مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هجدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۷

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

محمد افرازی[۱]، محمود یزدانی[۲*]، مهتاب علی طالش[۳]، احمدعلی فخیمی[٤]

۱–دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲–استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳– دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس
٤–استاد بخش مهندسی معدن دانشگاه نیومکزیکو، آمریکا و دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس

mahyaz@gmail.com

تاریخ دریافت: [۹٦/۰۳/۰۷]　　تاریخ پذیرش: [۹٦/۱۰/۰۹]

چکیده

آزمون برش مستقیم یکی از قدیمیترین آزمونها برای اندازهگیری مقاومت برشی خاک است. عوامل بسیار زیادی میتواند بر نتایج حاصل از این آزمایش تأثیرگذار باشد. به دلیل اینکه روشهای آزمایشگاهی زمانبر و سخت هستند استفاده از روشهای عددی در بررسی عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش برش مستقیم میتواند مناسب و کارآمد باشد. در این مقاله با استفاده از برنامه اجزاء محدود –اجزاء مجزا CA2، آزمایش برش مستقیم خاک شبیهسازیشده و تأثیر عوامل مختلف در نتایج آزمایش موردبررسی قرارگرفته است. با استفاده از این برنامه عددی، خاک توسط روش اجزا مجزا و جعبه برش با استفاده از روش اجزا محدود مدلسازی 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 موردبررسی قرارگرفته است. نتایج این تحقیق نشان میدهد که با افزایش ابعاد جعبه برش، مقاومت کاهش مییابد درحالیکه با افزایش سربار، فشار تشکیل و سرعت برش مقاومت نمونه افزایش نشان میدهد. همچنین درصورتیکه تغییر حجم قابلتوجهی در نمونه طی برش خوردن ایجاد نگردد، اصطکاک دیوارههای جعبه برش تأثیر قابلتوجهی بر مقاومت نمونه ندارد.

واژگان کلیدی: **آزمایش برش مستقیم خاک، مدلسازی عددی، روش اجزا محدود، روش اجزا مجزا، آزمایشهای آزمایشگاهی.**

۱–مقدمه

مقاومت برشی خاک یکی از پارامترهای مهم در طراحیهای ژئوتکنیکی است که در تحلیل مسائلی مانند محاسبه فشار جانبی خاک، ظرفیت باربری پیها، پایداری شیبها، سدهای خاکی و دیگر مسائل ژئوتکنیکی به کار میرود. آزمایشهای متداول برای اندازهگیری مقاومت برشی خاک شامل آزمایشهای برش مستقیم، سهمحوری و برش مستقیم پیچشی هستند که از میان آنها آزمایش برش مستقیم به علت کاربرد فراوان در درک رفتار مکانیکی خاک بسیار مورد توجه است.

پژوهشهای متعددی عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش برش مستقیم را بررسی کردهاند [1, 4]. ازجمله آنها میتوان به اثر چگونگی سرهم کردن نیمه بالایی جعبه برش مستقیم و همچنین

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[1] 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[2] [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 [۵] اثر این پدیده را بررسی کند و دستگاهی با نیمه بالایی متحرک را به‌عنوان استاندارد پیشنهاد دهد. بااین‌حال بیشتر مطالعاتی که در ارتباط با آزمایش برش مستقیم انجام‌شده 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 انجام‌شده است [7]. سرعت برش نیز از دیگر پارامترهایی بوده که پژوهشگران مختلف به بررسی آن پرداخته‌اند [7, 12]. به‌عنوان‌مثال 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].

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 شبیه‌سازی‌شده است. شکل (۱) طرح‌واره‌ای از جعبه برش مستقیم مدل‌سازی شده در

1 Shibuya, s.
2 Stoewahse

CA2 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، جعبه از ۵ قسمت تشکیل‌شده که با حروف لاتین A، B، C، D و E نشان داده‌شده است. نیمه بالایی جعبه از چهار قسمت تشکیل‌شده است (A، B، C و D). قسمت C جعبه با قسمت عمودی B جعبه به‌وسیله سطح لغزش A1A3-C2C4[1] در ارتباط است. هیچ‌گونه سطح لغزشی در راستای B2B4-C1C3 به‌منظور دوران آزاد قسمت بالایی تعریف‌نشده است. دو سمت یک سطح لغزش در نرم‌افزار CA2 به‌وسیله فنرهای برشی و نرمال باهم برهم‌کنش[2] دارند. به‌منظور 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 اصطکاکی ندارند. همچنین برای قسمت‌های B1B2-E1E2 و A1A2-E5E6 سطح لغزش‌هایی برای جلوگیری از نفوذ ذرات به درون شبکه اجزا محدود و عدم اصطکاک دو جدار جعبه برش ، مانند سایر پژوهش-های عددی صورت گرفته در این زمینه، تعریف‌شده است [17].

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

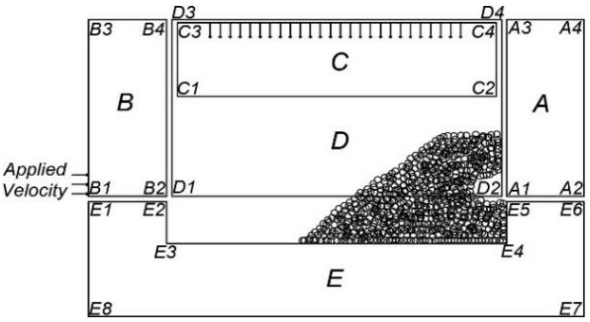


Fig. 1. A sketch of the shear box used for CA2 numerical simulation

قسمت D (D1، D2، D3 و D4) در شکل (۱) برای اتصال دو قسمت عمودی A و B در جعبه برش به‌منظور 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، دیوار[3]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 ایجادشده بین دو استوانه از مقاومت باند برشی یا باند نرمال کمتر باشد، مدل به‌صورت الاستیک عمل کند در غیر این صورت باندهای نرمال یا برشی می‌شکنند [20]. زمانی که یک باند گسیخته می‌شود، اتصال خود را به‌صورت 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[4] نیز باید تعیین شود. فشار تشکیل درواقع تنش فشاری است که در زمان آماده‌سازی یک نمونه به محیط مجزا وارد می‌شود. در زمان تشکیل نمونه هیچ باند و یا اصطکاکی بین اجزای مدل وجود ندارد و استوانه‌ها می‌توانند به‌راحتی 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، Ks و نرمال، Kn 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

1Interface
2Interaction
3Wall
4Genesis Pressure

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. درنهایت با اعمال جابجایی به سمت راست، نیمه بالایی جعبه نسبت به نیمه پایینی آن‌که ثابت است، حرکت می‌کند و مرحله بارگذاری برشی در آزمایش شروع می‌شود. سرعت اعمال برش برابر با $٤/٥\times١٠^{-٩}$ متر در هر گام محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. این سرعت اعمال برش به‌گونه‌ای انتخاب‌شده است که اطمینان حاصل شود نمونه طی انجام آزمایش به‌صورت شبه استاتیکی برش می‌خورد [17]. شکل (۲) هندسه و شرایط مرزی مدل عددی ایجادشده در برنامه CA2 را نشان می‌دهد.

شکل ۲. هندسه و شرایط مرزی مدل ایجادشده در برنامه CA2.

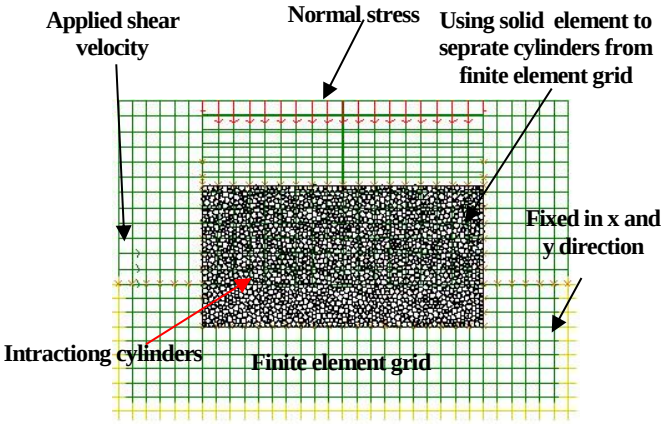


Fig. 2. Geometry and boundary conditions of CA2 model

۳ – کالیبراسیون مدل‌سازی عددی

به‌منظور درستی‌آزمایی مدل‌سازی 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 ۰/۰۷ تا ۰/٤ میلی‌متر است که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

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

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

Parameters	Value	Units
Wet density	16.73	kN/m3
Dry density	15.78	kN/m3
Silt content to sand content ratio	0.055	-
Maximum dry density	17.16	kN/m3
Minimum dry density	14.31	kN/m3
Friction angle	38	Degree
Diltation 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

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ و ۱۵۱ فیروزکوه.

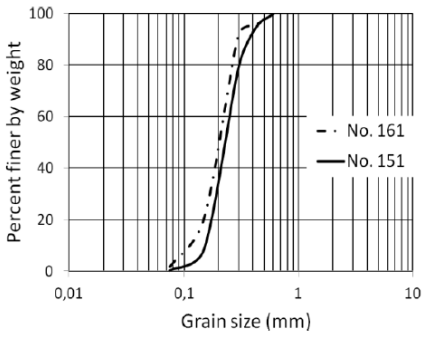


Fig. 3. Gradation curves of Firooz Kooh 151 and 161 sand

دستگاهی که آزمایش به وسیله آن انجام‌شده 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 تشکیل‌شده است. سیستم اندازه‌گیری نیروی برشی و جابه‌جایی افقی به‌صورت دیجیتالی است و سیستم بارگذاری قائم

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

نمونه خشک ماسه با چگالی حداکثر خشک ذکرشده 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 و ۴۸ کیلو پاسکال بر نمونه اعمال‌شده است. سپس مطابق با توضیح ارائه‌شده 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 (0.075) + D50 و (0.075) – D50 میلی‌متر داشته باشد و تنش‌های نرمال اعمال‌شده در مدل عددی کاملاً مطابق با آزمایش‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.

در ادامه با استفاده از روند پیشنهادشده در مرجع [23] مقادیر σ_0، K_s و K_n با کمک مدل‌سازی آزمایش دومحوری و نمودارهای مربوط ارائه‌شده 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 ٤. مقایسه بین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

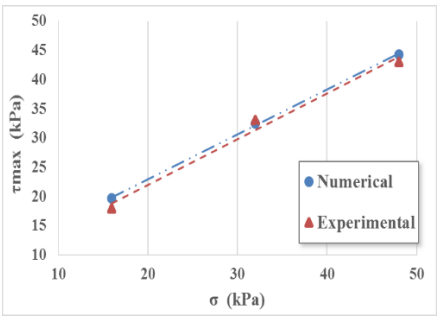


Fig. 4. Comparison of experimental and numerical results

sb=۵۰ N/m ،nb=۲۵ N/m ،ks=٤/٦٩٣×١٠٦ Pa ،kn=٤٩/٢×١٠٦ Pa و f=۰/۸ و σ_0 =۲/۳۱MPa. که در آن kn سختی فنر نرمال بین استوانه‌ها، ks سختی فنر برشی بین استوانه‌ها، nb باند نرمال، sb باند برشی، f ضریب اصطکاک و σ_0 فشار تشکیل نمونه است. در شکل (٤) مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نشان داده‌شده است.

همان‌گونه که از نمودارهای ارائه‌شده در شکل (٤) مشخص است، هماهنگی خوبی بین نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام‌شده و مدل‌سازی عددی در CA2 وجود دارد؛ بنابراین با توجه به اینکه هماهنگی خوبی بین نتایج آزمایش برش مستقیم و مدل عددی ایجادشده در CA2 وجود دارد و از درستی مدل‌سازی در این برنامه اطمینان حاصل‌شده است، پارامترهای تأثیرگذار در آزمایش برش مستقیم در برنامه CA2 مورد بررسی قرارگرفته است.

٤- 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 پرداخته‌شده است. پارامترهای بررسی‌شده در این پژوهش عبارت‌اند از اثر اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سربار، 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

به‌منظور 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 ارائه‌شده در بخش ۲ مدل‌سازی، شبیه‌سازی‌شده‌اند. در مدل‌سازی عددی، برای استوانه‌ها مقادیر میکرو مکانیکی kn=۳۳/۰٦×١٠٦ Pa ،ks=۷/٦×١٠٦ Pa ،N/m sb=١٩/٤ N/m ،nb=١٩/٤ و f=۰/۸ و σ_0/kn=۰/۰۷ که در بخش قبل کالیبره شده‌اند در نظر گرفته‌شده است؛ که kn سختی فنر نرمال، ks سختی فنر برشی، nb باند نرمال، sb باند برشی، f ضریب اصطکاک و σ_0 فشار تشکیل نمونه است. شعاع میانگین استوانه‌ها ۰/۲۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته و در مدل عددی اجازه داده‌شده است که شعاع استوانه‌ها به‌صورت تصادفی توزیع یکنواختی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ میلی‌متر داشته باشند.

پس از اعمال تنش‌های نرمال مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلو پاسکال، بخش فوقانی جعبه برش مستقیم با سرعت $^{-9}$ ۱۰×٤/٥ 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 گرفته‌شده است که در جای مناسب آن توضیح داده‌شده است. در شکل (۵) a تا g نمودارهای تنش برشی در مقابل کرنش برای اندازه‌های مختلف جعبه برش تحت‌فشارهای سربار متفاوت نشان داده‌شده است.

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

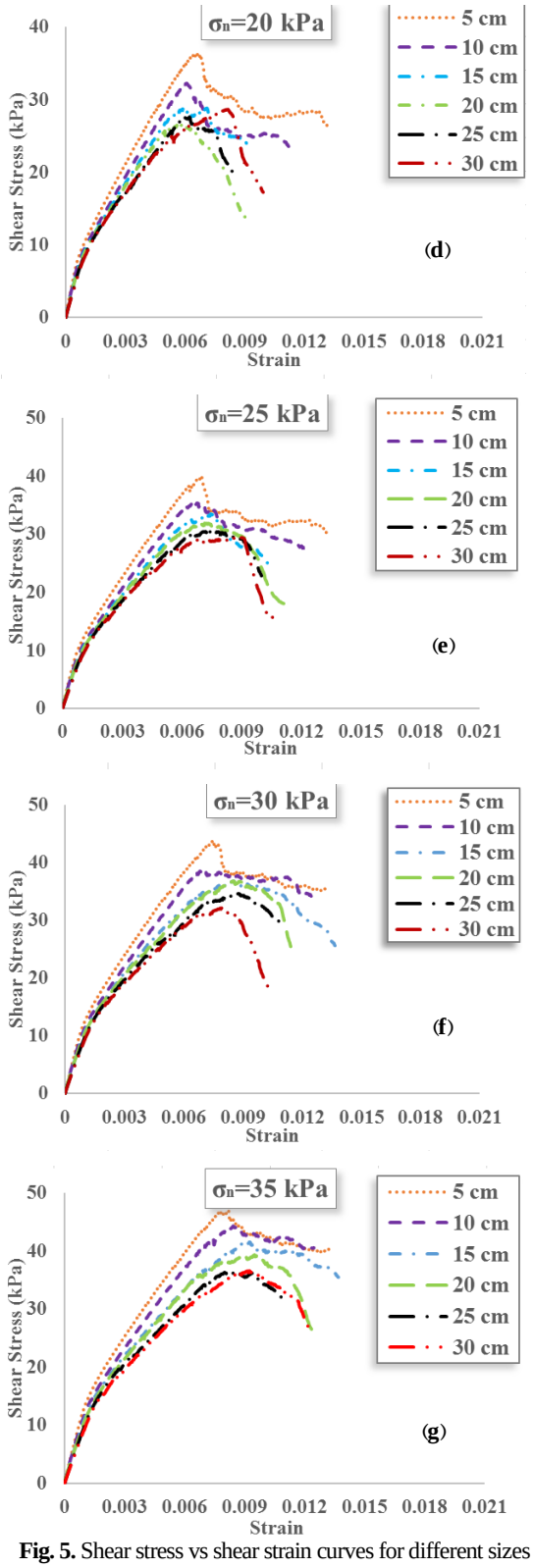
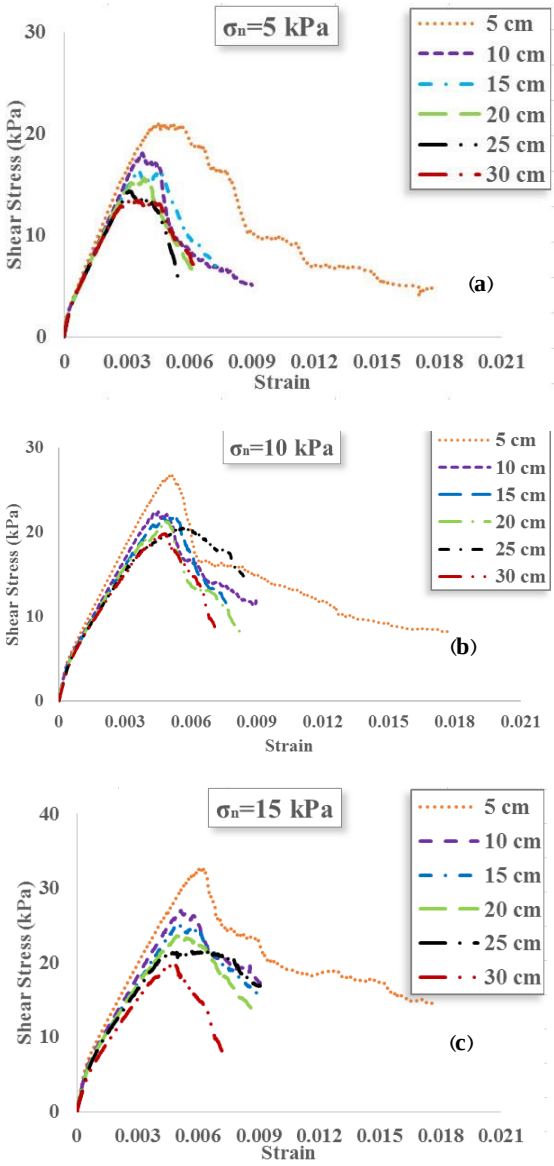


Fig. 5. Shear stress vs shear strain curves for different sizes of direct shear test box (a) 5 kPa (b) 10 kPa (c) 15 kPa (d) 20 kPa (e) 25 kPa (f) 30 kPa (g) 35kPa



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

سانتی‌متری (نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه برابر ۲۲۲) بیشترین مقدار تنش برشی ایجاد می‌شود که بیانگر تأثیر قابل‌توجه اندازه جعبه بر نتایج حاصل از آزمایش است. به منظور بررسی اثر اندازه جعبه برش بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش برش مستقیم، برای هراندازه جعبه برش مستقیم، نمودار پوش گسیختگی آن در شکل (٦) ترسیم‌شده است.

شکل ٦. نمودارهای پوش گسیختگی برای اندازه جعبه‌های مختلف

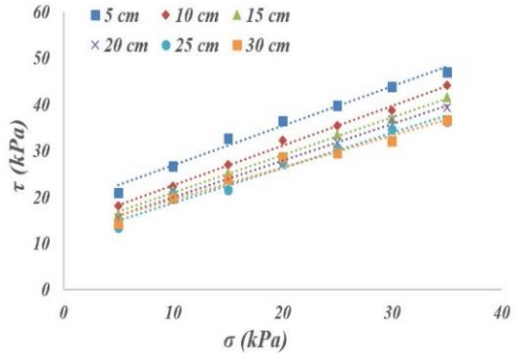


Fig. 6. Envelops for different boxes size.

مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی محاسبه و نمودار تغییرات آن‌ها در مقابل نسبت ابعاد جعبه برش به شعاع دانه‌ها ترسیم‌شده است که در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در راستای بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش‌های عددی به بیشینه چسبندگی (C_0) و بیشینه زاویه اصطکاک (φ_0) به دست آمده از نتایج تقسیم شده‌اند.

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

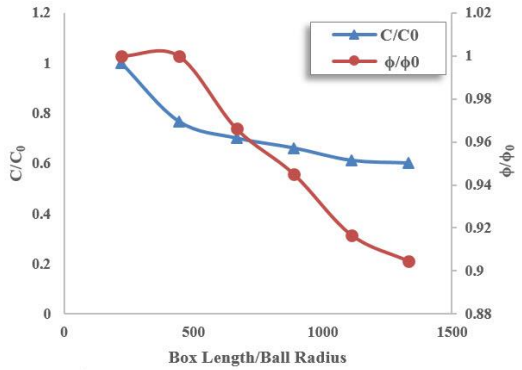


Fig. 7. Friction angle and cohesion versus the ratio of direct shear box dimensions ratio to cylinders radiuses.

نتایج ارائه‌شده در شکل (۷) بیان می‌کند که با افزایش ابعاد جعبه و ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترهای دیگر (افزایش نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه با ثابت نگه‌داشتن شعاع) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش پیدا می‌کند. در نتایج حاصل از آزمایش‌های با جعبه‌های بزرگ‌تر از ۲۰ سانتی‌متر، مقدار چسبندگی تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد و به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود. این نتیجه منطبق بر نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی ازجمله [13] است.

۴-۲-تأثیر فشار تشکیل

همان‌گونه که پیشتر توضیح داده شد، فشار تشکیل درواقع تنش فشاری است که در زمان آماده‌سازی نمونه به محیط اجزای مجزا وارد می‌شود، درحالی‌که هیچ باند و یا اصطکاکی بین اجزا مدل وجود ندارد و استوانه‌ها می‌توانند به‌راحتی تغییر مکان دهند و فضاهای خالی را پر کنند، این تنش را می‌توان معادل تنش پیش تحکیمی نمونه در آزمایشگاه دانست که تنش‌های برجا نمونه در شرایط واقعی را شبیه‌سازی میکند. فشار تشکیل در زمان ساخت نمونه منجر به هم‌پوشانی اندک استوانه‌ها می‌شود که این هم‌پوشانی باعث ایجاد فشار می‌شود. برای بررسی تأثیر فشار تشکیل، جعبه برش مستقیم به ابعاد ۵×۵×۲/۵ سانتی‌متر مکعب با روش توضیح داده شده در بخش ۲، مدل‌سازی و آزمایش‌شده است. شکل (۸) تأثیر فشار تشکیل را بر مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد. به‌منظور بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش‌های عددی، به بیشینه چسبندگی (C_0) و بیشینه زاویه اصطکاک (φ_0) به‌دست‌آمده از نتایج تقسیم‌شده است.

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

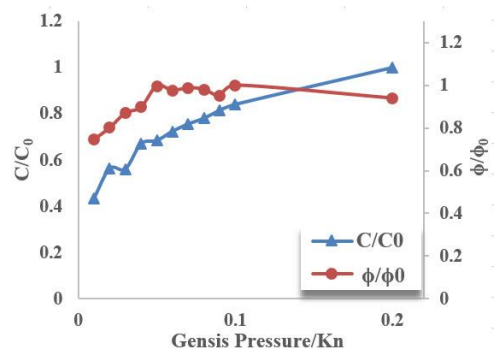


Fig. 8. Friction angle and cohesion versus gensis pressure.

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 ازجمله [24] است که به بررسی اثر پیش تحکیمی پرداخته‌اند. در حالت عددی نیز دلیل این موضوع را می‌توان به استفاده از مدل SOCPI[1] ارائه‌شده 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 درواقع 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 ϕ) بررسی‌شده است. مدل‌سازی جعبه برش مستقیم به ابعاد ۵/۰×۵/۰×۲/۵ سانتی‌متر مکعب مانند شرایط ذکرشده در بخش ۲ است. تنش‌های نرمال اعمال‌شده به مدل عددی جعبه برش مستقیم در جدول (۲) مرتب‌شده است. پس از بارگذاری و شبیه‌سازی آزمایش برش مستقیم در برنامه، مقدار C و ϕ حاصل از اعمال هر سربار برای هر نمونه محاسبه‌شده 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 (φ_0) به دست‌آمده از نتایج تقسیم شده‌اند.

جدول ۲. تنشهای نرمال اعمال‌شده 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.

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

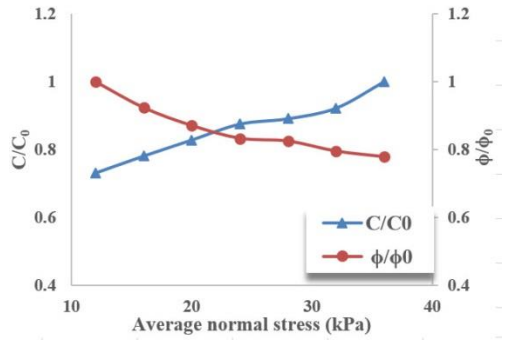


Fig. 9. Friction angle and cohesion versus normal stress.

نتایج ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که با افزایش میزان سربار قائم، مقدار C افزایش اما مقدارϕ 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 ۵/۰×۵/۰×۲/۵ 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 ارائه‌شده در جدول (۳) مورد بررسی قرارگرفته 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

1 Slightly Overlapped Circular Particles Interaction

تأثیر سرعت برش خوردگی بر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک حاصل از آزمایش‌های عددی در شکل (۱۰) ارائه‌شده است. در راستای بدون بعد کردن نمودار، اعداد حاصل از آزمایش‌های عددی به حداکثر چسبندگی (C_0) و بیشینه زاویه اصطکاک (φ_0) به‌دست‌آمده از نتایج تقسیم‌شده‌اند.

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

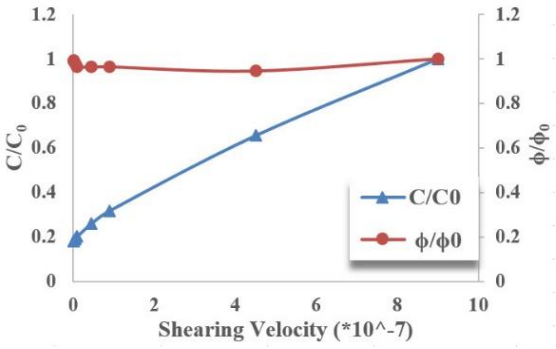


Fig. 10. Shear velocity effect on cohesion and friction angle

همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برش مقدار چسبندگی افزایش می‌یابد اما مقدار زاویه اصطکاک تغییر قابل‌توجهی نمی‌کند. نتایج به دست‌آمده از این تحقیق، هماهنگی بسیار خوبی با نتایج دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد. این نتیجه هماهنگ بر نتایج بدست آمده از پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی ازجمله [10] است.

۴-۵- تأثیر اصطکاک دیواره‌های جعبه برش

اگر از جابه‌جایی صفحه بالایی جعبه برش مستقیم در طول آزمایش برش جلوگیری شود، نیروی اصطکاکی بین دیواره‌های دستگاه به وجود می‌آید که این اصطکاک باعث کاهش تنش نرمال بر روی نمونه (در خاک‌های متراکم شونده) و یا افزایش تنش نرمال (در خاک‌های متورم شونده) در طول آزمایش برش مستقیم می‌شود [26]. اگر از این اثر چشم‌پوشی شود نتایج پارامترهای مقاومت برشی برای خاک‌های متراکم شونده دست پایین و برای خاک‌های متورم شونده دست بالا به‌دست می‌آید [26]. به‌منظور بررسی تأثیر ضریب اصطکاک دیواره جعبه برش، جعبه‌ای به ابعاد ۵×۵×۲/۵ سانتی‌متر مکعب مطابق با آنچه در بخش ۲ توضیح داده‌شده، مدل‌سازی شده است. مقادیر مختلفی برای آنالیز حساسیت ضریب اصطکاک دیواره جعبه مطابق با مقادیر ارائه‌شده در جدول (٤) در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته‌شده است.

جدول ٤. 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) ارائه‌شده است.

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

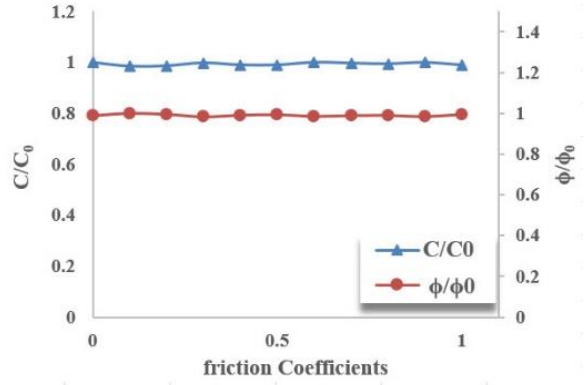


Fig. 11. Friction coefficient effects on cohesion and friction angle

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با توجه به عدم‌تغییر حجم قابل‌توجه 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 قابل‌توجهی نکرده است. این نتایج هماهنگی خوبی با نتایج ارائه‌شده توسط کوسکونووا[1] [26] دارد.

1Kostkanová

۵-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش در ابتدا درستی آزمایی بین مدل‌سازی عددی آزمایش برش مستقیم خاک در برنامه هیبرید اجزای محدود – اجزای مجزا CA2 با نتایج حاصل از آزمایش آزمایشگاهی برش مستقیم روی سبکدانه‌های مصنوعی انجام شد. پس از هماهنگی خوب نتایج دو روش، پارامترهای تأثیرگذار بر آزمایش برش مستقیم خاک، با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد. ازجمله پارامترهای مهمی که در این پژوهش بررسی‌شده است، شامل تأثیر اندازه جعبه برش مستقیم، فشار تشکیل نمونه، تنش سربار، سرعت اعمال برش و اصطکاک جداره‌های جعبه برش مستقیم است. به‌طورکلی نتایج حاصل از بررسی عددی آزمایش برش مستقیم را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

در بررسی تأثیر اندازه جعبه برش مستقیم، نتایج مدل‌سازی عددی نشان داده است که با افزایش ابعاد جعبه و ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترهای دیگر (افزایش نسبت اندازه جعبه به شعاع دانه با ثابت نگه‌داشتن شعاع) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش پیدا می‌کند، ولی چسبندگی در آزمایش‌های با جعبه‌های بزرگ‌تر از ۲۰ سانتی‌متر به‌اندازه جعبه حساس نیست. همچنین به‌طورکلی، افزایش ابعاد جعبه برش منجر به کاهش مقدار تنش برشی حداکثر و باقی‌مانده حاصل از آزمایش برش مستقیم می‌شود. این نتیجه تأییدکننده نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام‌شده توسط پژوهشگران پیشین است.

بررسی اثر فشار تشکیل نمونه در برنامه CA2، نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر در مدل‌سازی نمونه‌ها، منجر به افزایش مقدار هم‌پوشانی ذرات و درنهایت افزایش چسبندگی نمونه می‌شود. به این وسیله با استفاده از مدل SOCPI ارائه‌شده در برنامه CA2، می‌توان مقادیر بزرگی از چسبندگی را شبیه‌سازی نمود.

در بررسی اثر سربار قائم روی نمونه، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان سربار قائم، مقدار چسبندگی افزایش اما مقدار زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد. با افزایش سربار قائم، قفل و بست بیشتری در دانه‌ها به وجود می‌آید. این افزایش قفل و بست بین دانه‌ها بر روی مقدار چسبندگی تأثیر می‌گذارد و منجر به ایجاد چسبندگی ظاهری بزرگ‌تری می‌شود، این موضوع نیز با تغییر پارامترهای C و ϕ سنگ‌ها با افزایش عمق کاملاً همخوانی دارد. [27]

بررسی عددی اثر سرعت برش خوردگی نمونه نشان می‌دهد که افزاش سرعت برش خوردن منجر به افزایش مقاومت نمونه خاک می‌شود. این یافته نیز تأییدکننده نتایج ارائه‌شده توسط پژوهشگران دیگر که آزمایش‌های آزمایشگاهی برش مستقیم خاک را در سرعت‌های مختلف انجام دادند، است.

به دلیل عدم‌تغییر حجم قابل‌توجه نمونه طی برش خوردن، مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی تحت تأثیر اصطکاک جدار جعبه برش قرار نمی‌گیرند و تقریباً برای تمامی مقادیر اصطکاک جدار جعبه بررسی‌شده در این مقاله، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مقادیر یکسانی دارند. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج ارائه‌شده حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی توسط پژوهشگران دیگر هماهنگی خوبی نشان می‌دهد.

۶-منابع References

[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 fürGrundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Heft 56. Eigenverlag, Hannover, (in German).

[3] Goldscheider, G. 2003: Comparative tests with a conventional and a parallely guided direct shear apparatus as basis for DIN 18137-3. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (in German).

[4] Lindemann, M. 2003. Vergleich sversuchemit Rahmenschergerätenunterschiedlicher 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 InstitutfürGrundbau 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. G´eotechnique 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.

[10] Tika, T. E., Hutchinson, J. N. (1999). Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface. G´eotechnique 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 Thomton, 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 shaer 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" Geootechnique. 57, 211-223.
[17] Fakhimi, Ali, and HoomanHosseinpour. "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 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 fordirect 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 strenghth characteristics of consolidated clay" research conference on shear strenghth 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." ActaGeotechnica 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.

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

M. Afrazi[1], M. Yazdani[2*], A. A. Fakhimi[4] , M. Alitalesh[3]

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 Enviromental 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 4.5×10^{-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°, 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 increas 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