگی و تولید زنگ آهن در اطراف آرماتور و افزایش حجم در محل تماس، مقاومت پیوستگی افزایش یافته و با پیشرفت خوردگی و تولید بیشتر ماده زنگ آهن در اطراف آرماتور، این افزایش، تا یک حدی (بسته به شرایط عضو بتن

همانطور که می‌دانیم بتن مسلح ترکیبی از بتن و آرماتور (فولاد) بوده و فولاد از جمله فلزاتی است که تحت شرایط خاصی دچار خوردگی می‌شود. با توجه به آسیب‌های ناشی از خوردگی آرماتور، روش‌هایی برای ترمیم و تقویت چنین سازه‌هایی ابداع شده است که از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از مواد مرکب پلیمری یا در اصطلاح FRP اشاره نمود که امروزه کاربرد زیادی در تقویت سازه‌های بتن مسلح دارد.

برای در نظر گرفتن خوردگی آرماتور در مدلسازی یک المان بتن مسلح به روش ترک پخشی، مدل‌هایی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل ارائه شده توسط تونگنتونگ و مایکاو [۴] اشاره نمود. در این روش با مدلسازی اثرات خوردگی شامل ترک‌های ایجاد شده در بتن و کاهش سطح مقطع آرماتور به صورت متوسط در مدل‌های رفتاری فولاد و بتن، بیش‌ترین توجه به عامل ترک خوردگی اولیه در سازه بوده و سعی در مدلسازی پیش آسیب‌دیدگی ناشی از خوردگی دارد، بدین ترتیب که توزیع اولیه ترک‌های ناشی از خوردگی با توجه به شرایط مرزی محاسبه و به صورت توزیع شده در سازه مدنظر قرار می‌گیرد. اما این روش در خصوص در نظر گرفتن اثر خوردگی بر مدل رفتاری کششی یا همان سخت‌شدگی کششی ضعف دارد. روش دیگری که توسط گامباروا و گرنلی [۵] ارائه شده مبنی بر مدلسازی فولاد، بتن و اندرکنش بین این دو به صورت مجزا است، که اثر خوردگی به صورت مستقیم در مدل پیوستگی فولاد و بتن وارد می‌شود. در روش گامباروا بر خلاف روش قبل، بیش‌ترین توجه بر عامل پیوستگی بین فولاد و بتن بود ولی اثر پیش آسیب‌دیدگی و ترک‌های اولیه به صورت تقریبی وارد شده است.

در این تحقیق هر دو دیدگاه گفته شده مدنظر قرار گرفته تا بتوان به طور هم‌زمان اثر ترک خوردگی و پیوستگی را در مدلسازی در نظر گرفت.

از طرفی برای در نظر گرفتن اثر تقویت المان توسط FRP در مدل رفتاری فشاری المان بتن مسلح، مدل رفتاری پیش فرض «الاستو پلاستیک و شکست» [۶] که با دو مشخصه کرنش پلاستیک (ϵ_p) و عامل شکست (k_0) فرمول‌بندی می‌شود، ملاک عمل واقع شده است، بطوریکه بتوان بهبود رفتار بتن محصور شده با FRP را با تعیین این دو جزء در نظر گرفت. در مدل رفتاری کششی با ریزمدلسازی المان بتن مسلح به همراه FRP و اعمال رابطه پیوستگی بتن و FRP در مدلسازی، اثر آن در مدل رفتاری کششی بتن و سایر اجزاء المان شامل آرماتور و FRP مورد بررسی قرار گرفته و اثر خوردگی آرماتور بر رفتار کششی المان بتن مسلح تقویت شده با FRP، با ایجاد تغییرات

آرماتورها به دست می‌آید.

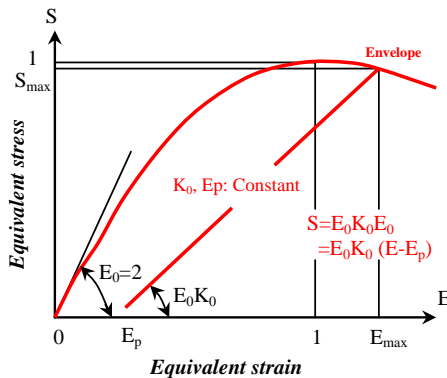


۴-۱- شکل (۱): نحوه مدلسازی المان صفحه‌ای بتن مسلح

۴-۲- مدل رفتاری بتن پیش از ترک خوردگی

۴-۲-۱ مدل الاستو پلاستیک و شکست

در این مدل رابطه تنش معادل- کرنش معادل توسط مدول الاستیسیته اولیه (E_0)، عامل شکست (K_0) و کرنش پلاستیک معادل (E_p) فرمول‌بندی می‌شود (شکل (۲)).



۴-۳- شکل (۲): رابطه تنش-کرنش معادل

برای تنش معادل روابط (۱) تا (۳) بکار می‌رود:

$$S = \sqrt{(a\sigma_m)^2 + (b\tau_d)^2} \quad (۱)$$

$$a = 0.6/f'_c \quad \text{و} \quad b = 1.3/f'_c \quad (۲)$$

$$\sigma_m = \sqrt{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad \text{و} \quad \tau_d = \sqrt{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (۳)$$

σ_1 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) و σ_2 تنش‌های اصلی هستند. f'_c ، τ_d ، σ_m و K به ترتیب تنش میانگین، تنش انحرافی، تنش فشاری بیشینه و تنش معادل هستند. روابط (۴) تا (۶) برای محاسبه کرنش معادل بکار می‌روند:

$$E = \sqrt{(c\varepsilon_m)^2 + (d\gamma_d)^2} \quad (۴)$$

$$c = 0.62/\varepsilon'_{co} \quad \text{و} \quad d = 0.98/\varepsilon'_{co} \quad (۵)$$

$$\varepsilon_m = \sqrt{2} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad \text{و} \quad \gamma_d = \sqrt{2} \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \quad (۶)$$

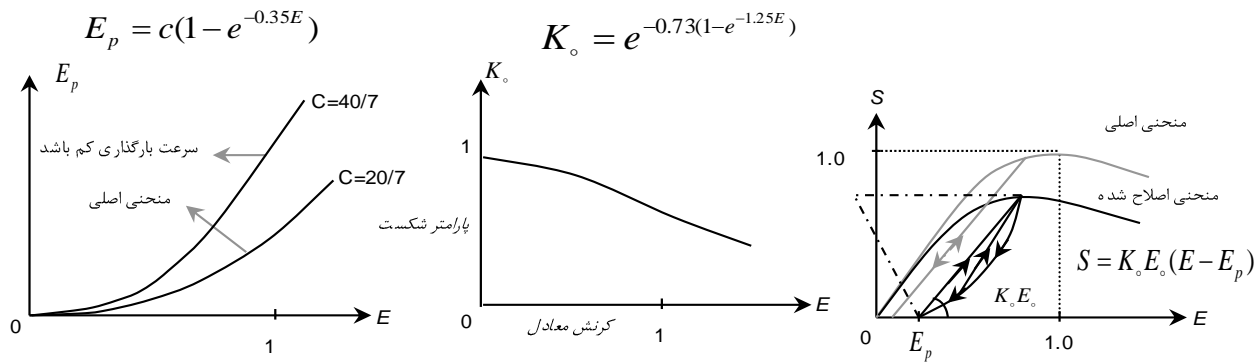
مسلح) ادامه می‌یابد و پس از آن رو به کاهش می‌گذارد، زیرا ماده زنگ آهن متخلخل بوده و با پیشرفت خوردگی این تخلخل افزایش یافته و در نتیجه مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد.

افزایش حجم آرماتور و ایجاد تنش‌های محصورشدگی داخلی باعث ایجاد ترک‌هایی در صفحه آرماتور و ترک‌های قائم خارج از صفحه آرماتور می‌شود. پس از شروع خوردگی با پیشرفت این فرایند، میزان مواد حاصل از خوردگی افزایش یافته و ترک‌های ناشی از آن بیشتر گسترش خواهد یافت. با افزایش درصد خوردگی، ممکن است امتداد ترک‌ها تا رسیدن به سطح بتن ادامه یابد و یا در صفحه آرماتور یک جدایی کامل رخ دهد که این پدیده تورق و فرو ریختن بتن پوشش آرماتور را به همراه خواهد داشت.

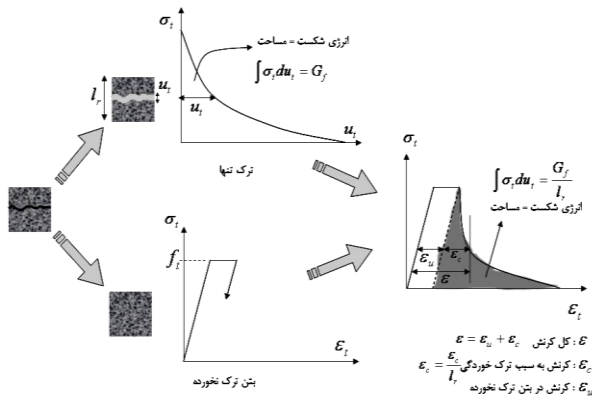
پدیده خوردگی باعث تبدیل قسمتی از فولاد مصرف شده در عضو بتن مسلح به ماده زنگ آهن می‌شود که به صورت پوسته پوسته و متخلخل در سطح آرماتور تشکیل می‌شود. طبیعی است این امر سطح مقطع موثر آرماتور را کاهش داده و باعث می‌شود ظرفیت باربری عضو به طور کامل تغییر نماید. بنابراین در تحلیل و مدلسازی عضو بتنی خورده شده میزان کاهش سطح مقطع آرماتور باید در نظر گرفته شود.

