



تحلیل ترک خوردگی پیشرونده در سازه‌های بتن مسلح به روش المانهای مجزا

محمد رضا آرم^۱، سهیل محمدی^۲

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲. استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله براساس روش ترکیبی المانهای محدود و مجزا یک مدل تحلیلی از سازه بتن مسلح ارائه می‌گردد که امکان مدلسازی عددی برخورد و نفوذ پرتابه‌ها، ایجاد و رشد ترکهای پیشرونده و کلیه رفتارهای تماسی پس از ترک خوردگی را با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگی بتن فراهم می‌سازد. برای مدلسازی بتن از معیار ترک خوردگی رانکین (Rankine) استفاده شده است. در محیط ترک خورده روابط روش المانهای مجزا (Discrete Element Method) و مکانیک تماس (Contact Mechanics) حاکم می‌باشد که در آن المان‌های اجزاء محدود علاوه بر عملکرد شکل پذیر (Deformable) خود بوسیله یک نوع اندرکنش تماسی با سایر المانها (که در مکانیک تماس تعریف می‌شود) رفتار محیط اصلی را شبیه سازی می‌کنند. نتایج بدست آمده از تحلیلهای عددی بوسیله این روش با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

کلید واژه‌ها: سازه بتن مسلح، المانهای مجزا، مکانیک تماس، ترک، برخورد، نفوذ، روش پنالتی، نرم شدگی کرنش، رانکین

محاسبه ترک خوردگی پیشرونده در سازه های بتنی و بتن مسلح نظیر سدها، پلها، پناهگاهها، سازه های مدفون ، راکتورهای هسته ای و ... در اثر بارگذارهای خارجی اعم از استاتیکی و دینامیکی از اهمیت به سزایی برخوردار است. به علت وجود مکانیسمها و عوامل متعددی که در رفتار این سازه ها مؤثر می باشند، برآورد دقیق چنین رفتاری به سادگی امکان پذیر نمی باشد. لذا ارائه روشی با استفاده از جدیدترین مدل‌های رفتاری تماسی که امکان محاسبه اندرکنش تماسی ، ترک خوردگی موضعی سازه و اثرات کلی برخورد را میسر نماید و نیروهای لازم جهت کنترل ظرفیت باربری سازه را در اختیار قرار دهد بیش از پیش ضروری می‌باشد.

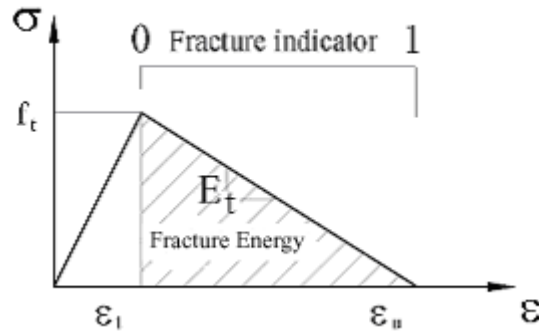
مدلسازی عددی رفتار بتن براساس روش ترک پیوسته (Smearred Crack) با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگی بتن (Strain Softening) اولین بار توسط Rashid انجام شد (۱۹۶۸) [۴]. بر اساس روش ترک مجزا (Discrete Crack) مدل ترک چسبنده بوسیله Hillerborg ارائه شد که مود I شکست بتن را در نظر می گیرد [۸]. این روش در سال ۱۹۹۴ توسط Cervenka برای شکست براساس موده‌های مرکب I و II تکمیل گردید [۹]. در سال ۱۹۹۵ روش Cervenka توسط Saleh و Aliabadi در المانهای مرزی استفاده شد [۱۰]. در این روش خصوصیات کاملی از مصالح نظیر انرژی شکست و تابع نرم شدگی در مد II مورد نیاز است. در سال ۱۹۸۷ Lin و Belytschko با ارائه المانهای فرسایشی (Eroding Element) و الگوریتم جدید برای برخورد دو جسم با یکدیگر توانستند برخورد پرتابه به دال بتنی را به صورت سه بعدی مدلسازی کنند [۱۱]. Morikawa در سال ۱۹۹۳ با استفاده از روش المانهای مجزا (DEM) ترک خوردگی و پارگی ناشی از برخورد پرتابه به دالهای بتنی مسلح را تحلیل کرد [۵]. او از ایده particle و فنرهای تماسی استفاده کرده است. توسط مدل محاسباتی ارائه شده در این تحقیق روشی مورد استفاده قرار می گیرد که ضمن در برداشتن رفتار پلاستیک مصالح و عملکردهای تماسی پس از ترک خوردگی نسبت به روشهای فوق کاملتر بوده و قابلیت تحلیل ترک خوردگی های گسترده را نیز دارد. در این روش محیط ترک خورده به المانهای جدا از هم تقسیم میشود که هر یک از این المانها ضمن رفتار شکل پذیر به وسیله بکارگیری الگوریتمهای تماسی با سایر المانهای هم مرز خود اندرکنش تماسی دارد.

