تحليل ترک خوردگي پيشرونده درسازه هاي بتن مسلح به روش المانهاي مجزا

محمد رضا آرم، دانشجوي دكتري سازه، دانشكده فني دانشگاه تهران
سهيل محمدي، استاديار دانشكده فني دانشگاه تهران
تلفن: ۶۱۱۲۲۷۳ – ۰۲۱ ، نمابر: ۰۲۱-۶۴۰۳۸۰۸ ، پست الكترونيكی : maram@ut.ac.ir

چكيده:

*در اين مقاله براساس روش تركيبي المانهاي محدود و مجزا يك مدل تحليلي از سازه بتن مسلح ارائه مي گردد كه امكان مدلسازي عددي برخورد و نفوذ پرتابه ها، ايجاد و رشد تركهاي پيشرونده و كليه رفتارهاي تماسي پس از ترك خوردگي را با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگي بتن فراهم مي سازد. براي مدلسازي بتن از معيار ترک خوردگي رانكين **(Rankine)** استفاده شده است. در محيط ترک خورده روابط روش المانهاي مجزا **(Discrete Element Method)** و مكانيک تماس **(Contact Mechanics)** حاكم مي باشدكه در آن المان های اجزاء محدود علاوه بر عملكرد شكل پذير **(Deformable)** خود بوسيله يك نوع اندركنش تماسي با ساير المانها (كه در مكانيك تماس تعريف مي شود) رفتار محيط اصلي را شبيه سازي مي كنند. نتايج بدست آمده از تحليلهاي عددي بوسيله اين روش با نتايج آزمايشگاهي مقايسه شده است.*

كليد واژه ها: *سازه بتن مسلح، المانهای مجزا، مكانيک تماس، ترک ، برخورد، نفوذ، روش پنالتی، نرم شدگی كرنش، رانكين*

۱. مقدمه

محاسبه ترك خوردگي پيشرونده در سازه هاي بتني و بتن مسلح نظير سدها، پلها، پناهگاهها، سازه هاي مدفون ، راكتورهاي هسته اي و .... در اثر بارگذارهاي خارجي اعم از استاتيكي و ديناميكي از اهميت به سزايي برخوردار است. به علت وجود مكانيسمها و عوامل متعددي كه در رفتار اين سازه ها مؤثر مي باشند، برآورد دقيق چنين رفتاري به سادگي امكان پذير نمي باشد. لذا ارائه روشي با استفاده از جديدترين مدلهاي رفتاري تماسي كه امكان محاسبه اندركنش تماسي ، ترک خوردگي موضعي سازه و اثرات كلي برخورد را ميسر نمايد و نيروهاي لازم جهت كنترل ظرفيت باربری سازه را در اختيار قرار دهد بيش از پيش ضروري ميباشد.

مدلسازي عددي رفتار بتن براساس روش *ترك پيوسته* (Smeared Crack) با در نظر گرفتن رفتار نرم شدگي بتن (Strain Softening) اولين بار توسط Rashid انجام شد(۱۹۶۸)[۴]. بر اساس روش *ترك مجزا* (Discrete Crack) مدل ترك چسبنده بوسيله Hillerborg ارائه شد كه مود I شكست بتن را در نظر مي گيرد[۸]. اين روش در سال ۱۹۹٤ توسط Cervenka براي شكست براساس مودهاي مركب I و II تكميل گرديد[۹]. در سال ۱۹۹۵ روش Cervenka توسط Saleh و Aliabadi در المانهاي مرزي استفاده شد[۱۰]. در اين روش خصوصيات كاملي از مصالح نظير انرژي شكست و تابع نرم شدگي در مد II مورد نياز است. در سال ۱۹۸۷ Lin و Belytschko با ارائه المانهاي فرسايشي (Eroding Element) و الگوريتم

جديد براي برخورد دو جسم با يكديگر توانستند برخورد پرتابه به دال بتني را به صورت سه بعدي مدلسازي كنند[۱۱]. Morikawa در سال ۱۹۹۳ با استفاده از روش المانهاي مجزا (DEM) ترک خوردگي و پارگي ناشي از برخورد پرتابه به دالهاي بتني مسلح را تحليل كرد[۵]. او از ايده particle و فنرهاي تماسي استفاده كرده است. توسط مدل محاسباتي ارائه شده در اين تحقيق روشي مورد استفاده قرار مي گيرد كه ضمن در برداشتن رفتار پلاستيک مصالح و عملكردهاي تماسي پس از ترک خوردگي نسبت به روشهاي فوق كاملتر بوده و قابليت تحليل ترک خوردگي هاي گسترده را نيز دارد. در اين روش محيط ترک خورده به المانهاي جدا از هم تقسيم ميشود كه هر يک از اين المانها ضمن رفتار شكل پذير به وسيله بكارگيري الگوريتمهاي تماسي با ساير المانهاي هم مرز خود اندركنش تماسي دارد.

۲. مدل رفتاري بتن مسلح

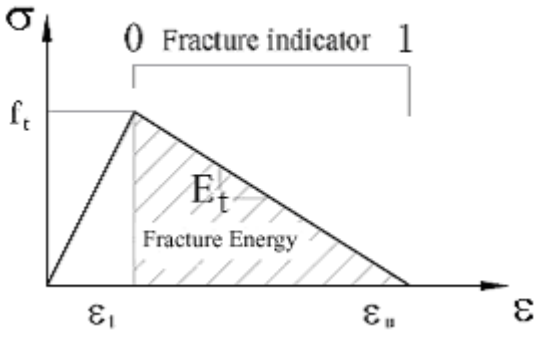
مدل رفتاري بتن شامل تعريف رابطه تنش كرنش ، معيار شكست و رفتار پس از ترک خوردگي ميباشد. در اين تحقيق مدل رفتاري بتن با مشخص بودن مقاومت كششي تک محوري بتن f_t' و انرژي شكست G_f شبيه سازي مي شود. بدينصورت كه بتن قبل از تسليم به صورت يک مصالح الاستيک خطي رفتار مي كند و پس از تسليم اوليه با يک رفتار نرم شدگي كرنش تا شكست نهايي و آغاز بازشدگي ترک پيش مي رود. برای معيار شكست بتن از معيار رانكين استفاده شده است.

سفره آرماتور مسلح كننده بتن به صورت يک لايه فولادي مدلسازي و المانبندي ميشود و چسبندگي بين لايه بتني و فولادي كامل فرض ميشود. رابطه تنش كرنش فولاد، الاستو پلاستيک كامل و بدون ترک خوردگي فرض مي شود و از اثر بوشينگر صرف نظر مي شود. معيار تسليم فولاد معيار تنش برشي فون ميزز (Von Mises) انتخاب شده است.

۲-۱. رفتار نرم‌شدگي بتن (Softening Behavior)

يك نوع روش كه براي اولين بار در سال ۱۹۷۶ توسط هيلربرگ (Hillerborg) ارائه شده بر اين اساس است كه يك رابطه تنش كرنش نرم شدگي وابسته به انرژي شكست معرفي مي كند. در اين روش مكانيک شكست به طور غير مستقيم تعريف مي‌شود و ممكن است بطور شبيه‌سازي شده‌اي يك شكست مركب از چند مود شامل مودهاي I و II و III فعال شوند. فرض " ثابت= G_f" نشان دهنده اين مطلب است كه قانون نرم‌شدگي موضعي كرنش به يك منطقه شكست با طول مشخصه l_c كه به مش اجزاء محدود وابسته است بستگي دارد. يك مدل كه در آن بوسيله يك روش ساده مي‌توان ناحيه جمع شدگي(Localization Zone) كرنش را شبيه سازي كرد، مدل پلاستيسيته نرم شدگي رانكين(Rankine Softening Plasticity) است كه داراي يك مدل نرم شدگي موضعي دو خطي است(شكل ۱) . انرژي آزاد شده شكست به صورت انتگرال سطح زير منحني شاخه نرم شدگي تنش كرنش تعريف مي‌شود:

$$G_f = \left[\frac{1}{2} f_t(\varepsilon_u - \varepsilon_t)\right] l_c \qquad (۱)$$



شكل (۱) *مدل نرم شدگي انرژي شكست* [۳]

f_t مقاومت كششي ، ε_t و ε_u كرنش شكست كششي و نهايي و l_c عرض جمع شدگي مي‌باشند. تعريف مقدار l_c نتيجه بيان كردن انرژي شكست مدل ترک پيوسته بوسيله مدل ترک مجزااست. درحالت كلي l_c مربوط به يك المان است و از آنجاييكه وضعيت تنشي كه باعث ايجاد ترك در مدل ترك مجزا مي‌شود نسبت به محور المان اجزاء محدود مايل خواهد بود l_c برابر عرض المان نيست. با يك تقريب مناسب l_c برحسب سطح المان *(A)* يا حجم المان *(V)* به صورت زير تعريف مي‌شود :

$l_c = A^{1/2}$ for 2D (۲)

$l_c = V^{1/3}$ for 3D (۳)

مدول نرم شدگي نيز بر اساس شيب خط نرم شدگی شكل(۱) و رابطه(۱) به صورت زير بدست می آيد :

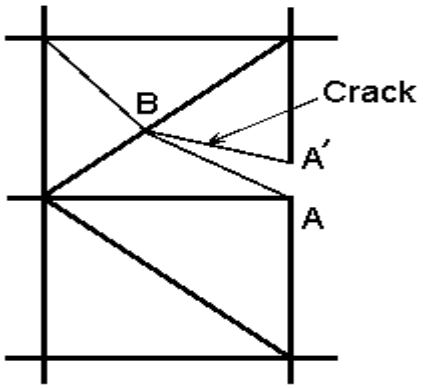
$$E_t = \frac{f_t^2 l_c}{2G_f} \quad (۴)$$

محل نقطه تنش روي شاخه نرم شدگي يا مقدار شاخص شكست (Fracture Indicator) در هر نقطه ، ميزان متلاشي شدن مصالح در آن نقطه را نشان مي‌دهد (شكل۱). اين شاخص در حالت خردشدگي كامل و آغاز بازشدگي ترک يک است.