۴-۴ مدل رفتاری المان بتن مسلح

تحقیقات فراوانی در سالیان اخیر برای توسعه روش‌های منطقی برای پیش‌بینی پاسخ المان‌های بتن مسلح در برش و ترکیبات تنش‌های دو محوره و توسعه مدل‌های رفتاری انجام شده است. در پژوهش حاضر از نرم‌افزارهای اجزای محدود غیرخطی "کامتری" و "دبلیوکامدی" توسعه یافته در دانشگاه توکیو استفاده شده است [۴]. در این نرم‌افزارها از معادلات رفتاری که در دانشگاه توکیو توسط مایکاوا و اکامورا [۸] توسعه یافته، استفاده شده است. این نرم‌افزارها با استفاده از مجموعه‌ای از المان‌های مختلف قابلیت مدلسازی رفتار غیرخطی سازه‌های بتنی، تحت حالات مختلف بارگذاری را دارند و با توجه به در اختیار بودن مجوز استفاده و توسعه آن توسط نویسندگان، این برنامه در فرایند تحقیق استفاده شد. در ادامه ابتدا مدل‌های رفتاری مورد استفاده در این نرم‌افزارها معرفی می‌شوند. در این نرم‌افزارها مدل المان دو بعدی بتن مسلح از ترکیب قانون رفتاری بتن و آرماتور ساخته شده است (شکل (۱)). این معادلات رفتاری، رابطه بین تنش متوسط و کرنش متوسط هستند. مدل رفتاری بتن ترک خورده از ترکیب مدل سخت‌شدگی کششی اوکامورا و همکاران [۹] و مدل محصورشدگی فشاری مایکاوا و همکاران [۶] و مدل انتقال برشی لی [۱۰] و مدل رفتاری



شکل ۴-۳: کرنش پلاستیک معادل، عامل شکست و تنش معادل برحسب کرنش معادل



شکل ۴: رفتار نرم‌شدگی کششی بتن غیر مسلح

ϵ ، ϵ_{III} به ترتیب کرنش متوسط و کرنش ترک‌خوردگی هستند. برای بتن غیر مسلح مقادیر C متفاوتی برای منعکس نمودن انرژی آزاد شده به کار برده می‌شود.

تحمل نیروی کششی توسط بتن در صفحه ترک خوردگی از بین می‌رود ولی در فاصله میان ترک‌ها همواره قسمتی از نیروی کششی به واسطه پیوستگی میان بتن و آرماتورها به بتن انتقال می‌یابد و بتن متحمل نیروی کششی می‌شود (شکل ۵ الف). این امر سختی کششی بعد از ترک خوردگی را از سختی کششی آرماتور تنها بیشتر می‌نماید (شکل ۵ ب). این پدیده را با ظرفیت دادن به بتن در نظر می‌گیریم تا پس از تشکیل ترک‌ها هم بتواند نیروی کششی را منتقل نماید. براین اساس رابطه میان تنش متوسط-کرنش متوسط بتن در نظر گرفته می‌شود. (شکل ۵ ج). در این مدل با معرفی یک عامل، تأثیرات ناشی از تفاوت مشخصات پیوستگی بتن و آرماتور در نظر گرفته شده است (شکل ۵ د).

۴-۵-۳ مدل رفتاری بتن تحت فشار

سختی فشاری بتن ترک خورده کمتر از حالت ترک نخورده است. کولینز و وچپو [۱۳] یک رابطه تجربی بر اساس آزمایش‌ها برای تعیین ضریب کاهش ارائه نموده‌اند که سختی بتن ترک خورده را به صورت تابعی از کرنش کششی عمود بر

ϵ_1 و ϵ_2 کرنش‌های اصلی هستند. ϵ_m ، γ_d ، ϵ'_{co} و E به ترتیب کرنش میانگین، کرنش انحرافی، کرنش متناظر با مقاومت فشاری حداکثر و کرنش معادل هستند.

برای آسانی، کرنش پلاستیک معادل و عامل شکست فقط برحسب کرنش معادل فرمول‌بندی شده‌اند (شکل ۳). کرنش پلاستیک معادل برخلاف عامل شکست با سرعت بارگذاری متغیر است و می‌تواند تا دو برابر بزرگتر شود.

۴-۵-۵ مدل رفتاری بتن پس از ترک خوردگی

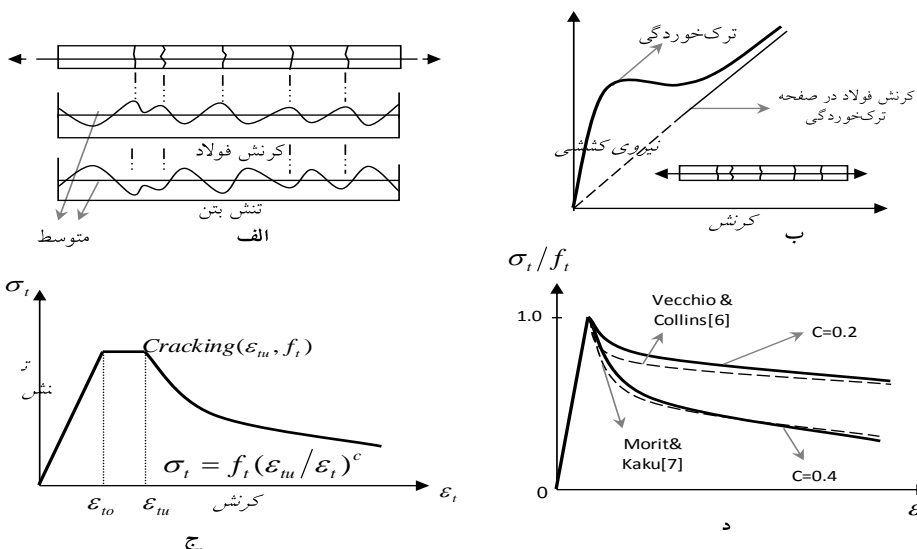
۴-۵-۱ معیار ترک خوردگی

تولید ترک، اولین نقطه‌ای است که بتن مسلح رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد. در مدل حاضر معیارهای ترک خوردگی براساس تنش کششی تعیین می‌شوند. زاویه ترک ظاهر شده عمود بر تنش کششی اصلی است و ترک‌ها وقتی کرنش کششی اصلی به مقدار حدی معادل دو برابر مقدار کرنش کششی متناظر با مقاومت کششی بتن رسید، رخ می‌دهند.

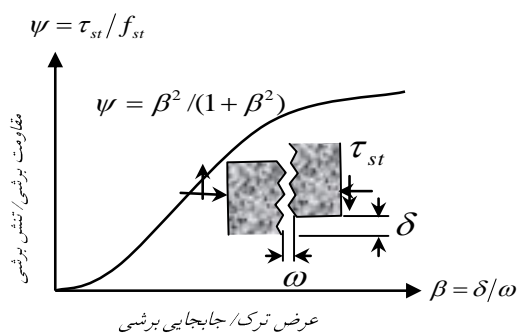
۴-۵-۲ مدل رفتاری تحت کشش

در المان بتن مسلح چندین ترک به سبب اندرکنش آرماتور با بتن و پیوستگی میان آنها ایجاد می‌گردد، ولی در بتن غیرمسلح، فقط یک ترک تشکیل می‌شود، به عبارتی نرم‌شدگی کرنشی در بتن غیر مسلح ترک خورده و افت شدید تنش کششی متناظر آن مربوط به موضع یک ترک است و در بتن ترک نخورده مجاور ترک مسیر باربرداری ارتجاعی دنبال می‌شود (شکل ۴). برای همسانی رابطه نرم‌شدگی تنش کششی در بتن غیر مسلح و سخت‌شدگی کششی بتن مسلح از رابطه (۷) استفاده می‌شود که توسط اوکامورا و همکاران [۹] ارائه شده است.

$$\sigma = f_t \left(\frac{\epsilon_{III}}{\epsilon} \right)^c \quad (7)$$



شکل (۵): الف. توزیع تنش در بتن مسلح ب. سختی کششی بتن مسلح و آرماتور تنها ج. مدل کششی د. مقایسه مدل‌های کششی



شکل (۷): مدل برش انتقالی ساده شده برای یک ترک

۴-۶- مدل رفتاری آرماتورها

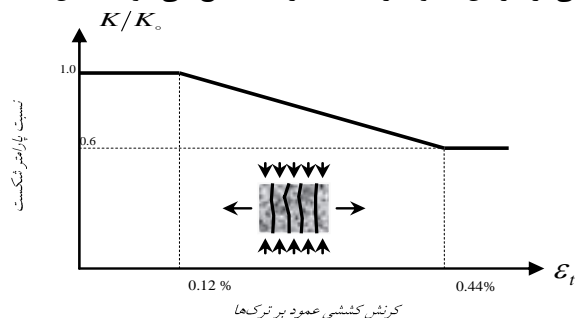
مدل رفتاری آرماتورها بر اساس خصوصیات آرماتورهای تنها و همچنین اثر پیوستگی آرماتور و بتن مدل می‌شوند. مدل رفتاری آرماتور فقط بر پایه مدل شیما و همکارانش [۱۴] در نظر گرفته می‌شود (شکل (۸)).

تنش وارد به یک آرماتور داخل بتن یکنواخت نیست و بیشترین مقدار تنش در جایی که آرماتور در معرض صفحه ترک قرار گرفته است رخ می‌دهد، مدل رفتاری آرماتور داخل بتن، مدل دو خطی فرض می‌شود، که نقطه شروع سخت‌شدگی و شیب سخت‌شدگی کرنشی آن برای ترک موردنظر، ثابت فرض می‌شود (شکل (۹)).

۵- مدل رفتاری فشاری المان بتن مسلح تقویت شده با FRP پس از خوردگی آرماتور

برای مدلسازی اعضاء بتن مسلح به روش اجزاء محدود با استفاده از مدل‌های رفتاری غیرخطی و همچنین در نظر گرفتن

صفحه ترک کاهش می‌دهد (رابطه (۱۱)). در مدل حاضر (روش مایکاو) با استناد به شیوه کولینز، عامل شکست به عنوان تابعی از کرنش عمود بر صفحه ترک اصلاح می‌شود (شکل (۶)).



شکل (۶): کاهش عامل شکست در روش اوکامورا و مایکاو [۸]

۴-۵-۴ مدل رفتاری بتن تحت برش

لی و همکارانش [۱۰] یک مدل رفتاری که بر پایه تابع چگالی اتصالی توسعه یافته و شکل ترک را با دو عامل تعیین می‌نماید، ارائه کرده‌اند. این مدل برای هر نوع بارگذاری قابل کاربرد است، با صرفنظر از مؤلفه الاستیک تغییرشکل در صفحه ترک و اثر عرض ترک، تنش برشی بصورت ضابطه‌ای فقط بر حسب نسبت جابجایی برشی (δ) به عرض ترک (ω) به دست می‌آید (شکل (۷)).

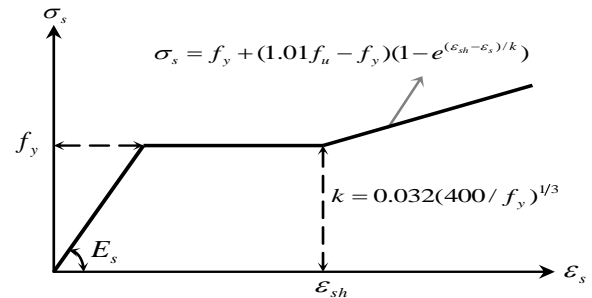
در این مدل مقاومت برشی از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$f_{st} = 18f_c^{1/3} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (8)$$

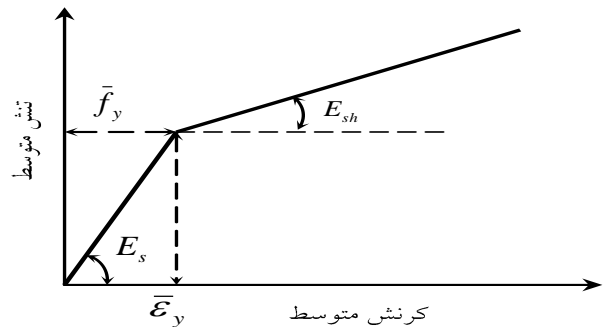
اثرات خوردگی، در این قسمت اثرات خوردگی بر مدل‌های رفتاری بتن مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های اصلاحی پیشنهاد می‌شود.

افزایش می‌یابد. به محض اینکه تنش ایجاد شده در بتن از مقاومت نهایی کششی آن بیشتر شود، ترک‌هایی در راستای عمود بر راستای تنش در بتن ایجاد می‌شود. تأثیر ایجاد چنین ترک‌هایی را می‌توان در رفتار فشاری یک المان بتنی مورد بررسی قرار داد. برای این منظور با استفاده از برنامه تحلیل غیرخطی "کام‌تری" یک المان بتنی تحت بار فشاری خالص با این فرض که ترک‌هایی در اثر خوردگی در صفحه عمود بر صفحه اعمال بار ایجاد شده باشد، مدل‌سازی شده است (شکل (۱۰)). نظر به اینکه که این ترک‌ها در واقع بدلیل کرنش‌های ناشی از تنش‌های محیطی موجود در اطراف آرماتور خورده شده ایجاد می‌شوند، بنابراین می‌توان ترک‌های ناشی از خوردگی را با اعمال کرنش‌های اولیه به المان بتنی، مدل‌سازی نمود. در این مدل‌سازی ابعاد المان ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر، مقاومت فشاری ۲۳۰۰ kg/cm، مقاومت کششی ۲۲۶ kg/cm و مدول الاستیسیته بتن ۲۲۲۰۰۰۰ kg/cm در نظر گرفته شده است. از آنجا که مقاومت مشخصه فشاری یک المان بتن مسلح با افزایش کرنش محیطی کاهش می‌یابد و از طرفی خوردگی آرماتور به دلیل افزایش حجم آرماتور باعث ایجاد کرنش محیطی در المان می‌شود، بنابراین اثری که این فرایند بر روی المان بتن مسلح دارد، همان کاهش مقاومت و سختی فشاری بتن است. به عبارت دیگر برای تحلیل غیرخطی المان بتن مسلح که دچار خوردگی شده، باید المان را از همان ابتدا با مقاومت فشاری کمتر از مقاومت فشاری اولیه آن مدل‌سازی نماییم. نتایج تحلیل اجزاء محدود با استفاده از برنامه "کام‌تری"، برای رفتار محوری بتن، با اعمال ترک‌های ناشی از خوردگی، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

اثرات خوردگی، در این قسمت اثرات خوردگی بر مدل‌های رفتاری بتن مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های اصلاحی پیشنهاد می‌شود.



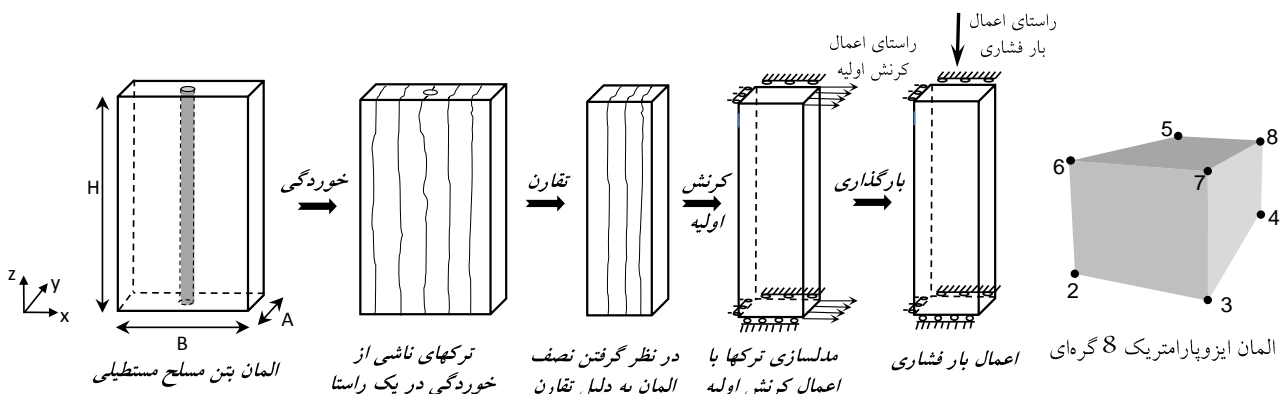
شکل (۸): رابطه تنش-کرنش برای میلگرد تنها



شکل (۹): مدل فولاد مسلح کننده در بتن ترک خورده

برای رفتار فشاری بتن، همانطور که در بخش مقدمه اشاره شد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک و شکست، پایه و اساس تحلیل‌ها گرفته است و از نرم‌افزار "کام‌تری"، برای مدل‌سازی المان تحت فشار استفاده شده است.

هنگام خوردگی آرماتور مواد حاصل از خوردگی در اطراف آن تشکیل می‌شود که دارای حجمی بیش از آرماتور اولیه است. این افزایش حجم باعث ایجاد تنش در بتن اطراف آرماتور می‌شود که با افزایش میزان خوردگی، تنش‌های محیطی اطراف آرماتور



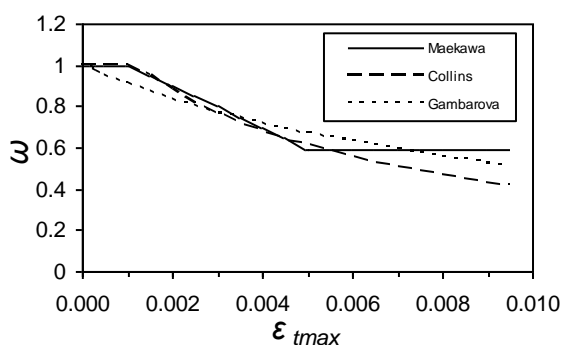
شکل (۱۰): نحوه مدل‌سازی المان بتن مسلح برای بررسی رفتار فشاری آن پس از اعمال ترک‌های ناشی از خوردگی

$$f_c^* = \frac{1}{1+100\varepsilon_t} \times f_c \quad (10)$$

کولینز و وچپو [۱۳] رابطه (۱۱) را برای کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر کرنش‌های محیطی ارائه نموده است:

$$f_c^* = \frac{1}{0.8+170\varepsilon_t} \times f_c \quad (11)$$

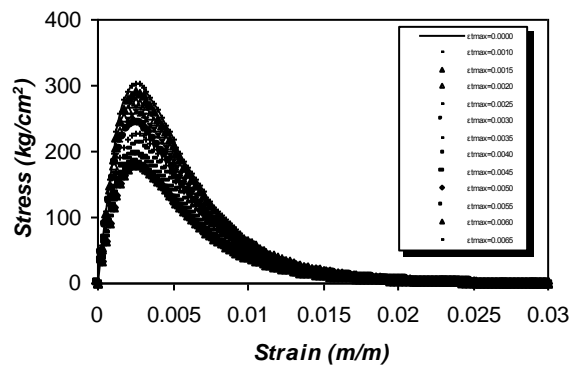
که در آن ε_{co} کرنش در مقاومت فشاری نهایی، ε_t کرنش محیطی، f_c مقاومت فشاری نهایی و f_c^* مقاومت فشاری نهایی کاهش یافته هستند. نمودار شکل (۱۳) مقایسه رابطه مایکاوا و اوکامورا [۶] را با روابط کولینز و وچپو [۱۳] و گامباروا و کرونیلی [۵] نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): مقایسه رابطه مایکاوا با روابط کولینز و گامباروا

همان‌طور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود بر اساس رابطه مایکاوا ضریب کاهش در هیچ حالتی کمتر از ۰/۶ بدست نمی‌آید، به عبارت دیگر به ازای کرنش محیطی بیش از ۰/۰۰۵ ضریب کاهش، همواره ۰/۶ فرض می‌شود. به همین دلیل با توجه به نحوه خوردگی از رابطه پیشنهادی کولینز استفاده شده است، چراکه بر اساس این رابطه هرچه کرنش محیطی افزایش می‌یابد ضریب کاهش بدست آمده کوچکتر می‌شود، به عبارت دیگر برای کرنش‌های بیش از ۰/۰۰۵ نیز ضریب کاهش از ۰/۶ کوچکتر بدست می‌آید. در شکل (۱۴) فرایند خوردگی آرماتور در بتن که به دلیل افزایش حجم آرماتور خورده شده منجر به ایجاد ترک در بتن اطراف آرماتور می‌شود به‌طور الگو وار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است خوردگی آرماتور باعث ایجاد کرنش محیطی در صفحه عمود بر راستای ترک می‌شود که بطور ساده می‌توان با رابطه (۱۲) بیان نمود:

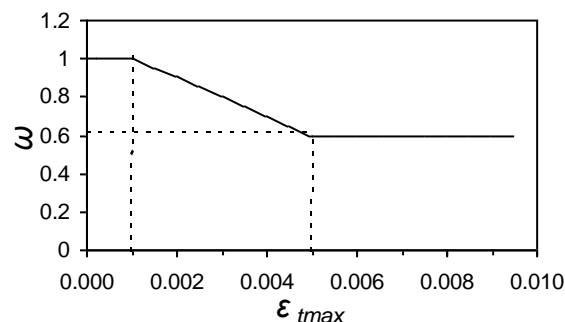
$$\varepsilon_t = \frac{L-L'}{L} \quad (12)$$



شکل (۱۱): بررسی تأثیر ترک‌های ناشی از خوردگی بر منحنی تنش-کرنش فشاری المان بتن مسلح

با افزایش کرنش‌های ناشی از ترک خوردگی، منحنی تنش-کرنش فشاری بتن تغییر نموده است، این تغییرات به گونه‌ای است که با افزایش کرنش‌ها، مقدار تنش فشاری قابل تحمل توسط بتن کاهش می‌یابد.

شکل (۱۲) تغییرات "نسبت حداکثر تنش فشاری بتن با اعمال ترک به حداکثر تنش فشاری بتن در حالت بدون ترک (σ_c)" را بر حسب "افزایش میزان ترک خوردگی (کرنش محیطی عمود بر صفحه ترک یا ε_{tmax})"، نشان می‌دهد.

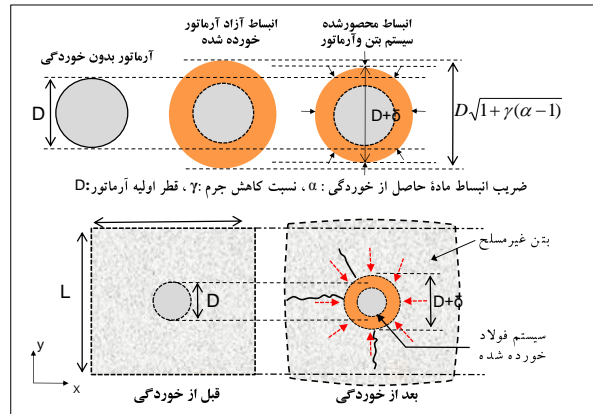


شکل (۱۲): تغییرات نسبت حداکثر تنش فشاری بتن با اعمال ترک به حداکثر تنش فشاری بتن بدون ترک

با توجه به اینکه نرم‌افزار "کامتری" بر اساس روابط پیشنهادی مایکاوا و اوکامورا [۶] توسعه یافته است، نمودار شکل (۱۲) مشابه با رابطه پیشنهادی مایکاوا برای کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر کرنش‌های محیطی بدست می‌آید. گامباروا و کرونیلی [۵] در روش پیشنهادی خود برای مدلسازی خوردگی به روشی مشابه با روش گفته شده عمل نموده است که در آن ضریب کاهش مقاومت فشاری بتن به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f_c^* = \frac{1}{1+k \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{co}}} \times f_c \quad (9)$$

با فرض ε_{co} برابر ۰/۰۰۲، k برابر ۰/۲ داریم:



شکل (۱۴): طرح کلی انبساط فولاد خورده شده در بتن مسلح و ترک‌های ناشی از آن

از ترکیب روابط پیشنهادی گامباروا و کرونی [۵] و تونگتونگ و مایکاو [۴] می‌توان کرنش محیطی را بر اساس درصد خوردگی آرماتور بدست آورد. بر همین اساس داریم:

$$L - L' = n_{bars} \cdot w_{cr} \xrightarrow{n_{bars}=1} L - L' = w_{cr}$$

$$w_{cr} = 2\pi(v_{rs} - 1)X = 2\pi(\alpha - 1) \frac{d_b}{2} (1 - \sqrt{1 - \gamma}) \xrightarrow{\alpha=2}$$

$$\varepsilon_t = \frac{\pi d_b}{L} (1 - \sqrt{1 - \gamma}) = k \sqrt{\rho} (1 - \sqrt{1 - \gamma}) \quad (13)$$

که در آن:

ε_t : کرنش محیطی ناشی از خوردگی آرماتور

L : اندازه بعد نمونه قبل از خوردگی

L' : اندازه بعد نمونه بعد از خوردگی

n_{bars} : تعداد آرماتور در مقطع نمونه

w_{cr} : عرض ترک ناشی از خوردگی آرماتور

α, v_{rs} : ضریب افزایش حجم آرماتور خورده شده

X : عمق نفوذ خوردگی از سطح آرماتور

d_b : قطر آرماتور

ρ : نسبت آرماتور

γ : درصد خوردگی (نسبت سطح مقطع خورده شده به سطح

مقطع اولیه آرماتور)

k : ضریب ثابت

حال با در نظر گرفتن رابطه کولینز (رابطه (۵)) مقدار مقاومت فشاری المان بتن مسلح خورده شده را به ازای درصد خوردگی‌های مختلف بدست می‌آوریم:

$$\begin{cases} f'_{c,cor} = f'_{co} & ; \gamma \leq \gamma_{cr} \\ f'_{c,cor} = \frac{f'_{co}}{0.8 + 170k_{sh} \sqrt{\rho} (1 - \sqrt{1 - \gamma})} & ; \gamma > \gamma_{cr} \end{cases} \quad (14)$$

$$\gamma_{cr} = 1 - \left(1 - \frac{0.001}{k_{sh} \sqrt{\rho}}\right)^2$$

در رابطه فوق داریم:

f'_{co} : مقاومت فشاری اولیه

ρ : نسبت آرماتور

γ : درصد خوردگی (نسبت سطح مقطع خورده شده به سطح

مقطع اولیه آرماتور)

k_{sh} : ضریب شکل (برای مقطع دایره برابر ۳/۱۴ و برای مقطع

مربع ۴ در نظر گرفته می‌شود)

$f'_{c,cor}$: مقاومت فشاری پس از خوردگی

از طرفی قریبی [۱] پس از مطالعات پارامتریک مراحل زیر را برای محاسبه تنش از روی کرنش برای یک المان بتنی محصور شده با FRP در مدل رفتاری الاستوپلاستیک و شکست ارائه نموده است.

۱- با توجه به مقدار کرنش قائم و نیز کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن محصور نشده از رابطه (۱۵) کرنش معادل محاسبه می‌شود:

$$e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}} \quad (15)$$

۲- با فرض گسیخته نشدن ورق FRP و نیز جاری نشدن خاموت‌ها، سختی محصورشدگی کل با جمع نمودن سختی محصورشدگی FRP ($E_f t/r$) و سختی محصورشدگی معادل خاموتها به دست می‌آید:

$$\left(\frac{Et}{r}\right) = \left(\frac{E_f t}{r}\right) + \left(\frac{Et}{r}\right)_{eq} \quad (16)$$

$$\left(\frac{Et}{r}\right)_{eq} = 10^6 \rho_s \quad (17)$$

۳- کرنش محیطی با استفاده از رابطه (۱۸) و مقدار سختی محصورشدگی کل تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} e_\theta = \beta_\theta \times (-0.01 \times a^2 + 0.1567 \times a - 0.1191) \times e_z^{(-0.1283 \times a + 2.2546)} \\ a = \ln\left(\frac{Et}{r} + 1\right) \end{cases} \quad (18)$$

۴- در صورت گسیخته شدن FRP ($e_\theta \times \varepsilon_{co} \geq \varepsilon_{uf} = \frac{F_f}{E_f}$)

سختی محصورشدگی FRP ($E_f t/r$) صفر و در صورت جاری شدن خاموت، سختی محصورشدگی معادل اصلاح می‌شود:

$$\varepsilon_\theta > \varepsilon_y \Rightarrow \left(\frac{Et}{r}\right)_{eq} = 10^6 \times \rho_s \times \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_\theta} \quad (19)$$

۵- با استفاده از روابط زیر درصد مشارکت خاموت و FRP در محصورشدگی محاسبه می‌شود:

$$k_{0_{uc}} = e^{-0.73e_{max}(1-e^{-1.25e_{max}})} \quad (28)$$

$$k_{0_{extra}} = \frac{0.023 \left(\frac{Et}{r}\right)^{0.2909} \times (\ln(e_{max} + 1))^{(11-0.659 \ln(\frac{Et}{r}+1))}}{(\ln(e_{max} + 1))^{(11-0.659 \ln(\frac{Et}{r}+1))} + 1} \quad (29)$$

$$k_0 = k_{0_{uc}} + \lambda \times k_{0_{extra}} \quad (30)$$

۱۲- با توجه به روابط زیر تنش قائم به دست می‌آید:

$$S = 2k_0(e - e_p) \quad (31)$$

$$\sigma = S \times f'_{co} \quad (32)$$

عوامل‌های مورد استفاده در روابط فوق عبارتند از:

\mathcal{E} : کرنش فشاری بتن محصور شده

\mathcal{E}_{co} : کرنش نظیر مقاومت فشاری بتن محصور نشده

e : کرنش فشاری معادل بتن محصور شده

$(Et/r)_{eq}$: سختی محصورشدگی معادل خاموت

\mathcal{E}_z : کرنش قائم نسبی شده با \mathcal{E}_{co}

\mathcal{E}_θ : کرنش محیطی نسبی شده با \mathcal{E}_{co}

r : شعاع در المان استوانه‌ای

b : طول ضلع مربع در المان مکعبی

e_{max} : بیش‌ترین کرنش معادل قائم

D : قطر بتن محصور شده با خاموت

f'_{co} : مقاومت فشاری بتن محصور نشده

σ : تنش فشاری بتن محصور شده

\mathcal{E}_{uf} : کرنش معادل گسیختگی FRP

S_f : فاصله آزاد بین نوارهای FRP

t : ضخامت ورق FRP

F_f : مقاومت نهایی FRP

E : سختی ورق FRP

W : عرض نوار FRP

\mathcal{E}_θ : کرنش محیطی بتن

S_s : فاصله خاموت‌ها

\mathcal{E}_y : کرنش جاری شدن خاموت

ρ_s : درصد حجمی خاموت

k_0 : پارامتر شکست

e_p : کرنش پلاستیک معادل

S : تنش معادل

با جایگذاری مقدار بدست آمده از رابطه (۱۴) برای $f'_{c,cor}$

به جای f'_{co} در رابطه (۳۲) می‌توان مدل رفتاری فشاری المان بتن مسلح تقویت شده با FRP پس از خوردگی آرماتور را

$$W_f = \frac{\frac{E_f t}{r}}{\frac{E_f t}{r} + \left(\frac{Et}{t}\right)_{eq}} \quad (20)$$

$$W_s = \frac{\left(\frac{Et}{r}\right)_{eq}}{\frac{E_f t}{r} + \left(\frac{Et}{t}\right)_{eq}} \quad (21)$$

۶- ضریب محصورشدگی ناکامل FRP (α_f) از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$\alpha_f = e^{-f \times e_{max} \times (1 - e^{-0.3e_{max}})} \quad (22)$$

عامل f در رابطه (۲۲) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{\left(0.1 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 0.74\right) \times \left(\frac{S_f}{D}\right)^{(0.19 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 1.06)}}{1 + \left(\frac{S_f}{D}\right)^{(0.19 \times \ln\left(w \frac{E_f t}{r}\right) - 1.06)}}$$

۷- ضریب شکل مقطع FRP (β_f) برای مقطع مربع از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود. برای مقطع دایره $\beta_f = 1$ است:

$$\beta_f = 1 + 0.0324 \times e_{max} - 0.0061 \times e_{max} \times \ln\left(\frac{E_f t}{r}\right)_{eq} \quad (23)$$

$$r = \frac{b}{2}$$

۸- ضریب محصورشدگی ناکامل خاموت (α_s) از رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$\alpha_s = e^{(3.67 \rho_s^2 - 1.45 \rho_s - 0.01) \left(\frac{S_s}{D} - 0.1\right) \times e_{max} \times e^{-0.1e_{max}}} \quad (24)$$

۹- ضریب شکل مقطع برای خاموت (β_s) از رابطه (۲۵) تعیین می‌شود. اگر مقطع دایره است $\beta_s = 1$

$$\beta_s = 1 + 0.0324 \times e_{max} - 0.0061 \times e_{max} \times \ln\left(\frac{Et}{r}\right)_{eq} \quad (25)$$

$$r = \frac{b}{2}$$

۱۰- ضریب کاهش λ طبق رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\lambda = W_f \times \alpha_f \times \beta_f + W_s \times \alpha_s \times \beta_s \quad (26)$$

۱۱- عامل شکست و کرنش پلاستیک معادل با روابط (۲۷) تا (۳۰) تعیین می‌شود. در این روابط از سختی محصورشدگی کل استفاده می‌شود.

$$e_p = e_{max} - \frac{17}{7} \left(1 - e^{-0.35e_{max}}\right) \quad (27)$$

کششی بتن مسلح و عامل‌های مرتبط با آن است. با بررسی مقالات ارائه شده [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] و [۲۰] در زمینه طرز کار پیوستگی و عامل‌های مؤثر در مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن، می‌توان این عوامل را به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. اولین دسته عوامل مربوط به بتن است از جمله می‌توان به اختلاط بتن شامل نوع سنگدانه‌ها، مواد آلی مخلوط، الیاف، مواد مضاف و همچنین مقاومت فشاری و کششی بتن اشاره نمود. دسته دوم عوامل مربوط به آرماتور است که عبارتند از قطر آرماتور، اندازه آج و مشخصات سطح آرماتور، طول مهاری، موقعیت آرماتور از نظر فاصله تا آرماتورهای مجاور و فاصله تا نزدیکتر سطح بتن و روکش‌هایی که بر روی سطح آرماتور قرار داده می‌شود. بقیه عوامل مؤثر که در مقالات مختلف با آنها برخورد می‌نماییم شامل، وجود آرماتورهای عرضی و مقدار آنها، فشار جانبی (محصور شدگی)، دما، درصد خوردگی، شرایط محیطی، تاریخچه بارگذاری و غیره هستند. در این مقاله با توجه به المان موردنظر، عوامل زیر به عنوان پارامترهای مؤثر در رفتار کششی این المان در نظر گرفته شده‌اند:

- مقدار پوشش بتن و وجود خاموت در اطراف آرماتور اصلی
- محصورشدگی بتن توسط FRP
- خوردگی آرماتور

۶-۱- روش پیشنهادی محاسبه تنش پیوستگی

با توجه به اینکه هدف اصلی بررسی اثر خوردگی بر روی رفتار المان است، ابتدا با بررسی طرز کار خوردگی آرماتور (شکل (۱۴)) به این نتیجه می‌رسیم که خوردگی آرماتور با افزایش حجمی که ایجاد می‌نماید و فشاری که به بتن اطراف آرماتور اعمال می‌دارد، باعث ایجاد ترک‌های شکافی مشابه با ترک‌های شکافی ناشی از تنش پیوستگی می‌شود. بنابراین می‌توان اینگونه استنباط نمود که یک نمونه خورده شده دارای ترک‌های شکافی اولیه است که باعث کاهش مقاومت پیوستگی خواهد شد.

بر همین اساس ویدال و همکاران [۲۱] بر اساس یک سری نتایج آزمایشگاهی، به بررسی ارتباط میزان خوردگی آرماتور و عرض ترک ایجاد شده در اثر آن، پرداخته و روابط (۳۴) تا (۳۶) را برای بیان این ارتباط ارائه نموده‌اند.

$$w = K(\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \quad (34)$$

$$\Delta A_{s0} = A_s \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha}{\phi_0} \left(7.35 + 9.32 \frac{c}{\phi_0} \right) 10^{-3} \right]^2 \right] \quad (35)$$

$$\Delta A_s = \frac{\pi}{4} (2\alpha x \phi_0 - \alpha^2 x^2) \quad (36)$$

در روابط فوق واحدها به نیوتن و میلی‌متر بوده و داریم:

بدست آورده و در مدلسازی عضو بتن مسلح به روش ترک پخشی از آن استفاده نمود. البته باید توجه داشت که در مدلسازی، نسبت آرماتور عضو بتن مسلح خورده شده بر اساس رابطه (۳۳) باید اصلاح شود.

$$\rho_{cor} = (1 - \gamma) \cdot \rho_o \quad (33)$$

که در آن ρ_o نسبت آرماتور قبل از خوردگی، ρ_{cor} نسبت آرماتور بعد از خوردگی و γ درصد خوردگی است.

۶- مدل رفتاری کششی المان بتن مسلح تقویت شده با FRP پس از خوردگی آرماتور

بررسی اثر خوردگی در رفتار کششی المان بتن مسلح تقویت شده با FRP به روش ریز مدلسازی با کمک برنامه‌ای نوشته شده به زبان فرترن انجام پذیرفته است.

سالم [۱۵] با استفاده از مدل چسبندگی-لغزش-کرنش شیما و همکاران [۱۶] و با ریزمدلسازی المان بتن مسلح به بررسی عددی رفتار ترک خوردگی نمونه‌های بتنی تحت کشش خالص پرداخته و رهنماسپهر [۲] بر مبنای روش ریزمدلسازی او و با اصلاح و اعمال تاثیر FRP، رفتار ترک خوردگی المان‌های بتن مسلح تقویت شده توسط FRP را مورد مطالعه قرار داده است. در این روش ریزمدلسازی ابتدا فاصله بین دو ترک برابر با طول نمونه فرض می‌شود. با فرض یک مقدار متوسط برای کرنش در مرحله اول که برای فولاد، بتن و FRP یکسان است، گام‌های تحلیل آغاز می‌شود و هر بار با انجام یک عملیات تکراری در زیر برنامه‌های جداگانه‌ای برای فولاد و FRP از راه ریزمدلسازی، مقدار تنش و مقدار کرنش در هر نقطه از طول آرماتور و FRP محاسبه می‌شود و از روی آن تنش و کرنش متوسط برای بتن، FRP و آرماتور محاسبه می‌شود. با مقایسه تنش در بتن با مقاومت کششی آن، امکان تشکیل یک ترک جدید بررسی می‌شود. در صورت وقوع ترک جدید، یک ترک به تعداد ترک‌ها اضافه و طول اولیه به تعداد کل ترک‌ها تقسیم می‌شود و دوباره محاسبات را ادامه می‌دهیم. محاسبات تا گسیخته شدن آرماتور و FRP (و یا جدایش FRP از بتن) ادامه می‌یابد.

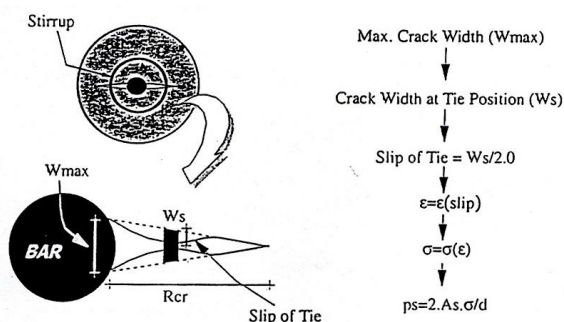
در این مقاله برای در نظر گرفتن اثر خوردگی در برنامه‌ای که برای انجام محاسبات مربوط به روش ریزمدلسازی گفته شده تهیه شده، تغییراتی در معادلات مربوط به رابطه پیوستگی آرماتور و بتن بر اساس روش پیشنهادی اعمال شده، سپس با استفاده از مطالعه پارامتریک مدل رفتاری کششی المان بتن مسلح تقویت شده با FRP پس از خوردگی آرماتور مورد بررسی قرار گرفته است.

پیوستگی بین آرماتور و بتن عامل اصلی در تعیین رفتار

شکل‌گیری ترک‌های شکافی توسعه داده‌اند، مقدار تنش پیوستگی را محاسبه نموده و از آن، در ادامه ریزمدلسازی و استخراج رفتار متوسط المان در کشش استفاده نمود.

$$\tau = f_c' \left(0.042 - 0.288 \left(\frac{w}{\phi_0} \right) \right) + \left(\frac{0.258}{\left(\frac{w}{\phi_0} \right) + 0.11} + 1.018 \right) p \quad (39)$$

اگر در اطراف آرماتور اصلی خاموت وجود داشته باشد، در برابر ترک ایجاد شده در اطراف آرماتور که به طرف سطح بتن در حال گسترش است، مقاومت نموده و مانع افزایش عرض ترک می‌شود. برای در نظرگرفتن اثر خاموت ابتدا مقدار عرض ترک در محل قرارگیری خاموت بدست آمده، سپس فرض می‌شود مقدار لغزش خاموت برابر با مقدار عرض ترک باشد و با استفاده از مقدار لغزش، تنش پیوستگی بین خاموت و بتن بر اساس مدل شیما [۱۴] بدست می‌آید که با فشار شعاعی در سطح آرماتور در تعادل بوده و به این ترتیب می‌توان اثر آن را در تحلیل در نظر گرفت (شکل (۱۶)).



شکل (۱۶): وجود خاموت در اطراف آرماتور اصلی و نحوه محاسبه نقش آن در محصورشدگی آرماتور اصلی

البته وقتی آرماتور اصلی دچار خوردگی شده باشد به‌طور معمول خاموت‌ها قبل از آنها دچار خوردگی خواهند شد و از طرفی بتن اطراف آرماتور خورده شده یا به عبارت دیگر پوشش خاموت در این حالت پوسته پوسته می‌شود، بنابراین خاموت نقش چندانی در کاهش گسترش ترک نخواهد داشت، زیرا تنش پیوستگی آن بشدت کاهش می‌یابد و نمی‌تواند مقاومت چندانی از خود نشان دهد. اما در حالت بدون خوردگی آرماتور اثر آن به روش فوق در برنامه منظور شده است.

تأثیر محصورشدگی بتن توسط FRP در رفتار کششی نیز به روشی مشابه با روشی که برای خاموت شرح داده شد، در برنامه وارد شده است. بدین ترتیب که پس از اینکه آرماتور دچار خوردگی می‌شود، ترک‌های شکافی در بتن اطراف آرماتور ایجاد می‌شود که عرض این ترک‌ها در سطح تماس بتن و آرماتور حداکثر بوده و به سمت سطح بتن کاهش می‌یابد، اما در عمل با

w : عرض ترک

c : پوشش بتن روی آرماتور

ΔA_s : مقدار سطح مقطع از بین رفته آرماتور

ΔA_{s0} : مقدار سطح مقطع از بین رفته آرماتور متناظر با شروع

ترک‌های ناشی از خوردگی

k : ضریب ثابت برابر 0.575

ϕ_0 : قطر اولیه آرماتور

α : ضریب افزایش حجم آرماتور که برابر با ۲ فرض می‌شود

x : میزان خوردگی بر اساس مقدار نفوذ آن در آرماتور

با توجه به درصد خوردگی تعریف شده در تحقیق حاضر

(γ) که برابر با مقدار سطح مقطع از بین رفته آرماتور به سطح

مقطع اولیه آن است، می‌توان میزان خوردگی در روابط فوق (x)

را با استفاده از رابطه (۳۷) به γ ارتباط داد:

$$x = \frac{1 - \sqrt{1 - \gamma}}{2} \cdot \phi_0 \quad (37)$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط (۲۸) تا (۳۰) و (۳۱) ارتباط

بین درصد خوردگی و عرض ترک ناشی از آن بدست می‌آید.

پس از محاسبه عرض ترک ایجاد شده در اثر خوردگی

آرماتور، می‌توان فشار ناشی از افزایش حجم آرماتور که منجر به

ایجاد چنین عرض ترکی شده است را بدست آورد. برای این

منظور از رابطه (۳۸) که توسط سالم [۱۵] ارائه شده، استفاده

شده است.

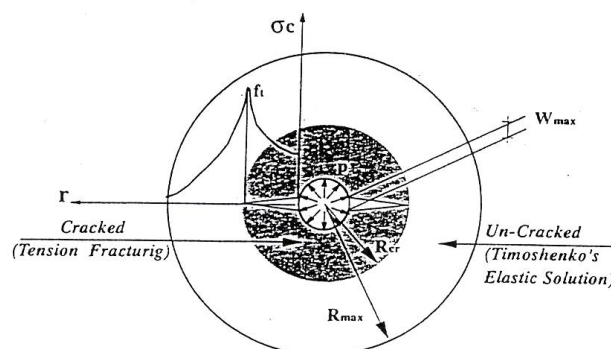
$$p = \frac{2f_t}{\phi_0} \left(1 + \frac{0.5f_t w}{G_f} \right)^{-3} \cdot \left(c - \frac{\phi_0}{2} \right) \quad (38)$$

که در آن p فشار شعاعی در سطح تماس آرماتور و بتن، w

عرض ترک، ϕ_0 قطر آرماتور، c پوشش بتن، f_t مقاومت کششی

بتن و G_f انرژی شکست (بین 0.1 تا 0.15) بوده و واحدها بر

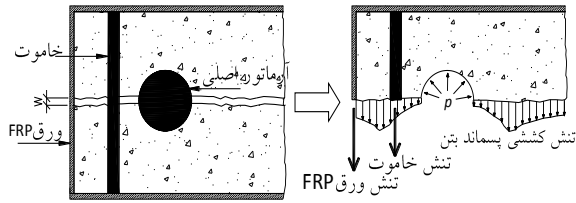
حسب کیلوگرم و سانتی‌متر است (شکل (۱۵)).



شکل (۱۵): ارتباط بین عرض ترک و فشار ناشی از افزایش حجم آرماتور خورده شده

پس از محاسبه تنش شعاعی p می‌توان با استفاده از رابطه

(۳۹) که گامباروا و همکارانش [۲۲] برای تنش پیوستگی پس از



شکل (۱۸): ترکهای شکافی ناشی از خوردگی و دیاگرام تنش در محل ترک

۲-۶- مقدار بحرانی تسلیح کننده

مقدار بحرانی تسلیح کننده، حداقل درصد فولادی است که مقدار کمتر از آن، ترک جدیدی در نمونه ایجاد نموده و فقط یک ترک در نمونه ایجاد می‌نماید. در این حالت، رفتار بتن همچون بتن غیرمسلح خواهد بود. به عبارت دیگر، حدی برای قابلیت استفاده از منحنی‌های سخت‌شدگی کششی در روش ترک پختی است. به این مفهوم که اگر درصد آرماتور از مقدار بحرانی بیشتر باشد می‌توان در تحلیل عضو بتن مسلح سخت‌شدگی کششی بتن را در نظر گرفت و در غیر این صورت سخت‌شدگی کششی در بتن رخ نداده و رفتار بتن در کشش نزدیک به رفتار بتن غیرمسلح خواهد بود یا به عبارت دیگر رفتار بتن را باید بصورت نرم‌شدگی کششی در نظر گرفت.

بر اساس یک مطالعه پارامتریک با توجه به عامل‌هایی همچون نسبت پوشش بتن به قطر آرماتور، وجود خاموت، درصد خوردگی آرماتور اصلی و محصورشدگی بتن توسط FRP و با استفاده از روش ریزمدلسازی یک رابطه برای مقدار بحرانی تسلیح کننده بدست آورده شده است. البته باید گفت که عامل وجود خاموت برای حالتی که آرماتور خورده نشده باشد مورد بررسی قرار گرفته و در صورت خورده شدن آرماتور از نقش خاموت برای اطمینان صرف‌نظر شده است. همچنین عامل وجود FRP پس از خوردگی آرماتور مورد بررسی قرار گرفته است. بر همین اساس مطالعه پارامتریک برای دو حالت، بدون خوردگی و با خوردگی انجام شده، که نتایج آن به قرار زیر است.

$$\rho_{cr,cor} = \frac{f_t}{f_y} \times \beta \quad (41)$$

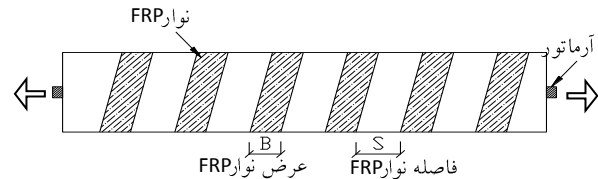
عامل β بر اساس رابطه (۴۲) بدست می‌آید:

$$\beta = \begin{cases} \text{without corrosion} \\ \left(\frac{5}{\left(\frac{c}{d_b} \right)^2} \times \frac{1}{V_s^{0.6} \times 4} \right) \geq 1 \\ \text{with corrosion} \\ \left(200\gamma + \left(4 - 1.4 \frac{c}{d_b} \right) \right) \times \alpha_{FRP} \geq 1 \end{cases} \quad (42)$$

و عامل‌های V_s و α_{FRP} با استفاده از رابطه (۴۳) بدست می‌آیند:

افزایش خوردگی ترک شکافی تا سطح بتن پیشروی نموده و در این حالت می‌توان عرض ترک را تا سطح بتن یکسان در نظر گرفت (شکل (۱۸)) که مقدار آن از رابطه (۳۴) بدست می‌آید.

حال اگر در اطراف بتن، FRP پیچیده شده باشد (شکل (۱۷))، به طوریکه طول مهاری آن تأمین شده و دچار جدایی زودرس از سطح بتن نشود، می‌توان به روشی مشابه با روشی که برای خاموت استفاده شد، با بکارگیری رابطه چسبندگی-لغزش بین FRP و بتن نیرویی را که FRP تحمل می‌نماید بدست آورد.



شکل (۱۷): نمونه بتن مسلح محصور شده با FRP تحت کشش

به این ترتیب که مقدار لغزش را برابر با نصف عرض ترک در نظر گرفته و تنش پیوستگی انتقال یافته از FRP به بتن را از روی مقدار لغزش بدست می‌آوریم، سپس با داشتن مشخصات FRP و حل معادله تعادل، تنش محصورشدگی آرماتور ناشی از وجود FRP محاسبه می‌شود. برای محاسبه مقدار این تنش از رابطه (۴۰) که از راه مطالعه پارامتریک بدست آمده استفاده شده است:

$$p_{FRP} = \left(\frac{\tau_{0FRP} E_{FRP}^{1.6} t_{FRP} B_{FRP}}{S_{FRP}} \right) \cdot \left(\frac{2}{w + 0.008} \right) \quad (40)$$

در رابطه فوق واحدها بر حسب کیلوگرم و سانتی‌متر بوده و τ_{0FRP} ، B_{FRP} ، E_{FRP} ، t_{FRP} به ترتیب ضخامت ورق، مدول الاستیسیته، عرض نوار، تنش پیوستگی حداکثر و فاصله نوارهای FRP هستند.

در صورتیکه در هنگام چسباندن FRP تنش پیش کشیدگی در آن ایجاد شده باشد، در این مرحله می‌توان مقدار آن را با تنش بدست آمده از رابطه (۴۰) جمع نموده و به این ترتیب کل تنش محصورکنندگی ناشی از وجود FRP را محاسبه نمود. حال با داشتن این تنش و حل معادله تعادل در مقطع ترک شکافی (شکل (۱۸)) مقدار تنش شعاعی p بدست می‌آید که تأثیر محصورشدگی بتن توسط FRP نیز در آن منظور شده است و از این راه با استفاده از رابطه (۳۹) تنش پیوستگی را بدست آورده و در تحلیل مورد استفاده قرار می‌دهیم.

در روابط فوق هر یک از عامل‌ها عبارتند از:

$$\alpha_{FRP} = \frac{1}{1 + 120\alpha'_{FRP}}; \alpha'_{FRP} = \frac{E_{FRP} t_{FRP} B_{FRP} \sigma_{0FRP}}{S_{FRP} \times 10^8}$$

$$V_s = \begin{cases} \frac{A_b}{S_s} & 0 < V_s \leq 1 \\ 0.1 & 0 \geq V_s \text{ or } V_s > 1 \end{cases} \quad (43)$$

$\rho_{cr,cor}$: مقدار بحرانی تسلیح‌کننده (آرماتور) پس از خوردگی

$\frac{c}{d_b}$: پوشش بتن به قطر آرماتور

γ : درصد خوردگی آرماتور

V_s : سطح مقطع مؤثر خاموت به فاصله خاموت‌گذاری

مدول الاستیسیته، ضخامت، عرض، فاصله و تنش پیش کشیدگی FRP

۳-۶- سخت‌شدگی کششی در المان بتن مسلح تقویت

شده با FRP پس از خوردگی آرماتور

مدل رفتار سخت‌شدگی کششی اوکامورا و همکاران [۶] که به عنوان مدل رفتاری مبنا مدنظر قرار گرفته است، محدودیت‌هایی دارد. از مهم‌ترین آنها اینست که طرح گفته شده فقط برای اعضای بتن مسلح که دارای نسبت آرماتور (ρ) بزرگتر از مقدار بحرانی آرماتور ($\rho_{cr,cor}$) باشند، توسعه یافته است. به عبارت دیگر رفتار کششی اعضای که نسبت آرماتور (ρ) در آنها کمتر از $\rho_{cr,cor}$ باشد، با مدل سخت‌شدگی کششی گفته شده متفاوت بوده و در واقع چنین اعضای رفتاری مشابه با رفتار کششی بتن غیرمسلح دارند. همچنین اثر وقوع ترک‌های شکافی در نمونه‌هایی با پوشش بتن کم در این مدل منظور نشده است. با توجه به این مطلب و برای در نظر گرفتن این عامل‌ها، در مدل سخت‌شدگی کششی، می‌توان مقدار بحرانی تسلیح‌کننده (آرماتور) را در عضو بتن مسلح با استفاده از رابطه پیشنهادی در قسمت قبل (رابطه (۴۲)) که تأثیر مقدار پوشش بتن، درصد خوردگی، وجود خاموت و محصورشدگی با FRP در آن منظور شده است، محاسبه نمود. اگر نسبت آرماتور موجود در نمونه‌ای از مقدار بحرانی محاسبه شده با استفاده از این رابطه بیشتر باشد، می‌توان مدل رفتاری کششی آن را بر اساس مدل سخت‌شدگی کششی اوکامورا و همکاران [۹] در نظر گرفت، در غیر اینصورت رفتار کششی نمونه باید مشابه بتن غیرمسلح فرض شود و از مدل نرم‌شدگی کششی استفاده نمود.

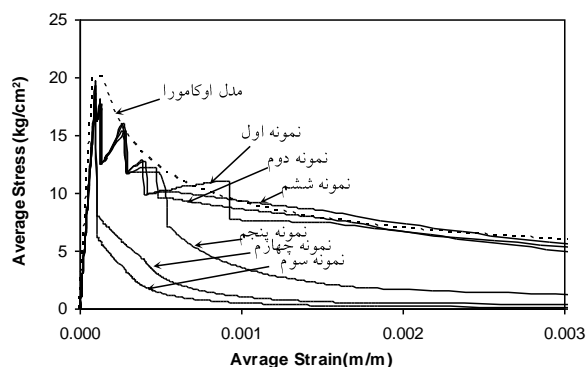
برای بررسی درستی این موضوع برای برخی از نمونه‌های که در بخش [۶-۲-§] برای انجام مطالعات پارامتریک از آنها استفاده شده، مقدار بحرانی آرماتور ($\rho_{cr,cor}$) را با استفاده از

رابطه (۴۲) بدست آورده و با نسبت آرماتور (ρ) آنها مقایسه می‌نماییم. جدول (۱) مقادیر ρ و $\rho_{cr,cor}$ را برای نمونه‌های گفته شده نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقادیر ρ و $\rho_{cr,cor}$ برای نمونه‌های تحلیل شده

	ρ	c/d_b	γ	V_s	α_{FRP}	$\rho_{cr,cor}$
۱	۰/۰۱	۳/۰	---	---	---	۰/۰۰۵
۲	۰/۰۱	۱/۵	---	---	---	۰/۰۰۵
۳	۰/۰۱	۰/۵	---	---	---	۰/۱
۴	۰/۰۱	۳/۰	---	---	---	۰/۰۲
۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۰۲	۰/۱۶	---	۰/۰۷
۶	۰/۰۱	۳/۰	۰/۰۲	---	۰/۴۵	۰/۰۰۶

در نمودار شکل (۱۹) منحنی رفتاری کششی بتن این نمونه‌ها آورده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است در نمونه‌های اول، دوم و ششم که مقدار ρ آنها از $\rho_{cr,cor}$ آنها بیشتر است، منحنی رفتاری‌شان تا حد زیادی با طرح سخت‌شدگی اوکامورا و همکاران [۹] انطباق دارد و در نمونه‌های سوم، چهارم و پنجم که ρ از $\rho_{cr,cor}$ کمتر است، رفتار کششی افت نموده و بصورت نرم‌شدگی کششی نمایان شده است.



شکل (۱۹): مقایسه منحنی سخت‌شدگی کششی نمونه‌ها با مدل اوکامورا

۷- اعتبارسنجی مدل‌های رفتاری پیشنهادی

۷-۱- اعتبارسنجی در سطح المان

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر هدف اصلی استخراج مدل رفتاری برای یک المان بوده، بنابراین در این قسمت قبل از اعتبارسنجی مدل‌های رفتاری کششی پیشنهادی در ابعاد و مشخصات یک عضو بتن مسلح، ابتدا این اعتبارسنجی در سطح یک المان مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور، با توجه به اینکه معیار اصلی در انتخاب مدل رفتاری کششی مقدار بحرانی آرماتور است، از تحلیل‌های انجام شده در بخش [۶-۲-§]، نمونه‌های سوم و ششم بصورتی انتخاب شده‌اند که در اولی

RC-SOUND به عنوان نمونه مرجع بدون خوردگی و FRP مورد آزمایش قرار گرفته است.

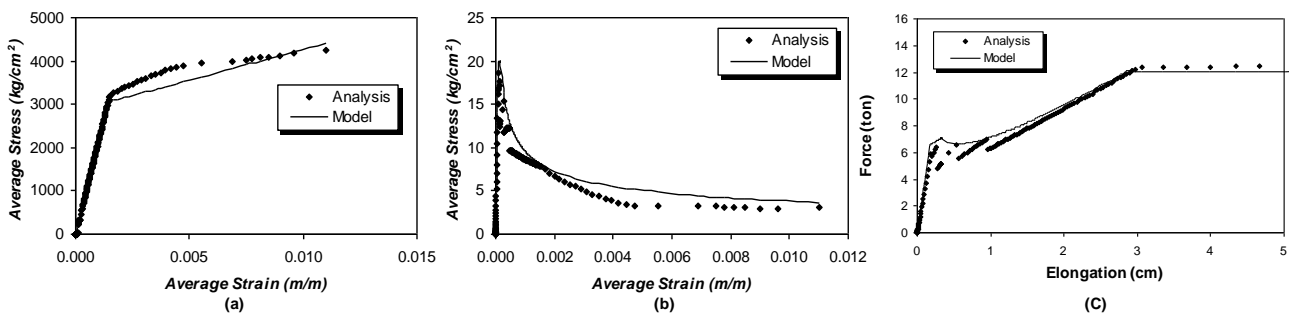
در شکل (۲۲)، مقایسه نتایج حاصل از تحلیل و آزمایش برای نمونه‌های با مشخصات مربوط به نمونه RC-COR-1 (نمونه خورده شده) و نمونه RICF-COR-1 (نمونه تقویت شده پس از خوردگی) در کنار نمونه مرجع (RC-SOUND) آورده شده است. این تحلیل توسط برنامه COM3 انجام شده است. شکل (۲۳) مربوط به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌هایی با مشخصات مربوط به نمونه RC-COR-2 و RICF-COR-2 و RC-SOUND با نتایج حاصل از آزمایش انجام شده است. تحلیل‌های این نمونه نیز توسط برنامه COM3 انجام شده است.

در شکل (۲۴) نتایج تحلیل نمونه سوم (RC-COR-3) که میزان خوردگی در آن بیشتر از دو نمونه قبل بوده و مدلسازی آن با المان‌های دوبعدی توسط برنامه "دبلیوکامدی" انجام و با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است.

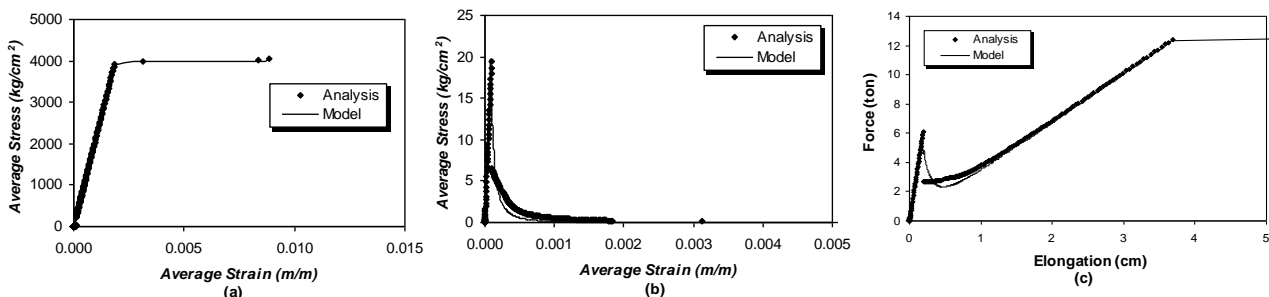
نسبت آرماتور کمتر از مقدار بحرانی آن و در دیگری بیشتر باشد. در شکل (۲۰) و شکل (۲۱) نتایج حاصل از این بررسی به تفکیک برای دو نمونه گفته شده آورده شده است.

۲-۷- اعتبارسنجی با استفاده از نمونه آزمایشگاهی

در این قسمت یک نمونه آزمایشگاهی که توسط لی و همکاران [۲۳] آزمایش شده است، با استفاده از برنامه "کامتری" و "دبلیوکامدی"، مدلسازی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. مدل‌های رفتاری پیش فرض در این برنامه‌ها بر اساس مدل‌های پیشنهادی، اصلاح شده‌اند. در این آزمایش‌ها، شش نمونه، طراحی شده که بسته به درجه خوردگی آنها و وجود FRP به عنوان ترمیم‌کننده تقسیم‌بندی و نام‌گذاری شده‌اند. به این ترتیب که نمونه RC-COR-1 بمدت ۲ هفته و نمونه‌های RC-COR-2 و RC-COR-3 به ترتیب ۴ و ۸ هفته تحت جریان الکتریکی قرار گرفته‌اند. پس از اینکه در نمونه‌های اول و دوم ترک‌های ناشی از خوردگی رخ داده، این نمونه‌ها توسط FRP به طور کامل دورپیچ شده و به این ترتیب نمونه RICF-COR-1 و COR-2 و RMCF-COR-2 تهیه شده. گفتنی است نمونه



شکل (۲۰): مقایسه منحنی تنش- کرنش متوسط (a) آرماتور (b) بتن (c) ظرفیت کششی، مدل پیشنهادی و ریزمدلسازی برای نمونه ششم



شکل (۲۱): مقایسه منحنی تنش- کرنش متوسط (a) آرماتور (b) بتن (c) ظرفیت کششی، مدل پیشنهادی و ریزمدلسازی برای نمونه سوم

شاهد کاهش سختی و مقاومت بودیم که برای وارد نمودن این کاهش در مدل فشاری رابطه‌ای که مقدار کاهش مقاومت را بر اساس درصد خوردگی با تکیه بر عرض ترک‌های ایجاد شده ناشی از خوردگی و کرنش محیطی ناشی از آن، بدست می‌دهد، ارائه شد.

– مقایسه مدل‌های رفتاری کششی پیشنهادی با نتایج تحلیل رایانه‌ای نشان داد این مدل‌ها برابری مناسبی با نتایج تحلیل رایانه‌ای دارند.

– مدل رفتاری فشاری و کششی پیشنهادی در برنامه "کام‌تری" و "دبلیوکام‌دی" وارد شد و یک نمونه آزمایشگاهی توسط این برنامه‌ها تحلیل شد که نتایج آن تا حد مطلوبی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک بود.

۹- مراجع

[۱] ا. قربی؛ م. سلطانی محمدی؛ "توسعه مدل رفتار فشاری بتن محصور شده با FRP"، نشریه بین المللی علوم مهندسی، جلد ۱۹، شماره ۸، ص ۹۷-۱۰۹، ۱۳۸۷.

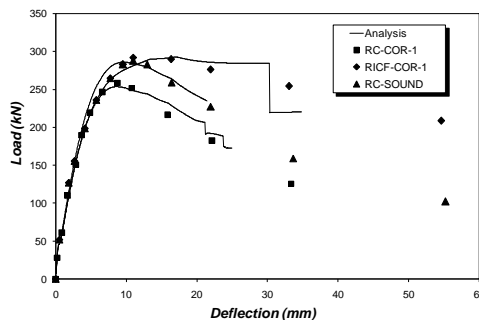
[۲] س. رهنمای سپهر؛ م. سلطانی محمدی؛ "مدلسازی رفتار سخت شدگی کششی المانهای بتن مسلح تقویت شده با FRP در کشش خالص"، پذیرفته شده برای چاپ در مجله علمی و پژوهشی شریف، ۱۳۸۷.

[۳] صفائیان، امین، "رفتار غیرخطی و مدل‌های رفتاری المان بتن مسلح ترمیم یافته با ورقهای FRP پس از خوردگی آرماتور"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۷.

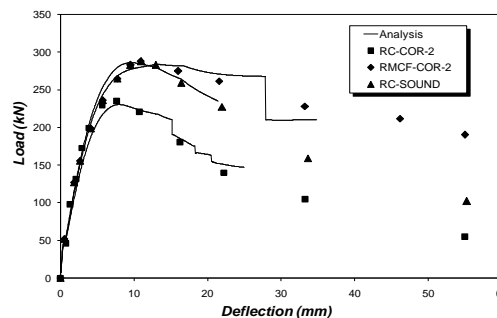
[۴] Toongoenthong, K.; Maekawa, K.; "Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear", Department of civil engineering, University of Tokyo, Japan.

[۵] Gambarova, P.; Coronelli, D.; "Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines", Journal of Structural Engineering, ASCE, August, 2004.

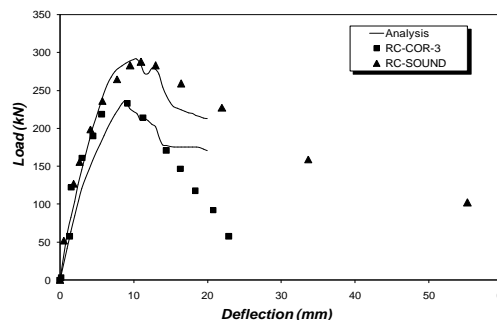
[۶] Maekawa, K.; Okamura, H.; "The Deformational Behaviour and Constitutive Equation of Concrete Using Elasto-Plastic and Fracture Model", Journal of the



شکل (۲۲): نمودار مقایسه نتایج تحلیل اول با نتایج آزمایشگاهی



شکل (۲۳): نمودار مقایسه نتایج تحلیل دوم با نتایج آزمایشگاهی



شکل (۲۴): نمودار مقایسه نتایج تحلیل سوم با نتایج آزمایشگاهی

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای مدلسازی آسیب‌های سازه‌ای وارده به اعضای بتن مسلح ناشی از خوردگی آرماتور و اثر FRP در بهبود این آسیب‌ها ارائه شده و بر همین اساس مدل‌های رفتاری فشاری و کششی برای یک المان بتن مسلح تقویت شده توسط FRP پس از خوردگی آرماتور، پیشنهاد شده که می‌تواند در تحلیل اعضای بتن مسلح به روش ترک پخشی استفاده شود.

– مقدار بحرانی آرماتور در المان بتن مسلح با در نظر گرفتن عامل‌هایی همچون نسبت پوشش بتن به قطر آرماتور، وجود خاموت، درصد خوردگی و تقویت توسط FRP محاسبه شود.

– بر اساس مقدار بحرانی آرماتور بدست آمده مدل رفتاری کششی برای دو حالت، یکی نمونه‌های با نسبت آرماتور کمتر از مقدار بحرانی و دیگری بیشتر از این مقدار پیشنهاد شد.

– در خصوص رفتار فشاری نمونه، با افزایش درصد خوردگی

- University of Tokyo, Japan, 1998.
- Shima, H.; Chou, L.; Okamura, H.; “Micro and Macro Models for Bond Behaviour in Reinforced Concrete”, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, v.39, No.2, pp.133-194, 1987. [۱۶]
- Rodriguez, J.; Ortega, LM.; Casal, J.; “Corrosion of reinforcing bars and service life of RC structures: Corrosion and bond deterioration”, International conference concrete across borders’, Vol II, 1994. [۱۷]
- Fédération International du Béton (FIB), “Bond of reinforcement in concrete”, State-of-Art Rep., Bulletin No.10, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2000. [۱۸]
- Ghandehari, M.; Zulli, M.; Shah, S.P.; “Influence of corrosion on bond degradation in reinforced concrete”, Polytechnic University, Brooklin, NY. [۱۹]
- Clark, L.A.; Saifullah, M.; “Effect of corrosion on reinforcement bond strength”, In: Forde M, editor., Proceedings of 5th international conference on structural faults and repairs, vol. 3., Edinburgh: Engineering Technical Press, pp.113-119, 1993. [۲۰]
- Vidal, T.; Castel, A.; Francois, R.; “Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete”, Cement and Concrete Research, v.34, pp.165-174, 2004. [۲۱]
- Gambarova, P.; Rosati, G.; Zasso, B.; “Steel-to-Concrete bond after concrete splitting: Constitutive laws and interface deterioration”, Materials and Structures, v.22, pp.347-356, 1989. [۲۲]
- Lee, H.S.; Kage, T.; Noguchi, T.; Tomosawa, F.; “An experimental study on the retrofitting effects of reinforced concrete columns damaged by rebar corrosion strengthened with carbon fiber sheets”, Cement and Concrete Research, No.33, pp.563-570, September, 2002. [۲۳]
- Ozden, S.; Akpınar, E.; “Effect of confining FRP overlay on bond strength Faculty of Engineering, University of Tokyo, v.37, No.2, pp.253-328, 1983. [۷]
- Broomfeild, J.P., “Corrosion of steel in concrete, Understanding, Investigation and Repair”, E & FN Spon Publishing Company, London, 1997. [۷]
- Okamura, H.; Maekawa, K.; “Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete”, Tokyo (Japan): Gihodo-shuppan, 1991. [۸]
- Okamura, H.; Maekawa, K.; Sivasubramaniyam, S., “Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element”, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE, pp.528-543, 1985. [۹]
- Li, B.; Maekawa, K.; Okamura, H.; “Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete”, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, v.40, No.1, pp.9-52, 1989. [۱۰]
- Vecchio, F.J.; Collins, M.P.; “The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear”, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986. [۱۱]
- Morita, S.; Kaku, T.; “Experimental study on the deformation of axially reinforced concrete prisms subjected to tension and drying”, CAJ Review of the 18 General Meeting, pp.205-209, 1964. [۱۲]
- Collins, M.P.; Vecchio, F.J.; “The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses”, University of Toronto, 1982. [۱۳]
- Shima, H.; Chou, L.; Okamura, H.; “Micro and Macro Models for Bond Behaviour in Reinforced Concrete”, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, v.39, No.2, pp.133-194, 1987. [۱۴]
- Salem, H.M.M.; “Enhanced tension stiffening model and application to nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete”, Doctoral dissertation, Department of civil engineering, [۱۵]

Haskett, M.; Oehlers, D.J.; Mohamed Ali; [۲۶] M.S., "Local and global bond characteristics of steel reinforcing bars", Engineering Structures, No.30, pp.376-383, April, 2007.

enhancement", Elsevier Science Ltd., Construction and Building Materials, v.21, pp.1377-1389, 2007.

Berto, L.; Simioni, P.; Saelta, A.; [۲۵] "Numerical Modeling of bond behavior in RC structures affected by reinforcement corrosion", Engineering Structures, August, 2007.

۱۰- زیرنویس ها

^۱ COM3

^۲ WCOMD

^۳ Maekawa

^۴ Okamura

^۵ Splittng Crack