



شبیه‌سازی و بررسی ارتباط بین شاخص مخروط و گشتاور برشی با روش اجزا محدود

هادی عظیمی نژادیان^۱، سید حسین کارپرور فرد^{۲*}، مجتبی نادری بلداجی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (h.aziminejadian@shirazu.ac.ir)

۲. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (karparvr@shirazu.ac.ir)

۳. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران (naderi.mojtaba@sku.ac.ir)

چکیده

تراکم یکی از مشکلات خاک بوده که به صورت طبیعی یا توسط انسان ایجاد شده و بر رشد و عملکرد محصول تأثیر منفی می‌گذارد. این پدیده به طور مستقیم منجر به افزایش هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی به دلیل نیاز به عملیات خاک‌ورزی بیشتر و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر می‌شود. از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری مقاومت خاک، استفاده از نفوذسنج مخروطی و تست پره برش است. در این تحقیق آزمون‌های برش پره و نفوذسنج مخروطی با استفاده از روش المان محدود روی ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. از فرم خطی معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی استفاده شد. برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک، فرایند استقلال اندازه المان و مکعب خاک بر نتایج شبیه‌سازی انجام شد. نتایج نشان داد اندازه مناسب المان‌ها، طول، عرض و ارتفاع مکعب خاک در شبیه‌سازی برش پره به ترتیب برابر ۴، ۴۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و برای شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی به ترتیب برابر ۴، ۳۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین ارتباط بین هر یک از پارامترهای مقاومت به نفوذ و تنش برشی خاک با متغیرهای محتوای رطوبت، چگالی و چسبندگی خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو پارامتر مقاومت به نفوذ و تنش برشی خاک به ترتیب بیشترین و کمترین ارتباط را با چگالی و محتوای رطوبت خاک دارند. داده‌های حاصل از آزمون نفوذسنج در مقابل داده‌های حاصل از پره برش رسم شد و ارتباط خطی با ضریب تبیین ۰/۹ بین آن‌ها برقرار بود.

کلمات کلیدی: برش پره، نفوذسنج مخروطی، روش المان محدود، چگالی خاک، محتوای رطوبت خاک، چسبندگی خاک

*نویسنده مسئول: karparvr@shirazu.ac.ir



شبیه‌سازی و بررسی ارتباط بین شاخص مخروط و گشتاور برشی با روش اجزا محدود

مقدمه

تراکم یکی از مشکلات خاک بوده که به صورت طبیعی یا توسط انسان ایجاد شده و بر رشد و عملکرد محصول تأثیر منفی گذاشته و باعث کاهش خاصیت هیدرولیک خاک و افزایش حساسیت خاک به فرسایش می‌شود [1,2]. این پدیده به طور مستقیم منجر به افزایش هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی به دلیل نیاز به عملیات خاک‌ورزی بیشتر و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر می‌شود [3]. افزایش اندازه و وزن ماشین‌های کشاورزی در سال‌های اخیر موجب افزایش میزان تنش عمودی ناشی از وزن آن‌ها به خاک‌های کشاورزی شده و همچنین کشش ایجاد شده در زیر چرخ‌های محرک منجر به ایجاد تنش برشی شده که در نهایت افزایش تنش‌های عمودی و برشی هر دو باعث افزایش مقاومت خاک و در نتیجه افزایش تراکم خاک می‌شوند [4]. از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری مقاومت خاک، استفاده از نفوذسنج مخروطی و تست پره برش است [4]. از نفوذسنج‌های مخروطی معمولاً برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر نفوذ با سرعت مشخص استفاده می‌شود [5]. خروجی اندازه‌گیری شده، شاخص مخروط بوده که با تقسیم نیروی نفوذ به سطح مقطع مخروط به دست می‌آید. شاخص مخروط وابسته به خصوصیات خاک مانند محتوای رطوبت، تراکم توده خاک و توزیع اندازه ذرات خاک است [6]. یکی از دلایل اصلی استفاده از نفوذسنج‌های مخروطی تعیین ظرفیت تحمل خاک (تنش لهدگی) بوده که این مهم نه تنها در پروژه‌های مهندسی عمران بلکه در کشاورزی نیز اهمیت دارد از آنجا که نفوذسنج‌های مخروطی دارای سطح مقطع کوچک بوده نیاز به نیرو نفوذ کم دارند که می‌تواند توسط یک فرد تأمین شود [7]. تست برش پره یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک دست‌نخورده در مزرعه است [8]. آزمایش‌های متعددی توسط محققین با استفاده از روش برش پره در مزرعه انجام شده است و از آن به عنوان یک روش کمک‌کننده در سیستم‌های خاک‌ورزی خاک کشاورزی یاد می‌شود. در تحقیقی مقاومت برشی خاک با استفاده از روش برش پره به منظور ارزیابی وضعیت تراکم سه نوع خاک مرتع در طول ۱۲، ۵۰ و ۱۵۰ سال پس از پاک‌سازی یک جنگل دست‌نخورده انجام شد. نتایج نشان داد که میزان تفاوت تراکم خاک محاسبه شده از داده‌های مقاومت در برابر نفوذ یا داده‌های مقاومت برشی در این سه دوره به راحتی قابل تشخیص است [9]. آزمایش برش پره به منظور بررسی ویژگی‌های برهم‌کنش خاک و ابزار خاک‌ورز، مانند نیروهای و بررسی شکست خاک در استفاده شود [10]. داده‌ها اندازه‌گیری شده در مزرعه دارای انحراف استاندارد بالایی هستند که به طور معمول به ناهمگونی خاک، به عنوان مثال، وجود سنگ یا سوراخ‌هایی در خاک نسبت داده می‌شود [11,12]. با انجام تعداد زیاد تست‌های نفوذ در همان نقطه در مزرعه می‌توان این نقطه ضعف را جبران کرده و مقدار متوسط را محاسبه کرد [7]. با این حال، انجام اندازه‌گیری‌های متعدد در همان نقطه یک عمل وقت‌گیر و پرهزینه است. بنابراین تلاش‌هایی به منظور اندازه‌گیری خودکار مقاومت در برابر نفوذ با استفاده از اتصال سه نقطه و قدرت هیدرولیک تراکتور انجام شده است. نفوذسنج‌های چندگانه با گیرنده‌های GPS طراحی و ترکیب شده‌اند تا اندازه‌گیری‌های چندگانه را همزمان انجام دهند [12]. اگرچه روش‌های تجربی اطلاعات عملی و دقیقی را ارائه می‌دهند، اما اندازه‌گیری‌های متعدد و استخراج نتایج برای همه شرایط دشوار است. به منظور غلبه بر کمبود روش‌های تجربی و همچنین با افزایش توان سخت-افزارهای محاسباتی، استفاده از روش‌های عددی (روش المان محدود (FEM) و روش المان گسسته (DEM)) به طور گسترده در شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک و ابزارهای مورد استفاده در خاک استفاده می‌شود [4,13]. روش المان محدود، روشی مناسب برای شبیه‌سازی برهم‌کنش بین خاک و ابزار و فرایند برش خاک است [14]. در این راستا تحقیقات مختلفی به منظور شبیه‌سازی برش خاک توسط ابزارهای خاک‌ورز و همچنین نیروهای اعمالی از طرف توده خاک به ابزار خاک‌ورز انجام شده است و نویسندگان گزارش کرده‌اند که روش المان محدود روش قابل اعتمادی جهت شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک و ابزار خاک‌ورز می‌باشد [15-18]. روش المان محدود در مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی نفوذسنج عمودی استفاده شده است [19-22]. در مطالعه‌ای با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار



آباکوس یک نفوذسنج مخروطی شبیه‌سازی شد. در این مطالعه از فرم خطی مدل دراگر پراگر استفاده شد. توده خاک شامل سه لایه بود که لایه وسط به عنوان لایه سخت تعریف شد. نتایج شبیه‌سازی عمق لایه سخت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کرد [19]. در تحقیقی دیگر برهمکنش یک نفوذسنج افقی و خاک با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شد. اختلاف مقاومت نفوذ اندازه‌گیری شده با استفاده از روش شبیه‌سازی با داده‌های تجربی کمتر از ۱۲ درصد بود [22].

در این مطالعه هدف شبیه‌سازی آزمایش‌های شاخص مخروط و برش پره در خاک‌های مختلف با استفاده از روش المان محدود به منظور تعیین مقادیر میانگین نیرو بر واحد سطح و تنش برشی در هر خاک و همچنین بررسی ارتباط بین شاخص مخروط و گشتاور برشی است.

مواد و روش‌ها

آزمایش برش پره

آزمایش برش پره در مزرعه شامل قرار دادن یک پره داخل خاک (شکل ۱-الف) بوده که به صورت دستی با سرعت دورانی آهسته و ثابت چرخانده می‌شود. هنگام چرخش، سطوح بالایی و پایینی پره با خاک درگیر شده و باعث برش و شکست خاک می‌شوند. مقاومت خاک به طور مستقیم مرتبط با گشتاور اعمال شده به پره‌ها می‌باشد. بنابراین، مقاومت خاک در برابر شکست را می‌توان با گشتاور اعمالی به دستگاه توصیف کرد [23]. گشتاور کل (یعنی گشتاور شکست خاک یا مقاومت در برابر شکست خاک) را می‌توان با جمع جبری مقادیر گشتاورهای اعمال شده توسط ناحیه جانبی (T_s) و مناطق بالایی و پایینی پره تعریف کرد (به ترتیب T_{e1} و T_{e2}). در آزمایش‌های برش پره فرض می‌شود که خاک همگن و یکنواخت است. بنابراین، تنش تسلیم خاک در تمام جهات یکسان است و استحکام برشی (σ) به طور مساوی در ناحیه جانبی توزیع می‌شود و در مناطق بالایی و پایینی پره برابر است. با استفاده از معادلات (۱-۵) می‌توان گشتاور اعمالی به دستگاه برش پره را به تنش برشی مورد نیاز خاک تبدیل کرد [23].

$$T = T_s + T_{e1} + T_{e2} \quad (1)$$

$$T_s = \pi D H \sigma R = \frac{\pi}{2} D^2 H \sigma \quad (2)$$

$$T_{e1} = \int_{r_1}^R 2\pi r dr \cdot \sigma \cdot r = \frac{2}{3} \pi \sigma (R^3 - r_1^3) = \frac{1}{12} \pi \sigma (D^3 - d^3) \quad (3)$$

