

# بررسی اثر شکستن ذرات بر رفتار مکانیکی مجموعه ذرات دو بعدی و تیز گوشه

علی اصغر میرقاسمی

استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی - دانشگاه تهران

سید رضا موسوی نیک

کارشناس ارشد مهندسی عمران - خاک و پی دانشکده فنی - دانشگاه تهران

احمد رضا محبوبی اردکانی

استادیار گروه مهندسی عمران - آب دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

(تاریخ دریافت ۷۸/۱۲/۱۴، تاریخ تصویب ۷۹/۱۲/۲۰)

## چکیده

با استفاده از روش المانهای مجزا (DEM)، مدلی برای شبیه سازی شکسته شدن ذرات دوبعدی تیز گوشه ارائه شده است. در این مدل، شکل ذرات حاصل از شکست از ابتدا معلوم فرض شده و هر ذره یکپارچه با چند ذره کوچکتر به هم پیوسته جایگزین می شود. در صورت گسیخته شدن پیوند بین این ذرات، شکست رخ می دهد. با به کارگیری این مدل، آزمایش دو محوری در دو حالت شبیه سازی شده است؛ در یک حالت شکست ذرات غیر ممکن و در حالت دیگر شکست ممکن می باشد. مقایسه نتایج شبیه سازیها در این دو حالت، امکان بررسی تأثیر شکستن ذرات بر زاویه اصطکاک داخلی و تغییر شکل پذیری مصالح دانه ای را فراهم می کند. نتایج شبیه سازیهای انجام شده با مشاهدات حاصل از آزمایشهای تجربی تشابه دارد.

**واژه های کلیدی:** شکست ذرات، مصالح دانه ای، روش اجزاء مجزا، آزمایش دومحوری

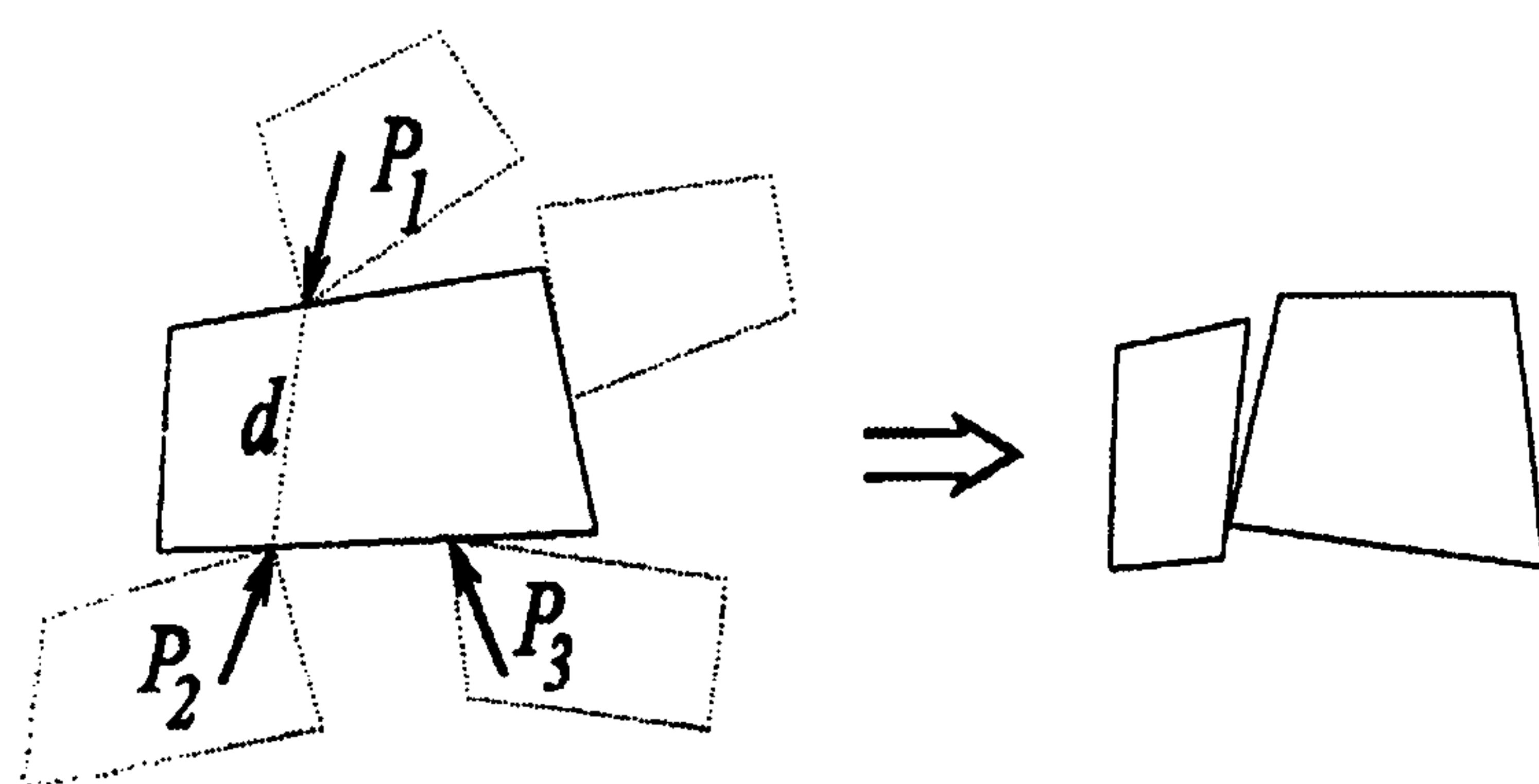
## مقدمه

انجام آزمایشهای تجربی همچون آزمایش سه محوری، تک محوری و کرنش صفحه ای میسر است؛ اما هنگامی که مطالعه رفتار مصالح درشت دانه ای مانند سنگریزه<sup>۱</sup> مد نظر باشد، به دلیل بزرگی ابعاد دانه ها انجام چنین آزمایشهایی بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود [۱-۴]. از این رو در تحقیق حاضر تلاش شده است با مدلسازی پدیده شکستن دانه ها به کمک روش المانهای مجزا (DEM)، تأثیر این پدیده بر رفتار مصالح دانه ای از طریق شبیه سازی عددی آزمایش دو محوری بر روی ذرات تیز گوشه بررسی گردد. به این منظور در یک برنامه کامپیوتری موجود برای شبیه سازی آزمایش دو محوری

در بناهای خاکی بزرگی همچون خاکریزهای بلند و سدهای خاکی، لایه های زیرین مصالح به کار رفته در ساخت بنا، ناچار به تحمل وزن قابل توجه لایه های فوقانی خود می باشند؛ بنابراین ذرات خاک در لایه های زیرین، تحت تأثیر تنشهای نسبتاً زیادی قرار گرفته و دچار شکستگی می شوند. شکستن ذرات و تبدیل دانه های درشت تر به دانه های ریزتر، باعث ایجاد تغییر در منحنی دانه بندی مصالح و در نتیجه تغییر خصوصیات رفتاری مصالح دانه ای می گردد.

مطالعه تأثیر شکستن ذرات بر زاویه اصطکاک داخلی و تغییر شکل پذیری مصالح دانه ای از طریق

در این رابطه،  $K$  ضریبی است که به شکل بلوک بستگی دارد،  $P$  بار شکست ذره و  $S$  مقاومت بلوک سنگی است که مقداری ثابت فرض می شود. در صورتی که متوسط دو بار حداکثر وارد بر ذره  $(P_1+P_2)/2$  از  $P$  بیشتر شود، شکست اتفاق می افتد. فرض اساسی در RBMC آنست که شکست ذره به صورت آنی (در یک سیکل اجرایی) رخ می دهد و از محل خط مستقیمی که نقطه اثر دو نیروی  $P_1$  و  $P_2$  را به هم متصل میکند، بلوک را به دو تکه تقسیم می کند (شکل ۱).



شکل ۱: نحوه شبیه سازی شکست در برنامه RBMC [۱۴].

در روش فوق، پس از رخ دادن هر شکست، بلوک اولیه حذف شده و دو بلوک با هندسه جدید ایجاد می گردد؛ بنابراین لازم است هندسه، جرم و گشتاور ماند این ذرات جدید مورد محاسبه قرار گرفته و در حافظه رایانه ثبت گردد.

در سالهای اخیر با پیشرفت چشمگیر رایانه ها از نظر مقدار حافظه و سرعت پردازش داده ها، روشهای شبیه سازی شکست دستخوش تحول بسیار شده است؛ به طوری که آخرین مطالعات صورت گرفته در زمینه مدلسازی شکست و شکل گیری ترک در اجسام شکننده، بر مبنای ترکیب روش المانهای مجزا (DEM) و روش دینامیک ملکولی (MD) استوار است [۸-۱۱]. دینامیک ملکولی یک تکنیک محاسباتی است که برای بررسی یک ماده ماکروسکوپی آن را به صورت مجموعه ای از ذرات میکروسکوپی در نظر می گیرد.

Kun و Herrmann برای بررسی فرآیند شکل گیری

(POLY)، اصلاحاتی انجام گرفته است تا مدلسازی پدیده شکستن دانه ها ممکن گردد. پیش از این به کمک این برنامه تأثیر فشار همه جانبه و اصطکاک بین دانه ها بر زاویه اصطکاک داخلی و تغییر شکل پذیری مصالح دانه ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۵].

### روشهای مدلسازی شکست به وسیله DEM

تاکنون روشهای متفاوتی برای مدلسازی شکستن اجسام شکننده به وسیله DEM به کار گرفته شده است که از میان آنها می توان به روش پیشنهادی Cundall و نیز شیوه های مبتنی بر استفاده از ترکیب دو روش دینامیک ملکولی (MD) و DEM<sup>۳</sup> اشاره نمود. پیش از تشریح روش مورد استفاده در تحقیق حاضر، روشهای فوق به اختصار مرور می گردد.

Cundall که پیشگام استفاده از روش المانهای مجزا برای مطالعه رفتار محیط های دانه ای و تحلیل مسایل مکانیک سنگ می باشد، برنامه ای تحت عنوان RBMC نوشت که در آن شکستن بلوک های سنگی مشابه آنچه در آزمایش کشش برزیلی (یا آزمایش بار نقطه ای) اتفاق می افتد، شبیه سازی شده بود [۶ و ۷]. در این برنامه در هر سیکل شبیه سازی، کلیه بارهای نقطه ای وارد بر هر بلوک کنترل شده و از بین آنها محل اثر و مقدار دو بار حداکثری که در جهت مخالف یکدیگر بر بلوک اثر می کنند، مشخص می گردد ( $P_1$  و  $P_2$  در شکل ۱). (منظور از بار نقطه ای وارد بر ذره، بارهای وارد از سوی گوشه ذرات مجاور می باشد). با مشخص شدن نقطه اثر دو بار حداکثر، فاصله آنها ( $d$ ) قابل محاسبه است. این فاصله به منزله فاصله دو فک اعمال کننده بار در آزمایش بار نقطه ای می باشد. Cundall بر اساس گزارشهای منتشر شده در مورد نتایج آزمایش بار نقطه ای بر روی قطعات سنگ با اشکال نامنظم، معیار شکست ذره را در برنامه RBMC به شکل زیر ارائه نمود:

$$S = \frac{KP}{d^2}$$

(۱)



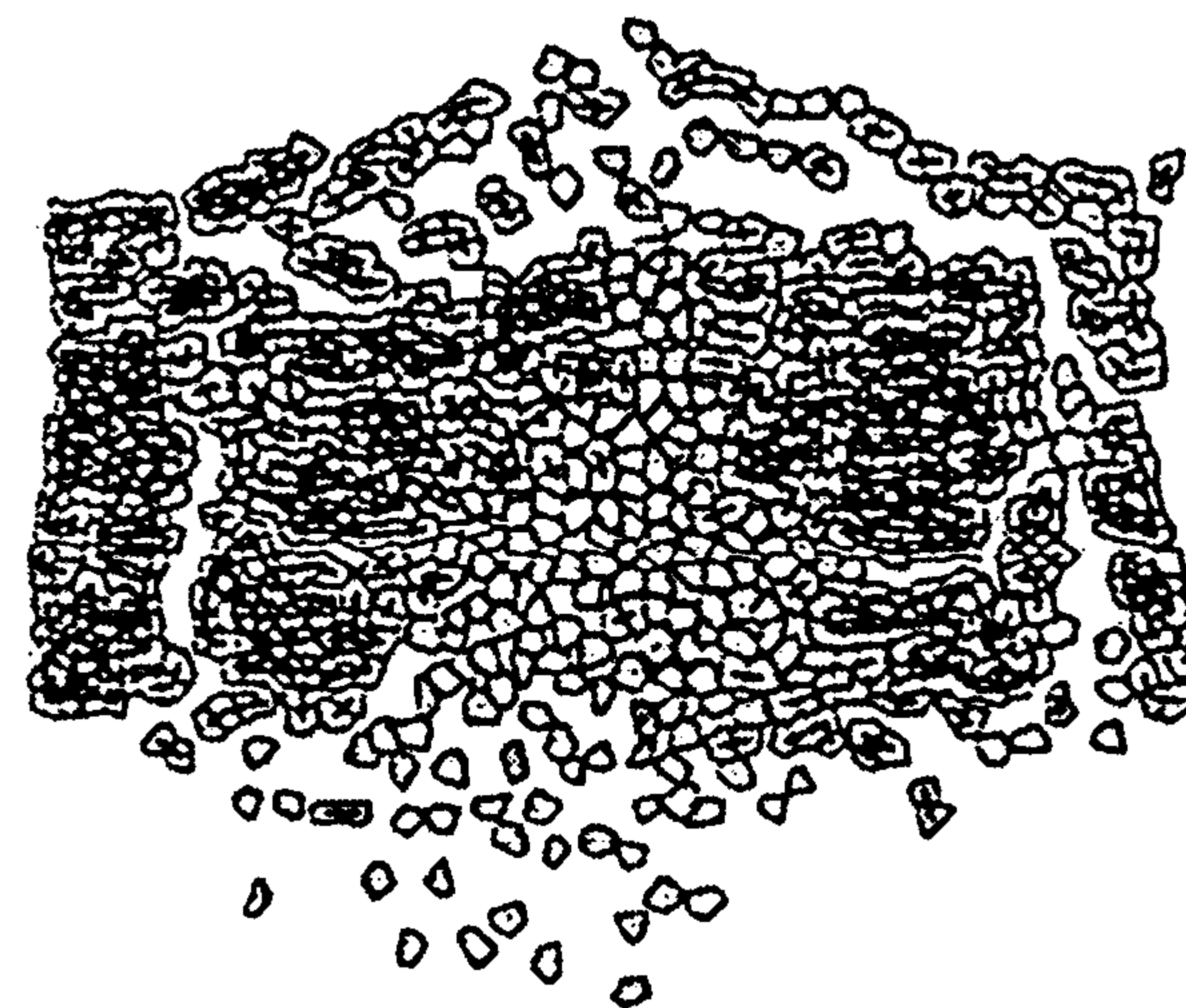
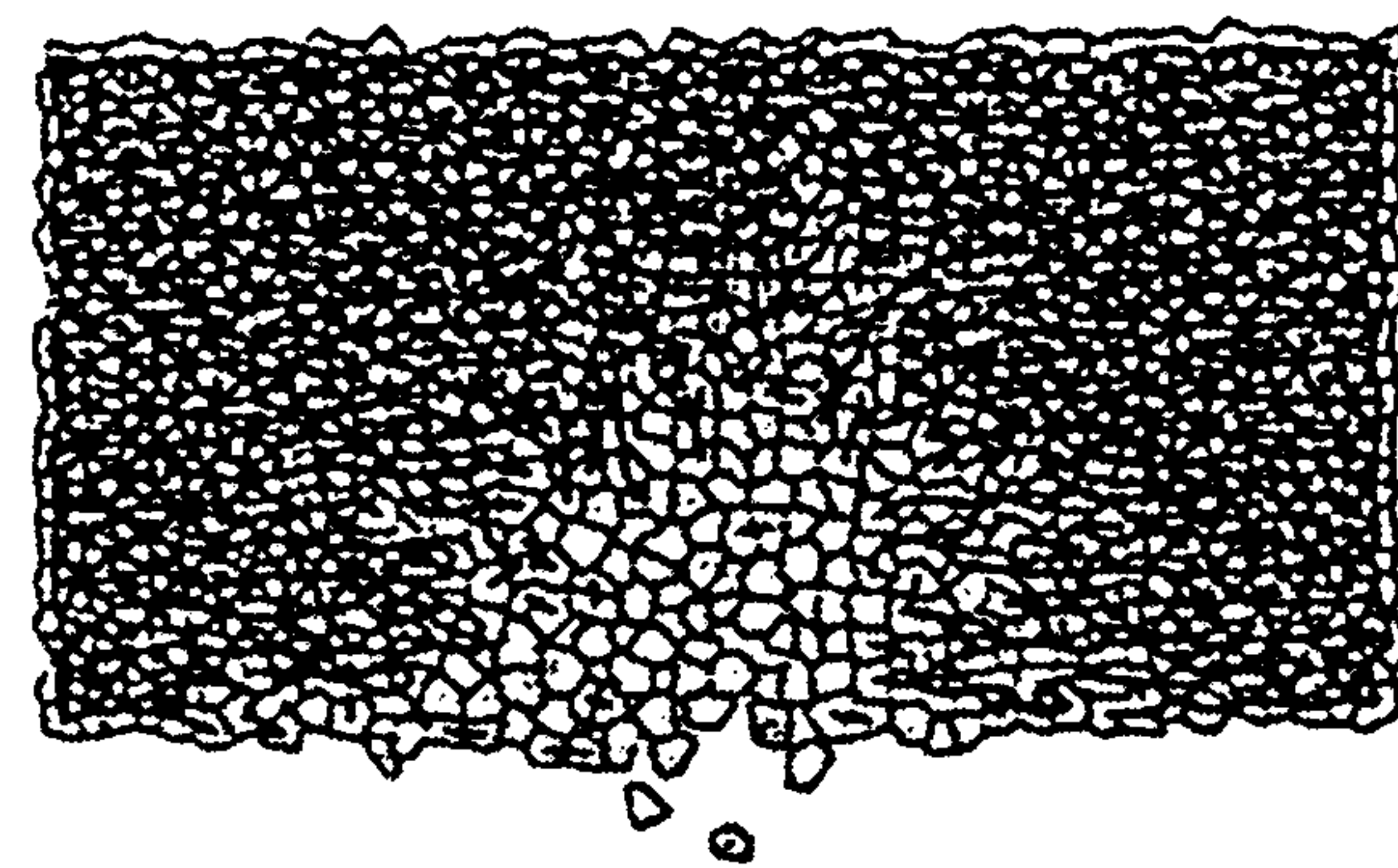
باشد. در صورتی که در یک لحظه خاص، جابجایی نسبی بین دو سلول به اندازه ای باشد که تنش ایجاد شده در تیر متصل کننده آن دو بیشتر از تحمل تیر گردد، تیر گسیخته خواهد شد. این لحظه، نقطه آغاز شکل گیری ترک می باشد و به مرور با گسیختگی تیرهای بین ذرات متوالی، ترک گسترش می یابد. هنگامی که مجموعه ای از سلولهای متصل به هم به طور کامل از دیسک اولیه جدا شود، شکستگی رخ داده است. در مدل اخیر، بررسی فرایند شکل گیری ترک در یک جسم شکننده امکان پذیر می باشد.

### روش مدلسازی شکست در تحقیق حاضر

در این تحقیق، شبیه سازی آزمایش دو محوری بر روی مجموعه هایی متشکل از ۲۰۰ تا ۳۰۰ قطعه سنگ و به کمک کامپیوترهای شخصی (PC) انجام می گیرد؛ از این جهت تلاش شده شکست ذرات به شیوه ای مدلسازی شود که تا حد امکان - در مقایسه با روشهای یاد شده - از حجم محاسبات و تعداد المانهای مورد نیاز کاسته شود. در این شیوه فرض بر این است که هر قطعه سنگ، تنها بتواند در امتداد تعدادی خط مستقیم با راستا و موقعیت مشخص شکسته شود. در تحقیق حاضر، این خطوط به گونه ای اختیار شده اند که هر ذره بتواند به محتمل ترین شکلهای نزدیک به واقعیت شکسته شود (مانند پریدن گوشه های تیز یک ذره و همچنین به دو یا سه تکه شدن آن). برای مثال، مطابق شکل (۳-الف)، فرض می شود که ذره P فقط در راستای خطوط  $d_1$ ،  $d_2$  و  $d_3$  قابلیت شکستن داشته باشد. بنابراین، شکل ذرات حاصل از شکست ذره اولیه از ابتدا مشخص فرض می شود، از این رو در این روش به جای هر ذره یکپارچه مانند P، یک ذره مرکب که از به هم پیوستن ذرات پیوندی کوچکتر  $P_1$ ،  $P_2$  و ...  $P_n$  تشکیل شده است، جایگزین می گردد. ذره P را ذره مینا و ذرات  $P_1$  تا  $P_n$  را ذرات هم مینا می نامیم.

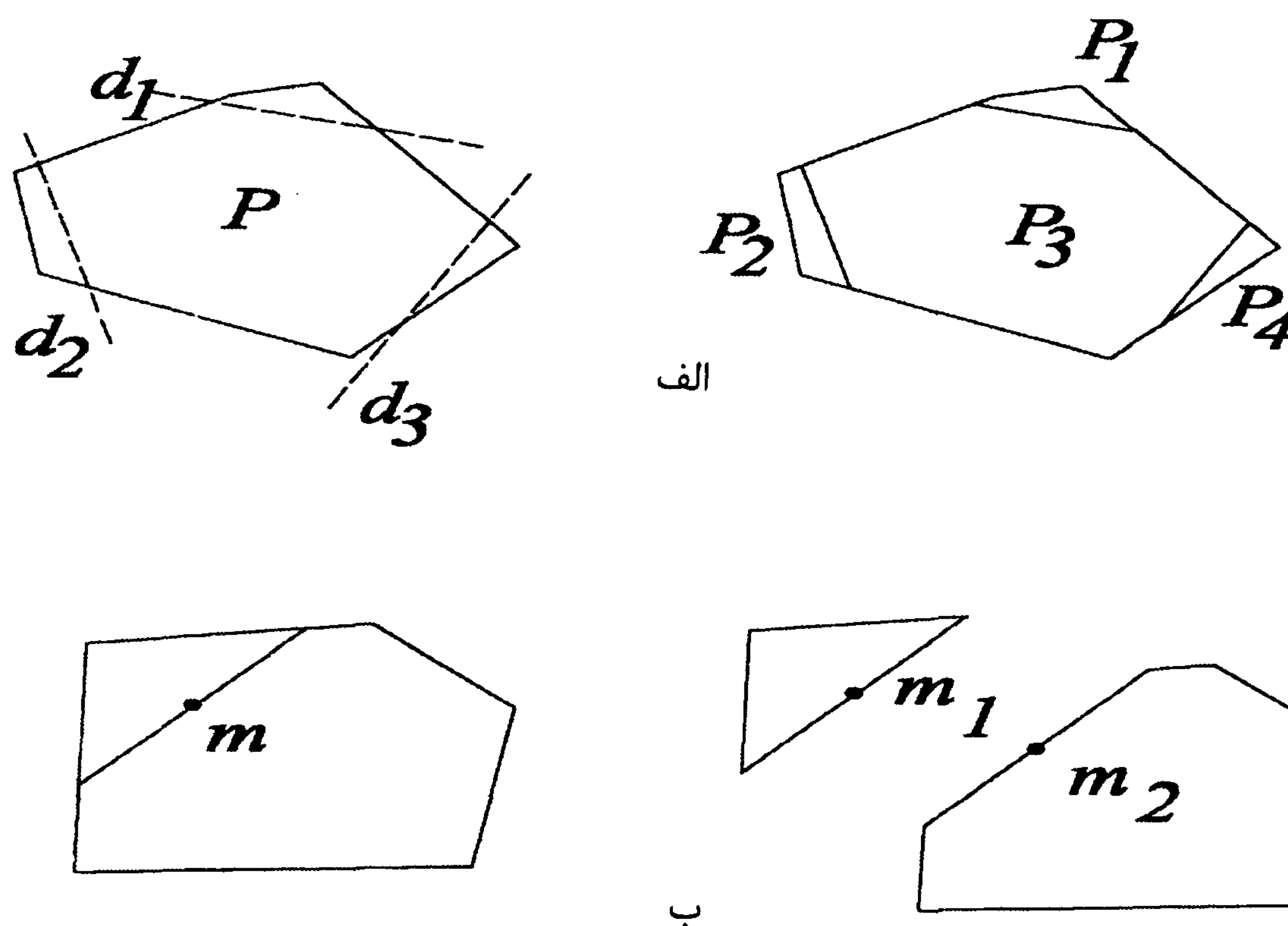
برای حفظ یکپارچگی ذرات پیوندی هم مینا، فرض می شود هر دو ذره پیوندی که دارای وجه مشترک هستند، از طریق یک اتصال گیردار در وسط وجه

ترک در بلوکهای شکننده دو بعدی و یافتن رابطه اندازه قطعات شکسته شده با یکدیگر، هر بلوک را به صورت شبکه ای از سلولهای کوچک متصل به هم در نظر گرفتند که همگی در یک صفحه واقع هستند (شکل ۲) [۱۱]. این شبکه سلولی به کمک یک فرآیند تصادفی<sup>۴</sup> ایجاد میگردد. هر سلول یک چندضلعی محدب و صلب است که به عنوان کوچکترین جزء تشکیل دهنده بلوک، نه می شکند و نه تغییر شکل می دهد و به صورت المانی مجزا از سایر سلولها عمل می کند. سلولها دارای دو درجه آزادی خطی و یک درجه آزادی دورانی در صفحه بلوک هستند و رفتار آنها در برخورد با یکدیگر به کمک روش المانهای مجزا شبیه سازی می شود.

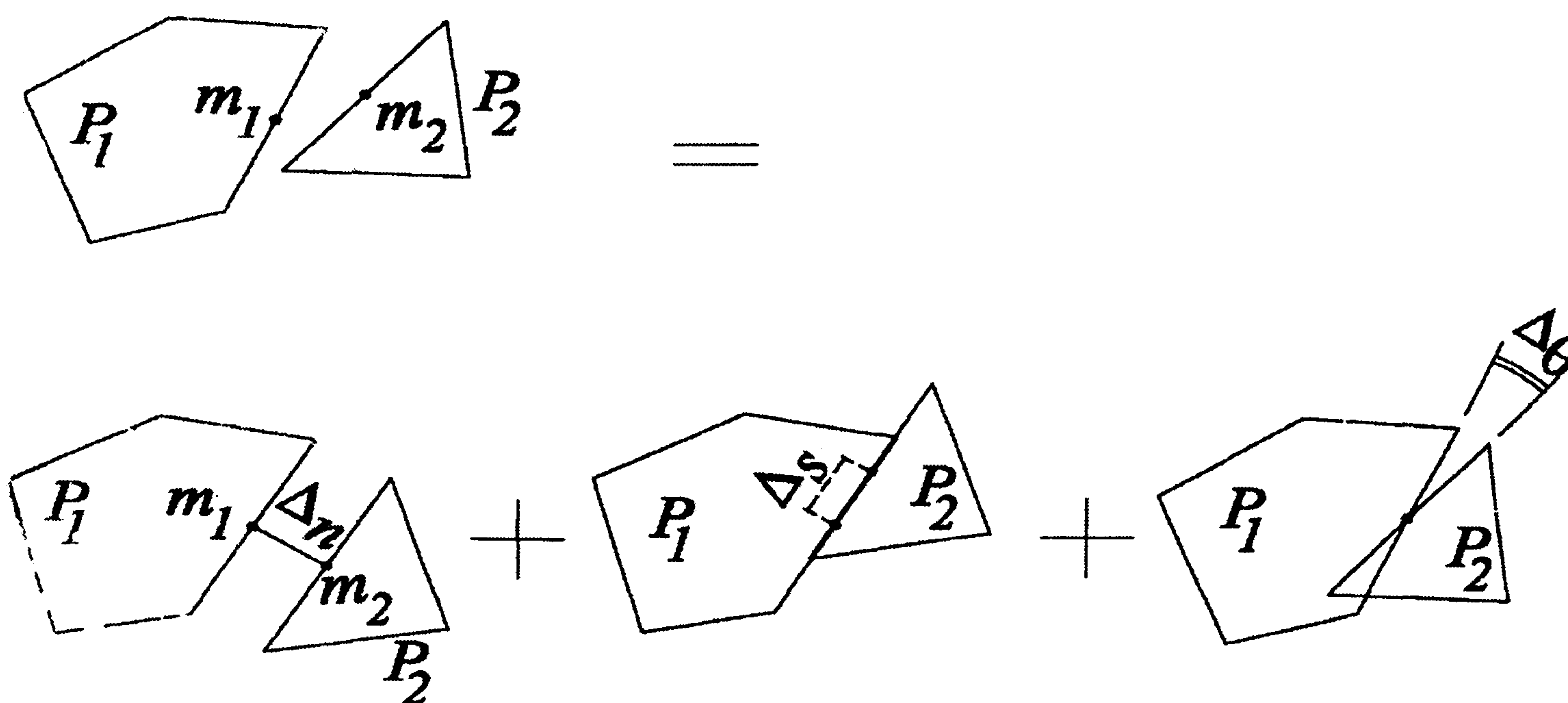


شکل ۲: بلوک متشکل از سلولهای صلب [۱۱].

برای حفظ انسجام سلولهای تشکیل دهنده هر بلوک، لازم است نوعی نیروی پیوستگی نیز بین سلولهای مجاور وجود داشته باشد. به این منظور فرض می شود مرکز جرم (مرکز سطح) هر سلول به کمک یک تیر الاستیک به مرکز جرم سلولهای مجاورش به صورت گیردار متصل شده



شکل ۳ : روش مدل‌سازی شکست در مقاله حاضر :  
 الف : ذره یکپارچه P و ذره مرکب معادل آن    ب : نقاط پیوندی دو ذره پیوندی.

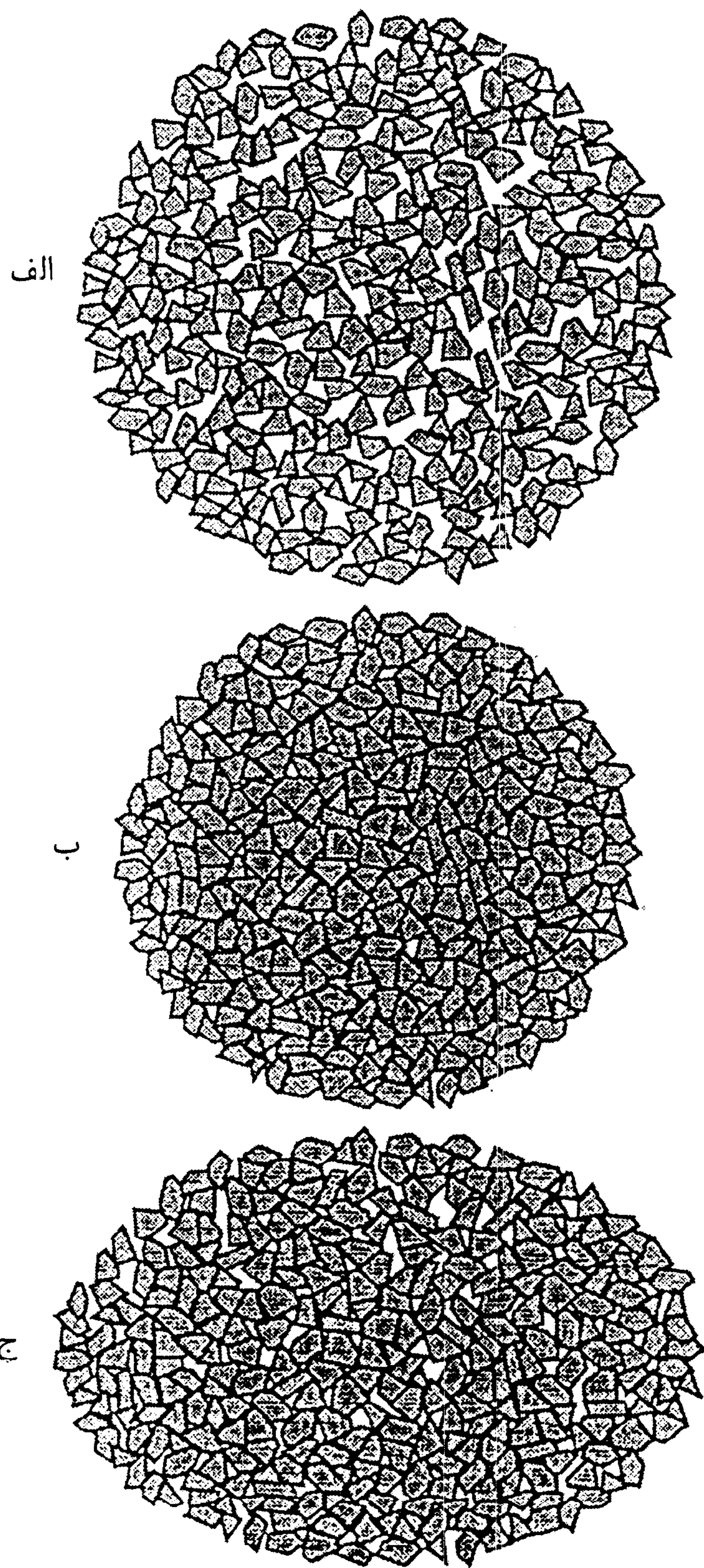


شکل ۴ : تفکیک جابجایی نسبی دو ذره به سه جابجایی قائم، برشی و دورانی.

یکدیگر، شکست رخ می‌دهد .  
 برای مدل‌سازی اتصال گیردار بین دو ذره دارای پیوند ،  
 از دو فنر انتقالی و یک فنر چرخشی استفاده می‌شود .  
 یکی از فنرهای انتقالی در جهت عمود بر وجه مشترک دو  
 ذره به عنوان فنر قائم و فنر انتقالی دیگر در جهت موازی  
 با وجه مشترک دو ذره به عنوان فنر برشی عمل می‌کند .

مشترک خود به یکدیگر متصل شده باشند ( نقاط  $m_1$  و  $m_2$   
 در شکل ۳ - ب). این اتصال گیردار به عنوان پیوند  
 (قید) بین دو ذره پیوندی هم مبنا عمل می‌کند . اگر در  
 یک لحظه خاص در حین شبیه‌سازی ، تنش ایجاد  
 شده در اتصال بین دو ذره از تحمل آن بیشتر گردد ،  
 اتصال گسیخته شده و با جدا شدن دو ذره پیوندی از





شکل ۵ : مراحل انجام آزمایش دو محوری.

الف : تولید مجموعه ذرات ، ب : تراکم همسان ، ج : اعمال تنش انحراف آور

شبيه سازی شده است .

در آزمایشهای سری A ، تک تک ذرات موجود در نمونه آزمایش ، یکپارچه می باشند و شبيه سازی به کمک برنامه اولیه POLY انجام می گیرد که امکان شکستن ذرات در آن وجود ندارد . در آزمایشهای سری B ، هر یک از این ذرات یکپارچه با یک ذره مرکب ( متشکل از چند ذره کوچکتر به هم پیوسته ) جایگزین شده و آزمایش دو

مقادیر نیرو و لنگر در محل اتصال بین دو ذره پیوندی ، با توجه به جابجایی نسبی آن دو محاسبه می گردد .

در شکل (۴)، ذره مرکب P پس از شروع شبيه سازی نشان داده شده است ؛ ملاحظه میگردد که ذرات  $P_1$  و  $P_2$  در اثر تحمل نیروی برخورد ذرات مجاور خود ، نسبت به یکدیگر جابجا شده اند و نقاط  $m_1$  و  $m_2$  دیگر بر یکدیگر منطبق نیستند . در این حالت برای محاسبه نیرو و لنگر وارد بر هر ذره ، جابجایی نسبی دو ذره پیوندی  $P_1$  و  $P_2$  به سه جابجایی نسبی قائم  $(\Delta_n)$  ، برشی  $(\Delta_s)$  و دورانی  $(\Delta_\theta)$  تفکیک میگردد (شکل ۴) . در این صورت نیروی قائم ، نیروی برشی و لنگر ایجاد شده در اتصال به کمک روابط زیر قابل محاسبه است :

$$\begin{aligned} F_{n)Bond} &= K_{n)Bond} \cdot \Delta_n \\ F_{s)Bond} &= K_{s)Bond} \cdot \Delta_s \\ M_{\theta)Bond} &= K_{\theta)Bond} \cdot \Delta_\theta \end{aligned} \quad (۲)$$

در روابط فوق ،  $K_{\theta)Bond}$  سختی فنر چرخشی و  $K_{s)Bond}$  و  $K_{n)Bond}$  به ترتیب سختی واحد طول فنر قائم و برشی می باشند . مقدار این پارامترها متناسب با سختی واحد سطح ذرات در نظر گرفته می شود .

در صورت برقراری یکی از دو شرط زیر ، پیوند بین ذرات گسیخته شده و شکست رخ خواهد داد :

الف - در صورتی که تنش برشی ایجاد شده در پیوند بین دو ذره از تنش برشی مجاز ( تحمل پیوند ) بیشتر گردد .

ب - اگر حداکثر تنش فشاری یا کششی ناشی از اثر توأم لنگر و نیروی قائم وارد بر پیوند از تنش فشاری یا کششی مجاز پیوند فراتر رود .

به این ترتیب با جایگزینی هر ذره یکپارچه با چند ذره کوچکتر به هم پیوسته ، امکان مدلسازی شکست به شکلی ابتدایی در برنامه POLY اصلاح شده میسر خواهد شد .

## شبيه سازی ها

به منظور بررسی اثر شکستن ذرات بر خصوصیات رفتاری مصالح دانه ای ، دو سری آزمایش دو محوری (سریهای A و B) بر روی مجموعه ای شامل ۳۰۰ ذره



## تأثیر فشار همه جانبه بر زاویه اصطکاک داخلی و تراکم پذیری مصالح دانه ای

نتایج شبیه سازیهای سری A به صورت نمودارهای نشان داده شده در شکل (۶) ارائه شده است. در شکل (۶- الف) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه نسبت به کرنش محوری آن ملاحظه میگردد. زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده مصالح، با توجه به نسبت تنشهای اصلی وارد بر نمونه از رابطه زیر محاسبه گردیده است:

$$\sin\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{\sigma_1/\sigma_3 - 1}{\sigma_1/\sigma_3 + 1} \quad (3)$$

جدول ۲: پارامترهای به کار گرفته شده در آزمایشهای سری A (بدون امکان شکست).

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 2000 MPa               | سختی قائم و برشی   |
| 25.0 KN/m <sup>3</sup> | وزن واحد حجم ذره   |
| 140 s <sup>-1</sup>    | ضریب میرایی خطی    |
| 1000 s <sup>-1</sup>   | ضریب میرایی دورانی |
| 1.5 E-4 s              | گام زمانی          |
| 0.006                  | آهنگ کرنش          |

جدول ۳: پارامترهای به کار گرفته شده در آزمایشهای سری B (با امکان شکست).

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| 2000 MPa               | سختی قائم و برشی     |
| 25000 MPa              | مدول ارتجاعی (E)     |
| 0.32                   | نسبت پواسون (ν)      |
| 25.0 KN/m <sup>3</sup> | وزن واحد حجم ذره (γ) |
| 500 s <sup>-1</sup>    | ضریب میرایی خطی      |
| 2000 s <sup>-1</sup>   | ضریب میرایی دورانی   |
| 8.0E-6 s               | گام زمانی            |
| 0.006                  | آهنگ کرنش            |

در همین آزمایشها تغییرات کرنش حجمی به صورت نمودارهای نشان داده شده در شکل (۶- ب) می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد، هر چه مقدار تنش همه جانبه وارد بر نمونه کوچکتر باشد، مصالح زاویه اصطکاک

محوری در شرایطی مشابه حالت اول، به کمک برنامه اصلاح شده POLY تکرار میگردد، در حالت اخیر، شکستن دانه ها میسر می باشد. با مقایسه کیفی نتایج شبیه سازی ها در هر یک از دو حالت فوق، بررسی اثر شکستن دانه ها بر رفتار مکانیکی مصالح دانه ای امکان پذیر خواهد بود.

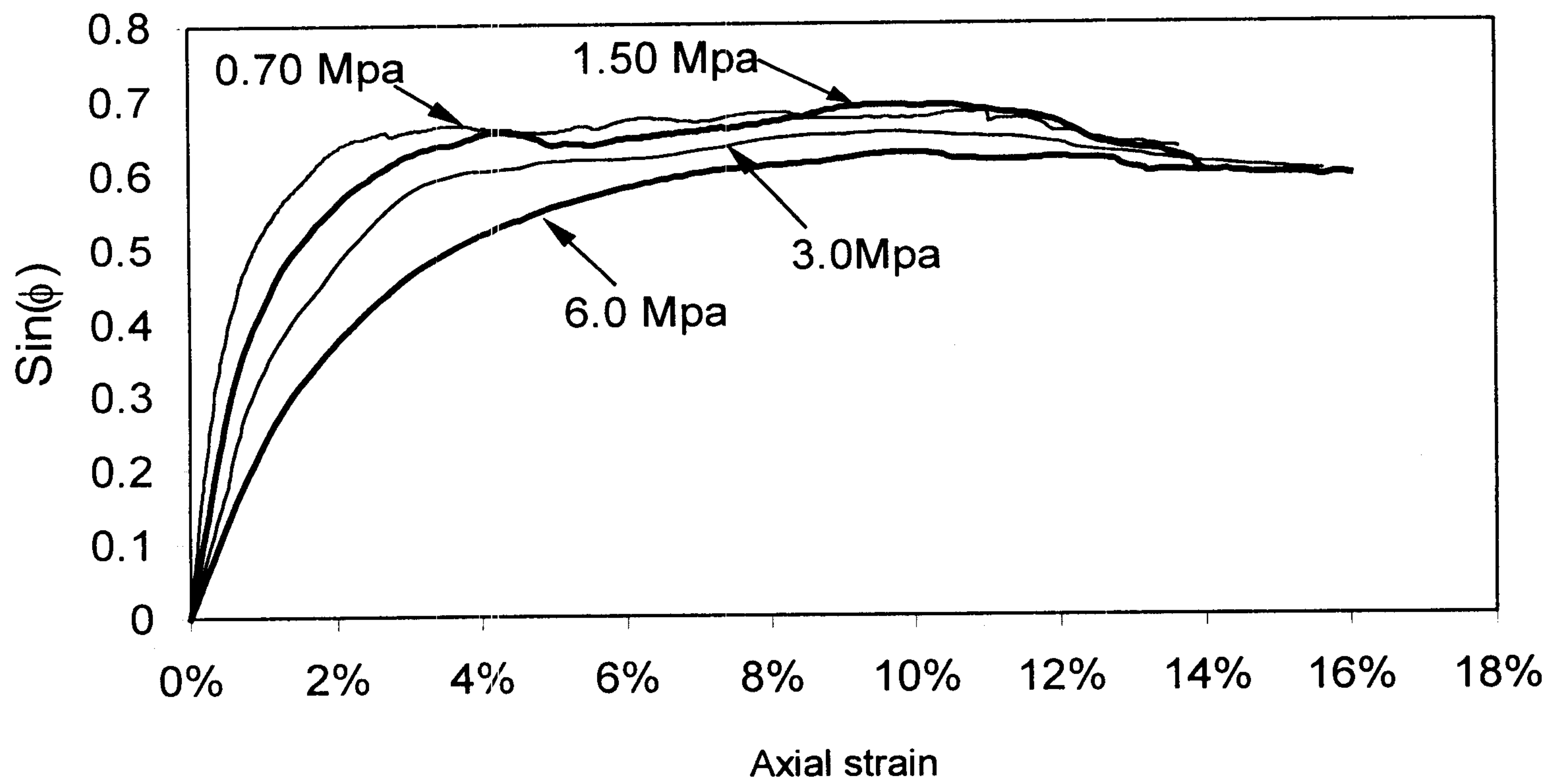
این شبیه سازی ها تحت فشارهای همه جانبه نشان داده شده در جدول (۱) انجام گرفته اند. در هر دو سری آزمایش A و B، مقدار ضریب اصطکاک بین دانه ها برابر ۰/۵ و دانه ها فاقد چسبندگی در نظر گرفته شده اند.

جدول ۱: مقدار فشار همه جانبه در شبیه سازی های سری A و B.

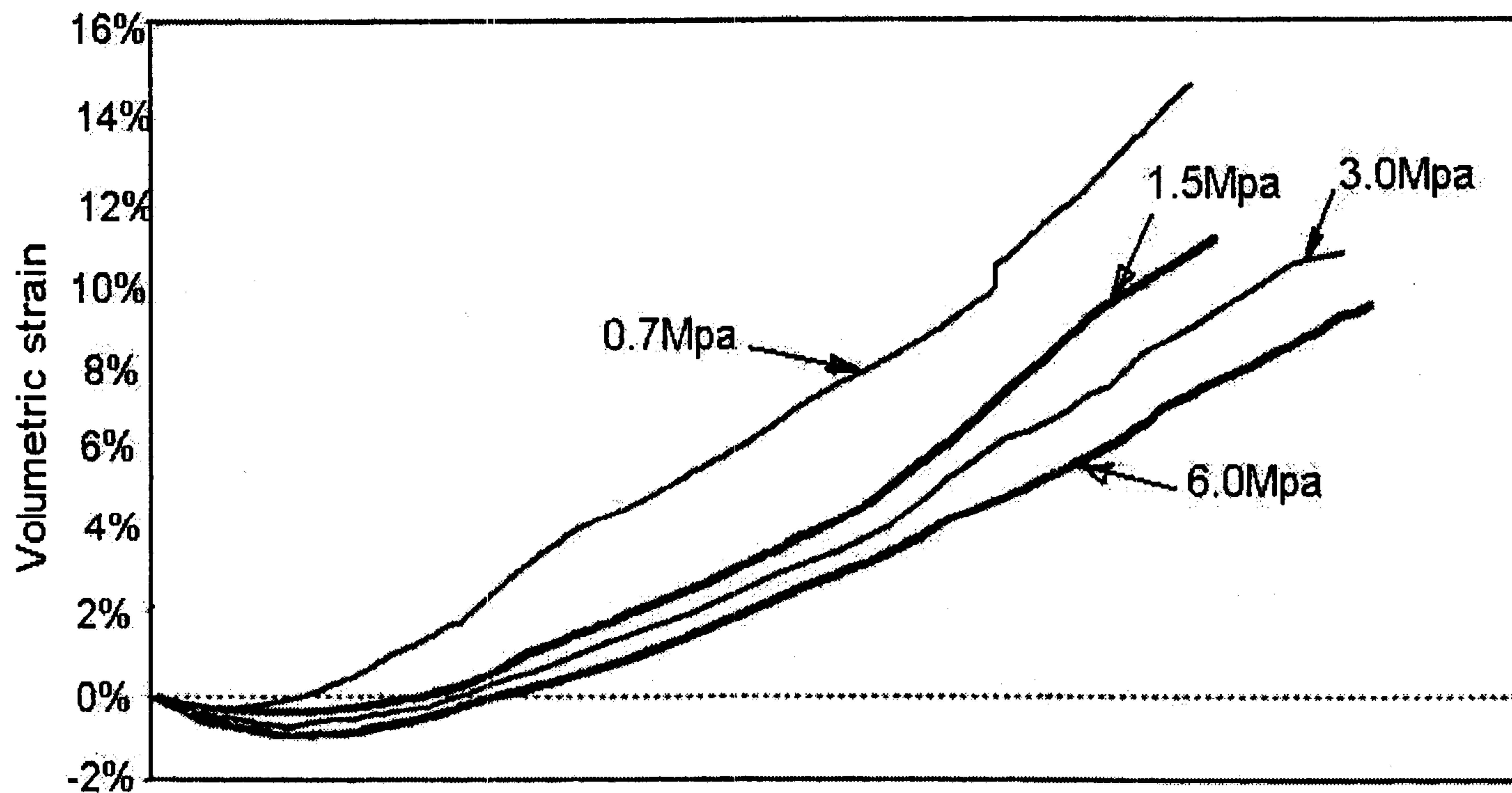
| فشار همه جانبه (MPa) | شماره شبیه سازی   |                |
|----------------------|-------------------|----------------|
|                      | شکست ذرات غیرممکن | شکست ذرات ممکن |
| 0.70                 | A1                | B1             |
| 1.50                 | A2                | B2             |
| 3.00                 | A3                | B3             |
| 6.00                 | A4                | B4             |

در هر شبیه سازی نخست توده غیر متراکم ذرات (شکل ۵- الف)، تا رسیدن به نسبت منفذهایی برابر با ۰/۱۷ متراکم شده (شکل ۵- ب) و سپس فشار همه جانبه ای برابر با مقادیر موجود در جدول (۱) بر آن اعمال شده است. مجموعه ذرات پس از این مرحله، تحت شرایط آزمایش دو محوری با میانگین آهنگ کرنش محوری برابر با ۰/۰۰۶ قرار می گیرد تا لحظه ای که گسیخته شود (شکل ۵- ج). لازم به توضیح است از آنجا که در شبیه سازیهای انجام شده، یک لحظه گسیختگی مشخص (افت مقاومت ناگهانی) مشاهده نمی شود، از این رو رسیدن نمونه به کرنشی بیشتر از حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد و آغاز روند افت مقاومت، به عنوان شروع گسیختگی نمونه تلقی می گردد (شکلهای ۶- الف و ۷- الف).

پارامترهای به کار گرفته شده در آزمایشهای سری A و B به شرح جداول (۲) و (۳) می باشد.



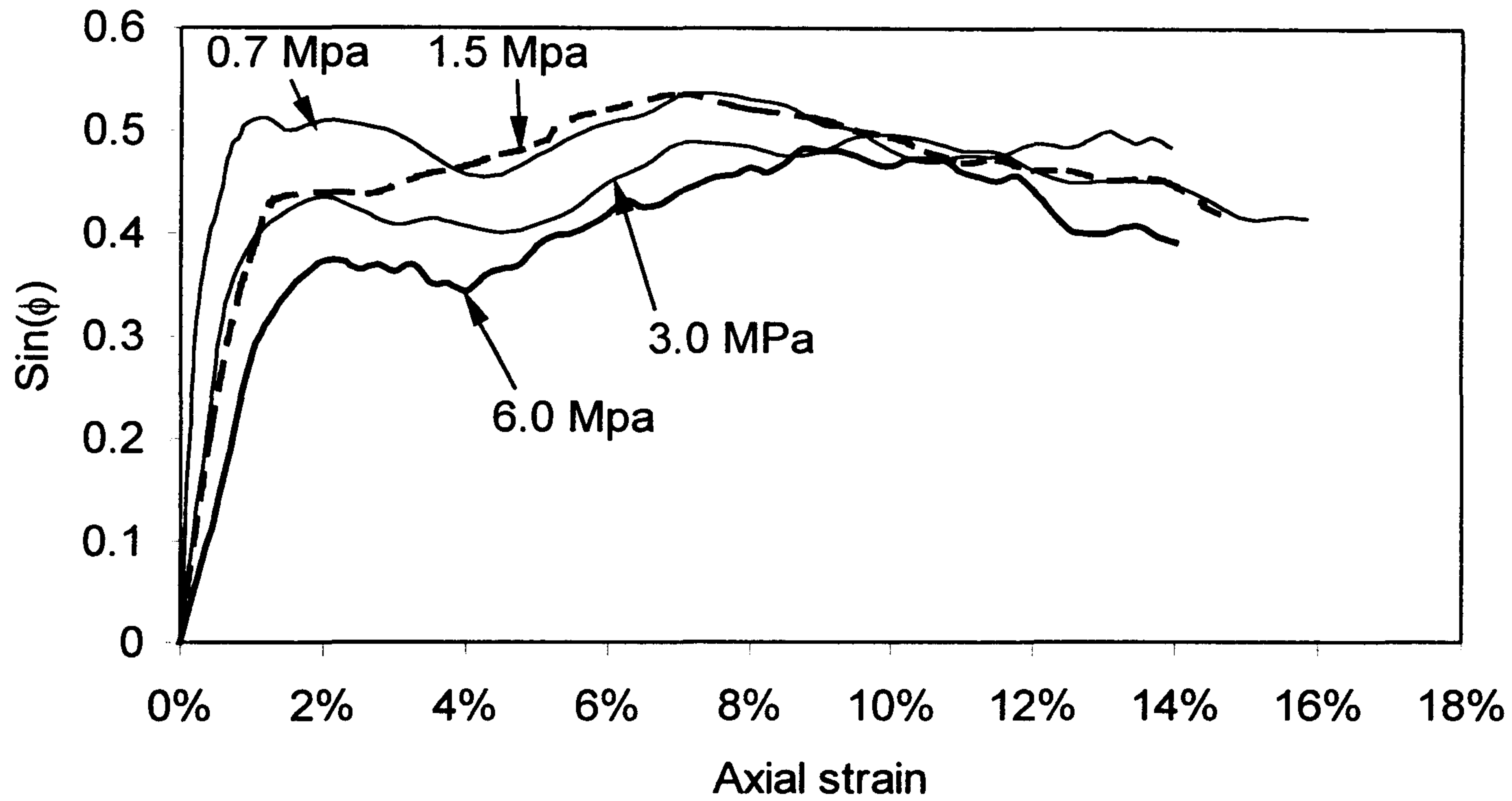
شکل ۶ - الف : تغییرات مقاومت برشی نسبت به کرنش محوری نمونه در آزمایشهای سری A.



