

بررسی ترک خوردگی پیشرونده به روش المانهای مجزا در سازه های بتن مسلح

حمید پریش¹، زهرا فایض²، ویدا الوانی³

1-مدرس دانشگاه علمی کاربردی واحد نی ریز، ایران

hamidparish@yahoo.com

2-دانشجوی دکترا، دانشگاه ukm مالزی

zahra_fayez@yahoo.com

3-کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه ukm مالزی

Vida_alvani@yahoo.com

چکیده

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

کلمات کلیدی: سازه بتن مسلح، المانهای مجزا، مکانیک تماس، ترک، برخورد، نفوذ

1. مقدمه

محاسبه ترک خوردگی پیشرونده در سازه های بتن مسلح نظیر سدها، پلها، پناهگاهها، سازه های مدفون ، راکتورهای هسته ای و در اثر بار گذارهای خارجی 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 محاسباتی که امکان محاسبه اندرکنش تماسی، ترک خوردگی موضعی سازه و اثرات کلی برخورد را میسر نماید بیش از پیش ضروری می‌باشد. مدلسازی عددی رفتار بتن بر اساس روش ترک مجزا (Discrete Crack) مدل ترک چسبنده بوسیله Hillerborg ارائه شد که مود I شکست بتن را در نظر می‌گیرد [1-2]. این روش در سال 1994 توسط Cervenka برای شکست براساس مودهای مرکب I و II تکمیل گردید [3]. در سال 1995 این روش توسط Aliabadi در المانهای مرزی استفاده شد [4]. در سال 1987 Lin با ارائه المانهای فرسایشی توانست برخورد پرتابه به دال بتنی را به صورت سه بعدی مدلسازی کند [5]. Morikawa در سال 1993 با استفاده از روش المانهای مجزا (DEM) ترک خوردگی ناشی از برخورد پرتابه به دالهای بتنی مسلح را تحلیل کرد [6]. در این تحقیق روشی مورد استفاده قرار می‌گیرد که ضمن در برداشتن رفتار مصالح و عملکردهای تماسی پس از ترک خوردگی 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.

2. مدل رفتاری بتن مسلح

در این تحقیق مدل رفتاری بتن با مشخص بودن مقاومت کششی تک محوری بتن f_t' و انرژی شکست G_f شبیه سازی می‌شود. بدینصورت که بتن قبل از تسلیم به صورت یک مصالح الاستیک خطی رفتار می‌کند و پس از تسلیم اولیه با یک رفتار نرم شدگی کرنش تا شکست نهایی و آغاز بازشدگی ترک پیش می‌رود. سفره آرماتور مسلح کننده بتن به صورت یک لایه فولادی با چسبندگی کامل به لایه بتنی المانبندی میشود. رابطه تنش کرنش فولاد، الاستو پلاستیک کامل از نوع فون میزز (Von Mises) فرض می‌شود.

1-2. رفتار نرم شدگی بتن (Softening Behavior)

در این تحقیق از مدل پلاستیسیتیه نرم شدگی دو خطی رانکین (Rankine) استفاده شده است (شکل 1). انرژی آزاد شده شکست به صورت انتگرال سطح زیر منحنی شاخه نرم شدگی تنش کرنش تعریف می‌شود:

(1)

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

f_t مقاومت کششی، ϵ_t و ϵ_{II} کرنش شکست کششی و نهایی و l_c عرض جمع شدگی می‌باشند. در حالت کلی با یک تقریب مناسب l_c برحسب سطح المان (A) به صورت زیر تعریف می‌شود [7]:

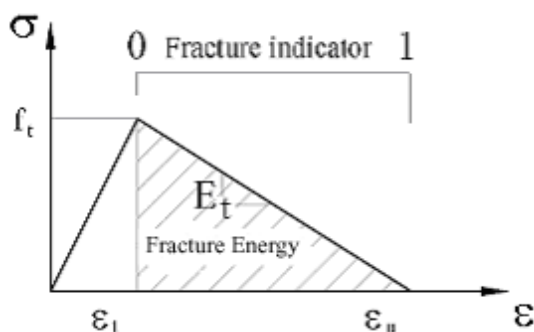
(2)

$$l_c = A^{1/2}$$

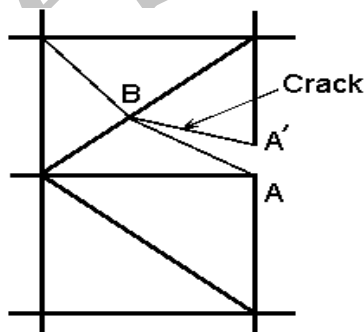
مدول نرم شدگی نیز بر اساس شیب خط نرم شدگی شکل (1) و رابطه (1) به صورت زیر بدست می‌آید:

(3)

$$E_t = \frac{f_t^2 l_c}{2G_f}$$



شکل 1- مدل نرم شدگی انرژی شکست [3]



شکل 2- مش بندی مجدد پس از شکست

3. مدل سازی المان های مجزا

روش المان های مجزا به سه گام اصلی ردیابی تماس (Contact Detection)، اندرکنش تماس (Contact Interaction) و الگوریتم شکست تقسیم بندی می‌شود [7]. هدف از گام اول ارائه الگوهای است که قادر به تشخیص خود کار المان هایی که با یکدیگر برخورد می‌کنند و یا در تماس هستند باشد. هدف گام دوم اعمال نیروهای حاصل از تماس و یا برخورد بین المان ها به سیستم می‌باشد. در گام سوم نحوه بسط و گسترش ترک ها، تعیین جهت ترک خوردگی، شاخص شکست، تعریف گره های جدید، تقسیم المان و اعمال شرایط سازگاری در گره های جدید و مش بندی مجدد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (2) 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 حد ترک خوردگی می رسد، گره A به دو گره A و A' تبدیل شده، المان حاوی ترک به دو المان جدید تقسیم میشود. به منظور حفظ سازگاری گره جدید B روی المان تعریف شده و متناسب با آن مش بندی تغییر داده می شود.

3-1. اندرکنش تماس

پس از آنکه تماس بین دو المان مجزا 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. یک روش معمول، روش مینیم 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 [7].

$$\bar{\pi} = \pi_{(u)} + \pi^{con}(C, \mathbf{u}, \dots) \quad (4)$$

که C ماتریس قید است. تغییرات تابعی جدید $\bar{\pi}$ برابر مجموعه تغییرات تابعی ذکر شده می باشد:

$$\delta \bar{\pi} = \delta \pi_{(u)} + \delta \pi^{con} \quad (5)$$

با صفر قرار دادن تغییرات تابعی پتانسیل جدید $\delta \bar{\pi}$ قید تماس به سیستم تحمیل می گردد.

روش پنالتی

مبنای روش پنالتی بر این اصل استوار است که تغییرات $C^T C$ هنگامی که قید ارضا می شود برابر صفر است ($\delta(C^T C) = 0$). در این روش تابعی قید را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\pi^{con} = \frac{1}{2} \alpha \int C_{(u)}^T C_{(u)} d\Omega \quad (6)$$

در رابطه (6) α ضریب پنالتی نامیده می شود. از مزیت های این روش آن است که اعمال قید نیاز به هیچ معادله اضافی نخواهد داشت ولی تقریبی بوده و پاسخهای بدست آمده از آن به α بستگی دارد. با کاهش مقدار این ضریب

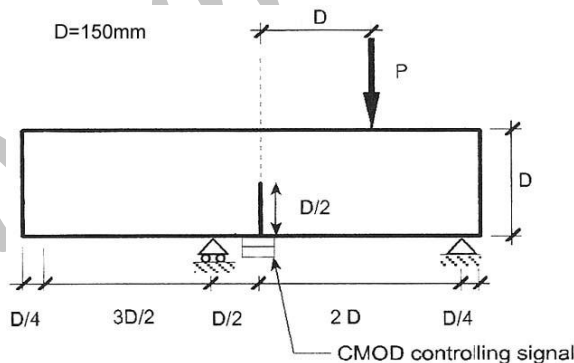
خطای بوجود آمده افزایش می یابد و بکارگیری مقادیر بسیار بزرگ برای آن به ناپایداری عددی تحلیل می انجامد. یک مقدار مناسب اولیه برای α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ پیشنهاد شده است [8].

