

بررسی تاثیر چسبندگی-لغزش بر ترک خوردگی صفحه‌ی بتن آرمه با استفاده از مدل شبکه‌ای

حمید شجاعی فر*، دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، باشگاه

پژوهشگران جوان و نخبگان، مراغه، ایران

مسعود فرزام، استادیار دانشکده فنی دانشگاه تبریز

*hshojaeifar@yahoo.com

چکیده:

در این مقاله سه مدل چسبندگی-لغزش (Farra, Harajli, CEB-FIP) که بر مبنای نتایج مطالعات تجربی قبلی بدست آمده‌اند، مطالعه می‌شوند تا اثر چسبندگی-لغزش در فاصله‌ی ترک و نحوه‌ی انتشار ترک صفحه‌ی بتن آرمه بررسی شود. برای این منظور، یک صفحه‌ی بتن آرمه با استفاده از مدل عددی شبکه‌ای توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل سازی شده است و روند ترک خوردگی توسط خرابی عضوهای میله‌ای بتن نشان داده شده است. مدل‌های شبکه‌ای بر اساس معیار ترک خوردگی توسعه یافته و با بکارگیری اصول مکانیک شکست در ارزیابی ترک خوردگی اعضا بتن آرمه بکار رفته‌اند. بتن و فولاد با یک مدل برهم کنش دهنده (Bond-Link) و با در نظر گرفتن اثر چسبندگی-لغزش با یکدیگر ترکیب شده‌اند تا رفتار مصالح ترکیبی بتن آرمه را توصیف کنند. نتایج تحلیل‌ها نشان داده‌اند که مدل‌های چسبندگی-لغزش تاثیر مهمی در فاصله‌ی ترک، عرض ترک، نحوه‌ی انتشار ترک و موضع شدگی خرابی دارند.

کلید واژگان: مدل شبکه‌ای، مکانیک شکست، گسترش ترک، روابط چسبندگی، لغزش

۱- مقدمه

تحلیل ترک خوردگی در سازه‌های بتن آرمه یک مرحله‌ی ضروری در طراحی است. فاصله‌ی ترک‌ها و عرض ترک، بحثی عموماً تجربی بوده در بعضی مواقع نظری است. با وجود تحقیقات متعدد در این زمینه، هنوز فاصله‌ی ترک‌ها، نحوه‌ی انتشار ترک و عرض ترک در اکثر شرایط، برای فرمول‌های در دسترس ناشناخته‌اند و روابط ارائه شده در تخمین صحیح آن ناکافی به نظر می‌رسد. علی‌رغم اینکه دلایل بوجود آمدن ترک‌ها متعدّداند، معمولاً این ترک‌ها، ناشی از تنش‌هایی هستند که یا بر اثر جلوگیری از تغییر حجم در بتن و یا بر اثر بارهایی که به سازه وارد می‌شوند، به وجود می‌آیند.

در آغاز دهه‌ی نود کار هاوکینز [۱] توسط کمیته‌ی ACI [۲] دنبال شد، که در آن کاربرد مکانیک شکست در سازه‌های بتنی در مقابل معیار مقاومت مصالح بصورت مستدل ارائه گردید. از نظر محاسباتی، چهار روش ترک ناپیوسته (Discrete Crack Approach) [۳]، ترک پخششی (Smearred Crack Approach) [۴]، ذرات ناپیوسته (Discrete Particle Approach) [۵] و ترک شبکه‌ای شکل (Lattice-Type Crack) [۶] برای مدل کردن ترک خوردگی، نحوه‌ی انتشار ترک و پیش‌بینی موقعیت ترک و سخت شدن و نرم شدن کششی وجود دارد. روش المان محدود به خوبی می‌تواند پدیده‌ی مکانیک پیوسته و همچنین پدیده‌ی گسستگی (مانند ترک و میان سطح‌ها یا رابط‌ها) را بر مبنای مکانیک شکست مدل‌سازی کند. با توجه به مقیاس‌های مختلف بتن، می‌توان رفتار مکانیکی انواع سازه‌های بتنی یا بتن آرمه را در سطح‌های ریز مقیاس (meso-level) و بزرگ مقیاس (macro-level) بررسی کرد. در کل، مدل‌سازی بزرگ مقیاس را می‌توان برای تحلیل سازه‌ی بتنی به کار برد، در حالی که مدل‌سازی ریز مقیاس در به‌دست آوردن روابط برای تحلیل بزرگ مقیاس استفاده می‌شود. در مدل‌های بزرگ مقیاس، بتن به‌عنوان مصالح همگن در نظر گرفته شده و هدف تحلیل، عمدتاً پیش‌بینی شرایط شکست کلی، تخمین بارهای نهایی و رسم منحنی‌های نیرو-جابجایی با زمان تحلیل کم می‌باشد.