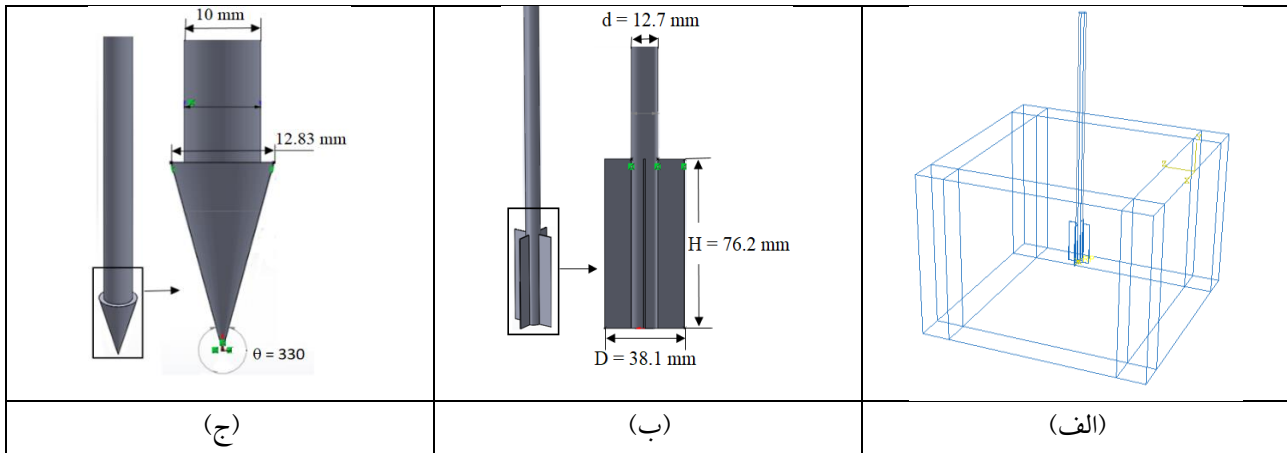
$$T_{e2} = \int_0^R 2\pi r dr \cdot \sigma \cdot r = \frac{1}{12} \pi \sigma D^3 \quad (4)$$

$$T = \frac{\pi}{12} \sigma (2D^3 + 6D^2 H - d^3) \quad (5)$$

در معادلات بالا D ، R و H به ترتیب قطر، شعاع و ارتفاع پره، σ تنش برشی، d و r به ترتیب قطر و شعاع محور هستند (شکل ۱-ب).

نفوذسنج مخروطی

آزمون نفوذ مخروط بر اساس نفوذ پیوسته ابزار استوانه‌ای با نوک مخروطی به داخل خاک عمل می‌کند. مقدار مقاومت خاک در برابر نفوذ ابزار مذکور توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق نفوذسنج مخروطی مطابق شکل (۱-ج) طراحی و در تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد زاویه نوک مخروط برابر ۳۰° است.



شکل ۱- (الف) نمایش مکعب خاک و دستگاه برش پره (ب) نمایش دستگاه پره برش شبیه‌سازی شده و ابعاد آن، (ج) نمایش نفوذسنج شبیه‌سازی شده و ابعاد آن.

روش المان محدود

مدل سه بعدی برهم کنش خاک با هر یک از ابزارها، شامل پره برش و شاخص مخروط صلب و مکعب خاک شکل‌پذیر می‌باشد. مطالعات متعددی خاک را به عنوان یک جسم الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته و از معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی برهم کنش خاک با ابزار دیگر استفاده کرده‌اند [17, 21, 24]. در این تحقیق نیز از معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی استفاده شد. فرم خطی مدل دراگر-پراگر مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی خاک بوده که با استفاده از آزمون سه محوری کالیبره شده و تابع تسلیم در این روش به صورت زیر تعریف می‌شود [25].

$$F = \tau - P \tan \xi - b \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

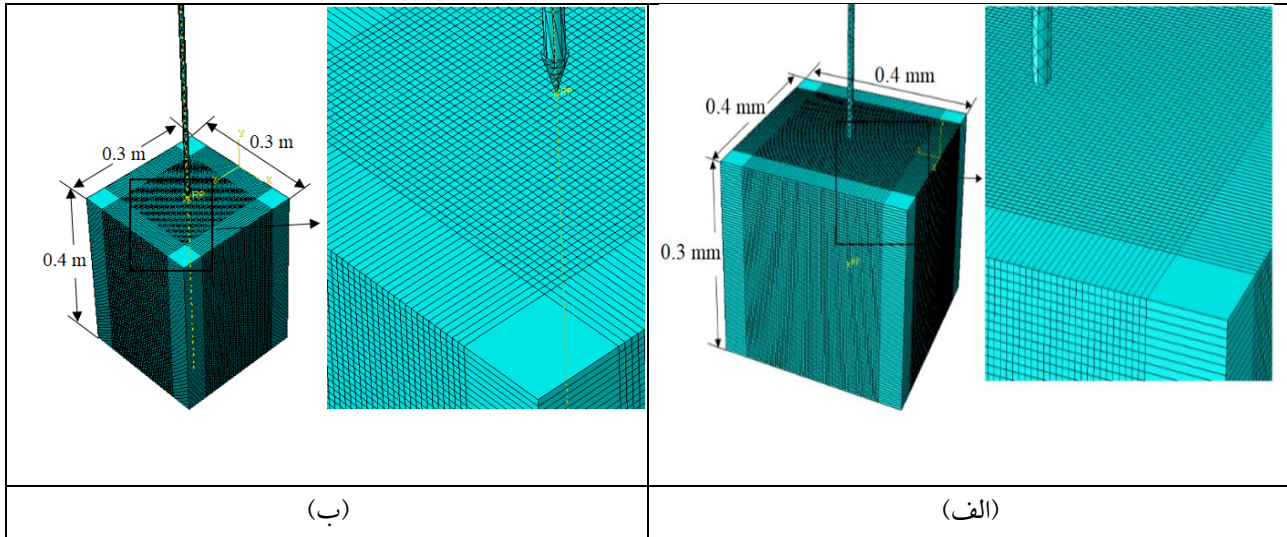
$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^3 \right] \quad (4)$$

در معادلات بالا F تابع تسلیم، τ تنش انحرافی، P تنش عمودی میانگین، ξ زاویه اصطکاک داخلی دراگر-پراگر، b عرض از مبدأ در صفحه P - τ ، σ_i تنش در راستای i ، k برابر است با نسبت تنش تسلیم کششی به فشاری که مقدار آن بین ۰/۷۷۸ و ۱ بوده و با استفاده از زاویه اصطکاک داخلی مور-کلمب (ϕ) مقدار آن محاسبه می‌شود [22, 26].