۴. مدلسازي المان‌هاي مجزا

روش المان‌هاي مجزا به سه گام اصلي رديابي تماس(Contact Detection) ، اندركنش تماس (Contact Interaction) و الگوريتم شكست تقسيم‌بندي مي‌شود. هدف از گام اول ارائه الگوهايي است كه قادر به تشخيص خودكار المان‌هايي كه با يكديگر برخورد مي‌كنند و يا در تماس هستند باشد. براي بررسي تماس‌هاي محتمل روش‌هاي مختلفي نظير روش جستجوي عمومي، روش ذخيره‌سازي درختي دوتايي و روش تجزيه فضايي ارائه شده است. اين مرحله بيشترين هزينه و زمان را در روش المانهاي مجزا دارد. هدف گام دوم اعمال نيروهاي حاصل از تماس و يا برخورد بين المان‌ها به سيستم مي‌باشد. در گام سوم نحوه بسط و گسترش ترك ها، تعيين جهت ترك خوردگي، شاخص شكست ، تعريف گره‌هاي جديد ، تقسيم المان و اعمال شرايط سازگاري در گره‌هاي جديد ، مش‌بندي مجدد و انتقال اطلاعات به مش جديد مورد بررسي قرار مي‌گيرد.

در شكل (۲) الگوي مش بندي مجدد در حالت دو بعدي نمايش داده شده است. همانطور كه در شكل ديده



شكل (٢) *مش بندي مجدد پس از شكست*

ميشود وقتي تنشها در نقطه اي مثل A به حدي مي رسد كه ترک خوردگي ميبايست رخ دهد ، گره A به دو گره A و 'A تبديل شده ، المان حاوي ترک به دو المان تقسيم شده و دو سطح جديد تعريف ميشود. به منظور حفظ سازگاري گره جديد B روي المان تعريف شده و متناسب با آن مش بندي تغيير داده ميشود.

۴-۱. اندركنش تماس

پس از آنكه تماس بين دو المان مجزا بررسي و محرز گرديد نوبت به آن مي‌رسد كه سختي و نيروي تماس توسط اعمال يك قيد مناسب به معادلات اجزاء محدود اعمال گردد. يك قيد تماسي در حقيقت يك مقدار مشخص براي يك درجه آزادي و يا تعيين ارتباط بين درجات آزادي مختلف مي‌باشد. معادله قيد را به فرم رياضي در حالت كلي مي‌توان به صورت رابطه (۵) بيان نمود :

$$\mathbf{C\,U = Q} \qquad (۵)$$

كه **C** ماتريس قيد ، **U** بردار درجات آزادي و **Q** بردار مقادير ثابت مي‌باشد. اين رابطه بايد به معادلات عادي سيستم افزوده گردد و به صورت همزمان با آنها حل گردد. روش‌هاي مختلفي براي حل اين مجموعه معادلات ذكر گرديده است. يك روش معمول روش مينيمم كردن انرژي پتانسيل كل براي بدست آوردن معادلات لازم مي‌باشد. در اين روش براي اعمال قيد مربوط به تماس يك تابعي (Functional) π^{con} به تابعي انرژي پتانسيل كل سيستم افزوده مي‌گردد.

$$\bar{\pi} = \pi_{(u)} + \pi^{con}(\mathbf{c},\mathbf{u},....) \qquad (۶)$$

تغييرات تابعي جديد $\bar{\pi}$ برابر مجموعه تغييرات تابعي ذكر شده مي‌باشد :

$$\delta\bar{\pi} = \delta\pi_{(u)} + \delta\pi^{con} \qquad (۷)$$

حال تغييرات تابعي پتانسيل جديد $\delta\bar{\pi}$ مساوي صفر قرار داده مي‌شود و بدينوسيله قيد تماس به سيستم تحميل مي‌گردد. ادامه بررسي اين روش نياز به معرفي قيد **C** و تابعي قيد π^{con} دارد.

روش پنالتي

مبناي روش پنالتي بر اين اصل استوار است كه عبارت $\mathbf{C^TC}$ همواره يك كميت مثبت مي‌باشد و هنگامي كه قيد ارضا مي‌شود تغييرات آن برابر صفر است. بعبارت ديگر : $\delta(\mathbf{C}^T\mathbf{C}) = 0$

در اين روش تابعي قيد را مي‌توان به صورت زير نوشت :

$$\pi^{con} = \frac{1}{2}\alpha \int \mathbf{C}_{(u)}^{T}\mathbf{C}_{(u)} d\Omega \qquad (۸)$$

در رابطه (۸) α ضريب پنالتي ناميده مي‌شود. از مزيت‌هاي اين روش آن است كه اعمال قيد نياز به هيچ معادله اضافي نخواهد داشت. روش پنالتي تقريبي بوده و پاسخهاي بدست آمده از آن به مقدار ضريب پنالتي بستگي دارد. با كاهش مقدار اين ضريب خطاي بوجود آمده افزايش مي يابد و بكارگيري مقادير بسيار بزرگ براي آن به ناپايداري عددی تحليل مي انجامد. يک مقدار مناسب اوليه در ابتداي تحليل براي α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ پيشنهاد شده است [۱۲].

۵. تحليلهاي عددي

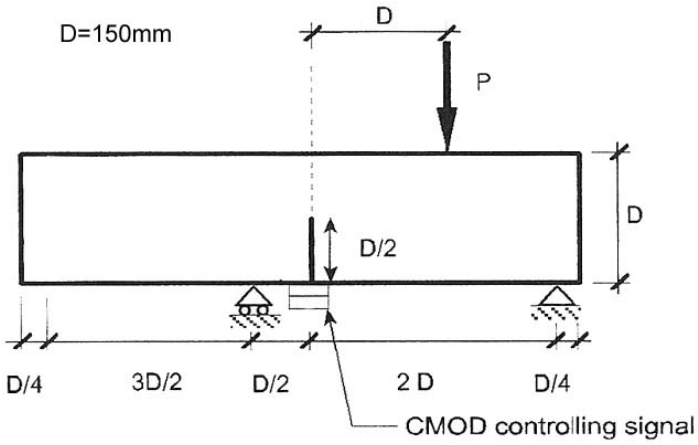
در اين مقاله ابتدا سه مدل عددي براي مقايسه با نتايج آزمايشگاهي و كنترل صحت عملكرد الگوي پيشنهادي تحليل مي‌شود و سپس يک مسئله برخورد كاربردي مورد تحليل قرار مي‌گيرد. در اين بخش، همچنين ميزان تاثير پارامترهاي مختلف حاكم در روابط مكانيک تماس بر جوابهاي تحليل مورد مطالعه قرار گرفته اند.

۵-۱. مدل شماره يک

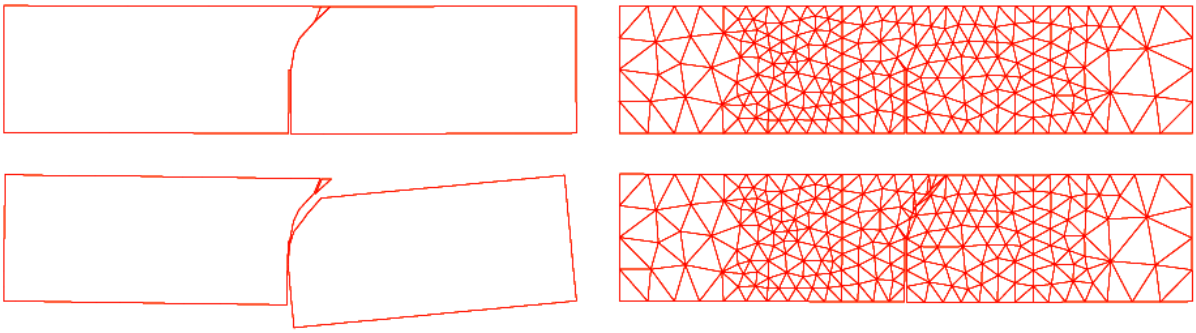
اين مدل يك تير بتني به ابعاد نشان داده شده در شكل(۳) ميباشد كه تحت بارگذاري استاتيكي قرار گرفته است و شكست بتن در اثر بارگذاری مودهای مركب را نشان می دهد[۷] . مشخصات مصالح در جدول (۱) آورده شده است. به منظور شبيه سازي تحليل استاتيكي با نرم افزار مورد استفاده كه بر مبناي تحليلهاي ديناميكي صريح عمل مي كند، بار خارجي را به آرامي وارد مي كنيم. شكل (۴) روند رشد ترک و تغيير شكلهاي نمونه همراه با تغييرات مش بندي پس از ترک خوردگي را نشان مي دهد. همانطور كه در شكل (۵) مشاهده ميشود شكل ترك خوردگي بدست آمده با دقت مناسبي در محدوده نتايج بدست آمده از چندين مدل آزمايشگاهي قرار دارد[۷].

جدول(۱) *ويژگيهاي مصالح مدل شماره يک*

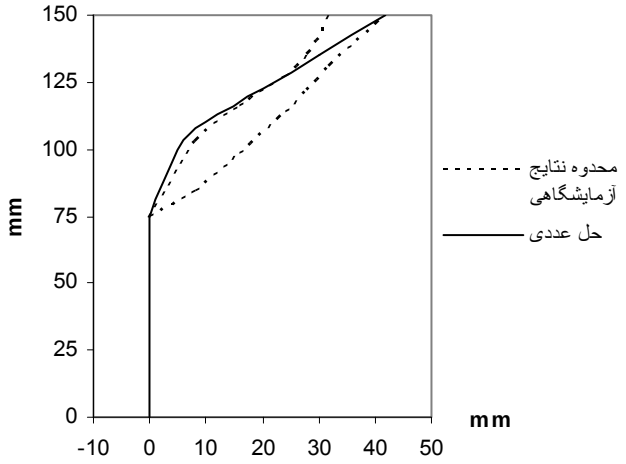
$\rho_c = 2400\,kg/m^3$	$E_c = 38\,GPa$	$\nu_c = 0.15$
$\alpha_{Contact} = 25\,GPa$	$f_t' = 3.0\,MPa$	$G_f = 100\,N/m$



شكل (۳) *ابعاد مدل شماره يک* [۷]



شکل (۴) *الگوي مش بندي سازه و گسترش ترک و مش بندي مجدد بعد از ترک خوردگي*



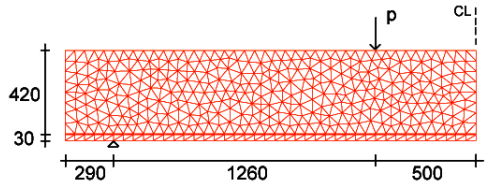
شکل(۵) *مقایسه شکل ترک بدست آمده با نتایج آزمایشگاهي*[۷]

۵-۲. مدل شماره دو

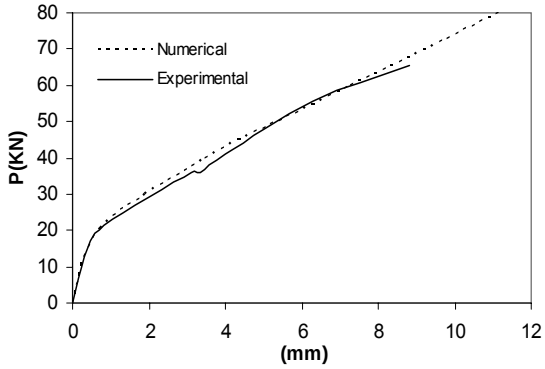
تحلیل عددی گسیختگی برشی تیرهای بتنی بدلیل در برگرفتن مودهای مرکب دارای پیچیدگی هایی است. در این مدل يك تير دوسر مفصل بتن مسلح با مشخصات جدول شماره ۲ که تحت بار جانبی استاتيكي است تحلیل شده است [۶] . سفره آرماتورها به صورت يک لايه فولادي گسترده به وسيله المانهاي مثلثي مدلسازي شده اند. چسبندگي بين بتن و فولاد كامل فرض شده است و لغزشي بين آنها رخ نميدهد. منحني تغيير مكان وسط دهانه تير بر حسب بار P و شكل ترك خوردگي تير در شكلهاي ۷ و ۹ ترسيم شده است. تطابق خوب جوابها با نتايج آزمايشگاهي دقت روش را نشان ميدهد. 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) *ويژگيهاي مصالح مدل شماره دو*

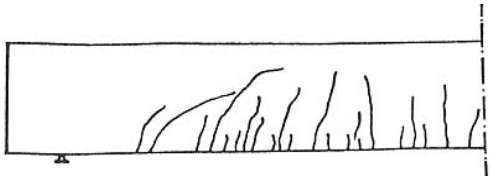
$\rho_c = 2400\,kg/m^3$	$E_c = 28\,GPa$	$\nu_c = 0.15$	$f_t' = 2.4\,MPa$	$G_f = 100\,N/m$
$\rho_s = 7850\,kg/m^3$	$E_s = 210\,GPa$	$\nu_s = 0.3$	$F_y = 4400\,MPa$	$\alpha_{Contact} = 25\,GPa$



شكل(۶) *ابعاد هندسي مدل شماره دو* [۶]



شكل (۷) *منحني تغيير مكان وسط دهانه تير*



شكل(۸) *شكل ترک خوردگي آزمايشگاهي* [۶]

شكل (۹) *شكل ترک خوردگي تحليل عددي*

۳-۵. مدل شماره سه

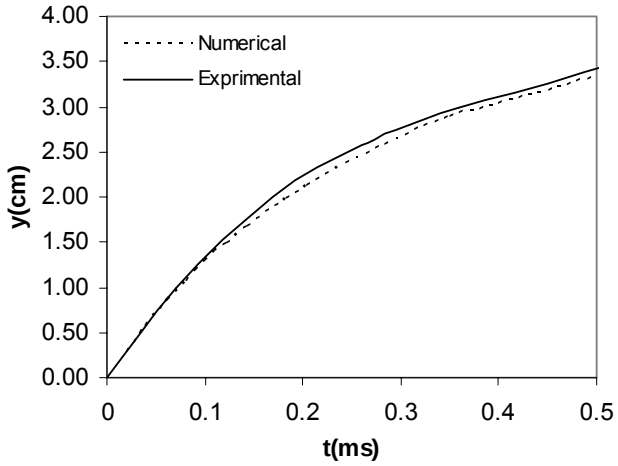
اين مدل يك دال بتني يكطرفه با ابعاد هندسي شكل(۱۰) و مشخصات مصالح جدول(۳) ميباشد كه به صورت يک تير دوبعدي مدل شده است [۵] . اين دال در اثر برخورد يك پرتابه با سرعت اوليه ۱۷۰ $^{m/s}$ ترك خورده و پرتابه به داخل آن نفوذ مي كند. منحني نفوذ پرتابه نسبت به زمان در شكل(۱۱) ، نمايانگر تطابق بسيار خوب نتايج حاصل از تحليل عددي مسئله با مشاهدات و اندازه گيريهاي آزمايشگاهي است.

يكي از پارامترهاي مهم در مسايل برخورد شعاع نواحي جستجوي كلي (Global Search) و جستجوي محلي (Local Search) مي باشد. جستجوي كلي يكبار در ابتداي تحليل انجام مي شود و فقط در صورت وجود تغيير شكلهاي بزرگ يا تغيير هندسه دوباره تكرار مي شود. در نرم افزار بكار گرفته شده در اين پژوهش Zone بيانگر شعاع ناحيه Global Search و Field بيانگر شعاع ناحيه Local Search مي باشند. با توجه به بررسي نزديک به ده مدل عددي حدود جواب مناسب براي Zone و Field بترتيب در حدود اندازه المان برخوردي و در حدود ۰/۲ - ۰/۱ اندازه المان برخوردي بدست آمد. علاوه بر اين انتخاب مقادير مناسب براي ساير پارامترهاي تحليل از قبيل ضريب پنالتي (α) و G_f و همچنين مش بندي مناسب در صحت جوابها و پايداري تحليل تأثير گذار است. بهترين مقدار براي α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ مي باشد. اما اين رابطه همواره قابل كاربرد نيست. در مسايل برخورد با سرعت بالا(High Velocity Impact) براي آنكه جسم برخورد كننده در جسم هدف فرو نرود (شكل ۱۲-الف) لازم است سختي مجازي تماس (ضريب پنالتي) افزايش يابد. همانطور كه در اين مسأله مشاهده مي شود براي رسيدن به جواب مناسب، ضريب پنالتي حدود ده برابر مدول يانگ پرتابه انتخاب گرديده است. بعبارتي با انتخاب ضريب پنالتی نامناسب مكانيزمهای برخورد درست عمل نخواهند كرد. در شكلهاي ۱۲-ب و ۱۲-ج ناپايداري ناشي از انتخاب مقدار زياد براي ضريب

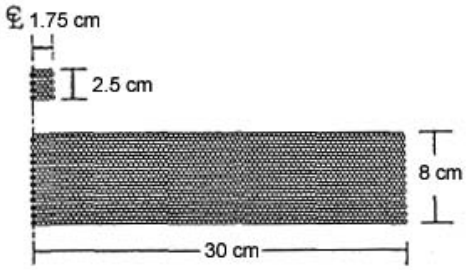
پنالتي و Field نشان داده شده است. در شکل (۱۳) الگوی گسترش ترک و خردشدگی بتن همراه با نفوذ پرتابه در گامهای زمانی مختلف که بر اساس تحلیلهای پایدار و صحیح بدست آمده اند، نشان داده شده است.