هدف این تحقیق بررسی اثر مدل‌های مختلف چسبندگی-لغزش بر رفتار یک صفحه‌ی بتن آرمه می‌باشد. چسبندگی بین بتن و فولاد بر عملکرد و طول عمر سازه‌ها، تحت اثر بارهای وارده تاثیر قابل توجهی دارد و ضعف چسبندگی و مکانیزم انتقال نیرو را دچار مشکل می‌کند، در نتیجه باعث افزایش تغییرشکل، افزایش تعداد ترک‌ها و کاهش ظرفیت باربری اعضا بتن آرمه می‌شود که این عوامل به سهم خود می‌توانند منجر به شکست ناگهانی عضو شوند. بنابراین پیش‌بینی رفتار چسبندگی-لغزش در سازه‌های بتن آرمه بسیار ضروری می‌باشد. دو روش عمده برای مدل‌سازی اتصال میلگرد فولادی به بتن در تحلیل اجزاء محدود وجود دارد. اولین روش، به‌نام روش Bond-link توسط نگو و اسکوردلیز [۳] معرفی شده که از یک سری المان‌های فتری مجزا با مشخصات مکانیکی معین برای در نظر گرفتن رفتار

میان‌سطحی استفاده می‌کند. این روش توسط برنامه‌های مختلف المان محدود (FEM) قابل مدل‌سازی است. روش دیگر برای اولین بار توسط گروت و همکارانش، به نام روش Bond-zone [۷] معرفی شده که در آن المان‌های چسبندگی (یا المان‌های میان‌سطحی)، ارتباط پیوسته‌ای ما بین بتن و فولاد بوجود می‌آورند. در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط نگو و اسکوردلیز [۳] برای مدل‌سازی المان‌های چسبندگی و از روش مدل شبکه‌ای شکل (با اعضای افقی، عمودی و قطری) برای مدل‌سازی صفحه‌ی بتن آرمه در نرم‌افزار ABAQUS [۸] در سطح بزرگ مقیاس استفاده شده است.

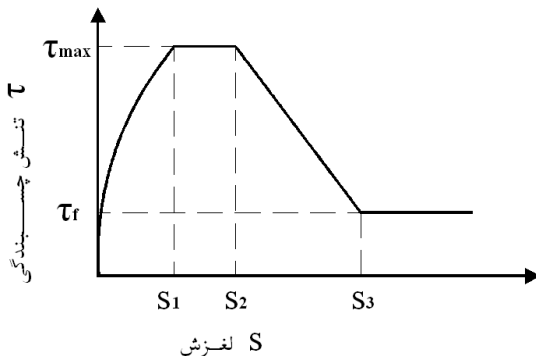
همچنین در این تحقیق برای تشخیص موقعیت ترک‌ها و نحوه‌ی انتشار آن‌ها در اعضا یا المان‌ها از اصل مینیمم انرژی [۹] استفاده شده که در ذیل بصورت مختصر شرح داده می‌شود:

۲- فواصل ترک‌ها و معیار شکست

شکست بتن ابتدا به صورت میکروتورک‌های پخش‌شونده در یک حوزه‌ی بزرگ شروع و سپس در یک منطقه‌ی نسبتاً کوچک متمرکز می‌شود تا اینکه یک ترک ناپیوسته تشکیل شود. اگر بتن با میلگرد تقویت شود، یقیناً میلگرد، شکل‌گیری و انتشار ترک را محدود می‌کند. وقتی کرنش‌های کششی بتن به مقدار کرنش نهایی برسند، ترک‌های کششی شروع به شکل‌گیری کرده و به صورت نامنظم انتشار می‌یابند. به محض گسترش بیشتر، بتن در محل ترک، رفتار نرم‌شونده از خود نشان می‌دهد و بتن در اطراف ترک‌ها به صورت الاستیک باربرداری می‌شود. سرانجام، خرابی در محل‌های ترک خوردگی متمرکز می‌شود. در اعضا بتنی خالص، تغییرشکل‌های متمرکز شده، نیاز به انرژی کمتری دارند [۱۰]. منظور اینکه عضو بتنی خالص توانایی کمی در جذب یا ذخیره‌ی انرژی دارد. اما در مورد بتن آرمه به دلیل مقاومتی که بوسیله‌ی میلگرد ایجاد می‌شود باربرداری خیلی زیاد در بتن گسترش نمی‌یابد، البته در بارگذاری زیاد وقتی کشش بتن از حد تجاوز می‌کند ترک‌های اضافی در خارج از محل باربرداری محلی شکل می‌گیرند. سرانجام فاصله‌ی ترک‌ها توسعه می‌یابد که در آن خرابی در چندین منطقه‌ی باریک (کم عرض) متمرکز می‌شود و به‌صورت کلی پخش نمی‌شود. بنابراین، فاصله‌ی ترک‌ها یک شکل خاص از مساله‌ی تمرکز کرنش است.

چنان‌که گفته شد علت بوجود آمدن فاصله‌ی ترک‌ها، اندرکشن نرم‌شدگی کرنشی بتن و مقاومت ایجاد شده توسط میلگرد می‌باشد. در مناطق نرم‌شدگی موضعی بتن ساده، الگوی تغییرشکل به مشخصات نرم‌شدگی بتن بستگی دارد که خرابی توسط تمرکز ترک‌ها در یک منطقه‌ی باریک و شکل‌گیری یک ترک جداگانه ایجاد می‌گردد. در حالی که در سطح سازه‌ای (بتن آرمه)، الگوی تغییر شکل بوسیله‌ی سخت‌شدگی میلگرد تعیین می‌شود، به‌طوری‌که از گسترش زیاد باربرداری جلوگیری می‌کند و فاصله‌ی ترک‌ها را بیشتر می‌کند. در نواحی نرم شده، تغییرشکل‌های موضعی انرژی کمتری را مصرف

به نوع محصورشدگی و شرایط چسبندگی می‌توان از جدول (۱) بدست آورد.



شکل ۱- روابط تحلیلی چسبندگی-لغزش با بارگذاری یکنواخت [۱۲]

جدول ۱- پارامترها برای محاسبات روابط چسبندگی-لغزش مطابق با معادلات (۱) تا (۴) [۱۲]

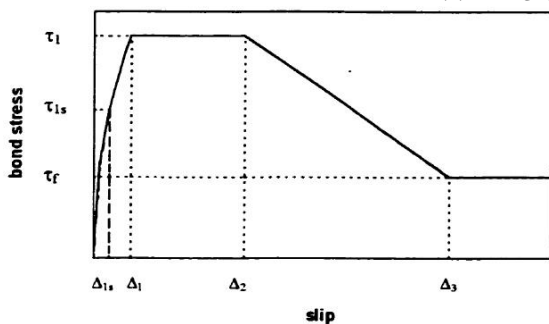
ستون ۵	ستون ۴	ستون ۳	ستون ۲	
	بتن محصورشده**	بتن محصورنشده*		
دیگر شرایط چسبندگی	شرایط چسبندگی خوب	دیگر شرایط چسبندگی	شرایط چسبندگی خوب	
1.0 mm 3.0 mm فاصله آجها	1.0 mm 3.0 mm فاصله آجها	0.6 mm 0.6 mm 2.5 mm	0.6 mm 0.6 mm 1.0 mm	S ₁ S ₂ S ₃
0.4	0.4	0.4	0.4	α
1.25√f _{ck}	2.5√f _{ck}	1.0√f _{ck}	2.0√f _{ck}	τ _{max}
0.40τ _{max}	0.40τ _{max}	0.15τ _{max}	0.15τ _{max}	τ _f

* گسیختگی بعلت شکاف خوردگی بتن

** گسیختگی بعلت برش بتن بین آجها

۳-۲- مدل Harajli و همکاران در سال ۱۹۸۸ [۱۳]

این مدل بر مبنای منحنی چسبندگی-لغزش مدل CEB-FIP پیشنهاد شده است، اما در شکست بیرون کشی با مقدار متفاوتی از α و تفاوت ناچیز τ_۱، τ_f و در شکست شکاف خوردگی بصورت خط نقطه چین شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- روابط تحلیلی چسبندگی- لغزش [۱۳]

می‌کنند، در حالی که پاسخ سخت شوندگی کل سازه، با حداقل شدن جذب انرژی در تغییرشکل‌های توزیع شده بدست می‌آید. بنابراین، معیار مینیمم انرژی، کنترل کننده واکنش سازه بوده و فاصله‌ی ترک‌ها را ایجاد می‌کند، بطوریکه خرابی در چند منطقه‌ی باریک متمرکز می‌شود.

مطالعات زیادی در گذشته برای ارزیابی نحوه‌ی انتشار ترک و درک رفتار چسبندگی انجام شده است که اکثر آن‌ها بر روی نمونه‌های منشوری بتن با یک میلگرد فولادی مدفون در آن، می‌باشد. روش‌های پیشنهاد شده توسط چندین محقق، تنها برای اعضای کوچک کاربرد دارد و نمی‌تواند برای سازه‌های بتن‌آرمه به کار برده شود. به هر حال، تحقیقات کمی برای تایید مدل‌های چسبندگی-لغزش (که بصورت تجربی بدست آمده‌اند) بابت اثرهای لغزش-چسبندگی در رفتار اعضای بتن‌آرمه انجام شده است. بنابراین چنین تحقیقی در جهت تایید مدل‌های چسبندگی-لغزش و بررسی اثر آن‌ها در عرض ترک، فاصله‌ی ترک و نحوه‌ی انتشار ترک خوردگی در اعضای بتن‌آرمه ضروری می‌باشد. به همین منظور در ادامه سه مدل چسبندگی-لغزش بررسی شده است.

۳-۳ مدل‌های چسبندگی-لغزش

تحولات و مطالعات اولیه در مورد چسبندگی از سال ۱۸۴۹ شروع شد، وقتی بتن‌آرمه برای اولین بار توسط Monier معرفی شد و این معرفی توسط افراد زیادی دنبال شد تا سیستم‌های تقویتی را بهبود بخشند. سه عدد از معادلات تجربی غیرخطی پیشنهاد شده توسط محققان برای مدل‌های تنش-لغزش چسبندگی که در این تحقیق به کار برده شده‌اند، در زیر آمده است.

۳-۱- مدل Eligehausen و همکاران در سال ۱۹۸۱ [۱۱]

این مدل، همان مدل انتخاب شده توسط CEB-FIP 1990 [۱۲] است که تنش‌های چسبندگی بین بتن و میلگرد تقویتی را می‌توان تحت بارگذاری یکنواخت، توسط توابع مرتبط با جابجایی (لغزش) s، توسط معادلات (۱) تا (۴) محاسبه کرد (شکل ۱):

$$\tau = \tau_{max} (s/s_1)^\alpha \text{ for } 0 \leq s \leq s_1 \quad (1)$$

$$\tau = \tau_{max} \text{ for } s_1 < s \leq s_2 \quad (2)$$

$$(3)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \left(\frac{s-s_2}{s_3-s_2} \right) \text{ for } s_2 < s \leq s_3$$

$$\tau = \tau_f \text{ for } s_3 < s \quad (4)$$

در معادلات اشاره شده، τ_{max} مقاومت چسبندگی حداکثر، τ_f مقاومت چسبندگی باقیمانده و S₁، S₂، S₃ مشخصه‌های مقادیر لغزش هستند که وابسته به میزان محصورشدگی، هندسه‌ی میلگردهای تقویتی و مقاومت و کیفیت بتن می‌باشد. مقدار این پارامترها را با توجه

۳-۳- مدل Farra در سال ۱۹۹۵ [۱۴]

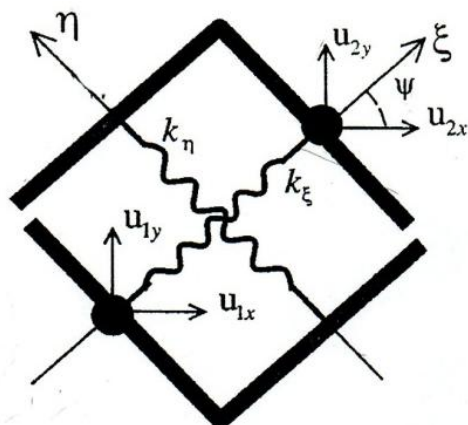
مدل Farra بر مبنای تعداد زیادی از آزمایش‌های اعضای کششی بتن‌آرمه، بصورت معادله‌ی (۵) به دست آمده که برای پوشش بتنی معمولی و بارگذاری یکنواخت کوتاه مدت پیشنهاد شده است.

$$\tau = 0.4 f_{cm}^{0.95} \cdot s^{0.3} \quad (۵)$$

در رابطه‌ی فوق، τ تنش چسبندگی، f_{ck} تنش فشاری بتن، در رابطه‌ی فوق، τ تنش چسبندگی، $f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$ و $\Delta f = 8 \text{ MPa}$ است. در این تحقیق برای مدل‌سازی رفتار چسبندگی-لغزش، از المان Bond-Link استفاده شده که در ادامه توضیح داده شده است.

۴- المان Bond-link

همانطور که در شکل (۳) می‌بینید، المان Bond-link [۳] شامل دو فنر موازی با محورهای عمود برهم ξ و η می‌باشد که به اندازه‌ی زاویه‌ی ψ نسبت به محور مختصات کلی، دوران دارد. المان پیوستگی از نظر مفهومی از دو فنر غیر خطی تشکیل شده و دو گره را با مختصات یکسان به هم وصل می‌کند که یکی موازی با محور میلگرد تقویتی و دیگری عمود بر آن است. مولفه‌ی نیروی ارتباطی در جهت محور میلگرد، نیروی چسبندگی و مولفه‌ی عمود بر آن نیروی شکافتگی شعاعی را می‌دهد.



شکل ۳- المان Bond-link

بردار نیروی گره‌ی $\vec{F} = [F_{1x} F_{1y} F_{2x} F_{2y}]$ و بردار جابجایی گره‌ی $\vec{u} = [u_{1x} u_{1y} u_{2x} u_{2y}]$ المان bond-link توسط ماتریس سختی K با هم مرتبط می‌باشند که در معادله‌ی (۶) آمده است:

$$K = \begin{bmatrix} k_{\xi}c^2 + k_{\eta}s^2 & k_{\xi}sc - k_{\eta}sc & -k_{\xi}c^2 - k_{\eta}s^2 & -k_{\xi}sc + k_{\eta}sc \\ k_{\xi}sc - k_{\eta}sc & k_{\xi}c^2 + k_{\eta}s^2 & -k_{\xi}sc + k_{\eta}sc & -k_{\xi}c^2 - k_{\eta}s^2 \\ -k_{\xi}c^2 - k_{\eta}s^2 & -k_{\xi}sc + k_{\eta}sc & k_{\xi}c^2 + k_{\eta}s^2 & k_{\xi}sc - k_{\eta}sc \\ -k_{\xi}sc + k_{\eta}sc & -k_{\xi}c^2 - k_{\eta}s^2 & k_{\xi}sc - k_{\eta}sc & k_{\xi}c^2 + k_{\eta}s^2 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

مصالص بتنی به کار بردند. به نظر می‌رسد اولین کار با کاربرد مدل‌سازی شبکه‌ای در سطح بزرگ مقیاس برای سازه‌های بتن‌آرمه، توسط نیوا و همکارانش در سال ۱۹۹۵ [۱۶] بوده که از یک مدل دوبعدی شبکه‌ای برای مطالعه‌ی مقاومت برشی استفاده کرده‌اند. همچنین، چن و بیکر در سال ۲۰۰۳ [۱۷] از مدل شبکه‌ای در سطح بزرگ مقیاس برای تاثیر چسبندگی-لغزش در فاصله‌ی ترک-های اعضای بتن‌آرمه استفاده کردند. یکی دیگر از مطالعات کامل در این خصوص توسط میکی در سال ۲۰۰۴ [۱۸] بوده که در آن اهداف اصلی، بالا بردن قابلیت‌های مدل شبکه‌ای دو بعدی نیوا و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل تحلیلی غیرخطی سه بعدی دقیق بود.

در این تحقیق مدل شبکه‌ای بر مبنای روش قابی پیشنهادی توسط Hrennikoff [۱۵] مدل‌سازی شده است. در این روش، سازه در الگویی با اعضای خرابی برابر جای‌گذاری شده که در شکل (۴) نشان داده شده و روند ترک خوردگی و انتشار آن، با خرابی المان‌های میله‌ای بتن تشخیص داده می‌شود. هر المان خرابی از دو نقطه‌ی هم

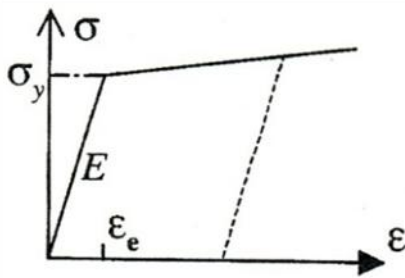
در معادله‌ی فوق، $c = \cos \psi$ ، $s = \sin \psi$ می‌باشد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی عملکرد صفحه‌ی بتن‌آرمه، مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح شامل رفتار نرم‌شدگی و سخت‌شدگی بتن در فشار، نرم‌شدگی کششی و رفتار چسبندگی-لغزش، از مدل شبکه‌ای که ضمن سادگی و سرعت بالای تحلیل، از دقت بالایی نیز برخوردار است، استفاده شده است. اساس فرمول بندی این مدل‌ها در ادامه توصیف شده است.

۵- مدل شبکه‌ای (Lattice Model)

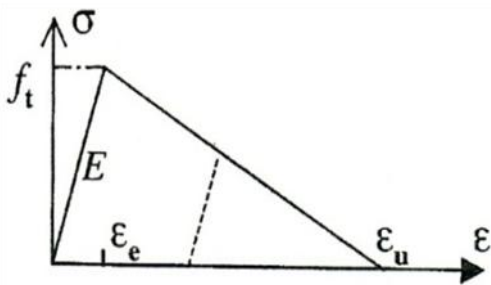
مدل‌های شبکه‌ای در طول ۵۰ سال گذشته برای اهداف مختلف و در گونه‌های مختلف استفاده شده‌اند. در سال ۱۹۴۱ آقای Hrennikoff [۱۵] اولین کسی بود که یک شبکه‌ی مثلثی منظم با المان‌های خرابی معرفی کرد تا مشکلات کلاسیک الاستیسیته را حل کند، اما این مدل به دلیل نیاز به روش محاسباتی قوی‌تر به صورت تئوریک باقی ماند. چلانگن و ون‌مایر [۶] در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار مدل شکست شبکه‌ای شکل را در سطح ریز مقیاس برای

کرنش الاستیک (ϵ_e) شد (آغاز ترک خوردگی)، مصالح تغییر شکل پلاستیک از خود نشان می‌دهند و بالاخره در کرنش نهایی (ϵ_u) عضو خرابی می‌شکند. در مدل کششی بتن، فرض شده است که مسیر باربرداری کاملاً بر روی مسیر اولیه می‌افتد و مسیر بارگذاری مجدد، مسیر باربرداری را دنبال می‌کند.

روابط تنش-کرنش می‌گردد بصورت الاستوپلاستیک تحت بارگذاری یکنواخت بیان شده است. همانطور که در شکل (۵-ب) نشان داده شده، شیب ناحیه‌ی سخت‌شدگی $E_s/100$ می‌باشد که در آن مدول الاستیسیته‌ی فولاد است. مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد به موازات شیب اولیه در نظر گرفته می‌شود.



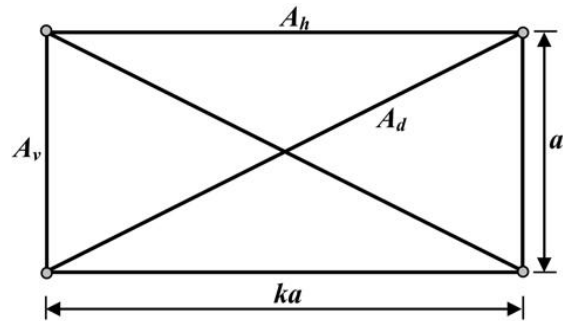
(الف)



(ب)

شکل ۵ - (الف) مدل کششی بتن، (ب) روابط تنش - کرنش می‌گردد

سطح تشکیل شده و در دو جهت عمود و موازی با میله، جابه‌جایی گرهی دارد. در مدل شبکه‌ای شکل، اعضای افقی و عمودی در برابر تنش‌های نرمال و اعضای قطری در مقابل تنش‌های برشی مقاومت می‌کنند. بنابراین این مدل می‌تواند هر دو نوع شکست خمشی و برشی را تخمین بزند و ظرفیت حمل برشی اعضای بتن آرمه را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. علاوه بر این، به دلیل این که مدل شبکه‌ای، یک عضو بتن آرمه را در المان‌های خرابی تقسیم می‌کند، می‌تواند به آسانی جریان‌های تنش‌های داخلی را دنبال کند.