برای انجام شبیه‌سازی آزمون پره برش، پره برش طراحی شده وارد نرم‌افزار اباکوس شد. نقطه مرجعی به منظور اعمال شرایط مرزی، به آن اختصاص داده شد. ابزار در عمق مناسب ثابت شده و تنها قادر چرخش حول محور y با سرعت ثابت بود. برای المان‌بندی مکعب خاک و پره برش به ترتیب از بلوک‌های هشت‌گره‌ای (C3D8) و المان‌های مثلثی چهارگره‌ای (R3D4) استفاده شد (شکل ۲-الف). برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک، فرایند استقلال اندازه المان و مکعب خاک بر نتایج شبیه‌سازی انجام شد.

برای انجام شبیه‌سازی شاخص مخروط، ابزار طراحی شده به عنوان یک جسم صلب وارد نرم‌افزار اباکوس شد. نقطه مرجعی به منظور اعمال شرایط مرزی، به آن اختصاص داده شد. ابزار در تماس با سطح خاک ثابت شده و تنها قادر به حرکت در راستای محور y با سرعت

ثابت $(V = 0.01 \text{ m/s})$ بود [4]. ابزار تا عمق ۳۰۰ میلی‌متر در نمونه خاک حرکت کرده و میانگین نیرو و مقاومت خاک در هر شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. برای المان‌بندی مکعب خاک و شاخص مخروط به ترتیب از بلوک‌های هشت گرهی (C3D8) و المان‌های مثلثی چهار گرهی (R3D4) استفاده شد (شکل ۲-ب). برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک، فرایند استقلال اندازه المان و مکعب خاک بر نتایج شبیه‌سازی انجام شد. شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی و برش پره برای هر یک از نمونه‌های خاک موجود در جدول ۱ انجام شد.



شکل ۲- (الف) نمایش المان‌بندی برش پره و مکعب خاک، (ب) نمایش المان‌بندی نفوذسنج مخروط و مکعب خاک

جدول ۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک و تماسی خاک با ابزار در محتوای رطوبت و چگالی مختلف [27].

شماره نمونه	محتوای رطوبت (m^3/m^3)	چگالی مرطوب (Mg/m^3)	چگالی خشک (Mg/m^3)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک مور-کلمب (deg)	مدول یانگ (kPa)	نسبت پواسون	زاویه اصطکاک خاک با فلز (deg)
۱	۰/۰۷	۱/۳	۱/۲۱	۸/۶	۳۲/۶	۱۹۲۰	۰/۰۲	۲۲/۴
۲	۰/۱	۱/۳	۱/۱۸	۷	۳۱/۴	۱۹۱۰	۰/۰۵۹	۱۳/۱
۳	۰/۱۳	۱/۳	۱/۱۵	۹/۳	۲۹/۲	۲۰۹۰	۰/۰۶۷	۱۴/۴
۴	۰/۰۳	۱/۵	۱/۴۶	۲۲/۷	۲۹/۳	۳۴۶۰	۰/۳۸	۱۶
۵	۰/۰۷	۱/۵	۱/۴	۱۷	۳۰/۶	۳۳۳۰	۰/۲۰۲	۱۸/۹
۶	۰/۱	۱/۵	۱/۳۶	۱۶	۳۰/۹	۳۱۵۰	۰/۰۹۱	۱۵/۶
۷	۰/۱۳	۱/۵	۱/۳۲	۱۱/۷	۳۰/۸	۲۴۴۰	۰/۱۵	۲۵
۸	۰/۱۷	۱/۵	۱/۲۸	۸/۱	۳۱/۴	۲۴۸۰	۰/۰۴۵	۱۹/۸
۹	۰/۲۲	۱/۵	۱/۲۶	۹/۲	۳۰/۸	۲۳۳۰	۰/۲۵۴	۱۸/۳
۱۰	۰/۰۳	۱/۶۵	۱/۶	۱۹/۵	۳۷/۶	۱۲۱۷۰	۰/۴۵۹	۱۱/۹
۱۱	۰/۰۷	۱/۶۵	۱/۵۴	۳۰/۷	۲۶/۶	۶۴۷۰	۰/۳۷۳	۱۳/۳
۱۲	۰/۱	۱/۶۵	۱/۵	۲۰/۳	۳۰/۸	۵۷۸۰	۰/۳	۲۴
۱۳	۰/۱۳	۱/۶۵	۱/۴۶	۱۸/۶	۲۷/۴	۳۴۱۰	۰/۲۴۴	۲۴/۱
۱۴	۰/۱۷	۱/۶۵	۱/۴۱	۱۳/۲	۲۸/۴	۳۱۸۰	۰/۱۶۲	۲۱/۶
۱۵	۰/۲۲	۱/۶۵	۱/۳۸	۱۳/۹	۲۹/۱	۲۴۵۰	۰/۱۳۶	۲۰/۹

۲۳	۰/۴۳۷	۹۱۳۰	۳۳/۵	۱۶/۷	۱/۶۴	۱/۸	۰/۱	۱۶
۱۵/۹	۰/۳۷۷	۶۱۷۰	۲۹/۲	۲۲	۱/۵۹	۱/۸	۰/۱۳	۱۷
۱۷/۲	۰/۲۷۷	۴۵۶۰	۲۹/۸	۱۲/۸	۱/۵۴	۱/۸	۰/۱۷	۱۸
۱۸/۸	۰/۲۸۵	۳۱۴۰	۳۰/۹	۱۱/۶	۱/۴۹	۱/۸	۰/۲۲	۱۹
۱۹/۹	۰/۴۴۶	۱۰۰۳۰	۲۸/۸	۲۹/۹	۱/۷۷	۲	۰/۱۳	۲۰
۱۴/۸	۰/۴۴۵	۵۷۲۲	۲۷/۱	۲۱/۳	۱/۷۱	۲	۰/۱۷	۲۱