4. تحلیل‌های عددی

1-4. مدل شماره یک

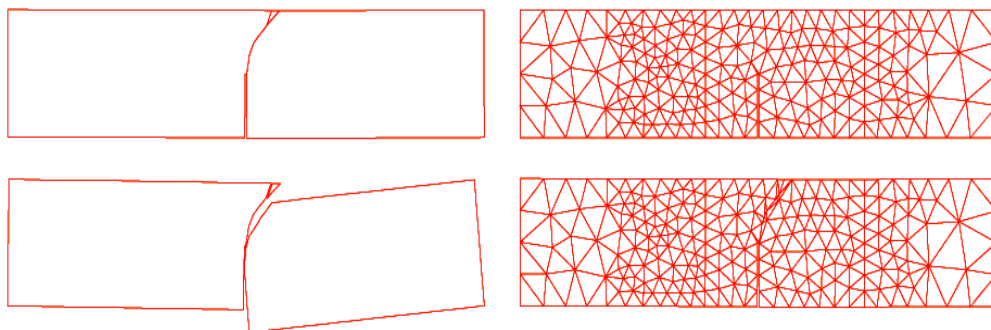
این مدل یک تیر بتنی به ابعاد نشان داده شده در شکل (3) میباشد که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته است و شکست بتن در اثر بارگذاری مودهای مرکب را نشان می دهد [9]. مشخصات مصالح در جدول (1) آورده شده است.. شکل (4) روند رشد ترک و تغییر شکل‌های نمونه همراه با تغییرات مش بندی پس از ترک خوردگی را نشان می دهد. همانطور که در شکل (5) مشاهده میشود شکل ترک خوردگی بدست آمده با دقت مناسبی در محدوده نتایج بدست آمده از چندین مدل آزمایشگاهی قرار دارد [9].

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

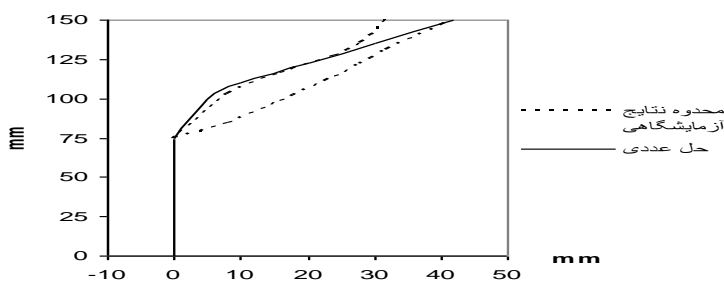


جدول 1: ویژگی‌های مصالح مدل شماره یک

شکل 3- ابعاد مدل شماره یک [9]



شکل 4- الگوی مش بندی سازه و گسترش ترک و مش بندی مجدد بعد از ترک خوردگی



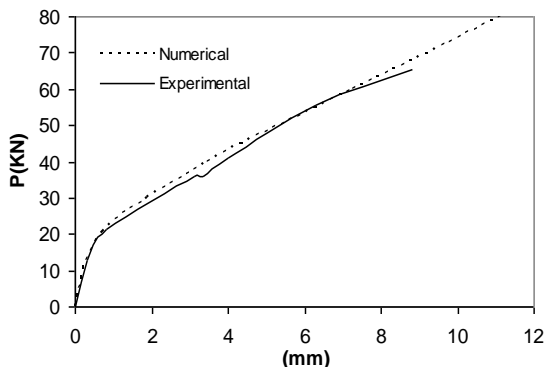
شکل 5- مقایسه شکل ترک بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی [9]

2-4. مدل شماره دو

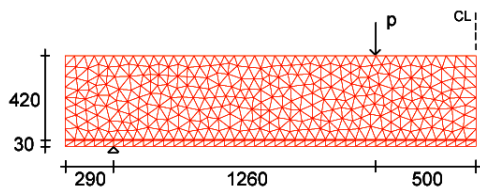
تحلیل عددی گسیختگی برشی تیرهای بتنی بدلیل در بر گرفتن مودهای مرکب دارای پیچیدگی هایی است. در این مدل یک تیر دوسر مفصل بتن مسلح با مشخصات جدول شماره 2 که تحت بار جانبی استاتیکی است تحلیل شده است [10]. سفره آرماتورها به صورت یک لایه فولادی گسترده به وسیله المانهای مثلثی مدلسازی شده اند. چسبندگی بین بتن 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 7 و 9 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 (7) انتظار نمی رود. در شکل (9) 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 2: ویژگیهای مصالح مدل شماره دو

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



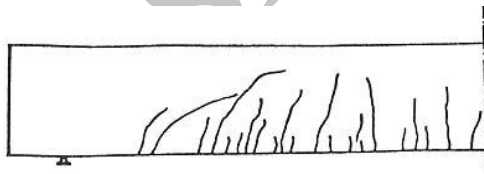
شکل 7- منحنی تغییر مکان وسط دهانه تیر



شکل 6- ابعاد هندسی مدل شماره دو [10]



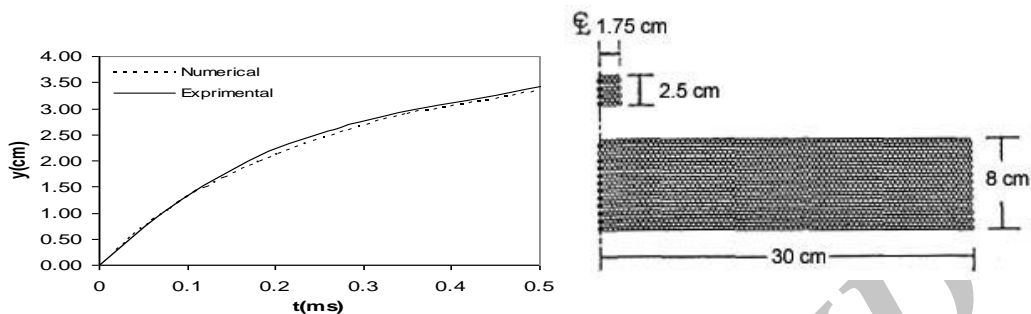
شکل 9- شکل ترک خوردگی تحلیل عددی



شکل 8- شکل ترک خوردگی آزمایشگاهی [10]

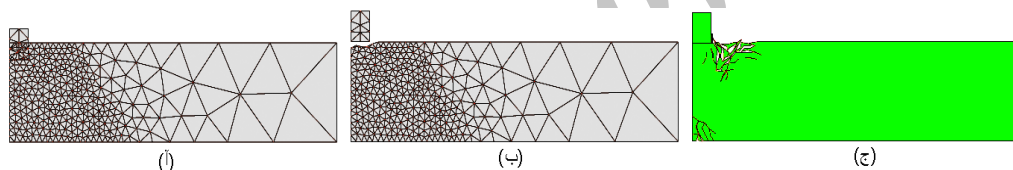
3-4. مدل شماره سه

این مدل یک دال بتنی یکطرفه با ابعاد هندسی شکل (10) و مشخصات مصالح جدول (3) میباشد که به صورت یک تیر دوبعدی مدل شده است [6]. 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 (11)، نمایانگر تطابق بسیار خوب نتایج حاصل از تحلیل عددی مسئله با مشاهدات و اندازه گیریهای آزمایشگاهی است. اگرچه بهترین مقدار برای α در فاصله $0.5E < \alpha < 2E$ می باشد. اما در مسایل برخورد با سرعت بالا برای آنکه جسم برخورد کننده در جسم هدف فرو نرود (شکل 12-الف) لازم است سختی مجازی تماس (ضریب پنالیتی) افزایش . در شکل های 12-ب و 12-ج ناپایداری ناشی از انتخاب مقادیر زیاد برای ضریب پنالیتی نشان داده شده است. در شکل (13) الگوی گسترش ترک و خردشدگی بتن همراه با نفوذ پرتابه در گامهای زمانی مختلف که بر اساس تحلیل های پایدار و صحیح بدست آمده اند، نشان داده شده است.

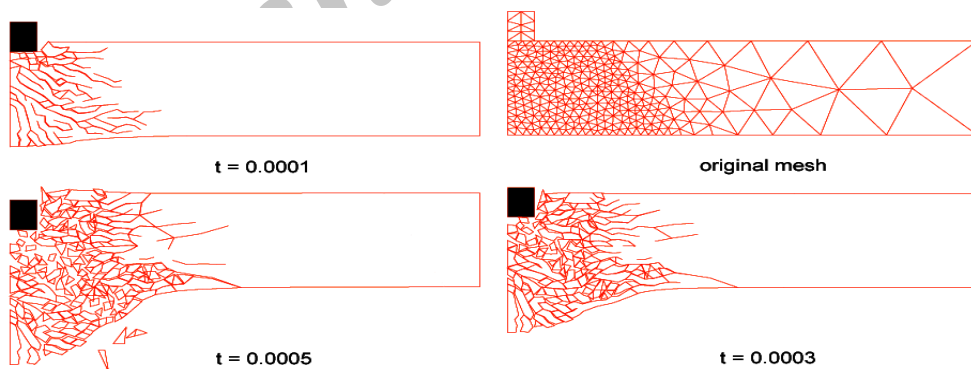


شکل 10- ابعاد مدل شماره سه [6]

شکل 11- منحنی نفوذ پرتابه بر حسب زمان



شکل 12- ناپایداری ناشی از انتخاب مقادیر نامناسب برای پارامترهای مکانیک تماس



شکل 13- الگوی گسترش ترک پس از برخورد پرتابه

جدول 3: ویژگیهای مصالح مدل شماره سه

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

5. نتیجه گیری:

در این مقاله بر اساس روش المانهای مجزا (DEM) 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 در نظر گرفتن تغییرشکلهای بزرگ و نرم شدگی کرنش بتن پس از ترک خوردگی می باشد. نتایج تحلیلهای انجام شده 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 تحقیقات 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 وفقی).
- توسعه و بررسی رفتار پیوستگی و چسبندگی بین بتن و فولاد و مدلسازی جدایی بین بتن و فولاد.

6. مراجع

- [1] Rashid Y., "Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels", *Nuclear Engineering and Design*, 1968, Balkema Ed., pp. 265-286.
- [2] 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.
- [3] Cervenka J., "Discrete crack modelling in concrete structures", 1994, *PhD Thesis*, University of Colorado.

- [4] Saleh A., Aliabadi M., “Crack growth analysis in concrete using boundary element method”, *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, Vol. 51, pp. 533-545.
- [5] 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.
- [6] Morikawa H., Sawamoto Y., “Local Fracture Analysis of a Reinforced Concrete Slab by the Discrete Element Method”, *proceeding of the 2nd international conference on Discrete Element Modelling*, 1993.
- [7] Mohammadi S., “Discontinuum Mechanics by Finite and Discrete Elements”, *WIT press*, 2003.
- [8] 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.
- [9] Cendon D.A., Galvez J. C., Planas J., “Modeling the Fracture of Concrete Under Mixed Mode Loading”, *ECCOMAS 2000*.
- [10] Grzegorz Gajer, “Simplified Nonorthogonal Crack Model For Concrete” *J. of Structural Engineering(ASCE)*, 1991, Vol. 117, No. 1.

Archive of SID