شکل ۴- الگوی المان‌های خرابی برای مسائل تنش صفحه‌ای [۱۵]

در شکل (۴)، A_v ، A_d ، A_h به ترتیب سطح مقطع عرضی اعضای خرابی افقی، قطری و عمودی هستند که به صورت زیر با استفاده از معادلات (۷) تا (۹) محاسبه می‌شوند:

$$A_h = \frac{3}{8}(3 - k^2)at \quad (7)$$

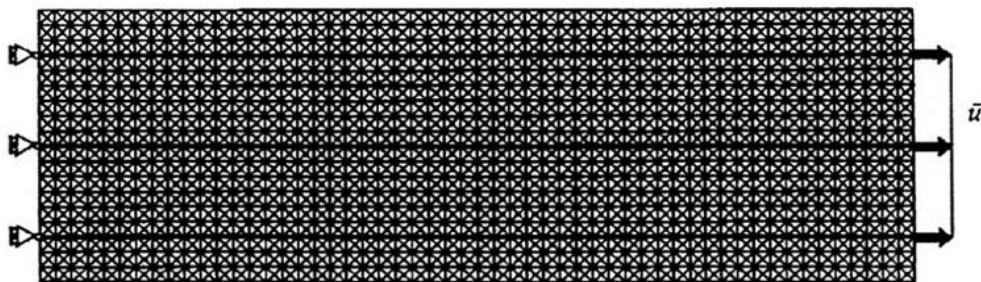
$$A_d = \frac{3}{16} \frac{(1+k^2)^{3/2}}{k} at \quad (8)$$

$$A_v = \frac{3}{8} \frac{(3k^2-1)}{k} at \quad (9)$$

در روابط فوق، t ضخامت صفحه، a طول عضو عمودی و k نسبت بین عضو افقی و عمودی می‌باشد.

۶- مدل‌های مصالح

المان‌های خرابی بتن در کشش، از منحنی نرم‌شدگی شکل (۵-الف) که بصورت خطی است، تبعیت می‌کنند که در آن، f_t مقاومت کششی شکافتگی بتن است. بعد از اینکه کرنش (ϵ) بزرگتر از



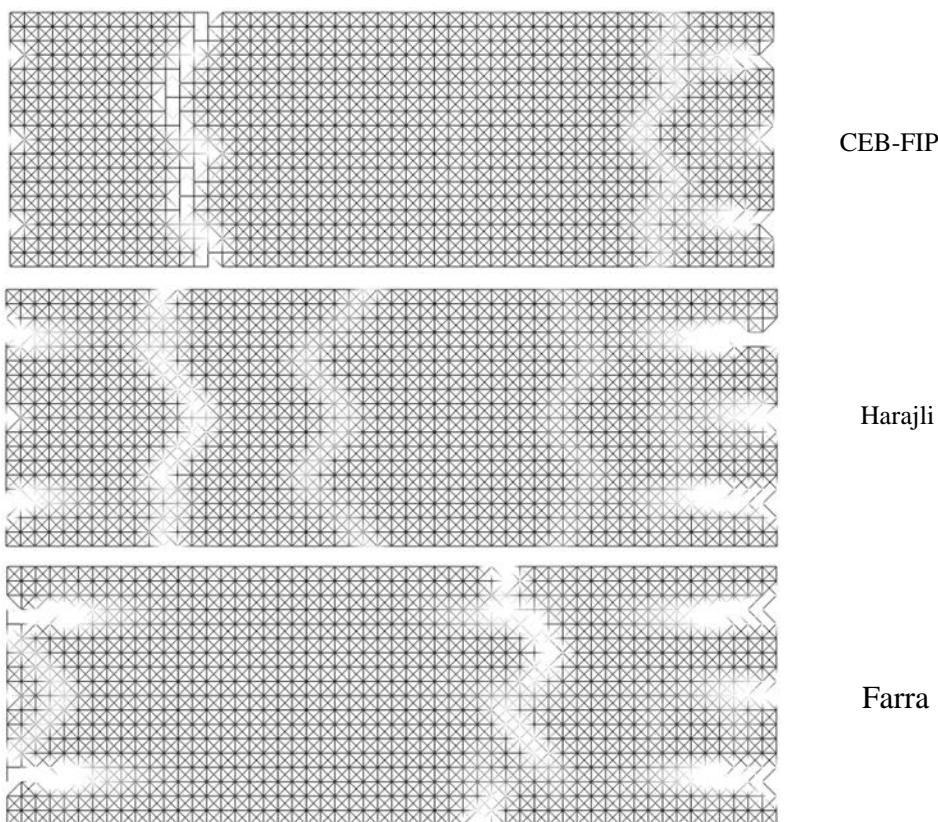
شکل ۶ - شکل شماتیک صفحه بتن

۷- تحلیل عددی صفحه‌ی بتن‌آرمه

به منظور نشان دادن اثر مدل‌های چسبندگی-لغزش بر عملکرد صفحه‌های بتن‌آرمه، صفحه‌ی نشان داده شده در شکل (۶)، با استفاده از تحلیل غیرخطی عددی و با مدل شبکه‌ای و در نظرگرفتن رفتارهای مصالح شرح داده شده در فوق با طول 2.7m، ارتفاع 0.90m، ضخامت 0.05m و تحت کشش تک محوری مدل‌سازی شده و نحوه‌ی انتشار ترک (زاویه، فاصله و تعداد ترک‌ها) بررسی شده است. در صفحه‌ی بررسی شده، یک میلگرد فولادی در وسط عرض و دو میلگرد به فاصله‌ی 15m از بالا و پایین خرپا قرار گرفته و حداکثر جابجایی کششی وارد بر آن 2.72×10^{-3} m است.

مشخصات مصالح بتنی عبارتند از: مدول الاستیسیته $E_c = 4 \times 10^4$ MPa، تنش کششی $f_t = 4$ MPa، ضریب پواسون $\nu = 0.2$ و مدول نرم شدگی $h = -0.05 E_c$ است و برای فولاد تقویتی: مدول الاستیسیته $E_s = 2 \times 10^5$ MPa، تنش تسلیم $\sigma_y = 500$ MPa، ضریب پواسون $\nu = 0.3$ و مدول سخت شدگی $h = 0.01 E_s$ می‌باشد.

در شکل (۷) نحوه‌ی انتشار ترک خوردگی صفحه‌ی بتن آرمه بعد از تحلیل عددی در برنامه‌ی ABAQUS، به ترتیب با اعمال مدل‌های چسبندگی-لغزش CEB-FIP، Farra و Harajli در حداکثر بار کششی نشان داده شده است. بطوری‌که تعداد ترک‌های ایجاد شده، نحوه‌ی انتشار، محل، زوایا و فاصله‌ی ترک‌ها، متأثر از انواع مدل‌های چسبندگی-لغزش می‌باشد. در مدل CEB-FIP دو ترک، در مدل Harajli سه ترک و در مدل Farra یک ترک در راستای ارتفاع صفحه انتشار یافته است که محل تشکیل و نحوه‌ی انتشار مدل Farra نسبت به دو مدل دیگر متفاوت تر است. همچنین نحوه‌ی انتشار ترک در راستای میلگردهای تقویتی در هر سه مدل تقریباً به یک صورت است ولی در مدل Farra ترک خوردگی در راستای میلگردها بیشتر از دو مدل دیگر می‌باشد. در کل می‌توان گفت که مدل CEB-FIP ترک خوردگی صفحه‌ی بتن آرمه را نسبت به مدل‌ها Farra و Harajli دقیق‌تر پیش‌بینی کرده است.



شکل ۷- نحوه‌ی انتشار ترک صفحه‌ی بتن‌آرمه در زمان گسیختگی برای مدل‌های متفاوت چسبندگی-لغزش

برای به‌دست آوردن یک مدل چسبندگی-لغزش دقیق و سازگار با سازه‌های واقعی نیاز به مطالعات و آزمایش‌های تجربی زیادی می‌باشد.

در سه مدل بررسی شده، اثر مدل‌های چسبندگی-لغزش به شکل موضعی کردن ترک خوردگی در بتن اطراف میلگردها مشهود بود و نتایج نشان دادند که مدل‌های مختلف چسبندگی-لغزش تأثیر قابل توجهی در حالت بارگذاری کشش محوری ایجاد می‌کنند. بنابراین

- 5- Bazant, Z. P.; Ozbolt, J., Nonlocal, 1990, microplane model for fracture, damage, and size Effect in structures, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol. 116, No. 11, Nov., pp. 2485-2505.
- 6- Schlangen, E.; Van Mier, J. G. M., 1992, Experimental and numerical analysis of micromechanisms of fracture of cement-based composites, Cement and Concrete Composites, 14(2), pp. 105-118.
- 7- De Groot A.K.; Kusters G.M.A.; 1981, Monnier T., Numerical modelling of bond-slip behavior, Heron, MT, Conc. Mech., Vol. 26(1B), pp. 6-38.
- 8- SIMULIA, ABAQUS, 1981 version 6.11-3, Dassault Systemes, 2011. omputational science and engineering, H. P. Lee and K. Kumer.eds., global energy minimization, Computers & Structures, Vol. 78 (4), pp. 529-536.
- 9- Chen, G.; Baker, G., 2002, Energy approach to numerical modeling of crack spacing in reinforced concrete, Recent advances in Imperial College Press, Singapore, p. 569-572.
- 10- Chen, G.; Baker, G.; Hunt, G. W., 2000. Computational approach to localization using global energy minimization, Computers & Structures, Vol. 78(4), pp. 529-539.
- 11- Ciampi, V.; Eligehausen, R.; Bertero, V.V.; Popov, E.P., 1981, Analytical model for deformed-bond under generalized excitations, Trans. IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, Netherlands.
- 12- CEB-FIP., CEB-FIP model code 1990: Design code, London: Telford.
- 13- Harajli, M.; Mukaddam, M, 1988. Slip of steel bars in concrete joints under cyclic loading, J. Struct. Eng, Vol. 114(9), pp. 2017-2035.
- 14- Farra, B., 1995. Influence of concrete strength and bond to reinforcement on cracking (in French), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ph.D. Thesis No.
- 15- Hrennikoff, A., 1941, Solutions of problems of elasticity by the framework method, J. Appl. Mech., A169-175.
- 16- Niwa, J.; Choi, I.C.; Tanabe, T. 1995, Analytical study for shear resisting mechanism using lattice model, Concrete Library of JSCE, No. 26, pp. 95-109, December.
- 17- Chen, G.; Baker, G., 2003, Influence of bond slip on crack spacing in numerical modeling of reinforced concrete, J. Struct. Eng., Vol. 129(11), pp. 1514-1521.
- 18- Miki, T., 2004, Nonlinear analysis of reinforced concrete structures subjected to seismic loads by using three-dimensional lattice model, PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Tokyo.

۸- نتیجه گیری

به طور کلی هدف از طراحی یک سازه، تامین ایمنی در مقابل فروریختگی و تضمین عملکرد مناسب در زمان بهره‌برداری است. بنابراین مدل‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه برای پیش‌بینی دقیق مقاومت واقعی سازه و تعیین اثرات داخلی بارهای وارده بر آن ضروری است. نتایج تحقیق کنونی شامل ارزیابی ترک‌خوردگی یک صفحه‌ی بتن آرمه با مدل شبکه‌ای شکل بزرگ سطح بر مبنای مکانیک شکست با بررسی سه مدل مختلف چسبندگی-لغزش، در برنامه‌ی ABAQUS می‌باشد که در ادامه مهم‌ترین یافته‌های تحقیق آمده است:

۱- نتایج ارزیابی نشان داده است که مدل‌های تحلیلی قادر به بازتولید اغلب جنبه‌های مهم انتشار ترک در اعضای مختلف سازه‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری یکنواخت هستند، مخصوصاً می‌توان به عملکرد بعد از اوج سازه‌های بتن‌آرمه اشاره کرد.

۲- اثر نرم‌شدگی کششی در تحلیل صفحه‌ی بتن آرمه، تحت بارگذاری یکنواخت خیلی مهم و تاثیرگذار است.

۳- المان Bond-Link در ارتباط با روش مینیموم انرژی قادر است تا اثر چسبندگی-لغزش را در فاصله‌ی ترک منعکس کند.

۴- تاثیر چسبندگی-لغزش در عرض، فاصله، ارتفاع و زاویه‌ی ترک در اعضای بتن‌آرمه قابل توجه است و در کل می‌توان گفت که مدل CEB-FIP نسبت به مدل‌های دیگر نحوه‌ی انتشار ترک را به خوبی نشان می‌دهد.

۵- تحلیل سازه‌های بتن‌آرمه با استفاده از مدل‌سازی شبکه‌ای، زمان محاسباتی را کاهش داده و در نتیجه سریع به جواب می‌رسد.

۶- از قابلیت‌های مهم این مدل، توانایی نشان دادن جهت ترک توسط خرابی المان است و همچنین می‌توان ترک‌های اولیه را با حذف المان تعریف کرد.

۹- منابع:

- 1- Hawkins, N. M., 1984. The role of fracture mechanics in conventional reinforced concrete design, In Shah, S. P., editor, Application of Fracture to Cementitious Composites, NATO Advanced Research Workshop, Evanston, IL, USA, pp. 639-666. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- 2- ACI Committe 446, 1992. Fracture mechanics of concrete: concepts, models and determination of material properties, American Concrete Institute. Chairman of the Committee: Z.P. Bazant,
- 3- Ngo, D.; Scordelis, A.C. 1967, Finite element analysis of reinforced concrete beams, Journal of ACI, Vol. 64, No. 3, pp. 152-163.
- 4- Rashid, Y. R., 1968, Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels, Nuclear Engineering and Design, Vol. 7, pp. 334-344.

Investigation of the Bond - Slip Effect on Cracking of RC Panel Using Lattice Model

H. Shojaifar

Department of Civil Engineering, Young Researchers and Elite Club, Maragheh Branch,
Islamic Azad University, Maragheh, Iran

M.Farzam

Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The present paper studies three bond-slip models (CEB-FIP, Harajli and Farra) based on the findings of previous experimental studies in order to investigate the influence of bond-slip on crack spacing and crack propagation in RC panel. For this purpose, the RC panel is modeled using a lattice type numerical model in ABAQUS software, in which the cracking process is represented by the damage of the concrete bar elements. The lattice models are proposed based on an improved cracking criterion, which is derived from fracture mechanics principles. Concrete and steel are combined based on a model of the interaction (bond-link) through bond-slip in order to describe the behavior of the composite reinforced concrete material. The results of this analysis showed that the effects of diverse bond-slip models on crack spacing, crack propagation and damage localization are significant.

Keywords: Lattice model, Fracture mechanics, Crack propagation, Bond-slip relationship.