جدول(۳) *ویژگیهاي مصالح مدل شماره سه*

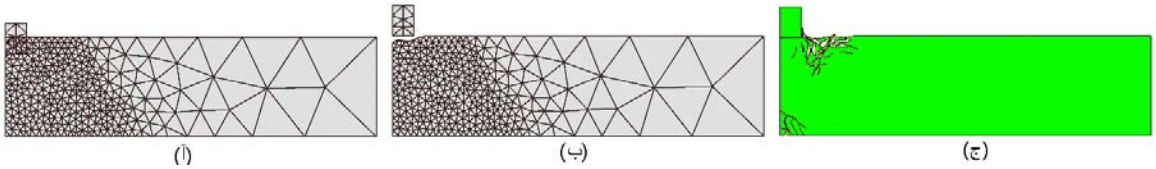
$\rho_c = 2400\,kg/m^3$	$E_c = 24\,GPa$	$\nu_c = 0.17$	$E_t = 210\,GPa$
$\alpha_{n(contact)} = 2100\,GPa$	$f_t' = 2.6\,MPa$	$G_f = 110\,N/m$	$\rho_t = 17850\,kg/m^3$



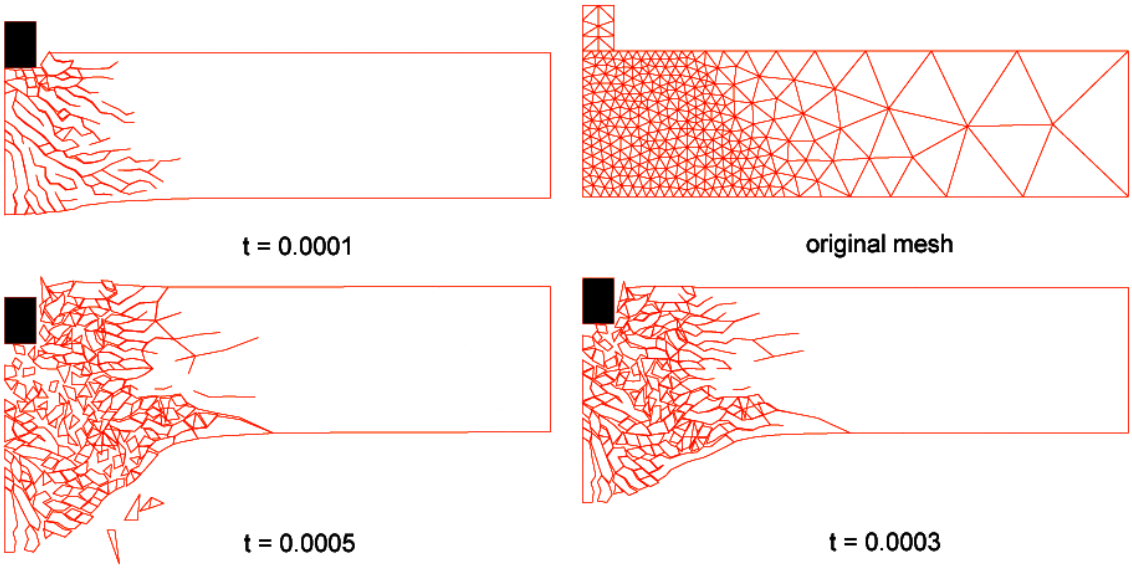
شکل(۱۱) *منحني نفوذ پرتابه بر حسب زمان*



شکل(۱۰) *ابعاد مدل شماره سه* [۵]



شکل(۱۲) *ناپایداري ناشي از انتخاب مقادیر نامناسب براي پارامترهاي مکانیک تماس*



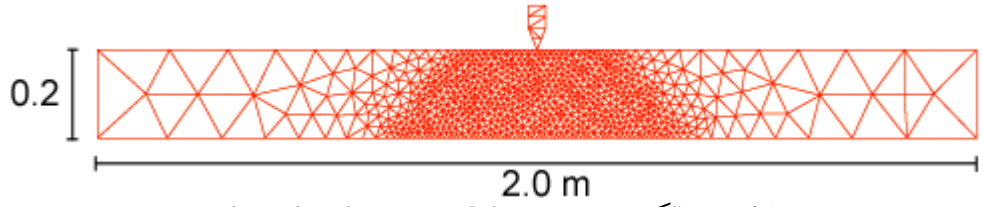
شکل(۱۳) *الگوي گسترش ترک پس از برخورد پرتابه*

۴-۵. مدل شماره چهار

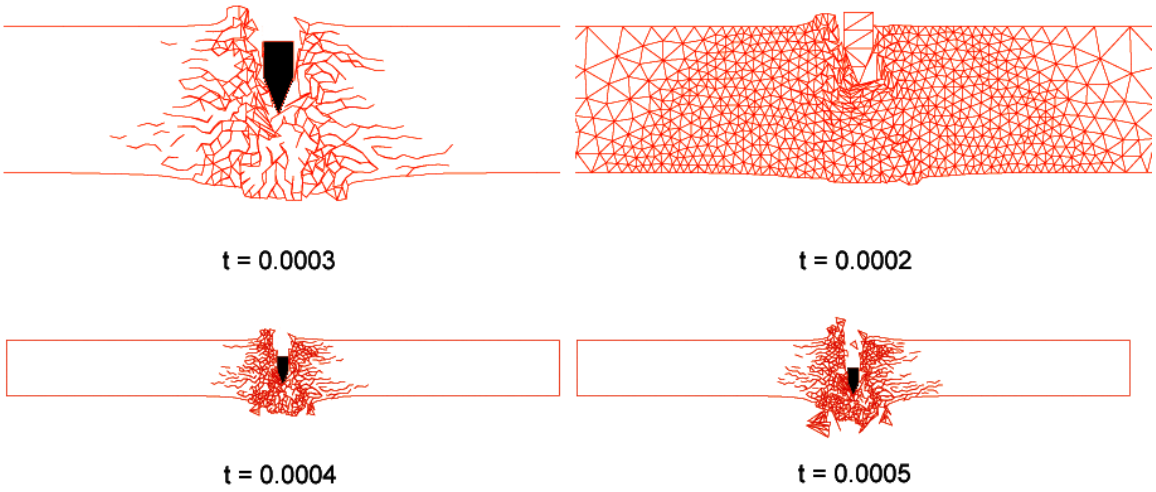
در اين مدل يک تير بتني که تحت اثر برخورد يك پرتابه با سرعت $400m/s$ قرار گرفته تحليل شده است(شکل۱۴). الگوي گسترش ترك و ميزان نفوذ پرتابه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نکته قابل توجه شکل گسيختگي نهايي اين مدل مي باشد. از آنجاييکه برخورد پرتابه با سازه، ايجاد انرژي بسيار زياد در زماني کوتاه مي کند؛ اين اثر باعث مي شود که عضو مورد نظر در محدوده برخورد پرتابه با سازه به مقاومت بپردازد و تغيير شکل کلي سازه را نداشته باشيم. در حقيقت اثر برخورد پرتابه با سازه يک اثر نقطه اي و محلي است تا عمومي. با توجه به نتايج آزمايشگاهي و مشاهدات عيني شکل گسيختگي مخروطي منطقي بنظر مي رسد[۱۳]. بديهي است که در سرعتهاي پايين مخروط گسيختگي بازتر خواهد شد. بدليل انتخاب مش ساختار نيافته (unstructured) و نامتقارن بودن آن و همچنين امکان ايجاد و رشد ترکها در مرزهای المان مش اوليه، اندکی عدم تقارن در نتايج شکل (۱۵) مشاهده می شود. لازم به ذکر است در اين مساله بعلت سرعت زياد برخورد، ضريب پنالتي اوليه سطوح برخورد نزديک به ۱۳۰ برابر مدول يانگ پرتابه انتخاب شد ليکن پس از ۲۰۰۰۰ گام زماني و پس از کاهش سرعت، ضريب پنالتي به ۴۵ برابر مدول يانگ پرتابه کاهش داده شد.

جدول(۴) *ويژگيهاي مصالح مدل شماره چهار*

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



شکل(۱۴) *الگوي مش بندي و ابعاد هندسي مدل شماره چهار*



شکل(۱۵) *الگوي گسترش ترک پس از برخورد پرتابه*

نتيجه گيري :

در اين مقاله بر اساس روش المانهاي مجزا (DEM) و پلاستيسيته و با استفاده از تئوريهاي مكانيک تماس و مكانيک شكست روش عددي مناسبي براي مدلسازي ترک خوردگي گسترده سازه هاي بتني و بتن مسلح ارائه شد. از خصوصيات اين روش تحليل پلاستيك با در نظر گرفتن تغييرشكلهاي بزرگ و نرم شدگي كرنش بتن پس از ترك خوردگي مي باشد. نتايج تحليلهاي انجام شده بوسيله معيار تسليم رانكين تطابق خوبي با نتايج آزمايشگاهي نشان داده است. جهت دستيابي به جوابهاي صحيح انتخاب مقادير مناسب براي پارامترهاي مكانيک تماس و مكانيک شكست و همچنين مش بندي مناسب سازه بسيار حائز اهميت است. در تحقيقهاي آينده امكان توسعه اين روش به شرح زير وجود دارد:

- اضافه كردن معيارهاي ترك خوردگي چند پارامتري و لحاظ نمودن اثرات تركيبی برش و تنش قائم در ترک خوردگی بتن به برنامه موجود و مقايسه بين نتايج تحليل با معيارهاي مختلف .
- افزودن امكانات مش بندي كلي مجدد سازه جهت كاهش هر چه بيشتر خطاهاي عددي ناشي از اعوجاج بيش از حد المانهاي اوليه (تحليل اجزا محدود وفقي).
- توسعه و بررسي رفتار پيوستگي و چسبندگي بين بتن و فولاد و اينكه جدايي بين بتن و فولاد چه موقع رخ مي 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.*, Vol. 5, 1987, 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.