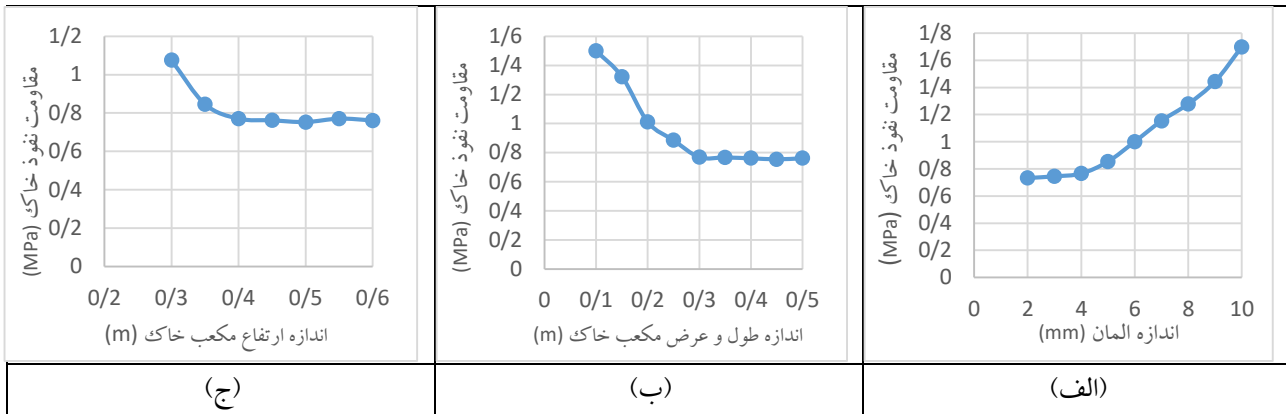
نتایج و بحث

برای هر کدام از نمونه‌های خاک، بیشینه گشتاور لازم برای برش خاک و نیروی مقاومت خاک به ترتیب با شبیه‌سازی آزمایش‌های برش پره و شاخص مخروطی محاسبه شد. برای تبدیل گشتاور به تنش برشی از معادله ۵ استفاده شد همچنین با تقسیم مقادیر نیروی مقاومت خاک بر سطح مقطع مخروط مقاومت خاک در برابر نفوذ مخروط محاسبه شد.

تعیین ابعاد مناسب مکعب خاک و اندازه المان‌ها

اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک برای هر کدام از آزمون‌های برش پره و شاخص مخروطی به طور جداگانه محاسبه شد. برای تعیین اندازه مناسب المان‌های خاک در آزمون نفوذسنج مخروطی، توده خاک به صورت مکعبی به طول، عرض و ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر ساخته شد. برای افزایش سرعت شبیه‌سازی اندازه المان‌های نواحی مجاور نفوذ مخروط به داخل خاک کوچک‌تر انتخاب شد. ابتدا اندازه المان‌های این ناحیه ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد و شبیه‌سازی برای این اندازه المان انجام شد و میانگین مقاومت خاک در برابر نفوذ در این شبیه‌سازی به دست آمد. همین روند برای اندازه المان ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳ و ۲ میلی‌متر تکرار شد. مقادیر نیروی مقاومت خاک در برابر نفوذ در مقابل اندازه المان‌ها در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. با توجه به این شکل اختلاف نیروی مقاومت خاک در المان‌هایی با ابعاد ۴ و ۳ میلی‌متر کمتر از ۱ درصد است بنابراین برای صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی‌ها از المان‌هایی با ابعاد ۴ میلی‌متر در تمام شبیه‌سازی‌های نفوذسنج مخروطی در خاک استفاده شد. برای تعیین ابعاد مکعب خاک، ارتفاع مکعب ثابت (۷۰۰ میلی‌متر) و طول و عرض مکعب خاک برابر فرض شد. شبیه‌سازی برای مقادیر طول و عرض ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر انجام شد. مقادیر نیروی مقاومت خاک به ازای هر یک از اندازه‌های مکعب در هر شبیه‌سازی استخراج شد (شکل ۳-ب). با توجه به شکل وقتی اندازه طول و عرض مکعب خاک برابر ۳۰۰ میلی‌متر یا بیشتر است، مقادیر نیروی مقاومت خاک تغییرات محسوسی (کمتر از یک درصد) ندارد بنابراین طول و عرض مکعب خاک ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای تعیین ارتفاع مکعب، طول و عرض مکعب و اندازه المان‌ها ثابت در نظر گرفته شد (به ترتیب ۴ و ۳۰۰ میلی‌متر). شبیه‌سازی برای اندازه ارتفاع مکعب ۳۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر انجام شد. به ازای هر شبیه‌سازی نیروی مقاومت خاک اندازه‌گیری شد (شکل). در نهایت با توجه به نتایج، اندازه ارتفاع مکعب خاک ۴۰۰ میلی‌متر به دست آمد (شکل ۳-ج).

برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک در شبیه‌سازی برش پره نیز از روش مشابه با روش نفوذسنج مخروطی استفاده شد. نتایج نشان داد اندازه مناسب المان‌ها، طول، عرض و ارتفاع مکعب خاک به ترتیب برابر ۴، ۴۰۰، ۴۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر است.

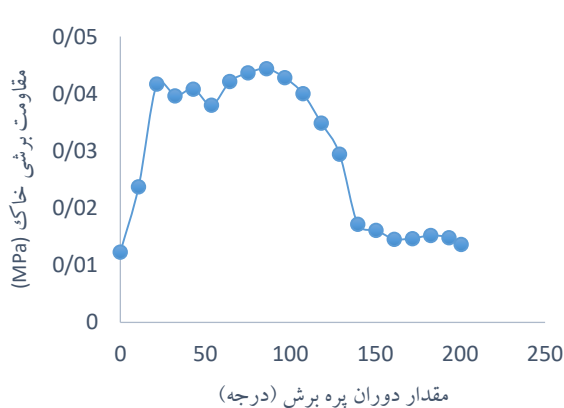


شکل ۳- نتایج آنالیز استقلال مقاومت نفوذ خاک از (الف) اندازه المان، (ب) اندازه طول و عرض مکعب خاک، (ج) اندازه ارتفاع مکعب خاک.

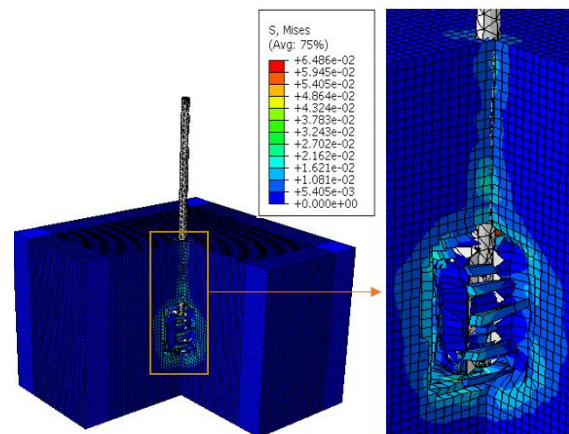
در تحقیقی به منظور تعیین ابعاد بهینه مکعب یا استوانه خاک در شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی به روش المان گسسته، به طور مشابه محققین گزارش کردند که بیشترین و کمترین مقاومت نفوذ خاک در مکعب یا استوانه‌هایی به ترتیب با سطح مقطع کمینه و بیشینه حاصل می‌شود. دلیل این پدیده، دور یا نزدیک بودن نفوذسنج به شرایط مرزی اعمالی به سطوح (دیواره‌ها) مکعب یا استوانه خاک در شبیه‌سازی ذکر شده است [4].

آزمون برش پره

آزمون برش پره برای ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. شکل (۴-الف) نمونه‌ای از کانتور تنش وان میسر اعمال شده به مکعب خاک را نشان می‌دهد. مقادیر گشتاور پیچشی لازم برای ایجاد حرکت دورانی پره در خاک برای هر شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. مقادیر گشتاور پیچشی با استفاده از معادله (۵) به تنش برشی مورد نیاز برای گسیختن خاک تبدیل شد. شکل (۴-ب) نمونه‌ای از روند تغییرات تنش برشی نسبت به جابجایی دورانی پره‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تنش برشی به طور لحظه‌ای افزایش پیدا کرده‌است و تا جابجایی دورانی حدود ۹۰ درجه مقادیر تنش برشی تقریباً نرخ ثابت داشته و سپس کاهش می‌یابد. بیشینه تنش برشی در بازه صفر تا ۹۰ درجه از چرخش برش پره حاصل می‌شود. با چرخش حدود ۱۵۰ درجه‌ای پره برش به طور تقریبی تغییرات مقاومت برشی خاک ثابت شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بعد از ۱۵۰ درجه از چرخش پره‌های برش المان‌های خاک گسیخته شده و تنها نیروی وزن المان‌ها است که باعث ایجاد حداقل گشتاور پیچشی در پره برش می‌شود (شکل ۴-ب).



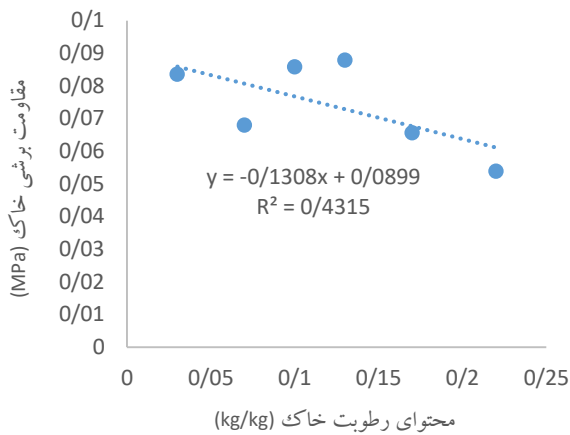
(ب)



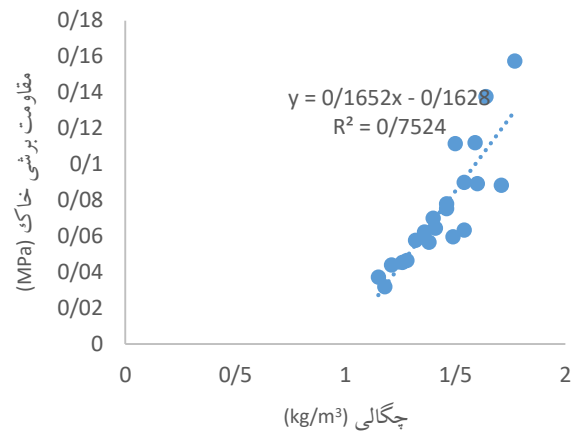
(الف)

شکل ۴- (الف) نمایش کانتور تنش وان میسز خاک در شبیه‌سازی پره برش، (ب) نمونه‌ای از نمودار مقاومت برشی خاک در برابر مقدار دوران پره برش.

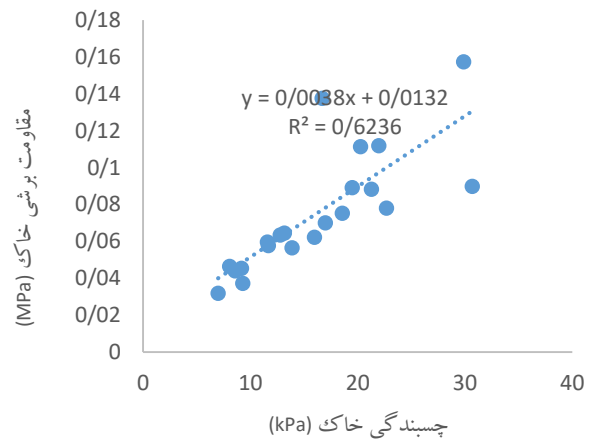
مقدار بیشینه تنش برشی خاک در نمودار شکل (۴-ب) و سایر نمونه‌های خاک محاسبه شد. شکل (۵-الف، ب، ج) ارتباط بین بیشینه مقاومت برشی نمونه‌های خاک به ترتیب با چگالی خاک، محتوای رطوبت خاک و چسبندگی خاک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل از بین این سه متغیر، مقاومت برشی بیشترین و کمترین وابستگی را به ترتیب به چگالی و محتوای رطوبت خاک دارد.



(ب)



(الف)



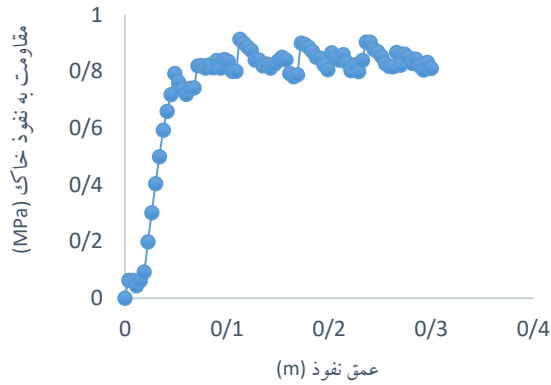
(ج)

شکل ۵- نمودار مقاومت برشی خاک در برابر (الف) چگالی خاک، (ب) محتوای رطوبت خاک، (ج) چسبندگی خاک.

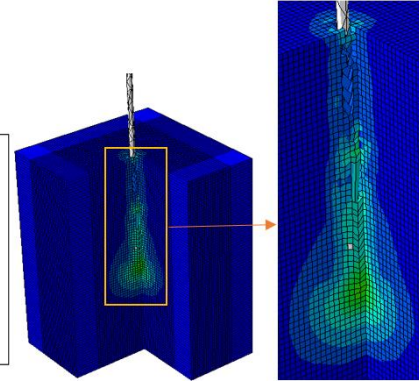
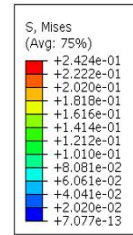
آزمون نفوذسنج مخروطی

شبیه‌سازی آزمون نفوذسنج مخروطی برای ۲۱ نمونه خاک انجام و مقادیر نیروی لازم برای نفوذ مخروط در خاک برای هر نمونه خاک اندازه‌گیری شد. شکل (۶-الف) نحوه توزیع تنش وان میسز در یک نمونه خاک بر اثر حرکت نفوذسنج مخروطی را نشان می‌دهد. مقادیر نیرو با استفاده از سطح مقطع مخروط به مقاومت نفوذ خاک تبدیل شد. شکل (۶-ب) نمونه‌ای از روند تغییرات مقاومت نفوذ نسبت

به جابجایی نفوذسنج را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶-ب) نیروی مقاومت خاک در از عمق نفوذ ۱۰ سانتی‌متر به بعد تقریباً ثابت بوده و تغییرات زیادی ندارد.



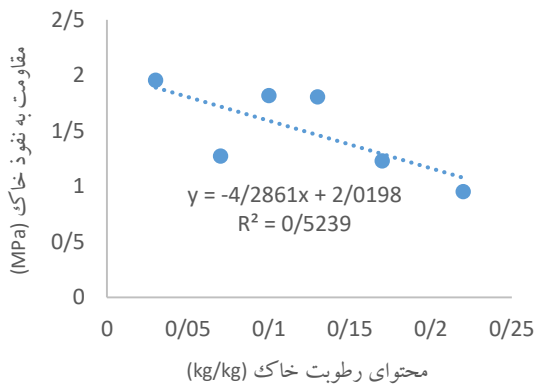
(ب)



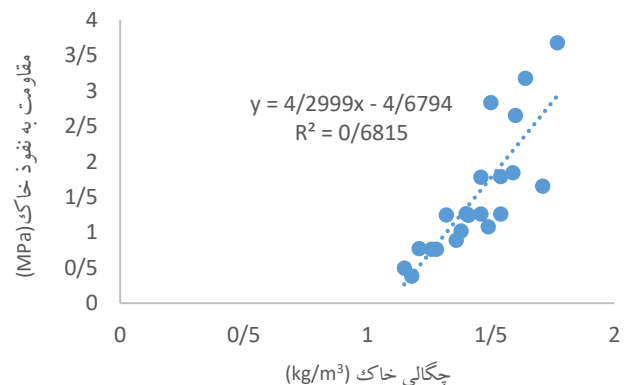
(الف)

شکل ۶- الف) نمایش کانتور تنش وان میسر خاک در شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی، ب) نمونه‌ای از نمودار مقاومت در برابر نفوذ خاک در شبیه‌سازی نفوذسنج مخروط.

