

تحلیل رفتار پس از ترک خوردگی المان‌های بتن مسلح بر مبنای میدان تنش- کرنش محلی

عاطفه جهان‌محمدی^۱، مسعود سلطانی محمدی^۲، عباسعلی تسنیمی^۳

۱. دانشجوی دکترای سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

msoltani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۷/۱۳]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۲۹]

چکیده- مدل‌های رفتاری مورد استفاده در روش ترک پخشی، بر مفهوم "دامنه تنش متوسط" استوارند که بر آن اساس می‌توان در فاصله بین دو ترک رفتار متوسط یکنواختی برای بتن و فولاد تعریف کرد. این مفهوم در مسائلی که مکانیزم‌های پس از ترک، وابستگی شدیدی به پدیده‌های محلی خواهند داشت، از دقت قابل قبولی برخوردار نیست. در این مقاله تلاش شده‌است تا اثر پدیده‌های محلی و رفتارهای موضعی، در ترکیب با مفهوم دامنه تنش متوسط مورد توجه قرار گرفته و مدل‌های رفتاری مورد استفاده در روش ترک پخشی ارتقا بخشیده شود. بدین منظور، ابتدا پدیده‌های فعال در سطح ترک مورد بررسی قرار گرفته و سپس، یک رابطه بسته بین مقادیر لغزش و کرنش‌های محلی، با هدف تعیین توزیع کرنش فولاد در فاصله بین دو ترک، ارائه می‌شود. سپس مفهومی با عنوان "دامنه تنش محلی" معرفی می‌شود که بر آن اساس، بهبود مدل‌های رفتاری متوسط سهم در رفتار نمونه‌ها، استفاده از مدل‌های رفتاری وابسته به مقادیر تغییر مکانی و نیز، ارزیابی دقیق رفتار پس از ترک خوردگی اعضای بتن مسلح قابل دستیابی است.

واژگان کلیدی: روش ترک پخشی، دامنه تنش محلی، رابطه لغزش-کرنش، تحلیل غیرخطی، مدل‌سازی اجزاء محدود

۱- مقدمه

بارگذاری و ترک‌های ایجاد شده در نمونه، نواحی مشخصی برای اختصاص و تعریف دامنه تنش متوسط تعیین می‌شود [۲]. طول این نواحی، که در بیشتر پژوهش‌ها به فاصله بین دو ترک محدود می‌شود، براساس میزان اندرکنش موجود بین رفتار بتن و فولاد تعریف می‌شود. با توجه به ابعاد و مشخصات نواحی یاد شده، رفتار پدیده‌های مشارکت‌کننده در پاسخ غیرخطی عضو بتن مسلح، در قالب مجموعه‌ای از مدل‌های رفتاری متوسط بیان می‌شود که این مدل‌ها، با استناد بر تجارب و مطالعات آزمایشگاهی موجود در سابقه تحقیق، و براساس مجموعه روابط موجود در این خصوص، تعریف شده‌اند [۲-۷].

تحلیل غیرخطی اعضای بتن مسلح، به دلیل پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی رفتار بتن و فولاد به طور مجزا، و بیان روابط متأثر از اندرکنش این دو و همچنین شرایط حاکم بر رفتار پس از ترک، به ویژه در سطح ترک، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده‌است. بر این اساس روش‌های مختلفی برای ساده‌سازی فرآیند ارزیابی رفتار غیرخطی اعضای بتن مسلح ارائه شده که از جامع‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر دامنه تنش متوسط که در ادبیات موضوعی با نام روش‌های ترک پخشی^۱ شناخته می‌شوند، اشاره کرد [۱]. در این روش‌ها، با توجه به چگونگی تسلیح عضو و شرایط

1 Smeared Crack

از جمله مدل‌های رفتاری مبتنی بر دامنه تنش متوسط، می‌توان به مدل‌های پیشنهادی توسط وکیو و همکاران [۴-۵] در دانشگاه تورنتو اشاره کرد. این مدل‌ها، از آزمایش تعداد زیادی پنل دارای آرماتورگذاری‌های متعامد حاصل شده‌است که هرچند تلاش شده تا انتخاب پنل‌ها به صورت جامع صورت پذیرد [۸]، محدودیت‌های مرتبط با آزمایش و تعداد پارامترهای قابل ارزیابی در فرآیند آزمون، سبب شده‌است تا این مدل‌ها در برخی موارد با نقاط ضعف قابل ملاحظه‌ای روبرو شوند. علاوه بر این، تفسیر این مدل‌ها، که براساس رفتار برشی پنل‌ها استخراج شده‌است، در شرایطی که بتواند اثر هم‌زمان تنش‌های مختلف محوری و برشی را در بر گیرد، با ساده‌سازی‌هایی همراه است که ممکن است از دقت حل مسئله کم کند. مجموعه دوم مدل‌های رفتاری متوسط را می‌توان متعلق به آزمایشگاه بتن دانشگاه توکیو با هدایت مائکاوا [۲-۳] دانست. در این پژوهش‌ها، براساس آزمایش‌های انجام شده روی اعضای مختلف از جمله اعضای تحت کشش و پنل‌های تحت برش، مجموعه‌ای از مدل‌های رفتاری استخراج شده‌است که این مدل‌ها، از نظر دقت و پارامترهای مورد توجه در فرآیند آزمون، در زمره مدل‌های قابل اعتماد قرار می‌گیرند. با این حال، پیاده‌سازی رفتارهای استخراج‌شده از آزمایش در قالب مدل‌های رفتاری با روابط مشخص نیازمند فرضیاتی است که در پژوهش‌های مائکاوا، بر درونیابی رفتار نسبت به سطح ترک و تعریف نواحی مشخصی متأثر از اندرکنش بتن و فولاد استوار است [۲]. هرچند این فرضیه‌ها در شرایط کلی از دقت مطلوبی برخوردار است ولی در مسائلی که اندرکنش بتن و فولاد با پیشرفت فرآیند ترک خوردگی تغییر خواهد کرد، از دقت این فرضیات کاسته می‌شود. آنچه در مجموعه پژوهش‌های مورد اشاره مشترک است این است که مدل‌های رفتاری متوسط موجود در روش ترک پختی به عنوان مدل‌های پیش‌فرض، و بدون توجه به ساختار ترک خوردگی، از ابتدای تحلیل وارد محاسبات می‌شود. حال آنکه، با افزایش گام به گام بار و پیشرفت و گسترش ترک خوردگی‌ها، نواحی متأثر از اندرکنش رفتارهای بتن و فولاد تغییر کرده و ممکن است رفتار متوسط مصالح در هر گام، نسبت به گام قبل متفاوت باشد. به علاوه، این مدل‌ها در تخمین رفتار

متوسط بتن و فولاد در مسائل با ترک‌های اندک و یا ساختار تسلیح ناهمسان، به دلیل وابستگی زیاد رفتار عضو به پدیده‌های محلی، از دقت کمی برخوردارند [۹، ۱۰]. به همین دلیل، به نظر می‌رسد در صورت در دسترس بودن اطلاعاتی از رفتار محلی عضو، به ویژه در نواحی بین دو ترک و یا در سطح ترک، امکان اصلاح رفتار متوسط پیش‌فرضی که از ابتدای تحلیل در مدل‌سازی وارد شده‌است، وجود خواهد داشت.

با توجه به نقاط ضعف موجود در مدل‌های متوسط تعریف‌شده براساس مبانی روش ترک پختی موجود و با توجه به دقت به دست آمده از ترکیب رفتار متوسط و محلی در کنار یکدیگر [۹]، وارد کردن مبانی محاسباتی متناظر با ترکیب دو دامنه تنش محلی و متوسط در فضای تحلیل غیرخطی اجزاء محدود در این مقاله مورد توجه قرار گرفته‌است. به همین منظور، اطلاعات محلی مربوط به تنش و کرنش در ناحیه بین دو ترک، با استفاده از یک رابطه بسته^۲ پیشنهادی و با هدف تعریف تناظری بین میزان لغزش بین آرماتور و بتن و مقدار کرنش در یک موقعیت مشخص از آرماتور، تعیین می‌شود. با در دسترس بودن توزیع کرنش و تنش در طول آرماتورهای واقع در فاصله بین دو ترک، امکان ارزیابی رفتار محلی بتن فراهم آمده و ضمن بررسی امکان وقوع ترک خوردگی‌های جدید و یا گسترش ترک‌های موجود، نواحی متأثر از اندرکنش بتن و فولاد به طور مرحله‌ای و گام به گام تخمین زده شده و رفتار متوسط بتن و فولاد در این نواحی، با دقت بالایی تعریف می‌شود. با تخمین میزان دقیق‌تری از فاصله بین دو ترک و مقادیر کرنش محلی، امکان محاسبه دامنه تغییرمکان در سطح ترک با دقت بیشتری وجود خواهد داشت. بدین ترتیب، مدل‌سازی سازوکار انتقال برش در سطح ترک، و یا هر سازوکار وابسته به دامنه تغییرمکان که مدل‌سازی آن در فضای مبتنی بر کرنش اجزاء محدود با ساده‌سازی‌هایی همراه خواهد بود، میسر می‌شود. بر همین اساس، امکان ارائه مدل‌های رفتاری متوسط براساس اطلاعات دقیق‌تری از رفتار محلی، بدون نیاز به انجام مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از مجموعه‌ای از روابط مبتنی بر رفتار متوسط و محلی عضو، فراهم خواهد آمد.

۲- پدیده‌های فعال در رفتار پس از ترک

مدل‌های رفتاری مبتنی بر روش‌های ترک پخشی، که متناظر با وضعیت یک نقطه انتگرال‌گیری، در تحلیل‌های اجزاء محدود به کار گرفته می‌شوند، بر اساس رفتار متوسط فولاد و بتن تعریف می‌شوند. این مدل‌های متوسط، متأثر از عوامل مختلفی، از جمله وقوع لغزش بین آرماتور و بتن پیرامون آن، درهم‌تنیدگی سنگدانه‌ها در سطح ترک، وقوع یا عدم وقوع ترک‌های شکافتی، عملکرد شاخه‌ای آرماتور و ... است که در رفتار پس از ترک فعال خواهند شد و برخی از آنها مبتنی بر دامنه تنش متوسط و برخی دیگر، وابسته به دامنه تنش محلی است.

مهم‌ترین پدیده فعال در رفتار پس از ترک، لغزش بین آرماتور و بتن است که سبب می‌شود پیوستگی کامل بین این دو به تدریج از بین رفته و تنش پیوستگی در روابط و محاسبات وارد شود. بدین ترتیب، رفتار متوسط فولاد و بتن، متأثر از حضور یکدیگر و بسته به میزان تنش پیوستگی منتقل شده از فولاد به بتن تعریف می‌شود.

علاوه بر این، رفتار سطح ترک به صورت موضعی اهمیت دارد و ضمن این که لازم است مشارکت بتن و فولاد در این رفتار، به صورت محلی مورد توجه قرار گیرد، سازوکارهای فعال در سطح ترک نیز باید براساس اطلاعات محلی بررسی شود. رفتار محلی بتن در سطح ترک، در دو بخش رفتار کششی عمود بر سطح ترک و رفتار برشی روی آن تعریف می‌شود. رفتار کششی مورد اشاره، متأثر از میزان بازشدگی بوجود آمده در ترک (ω) و انرژی شکست بتن (G_f) بوده و به تنش Bridging^۳ معروف است (رابطه ۱) و رفتار برشی نیز، که متأثر از بازشدگی (ω) و لغزش (δ) است، با دو مولفه تنش، یکی عمود بر سطح ترک (تنش اتساعی^۴) و دومی موازی با سطح ترک (تنش قفل و بست دانه‌ای^۵) شناخته می‌شود (شکل ۱-ب). در محاسبات روش ترک پخشی، میزان بازشدگی و لغزش براساس روابط (۲) و (۳) در سطح ترک قابل محاسبه است [۲-۳]. در این روابط، f_t و ϵ_{1cr} به ترتیب تنش کششی و کرنش‌های

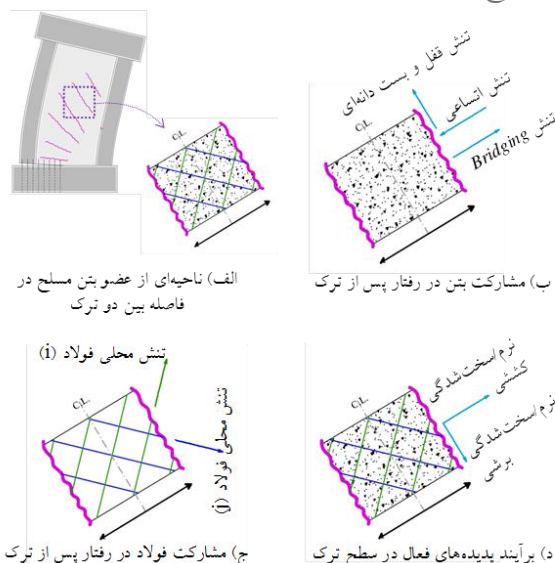
کششی و برشی متناظر با ترک‌خوردگی بتن است و مقادیر ϵ_l و γ_{12} معرف کرنش‌های کششی و برشی متوسط در فاصله بین دو ترک خواهد بود.

$$\sigma_{brg} = f_t \left(1 + 0.5 \omega \left(\frac{f_t}{G_f} \right) \right)^{-3.0} \quad (1)$$

$$\omega = (\epsilon_l - \epsilon_{1cr}) \times \text{Crack Spacing} \quad (2)$$

$$\delta = (\gamma_{12} - \gamma_{12cr}) \times \text{Crack Spacing} \quad (3)$$

به محض ایجاد ترک‌خوردگی، مشارکت آرماتور در تحمل تنش‌های وارده بیشتر شده، و به دلیل افت در رفتار بتن، سهم بیشتری از باربری عضو بر عهده شبکه میلگرد خواهد بود. رفتار آرماتور به صورت کشش یا فشار محوری و در راستای آن تعریف می‌شود و بر همین اساس، مجموعه‌ای از تنش‌های محوری در فولاد ایجاد می‌شود که در سطح ترک، براساس دامنه تنش‌های محلی و مدل‌های رفتاری محلی تعیین می‌شود (شکل ۱-ج).



شکل (۱) پدیده‌های فعال در سطح ترک

رفتار بتن در مختصات متعامد تعریف شده روی سطح ترک، به گونه‌ای که محور (۱) عمود بر سطح و محور (۲) موازی با سطح باشد، به دست می‌آید ولی رفتار فولاد، در راستای هر میلگرد به شکل مجزا محاسبه می‌شود. به همین دلیل، برای بیان دقیق پدیده‌ها، لازم است تمامی سازوکارهای فعال در سطح ترک، در مختصات متعامد تعریف شده روی ترک تصویر شود. با در نظر گرفتن تمام پدیده‌های فعال در سطح ترک در مختصات متعامد روی ترک، مولفه برآیندی در راستای عمود

۳ این تنش را می‌توان به عنوان "تنش کششی انتقالی" ناشی از قفل و بست دانه‌ای در سطح ترک تعبیر نمود.

4 Dilatancy

5 Aggregate Interlock

بازتولید می‌شوند. علاوه بر این، در روش پیشنهادی تقریب مناسبی از فاصله ترک‌ها حاصل خواهد شد که به نوبه خود اهمیت دارد. به منظور تعریف دامنه تنش محلی، لازم است اطلاعاتی از مقادیر کرنش و تنش در طول آرماتور در دسترس باشد. در این پژوهش رابطه‌ای صریح بین لغزش بوجود آمده بین بتن و فولاد و کرنش محلی روی هر مختصاتی از آرماتور ارائه می‌شود که با استفاده از آن، می‌توان دامنه کرنش محلی را تخمین زد. پس از آن و با استفاده از مدل محلی فولاد در کشش، میزان تنش‌های محلی در موقعیت‌های مختلف روی آرماتور محاسبه شده و بدین ترتیب، دامنه تنش محلی حاصل می‌شود. در ادامه، به معرفی رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی و نیز، چگونگی به کارگیری آن در تعیین رفتار محلی و الگوریتم بازتولید مدل‌های رفتاری متوسط پرداخته می‌شود. در پایان نیز، مدل‌های متوسط حاصل‌شده در این پژوهش معرفی می‌شوند.

۳-۱- رابطه لغزش-کرنش

توزیع کرنش فولاد در فاصله دو ترک به طور مستقیم بر توزیع کرنش بتن تاثیر خواهد داشت و برای تعریف مشارکت پدیده‌های محلی، مشخص بودن این توزیع ضروری است. برای تعیین توزیع دقیق کرنش و تنش در طول آرماتور لازم است معادله دیفرانسیل غیرخطی حاکم بر مساله، شامل تنش پیوستگی بین بتن و فولاد و تنش‌های محوری هر موقعیت روی آرماتور، در یک فرآیند تکراری تحلیل شود [۱۰]. با توجه به تکراری بودن این روش، قطعاً به کارگیری آن در برنامه‌هایی با ساختار تحلیلی مبتنی بر اجزاء محدود غیرخطی، که خود بر تحلیل تکراری استوار است، توصیه نمی‌شود. از همین رو پژوهشگران مختلف توجه زیادی به ارائه رابطه صریحی برای محاسبه توزیع کرنش محلی بر روی آرماتور نشان داده‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های اوکامورا [۳]، شیما و همکاران [۱۲] و شین و همکاران [۲] اشاره کرد. در سال ۲۰۰۸، سلطانی‌محمدی و همکاران [۱۴] رابطه صریحی برای محاسبه کرنش بر اساس لغزش ارائه کردند که در آن، برخلاف مدل‌های پیشین، اثر زوال تنش پیوستگی به طور خاص در روابط محاسباتی مدنظر قرار گرفته‌است. نکته‌ای که در خصوص مدل‌های مورد اشاره مشترک است این است که این مدل‌ها

بر سطح ترک ایجاد می‌شود که به نرم‌شوندگی/سخت‌شوندگی^۶ کششی بتن معروف است و مولفه برآیند دیگری در راستای موازی با سطح ترک بوجود خواهد آمد که با نرم-شوندگی/سخت‌شوندگی برشی^۷ تعریف می‌شود (شکل ۱-د). مجموعه این سازوکارها که در سطح ترک وابسته به اطلاعات محلی و دامنه کرنش و تغییرمکان محلی است، در نهایت در قالب یک مدل رفتاری متوسط برای دامنه بین دو ترک قابل تفسیر است.

۳- استخراج مدل‌های متوسط وابسته به میدان تنش محلی

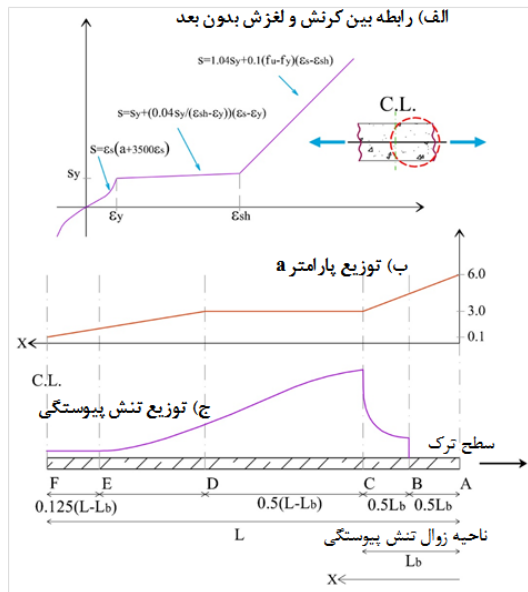
مجموعه مطالعات انجام شده در خصوص روش‌های ترک پخشی به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف از جمله وکیو و همکاران [۱، ۴، ۵]، مائکاوا و همکاران [۲، ۳] و سو و همکاران [۶، ۷] منجر به ارائه مدل‌های متوسطی برای بتن و فولاد شده است. از این بین، مجموعه مدل‌های ارائه شده به وسیله‌ی وکیو و سو بر روش‌های ترک پخشی دورانی و مدل‌های ارائه شده به وسیله‌ی مائکاوا بر روش ترک پخشی ثابت تمرکز دارد. به منظور بررسی اثر پدیده‌های محلی در رفتارهای وابسته به دامنه‌های تغییرمکانی و دامنه‌های کرنش محلی، مجموعه مدل‌های ارائه شده به وسیله‌ی مائکاوا مورد توجه قرار گرفته است. به این ترتیب که معادلات حاکم بر مدل‌ها، از روابط ارائه‌شده به وسیله‌ی مائکاوا اقتباس شده و به عبارت بهتر، شکل ظاهری مدل‌ها حفظ می‌شود ولی، پارامترهای مشخصه‌ای که به طور خاص بیانگر رفتار متوسط مدل‌هاست، براساس محاسبات میدان محلی و در هر گام از تحلیل، اصلاح می‌شود. مدل‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از مدل فشاری تک محوره بتن [۱۱، ۲] و مدل فشاری فولاد که متناظر با مدل فولاد تنهاست^۸ [۱۲]، که روابط متناظر با آن‌ها به طور دقیق مورد استفاده قرار گرفته است، و مدل متوسط کششی بتن [۲-۳]، مدل متوسط کششی فولاد [۲-۳]، و مدل برش [۱۳] که براساس وضعیت کرنش و تنش محلی،

6 Tension Softening/Stiffening

7 Shear Softening/Stiffening

8 Bare bar

هر دو بر حسب میلی‌متر، $K_{f_c} = (f'_c / 20)^{2/3}$ پارامتر بی‌بعد متناظر با مقاومت فشاری بتن (MPa) و $C_5 = (Cover / 5D)^{2/3} \leq 1.0$ پارامتر بی‌بعد متناظر با میزان پوشش تامین‌شده پیرامون آرماتور است [۱۶]. مقدار کرنش در ناحیه‌ای به طول $0.125(L-L_b)$ پس از موقعیت E، به شکل ثابت و برابر با کرنش موقعیت E در نظر گرفته خواهد شد (شکل ۲).



شکل (۲) رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی

$$s = \varepsilon_s (a + 3500 \varepsilon) \quad \varepsilon \leq \varepsilon_y$$

$$s_y = \varepsilon_y (a + 3500 \varepsilon_y)$$

$$s = s_y + \frac{0.04 s_y}{(\varepsilon_{sh} - \varepsilon_y)} (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \quad \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \quad (4)$$

$$s = 1.04 s_y + 0.1(f_u - f_y)(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{sh} \quad (5)$$

$$a = 6.0 - 3.0 \left(\frac{x}{L_b} \right) \quad x \leq L_b$$

$$a = 3.0 \quad L_b \leq x \leq 0.5(L + L_b)$$

$$a = 3.0 - 3.0 \left(\frac{x - 0.5(L + L_b)}{0.5(L - L_b)} \right) \geq 0.1 \quad x \geq 0.5(L + L_b)$$

$$\text{for } L \geq 10.0d / (Cover / 5d)^{2/3}$$

$$L_b = 5.0d / (Cover / 5d)^{2/3}$$

$$\text{for } 5.0d / (Cover / 5d)^{2/3} \leq L \leq 10.0d / (Cover / 5d)^{2/3}$$

$$L_b = L - 5.0d / (Cover / 5d)^{2/3} \quad (6)$$

$$\text{for } L < 5.0d / (Cover / 5d)^{2/3}$$

$$L_b = 0.0$$

به منظور اعتبارسنجی روابط پیشنهادی، مجموعه آزمایش‌های انجام شده به وسیله شیما [۱۲] با استفاده از رابطه لغزش-

همگی برای شرایط بیرون کشیدگی آرماتور (Pull out) با طول مهارتی کافی ارائه شده‌اند و از طرفی اثر میزان پوشش آرماتور در آنها مورد توجه قرار نگرفته‌است.

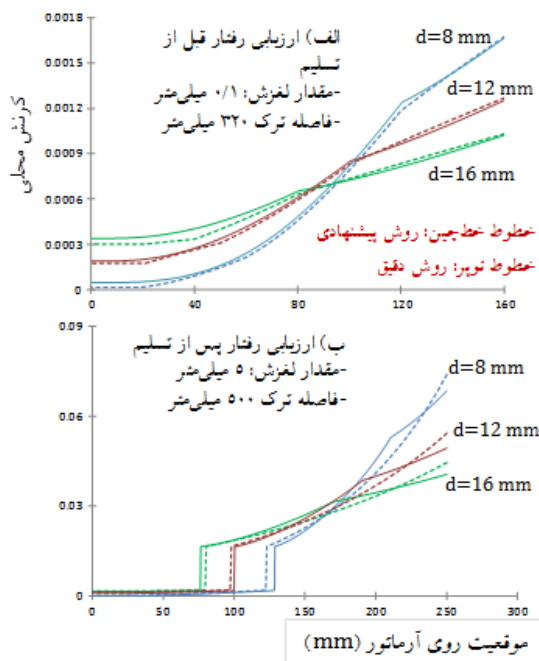
در این مقاله رابطه جدیدی برای تعیین توزیع کرنش در طول آرماتور ارائه می‌شود که در آن، ضمن حفظ کلیات مدنظر مدل سلطانی محمدی و همکاران [۹، ۱۰]، از وابستگی دقت روابط به طول مهارتی آرماتور کاسته شده‌است. علاوه بر این، زوال تنش پیوستگی در نواحی نزدیک ترک و در شرایطی که پوشش مناسبی پیرامون آرماتور تامین نشده باشد، مورد توجه قرار گرفته‌است. روابطی که در ادامه ارائه می‌شوند، براساس تحلیل‌های عددی و مطالعات پارامتریک بر روی عوامل موثر بر توزیع کرنش ارائه شده که بیان جزئیات آنها به طور کامل در این مقاله نمی‌گنجد [۱۵]. لازم به گفتن است که با معین بودن توزیع کرنش محلی در فاصله بین دو ترک، امکان تعیین توزیع تنش محلی فولاد، با استفاده از مدل آرماتور تنها [۱۲] میسر خواهد شد.

رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی که در شکل (۲-الف) نمایش داده شده‌است، ارتباط بین میزان لغزش بدون بعد (S) را در ناحیه قبل و بعد از تسلیم آرماتور بیان می‌کند. بر این اساس، توزیع کرنش در ناحیه قبل از تسلیم، از لحظه تسلیم تا پیش از کرنش سخت‌شدگی و پس از آن، با روابط ارائه‌شده در مجموعه رابطه (۴) تعریف می‌شود. فارغ از رفتار فولاد، موقعیت نقطه مورد بررسی روی آرماتور نسبت به ترک، در تعیین پارامتر زوال پیوستگی a حائز اهمیت خواهد بود. بر همین اساس، توزیع این پارامتر که در شکل (۲-ب) نشان داده شده‌است، در سه ناحیه اصلی (A~C)، (C~D) و (D~E) تعیین فرمول‌بندی شده‌است. این پارامتر با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود که در آن، x مختصات نقاط روی آرماتور، L طول متناظر با توزیع لغزش، که در مسائل بیرون کشیدگی آرماتور برابر با کل طول نمونه و در مسائل کشش خالص، برابر با نصف طول نمونه یا فاصله بین دو ترک تا موضع ترک است، و L_b نیز طولی در نزدیکی ترک است که زوال تنش پیوستگی در آن رخ می‌دهد و بسته به میزان پوشش تامین شده، مقادیر متفاوتی خواهد داشت. در این روابط، پارامتر بی‌بعد متناظر با مقدار لغزش برابر با

$$s = \frac{S}{D} K_{f_c} C_5$$

۲-۳ فرآیند محاسباتی مدل‌های رفتاری متوسط براساس محاسبات محلی

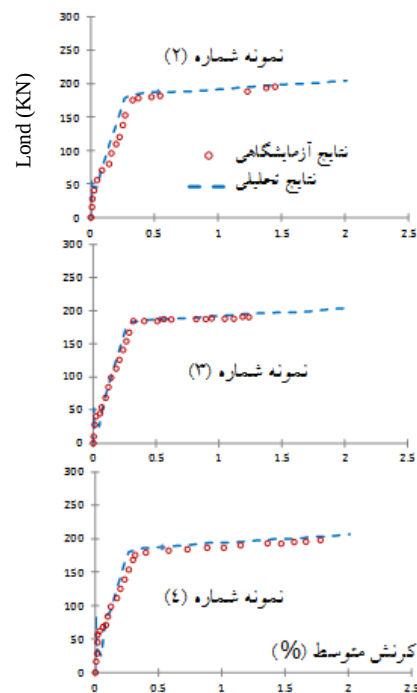
رفتار یک نمونه بتن مسلح در دامنه تنش و کرنش محلی، به شرایط اعمال بار و راستا و فواصل ترک‌خوردگی‌های ایجادشده در نمونه وابسته است. در این پژوهش ارزیابی این رفتار محلی در دو گام اصلی تعریف می‌شود که در گام اول، با استفاده از رابطه لغزش-کرنش معرفی شده، مقدار دقیق‌تری برای فاصله بین دو ترک تخمین زده می‌شود و در گام دوم، مدل‌های رفتاری، براساس فاصله ترک محاسباتی، اصلاح و بازتولید می‌شوند.



شکل (۴) مقایسه دقت رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی با مقادیر حاصل از حل تکراری دقیق [۱۰]

واضح است که ترک خوردگی در یک نمونه بتن مسلح در شرایطی اتفاق می‌افتد که تنش محلی بتن در نقطه‌ای، از مقاومت کششی بتن تجاوز نماید. از آنجاکه در رفتارهای متوسط مستخرج از مبانی روش ترک پخشی، این نقطه متناظر با میانه فاصله بین دو ترک موجود است، می‌توان موقعیت ترک جدید را به طور تقریبی در این نقطه در نظر گرفت. با در دسترس بودن میزان کرنش متوسط موجود در فاصله بین دو ترک و مقدار این فاصله، و با استفاده از رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی، رفتار محلی فولاد قابل استخراج، و با نوشتن تعادل تنش‌های محلی بین سطح ترک و

کرنش پیشنهادی، به صورت تحلیلی، ارزیابی شده‌است. نمونه‌های مورد ارزیابی در مطالعات شیما [۱۲] دربرگیرنده رفتار کششی نمونه‌های بتن مسلح به طول ۲۷۰۰ میلی‌متر با مقطعی با ابعاد (B×H) است که با یک آرماتور به قطر ۱۹ میلی‌متر تسلیح شده‌اند (جدول ۱). همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده‌است، رابطه پیشنهادی، هماهنگی خوبی در تخمین دقیق رفتار فولاد داشت. علاوه بر این، توزیع تنش و کرنش حاصل از روابط تکراری مربوط به حل دقیق [۹، ۱۰] و روابط صریح پیشنهادی در این مقاله، در شرایط قبل و بعد از تسلیم آرماتور، با یکدیگر مقایسه شد که بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴)، رابطه پیشنهادی در شرایط قبل و بعد از تسلیم، در طول‌های کم و زیاد و مقادیر کرنش متفاوت، از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل (۳) اعتبارسنجی رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی براساس مطالعات آزمایشگاهی شیما [۱۲]

جدول (۱) مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی شیما [۱۲]

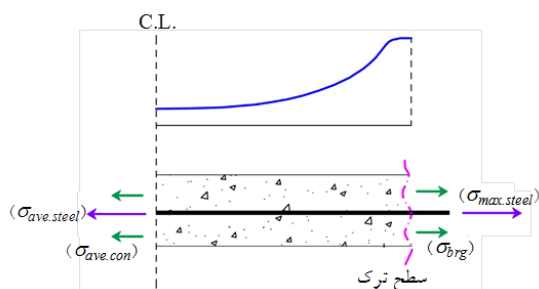
B×H (mm)	ρ	f_c (MPa)	نمونه
۲۰۰ × ۱۵۰	۱ %	۴۵	۲
۲۰۰ × ۱۵۰	۱ %	۲۵	۳
۲۵۰ × ۲۰۰	۰,۶ %	۲۵	۴

با ثابت ماندن فاصله ترک خوردگی، رفتار محلی فولاد شامل تنش و کرنش در تمام موقعیت‌های بین دو ترک در دسترس خواهد بود. با نوشتن تعادل بین تنش‌های بیشینه در سطح ترک، شامل تنش محلی بیشینه فولاد ($\sigma_{max.steel}$) و تنش Bridging (σ_{brg})، و تنش‌های متوسط در فاصله بین دو ترک، شامل تنش متوسط فولاد ($\sigma_{ave.steel}$) و تنش متوسط بتن ($\sigma_{ave.con}$) در خط‌المركز فاصله دو ترک، امکان اصلاح رفتار متوسط بتن وجود خواهد داشت (شکل ۶-الف). بدین ترتیب که، مقدار تنش متوسط بتن، به عنوان تنها مجهول تعادل یاد شده، محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه (۷)، پارامتر متناظر با نرم‌شوندگی/سخت شوندگی بتن (پارامتر C) تعیین و نسبت به گام قبلی اصلاح خواهد شد (شکل ۶-ب).

$$\sigma_{ave.con} = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_{ave.new}} \right)^C \quad (7)$$

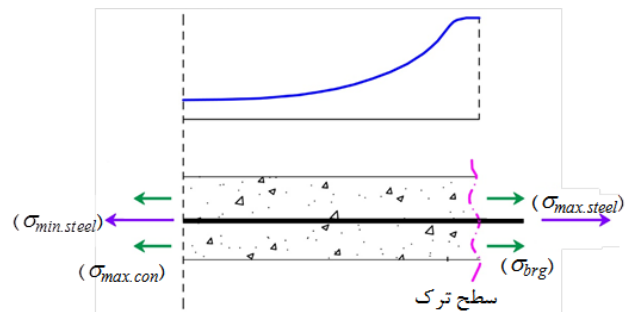
۳-۴ رفتار متوسط فولاد

در این پژوهش، رفتار فولاد کششی که در مجاورت با بتن به صورت رفتار متوسط تفسیر می‌شود، براساس مدل ارائه شده توسط مائکاو و سالم [۲، ۱۷] (رابطه ۸) تعریف شده است. در این مدل، پارامترهای متناظر با رفتار متوسط که براساس میدان تنش متوسط حاصل شده‌است، مقادیر کرنش و تنش متوسط تسلیم ($\bar{\epsilon}_y$ و $\bar{f}_y$) است. این پارامترها در روش متداول ترک پخشی، براساس هندسه عضو و میزان تسلیح، به عنوان پارامتر ورودی مدل شناخته می‌شود و در این پژوهش، براساس محاسبات در دامنه تنش محلی قابل اصلاح است. با ثابت ماندن فاصله ترک-خوردگی، میزان لغزش فولاد در سطح ترک متناظر با لغزش تسلیم و برابر با ($\epsilon_j \times$ فاصله ترک) تعیین می‌شود که در آن، ϵ_j کرنش تسلیم فولاد است.



الف) تعادل تنش‌ها در وضعیت متوسط

خط‌المركز فاصله بین دو ترک ($C.L.$)، احتمال وقوع ترک جدید قابل ارزیابی است. بدین ترتیب که در سطح ترک، تنش محلی بیشینه فولاد ($\sigma_{max.steel}$) و تنش Bridging (σ_{brg})، در تعادل با تنش محلی کمینه فولاد ($\sigma_{min.steel}$) و تنش بیشینه بتن ($\sigma_{max.con}$) در خط‌المركز فاصله بین دو ترک خواهد بود (شکل ۵).

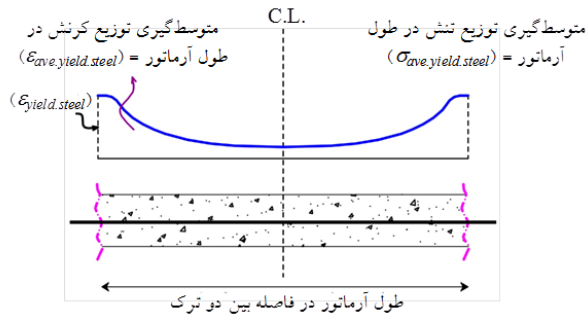


شکل (۵) معادلات تعادل محلی برای کنترل احتمال وقوع ترک جدید

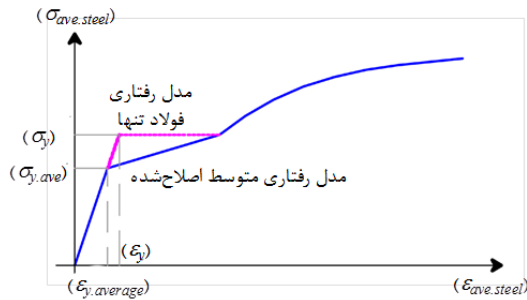
در صورتی که تنش بیشینه بتن به عنوان تنها مجهول این تعادل، از مقدار مقاومت کششی تجاوز نماید، ترک خوردگی جدید گزارش شده و فاصله بین دو ترک اصلاح می‌شود. بدین ترتیب، تقریب دقیق‌تری از فاصله ترک متناظر با یک نقطه انتگرال‌گیری ارائه می‌شود. براساس میزان فاصله ترک تخمین زده شده، امکان اصلاح رفتار متوسط بتن و فولاد و همچنین، اصلاح مدل برش میسر می‌شود که مطالب مرتبط با هر مدل، در ادامه ارائه شده‌است.

۳-۳ رفتار متوسط بتن

براساس مطالعات انجام شده به وسیله مائکاو [۲-۳]، رفتار بتن در کشش با رابطه (۷) تعریف می‌شود که در آن، f_t مقاومت کششی بتن و ϵ_{cr} کرنش معادل آن است. در این رابطه، پارامتر C بیانگر میزان نرم‌شوندگی/سخت شوندگی بتن در حضور/عدم حضور آرماتور است که در مدل‌های موجود [۱-۵] مقدار پیش فرضی خواهد داشت. حال آنکه این مقدار، در این پژوهش بر اساس فاصله ترک متناظر با هر گام بارگذاری و با انجام محاسبات در دامنه تنش محلی، محاسبه خواهد شد بنابراین، امکان اصلاح رفتار متوسط بتن به ازای شرایط محلی متناظر با هر گام بارگذاری، فراهم خواهد آمد.



الف) توزیع لغزش متناظر با حد تسلیم برای اصلاح رفتار متوسط فولاد

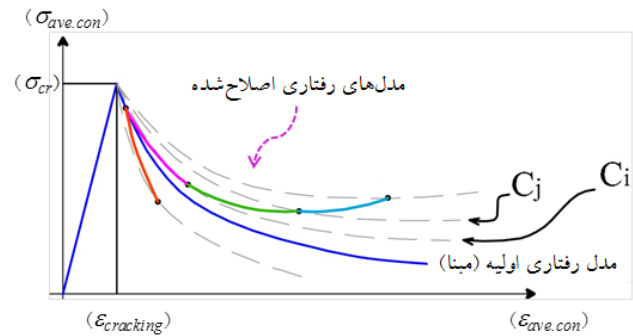


ب) مدل رفتاری متوسط اصلاح شده فولاد

شکل (۷) اصلاح رفتار متوسط فولاد

۴- اعتبارسنجی

به منظور بررسی دقت روش پیشنهادی در تحلیل مسائل دارای تنش یکنواخت، مجموعه‌ای از پل‌های آزمایش شده به وسیله‌ی وکیو [۸] و سو [۱۸] مورد توجه قرار گرفت. در این نمونه‌ها، که مشخصات آنها در جدول (۲) ارائه شده‌است، بسیاری از شرایط ناهمسانی در آرماتورگذاری، از جمله تفاوت در قطر و درصد آرماتورها در دو راستا قابل مشاهده‌است. همان‌گونه که در شکل‌های (۸) و (۹) دیده می‌شود، رفتار برشی پل‌های مورد آزمایش، به خوبی به وسیله‌ی روش پیشنهادی و مدل‌های رفتاری بهبود یافته قابل پیش بینی است. علاوه بر این، میزان سختی و شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز با دقت قابل قبولی تخمین زده شده‌است. این مسئله برای این اهمیت دارد که در مجموعه سازوکارهای پس از ترک، پدیده برش به عنوان سازوکاری که پس از وقوع تسلیم در اولین راستای آرماتورها فعال می‌شود، نقش قابل ملاحظه‌ای در تعیین سختی نمونه خواهد داشت. همچنین، این سازوکار تا زمانی که فولاد راستای دیگر به تسلیم برسد، افزایش ظرفیت نمونه را همراه خواهد داشت و پس از وقوع تسلیم در دومین راستای آرماتور، میزان ظرفیت نمونه را تعیین خواهد نمود. آنچه از نتایج بر می‌آید این است که رفتار برشی به خوبی در الگوریتم پیشنهادی پیاده شده‌است، و از آنجا که این



ب) مدل رفتاری متوسط اصلاح شده بتن

شکل (۶) معادلات تعادل متوسط برای به اصلاح رفتار متوسط بتن

با مشخص بودن این میزان لغزش و فاصله بین دو ترک، و با استفاده از رابطه لغزش-کرنش پیشنهادی، توزیع کرنش محلی متناظر با حد تسلیم در طول آرماتور حاصل می‌شود و با انتگرال‌گیری از این دو توزیع، مقادیر کرنش و تنش متوسط تسلیم $(\bar{\epsilon}_y$ و $\bar{f}_y)$ فولاد، متناظر با وضعیت محلی فعلی، محاسبه (شکل ۷-الف) و مدل متوسط فولاد براساس وضعیت محلی اصلاح خواهد شد (شکل ۷-ب).

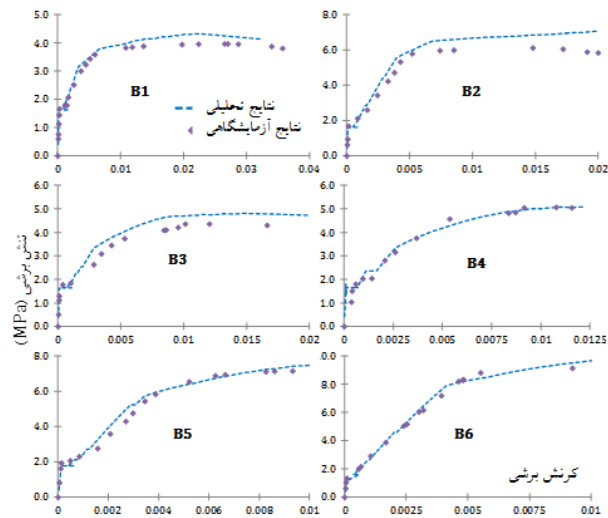
(۸)

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\sigma} = E_s \bar{\epsilon} \\ \bar{\sigma} = \bar{f}_y + \left(\frac{\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_y}{\bar{\epsilon}_{sh1} - \bar{\epsilon}_y} \right) (\bar{f}_{y1} - \bar{f}_y) \\ \bar{\sigma} = \bar{f}_{y1} + \left(1 - \exp \left(\frac{\bar{\epsilon}_{sh1} - \bar{\epsilon}}{k} \right) \right) (1.01 \bar{f}_u - \bar{f}_{y1}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}_y \\ \bar{\epsilon}_y \leq \bar{\epsilon} \leq \bar{\epsilon}_{sh1} \\ \bar{\epsilon} \geq \bar{\epsilon}_{sh1} \end{array} \right.$$

$$k = 0.035 \left(\frac{400}{f_y} \right)^{1/3} \quad (MPa)$$

۳-۵ مدل برش

با به دست آمدن تقریب دقیق‌تری از فاصله ترک‌ها و با مشخص بودن مقادیر کرنش متوسط کششی و برشی در دامنه بین دو ترک، و به کمک روابط (۲) و (۳)، مقادیر دقیق‌تری برای بازشدگی (ω) و لغزش (δ) در سطح ترک حاصل می‌شود، به این ترتیب استفاده از مدل‌های برش مبتنی بر دامنه تغییر مکان با تقریب بهتری میسر می‌شود.



شکل (۹) مقایسه نتایج تحلیلی پل‌های سری B با نتایج آزمایشگاهی

[۱۸]

الف) اثر طول در نمونه‌های با آرماتورگذاری کم

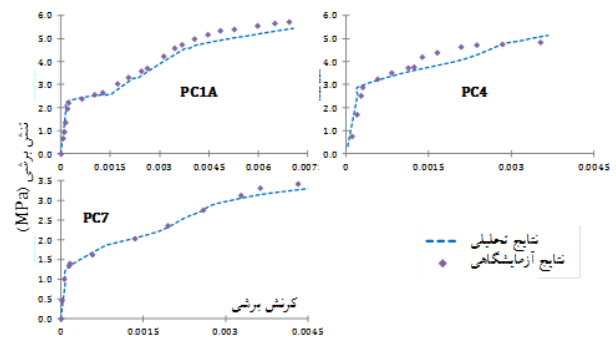
در مسائل بتن مسلح با تسلیح اندک، گاه تعداد ترک‌ها به یک یا دو ترک در نمونه محدود می‌شود بنابراین، برای نمونه‌هایی با طول‌های متفاوت، فواصل ترک‌خوردگی متفاوتی حاصل می‌شود که در نهایت به رفتار متوسط متفاوتی منجر خواهد شد. این پدیده، که معرف اثر اندازه در پاسخ این نمونه‌هاست با مدل‌سازی المان‌هایی تحت اثر کشش خالص، با درصد آرماتوری برابر با ۰/۰۰۴۴ که بسیار نزدیک به درصد آرماتور بحرانی است [۲،۳]،

ارزیابی شده‌است (شکل ۱۰).

سازوکار به طور ذاتی وابسته بر دامنه تغییر مکان است، الگوریتم پیشنهادی توان قابل قبولی در تخمین دامنه تغییر مکان داشته‌است.

۵- مطالعه پارامتریک

همان‌گونه که اشاره شد، روش‌های مرسوم مبتنی بر ترک پخشی در ارزیابی پاسخ مسائل دارای تسلیح ناهمسان یا غیریکنواخت، از دقت بالایی برخوردار نیستند. در این بخش نقش پدیده‌های محلی در تعیین رفتار کلی این مسائل، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در همین راستا، اثر طول در نمونه‌های با آرماتورگذاری کم، اثر راستای ترک در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد و اثر آرایش آرماتورها در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد ناهمسان مورد توجه قرار می‌گیرند.



شکل (۸) مقایسه نتایج تحلیلی پل‌های سری PC با نتایج

آزمایشگاهی [۸]

جدول (۲) مشخصات پل‌های برشی

پنل های مورد الف بررسی	مشخصات بتن		مشخصات آرماتورگذاری افقی ب				مشخصات آرماتورگذاری قائم ب				وضعیت بار
	ϵ_{peak}	f_c^* (MPa)	درصد (%)	قطر (mm)	F_y (MPa)	زاویه (Deg.)	درصد (%)	قطر (mm)	F_y (MPa)	زاویه (Deg.)	
B [m]	B1	۴۵٫۳	۰٫۰۰۲۱۵	۱٫۲۰	۱۶	۴۶۳	۰٫۶	۱۱٫۳	۴۴۵	+۹۰	۱ : ۰ : ۰
	B2	۴۴٫۱	۰٫۰۰۲۳۵	۱٫۷۹	۱۹٫۵	۴۴۷	۱٫۲۰	۱۶	۴۶۳		۱ : ۰ : ۰
	B3	۴۴٫۹	۰٫۰۰۲۱۵	۱٫۷۹	۱۹٫۵	۴۴۷	۰٫۶	۱۱٫۳	۴۴۵		۱ : ۰ : ۰
	B4	۴۴٫۸	۰٫۰۰۲۰۵	۲٫۹۸	۲۵٫۲	۴۷۰	۰٫۶	۱۱٫۳	۴۴۵		۱ : ۰ : ۰
	B5	۴۲٫۹	۰٫۰۰۲۲۰	۲٫۹۸	۲۵٫۲	۴۷۰	۱٫۲۰	۱۶	۴۶۳		۱ : ۰ : ۰
	B6	۴۳٫۰	۰٫۰۰۲۲۰	۲٫۹۸	۲۵٫۲	۴۷۰	۱٫۷۹	۱۹٫۵	۴۴۷		۱ : ۰ : ۰
PC [N]	PC1A	۲۵٫۱	۰٫۰۰۱۸۳	۱٫۶۵	۵٫۷۲	۵۰۰	۰٫۸۲۵	۵٫۷۲	۵۰۰	+۹۰	۱ : ۰ : ۰
	PC4	۲۴٫۹	۰٫۰۰۱۷۰	۱٫۶۵	۵٫۷۲	۲۶۰	۰٫۸۲۵	۵٫۷۲	۲۶۰		۱ : -۰٫۳۹ : -۰٫۳۹
	PC7	۲۸٫۷	۰٫۰۰۱۸۵	۱٫۶۵	۵٫۷۲	۳۹۰	۰٫۸۲۵	۵٫۷۲	۳۹۰		۱ : ۰٫۳۲ : ۰٫۳۲

الف پل‌های سری B دارای ابعاد (۱۳۹۷×۱۳۹۷×۱۷۸) میلی‌متر و پل‌های سری PC دارای ابعاد (۸۹۰×۸۹۰×۷۰) میلی‌متر هستند.

ب مدول الاستیسیته آرماتورهای پل‌های سری B، با قطرهای ۱۱٫۳، ۱۶، ۱۹٫۵ و ۲۵٫۲ میلی‌متر به ترتیب عبارتند از ۱۸۱۳۳۲، ۱۹۲۳۳۳، ۱۹۹۹۴۷ و ۲۰۰۶۳۷ (MPa). این مقدار برای پل‌های PC1A، PC4 و PC7 به ترتیب برابر خواهد بود با ۱۹۶۸۰۰، ۲۰۲۷۰۰ و ۱۹۵۰۰۰ (MPa).

پلکانی رخ می‌دهد (شکل ۱۰-د). (۳) رفتار بتن در شرایط پس از ترک اول بیانگر این مسئله است که افت مقاومت این مصالح در طول‌های کم، بسیار بیشتر از مقدار این افت در مسائل با طول‌های بیشتر می‌باشد (شکل ۱۰-ه).

ب) اثر راستای ترک در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد

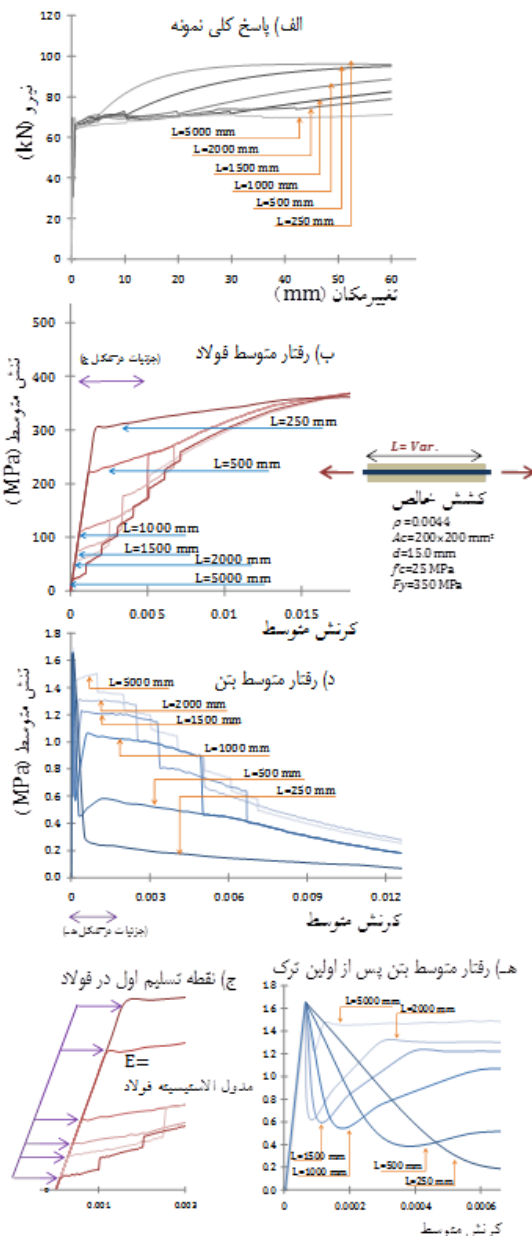
همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در پژوهش‌های پیشین عموماً رفتار متوسط بتن و فولاد غیر وابسته به زاویه ترک و راستای آن نسبت به راستای آرماتورها معرفی شده است [۳]. به منظور بررسی این مسئله، یک المان بتن مسلح که در دو جهت متعامد تسلیح شده‌است، تحت اثر سه نوع بارگذاری مختلف شامل کشش خالص با زاویه ترک نسبت به آرماتور افقی برابر با ۹۰ درجه، برش خالص با زاویه ۴۵ درجه و ترکیب برش و کشش با زاویه‌ای بین ۴۵ تا ۹۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت.

بررسی رفتار متوسط فولاد و بتن در این شرایط بیانگر این مطلب است که: (۱) رفتار متوسط فولاد، به میزان درصد آرماتور در دو راستا و سهم هر راستا در رفتار کلی نمونه وابسته‌است (شکل ۱۱-الف و ب).

(۲) رفتار بتن به راستای ترک، میزان مشارکت هریک از راستاهای آرماتورها و طول متوسط گیری محاسبه شده بین دو ترک، وابسته است (شکل ۱۱-ج و ۳) فاصله ترک‌ها به راستای ترک و رفتار متوسط مصالح وابسته است، به گونه‌ای که در کشش خالص، فاصله ترک‌ها برابر با ۹۸/۸ میلی‌متر، در برش خالص ۷۴/۰۳ میلی‌متر و در ترکیب برش و کشش برابر با ۶۸/۱ میلی‌متر گزارش شده‌است. نتایج نشان دهنده تاثیر بالای راستای ترک خوردگی نسبت به راستای آرماتورها بر مدل‌های رفتاری متوسط فولاد و بتن است که به خوبی در روش پیشنهادی در تحلیل نمونه‌ها قابل اعمال است.

ج) اثر آرایش آرماتور در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد ناهمسان

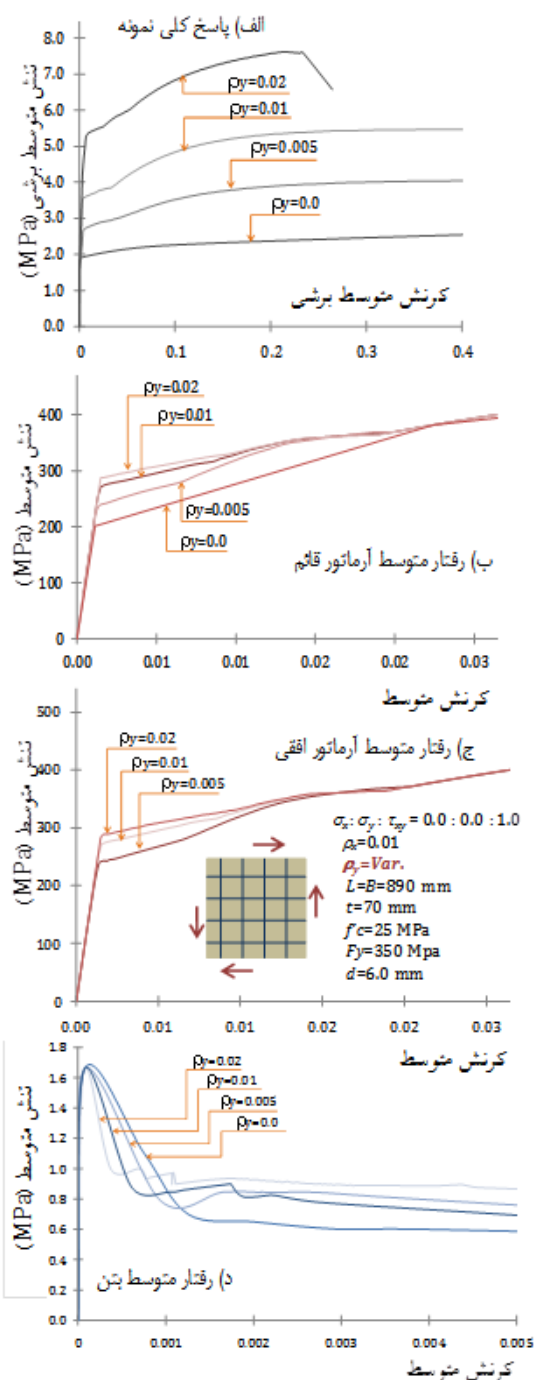
با حفظ مشخصات هندسه و بارگذاری اعمالی روی المان و انتخاب شرایط برش خالص که در نهایت به زاویه ترک ۴۵ درجه نسبت به راستای افقی منجر خواهد شد، تاثیر تغییر در آرماتورگذاری در یک راستا، روی رفتار کلی عضو و رفتار متوسط بتن و فولاد در هر دو راستا قابل ارزیابی است. در این شرایط، آرماتورهای افقی در کلیه



شکل (۱۰) بررسی اثر طول ناحیه متوسط گیری در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری اندک

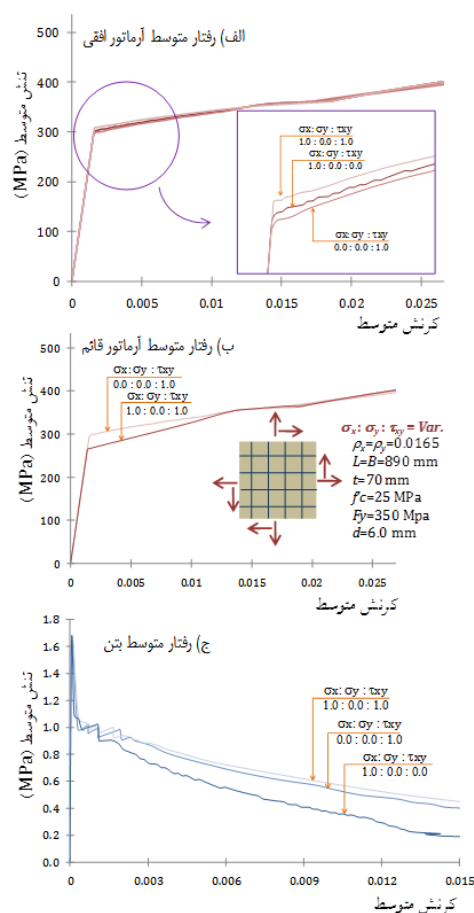
از نکات قابل توجه در این مسائل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) رفتار متوسط فولاد در این مسائل، بسیار کمتر از آنچه از روابط موجود در روش‌های ترک‌پخشی مورد انتظار است، به دست می‌آید. صعود پلکانی مقاومت متوسط فولاد با افزایش ترک‌ها، نشان‌دهنده تاثیر پدیده‌های محلی در رفتار این مصالح است (شکل ۱۰-ب و ج). (۲) افت در مقاومت کششی بتن در شرایط پس از ترک، به خوبی در مسائل با طول‌های کمتر قابل مشاهده است حال آنکه در طول‌های بیشتر، مشارکت فولاد مانع از افت یکباره در رفتار بتن می‌شود و این افت، مانند رفتار فولاد، به صورت

راستای آرماتورگذاری است و تغییر در رفتار آرماتورهای هر یک از راستاهای تسلیح، رفتار بتن را دستخوش تغییرات محسوسی خواهد کرد. به گونه‌ای که با افزایش درصد آرماتور قائم، از میزان افت موضعی دقیقاً پس از ترک‌خوردگی، کاسته می‌شود. (۴) فواصل ترک‌خوردگی که در جدول (۳) ارائه شده‌است، بیانگر وابستگی فاصله ترک محاسباتی به رفتار هر دو راستای تسلیح است.



شکل (۱۲) اثر آرایش آرماتور در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد ناهمسان

نمونه‌های مورد ارزیابی با درصد آرماتور ثابت ۰/۰۱ و آرماتورهای قائم، با تغییر از ۰ تا ۲ درصد، در مدل‌سازی وارد شده‌است.



شکل (۱۱) اثر راستای ترک در نمونه‌های دارای آرماتورگذاری متعامد

جدول (۳) فاصله ترک محاسباتی با توجه به تغییرات آرایش آرماتورها

درصد آرماتور راستای قائم	۰/۰۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰
فاصله ترک‌ها (mm)	۱۵۷/۳	۱۱۴/۴	۹۶/۸	۸۳/۹

نتایج به دست آمده (شکل ۱۲) نشان می‌دهد: (۱) افزایش درصد آرماتور در راستای قائم، با افزایش میزان ظرفیت برشی المان و کاهش شکل‌پذیری همراه خواهد بود. (۲) افزایش درصد آرماتور قائم، افزایش مقاومت متوسط تسلیم آرماتورهای افقی (راستای متعامد) را در بر خواهد داشت. (۳) رفتار بتن متأثر از رفتار هر دو

۶- نتیجه‌گیری

ها از جمله آوردهای روش پیشنهادی است که امکان مدل‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های مبتنی بر تغییر مکان و اصلاح مدل‌های رفتاری متوسط را فراهم می‌آورد.

۷- مراجع

- [1] Vecchio, F.J., Collins, M.P., and Mehlhorn, G., An International Competition to Predict the Response of Reinforced Concrete Panels, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 624-644, 1985.
- [2] Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H., Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London (England), 2003.
- [3] Okamura H, Maekawa K., Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo-Shuppan, Tokyo (Japan), 1991.
- [4] Vecchio, F.J., and Collins, M.P., The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, Journal of the American Concrete Institute, vol. 83, No. 2, pp. 219-231, 1986.
- [5] Vecchio, F.J., Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes, ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 1, pp. 26-35, 1989.
- [6] Belarbi, A., Hsu, T. T. C., Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete, ACI Structural Journal, July-August 1994, pp.465-474.
- [7] Hsu, T. T. C., Wang, T., Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models, Computers & Structures, vol. 79 (32), pp. 2781-2791, 2001.
- [8] Vecchio, F.J., and Chan, C.C.L., Reinforced Concrete Membrane Elements with Perforations, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 698-704, 1990.
- [9] Soltani, M., An, X., Maekawa, K., Localized Nonlinearity and Size-Dependent Mechanics of In-Plane RC Element in Shear, Engineering Structures, vol. 27, pp. 891-908, 2005.
- [10] Soltani, M., An, X., Maekawa, K., Computational Model for Post Cracking Analysis of RC Membrane Elements Based on Local Stress-Strain Characteristics, Engineering Structures, vol. 25, pp. 993-1007, 2003.
- [11] Ghorbi, E., Soltani, M., Maekawa, K., Development of a compressive constitutive model for FRP-confined concrete elements, Composites: Part B, 45, 504-517, 2013.
- [12] Shima, H., Chou, L., Okamura, H., Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), vol. XXXIX, No. 2, pp. 133-194, 1987.
- [13] Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H., Contact density model for stress transfer across cracks in concrete, Journal of the faculty of engineering, the University of Tokyo(B), vol. XL, No.1, pp.9-52, 1989.
- [14] Soltani, M., and Maekawa, K., Path-dependent mechanical model for deformed reinforcing bars at RC interface under coupled cyclic shear and pullout tension, Engineering Structures, 30, 1079-1091, 2008.

روش‌های ترک پخشی که به طور ذاتی بر متوسط رفتار بتن و فولاد در فاصله بین دو ترک بنا نهاده شده‌اند، در شرایطی از دقت و توان بالایی برخوردار هستند که بتوان رفتار بتن یا فولاد را به طور یکنواخت در فاصله بین دو ترک توزیع کرد. این توزیع یکنواخت در مسائل با آرماتورگذاری کم یا مسائلی با آرماتورگذاری‌های غیریکنواخت و ناهمسان، به دلیل وابستگی پاسخ اعضاء بتن مسلح به رفتارهای وابسته به مقادیر کرنش و تغییر مکان محلی و پدیده‌های موضعی در سطح ترک، از دقت بالایی برخوردار نخواهد بود. به همین دلیل، تخمین دقیقی از رفتار اینگونه از اعضاء در گرو در دسترس بودن اطلاعات محلی است. در این پژوهش و به منظور بهبود مدل‌های رفتاری متوسط براساس مجموعه سازوکارهای محلی پس از ترک، دامنه تنش متوسط حاکم بر روش‌های ترک پخشی، با مفهومی متناظر با دامنه تنش محلی، ارتقا داده شد. بدین منظور، با پیشنهاد رابطه‌ای نسبتاً دقیق برای تعیین توزیع کرنش در طول آرماتور مدفون در فاصله بین دو ترک، مفاهیمی برای استخراج مدل‌های رفتاری متوسط، براساس اطلاعات دامنه تنش-کرنش محلی ارائه شد. با پیاده‌سازی موارد پیشنهادی در قالب یک برنامه اجزاء محدود و بررسی مجموعه مطالعات آزمایشگاهی موجود، توان روش پیشنهادی در تخمین رفتار متوسط بتن و فولاد، رفتار مدل برش که به طور ذاتی وابسته به مقادیر تغییر مکانی است و نیز، فواصل ترک خوردگی مورد انتظار از نمونه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده موید این مطلب است که (۱) وارد کردن اثر پدیده‌های محلی در تعیین میزان نرم‌شوندگی رفتار متوسط بتن در شرایط بعد از ترک‌خوردگی و تنش تسلیم متوسط فولاد که به طور خاص وابسته به توزیع تنش پیوستگی در طول آرماتور است، به خوبی در الگوریتم پیشنهادی قابل دستیابی است. (۲) علاوه بر این، ضمن حفظ الگوی کلی تحلیل به روش ترک پخشی، امکان ارزیابی هرگونه ناهمسانی در مشخصه‌های اعضای مورد بررسی، از جمله ناهمسانی در میزان درصد آرماتور تسلیح در راستاهای مختلف و یا بروز پدیده‌های متمرکز محلی^{۱۱}، در فرآیند پیشنهادی میسر است. (۳) تعیین میدان تغییر شکل در فاصله بین دو ترک مجاور، پارامترهای تغییر مکانی در سطح ترک و تخمین فاصله ترک-

- [17] Salem, H. M. M., Enhanced Tension Stiffening Model and Application to Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced concrete, PhD Thesis, Tokyo University, 1998.
- [18] Hsu, T.T.C., Zhang, L.X., Nonlinear Analysis of Membrane Elements by Fixed-Angle Softened-Truss Model, ACI Structural Journal, vol. 94, No. 5, p.p.483-492, 1997.
- [15] Jahanmohammadi, A., Soltani, M., Towards Combined Local-Average Stress Field Modeling of Reinforced Concrete, Engineering Structures, under review.
- [16] Densnerck, P., Schutter, G. De., Taerwe, L., A Local bond stress-slip model for reinforcing bars in self-compacting concrete, Proceedings of Fracture mechanics of concrete and concrete structures, pp. 771-778, May 2010.