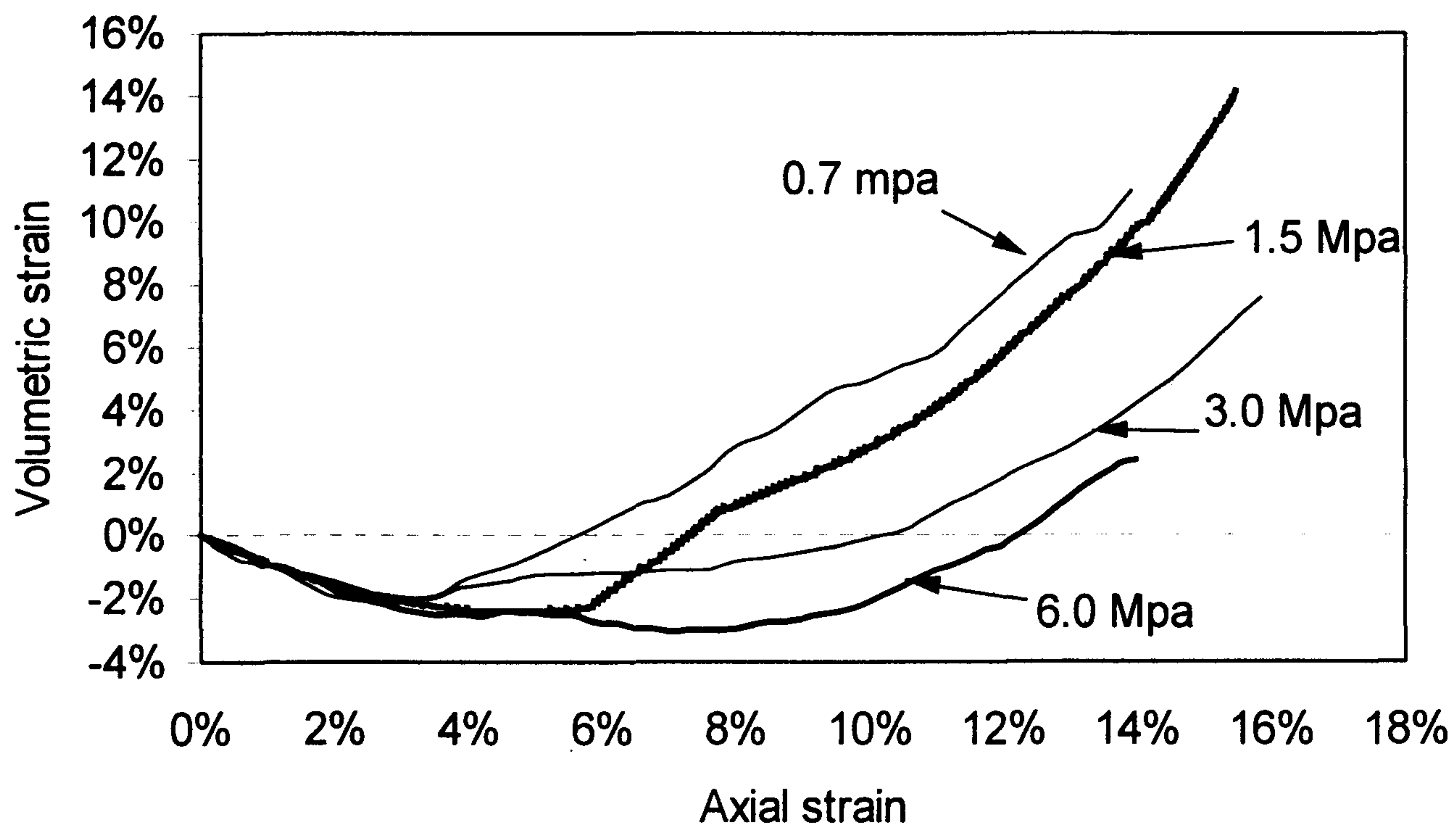
شکل ۶ - ب : تغییرات کرنش حجمی نمونه نسبت به کرنش محوری آن (آزمایشهای سری A).

بیشتری خواهد شد. این نتایج پیش از این نیز در شبیه سازی آزمایش دو محوری برای مجموعه ای متشکل از ۳۰۰ ذره تیز گوشه حاصل شده و توافق آن با نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی ملاحظه گردیده است [۵].

داخلی بیشتری از خود نشان می دهد و نمونه در انتهای شبیه سازی، اتساع بیشتری خواهد یافت (شکل ۶ - ب). همچنین هرچه تنش همه جانبه وارد بر نمونه بزرگتر باشد، نمونه پیش از گسیختگی متحمل کرنش محوری



شکل ۷ - الف : تغییرات مقاومت برشی نسبت به کرنش محوری نمونه در آزمایشهای سری B.



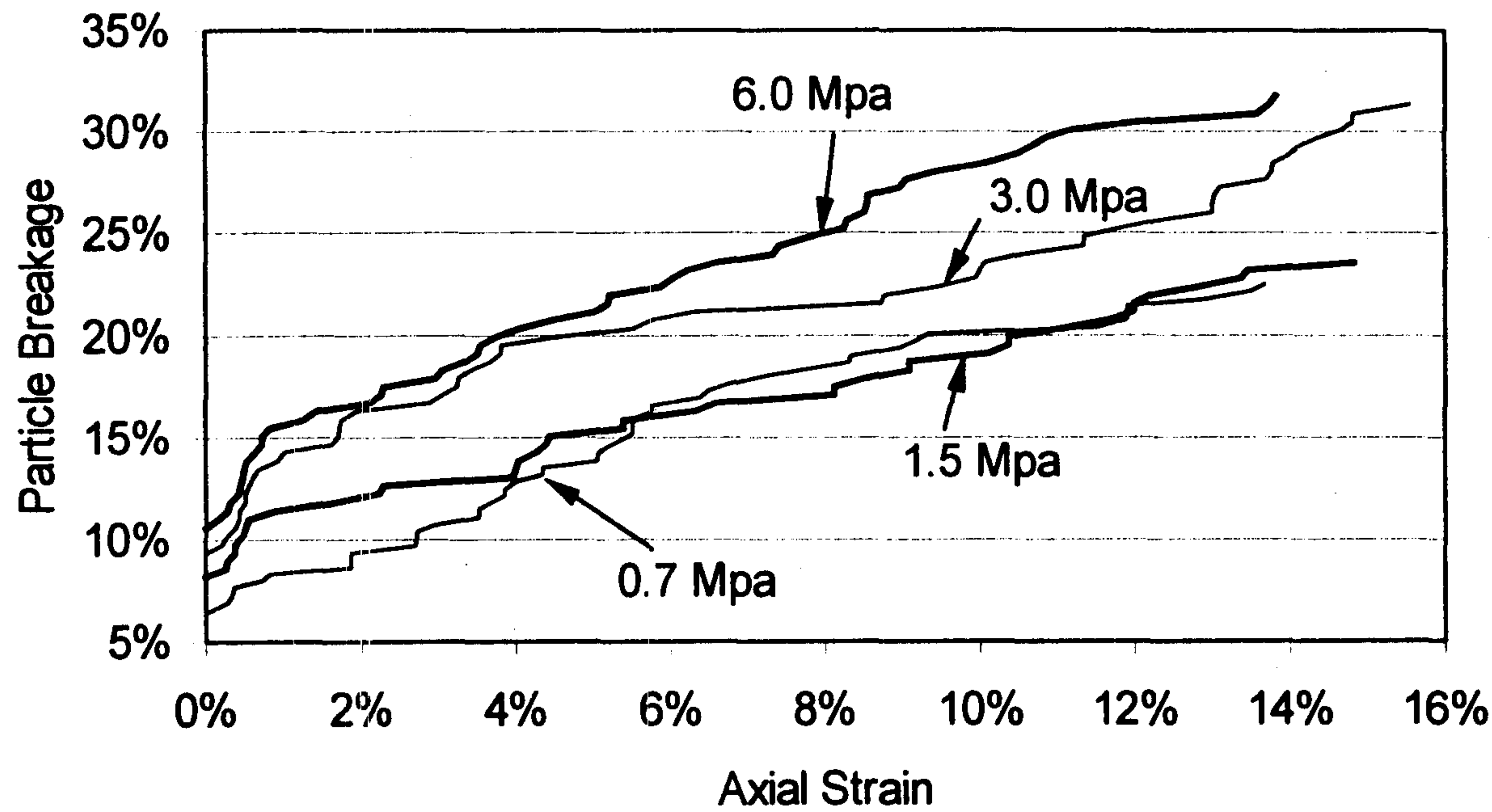
شکل ۷ - ب : تغییرات کرنش حجمی نمونه نسبت به کرنش محوری آن (آزمایشهای سری B).

محوری آن، برای فشارهای همه جانبه متفاوت در شبیه سازیهای سری B ترسیم شده است. با توجه به این نمودارها ملاحظه میگردد در حالتی که شکستن ذرات ممکن باشد (آزمایشهای سری B)، زاویه اصطکاک داخلی مصالح دانه ای نسبت به حالتی که ذرات امکان

### تأثیر شکستن ذرات بر زاویه اصطکاک داخلی و تراکم پذیری مصالح دانه ای

در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و کرنش حجمی نمونه نسبت به کرنش

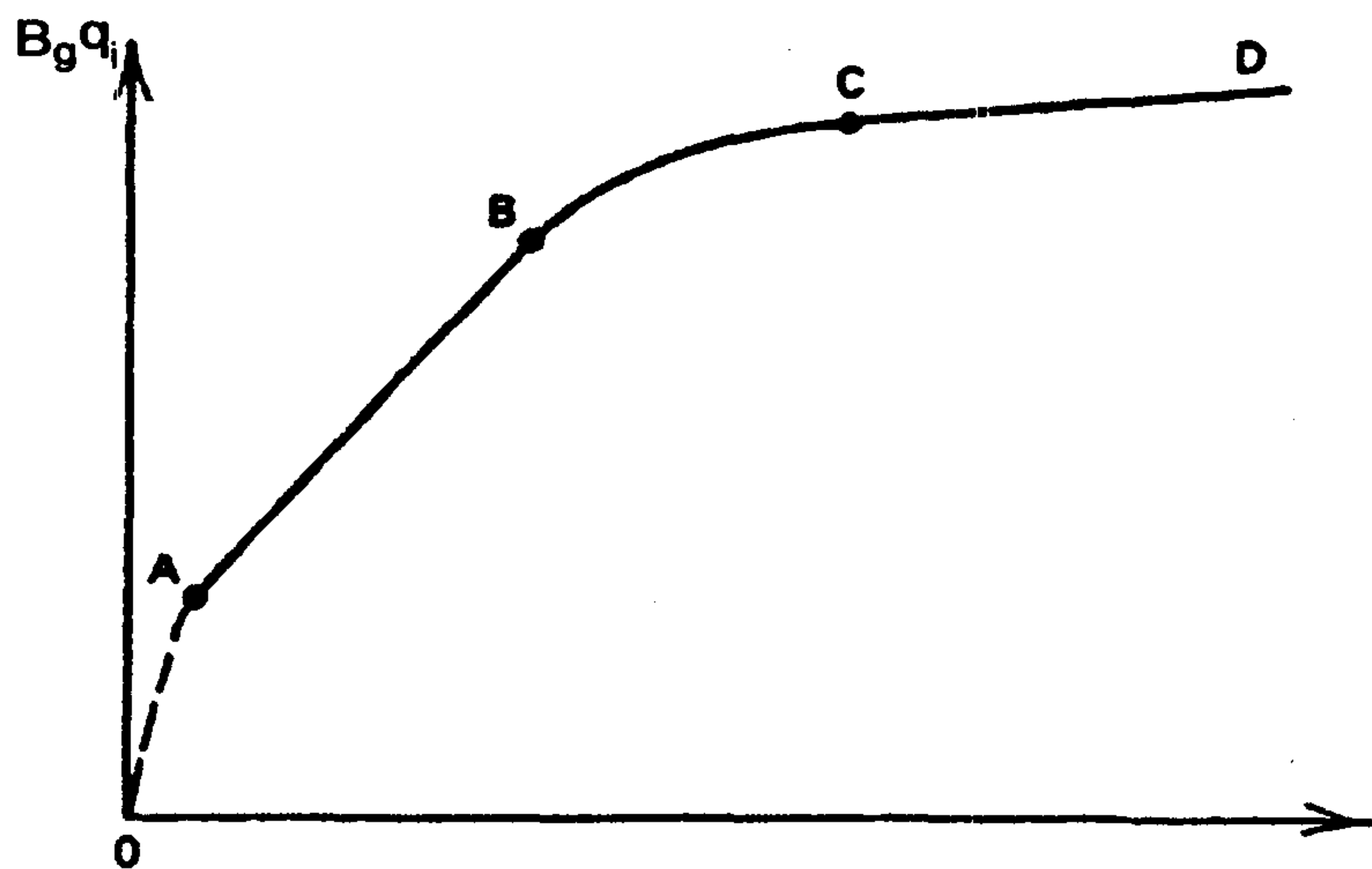




شکل ۸: تغییرات مقدار شکست مصالح در آزمایشهای سری B.

ابتدای آزمایش، دانه های درشت و دارای درز و ترک شکسته می شوند و به همین لحاظ آهنگ شکستن دانه ها در این لحظات اولیه بیشتر است.

شکست ندارند (آزمایشهای سری A) کاهش می یابد. همچنین با توجه به نمودار تغییرات کرنش حجمی، در ابتدای شبیه سازی در اثر شکستن ذرات، نمونه تراکم بیشتری نسبت به حالت بدون شکست پیدا می کند و در انتهای شبیه سازی، اتساع کمتری از خود نشان می دهد.



شکل ۹: تغییرات شماتیک مقدار شکستگی ( $B_g q_i$ ) نسبت به تنش محوری ( $\sigma_{if}$ ) وارد بر نمونه در لحظه گسیختگی در آزمایش سه محوری.

ذرات کوچک حاصل از شکست در شروع آزمایش در فضای خالی بین سایر ذرات جای می گیرند و نقشی در انتقال نیرو به ذرات مجاور خود ندارند؛ لیکن در مراحل بعدی با ایجاد تراکم بیشتر در مجموعه ذرات و کوچکتر شدن فضاهای خالی، این ذرات ریز نیز در انتقال بار به ذرات مجاور خود نقش پیدا می کنند، در نتیجه با افزایش

### تأثیر فشار همه جانبه بر مقدار شکست دانه ها

تغییرات مقدار شکست ایجاد شده در دانه ها (نسبت تعداد پیوندهای گسیخته شده به پیوندهای اولیه) در طول شبیه سازی، برای آزمایشهای B1 تا B4 در شکل (۸) ملاحظه می گردد. با توجه به این شکل، هر چه مقدار فشار همه جانبه افزایش یافته، مقدار شکست ایجاد شده در مصالح نیز بیشتر شده است. در این شکل، نقطه شروع نمودار (در محل کرنش صفر)، مقدار شکست ایجاد شده در مرحله اعمال فشار هیدرواستاتیک را نشان می دهد و ادامه نمودار بیانگر مقدار شکست در مرحله شبیه سازی آزمایش دو محوری است.

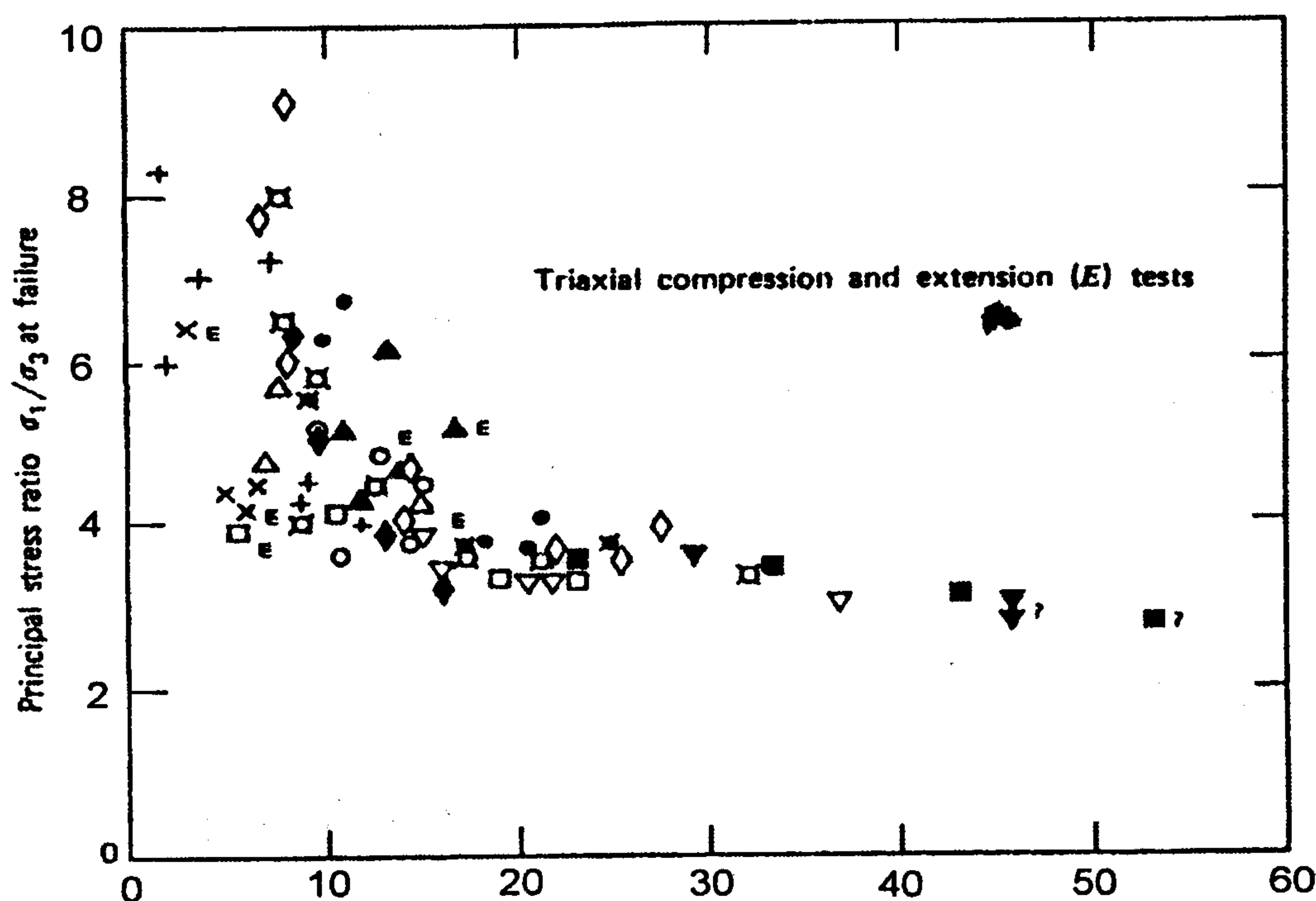
مارشال با انجام آزمایش سه محوری بر روی Rockfill، تغییرات مقدار شکست ذرات را نسبت به تنش محوری نمونه در لحظه گسیختگی آن، به صورت نمودار شماتیک شکل (۹) ارائه نموده است [۱۲]. بنا بر نظر مارشال، در

تعداد ذرات دور هر دانه ، تنشهای متوسط تماسی کاهش یافته و مقدار شکست کمتر می شود .

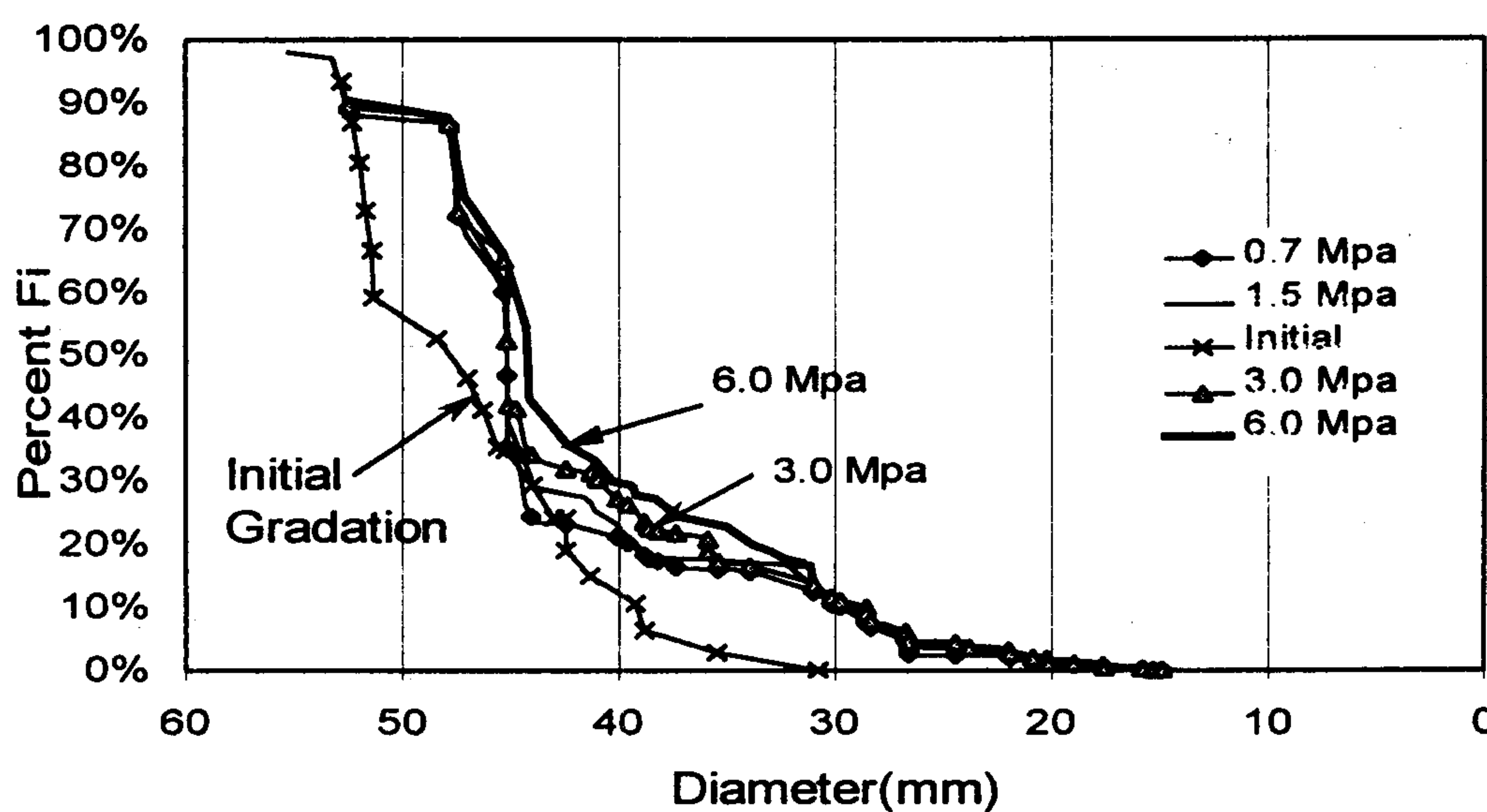
در تمامی نمودارهای نشان داده شده در شکل (۸) ، پدیده شکستن دانه ها در ابتدای شبیه سازی با آهنگ زیادی همراه است و سپس این آهنگ کاهش می یابد، بنابراین تغییرات آهنگ شکستن دانه ها با افزایش کرنش محوری ( و تنش محوری ) در طول یک آزمایش دو محوری شبیه سازی شده نیز تقریباً از رفتار نشان داده شده در شکل (۹) پیروی می کند .

در آزمایشهای تجربی انجام شده توسط مارشال ، مشاهده

شده است که هر چه مقدار شکست بیشتر شود ، نسبت تنشهای اصلی در لحظه گسیختگی نمونه کمتر می گردد ( شکل ۱۰ ) [۱۲] . از مقایسه نمودارهای نشان داده شده در شکلهای (۷) و (۸) ، می توان مشابه همین رفتار را نتیجه گرفت ، زیرا با توجه به شکل (۸) ، هرچه  $\sigma_3$  بیشتر باشد ، مقدار شکست هم افزایش می یابد و از طرفی در شکل (۷) ، ملاحظه می گردد که با فزونی مقدار  $\sigma_3$  (و در پی آن بیشتر شدن شکست ) ، نسبت تنشهای اصلی (رابطه ۳ :  $\sigma_1/\sigma_3 \sim \sin \phi$ ) در هنگام گسیختگی کاهش یافته است .

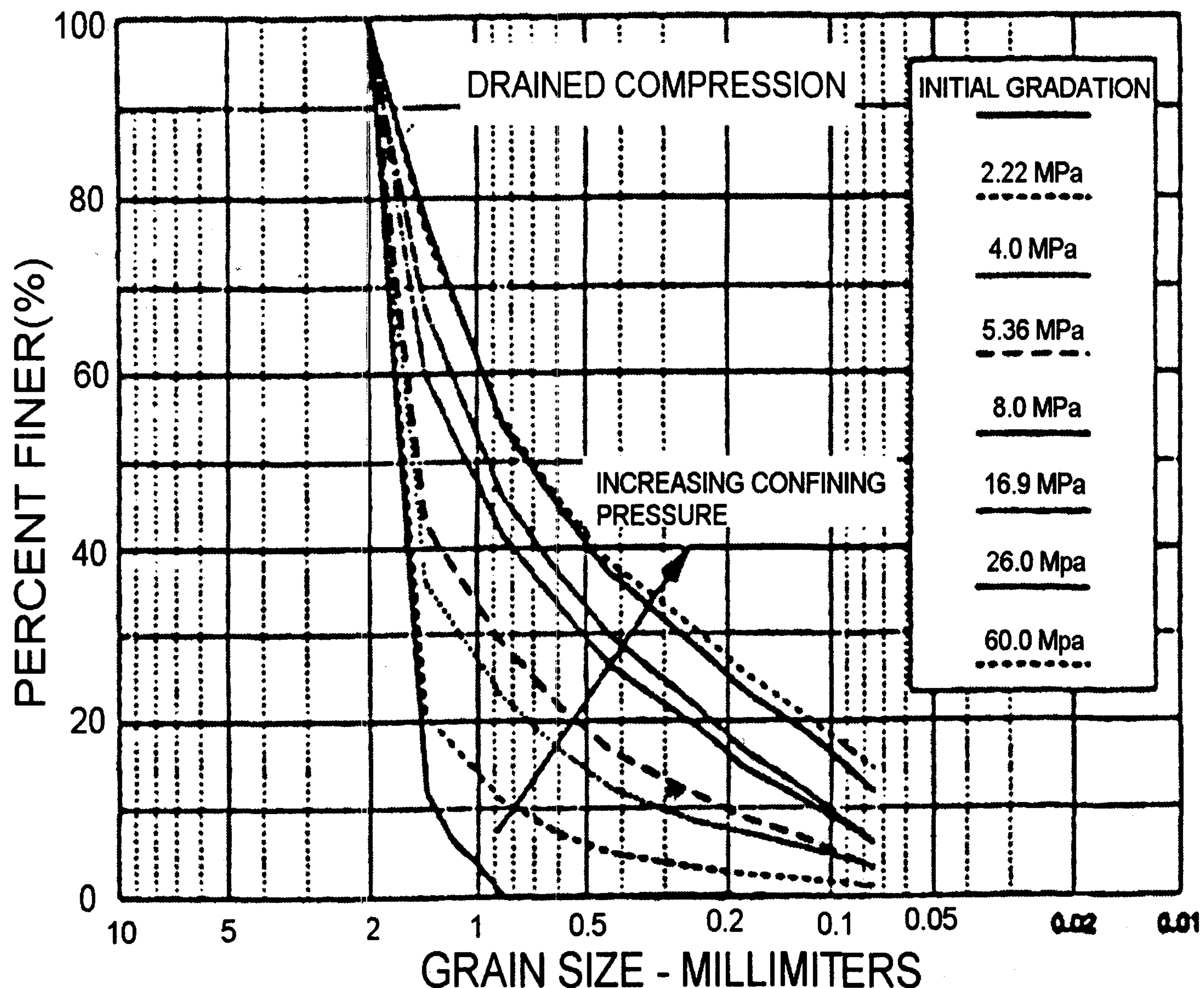


شکل ۱۰ : تغییرات نسبت تنش های اصلی نمونه در مقایسه با مقدار شکستگی دانه ها در آزمایشهای سه محوری مارشال [۱۲].



شکل ۱۱ : تغییرات نمودار دانه بندی نمونه پس از انجام آزمایش دوماحوری سری B.





شکل ۱۲: منحنی دانه بندی ماسه Camberia پس از انجام آزمایش سه محوری فشاری زهکشی شده تحت فشارهای همه جانبه متفاوت [۱۳].

(شکل ۱۲) [۱۳]. البته در روش مدلسازی شکست در این تحقیق، شکل ذرات حاصل از شکستن از پیش تعیین شده و ذرات نمی توانند از یک حد مشخص - که بستگی به میزان حافظه و سرعت پردازش رایانه مورد استفاده دارد - ریزتر شوند، بنابراین با توجه به این محدودیت، امکان دستیابی به بخش ریزدانه مصالح و رسیدن به یک دانه بندی نزدیک به واقعیت وجود ندارد.

### نتایج

مقایسه رفتار شبیه سازی شده مصالح در دو سری آزمایش دو محوری A (بدون امکان شکستن ذرات) و B (با امکان شکستن ذرات)، نشان می دهد که شکستن

### تأثیر شکستن دانه ها بر دانه بندی مصالح

نتایج حاصل از شبیه سازیهای انجام شده را می توان در قالب نمودارهای دانه بندی مصالح، پس از تحمل شکست بررسی نمود. در شکل (۱۱)، منحنی دانه بندی اولیه مصالح (منحنی دانه بندی نمونه متشکل از ذرات یکپارچه) و منحنی های دانه بندی در انتهای شبیه سازیهای سری B (پس از ایجاد شکست در ذرات) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، با افزایش تنش همه جانبه نمودار دانه بندی به حالت خوب دانه بندی شده نزدیکتر می شود. این رفتار مشابه مشاهدات Yamamuro و Lade در آزمایشهای سه محوری انجام شده بر روی ماسه تحت فشار زیاد می باشد

مشاهدات حاصل از آزمایشهای تجربی ، نشانگر آنست که این شیوه مدلسازی می تواند در بررسی تأثیر پدیده شکست بر رفتار مصالح دانه ای مفید واقع شود . بدیهی است هرچه اندازه ذرات تشکیل دهنده یک ذره مرکب کوچکتر باشند ، مدلسازی شکست به واقعیت نزدیکتر خواهد بود .

دانه ها باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش تراکم پذیری مصالح دانه ای می شود . همچنین ملاحظه می گردد که هر چه میزان فشار همه جانبه وارد بر مصالح بیشتر باشد ، میزان شکست ایجاد شده در مجموعه ذرات افزایش یافته و مصالح به حالت خوب دانه بندی شده نزدیکتر می شود . مقایسه نتایج شبیه سازی ها با

## مراجع

- 1 - Bertacchi, P. and Bellotti, R. (1970). "Experimental research on rockfill dams." *10<sup>th</sup> Int. Congress on Large Dams, Montreal* , PP. 511-529.
- 2 - Marachi, N. D., Chan, C.K. and Bolton, H.B. (1972). "Evaluation of properties of rockfill materials." *J. of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 98, No. SM1.
- 3 - Marsal, R. J. (1967). "Large scale testing of rockfill materials." *J. of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 93, No. SM2.
- 4 - Fumagali, E., Moscini, B. and Rossi, P.P. (1970). "Laboratory tests on materials and static models for rockfill dams." *10<sup>th</sup> Int. Congress on Large Dams, Montreal* , PP. 531-551.
- 5 - Mirghasemi, A. A., Rothenburg, L. and Matyas, E. L. (1997). "Numerical simulations of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength." *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 37, No. 3, PP. 43-52.
- 6 - Cundall, P. A., Marti, J., Beresford, P., Last, N. and Asgian, M. (1978) "Computer modelling of jointed rock masses." *Dames and Moore, technical Report N-76-4*.
- 7 - Cundall, P.A. and Hart, R.D. (1985) "Development of generalised 2-D and 3-D distinct element programs for modeling jointed rock." *US Army Engineers, Miscellaneous Paper SL-85-1*.
- 8 - Potapov, A.V., Hopkins, M.A. and Campbell, C.S., (1995). *Int. J. Mod. Phys. C6*. PP.371 & 399.
- 9 - Herrmann, H. J., Garidido, P. L. and Marro, J. (1995). *3<sup>rd</sup> Granada Lectures in Computational Physics*, Springer, Heidelberg.
- 10 - Herrman, H. J. and Roux, S. (1990). "Statistical models for the fracture of disordered media." *N.H. Amesterdam*.
- 11 - Kun, F. and Herrmann, H. J. (1996). "A study of fragmentation process using a discrete element method." *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 138, pp.3-18.
- 12 - Marsal, R. J. (1973) "Mechanical properties of rockfill ." *Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume* , Hirshfeld, R.C. and Poulos, S.J. (eds.), John Wily & Sons Inc., New York , PP. 109-200.
- 13 - Lade, P. V., Yamamuro, J. A. and Bopp, P. A. (1996). "Significance of particle crushing in granular materials." *J. Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 4, PP. 309-316.



- 
- 14 - Cundall, P. A. (1978). "Ball – A computer program to model granular media using distinct element method." *Technical Note TN-LN-13., Advanced Technology Group, Dames and Moore, London.*

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Rockfill
- 2 - MD : Molecular Dynamics.
- 3 - DEM : Discrete(or Distinct) Element Method.
- 4 - Voronoi Construction