مدل رفتاری بتن مسلح

مدل رفتاری بتن شامل تعریف رابطه تنش کرنش ، معیار شکست و رفتار پس از ترک خوردگی میباشد. در این تحقیق مدل رفتاری بتن با مشخص بودن مقاومت کششی تک محوری بتن f'_t و انرژی شکست G_f شبیه سازی می شود. بدینصورت که بتن قبل از تسلیم به صورت یک مصالح الاستیک خطی رفتار می کند و پس از تسلیم اولیه با یک رفتار نرم شدگی کرنش تا شکست نهایی و آغاز بازشدگی ترک پیش می رود. برای معیار شکست بتن از معیار رانکین استفاده شده است. سفره آرماتور مسلح کننده بتن به صورت یک لایه فولادی مدلسازی و المان بندی میشود و چسبندگی بین لایه بتنی و فولادی کامل فرض میشود. رابطه تنش کرنش فولاد، الاستو پلاستیک کامل و بدون ترک خوردگی فرض می شود و از اثر بوشینگر صرف نظر می شود. معیار تسلیم فولاد معیار تنش برشی فون میزز (Von Mises) انتخاب شده است.

رفتار نرم شدگی بتن (Softening Behavior)

یک نوع روش که برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط هیلبرگ (Hillerborg) ارائه شده بر این اساس است که یک رابطه تنش کرنش نرم شدگی وابسته به انرژی شکست معرفی می کند. در این روش مکانیک شکست به طور غیر مستقیم تعریف می شود و ممکن است بطور شبیه سازی شده ای یک شکست مرکب از چند مود شامل موده‌های I و II و III فعال شوند. فرض " ثابت G_f " نشان دهنده این مطلب است که قانون نرم شدگی موضعی کرنش به یک منطقه شکست با طول مشخصه l_c که به مش اجزاء محدود وابسته است بستگی دارد. یک مدل که در آن بوسیله یک روش ساده می توان ناحیه جمع شدگی (Localization Zone) کرنش را شبیه سازی کرد، مدل پلاستیسیته نرم شدگی رانکین است که دارای یک مدل نرم شدگی موضعی دو خطی است (شکل ۱). انرژی آزاد شده شکست به صورت انتگرال سطح زیر منحنی شاخه نرم



شکل ۱- مدل نرم شدگی انرژی شکست [۳]

شدگی تنش کرنش تعریف می‌شود:

$$G_f = \left[\frac{1}{2} f_t (\varepsilon_u - \varepsilon_t) \right] l_c \quad (1)$$

f_t مقاومت کششی، ε_t و ε_u کرنش شکست کششی و نهایی و l_c عرض جمع شدگی می‌باشند. تعریف مقدار l_c نتیجه بیان کردن انرژی شکست مدل ترک پیوسته بوسیله مدل ترک مجزا است. در حالت کلی l_c مربوط به یک المان است و از آنجاییکه وضعیت تنشی که باعث ایجاد ترک در مدل ترک مجزا می‌شود نسبت به محور المان اجزاء محدود مایل خواهد بود l_c برابر عرض المان نیست. با یک تقریب مناسب l_c برحسب سطح المان (A) یا حجم المان (V) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$l_c = A^{1/2} \quad \text{for 2D} \quad (2)$$

$$l_c = V^{1/3} \quad \text{for 3D} \quad (3)$$

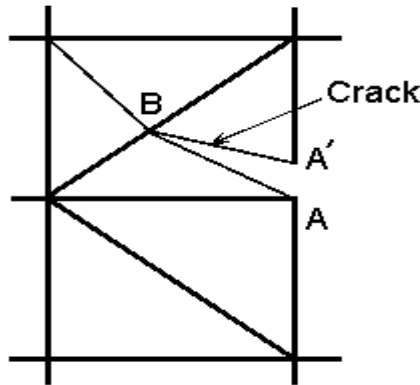
مدول نرم شدگی نیز بر اساس شیب خط نرم شدگی شکل (۱) و رابطه (۱) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_t = \frac{f_t^2 l_c}{2G_f} \quad (4)$$

محل نقطه تنش روی شاخه نرم شدگی یا مقدار شاخص شکست (Fracture Indicator) در هر نقطه، میزان متلاشی شدن مصالح در آن نقطه را نشان می‌دهد (شکل ۱). این شاخص در حالت خردشدگی کامل و آغاز بازشدگی ترک یک است.

مدلسازی المان‌های مجزا

روش المان‌های مجزا به سه گام اصلی ردیابی تماس (Contact Detection)، اندرکنش تماس (Contact Interaction) و الگوریتم شکست تقسیم‌بندی می‌شود. هدف از گام اول ارائه الگوهایی است که قادر به تشخیص خودکار المان‌هایی که با یکدیگر برخورد می‌کنند و یا در تماس هستند باشد. برای بررسی تماس‌های محتمل روش‌های مختلفی نظیر روش جستجوی عمومی، روش ذخیره‌سازی درختی دوتایی و روش تجزیه فضایی ارائه شده است. این مرحله بیشترین هزینه و زمان را در روش المان‌های مجزا دارد. هدف گام دوم اعمال نیروهای حاصل از تماس و یا برخورد بین المان‌ها به سیستم می‌باشد. در گام سوم نحوه بسط و گسترش ترک‌ها، تعیین جهت ترک خوردگی، شاخص شکست، تعریف گره‌های جدید، تقسیم المان و اعمال شرایط سازگاری در گره‌های جدید، مش‌بندی مجدد و انتقال اطلاعات به مش جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۲- مش بندی مجدد پس از شکست

در شکل (۲) الگوی مش بندی مجدد در حالت دو بعدی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده میشود وقتی تنشها در نقطه ای مثل A به حدی می رسد که ترک خوردگی میبایست رخ دهد، گره A به دو گره A و A' تبدیل شده، المان حاوی ترک به دو المان تقسیم شده و دو سطح جدید تعریف میشود. به منظور حفظ سازگاری گره جدید B روی المان تعریف شده و متناسب با آن مش بندی تغییر داده میشود.

اندرکنش تماس

پس از آنکه تماس بین دو المان مجزا بررسی و محرز گردید نوبت به آن می رسد که سختی و نیروی تماس توسط اعمال یک قید مناسب به معادلات اجزاء محدود اعمال گردد. یک قید تماسی در حقیقت یک مقدار مشخص برای یک درجه آزادی و یا تعیین ارتباط بین درجات آزادی مختلف می باشد. معادله قید را به فرم ریاضی در حالت کلی می توان به صورت رابطه (۵) بیان نمود:

$$C U = Q \quad (5)$$

که C ماتریس قید، U بردار درجات آزادی و Q بردار مقادیر ثابت می باشد. این رابطه باید به معادلات عادی سیستم افزوده گردد و به صورت همزمان با آنها حل گردد. روشهای مختلفی برای حل این مجموعه معادلات ذکر گردیده است. یک روش معمول روش مینیمم کردن انرژی پتانسیل کل برای بدست آوردن معادلات لازم می باشد. در این روش برای اعمال قید مربوط به تماس یک تابعی (Functional) π^{con} به تابعی انرژی پتانسیل کل سیستم افزوده می گردد.

$$\bar{\pi} = \pi_{(u)} + \pi^{con}(c, u, \dots) \quad (6)$$

تغییرات تابعی جدید $\bar{\pi}$ برابر مجموعه تغییرات تابعی ذکر شده می باشد:

$$\delta \bar{\pi} = \delta \pi_{(u)} + \delta \pi^{con} \quad (7)$$

حال تغییرات تابعی پتانسیل جدید $\delta \bar{\pi}$ مساوی صفر قرار داده می شود و بدینوسیله قید تماس به سیستم تحمیل می گردد. ادامه بررسی این روش نیاز به معرفی قید C و تابعی قید π^{con} دارد.

روش پنالتی

مبنای روش پنالتی بر این اصل استوار است که عبارت $C^T C$ همواره یک کمیت مثبت می باشد و هنگامی که قید ارضا می شود تغییرات آن برابر صفر است. بعبارت دیگر:

$$\delta(C^T C) = 0$$

در این روش تابعی قید را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\pi^{con} = \frac{1}{2} \alpha \int C_{(u)}^T C_{(u)} d\Omega \quad (8)$$

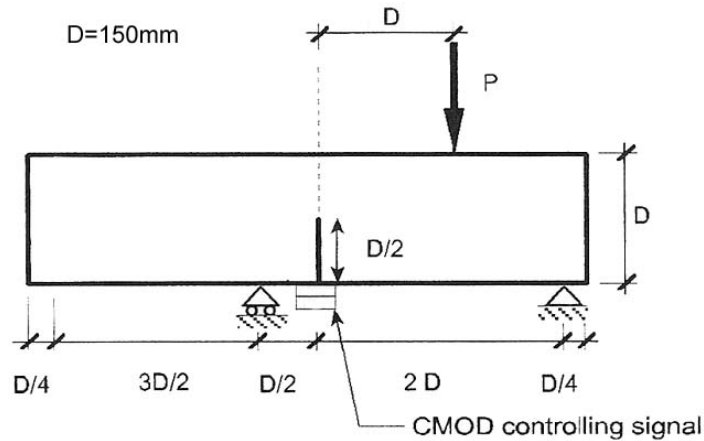
در رابطه (۸) α ضریب پنالته نامیده می‌شود. از مزیت‌های این روش آن است که اعمال قید نیاز به هیچ معادله اضافی نخواهد داشت. روش پنالته تقریبی بوده و پاسخهای بدست آمده از آن به مقدار ضریب پنالته بستگی دارد. با کاهش مقدار این ضریب خطای بوجود آمده افزایش می‌یابد و بکارگیری مقادیر بسیار بزرگ برای آن به ناپایداری عددی تحلیل می‌انجامد. یک مقدار مناسب اولیه در ابتدای تحلیل برای α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ پیشنهاد شده است [۱۲].

تحلیلهای عددی

در این مقاله ابتدا سه مدل عددی برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و کنترل صحت عملکرد الگوی پیشنهادی تحلیل می‌شود و سپس یک مسئله برخورد کاربردی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این بخش، همچنین میزان تاثیر پارامترهای مختلف حاکم در روابط مکانیک تماس بر جوابهای تحلیل مورد مطالعه قرار گرفته اند.

مدل شماره یک

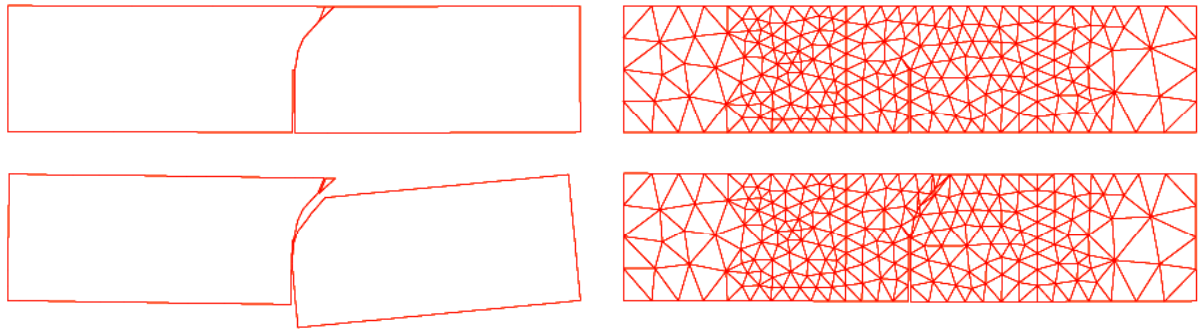
این مدل یک تیر بتنی به ابعاد نشان داده شده در شکل (۳) میباشد که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته است و شکست بتن در اثر بارگذاری مودهای مرکب را نشان می‌دهد [۷]. مشخصات مصالح در جدول (۱) آورده شده است. به منظور شبیه سازی تحلیل استاتیکی با نرم افزار مورد استفاده که بر مبنای تحلیلهای دینامیکی صریح عمل می‌کند، بار خارجی را به آرامی وارد می‌کنیم. شکل (۴) روند رشد ترک و تغییر شکلهای نمونه همراه با تغییرات مش بندی پس از ترک خوردگی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده میشود شکل ترک خوردگی بدست آمده با دقت مناسبی در محدوده نتایج بدست آمده از چندین مدل آزمایشگاهی قرار دارد [۷].



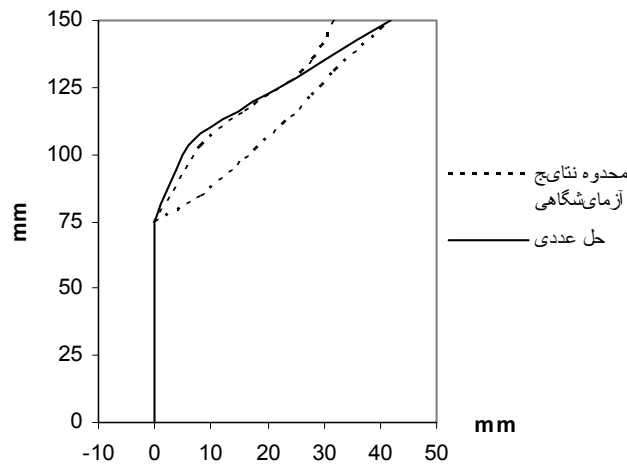
شکل ۳- ابعاد مدل شماره یک [۷]

جدول ۱- ویژگیهای مصالح مدل شماره یک

$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$	$E_c = 38 \text{ GPa}$	$\nu_c = 0.15$
$\alpha_{Contact} = 25 \text{ GPa}$	$f'_t = 3.0 \text{ MPa}$	$G_f = 100 \text{ N/m}$



شکل ۴- الگوی مش بندی سازه و گسترش ترک و مش بندی مجدد بعد از ترک خوردگی



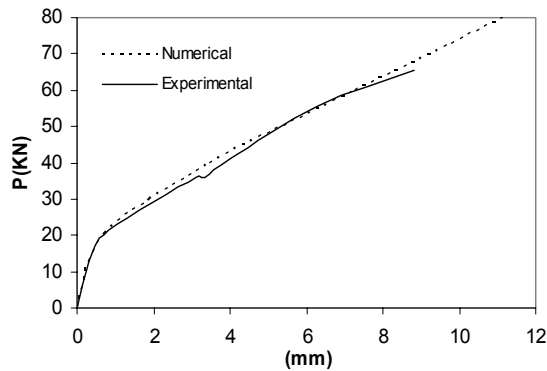
شکل ۵- مقایسه شکل ترک بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی [۷]

مدل شماره دو

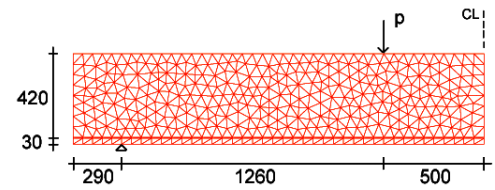
تحلیل عددی گسیختگی برشی تیرهای بتنی بدلیل در برگرفتن موده‌های مرکب دارای پیچیدگی هایی است. در این مدل یک تیر دوسر مفصل بتن مسلح با مشخصات جدول شماره ۲ که تحت بار جانبی استاتیکی است تحلیل شده است [۶]. سفره آرماتورها به صورت یک لایه فولادی گسترده به وسیله المانهای مثلثی مدلسازی شده اند. چسبندگی بین بتن و فولاد کامل فرض شده است و لغزشی بین آنها رخ نمیدهد. منحنی تغییر مکان وسط دهانه تیر بر حسب بار P و شکل ترک خوردگی تیر در شکل‌های ۷ و ۹ ترسیم شده است. تطابق خوب جوابها با نتایج آزمایشگاهی دقت روش را نشان میدهد. تحلیل تا مرحله گسیختگی کامل پیش نرفته است و لذا هیچگونه افت مقاومت مرحله گسیختگی در بخش انتهایی منحنی شکل (۷) انتظار نمی رود. در شکل (۹) همانطور که مشاهده می شود ترکهای بدست آمده ترکیبی از ترکهای خمشی و خمشی- برشی است. انحراف امتداد ترکها از محور قائم در نزدیکی تکیه گاه یعنی جایی که اثر لنگر از برش کمتر است رخ می دهد.

جدول ۲- ویژگیهای مصالح مدل شماره دو

$G_f = 100 \text{ N/m}$	$f'_t = 2.4 \text{ MPa}$	$\nu_c = 0.15$	$E_c = 28 \text{ GPa}$	$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$
$\alpha_{\text{Contact}} = 25 \text{ GPa}$	$F_y = 4400 \text{ MPa}$	$\nu_s = 0.3$	$E_s = 210 \text{ GPa}$	$\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$



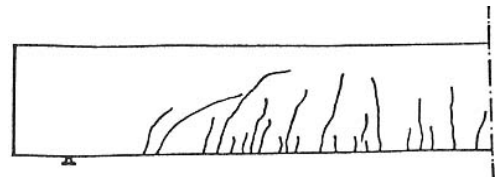
شکل ۷- منحنی تغییر مکان وسط دهانه تیر



شکل ۶- ابعاد هندسی مدل شماره دو [۶]



شکل ۹- شکل ترک خوردگی تحلیل عددی



شکل ۸- شکل ترک خوردگی آزمایشگاهی [۶]

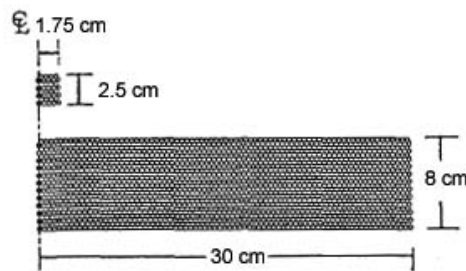
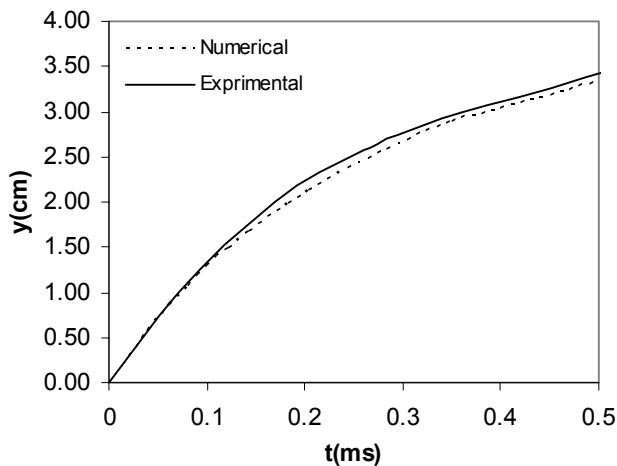
مدل شماره سه

این مدل یک دال بتنی یکطرفه با ابعاد هندسی شکل (۱۰) و مشخصات مصالح جدول (۳) میباشد که به صورت یک تیر دوبعدی مدل شده است [۵]. این دال در اثر برخورد یک پرتابه با سرعت اولیه 170 m/s ترک خورده و پرتابه به داخل آن نفوذ می کند. منحنی نفوذ پرتابه نسبت به زمان در شکل (۱۱)، نمایانگر تطابق بسیار خوب نتایج حاصل از تحلیل عددی مسئله با مشاهدات و اندازه گیریهای آزمایشگاهی است.

یکی از پارامترهای مهم در مسایل برخورد شعاع نواحی جستجوی کلی (Global Search) و جستجوی محلی (Local Search) می باشد. جستجوی کلی یکبار در ابتدای تحلیل انجام می شود و فقط در صورت وجود تغییر شکلهای بزرگ یا تغییر هندسه دوباره تکرار می شود. در نرم افزار بکار گرفته شده در این پژوهش Zone بیانگر شعاع ناحیه Global Search و Field بیانگر شعاع ناحیه Local Search می باشند. با توجه به بررسی نزدیک به ده مدل عددی حدود جواب مناسب برای Zone و Field بترتیب در حدود اندازه المان برخوردی و در حدود $0.1 - 0.2$ اندازه المان برخوردی بدست آمد. علاوه بر این انتخاب مقادیر مناسب برای سایر پارامترهای تحلیل از قبیل ضریب پنالتی (α) و G_f و همچنین مش بندی مناسب در صحت جوابها و پایداری تحلیل تأثیر گذار است. بهترین مقدار برای α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ می باشد. اما این رابطه همواره قابل کاربرد نیست. در مسایل برخورد با سرعت بالا (High Velocity Impact) برای آنکه جسم برخورد کننده در جسم هدف فرو نرود (شکل ۱۲-الف) لازم است سختی مجازی تماس (ضریب پنالتی) افزایش یابد. همانطور که در این مسأله مشاهده می شود برای رسیدن به جواب مناسب، ضریب پنالتی حدود ده برابر مدول یانگ پرتابه انتخاب گردیده است. عبارتی با انتخاب ضریب پنالتی نامناسب مکانیزمهای برخورد درست عمل نخواهند کرد. در شکلهای ۱۲-ب و ۱۲-ج ناپایداری ناشی از انتخاب مقدار زیاد برای ضریب پنالتی و Field نشان داده شده است. در شکل (۱۳) الگوی گسترش ترک و خردشدگی بتن همراه با نفوذ پرتابه در گامهای زمانی مختلف که بر اساس تحلیلهای پایدار و صحیح بدست آمده اند، نشان داده شده است.

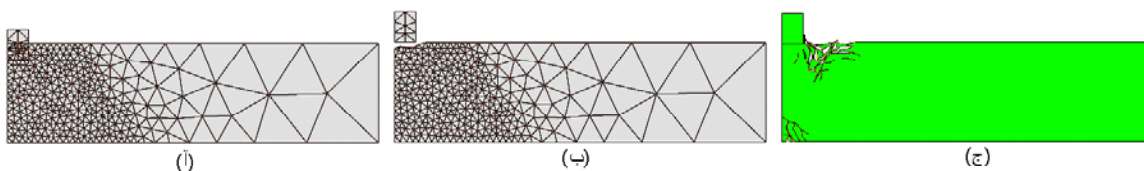
جدول ۳- ویژگیهای مصالح مدل شماره سه

$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$	$E_c = 24 \text{ GPa}$	$\nu_c = 0.17$	$E_t = 210 \text{ GPa}$
$\alpha_{n(contact)} = 2100 \text{ GPa}$	$f'_t = 2.6 \text{ MPa}$	$G_f = 110 \text{ N/m}$	$\rho_t = 17850 \text{ kg/m}^3$

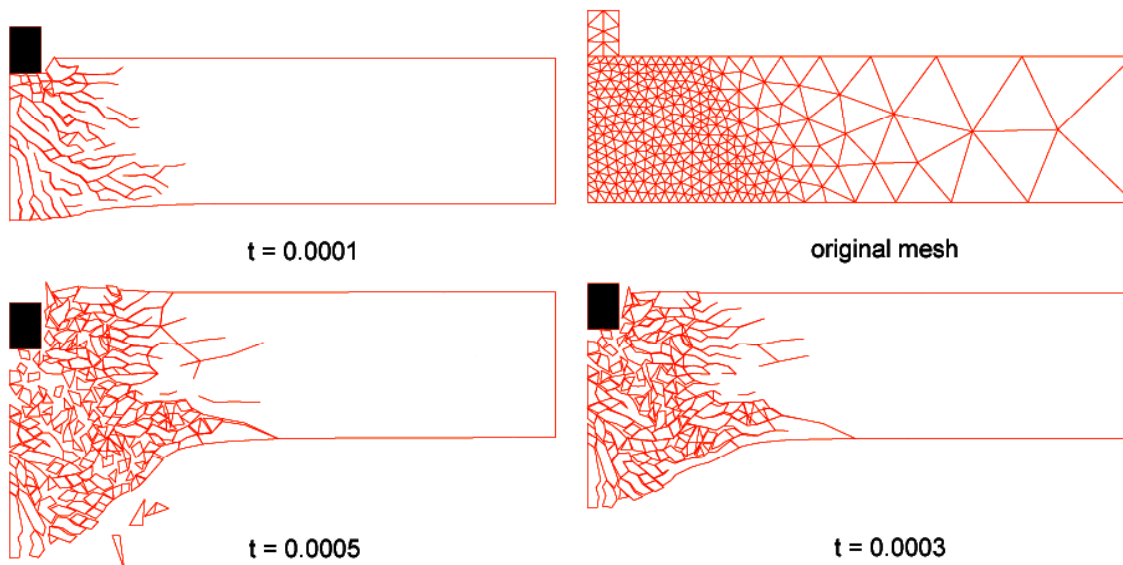


شکل ۱۱- منحنی نفوذ پرتابه بر حسب زمان

شکل ۱۰- ابعاد مدل شماره سه [۵]



شکل ۱۲- نا پایداری ناشی از انتخاب مقادیر نامناسب برای پارامترهای مکانیک تماس



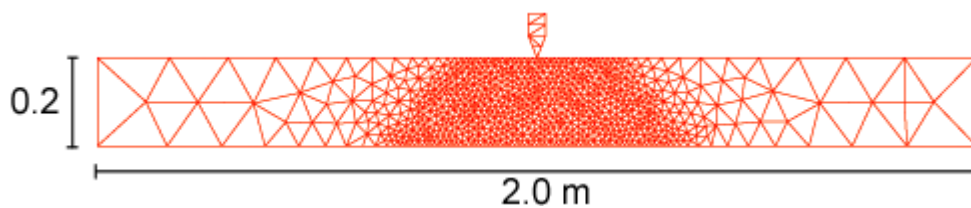
شکل ۱۳- الگوی گسترش ترک پس از برخورد پرتابه

مدل شماره چهار

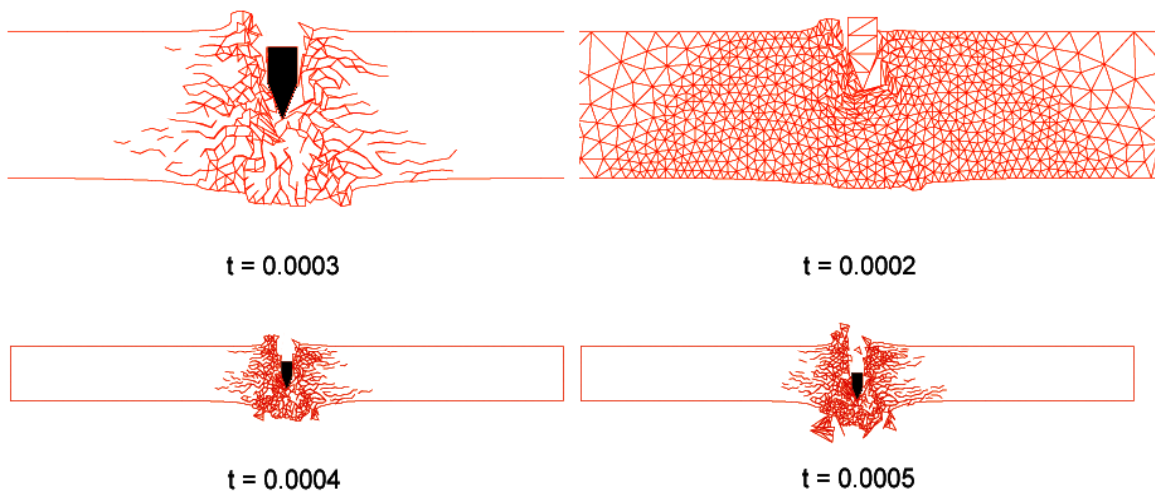
در این مدل یک تیر بتنی که تحت اثر برخورد یک پرتابه با سرعت $400m/s$ قرار گرفته تحلیل شده است (شکل ۱۴). الگوی گسترش ترک و میزان نفوذ پرتابه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نکته قابل توجه شکل گسیختگی نهایی این مدل می باشد. از آنجاییکه برخورد پرتابه با سازه، ایجاد انرژی بسیار زیاد در زمانی کوتاه می کند؛ این اثر باعث می شود که عضو مورد نظر در محدوده برخورد پرتابه با سازه به مقاومت بپردازد و تغییر شکل کلی سازه را نداشته باشیم. در حقیقت اثر جدول ۴- ویژگیهای مصالح مدل شماره چهار

$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$	$E_c = 23 \text{ GPa}$	$\nu_c = 0.15$	$G_f = 110 \text{ N/m}$
$\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$	$E_s = 210 \text{ GPa}$	$\nu_s = 0.30$	$f'_t = 2.0 \text{ MPa}$
$\alpha_{contact(n)} = 28000 \text{ GPa}$	$\alpha_{contact(t)} = 28 \text{ GPa}$	$\alpha_{c(n)} = 28000 \text{ GPa}$	$V=400 \text{ m/s}$

برخورد پرتابه با سازه یک اثر نقطه ای و محلی است تا عمومی. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات عینی شکل گسیختگی مخروطی منطقی بنظر می رسد [۱۳]. بدیهی است که در سرعتهای پایین مخروط گسیختگی بازتر خواهد شد. بدلیل انتخاب مش ساختار نیافته (unstructured) و نامتقارن بودن آن و همچنین امکان ایجاد و رشد ترکها در مرزهای المان مش اولیه، اندکی عدم تقارن در نتایج شکل (۱۵) مشاهده می شود. لازم به ذکر است در این مساله بعلت سرعت زیاد برخورد، ضریب پنالتی اولیه سطوح برخورد نزدیک به ۱۳۰ برابر مدول یانگ پرتابه انتخاب شد لیکن پس از ۲۰۰۰۰ گام زمانی و پس از کاهش سرعت، ضریب پنالتی به ۴۵ برابر مدول یانگ پرتابه کاهش داده شد.



شکل ۱۴- الگوی مش بندی و ابعاد هندسی مدل شماره چهار



شکل ۱۵- الگوی گسترش ترک پس از برخورد پرتابه

نتیجه گیری :

در این مقاله بر اساس روش المانهای مجزا (DEM) و پلاستیسیته و با استفاده از تئوریهای مکانیک تماس و مکانیک شکست روش عددی مناسبی برای مدلسازی ترک خوردگی گسترده سازه های بتنی و بتن مسلح ارائه شد. از خصوصیات این روش تحلیل پلاستیک با در نظر گرفتن تغییرشکلهای بزرگ و نرم شدگی کرنش بتن پس از ترک خوردگی می باشد. نتایج تحلیلهای انجام شده بوسیله معیار تسلیم رانکین تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده است. جهت دستیابی به جوابهای صحیح انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای مکانیک تماس و مکانیک شکست و همچنین مش بندی مناسب سازه بسیار حائز اهمیت است. در تحقیقهای آینده امکان توسعه این روش به شرح زیر وجود دارد:

- اضافه کردن معیارهای ترک خوردگی چند پارامتری و لحاظ نمودن اثرات ترکیبی برش و تنش قائم در ترک خوردگی بتن به برنامه موجود و مقایسه بین نتایج تحلیل با معیارهای مختلف .

- افزودن امکانات مش بندی کلی مجدد سازه جهت کاهش هر چه بیشتر خطاهای عددی ناشی از اعوجاج بیش از حد المانهای اولیه (تحلیل اجزا محدود وقتی).
- توسعه و بررسی رفتار پیوستگی و چسبندگی بین بتن و فولاد و اینکه جدایی بین بتن و فولاد چه موقع رخ می دهد.

مراجع:

1. Chen W.F., Han D.J., "Plasticity for Structural Engineers", 1988.
2. Owen D.R.J., Hinton E., "Finite Elements in Plasticity", 1986.
3. Mohammadi S., "Discontinuum Mechanics by Finite and Discrete Elements", WIT press, 2003.
4. Rashid Y., "Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels", Nuclear Engineering and Design, 1968, Balkema Ed., pp. 265-286.
5. Morikawa H., Sawamoto Y., "Local Fracture Analysis of a Reinforced Concrete Slab by the Discrete Element Method", proceeding of the second international conference on Discrete Element Modelling (DEM), 1993.
6. Grzegorz Gajer, "Simplified Nonorthogonal Crack Model For Concrete" J. of Structural Engineering(ASCE), 1991, Vol. 117, No. 1.
7. Cendon D.A., Galvez J. C., Planas J., "Modeling the Fracture of Concrete Under Mixed Mode Loading", ECCOMAS 2000.
8. Hillerborg A., Modeer M., Petersson P., "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", Cement and Concrete Research, 1976, Vol. 6, p. 773-782.
9. Cervenka J., "Discrete crack modelling in concrete structures", 1994, PhD Thesis, University of Colorado.
10. Saleh A., Aliabadi M., "Crack growth analysis in concrete using boundary element method", Engineering Fracture Mechanics, 1995, Vol. 51, pp. 533-545.
11. Belytschko T. and Lin J. I., "A Three- Dimensional Impact-Penetration Algorithm With Erosion", Int. J. Impact Eng., 1987, Vol. 5, p.p. 111-127.
12. Peric D. and Owen D.R.J., Computational Model for 3-D Contact Problem with Friction Based on the Penalty Method", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, 1992, Vol. 35, p.p. 1289-1309.
13. Polak M., "Modeling Punching Shear of Reinforced Concret Slabs Using Layered Finite Elements", ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 1, pp. 71-80.

Key Words : reinforced concrete structure, discrete element method(DEM), contact mechanics, crack, impact, penetration, penalty method, strain softening, Rankine failure criterion.

Abstract:

In this paper, a numerical model of reinforced concrete structure based on a *combined finite discrete element method* has been proposed. Using this approach, it is possible to model various phenomena such as projectile impact and penetration, progressive cracking, strain softening of concrete and contact features of postcracking. Rankine failure criterion has been used for concrete.

The behavior of cracked parts is governed by principles of the discrete element method and contact mechanics. The discrete element method idealizes the whole medium into an assemblage of individual bodies, which in addition to their own deformable response, interact with each other (through a contact type interaction) to perform the same response as the medium.

Finally, several concrete and reinforced concrete structures have been simulated and compared with experimental results.