

## بررسی شکست ذرات از دید میکرومکانیک بوسیله روش اجزاء مجزا

احسان سیدی حسینی نیا، دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران<sup>x</sup>

علی اصغر میرقاسمی، استادیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران<sup>xx</sup>

<sup>x</sup> [esevedi@ut.ac.ir](mailto:esevedi@ut.ac.ir)

<sup>xx</sup> [aghasemi@ut.ac.ir](mailto:aghasemi@ut.ac.ir)

### چکیده

در سازه های خاکی بلند نظیر سدهای سنگریزه ای، لایه های تحتانی تحت فشار ناشی از لایه های فوقانی قرار گرفته و در نتیجه ذرات آن در معرض شکسته شدن قرار می گیرند. قطعه قطعه شدن ذرات سنگریزه ای و تبدیل شدن به ذرات ریزتر، باعث تغییر دانه بندی شده و در نتیجه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح نیز دستخوش تغییرات قرار می گیرد. یکی از راههای بررسی این پدیده استفاده از شبیه سازی آن بوسیله روش های عددی میباشد. از آنجاییکه محیط خاک از ذرات مجزا و جدا از هم تشکیل یافته، لازم است که در شبیه سازی محیط فوق هر ذره خاک به عنوان یک جسم مستقل در نظر گرفته شود. با کمک روش عددی اجزاء مجزا، می توان پدیده شکست ذرات تحت فشار زیاد را شبیه سازی نمود. در این مقاله با استفاده از یک مکانیزم ساده برای مدل سازی پدیده شکست ذرات تیز گوشه که در آزمایش دوهمچوری شرکت دارند، به مطالعه پدیده شکست بر روی رفتار مجموعه دانه ای پرداخته می شود. با شبیه سازی روند فوق و دستیابی به اطلاعات هر یک از ذرات حین آزمایش دوهمچوری، رفتار کل مجموعه شامل رفتار ماکروسکوپی و میکروسکوپی تحت تأثیر شکست ذرات بررسی گردیده است.

**کلید واژه ها:** روش اجزاء مجزا، شکست ذرات، ضرایب ناهمسانی، آزمایش دوهمچوری

### ۱- مقدمه

رفتار خاکهای دانه ای مثل ماسه بر خلاف رفتار خاکهای ریزدانه نظیر رس متأثر از تنش اعمالی بر مجموعه میباشد. در تنشهای بالا، ذرات خاک ممکن است دچار خردشدگی شوند. شکستن ذرات و تبدیل ذرات درشت به ذرات ریزتر باعث ایجاد تغییراتی در منحنی دانه بندی و در نتیجه تغییر در خصوصیات فنی مصالح دانه ای می گردد. این پدیده در بناهای خاکی بلندی همچون سدهای خاکی، سدهای سنگریزه ای و موج شکن ها رخ می دهد، مخصوصاً در لایه های زیرین که تحت وزن لایه های فوقانی قرار گرفته اند، این رخداد بیشتر است. در این مقاله نتایج آزمایش های دوهمچوری که در آنها شکست ذرات بوسیله روش عددی اجزاء مجزا شبیه سای شده است، ارائه گردیده و با آزمایش های بدون پدیده شکست مقایسه و رفتار مجموعه از نظر ماکرو و میکروسکوپی مطالعه شده است.

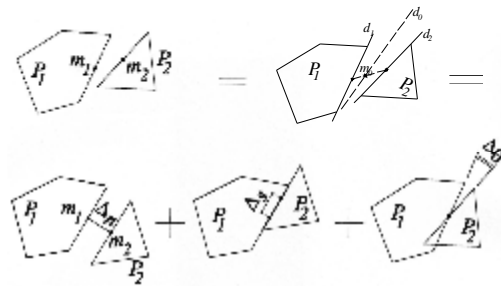
## ۲- مروری بر تحقیقات گذشته

محققان متعددی با انجام آزمایشهای تجربی گوناگون بر روی خاکهای درشت دانه، تأثیر پدیده شکست ذرات بر خصوصیات فنی مصالح دانه‌ای همچون مقاومت برشی، تغییرشکل پذیری و نفوذپذیری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. (برای نمونه: Marsal (1964-67), Fumagali et al.(1970), (Marachi et al.(1972), Bopp(1994), Yamamuro et al.(1996), Varadarajan et al.(2003) نتایج مطالعات انجام شده، نشانگر آن است که در یک توده مصالح دانه‌ای هرچه ذرات بیشتری شکسته شوند، مقاومت برشی و نفوذپذیری مصالح دانه‌ای کمتر و تراکم پذیری آن بیشتر خواهد شد. به عنوان مثال، به منظور تعیین خصوصیات فنی و رفتار مصالح سنگریزه‌ای در دو پروژه Purmlia و Ranjit Sagar در هند، چندین آزمایش فشاری سه محوری توسط (A.Varadaragan te al.( 2003) انجام شده است. مصالح بکارگرفته شده در پروژه Ranjit Sagar مصالح رسوبی گردگوشه و مصالح موجود در پروژه Puralia، مصالح سنگریزه‌ای تیز گوشه می باشد. نتایج نشان می دهد مقدار ضریب شکست با افزایش فشار همه جانبه افزایش می یابد. همچنین هر چه اندازه ذرات بزرگتر و تیز گوشه تر باشند، ضریب شکست بزرگتر می گردد. محققان دیگری نیز مواردی نظیر بزرگی تنش وارد بر مصالح، اندازه ذرات، شکل ذرات و دانه بندی مصالح را در مقدار شکست ذرات موثر می دانند. مطالعه رفتار محیط های دانه ای از طریق انجام آزمونهای آزمایشگاهی نظیر آزمایش سه محوری بزرگ مقیاس میسر می باشد. لیکن انجام این آزمایشها نسبتاً پرهزینه و فراتر از امکانات آزمایشگاههای معمول مکانیک خاک می باشد. علاوه بر آزمایشهای تجربی، یک راه حل مناسبتر برای مطالعه محیطهای دانه ای، شبیه سازی دانه ها به صورت عددی و استفاده از روش اجزاء مجزا می باشد. در این صورت، با مطالعه میکرومکانیک محیطی که از اجزای مجزایی تشکیل شده است، نظیر نحوه آرایش دانه ها در محیط، جابجایی ذرات نسبت به هم جهت باربری مجموعه تحت بار، تماسهای ذرات با هم و چگونگی خرد شدن ذرات، می توان به دلایل تغییر رفتار در یک توده دانه ای پی برد.

## ۳- روش شبیه سازی شکست ذرات

در این شیوه مدلسازی فرض می شود که هر قطعه سنگ تنها بتواند در امتداد تعدادی خط مستقیم، با راستا و موقعیت مشخص شکسته شود (موسوی نیک، ۱۳۷۸). بنابراین، شکل قطعات 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 مبنا و ریز ذرات پیوندی  $P_1$  و  $P_n$  را ریز ذرات هم مبنا می نامیم. فرض می شود هر دو ذره پیوندی که دارای وجه مشترک هستند، از طریق یک اتصال به عنوان پیوند در وسط وجه مشترک

خود به یکدیگر متصل شده باشند (نقاط  $m_1$  و  $m_2$  در شکل ۱). اگر در حین شبیه سازی، تنش ایجاد شده در اتصال بین دو ذره از تحمل آن بیشتر گردد، اتصال گسیخته شده و با جدا شدن دو ذره پیوندی از یکدیگر، شکست رخ می دهد.



شکل ۱: تفکیک جابجایی نسبی دو ذره پیوندی به سه جابجایی نسبی قائم، برشی و دورانی

برای مدلسازی اتصال بین دو ذره دارای پیوند، از دو فنر خطی و یک فنر پیچشی استفاده می شود. یکی از فنرهای خطی در جهت عمود بر وجه مشترک دو ذره به عنوان فنر قائم و فنر خطی دیگر در جهت موازی با وجه مشترک دو ذره به عنوان فنر برشی عمل می کند. مقادیر نیرو و لنگر در محل اتصال بین دو ذره پیوندی، با توجه به جابجایی نسبی آن دو محاسبه می گردد. بدین ترتیب که برای محاسبه نیرو و لنگر وارد بر هر ذره، جابجایی نسبی دو ریزذره پیوندی  $P_1$  و  $P_2$  به سه جابجایی نسبی قائم  $(\Delta n)$ ، جابجایی برشی  $(\Delta s)$  و دورانی  $(\Delta \theta)$  تفکیک می گردد. در این صورت نیروی قائم، نیروی برشی و لنگر ایجاد شده در اتصال به کمک روابط زیر قابل محاسبه است:

$$F_n Bond = K_n Bond \cdot D_n$$

$$F_s Bond = K_s Bond \cdot D_s$$

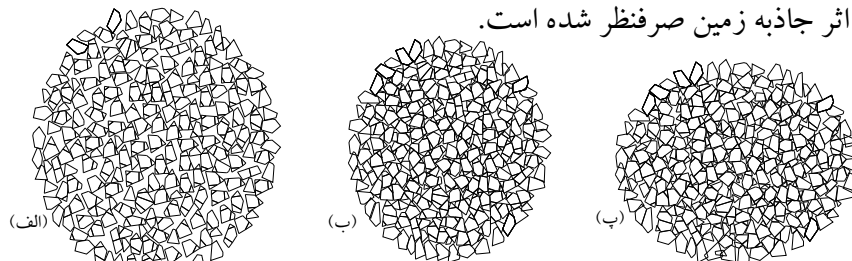
(۱)

$$M Bond = K_q Bond \cdot D_q$$

که در این رابطه،  $K_n$ ،  $K_s$  و  $K_q$  به ترتیب سختی های نرمال، برشی و چرخشی می باشند.

#### ۴- شبیه سازیها

به منظور بررسی اثر شکست ذرات بر خصوصیات مصالح دانه ای، دوسری آزمایش دو محوری شامل آزمایش WNB که در آن تمام ذرات غیر قابل شکست هستند و گروه WB که در آن ذرات سالم یکپارچه با ریز ذرات تشکیل دهنده آنها جایگزین شده است، شبیه سازی شده اند. همچنین در شبیه سازی ها، از اثر جاذبه زمین صرف نظر شده است.



شکل ۲: (الف) مجموعه ذرات غیر متراکم؛ (ب) مجموعه ذرات متراکم شده و به تعادل رسیده؛ (پ) نمونه گسیخته

شده در مرحله نهایی شبیه سازی آزمایش دو محوری

مراحل مختلف آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است. ابتدا مجموعه ذرات تولید شده متراکم شده، سپس تحت فشار هیدرواستاتیک معین قرار گرفته و نهایتاً در شرایط آزمایش دو محوری تحت برش قرار می گیرد. در این مرحله، تنش در راستای افق ثابت نگه داشته شده و نمونه در راستای قائم با نرخ کرنش ۰/۰۰۵ فشرده می گردد. نمونه مورد نظر در این مقاله تحت تنش همه جانبه ۲ مگاپاسکال انجام گرفته است. پارامترهای به کار گرفته شده در آزمایشهای گروه  $WNB$  و  $WB$  به شرح جداول ۱-الف و ب می باشد.

**جدول ۱:** پارامترهای به کار گرفته شده در (الف) آزمایش بدون امکان شکست؛ (ب) آزمایش با امکان شکست

(ب)	
$2.0 \times 10^7$	سختی فنرهای نرمال و برشی (N/m)
2500	جرم مخصوص ذرات ( $kg/m^3$ )
150	ضریب میرایی انتقالی (1/sec)
900	ضریب میرایی دورانی
$1.52E-4$	گام زمانی (sec)
0.005	نرخ اعمال کرنش (%)
$9.0 \times 10^4$	مدول الاستیسیته ( $MN/m^2$ )
350	مقاومت فشاری ( $MN/m^2$ )
35	مقاومت کششی ( $MN/m^2$ )
75	چسبندگی محل شکست ( $MN/m^2$ )
1.60	ضریب اصطکاک محل شکست

(الف)	
$2.0 \times 10^7$	سختی فنرهای نرمال و برشی (N/m)
2500	جرم مخصوص ذرات ( $kg/m^3$ )
75	ضریب میرایی انتقالی (1/sec)
450	ضریب میرایی دورانی
$3.2E-4$	گام زمانی (sec)
0.005	نرخ اعمال کرنش (%)

## ۵- ارائه نتایج

در این قسمت به ارائه نتایج ماکرو و میکروسکوپیکی حاصل از آزمایش های دو محوری می پردازیم :

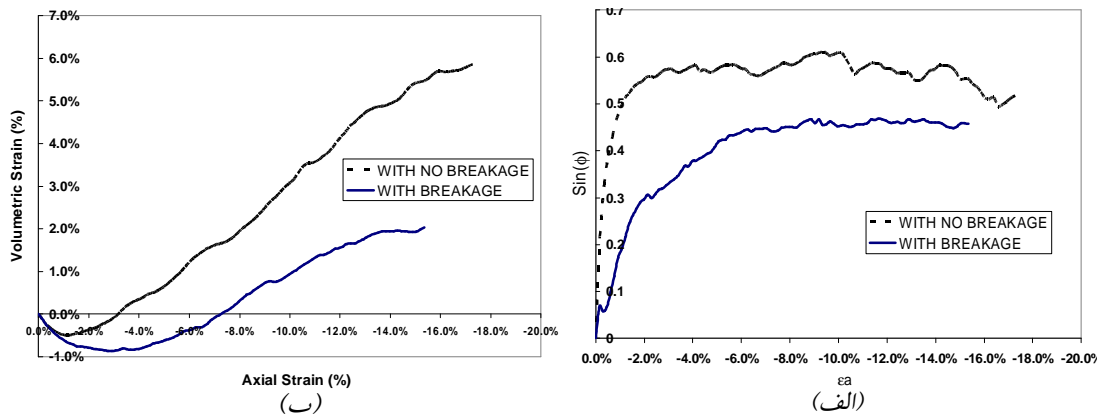
### ۵-۱- مشاهدات ماکروسکوپیکی

در شکل ۳، نمودارهای تغییرات مقاومت برشی و کرنش حجمی نمونه آزمایش نسبت به کرنش محوری تحت فشار همه جانبه ۲ مگاپاسکال در شبیه سازیهای  $WNB$  و  $WB$  ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می شود، زاویه اصطکاک داخلی مجموعه در کرنش های کوچک رشد کرده و در کرنشهای بزرگ به مقدار ثابتی می رسد. می توان مقاومت برشی بسیج شده مجموعه ( $Sinf mobilized$ ) را بر حسب تنش های اصلی از رابطه ۲ بدست آورد.

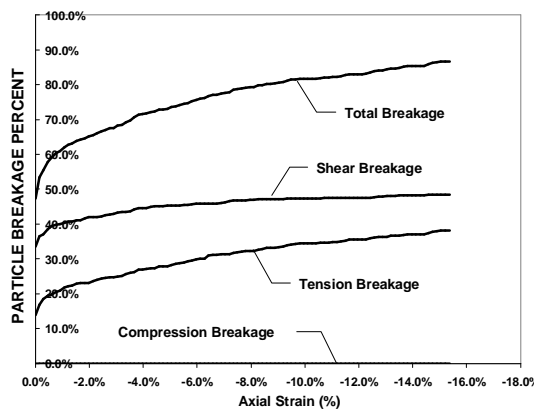
$$\sin f = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (2)$$

با توجه به این نمودارها ملاحظه می گردد در حالتی که شکستن ذرات ممکن باشد، مقاومت برشی مصالح دانه ای نسبت به حالتی که ذرات امکان شکست ندارند کاهش می یابد و از طرفی از رشد کندتری برخوردار است. 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 ۳: (الف) منحنی تغییرات  $\sin(\phi)$ ؛ (ب) کرنش حجمی؛ نسبت به کرنش محوری



شکل ۴: منحنی تغییرات انواع مکانیزم شکست نسبت به کرنش محوری

تغییرات مقدار شکست ذرات حین آزمایش با توجه به سه مد فشاری، برشی و کششی در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، ذرات به فشار نشکسته اند و در عین حال بیشترین حالتی که موجب قطعه قطعه شدن ذرات شده است، مد برشی می باشد. همچنین مشاهده می شود که

در ابتدای آزمایش و در کرنش های کوچک، نرخ شکست ذرات، بالا و با افزایش کرنش محوری کاهش می یابد. این نتایج تطابق کامل با نتایج حاصل از تحقیقات مارشال در آزمایشات سه محوری بر روی مصالح سنگریزه ای دارد.

### ۵-۲- رفتار میکروسکوپی

در یک مجموعه دانه ای، تماس ذرات با هم و انتقال نیرو، بستگی به جابجایی ذرات نسبت به هم، شکل ذرات و همچنین خصوصیات سطح اصطکاکی بین آنها دارد. در یک مجموعه محیط دانه ای دو بعدی که ذرات در جهات مختلف با هم در تماسند با کمک اصول میکرومکانیک، می توان تابع توزیع تماسی  $E(\theta)$  را بدست آورد (Rothenburg, 1980). رابطه زیر برای توزیع تماسی ارائه شده است:

$$E(q) = \frac{1}{2p} [1 + a \cos 2(q - q_0)] \quad (3)$$

که در آن،  $a$  ضریب ناهمسانی تماسی نامیده می شود.  $q$  محور ناهمسانی را مشخص می کند و همواره در جهت تنش اصلی حداکثر منطبق است.  $E(\theta)$  نشانگر تعداد تماسهایی می باشد که در راستای  $\theta$  قرار گرفته باشد.

مشابه آنچه برای توزیع نرمال تماسی بیان شد، برای توزیع نیروی نرمال و برشی تماسی روابط ۴ و ۵ توسط *Rothenburg & Bathurst (1989)* ارائه شده است:

$$\bar{f}_n(q) = \bar{f}_n^0 [1 + a_n \cos 2(q - q_f)] \quad (4)$$

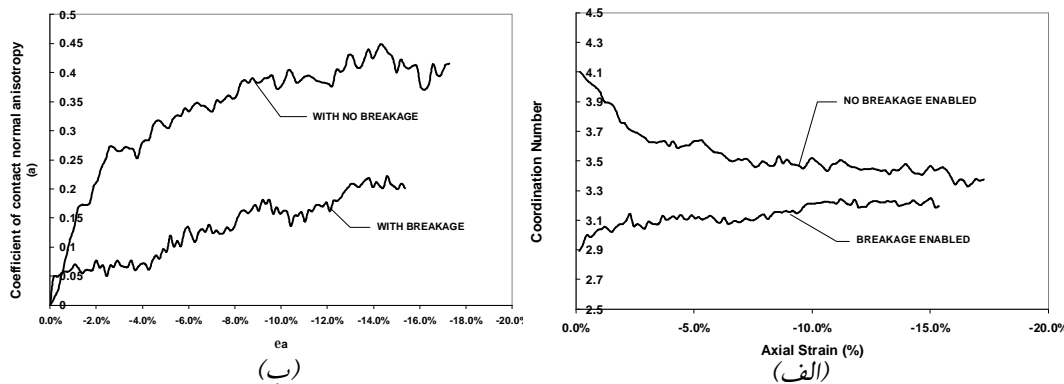
$$\bar{f}_t(q) = -\bar{f}_n^0 [a_t \sin 2(q - q_f)] \quad (5)$$

که در آن  $a_t$ ،  $a_n$  به ترتیب ضریب ناهمسانی نیروهای نرمال و نیروهای برشی و  $\theta_f$  جهت ناهمسانی نیروی می باشد.  $\bar{f}_n^0$  مقدار میانگین کل نیروهای نرمال تماسی در یک مجموعه دانه ای می باشد.

با بکارگیری روابط حاصل از پارامترهای میکرومکانیکی، رابطه ای بین مقاومت نمونه و پارامترهای غیر

همسانی حاصل می شود:

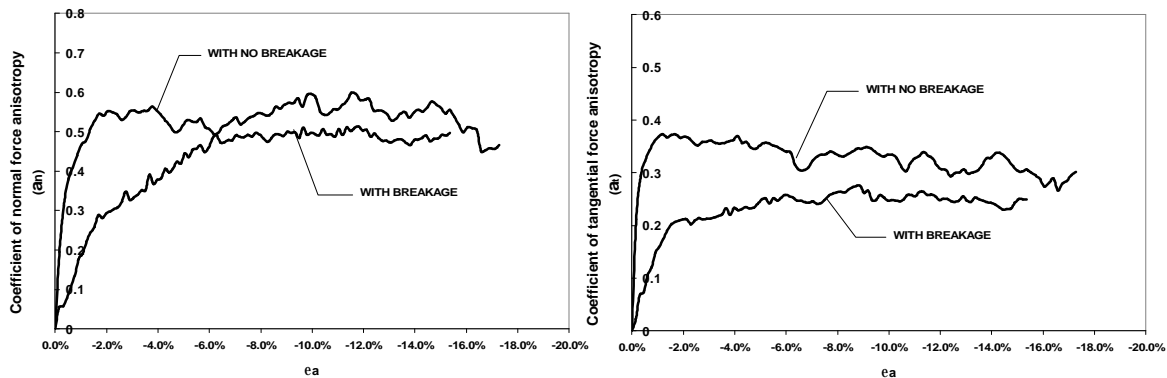
$$\frac{s_{22} - s_{11}}{s_{22} + s_{11}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{a + a_n + a_t}{1 + 2a_n} \right] \quad (6)$$



شکل ۵: (الف) تغییرات عدد همبستگی (ب) تغییرات ضریب ناهمسانی تماسی با کرنش محوری

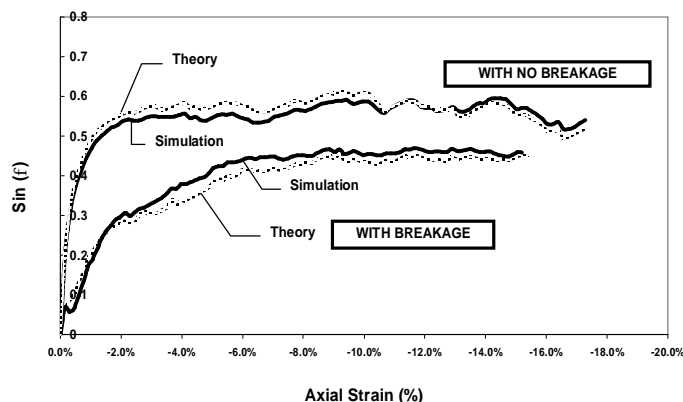
به تعداد تماس های فیزیکی یک ذره با ذرات مجاورش عدد همبستگی (Coordination Number) گویند. واضح است که هرچه قدر عدد همبستگی بزرگتر باشد، تراکم نمونه بیشتر می باشد. همانطور که در شکل ۵-الف) مشاهده می شود تغییرات متوسط عدد همبستگی در دو آزمایش WB, WNB رفتار متفاوتی از خود نشان می دهند. در آزمایش WNB، با افزایش کرنش محوری عدد همبستگی رفتار کاهشی دارد تا اینکه در نهایت در کرنش های بزرگ، به مقدار ثابتی برسد که دلیل آن کاهش تعداد تماس های درون توده در جهت افق بخاطر جهت گیری دانه ها در جهت قائم (در جهت اعمال کرنش محوری) می باشد. در WB نیز این پدیده بوقوع می پیوندد، ولی در این مورد ذرات قابل شکسته شدن هستند و باید این پدیده را دلیل بر تغییر رفتار مجموعه دانه ای فوق دانست. بر اثر قطعه قطعه شدن ذرات، هم تعداد ذرات مستقل در محیط آزمایش افزایش می یابد و هم اینکه به دلیل کوچکتر بودن ریزذرات و قرار گیری بین ذرات دیگر، امکان داشتن تعداد تماس های بیشتری با ذرات مجاور خود پیدا می کند.

در شکل ۵- (ب)، منحنی تغییرات ضریب ناهمسانی تماسی مشاهده می شود که پدیده شکست ذرات فعال و غیرفعال بوده است. همانطور که مشاهده می شود، در هر دو آزمایش  $WNB$  و  $WB$  ضریب  $a$  از مقدار صفر شروع شده و با افزایش کرنش محوری اعمالی، رشد می کند. با وجود این، ضریب  $a$  در آزمایش  $WNB$ ، سریعاً افزایش یافته و به مقدار ثابتی می رسد، در حالیکه در آزمایش های گروه  $WB$ ، ضریب فوق با افزایش کرنش محوری، به صورت تدریجی رشد کرده به طوریکه در کرنش های بزرگ همچنان تمایل به افزایش از خود نشان می دهد. همچنین مشاهده می شود که همواره ضریب فوق در آزمایش  $WB$  کوچکتر از آزمایش  $WNB$  می باشد.



شکل ۵: منحنی تغییرات ضریب ناهمسانی (الف) نیروی نرمال؛ (ب) نیروی برشی نسبت به کرنش محوری (ب)

در شکل ۶ منحنی های تغییرات ضرایب ناهمسانی نیروی نرمال و نیروی تماسی ( $a_n$ ,  $a_t$ ) نسبت به کرنش محوری اعمالی در آزمایش های دو محوری، نشان داده شده است. در آزمایش  $WNB$ ، ضریب ناهمسانی نیروی نرمال ( $a_n$ ) سریعاً به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس با تغییرات کندی، کاهش افزایش می یابد. در گروه آزمایش  $WB$ ، روند تغییرات  $a_n$  متفاوت است. بدین ترتیب که از همان ابتدا به صورت تدریجی افزایش می یابد بدون اینکه به مقدار بیشینه برسد تا اینکه در کرنش های بزرگ مقدار آن ثابت می شود. رفتار ضریب ناهمسانی  $a_t$  در آزمایش  $WB$  نیز مشابه گروه  $WNB$  می باشد ولی هنگامی که شکست در دانه ها رخ دهد، نیروی برشی بین ذرات دیرتر بسیج می شود که دلیل آن بخاطر عدم تحمل برش میان پیوند ریزذرات می باشد. همچنین قابل ذکر است که مقادیر  $a_t$  در گروه  $WB$ ، کمتر از مقادیر ضریب فوق در گروه آزمایش  $WNB$  می باشد.



شکل ۶: ارزیابی رابطه مقاومت برشی با ضرایب ناهمسانی

در ادامه، منحنی های مقاومت برشی ( $\sin f$ ) حاصل از (۱) اندازه گیری تنش های مجموعه (۲) محاسبه با کمک ضرایب ناهمسانی در شکل ۷، ارائه می گردد. منحنی های فوق، صحت و درستی برقراری رابطه ۶ را برای محیط های دانه ای تیز گوشه در حالت های بدون پدیده شکست و با در نظر گرفتن پدیده شکست، بیان می دارد.

## ۶- خلاصه و نتیجه گیری

نتایج نشانگر آن است که با شکسته شدن ذرات تحت بار، مقاومت برشی کاهش و در عوض تراکم پذیری نمونه افزایش می یابد. همچنین از نظر میکروسکوپیکی پدیده شکست باعث می شود تا نمونه نسبت به حالتی که ذرات نمی توانند بشکنند، رفتاری همگن تر از خود نشان دهد. همچنین مشاهده شد که می توان با مطالعه پارامترهای میکرومکانیک مجموعه دانه ای، رفتار ماکروسکوپیکی آن را مورد بررسی قرار داد به طوریکه هرچه ناهمسانی نمونه بیشتر باشد مقاومت برشی آن نیز بالاتر است. در پایان صحت رابطه ای که مقاومت برشی را بر حسب ضرایب ناهمسانی نشان می دهد برای نمونه ای متشکل از ذرات قابل شکست مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۷- مراجع

- [1] 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.
- [2] Marsal, R.J. (1967). "Large Scale Testing of Rockfill Materials", *J.of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.93, No. SM2.
- [3] 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.
- [4] Rothenburg, L., Bathurst, R.J. & Dusseault, M.B. (1989). "Micromechanical ideas in constitutive modeling of granular materials", *Powders and Grains, Biazeez & Gourves(eds)*, 1989 Balkema, Rotterdam. ISBN 906191 984 3
- [5] Mirghasemi, A.A., Rothenburg, L. and Matyas, E.L.(2002) Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles, *Geotechnique* 52, No.3, 209-217
- [6] Mirghasemi, A.A., Mousavi Nik, R. (2001), "Influence of particle breakage on mechanical behavior of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles", "Proc. of 54<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Alberta, 614-620
- [7] Varadarajan, A, Sharma, K.G., Venkatachalam, K. & Gupta, A.K., "Testing and modeling two rockfill materials", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, March 2003
- [۸] سیدی حسینی نیا، احسان(۱۳۸۳)، "بررسی شکست ذرات از دید میکرومکانیک به کمک روش المانهای مجزا"، پایان

نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران