

# مطالعه عوامل مؤثر در آزمایش برش مستقیم خاک با استفاده از روش هیبرید اجزای محدود - اجزای مجزا

محمد افزای<sup>۱</sup>، محمود یزدانی<sup>۲\*</sup>، مهتاب علی طالش<sup>۳</sup>، احمدعلی فخمی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
- ۴- استاد بخش مهندسی معدن دانشگاه نیومکزیکو، آمریکا و دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

mahyaz@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۳/۰۷]

## چکیده

آزمون برش مستقیم یکی از قدیمی ترین آزمون ها برای اندازه گیری مقاومت برشی خاک است. عوامل بسیار زیادی می تواند بر نتایج حاصل از این آزمایش تأثیرگذار باشد. به دلیل اینکه روش های آزمایشگاهی زمان بر و سخت هستند استفاده از روش های عددی در بررسی عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش برش مستقیم می تواند مناسب و کارآمد باشد. در این مقاله با استفاده از برنامه اجزاء محدود - اجزاء مجزا CA2، آزمایش برش مستقیم خاک شبیه سازی شده و تأثیر عوامل مختلف در نتایج آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این برنامه عددی، خاک توسط روش اجزا مجزا و جعبه برش با استفاده از روش اجزا محدود مدل سازی شده است. در این مطالعه، اثرات اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سربار، سرعت برش و اصطکاک جداره بر نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش ابعاد جعبه برش، مقاومت کاهش می یابد درحالی که با افزایش سربار، فشار تشکیل و سرعت برش مقاومت نمونه افزایش نشان می دهد. همچنین در صورتی که تغییر حجم قابل توجهی در نمونه طی برش خوردن ایجاد نگردد، اصطکاک دیواره های جعبه برش تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه ندارد.

**واژگان کلیدی:** آزمایش برش مستقیم خاک، مدل سازی عددی، روش اجزا محدود، روش اجزا مجزا، آزمایش های آزمایشگاهی.

## ۱- مقدمه

سه محوری و برش مستقیم پیچشی هستند که از میان آن ها آزمایش برش مستقیم به علت کاربرد فراوان در درک رفتار مکانیکی خاک بسیار مورد توجه است.

پژوهش های متعددی عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش برش مستقیم را بررسی کرده اند [1, 4]. از جمله آن ها می توان به اثر چگونگی سرهم کردن نیمه بالایی جعبه برش مستقیم و همچنین

مقاومت برشی خاک یکی از پارامترهای مهم در طراحی های ژئوتکنیکی است که در تحلیل مسائلی مانند محاسبه فشار جانبی خاک، ظرفیت باربری پی ها، پایداری شیب ها، سدهای خاکی و دیگر مسائل ژئوتکنیکی به کار می رود. آزمایش های متداول برای اندازه گیری مقاومت برشی خاک شامل آزمایش های برش مستقیم،

به دلیل اینکه روش‌های آزمایشگاهی زمان‌بر و سخت هستند استفاده از روش‌های عددی در بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر نتایج آزمایش برش مستقیم می‌تواند مناسب و کارآمد باشد. ژانگ و همکاران [14] با مدل‌سازی دوبعدی و اجزا مجزا آزمایش برش مستقیم به بررسی چگونگی توزیع تنش، کرنش و اثر اتساع در نمونه‌های برش مستقیم پرداختند. پاتس و همکاران [15] با مدل‌سازی مدل الاستیک-پلاستیک خاک به بررسی تغییر حجم، تنش اولیه و کرنش نرم شدگی در نمونه را بررسی کردند. ونگ و همکاران [16] با توسعه یک روش عددی در آزمایش برش مستقیم به بررسی تنش بین دانه‌ها، اتساع و توسعه ناحیه برش پرداختند. فخیمی و همکاران [17] نیز به بررسی اثر یک‌دانه بیش‌ازاندازه بزرگ در آزمایش برش مستقیم پرداخته‌اند. در این پژوهش با استفاده از روش عددی هیبرید که هم‌زمان از روش اجزا محدود و اجزای مجزا بهره می‌برد، آزمایش برش مستقیم خاک مدل‌سازی شده است. روش اجزای مجزای استفاده‌شده در این پژوهش بر مبنای برهم‌کنش ذرات متصل‌به‌هم است. در این مقاله به بررسی پارامترهای اثر اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سربار، سرعت برش و اصطکاک جداره پرداخته‌شده است.

## ۲- روش مدل‌سازی عددی

در راستای مدل‌سازی جعبه برش مستقیم و با توجه به شرایط آزمایشگاهی، جعبه برش مستقیم صلب، نیمه پایین جعبه در راستای افقی و عمودی ثابت، وجه بالای نمونه در راستای قائم قابل حرکت و بدون اصطکاک در نظر گرفته شد که بار را به‌طور کامل به نمونه خاک انتقال دهد و سطح لغزش برش نمونه کاملاً بدون اصطکاک در نظر گرفته شد که نمونه به‌راحتی برش بخورد. در راستای مدل‌سازی عددی آزمایش‌های برش مستقیم از برنامه هیبرید اجزای محدود - اجزای مجزا، CA2 استفاده‌شده است. این برنامه معادلات حرکت را همراه با معادلات ساختاری میکرو و ماکرو به‌صورت صریح حل می‌کند [18, 19].

در این مطالعه، جعبه برش مستقیم با استفاده از اجزا محدود مدل شد و خاک درون آن توسط اجزای مجزا شبیه‌سازی شده است. شکل (۱) طرح‌واره‌ای از جعبه برش مستقیم مدل‌سازی شده در

اصطکاک دیواره‌های جعبه برش بر نتایج آزمایش اشاره کرد. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش اثر اصطکاک دیواره‌های جعبه برش مستقیم، می‌تواند روغن‌کاری دیواره جعبه برش باشد [1, 4].

شیبویا<sup>۱</sup> و همکاران [1] نشان دادند که روش متعارف اندازه‌گیری تنش نرمال که در آن نیروی نرمال بر سطح مقطع تقسیم و در طول آزمایش برش ثابت فرض می‌شود، مناسب نیست و مقدار زاویه اصطکاک اندازه‌گیری شده از این روش برای خاک‌های با قابلیت اتساع، دست بالا به دست می‌آید. برای حل این مشکل آن‌ها دستگاه برش مستقیمی پیشنهاد دادند که تنش نرمال روی نمونه را به‌وسیله یک گیج که در نیمه پایینی نمونه قرار دارد اندازه‌گیری می‌کند.

استووالز<sup>۲</sup> [2] برای کاهش اثر اصطکاک بین دیواره و خاک، دستگاه برشی با نیمه بالایی متحرک پیشنهاد داد. نتیجه تحقیق وی باعث شد که استاندارد DIN:1837-3 [5] اثر این پدیده را بررسی کند و دستگاهی با نیمه بالایی متحرک را به‌عنوان استاندارد پیشنهاد دهد. با این حال بیشتر مطالعاتی که در ارتباط با آزمایش برش مستقیم انجام شده است، درباره دستگاه‌های مختلف برای اندازه‌گیری این تأثیرات بر روی زاویه اصطکاک و چسبندگی بوده است.

از دیگر پارامترهای بررسی‌شده در آزمایش برش مستقیم می‌توان به تأثیر درصد تراکم و تاریخچه تنش نمونه بر مقاومت برشی خاک‌ها اشاره کرد [6]. تحقیقاتی نیز بر روی تأثیر نوع خاک، شکل، اندازه و توزیع دانه‌ها، درصد رطوبت و درصد تراکم نمونه بر پارامترهای مقاومت برشی خاک انجام شده است [7]. سرعت برش نیز از دیگر پارامترهایی بوده که پژوهشگران مختلف به بررسی آن پرداخته‌اند [7, 12]. به‌عنوان مثال پژوهشگران نشان داده‌اند که با افزایش سرعت برش، مقاومت برشی نمونه افزایش می‌یابد اما همچنان تأثیر سرعت برش بر مقاومت برشی باقی‌مانده به‌خوبی مشخص نشده است و نظریه‌های متفاوتی در این مورد وجود دارد [9]. از دیگر پارامترهای بررسی‌شده توسط پژوهشگران می‌توان به اثر اندازه دانه‌ها بر پارامترهای مقاومت برشی اشاره کرد که با افزایش اندازه دانه‌ها نسبت به‌اندازه جعبه برش، مقاومت بیشینه و مقاومت باقی‌مانده نمونه افزایش می‌یابد [13].

1 Shibuya, s.  
2 Stoewahse

دیوار<sup>۳</sup>هایی در برنامه CA2 مدل شده است که این دیوارها اجازه اندرکنش بین محیط گسسته و پیوسته را می‌دهند.

هر المان گسسته در برنامه CA2 به شکل استوانه تعریف می‌شود. برهم‌کنش بین استوانه-استوانه و استوانه-دیوار توسط فنرهای نرمال و کششی، باندهای نرمال و کششی و ضریب اصطکاک ایجاد می‌شود، بنابراین برای تعریف برهم‌کنش بین استوانه - استوانه و استوانه - دیوار، ثابت‌های میکرو مکانیکی ضرایب فنر نرمال و کششی، مقاومت‌های باند نرمال و برشی و همچنین ضریب اصطکاک استفاده می‌شوند. استفاده از این اتصال‌های ساده، باعث می‌شوند تا زمانی که نیروی برشی یا نرمال ایجاد شده بین دو استوانه از مقاومت باند برشی یا باند نرمال کمتر باشد، مدل به صورت الاستیک عمل کند در غیر این صورت باندهای نرمال یا برشی می‌شکنند [20]. زمانی که یک باند گسیخته می‌شود، اتصال خود را به صورت دائمی از دست می‌دهد اما با توجه به قانون کولمب تا زمانی که تحت بار فشاری قرار داشته باشد می‌تواند از طریق اصطکاک بار برشی را تحمل کند [17].

علاوه بر پارامترهای میکرو مکانیکی که در بالا ذکر شد، شعاع استوانه‌ها و فشار تشکیل<sup>۴</sup> نیز باید تعیین شود. فشار تشکیل در واقع تنش فشاری است که در زمان آماده‌سازی یک نمونه به محیط مجزا وارد می‌شود. در زمان تشکیل نمونه هیچ باند و یا اصطکاک بین اجزای مدل وجود ندارد و استوانه‌ها می‌توانند به راحتی تغییر مکان دهند و فضاهای خالی را پر کنند. فشار تشکیل در مرحله آماده‌سازی نمونه منجر به هم‌پوشانی استوانه‌ها می‌شود. با استفاده از چنین مدلی که امکان هم‌پوشانی بین ذرات فراهم می‌شود، نتایج بهتری از مقدار زاویه اصطکاک حاصل می‌شود [18].

قدم اول در مدل‌سازی عددی آزمایش برش مستقیم، آماده‌سازی نمونه با اعمال فشار تشکیل اولیه و تخصیص ضرایب سختی فنرهای برشی،  $K_s$  و نرمال،  $K_n$  برای ذرات است. در این مرحله مرزهای خارجی عمودی و افقی جعبه در راستای  $x$  و  $y$  گیردار می‌شوند و با افزایش شعاع ذرات و فرورفتن آن‌ها در هم، تا زمان رسیدن به تعادل با تعداد مناسبی از گام‌های محاسباتی، مدل تحلیل می‌شود. پس از آماده‌سازی نمونه، تنش‌های اولیه، نیروهای

CA2 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، جعبه از ۵ قسمت تشکیل شده که با حروف لاتین A, B, C, D و E نشان داده شده است. نیمه بالایی جعبه از چهار قسمت تشکیل شده است (A, B, C و D). قسمت C جعبه با قسمت عمودی B جعبه به وسیله سطح لغزش<sup>۱</sup> A1A3-C2C4 در ارتباط است. هیچ‌گونه سطح لغزشی در راستای B2B4-C1C3 به منظور دوران آزاد قسمت بالایی تعریف نشده است. دو سمت یک سطح لغزش در نرم‌افزار CA2 به وسیله فنرهای برشی و نرمال باهم برهم‌کنش<sup>۲</sup> دارند. به منظور ایجاد آزادی جابه‌جایی و دوران و همچنین برای کمک به انتقال کامل بار عمودی به خاک، سطح لغزش A1A3-C2C4 (بین صفحه بالایی و قسمت عمودی کناری) هیچ‌گونه چسبندگی و اصطکاک ندارد. همچنین برای قسمت‌های A1A2-E5E6 و B1B2-E1E2 سطح لغزش‌هایی برای جلوگیری از نفوذ ذرات به درون شبکه اجزا محدود و عدم اصطکاک دو جدار جعبه برش، مانند سایر پژوهش‌های عددی صورت گرفته در این زمینه، تعریف شده است [17].

شکل ۱. طرح‌واره‌ای از جعبه برش برای مدل‌سازی عددی در CA2.

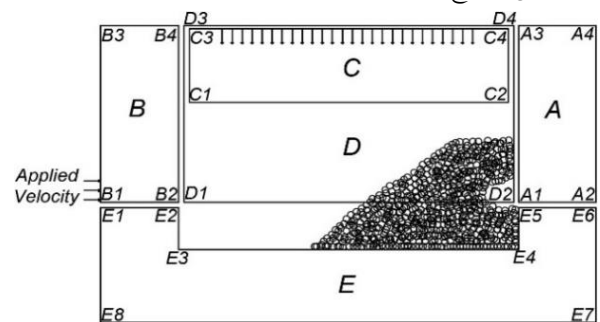


Fig. 1. A sketch of the shear box used for CA2 numerical simulation

قسمت D (D1, D2, D3 و D4) در شکل (۱) برای اتصال دو قسمت عمودی A و B در جعبه برش به منظور شبیه‌سازی کامل اثر سه‌بعدی برش مستقیم استفاده شده‌اند. قسمت D به دو قسمت A و B در دو طرف جعبه با سطح لغزش‌های B2B4-D1D3 و A1A3-D2D4 متصل شده‌اند. این سطوح لغزش دارای مقاومت‌های برشی و کششی بسیار قوی برای جلوگیری از جدا شدن جعبه در اثر بار نرمال هستند. در سطح داخلی جعبه،

آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مطابق با استاندارد آزمایش ASTM:D3080 انجام شده است [21].

جدول (۱): مشخصات ماسه استفاده شده در آزمایش برش مستقیم.

Parameters	Value	Units
Wet density	16.73	kN/m <sup>3</sup>
Dry density	15.78	kN/m <sup>3</sup>
Silt content to sand content ratio	0.055	-
Maximum dry density	17.16	kN/m <sup>3</sup>
Minimum dry density	14.31	kN/m <sup>3</sup>
Friction angle	38	Degree
Dilatation angle	1.5	Degree
Cohesion	12	kPa
Elastic modulus	27	MPa
Posion ratio	0.3	-

Table 1. Properties of Soil sample used in direct shear test

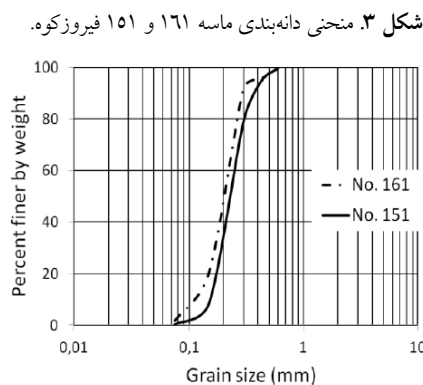


Fig. 3. Gradation curves of Firooz Kooh 151 and 161 sand

دستگاهی که آزمایش به وسیله آن انجام شده است، توانایی انجام آزمایش روی نمونه‌های ۶۰×۶۰×۲۲ میلی‌متر مکعب را دارا است. دستگاه از پنج بخش اصلی بدنه، جعبه برش، سیستم بارگذاری قائم، سیستم بارگذاری نیروی برشی و سیستم اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی تشکیل شده است. سیستم اندازه‌گیری نیروی برشی و جابه‌جایی افقی به صورت دیجیتالی است و سیستم بارگذاری قائم

تماسی و سرعت‌ها صفر می‌شوند. سپس باندهای نرمال، nb و برشی، sb و اصطکاک، f برای استوانه‌ها تعریف می‌شوند و به سیستم (نمونه خاک مدل‌سازی شده) اجازه داده می‌شود که تحت وزن خود به تعادل برسد. در این حالت، تنها نیمه پایینی جعبه برش در حالت گیرداری (در راستای x و y) قرار دارد و سپس تنش نرمال به نیمه بالایی جعبه وارد و مدل بار دیگر تا رسیدن به تعادل تحلیل می‌شود. در نهایت با اعمال جابجایی به سمت راست، نیمه بالایی جعبه نسبت به نیمه پایینی آن که ثابت است، حرکت می‌کند و مرحله بارگذاری برشی در آزمایش شروع می‌شود. سرعت اعمال برش برابر با  $4/5 \times 10^{-9}$  متر در هر گام محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. این سرعت اعمال برش به گونه‌ای انتخاب شده است که اطمینان حاصل شود نمونه طی انجام آزمایش به صورت شبه استاتیکی برش می‌خورد [17]. شکل (۲) هندسه و شرایط مرزی مدل عددی ایجاد شده در برنامه CA2 را نشان می‌دهد.

شکل ۲. هندسه و شرایط مرزی مدل ایجاد شده در برنامه CA2.

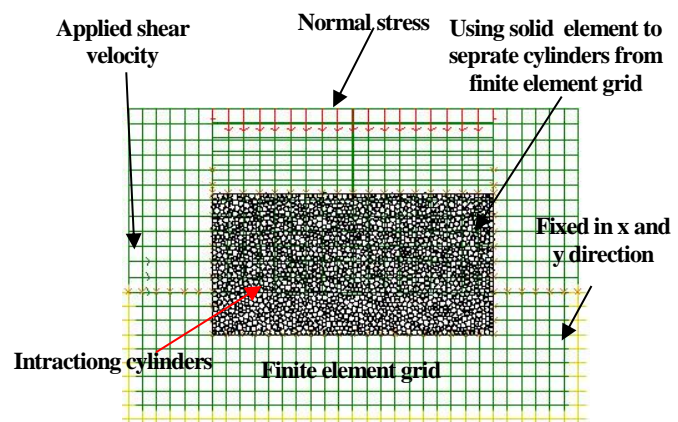


Fig. 2. Geometry and boundary conditions of CA2 model

### ۳- کالیبراسیون مدل سازی عددی

به منظور درستی آزمایشی مدل سازی عددی آزمایش برش مستقیم با استفاده از برنامه CA2، نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه مقایسه شد. جدول (۱) مشخصات ماسه استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد. محدوده تغییرات اندازه دانه‌های این خاک، بین ۰/۷ تا ۰/۴ میلی‌متر است که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

استوانه‌ها، ks سختی فنر برشی بین استوانه‌ها، nb باند نرمال، sb باند برشی، f ضریب اصطکاک و  $\sigma_0$  فشار تشکیل نمونه است. در شکل (۴) مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

همان‌گونه که از نمودارهای ارائه شده در شکل (۴) مشخص است، هماهنگی خوبی بین نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده و مدل‌سازی عددی در CA2 وجود دارد؛ بنابراین با توجه به اینکه هماهنگی خوبی بین نتایج آزمایش برش مستقیم و مدل عددی ایجاد شده در CA2 وجود دارد و از درستی مدل‌سازی در این برنامه اطمینان حاصل شده است، پارامترهای تأثیرگذار در آزمایش برش مستقیم در برنامه CA2 مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴- مطالعه پارامتریک مدل عددی آزمایش برش

##### مستقیم

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی در برنامه CA2، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر آزمایش برش مستقیم پرداخته شده است. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش عبارت‌اند از اثر اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سرپار، سرعت برش و اصطکاک جداره. نتایج حاصل از بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر آزمایش عددی برش مستقیم در ادامه به تفصیل ارائه شده است.

##### ۴-۱- تأثیر اندازه جعبه برش مستقیم

به منظور بررسی اثر اندازه جعبه برش مستقیم، جعبه‌هایی مربعی با طول‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر و نسبت ارتفاع به طول جعبه برابر ۰/۵ مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش ۲ مدل‌سازی، شبیه‌سازی شده‌اند. در مدل‌سازی عددی، برای استوانه‌ها مقادیر میکرو مکانیکی  $k_n = 33/06 \times 10^6$  Pa،  $k_s = 7/6 \times 10^6$  Pa N/m،  $s_b = 19/4$  N/m،  $a_n = 19/4$  و  $f = 0/8$  و  $\sigma_0/k_n = 0/07$  که در بخش قبل کالیبره شده‌اند در نظر گرفته شده است؛ که  $k_n$  سختی فنر نرمال،  $k_s$  سختی فنر برشی، nb باند نرمال، sb باند برشی، f ضریب اصطکاک و  $\sigma_0$  فشار تشکیل نمونه است. شعاع میانگین استوانه‌ها ۰/۲۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته و در مدل عددی اجازه داده شده است که شعاع استوانه‌ها به صورت تصادفی توزیع یکنواختی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ میلی‌متر داشته باشند.

در این دستگاه به صورت مکانیکی و به شکل اهرم با ضریب ۱ به ۱۰ است.

نمونه خشک ماسه با چگالی حداکثر خشک ذکر شده در جدول (۱) کوبیده شد و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. در انجام آزمایش‌های برش مستقیم آزمایشگاهی، ۳ حالت مختلف تنش نرمال شامل ۱۶، ۳۲، ۴۸ کیلو پاسکال بر نمونه اعمال شده است. سپس مطابق با توضیح ارائه شده در بخش ۲ جعبه برش مستقیم برای شبیه‌سازی عددی آزمایش، در برنامه CA2، مدل‌سازی شد. قطر استوانه‌ها با توجه به شکل (۳) و مقدار D50 انتخاب شد و به نرم‌افزار اجازه داده شد که توزیع یکنواختی بین  $D50 + (0.075)$  و  $D50 - (0.075)$  میلی‌متر داشته باشد و تنش‌های نرمال اعمال شده در مدل عددی کاملاً مطابق با آزمایش‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.

در ادامه با استفاده از روند پیشنهاد شده در مرجع [23] مقادیر  $\sigma_0$ ،  $K_s$  و  $K_n$  با کمک مدل‌سازی آزمایش دومی و نمودارهای مربوط ارائه شده در آن مرجع مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون کالیبره شدند سپس  $n_b$  و  $s_b$  با سعی و خطا به نحوی که مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک بر نتایج آزمایشگاهی منطبق شود، به دست می‌آیند. مقدار سختی‌های نرمال و برشی دیوار اطراف نیز مطابق تحلیل‌های [23]  $kn=ks=10^{10}$  در نظر گرفته شد.

پارامترهای مدل رفتاری اجزا مجزا جهت انطباق تحلیل عددی با آزمایش آزمایشگاهی بدین شرح بدست آمدند:

شکل ۴. مقایسه بین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

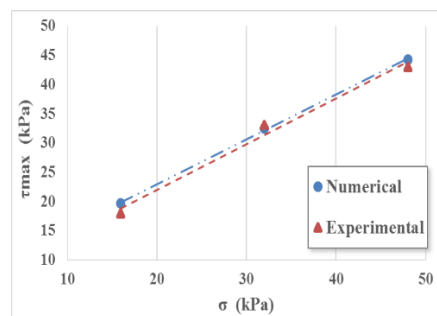


Fig. 4. Comparison of experimental and numerical results

$s_b = 50$  N/m،  $a_n = 25$  N/m،  $k_s = 4/693 \times 10^6$  Pa،  $k_n = 49/2 \times 10^6$  Pa،  $\sigma_0 = 2/31$  MPa و  $f = 0/8$  که در آن  $kn$  سختی فنر نرمال بین

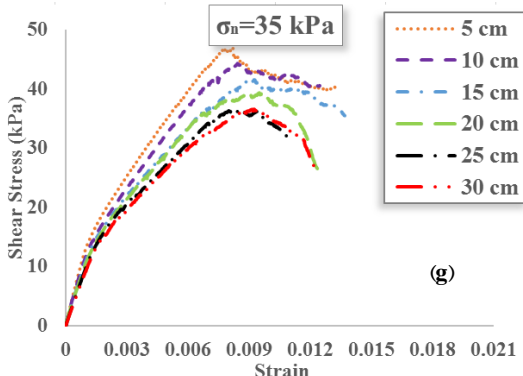
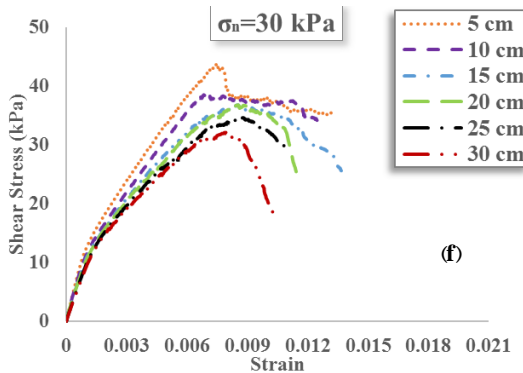
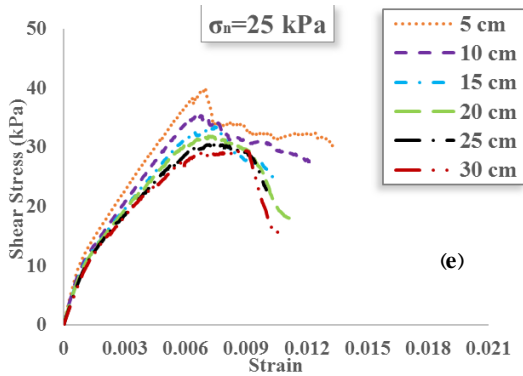
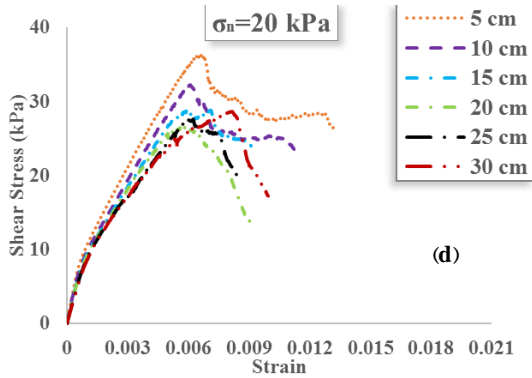
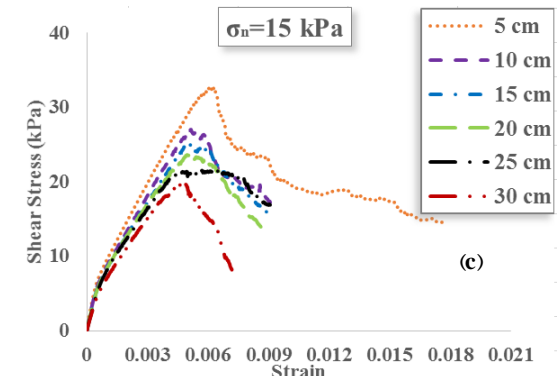
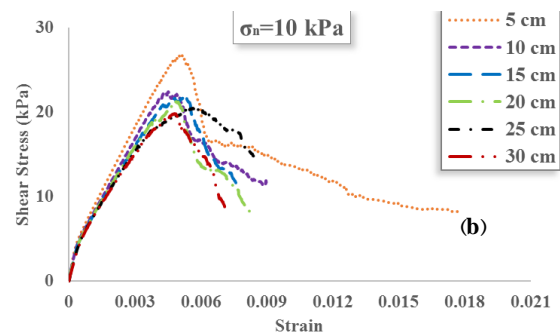
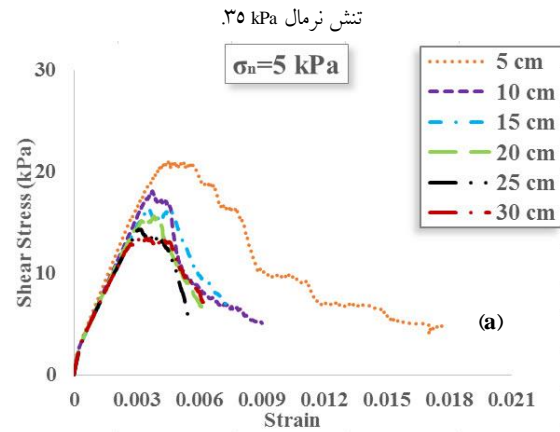


Fig. 5. Shear stress vs shear strain curves for different sizes of direct shear test box (a) 5 kPa (b) 10 kPa (c) 15 kPa (d) 20 kPa (e) 25 kPa (f) 30 kPa (g) 35kPa

در نمودارهای شکل (۵) تأثیر اندازه جعبه برش، به خوبی نمایان است. تقریباً در تمامی حالات در آزمایش با جعبه ۵

پس از اعمال تنش‌های نرمال مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلو پاسکال، بخش فوقانی جعبه برش مستقیم با سرعت ۹-۴/۵×۱۰ متر در هر گام محاسباتی عددی، نسبت به نیمه پایینی حرکت داده می‌شود. در هر بخش از این مقاله یکی از پارامترهای تأثیرگذار متغیر و مابقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است که در جای مناسب آن توضیح داده شده است. در شکل (۵) a تا g نمودارهای تنش برشی در مقابل کرنش برای اندازه‌های مختلف جعبه برش تحت فشارهای سربار متفاوت نشان داده شده است.

شکل ۵. نمودارهای تنش برشی در مقابل کرنش برای جعبه‌های برش با اندازه‌های متفاوت: (الف) تنش نرمال ۵ kPa؛ (ب) تنش نرمال ۱۰ kPa؛ (ج) تنش نرمال ۱۵ kPa؛ (د) تنش نرمال ۲۰ kPa؛ (ه) تنش نرمال ۲۵ kPa؛ (و) تنش نرمال ۳۰ kPa؛ (ز) تنش نرمال ۳۵ kPa.





نتایج ارائه شده در شکل (۷) بیان می کند که با افزایش ابعاد جعبه و ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای دیگر (افزایش نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه با ثابت نگه داشتن شعاع) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش پیدا می کند. در نتایج حاصل از آزمایش های با جعبه های بزرگ تر از ۲۰ سانتی متر، مقدار چسبندگی تغییر محسوسی نشان نمی دهد و به یک مقدار ثابت نزدیک می شود. این نتیجه منطبق بر نتایج بدست آمده از پژوهش های آزمایشگاهی قبلی از جمله [13] است.

#### ۴-۲- تأثیر فشار تشکیل

همان گونه که پیشتر توضیح داده شد، فشار تشکیل در واقع تنش فشاری است که در زمان آماده سازی نمونه به محیط اجزای مجزا وارد می شود، درحالی که هیچ باند و یا اصطکاک بین اجزا مدل وجود ندارد و استوانه ها می توانند به راحتی تغییر مکان دهند و فضاهای خالی را پر کنند، این تنش را می توان معادل تنش پیش تحکیمی نمونه در آزمایشگاه دانست که تنش های برجا نمونه در شرایط واقعی را شبیه سازی میکند. فشار تشکیل در زمان ساخت نمونه منجر به هم پوشانی اندک استوانه ها می شود که این هم پوشانی باعث ایجاد فشار می شود. برای بررسی تأثیر فشار تشکیل، جعبه برش مستقیم به ابعاد ۲/۵×۵×۵ سانتی متر مکعب با روش توضیح داده شده در بخش ۲، مدل سازی و آزمایش شده است. شکل (۸) تأثیر فشار تشکیل را بر مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش های عددی نشان می دهد. به منظور بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش های عددی، به بیشینه چسبندگی ( $C_0$ ) و بیشینه زاویه اصطکاک ( $\phi_0$ ) به دست آمده از نتایج تقسیم شده است.

شکل ۸ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک در مقابل فشار تشکیل.

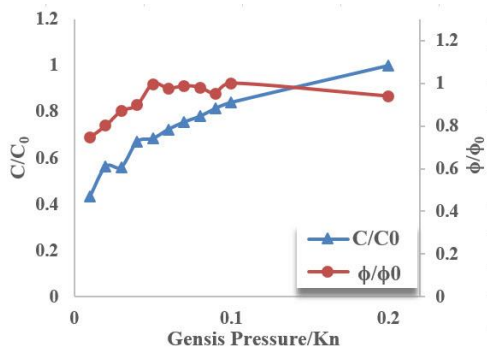


Fig. 8. Friction angle and cohesion versus gensis pressure.

سانتی متری (نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه برابر ۲۲۲) بیشترین مقدار تنش برشی ایجاد می شود که بیانگر تأثیر قابل توجه اندازه جعبه بر نتایج حاصل از آزمایش است. به منظور بررسی اثر اندازه جعبه بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش برش مستقیم، برای هر اندازه جعبه برش مستقیم، نمودار پوش گسیختگی آن در شکل (۶) ترسیم شده است.

شکل ۶. نمودارهای پوش گسیختگی برای اندازه جعبه های مختلف

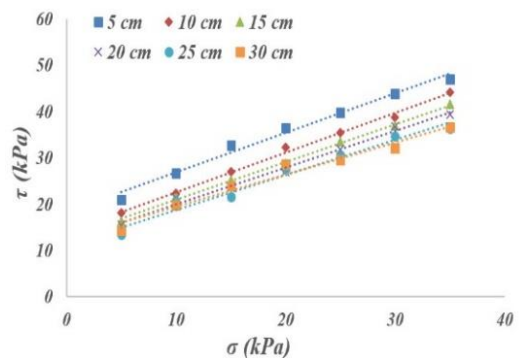


Fig. 6. Envelops for different boxes size.

مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی محاسبه و نمودار تغییرات آن ها در مقابل نسبت ابعاد جعبه برش به شعاع دانه ها ترسیم شده است که در شکل (۷) مشاهده می شود. در راستای بدون بعد نمودار، اعداد حاصل از آزمایش های عددی به بیشینه چسبندگی ( $C_0$ ) و بیشینه زاویه اصطکاک ( $\phi_0$ ) به دست آمده از نتایج تقسیم شده اند.

شکل ۷. تغییرات زاویه اصطکاک و چسبندگی در مقابل نسبت ابعاد جعبه برش به شعاع دانه ها.

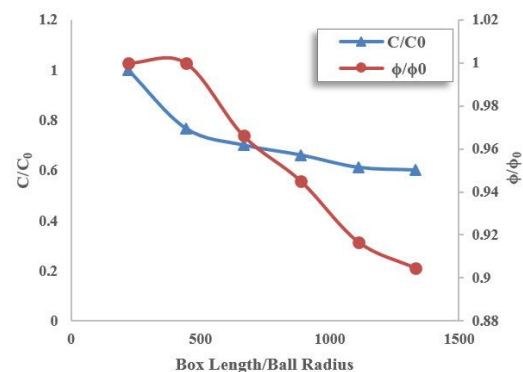


Fig. 7. Friction angle and cohesion versus the ratio of direct shear box dimensions ratio to cylinders radiuses.

شکل (۹) نمودار تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک در مقابل تنش نرمال.

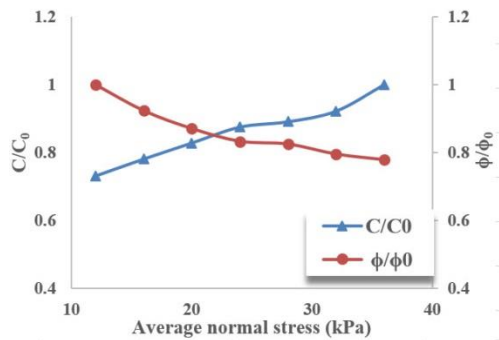


Fig. 9. Friction angle and cohesion versus normal stress.

نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که با افزایش میزان سربار قائم، مقدار C افزایش اما مقدار  $\phi$  کاهش می‌یابد که این موضوع هماهنگی خوبی با پوش گسیختگی موهر کولمب دارد، زیرا همان‌گونه که میدانیم در سطح تنش‌های بالا، پوش خطی موهر کولمب که مماس بر منحنی تنش برشی در مقابل تنش نرمال است در سطوح بالای تنش، چسبندگی بیشتر و زاویه اصطکاک کمتر نشان می‌دهد [25].

#### ۴-۴- تأثیر سرعت اعمال برش

برای بررسی اثر سرعت اعمال برش، جعبه برش مستقیم به ابعاد  $2/5 \times 5/0 \times 5/0$  سانتی‌متر مکعب مانند آنچه در بخش ۲ شرح داده شد، مدل‌سازی شده است. پس از آماده‌سازی نمونه مدل عددی، سرعت‌های مختلفی از اعمال برش به نیمه بالایی جعبه مطابق با اعداد ارائه شده در جدول (۳) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای هر سرعت اعمال برش، تنش‌های نرمال مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلو پاسکال به نمونه وارد شده است.

جدول ۳. سرعت‌های اعمال برش در مدل‌سازی عددی آزمایش.

Test number	Shear velocity (meter per cycle)
1	4.5e-10
2	9e-10
3	4.5e-9
4	9e-9
5	4.5e-8
6	9e-8
7	4.5e-7
8	9e-7

Table 3. shear velocities applied to the numerical models

همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش فشار تشکیل، چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این نتیجه منطبق بر نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی از جمله [24] است که به بررسی اثر پیش تحکیمی پرداخته‌اند. در حالت عددی نیز دلیل این موضوع را می‌توان به استفاده از مدل SOCPI<sup>1</sup> ارائه شده در برنامه CA2، نسبت داد. در مدل SOCPI، برای مدل‌سازی بهتر چسبندگی از هم‌پوشانی استوانه‌ها کمک گرفته می‌شود [18] که این موضوع توانایی برنامه CA2 را در مدل‌سازی نمونه‌های با چسبندگی‌های بالا و در واقع معادل تنش‌های پیش تحکیمی بالا افزایش می‌دهد. با افزایش فشار تشکیل مقدار هم‌پوشانی ذرات نیز افزایش می‌یابد که این افزایش منجر به افزایش چسبندگی نمونه می‌شود [18].

#### ۴-۳- تأثیر تنش سربار

در این بخش تأثیر تنش سربار، بر پارامترهای مقاومت برشی (C و  $\phi$ ) بررسی شده است. مدل‌سازی جعبه برش مستقیم به ابعاد  $2/5 \times 5/0 \times 5/0$  سانتی‌متر مکعب مانند شرایط ذکر شده در بخش ۲ است. تنش‌های نرمال اعمال شده به مدل عددی جعبه برش مستقیم در جدول (۲) مرتب شده است. پس از بارگذاری و شبیه‌سازی آزمایش برش مستقیم در برنامه، مقدار C و  $\phi$  حاصل از اعمال هر سربار برای هر نمونه محاسبه شده است که نتایج آن در شکل (۹) مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در راستای بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش‌های عددی به بیشینه چسبندگی ( $C_0$ ) و بیشینه زاویه اصطکاک ( $\phi_0$ ) به دست آمده از نتایج تقسیم شده‌اند.

جدول ۲. تنش‌های نرمال اعمال شده به مدل عددی در هر آزمایش.

Average normal stress	Normal stress (kPa)
12	3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21
16	4, 8, 12, 16, 20, 24 and 28
20	5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35
24	6, 12, 18, 24, 30, 36 and 42
28	7, 14, 21, 28, 35, 42 and 49
32	8, 16, 24, 32, 40, 48 and 56
36	9, 18, 27, 36, 45, 54 and 63

Table 2. Normal stresses applied on the specimens.



جعبه مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول (۴) در مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. مقادیر ضرایب اصطکاک دیواره جعبه برش در مدل عددی.

Test number	Friction coefficient
1	0
2	0.1
3	0.2
4	0.3
5	0.4
6	0.5
7	0.6
8	0.7
9	0.8
10	0.9
11	1.0

Table 4. Friction coefficient of direct shear box sides

تأثیر اصطکاک جدار جعبه برش بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش عددی برش مستقیم در شکل (۱۱) ارائه شده است.

شکل ۱۱. تاثیر اصطکاک جدار جعبه برش بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش عددی برش مستقیم.

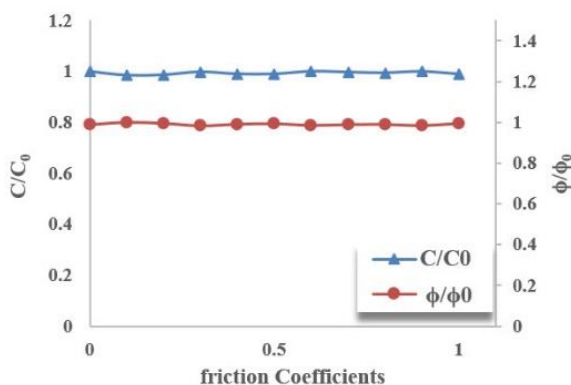


Fig. 11. Friction coefficient effects on cohesion and friction angle

همان طور که نتایج نشان می دهد با توجه به عدم تغییر حجم قابل توجه نمونه طی برش خوردن، مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی تغییر محسوسی ندارد و تقریباً برای تمامی ضرایب اصطکاک جدار جعبه، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تغییر قابل توجهی نکرده است. این نتایج هماهنگی خوبی با نتایج ارائه شده توسط کوسکونووا<sup>۱</sup> [26] دارد.

تأثیر سرعت برش خوردگی بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش های عددی در شکل (۱۰) ارائه شده است. در راستای بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش های عددی به حداکثر چسبندگی ( $C_0$ ) و بیشینه زاویه اصطکاک ( $\phi_0$ ) به دست آمده از نتایج تقسیم شده اند.

شکل ۱۰. تأثیر سرعت برش بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک.

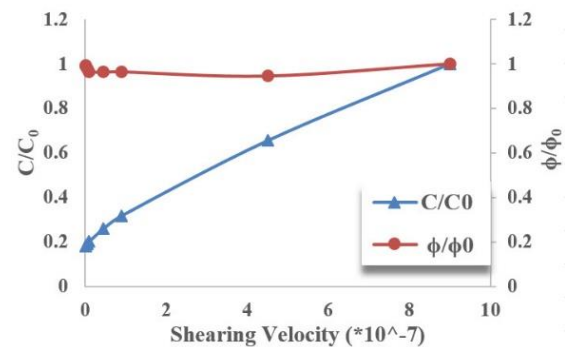


Fig. 10. Shear velocity effect on cohesion and friction angle

همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، با افزایش سرعت برش مقدار چسبندگی افزایش می یابد اما مقدار زاویه اصطکاک تغییر قابل توجهی نمی کند. نتایج به دست آمده از این تحقیق، هماهنگی بسیار خوبی با نتایج دیگر پژوهشگران نشان می دهد. این نتیجه هماهنگ بر نتایج بدست آمده از پژوهش های آزمایشگاهی قبلی از جمله [10] است.

#### ۴-۵- تأثیر اصطکاک دیواره های جعبه برش

اگر از جابه جایی صفحه بالایی جعبه برش مستقیم در طول آزمایش برش جلوگیری شود، نیروی اصطکاک بین دیواره های دستگاه به وجود می آید که این اصطکاک باعث کاهش تنش نرمال بر روی نمونه (در خاک های متراکم شونده) و یا افزایش تنش نرمال (در خاک های متورم شونده) در طول آزمایش برش مستقیم می شود [26]. اگر از این اثر چشم پوشی شود نتایج پارامترهای مقاومت برشی برای خاک های متراکم شونده دست پایین و برای خاک های متورم شونده دست بالا به دست می آید [26]. به منظور بررسی تأثیر ضریب اصطکاک دیواره جعبه برش، جعبه ای به ابعاد  $2/5 \times 5 \times 5$  سانتی متر مکعب مطابق با آنچه در بخش ۲ توضیح داده شده، مدل سازی شده است. مقادیر مختلفی برای آنالیز حساسیت ضریب اصطکاک دیواره

## ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش در ابتدا درستی آزمایشی بین مدل سازی عددی آزمایش برش مستقیم خاک در برنامه هیبرید اجزای محدود - اجزای مجزا CA2 با نتایج حاصل از آزمایش آزمایشگاهی برش مستقیم روی سبکدانه های مصنوعی انجام شد. پس از هماهنگی خوب نتایج دو روش، پارامترهای تأثیرگذار بر آزمایش برش مستقیم خاک، با استفاده از مدل سازی عددی بررسی شد. از جمله پارامترهای مهمی که در این پژوهش بررسی شده است، شامل تأثیر اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سربار، سرعت اعمال برش و اصطکاک جداره های جعبه برش مستقیم است. به طور کلی نتایج حاصل از بررسی عددی آزمایش برش مستقیم را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:

در بررسی تأثیر اندازه جعبه برش مستقیم، نتایج مدل سازی عددی نشان داده است که با افزایش ابعاد جعبه و ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای دیگر (افزایش نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه با ثابت نگه داشتن شعاع) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش پیدا می کند، ولی چسبندگی در آزمایش های با جعبه های بزرگ تر از ۲۰ سانتی متر به اندازه جعبه حساس نیست. همچنین به طور کلی، افزایش ابعاد جعبه برش منجر به کاهش مقدار تنش برشی حداکثر و باقی مانده حاصل از آزمایش برش مستقیم می شود. این نتیجه تأییدکننده نتایج حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی انجام شده توسط پژوهشگران پیشین است.

بررسی اثر فشار تشکیل نمونه در برنامه CA2، نشان می دهد که افزایش این پارامتر در مدل سازی نمونه ها، منجر به افزایش مقدار هم پوشانی ذرات و در نهایت افزایش چسبندگی نمونه می شود. به این وسیله با استفاده از مدل SOCPI ارائه شده در برنامه CA2، می توان مقادیر بزرگی از چسبندگی را شبیه سازی نمود.

در بررسی اثر سربار قائم روی نمونه، نتایج نشان می دهد که با افزایش میزان سربار قائم، مقدار چسبندگی افزایش اما مقدار زاویه اصطکاک کاهش می یابد. با افزایش سربار قائم، قفل و بست بیشتری در دانه ها به وجود می آید. این افزایش قفل و بست بین دانه ها بر روی مقدار چسبندگی تأثیر می گذارد و منجر به ایجاد چسبندگی ظاهری بزرگ تری می شود، این موضوع نیز با تغییر پارامترهای C و  $\phi$  سنگ ها با افزایش عمق کاملاً همخوانی دارد. [27]

بررسی عددی اثر سرعت برش خوردگی نمونه نشان می دهد که افزایش سرعت برش خوردن منجر به افزایش مقاومت نمونه خاک می شود. این یافته نیز تأییدکننده نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر که آزمایش های آزمایشگاهی برش مستقیم خاک را در سرعت های مختلف انجام دادند، است.

به دلیل عدم تغییر حجم قابل توجه نمونه طی برش خوردن، مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی تحت تأثیر اصطکاک جدار جعبه برش قرار نمی گیرند و تقریباً برای تمامی مقادیر اصطکاک جدار جعبه بررسی شده در این مقاله، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مقادیر یکسانی دارند. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج ارائه شده حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی توسط پژوهشگران دیگر هماهنگی خوبی نشان می دهد.

## References

## ۶- منابع

- [1] Shibuya, S., T. Mitachi, and S. Tamate. "Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear." *Geotechnique* 47.4 (1997): 769-790.
- [2] Stoewahse, C. 2001. On the determination of friction behaviour of geotextiles and soils in the direct shear device. Dissertation Universität Hannover, Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Heft 56. Eigenverlag, Hannover, (in German).
- [3] Goldscheider, G. 2003: Comparative tests with a conventional and a parallelly guided direct shear apparatus as basis for DIN 18137-3. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (in German).
- [4] Lindemann, M. 2003. Vergleich sversuchemit Rahmenschergeräten unterschiedlicher Bauart. *Geotechnik*, 26(1), 27-32 (in German).
- [5] DIN 18137-3. 2002. Soil, investigation and testing – Determination of shear strength – Part 3: Direct shear test (in German).
- [6] Kalhor, Amir. "The shear strength analyses of soil with various compactions under vertical load in direct shear test." *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 3 (2012): 2815-2821.
- [7] Kramer, U. & Rizkallah, V. 1976. Experiences with the determination of shear parameters in the shear box device. Mitteilungen Lehrstuhlfür Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau und Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Hannover, Heft 10. Eigenverlag, Hannover (in German).
- [8] Skempton, A. W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, No. 1, p.3-18.
- [9] Tika, T. E., Vaughan, P. R., Lemos, L. J. L. J. (1996). Fast shearing of pre-existing shear zone in soil. *Geotechnique* 46, No. 2, p.97-233.

- Rocks with High Friction Angles," Eng. Geol. (Amsterdam), Vol. 74, pp. 129-138.
- [19] Fakhimi, A., 2009, "A Hybrid Discrete-Finite Element Model for Numerical Simulation of Geomaterials," Comput. Geotech., Vol. 36, pp. 386-395.
- [20] Itasca Consulting Group, Inc., 1999, PFC2D, Particle Flow Code in 2 Dimensions, Itasca, Minneapolis, MN.
- [21] ASTM. (2004). "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions." D3080-04, West Conshohocken, Pa.
- [22] Ramyar Faramaz, Yasrebi Shahab Addin, Naeimi Far Omid "Investigating the effect of sample preparation method and plastic fines content on sand behavior" Tarbiat Modares journal, volume 13, 1392, 11-25. (In Persian).
- [23] Fakhimi, A., and Villegas, T. "Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture" Rock Mechanics and Rock Engineering, 40, 2007, 193-211.
- [24] Bjerrum, L., and Simons, N. E. "Compression of shear strength characteristics of consolidated clay" research conference on shear strength of cohesive soils, ASCE, 711-726.
- [25] Boltow, M. D. "The strength and dilatancy of sands" Geotechnique, 36, 1986, 65-78.
- [26] Kostkanová, V., and I. Herle. "Measurement of wall friction in direct shear tests on soft soil." Acta Geotechnica 7.4 (2012): 333-342.
- [27] Hoek E., Carranza-Torres C. and Corkum B.; 2002; "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition"; In: Proc Fifth North Am Rock Mech Symp.
- [10] Tika, T. E., Hutchinson, J. N. (1999). Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface. *Geotechnique* 49, No. 1, p.59-74.
- [11] Suzuki, M., Umezaki, T., and Yamamoto, T. (2000). Residual strength of soil by direct shear test. *Journal of Geotechnical Engineering* 645-50, JSCE, p.51-62.
- [12] Lemos, J. L. J. (2003). Shear behavior of pre-existing shear zone under fast loading-insights on the landslide motion. Proc. International workshop on occurrence and mechanisms of flow-like landslide motion, p. 229 - 236.
- [13] Alias, R., A. Kasa, and M. R. Taha. "Particle Size Effect on Shear Strength of Granular Materials in Direct Shear Test." *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 8.11 (2014): 1144-1147.
- [14] Zhang, L., and Thomson, C. "A numerical examination of the direct shear test" *Geotechnique*, 57, 117-130.
- [15] Potts, D. M., Dounias, G. T., and Vaughan P. R. "Finite element analysis of the direct shear box test" *Geotechnique*, 37, 11-23.
- [16] Wang, J., Dove, J. E., and Gutierrez, M. S., "Discrete-continuum analysis of shear banding in the direct shear test" *Geotechnique*, 57, 211-223.
- [17] Fakhimi, Ali, and Hooman Hosseinpour. "Experimental and numerical study of the effect of an oversize particle on the shear strength of mined-rock pile material." (2011): 1-8.
- [18] Fakhimi, A., 2004, "Application of Slightly Overlapped Circular Particles Assembly in Numerical Simulation of

# Numerical analysis of effective parameters in direct shear test by hybrid discrete – finite element method

M. Afrazi<sup>1</sup>, M. Yazdani<sup>2\*</sup>, A. A. Fakhimi<sup>4</sup>, M. Alitalesh<sup>3</sup>

1-M.Sc. of Geotechnical Engineering, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2-Assistant Prof., Geotechnical Eng., Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3-Professor, Mineral Eng., Dept. of Mineral Engineering, New Mexico Tech University, NM, USA, and School of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Iran

4-Ph.D. student in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

myazdani@modares.ac.ir

## Abstract:

Determination of soil engineering properties such as shear strength is essential to analysis many geotechnical problems. Therefore, determination of the reliable values for this parameter is very important. For this purpose, direct shear test as one of the oldest test to examine the shear strength of soils, is conducted on soil samples. There are too many factors which could affect results of direct shear test. Laboratory tests are expensive, difficult and time consuming, hence using numerical method to simulate experimental test and study effective factors can be useful. In this paper direct shear test was numerically modeled using CA2 hybrid finite element-discrete element method code. CA2 solves explicitly equations of motion together with macro or micro-constitutive equations. In this study, shear box is modeled using finite element grids and a discrete element model is implemented for simulation of soil specimen within the box. Appropriate boundary conditions are assigned to the box, normal stress is applied to the specimen using finite element grid and shear velocity was finally applied to the model. Shear force is applied to the model by a constant velocity  $4.5 \times 10^{-9}$  meter/cycle. It should be noted that, shear velocity is applied to the upper part of shear box, and applied velocity is considered small enough to confirm that there is a quasi-static condition in numerical solution. In this study using numerical simulation, the effects of box dimension, genesis pressure, normal stress, shear velocity and box wall friction on shear strength of the soil specimen are investigated. Study of box dimension effect, shows that peak effective internal friction angle in small direct shear box and large direct shear box differs about  $6^\circ$ , and cohesion decreases by increasing box dimension but for box dimensions bigger than 20cm, changes in box dimension has no significant effect on resulted soil cohesions. Investigation of influence of genesis pressure shows that, incrementing genesis pressure, cohesion increases too, that can be attributed to the SOCPI model provided in CA2. In SOCPI model by increasing genesis pressure the overlap between cylinders increases. In SOCPI model by increasing overlap the cohesion increases but peak friction angle doesn't change too much. Normal stress analysis shows that, increasing normal stress will increase the interlocking between soil particle and this tends to increase cohesion of the soil model. Shear velocity is another parameter which is studied in this research. Results show that by increasing shear velocity, soil shear strength increases. It should be mentioned that shear velocity should be considered as small enough to provide a quasi-static condition. In this research, friction of shear box wall was also investigated. When there is friction between box wall and soil particles, shear strength can be underestimated for contractant soils or overestimated for dilatant soils. In this paper, it is shown that if soil has no significant volume changes, peak shear strength is not affected by friction between soil particle and box wall.

**Keywords:** Direct Shear Test, Numerical Modeling, Finite Element Method, Discrete Element Method, Experimental tests