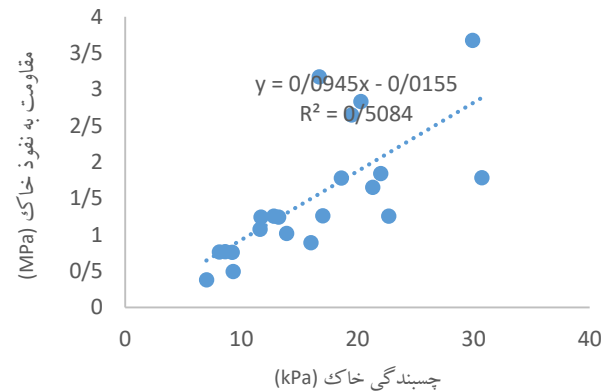
مقدار میانگین مقاومت نفوذ برای نمودار شکل و سایر نمونه‌های خاک محاسبه شد. شکل (۷-الف، ب، ج) ارتباط بین مقاومت نفوذ خاک با چگالی، محتوای رطوبت خاک و چسبندگی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل از بین سه متغیر مقاومت نفوذ خاک بیشترین کمترین وابستگی را به ترتیب به چگالی و محتوای رطوبت خاک دارد. در تحقیقی مشابه محققین بیان کردند که با افزایش محتوای رطوبت خاک مقدار مقاومت به نفوذ خاک کاهش می‌یابد همچنین ارتباط خطی قوی بین این دو پارامتر برقرار است [10].



(ب)



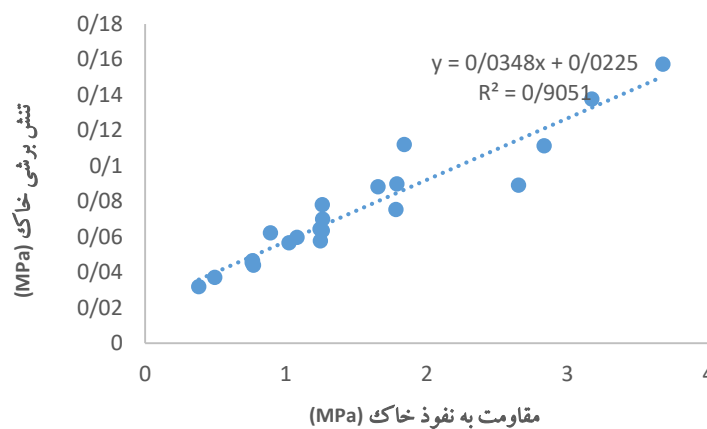
(الف)



(ج)

شکل ۷- نمودار مقاومت به نفوذ خاک در برابر (الف) چگالی خاک، (ب) محتوای رطوبت خاک، (ج) چسبندگی خاک.

مقادیر تنش برشی برای همه نمونه‌های خاک در مقابل مقاومت به نفوذ خاک در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار ضریب تبیین ارتباط این دو پارامتر برابر ۰/۹ است بنابراین ارتباط قوی بین بیشینه تنش برشی خاک و مقاومت به نفوذ آن می‌باشد.



شکل ۸- نمودار تنش برشی در برابر مقاومت به نفوذ خاک.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمون‌های برش پره و نفوذسنج مخروطی با استفاده از روش المان محدود روی ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. اندازه مناسب المان‌ها، طول، عرض و ارتفاع مکعب خاک در شبیه‌سازی برش پره به ترتیب برابر ۴، ۴۰۰، ۴۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر و برای شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی به ترتیب برابر ۴، ۳۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر به دست آمد. همچنین ارتباط بین هر یک از پارامترهای مقاومت به نفوذ و تنش برشی خاک با متغیرهای محتوای رطوبت، چگالی و چسبندگی خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو پارامتر مقاومت به نفوذ و تنش برشی خاک به ترتیب بیشترین و کمترین ارتباط را با چگالی و محتوای رطوبت خاک دارند. داده‌های حاصل از آزمون نفوذسنج در مقابل داده‌های حاصل از پره برش رسم شد و ارتباط خطی با ضریب تبیین ۰/۹ بین آن‌ها برقرار بود.



منابع

1. Fleige, H. and Horn, R., 2000. Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. *Advances in Geoecology*, (32), pp.258-268.
2. Hamza, M.A. and Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 82(2), pp.121-145.
3. Mouazen, A.M. and Ramon, H., 2002. A numerical-statistical hybrid modelling scheme for evaluation of draught requirements of a subsoiler cutting a sandy loam soil, as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil and Tillage Research*, 63(3-4), pp.155-165.
4. Kotrocz, K., Mouazen, A.M. and Kerényi, G., 2016. Numerical simulation of soil-cone penetrometer interaction using discrete element method. *Computers and electronics in agriculture*, 125, pp.63-73.
5. McKeyes, E. ed., 1985. *Soil cutting and tillage* (Vol. 7). Elsevier.
6. Sudduth, K.A., Chung, S.O., Andrade-Sanchez, P. and Upadhyaya, S.K., 2008. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *computers and electronics in agriculture*, 61(1), pp.20-31.
7. Laib, L. (Ed.), 2002. *Terepen mozgó járművek* (Moving off-road vehicles). Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, Hungary (in Hungarian).
8. Bauer, E., de Sousa, J.G., Guimarães, E.A. and Silva, F.G.S., 2007. Study of the laboratory Vane test on mortars. *Building and environment*, 42(1), pp.86-92.
9. Bachmann, J., Contreras, K., Hartge, K.H. and MacDonald, R., 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research*, 87(1), pp.112-118.
10. Arvidsson, J. and Keller, T., 2011. Comparing penetrometer and shear vane measurements with measured and predicted mouldboard plough draught in a range of Swedish soils. *Soil and Tillage Research*, 111(2), pp.219-223.
11. Sudduth, K.A., Chung, S.O., Andrade-Sanchez, P. and Upadhyaya, S.K., 2008. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *computers and electronics in agriculture*, 61(1), pp.20-31.
12. Fountas, S., Paraforos, D., Cavalaris, C., Karamoutis, C., Gemtos, T.A., Abu-Khalaf, N. and Tagarakis, A., 2013. A five-point penetrometer with GPS for measuring soil compaction variability. *Computers and electronics in agriculture*, 96, pp.109-116.
13. