

## ارزیابی عوامل مؤثر بر شکست مصالح دانه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزای مجزا

علی امین‌زاده<sup>۱</sup>؛ احمد فهیمی‌فر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۷

### چکیده

بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، پارامترهای گوناگونی بر رفتار مصالح دانه‌ای تأثیر دارند. در این مقاله، تأثیر تنش همه‌جانبه، شکل و حالت شکست دانه‌ها بر گسترش شکست ذرات در مصالح دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. برای رسیدن به این منظور، از شبیه‌سازی عددی چندین آزمون دومیحوری به کمک روش اجزای مجزا استفاده می‌شود. روش‌های عددی علاوه بر مزایایی مانند ارزان و سریع بودن، قابلیت تمرکز بر روی یک یا چند پارامتر خاص را نیز دارند. برای هر کدام از پارامترهای مورد بررسی، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به صورت منحنی‌های درصد شکست ذرات نسبت به تنش همه‌جانبه ترسیم می‌گردد. آزمایش‌ها برای سه شکل مختلف از ذرات (سه، چهار و شش گوشه‌ای) که دارای دو حالت شکست متفاوت (تقسیم به دو قسمت مساوی یا فرسایش گوشه‌های تیز) هستند اجرا شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش هر دو پارامتر تیز گوشه‌گی و تنش همه‌جانبه باعث گسترش شکست ذرات نمونه‌ها می‌شود. علاوه بر این، حالت شکست نیز تأثیر قابل توجهی در میزان شکست ذرات دارد. در نهایت، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی با کد اجزای مجزای استفاده‌شده در این تحقیق با نتایج عددی و تجربی حاصل از کارهای گذشته در یک نمودار مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج، تطابق قابل قبول بین آن‌ها را نشان می‌دهد. اختلافاتی نیز در نتایج به چشم می‌خورد که ممکن است ناشی از دوبعدی بودن شبیه‌سازی و همچنین تفاوت در نحوه در تعریف شکست در آزمایش‌های تجربی با عددی باشد؛ بنابراین در مجموع، استفاده از کد مورد نظر برای شبیه‌سازی‌های آبی مناسب به نظر می‌رسد.

شکست ذرات، مصالح دانه‌ای، روش اجزای مجزا، شکل ذرات، تنش همه‌جانبه

واژگان کلیدی

\*. ایران، تهران، خیابان حافظ ۴۲۴، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ساختمان عمران شماره ۲، اتاق ۷۱۱، کد پستی ۱۵۹۱۶۳۴۳۱۱

تلفن ثابت: ۰۲۴۳-۶۴۵۴۳۰۱۱، تلفن همراه: ۰۹۱۵۳۲۵۷۴۵۰، نمابر: ۰۱۱ ۶۴۵۴۳۰۱۱

آدرس پست الکترونیک: [fahim@aut.ac.ir](mailto:fahim@aut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

پارامترهای مختلفی بر رفتار مصالح دانه‌ای مثل خاک‌ها و سنگ‌ها اثر می‌گذارند که از جمله آن‌ها می‌توان به سطح تنش همه‌جانبه‌ی واردشده، تراکم، دانه‌بندی، شکل ذرات، جنس ذرات و همچنین مقدار و نحوه شکست ذرات اشاره کرد. به‌منظور تحقیق در مورد رفتار مکانیکی محیط‌های دانه‌ای می‌توان از آزمایش‌های تجربی استفاده نمود. از جمله این آزمایش‌ها می‌توان از آزمایش تک‌محوری، سه محوری و کرنش صفحه‌ای نام برد. با توجه به تحقیقات انجام‌شده در مورد تأثیر عواملی همچون شکل و شکست دانه‌ها و تنش همه‌جانبه مشاهده می‌شود که توجه به این عوامل در مطالعه رفتار مصالح دانه‌ای اجتناب‌ناپذیر است. خرد شدن ذرات منجر به تغییر در خصوصیات فنی و مکانیکی مصالح دانه‌ای همچون مقاومت برشی، تغییر شکل‌پذیری و نفوذپذیری می‌شود [۱-۶]. رفتار مکانیکی نمونه‌ی ذرات مصالح دانه‌ای با تغییر شکل ذرات تشکیل‌دهنده آن تغییر می‌کند. محققان مختلفی بر روی تأثیر شکل ذرات بر روی رفتار مکانیکی خاک مطالعه کرده‌اند. [۷-۱۱] با توجه به تحقیقات انجام‌شده بر روی تأثیر عواملی همچون شکل و شکست دانه‌ها و تنش همه‌جانبه مشاهده می‌شود که توجه به این عوامل در مطالعه رفتار خاک اجتناب‌ناپذیر است. بیشتر این آزمون‌ها برای تنش‌های همه‌جانبه مختلف تکرار شده‌اند.

انجام چنین آزمایش‌هایی گاه بسیار پرهزینه و دشوار می‌باشد؛ بنابراین، از روش‌های عددی به‌عنوان جایگزین مناسبی برای چنین آزمون‌هایی استفاده می‌شود. با کمک شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان تأثیر عوامل مختلف (مانند شکل، اندازه، دانه‌بندی و شکست ذرات، تنش همه‌جانبه و غیره) را بر روی رفتار محیط دانه‌ای به تفکیک یا به‌طور هم‌زمان بررسی نمود و اهمیت هرکدام از عوامل را با سایر عامل‌ها مقایسه کرد. این روش علاوه بر ارزان‌تر بودن، به تجهیزات ویژه نیز نیاز ندارد. در این پژوهش، از روش اجزای مجزا<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

روش اجزای مجزا نخستین بار توسط Cundall (1971) به‌منظور شبیه‌سازی محیط‌های دانه‌ای ارائه شد و این امکان را فراهم نمود که نمونه‌ای متشکل از مجموعه‌ای از ذرات موردبررسی قرار گیرد. نخستین برنامه‌ی رایانه‌ای که بر اساس

اجزای مجزا معرفی شد، BALL نام دارد که به‌منظور مدل‌سازی دوبعدی محیط‌های دانه‌ای که از ذرات دایروی تشکیل شده‌اند، تهیه شد. [۱۲، ۱۳] او از این روش برای تغییر شکل مجموعه‌ی سنگ‌های بلوکی استفاده نمود. پس از آن، برنامه‌های رایانه‌ای دیگری برای شبیه‌سازی محیط‌های دانه‌ای متشکل از ذرات بیضی‌شکل [۱۴] و ذرات تیز گوشه چندضلعی [۱۵] معرفی شدند.

برنامه‌ی POLY که برای مدل‌سازی محیط‌های متشکل از ذرات دوبعدی تیز گوشه ارائه شده است [۱۵] و نسخه‌ی تغییر یافته‌ی آن از برنامه‌ی BALL [13] می‌باشد، جهت مدل‌سازی شکسته شدن ذرات چندضلعی تیز گوشه دوبعدی اصلاح گردیده [۱۶] و برای بررسی اثر شکل و شکست ذرات بر رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای استفاده شده است [۱۷]. کد موردنظر M-POLY نام دارد و مبنای کار پژوهش حاضر قرار گرفته است.

تاکنون توسط برنامه‌ی M-POLY، تأثیر عواملی همچون فشار همه‌جانبه و شکست ذرات [۱۸] و همچنین ناهمسانی<sup>۲</sup> [۱۹] بر رفتار مکانیکی محیط‌های دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، علاوه بر بررسی عواملی مانند شکست ذرات و فشار همه‌جانبه تأثیر هم‌زمان شکل ذرات و همچنین نحوه‌ی شکست آن‌ها بر رفتار خاک دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. با مروری در ادبیات گذشته، روشن است که تاکنون به تأثیر این عوامل به‌طور هم‌زمان چندان پرداخته نشده است. علاوه بر این، نحوه‌ی شکست ذرات نیز از عواملی است که هنوز در تحقیقات انجام‌شده اطلاعات بسیار کمی در مورد آن موجود می‌باشد و بیشتر به پدیده‌ی شکست ذرات پرداخته شده است اما در مورد نحوه‌ی شکست آن‌ها نتایج زیادی مشاهده نمی‌شود.

## ۲- استفاده از روش اجزای مجزا

برای شبیه‌سازی برهم‌کنش بین ذرات، از سیستم جرم و فنر به همراه میراگر استفاده می‌شود. با توجه به این که در سیستم موجود، ذرات دارای انرژی جنبشی هستند، برای کاهش این انرژی و رسیدن به حالت تعادل استاتیکی، استفاده از میراگر لازم است. در شکل ۱ نمونه‌ای از این نوع شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای هر ذره

هنگامی که دو ذره باهم برخورد کنند، نیروهای عمودی و برشی میان آنان ایجاد می‌شود. برای نمایش نیروی عمودی از  $F_n$  و برای نمایش نیروی برشی از  $F_s$  استفاده می‌شود. ذرات فاقد چسبندگی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، هیچ نیروی کششی در محل برخورد دو ذره ایجاد نمی‌گردد. اگر  $F_n \leq 0$  شود، تماس میان ذرات از بین می‌رود و از یکدیگر جدا می‌شوند. از قانون اصطکاک کولمب برای محاسبه نیروی اصطکاک بین دو ذره دارای برخورد استفاده می‌شود. برای محیط‌های دانه‌ای فاقد چسبندگی، قانون کولمب به صورت  $F_s^{\max} = F_n \cdot \tan \phi$  نوشته می‌شود ( $\phi$  زاویه اصطکاک در محل تماس دو ذره است). ذراتی که باهم برخورد دارند، می‌توانند با یک ضریب اصطکاک ثابت در محل تماس با یکدیگر بلغزند. اگر نیروی برشی یا مماسی ( $F_s$ ) در محل برخورد دو ذره از حداکثر مقدار نیروی اصطکاک بیشتر شود، لغزش اتفاق می‌افتد. مقدار نیروی برشی وارد بر ذرات با حفظ علامت اولیه خود به حداکثر مقدار خود برابر  $|F_s^{\max}|$  محدود می‌شود (یعنی همواره  $F_s \leq F_s^{\max}$  می‌باشد)، که مقدار  $F_s^{\max}$  نیز از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$F_s^{\max} = \mu \cdot F_n \quad (1)$$

که در آن  $\mu = \tan \phi$  ضریب اصطکاک بین دانه‌ای است. اگر بین دو ذره لغزش رخ دهد، میرایی تماسی در جهت مماس بر محل برخورد ذرات ( $C_s$ )، اعمال نمی‌شود.

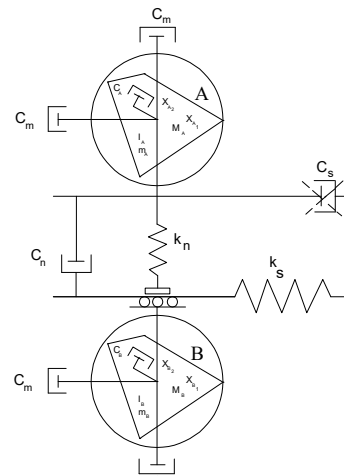
### ۳- روش آزمایش

کد مورد استفاده در این مقاله (POLY)، پدیده شکست ذرات تیز گوشه را جهت مطالعه اثر آن بر رفتار نمونه‌ای از مصالح همچون سنگ‌ریزه‌ها شبیه‌سازی می‌کند. در این کد، شبیه‌سازی پدیده شکست ذرات به گونه‌ای انجام گیرد که تا حد امکان از حجم محاسبات و تعداد المان‌های مورد نیاز کاسته شود. بدین منظور ذرات در فضای دوبعدی در نظر گرفته شده‌اند.

در روش مذکور، فرض شده است که هر ذره تنها بتواند در امتداد تعدادی خط مستقیم، با راستا و موقعیت مشخص شکسته شود. این خطوط به شکلی در نظر گرفته شده‌اند که یک ذره سالم تبدیل به چند ریز ذره شود؛ بنابراین، شکل قطعات حاصل از شکست ذره اولیه از ابتدا مشخص فرض می‌شود. مطابق شکل ۲-الف فرض می‌شود که ذره P فقط در

مانند A و B (که به صورت یک چندضلعی محدب می‌باشد) یک محور مختصات محلی تعریف شده است. از طرفی، مبدأ مختصات محلی هر ذره بر روی مرکز ثقل آن (مرکز سطح ذره) قرار دارد. همچنین، شعاع معادل این چندضلعی که برابر با فاصله دورترین گوشه‌ی چندضلعی نسبت به مرکز ثقل آن می‌باشد توسط برنامه محاسبه می‌گردد؛ بنابراین، برنامه به جای چندضلعی دایره‌ای را در نظر می‌گیرد که مرکز آن منطبق بر مرکز ثقل و شعاع آن برابر شعاع معادل ذره می‌باشد. این دایره معادل، دایره محیطی ذره نامیده می‌شود. فزنی که در راستای خط واصل مراکز جرم ذرات (مرکز دایره‌ی محیطی ذره) است، نماینده سختی عمودی بوده که با  $K_n$  نشان داده می‌شود و فزنی که در راستای عمود بر خط اتصال دو مرکز است، نشان‌دهنده سختی برشی می‌باشد که با  $K_s$  نمایش داده می‌شود.

علاوه بر سختی در تماس بین دو ذره، باید میرایی نیز برای تماس در نظر گرفته شود. میرایی به دو صورت قابل شبیه‌سازی می‌باشد: میرایی تماسی<sup>۳</sup> و میرایی کلی<sup>۴</sup>. میرایی تماسی ناشی از میراگرهایی است که در دو راستای عمود و مماس بر محل برخورد ذرات تعبیه شده‌اند که در شکل ۱، به صورت  $C_n$  و  $C_s$  نمایش داده می‌شوند. میرایی کلی را می‌توان ناشی از میراگرهایی تصور نمود که تک‌تک ذرات را به یک دستگاه مرجع ثابت متصل کرده‌اند که در شکل ۱ به صورت  $C_m$  نشان داده شده است.



شکل ۱: شبیه‌سازی برهم‌کنش و برخورد ذرات به وسیله جرم - فنر - میراگر در روش DEM

3- Contact Damping

4- Global Damping

مدل سازی اتصال گیردار بین دو ذره دارای پیوند، از طریق دو فنر خطی و یک فنر پیچشی انجام می شود. یکی از فنرهای خطی که عمود بر وجه مشترک دو ذره است فنر قائم و فنر خطی دیگر که موازی با وجه مشترک دو ذره می باشد فنر برشی نام دارند. نیروها و لنگر در محل اتصال بین دو ذره پیوندی، از طریق فنرهای خطی و پیچشی منتقل می شوند. محاسبه مقدار آن ها با توجه به جابجایی نسبی دو ذره پیوندی، در هر سیکل شبیه سازی مقدر می باشد.

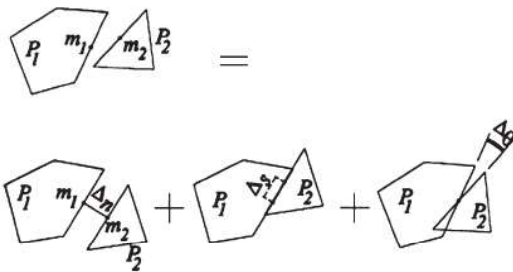
در شکل ۳ دو ریز ذره  $P_1$  و  $P_2$  که ذره مبنای  $P$  را تشکیل می دهند، نشان داده شده است. بر اثر اعمال بار، هر یک از ریز ذره ها جابجا می شوند. بر اثر جابجایی نسبی این دو ریز ذره، باید بررسی کرد که آیا شکست در این ذره رخ داده است یا خیر. بدین منظور، نقاط  $m_1$  و  $m$  که دیگر بر هم منطبق نیستند، بررسی می شوند. به منظور محاسبه نیرو و لنگر اعمال شده بر هر ذره، جابجایی نسبی دو ذره پیوندی  $P_1$  و  $P_2$  به سه جابجایی نسبی عمودی  $(\Delta_n)$ ، جابجایی برشی  $(\Delta_s)$  و دورانی  $(\Delta_\theta)$  تفکیک می شود. این سه مؤلفه نسبت به صفحه ی مشترک دو ریز ذره سنجیده می شوند. از این رو، نیروهای عمودی، برشی و لنگر ایجاد شده در اتصال به کمک روابط زیر قابل محاسبه است:

$$F_{nBond} = K_{nBond} \cdot \Delta_n \quad (2)$$

$$F_{sBond} = K_{sBond} \cdot \Delta_s \quad (3)$$

$$M_{Bond} = K_{\theta Bond} \cdot \Delta_\theta \quad (4)$$

در روابط بالا  $K_{\theta-Bond}$  سختی فنر پیچشی،  $K_{n-Bond}$  و  $K_{s-}$  Bond سختی واحد طول فنرهای عمودی و برشی هستند. مقادیر این پارامترها متناسب با سختی جنس ذرات در نظر گرفته می شوند.

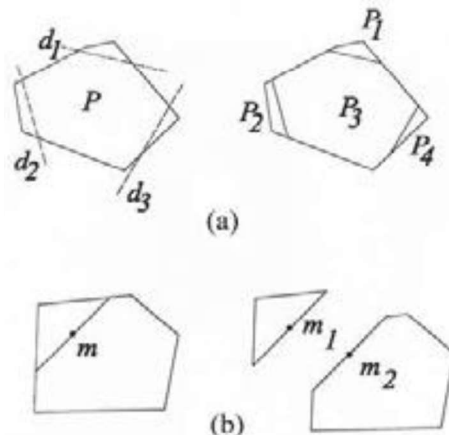


شکل ۳: جایگزینی جابجایی نسبی دو ریز ذره، با سه مؤلفه عمودی، برشی و پیچشی [۱۵]

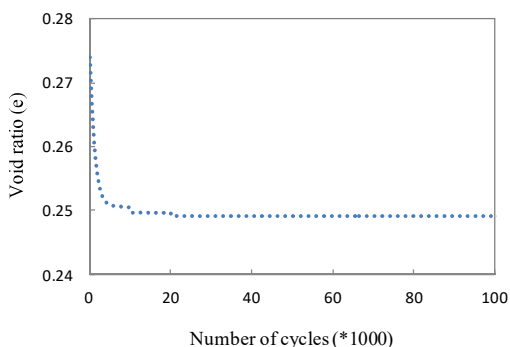
راستای خطوط  $d_1$ ،  $d_2$  و  $d_3$  قابلیت شکسته شدن داشته باشد. بدین جهت، در این روش به جای هر ذره یکپارچه مانند  $P$ ، یک ذره مرکب که از به هم پیوستن ذرات پیوندی کوچک تر  $P_1$ ،  $P_2$  تا  $P_n$  تشکیل شده است، جایگزین می گردد. ذره  $P$  را ذره مبنا و ریز ذرات پیوندی  $P_1$ ،  $P_2$  و  $P_n$  را ریز ذرات هم مبنا می نامیم.

ریز ذرات پیوندی هم مبنا، جسم صلب در نظر گرفته می شوند. آن ها قابلیت شکستن یا تغییر شکل ندارند؛ اما زمانی که به طرف همدیگر فشار داده شوند، امکان همپوشانی دارند. ذرات مبنا نیز قابلیت تغییر شکل ندارند، اما از آنجاکه از چندین ریز ذره پیوندی تشکیل شده اند، قابلیت شکستن دارند. هر دو ذره مبنا و ریز ذره پیوندی به طور اختیاری چندضلعی محدب در نظر گرفته شده اند.

جهت اطمینان از صلبیت و یکپارچگی ریز ذرات پیوندی هم مبنا برای تشکیل ذره مبنا، فرض می شود هر دو ریز ذره پیوندی که وجه مشترک دارند، به وسیله یک اتصال گیردار در وسط وجه مشترک خود به یکدیگر متصل شوند. نقاط  $m_1$  و  $m_2$  در شکل ۲-ب نشان دهنده محل پیوند مذکور می باشند. این اتصالات گیردار نقش قید را برای دو ذره پیوندی هم مبنا بازی می کنند. در طی شبیه سازی، هرگاه تنش ایجاد شده در اتصال بین دو ذره از ظرفیت باربری آن بیشتر شود، اتصال شکسته می شود و با جدا شدن دو ذره پیوندی از یکدیگر، شکست رخ می دهد.



شکل ۲: شبیه مدل سازی شکست: (الف) ذره یکپارچه  $P$  و ذره مرکب معادل آن؛ (ب) نقاط پیوند دو ریز ذره پیوندی [۱۶]



شکل ۴: تراکم همه‌جانبه‌ی نمونه ذرات مربعی بر اثر تنش همه‌جانبه-ی نیم مگاپاسکال

۳. آزمون دومی: در آخرین مرحله از هر آزمایش، نمونه در معرض کرنش برشی دومی با نرخ ثابت قرار می‌گیرد. در آزمون دوم، کرنش محوری با نرخ ثابتی در راستای عمودی اعمال می‌شود و هم‌زمان، تنش داخلی مجموعه‌ی ذرات در راستای افقی مساوی با فشار محصورکننده‌ای که در مرحله قبل به نمونه وارد شده بود، نگه‌داشته می‌شود. این مرحله در تمام آزمون‌های انجام‌شده تا کرنش محوری ۲۰٪ نمونه ادامه یافته است.

شکل ۵-الف نمونه‌ای از ذرات مربعی تولیدشده را نشان می‌دهد. این ذرات سپس به‌صورت همسان متراکم شده است و به‌صورت شکل ۵-ب درآمد شده است. در شکل ۵-پ این نمونه از ذرات تا رسیدن به کرنش محوری ۲۰٪ تحت برش دومی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها

پارامترهای استفاده‌شده در آزمایش بر روی نمونه‌ها شامل ذرات سالم و ذرات شامل چند ریزذره مطابق جدول ۱ انتخاب شدند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای بررسی شکست، مقاومت فشاری و کششی ماسه و چسبندگی و ضریب اصطکاک سکون نیز باید تعیین شود.

#### ۴-۲- تنش‌های همه‌جانبه، شکل ذرات، شکست و نوع آن

در آزمایش بر روی نمونه‌های با ذرات مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی از تنش‌های همه‌جانبه‌ی نیم، یک، دو و چهار مگاپاسکال برای تراکم همه‌جانبه‌ی نمونه‌ها استفاده‌شده است. برای هر تنش همه‌جانبه روند تکرار چرخه‌ها تا جایی ادامه یافته که نسبت تخلخل نمونه‌ها به مقدار ثابتی برسد. پس‌از آن نمونه تحت اثر تنش همه‌جانبه‌ی بزرگ‌تری قرار گرفته است.

با رخ دادن یکی از دو حالت زیر، قید بین دو ذره پیوندی گسسته می‌شود:

الف- هرگاه تنش برشی در محل اتصال دو ذره پیوندی، از مقدار تنش برشی نهایی (ظرفیت باربری قید) فراتر رود.

ب- هرگاه حداکثر تنش‌های فشاری یا کششی اتصال (که به‌وسیله گشتاور و نیروی عمودی به وجود آمده‌اند) از تنش‌های فشاری و کششی نهایی بیشتر شوند.

#### ۴- شبیه‌سازی‌های عددی در تحقیق حاضر

روند شبیه‌سازی شامل سه مرحله‌ی مختلف است:

۱. تولید اولیه‌ی نمونه‌ی ذرات: ابتدا ذرات موردنظر تولید می‌شوند. تخلخل مجموعه تولیدشده زیاد است، بنابراین نیاز به تراکم دارد.

۲. تراکم همه‌جانبه: برنامه در مرحله‌ی تراکم همه‌جانبه‌ی مجموعه‌ی ذرات، نرخ کرنش واردشده بر ذرات را به شکلی کنترل می‌کند تا مقدار تنش‌های داخلی میانگین نمونه‌ی ذرات، به تنش همه‌جانبه‌ای که توسط کاربر تعریف می‌شود برسد. با در نظر گرفتن این شرط در برنامه، اگر تنش‌های داخلی مجموعه از تنش‌های همه‌جانبه تعریف‌شده کمتر باشد، ذرات مرزی به مرکز دایره محصورکننده‌ی ذرات نزدیک شده و در غیر این صورت از مرکز دایره دور می‌شوند. مرحله‌ی تراکم همه‌جانبه تا جایی ادامه می‌یابد که:

الف- میان تنش داخلی نمونه ذرات و تنش همه‌جانبه‌ی وارد-شده تعادل برقرار گردد. به عبارتی، تنش همه‌جانبه باید به مقداری برسد که کاربر تعریف کرده است.

ب- حجم نمونه به مقدار ثابتی برسد که با ثابت شدن نمودار نسبت تخلخل به تعداد چرخه‌های تکرار روند آزمایش مشخص می‌شود.

در شکل ۴ تغییرات نسبت تخلخل نمونه‌ی ذرات مربعی نسبت به افزایش چرخه‌های محاسباتی اجراشده به‌وسیله‌ی برنامه، تحت تنش همه‌جانبه‌ی نیم مگاپاسکال مشاهده می‌شود. تغییرات نسبت تخلخل در ابتدا سرعت زیادی داشته اما با ادامه‌ی روند تراکم همه‌جانبه نسبت تخلخل به مقدار ثابتی می‌رسد.

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در نمونه ذرات

اندازه	واحد	عامل استفاده شده
$2.0 \times 10^8$	نیوتن بر متر	سختی عمودی و مماسی ( $k_{11}, k_{12}$ )
$2.5 \times 10^3$	کیلوگرم بر مترمکعب	وزن واحد ذرات ( $\rho$ )
$1.0 \times 10^4$	بر ثانیه	ضریب میرایی انتقالی (ALPHA)
$2.0 \times 10^4$	بر ثانیه	ضریب میرایی چرخشی (ALPHA)
$1.3 \times 10^{-5}$	ثانیه	گام زمانی (Frac)
$1.0 \times 10^{-2}$	بر ثانیه	نرخ کرنش (EBEVEL)
0.0	کیلو پاسکال	چسبندگی بین ذرات (c)
عامل‌های مرتبط با مقاومت ماسه		
200	مگا نیوتن بر مترمربع	مقاومت فشاری (Sc)
20	مگا نیوتن بر مترمربع	مقاومت کششی (St)
$4.0 \times 10^6$	مگا نیوتن بر مترمربع	ضریب الاستیسته (E)

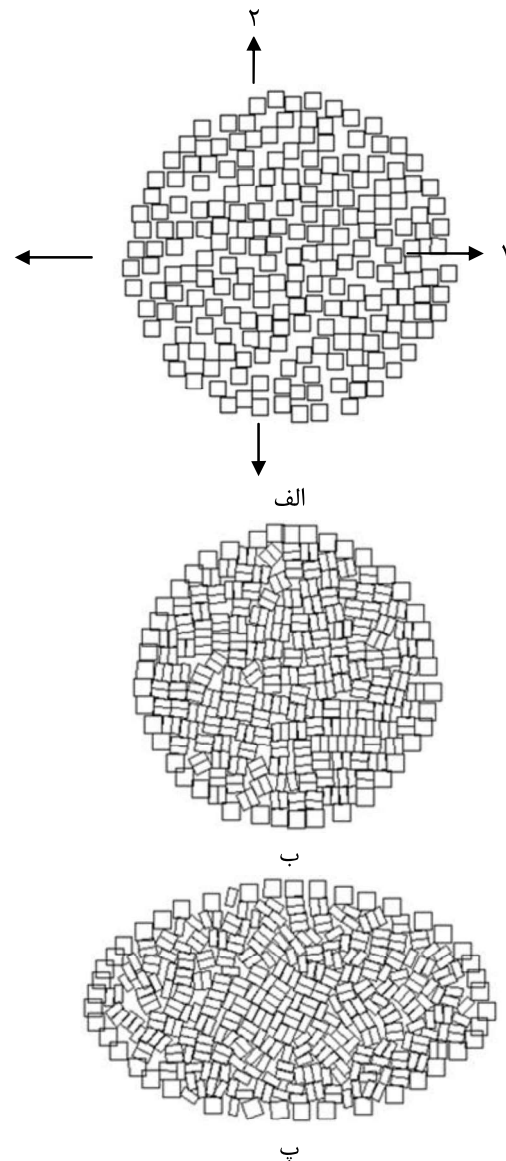
جدول ۲: نحوه شکست هر کدام از ذرات

حالت‌های شکست	شکل ذرات		
	H	S	T
۱			
۲			

جدول ۳: علامت‌های اختصاری برای سه شکل مختلف ذرات با دو

حالت شکست	شکل ذرات		
	مربع	مثلث	شش ضلعی
۱	S1	T1	H1
۲	S2	T2	H2

در این تحقیق، هر نمونه شامل ذرات مثلثی، مربعی یا شش گوشه می‌باشد. هر کدام از این ذرات می‌توانند به صورت دو ریزذره‌ای یا چند ریزذره‌ای موجود باشند (جدول ۲). از این پس برای هر کدام از ذرات و حالت شکست آن، از علامت اختصاری نشان داده شده در جدول ۳ استفاده می‌شود.



شکل ۵: تراکم همه‌جانبه‌ی نمونه ذرات مربعی بر اثر تنش همه‌جانبه - ی نیم مگاپاسکال

### ۳-۴- شرایط نمونه ذرات

شبیه‌سازی آزمون دومحوری بر روی ذراتی با شکل‌های مختلف توسط رایانه‌ی شخصی انجام شده است. برای این که امکان بررسی و مقایسه عامل‌های مختلف را به‌طور مجزا داشته باشیم، نمونه‌ها شرایطی مطابق زیر دارند:

الف- شعاع معادل همه ذرات، یک میلی‌متر می‌باشد.

ب- هر مجموعه شامل فقط یک‌شکل از ذرات (مثلثی، مربعی و شش‌گوشه) می‌باشد.

پ- هر نمونه از ذرات، به‌وسیله دایره‌ای به شعاع ۴۰ میلی‌متر احاطه شده است.

در فایل ورودی برنامه برای تمام نمونه‌ها، طول و عرض محدوده‌ی مستطیلی شکلی که حافظه‌ی برنامه فقط به ذرات داخل آن‌ها اختصاص می‌یابد ۱۴۵ میلی‌متر انتخاب شده است. شعاع دایره‌ی محصورکننده‌ی ذرات ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. حداکثر تعداد ذراتی که می‌توانند تولید شوند برای ذرات مثلثی ۴۶۰، مربعی ۲۱۰ و شش‌ضلعی ۳۱۵ ذره مینا تعریف می‌شود. برای ذرات شامل دو ریزذره، تعداد کل ریزذرات مثلثی ۸۴۰، مربعی ۳۶۴ و شش‌ضلعی ۵۷۱ ذره به دست می‌آید. این مقدار برای ذرات چند ریزذره‌ای به ترتیب ۱۶۱۲، ۸۴۷ و ۱۰۱۹ ریزذره می‌شود.

### ۵- نتایج

آزمون آزمایشگاهی سه محوری با توجه به مساوی بودن تنش‌ها در دو جهت از سه بعد، در عمل به آزمونی دومحوری تبدیل می‌شود. برای شبیه‌سازی آزمون دومحوری با روش اجزای مجزا، ابتدا نمونه اولیه به‌وسیله برنامه‌ی AutoBall تولید می‌شود. برنامه‌ی AutoBall برای تعریف موقعیت مکانی هر ذره کنترل می‌نماید که دایره محیطی هر ذره با دایره‌های محیطی ذرات پیرامون آن تداخل نداشته باشد؛ بنابراین نمونه‌ی تولیدشده تخلخل زیادی دارد. با توجه به غیرمتراکم بودن نمونه‌ی اولیه‌ی تولیدشده به‌وسیله‌ی برنامه‌ی AutoBall، ابتدا باید تخلخل نمونه‌ها را با وارد کردن تراکم اولیه (بدون این که تنش‌ی به ذرات اعمال شود) کاهش داد. بدین منظور، با اعمال کرنش محوری بر مرز مجموعه، ذرات مرزی با یک نرخ کرنش ثابت ( $E_{BEVEL}=0.01$ ) به سمت مرکز نمونه ذرات به حرکت درمی‌آیند که در نتیجه‌ی آن، مجموعه متراکم می‌شود. روند تراکم تا جایی ادامه می‌یابد که تنش ناچیزی در مجموعه ذرات به وجود آید. در غیر این صورت با افزایش عملیات تراکم، ذرات

در یکدیگر فرو می‌روند و در نتیجه در داخل مجموعه نیروهای بسیار بزرگی ایجاد می‌شود. مقدار تراکم اولیه توسط آزمون و خطا به دست می‌آید. به این صورت که ابتدا تعدادی چرخه معین به برنامه داده می‌شود. با کنترل روند اجرای برنامه مشاهده می‌شود که از یک چرخه‌ی معین به بعد (یعنی همان مقداری که باید به‌عنوان چرخه‌ی پایان برنامه در نظر گرفته شود) نیروهای بزرگی در داخل مجموعه پدید می‌آیند. در نتیجه چرخه تعریف شده توسط کاربر اصلاح می‌گردد. پس از تراکم نمونه اولیه، آزمون دومحوری با اعمال کرنش محوری با آهنگ مشخصی در راستای دو (که در شکل ۵ نشان داده شد) اجرا می‌شود و هم‌زمان، تنش داخلی مجموعه‌ی ذرات در راستای یک مساوی با فشار جانبی از قبل تعیین شده در مرحله تراکم همه‌جانبه، نگهداشته می‌شود. این مرحله تا کرنش محوری (کرنش در راستای ۲-۲) ۲۰٪ ادامه دارد. با ترسیم نمودارهای درصد شکست ذرات هرکدام از نمونه‌ها نسبت به فشار جانبی در راستای ۱-۱، روند تغییرات شکست ذرات نسبت به فشارهای جانبی مختلف برای نمونه‌هایی شامل ذرات مثلثی، مربعی و شش‌گوشه برای دو حالت شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### ۵-۱- تأثیر شکل و نحوه شکست ذرات و تنش جانبی بر

#### درصد شکست ذرات

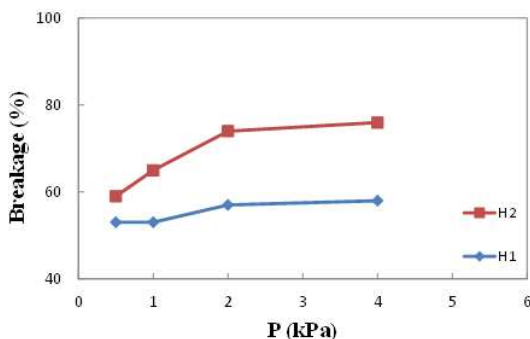
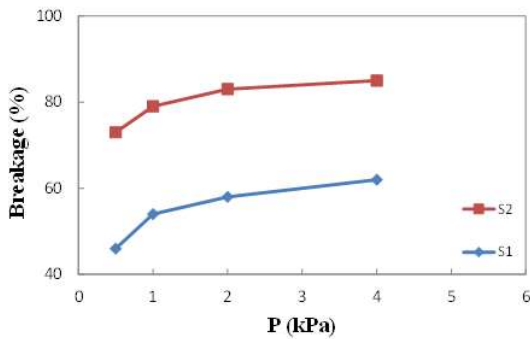
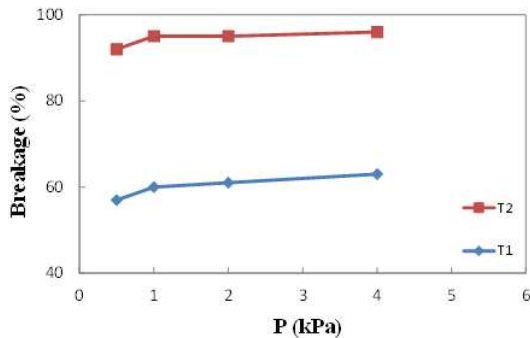
در این بخش، تأثیر هم‌زمان عامل‌های شکل و نحوه شکست ذرات و مقدار تنش جانبی بر مقدار شکست ذرات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در هرکدام از قسمت‌های زیر، تأثیر دو عامل از سه عامل شکل، نحوه شکست ذرات و تنش جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود، منحنی‌های شکست ذرات مختلف از صفر شروع نشده‌اند که علت آن، شکست مقداری از ذرات در مرحله تراکم همه‌جانبه است.

#### ۵-۱-۱- تأثیر شکل ذرات و تنش جانبی

تغییرات درصد شکست مجموعه ذرات شامل دو و چند ریزذره نسبت به تنش‌های ثابت جانبی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. در هر یک از شکل‌ها سه منحنی جداگانه برای مقایسه‌ی تأثیر شکل ذرات نمونه (مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی) بر رفتار نمونه ترسیم شده است. شکل ۶-الف مقدار شکست مجموعه ذرات دو ریزذره‌ای را با در نظر گرفتن فقط مرحله آزمون دومحوری نمایش می‌دهد. کم‌ترین درصد شکست

سه شکل ذرات (الف- مثلث، ب- مربع و پ- شش گوشه) و در هر تنش جانبی، افزایش تعداد ریزذره‌ها منجر به افزایش مقدار شکست ذرات می‌شود.

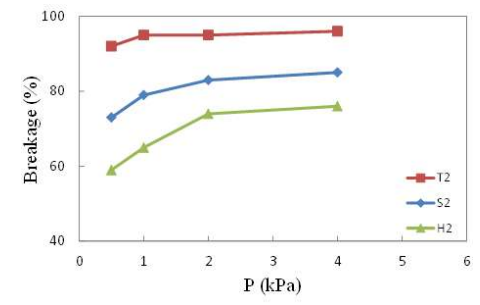
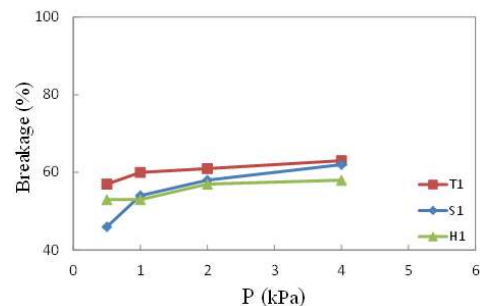
همچنین مشابه بخش ۵-۱-۱، در همه نمونه‌ها و در هر مرحله از آزمایش، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست ذرات می‌شود.



شکل ۷: منحنی‌های تغییر درصد شکست مجموعه ذرات شامل دو و چند ریزذره نسبت به تنش‌های جانبی ۰/۵، یک، دو و چهار مگاپاسکال برای ذرات (الف) مثلثی، (ب) مربعی و (پ) شش ضلعی در آزمون دومحوری

مربوط به نمونه ذرات شش ضلعی می‌باشد. از طرفی، ذرات مثلثی بیش‌ترین درصد شکست را دارند. برای ذرات شامل چند ریزذره (شکل ۶-ب) نیز، درصد شکست بیشینه در هر تنش جانبی برای نمونه ذرات مثلثی و درصد شکست کمینه برای ذرات شش ضلعی اتفاق می‌افتد با این تفاوت که، اختلاف میان نمودارهای ذرات بیش‌تر و متمایزتر است. به‌طور کلی می‌توان گفت که هر چه ذرات نمونه تیز گوشه‌تر باشند، درصد شکست نهایی ذرات بیش‌تر است. آزمون‌های تجربی نیز این نتایج را تأیید می‌کند [۲۰].

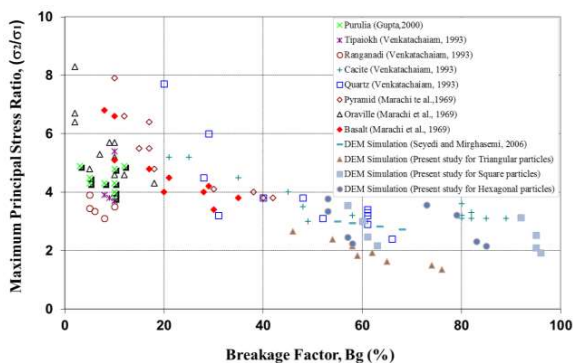
برای همه نمونه‌ها (مثلثی، مربعی و شش ضلعی)، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست می‌گردد که با نتایج آزمایش‌های تجربی گزارش شده تطابق دارد [۲].



شکل ۶: منحنی‌های تغییر درصد شکست مجموعه ذرات مثلثی، مربعی و شش ضلعی نسبت به تنش‌های جانبی ۰/۵، یک، دو و چهار مگاپاسکال برای ذرات شامل (الف) دو و (ب) چند ریزذره در آزمون دومحوری

#### ۵-۱-۲- تأثیر نحوه شکست ذرات و تنش جانبی

در شکل ۷ تغییرات درصد شکست مجموعه ذرات مثلثی، مربعی و شش گوشه نسبت به تنش‌های جانبی مختلف برای آزمون دومحوری نشان داده شده است. هر کدام از شکل‌ها شامل سه منحنی جداگانه برای نمایش و مقایسه‌ی نمونه ذرات دو یا چند ریزذره‌ای می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود برای هر



شکل ۸- تغییرات نسبت تنش‌های اصلی به فاکتور شکست (بر حسب درصد) برای نتایج شبیه‌سازی‌های دومحوری و آزمایش‌های تجربی

### ۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی به منظور بررسی عوامل تنش هم‌جانبه، شکل ذرات و حالت شکست ذرات بر مقدار شکست مصالح دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌ها شامل ذراتی به شکل مثلث، مربع یا شش‌ضلعی انتخاب شدند. هر کدام از این ذرات می‌تواند با دو حالت مختلف بشکند. هر دسته از آزمایش‌ها با چهار تنش محصورکننده متفاوت (۰/۵، یک، دو و چهار مگاپاسکال) انجام شده است. آزمون‌ها شامل مراحل تراکم هم‌جانبه و همچنین، آزمون دومحوری می‌باشند. بنابراین، ۴۸ آزمایش مختلف بر روی نمونه‌هایی که توسط دایره‌ای به شعاع ۴۰ میلی‌متر محاط شده‌اند، صورت گرفته است. علاوه بر این، ذرات تشکیل‌دهنده‌ی همه نمونه‌ها دارای شعاع معادل یکسانی برابر یک میلی‌متر هستند. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی به شرح زیر می‌باشد:

الف- برای تمام نمونه‌ها، افزایش تنش جانبی منجر به افزایش درصد شکست ذرات می‌شود.

ب- مجموعه‌های شامل ذرات تیز گوشه‌تر، شکست بیشتری از خود نشان می‌دهند.

پ- با افزایش ریزذرات ذره مینا (حالتی که به فرایش ذرات شبیه است)، درصد بیشتری از ذرات نمونه می‌شکند.

با مرور ادبیات گذشته می‌توان تأثیر پارامترهای شکل [۲۱] و شکست ذرات [۲۲] در تنش‌های جانبی مختلف را در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط محققین پیدا کرد، اما تأثیر هم‌زمان این پارامترها به‌ندرت یافت می‌شود. علاوه بر این، تلاش شده است تا با شبیه‌سازی نحوه شکست ذرات، روند مناسبی برای مدل‌سازی حالت‌های مختلف شکست برای تحقیقات آینده ارائه شود.

### ۶- مقایسه نتایج با سایر مطالعات تجربی و عددی

به‌منظور مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمایش‌های تجربی، مقادیر تجربی نسبت تنش‌های اصلی بیشینه  $(\sigma_2 / \sigma_1)_{max}$  در مقابل درجه شکست  $(B_g)$  که توسط محققان مختلفی انجام شده است، در شکل ۸ مشاهده می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته در گذشته که بر روی مجموعه‌ای از ذرات با شکل‌های نامنظم که به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند انجام گرفته [۲۳] و نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر که بر روی ذراتی با شکل‌های مثلثی، مربعی و شش‌ضلعی اجرا شده، در این شکل نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی در اطراف مرز پایینی به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده است؛ بنابراین، روش استفاده‌شده در این تحقیق روشی مناسب برای شبیه‌سازی رفتار مصالح دانه‌ای است. شایان‌ذکر است که محققان در آزمایش‌های تجربی خود از عامل شکست مارشال استفاده کرده‌اند، درحالی‌که تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی بوده و برای تعریف مقدار شکست از نسبت ذرات شکسته شده به تعداد کل ذرات استفاده شده است. علاوه بر این، مدل‌سازی‌ها در دو بعد انجام شده‌اند. در صورتی‌که مدل‌سازی سه‌بعدی انجام شود، شاید نتایج انطباق بیشتری باهم پیدا کنند.

### ۸- مراجع

rockfill dams (pp. 531–551), 10th Congress on Large Dams.

[3] Marachi, N.D., & Chan, C.K., & H.B. Bolton. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials, J. Soil Mech. Found. Div. 98(1), 95-114.

[4] Bopp, P.A. (1994). Effect of initial relative density

[1] Marsal, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (pp. 27-43) Proceedings of the American Society of Civil Engineers.

[2] Fumagali, E., & Moscini, B. Rossi, P.P. (1970). Laboratory tests on materials and static models for

- [15] Mirghasemi, A.A., & Rothenburg, L., & 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. 37(3), 43–52. DOI: 10.3208/sandf.37.3\_43
- [16] Hosseininia, E.S., & Mirghasemi, A.A. (2006). Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method, Powder Technology(pp. 100-112). Doi:10.1016/j.powtec.2006.05.006
- [17] Aminzadeh, A., & Hosseininia, E.S.(2013). A study on the effect of particle shape and fragmentation on the mechanical behavior of granular materials using discrete element method (pp. 915–918). AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, sydney, australia. doi:10.1063/1.4812081.
- [18] Hosseininia, E.S., & Mirghasemi, A.A. (2007). Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies. Journal of China Particuology. 5, 328–336. Doi:10.1016/j.cpart.2007.06.005
- [19] Seyed Hosseininia, E. (2012). Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles, Particuology. 130(4), 32-43. Doi:10.1016/j.partic.2011.11.015.
- [20] Lobo-Guerrero, S., & Vallejo, L.E., & Vesga, L.F. (2006). Visualization of Crushing Evolution in Granular Materials under Compression Using DEM. International Journal of Geomechanics. 6(3), 195-200. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:3(195)
- [21] Abedi, S. A, & Mirghasemi, A. (2011). Particle shape consideration in numerical simulation of assemblies of irregularly shaped particles. Particuology. 9(4), 387–397. DOI:10.1016/j.partic.2010.11.005.
- [22] Al Hattamleh, O. F., & AlShalabi, H., & Al Qablan, T. Al-Rousan, (2010). Effect of grain crushing and bedding plane inclination on Aqaba sand behavior. Journal of Bull. Eng. Geol. Environ. 69, 41–49. DOI 10.1007/s10064-009-0238-6
- [23] Seyed Hosseininia, E., & Mirghasemi, a. a. (2006). Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method. Powder Technology. 166, 100–112. DOI:10.1016/j.powtec.2006.05.006
- on instability and behavior of granular materials at high pressures, Univ. of California.
- [5] Yamamuro, J.A., & Bopp, P.A., & Lade, P. V. (1996). One-dimensional compression of sands at high pressures. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 122(2), 109–119. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:2(109)
- [6] Varadarajan, A., & Sharma, K.G., & Venkatachalam, K., & Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling two rockfill materials. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 129(3), 206–218. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(206)
- [7] Lade, P. V., & Yamamuro, J.A., & Bopp, P.A.( 1996). Significance of Particle Crushing in Granular Materials. Journal of Geotech. Engr., ASCE. 122(4), 309–316. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309)
- [8] Lee, K.L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil. Journal of Can. Geotech. 4(1), 68–86. DOI: 10.1139/t67-012
- [9] Hagerty, M.M., & Hite, D.R., & Ulrich, C.R., & Hagerty, D.J. (1993). One-dimensional high pressure compression of granular media. Journal of Geotech. Eng. ASCE. 119(1), 1–18. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(1)
- [10] Santamarina, J.C., & Cho G.C. (2004). Soil behaviour : The role of particle shape. 18(1), 1–14.
- [11] Cho, G.C., & Dodds, J. J., & Santamarina, C. (2006). Particle Shape Effects on Packing Density , Stiffness , and Strength: Natural and Crushed Sands, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 132(5), 591–602. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)
- [12] Cundall P.A.(1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems (pp. 129-136). Symp. ISRM, Nancy, France. Proc.
- [13] Cundall, P.A. (1978). Ball—A computer program to model granular media using distinct element method, Advanced Technology Group, Dams and Moore, London. Technical.
- [14] Ting, J., & Khawaja, M., & Meachum, L., & Rowell, J. (1993). An ellipse-based discrete element model for granular materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 17(9), 603–623. DOI: 10.1002/nag.1610170902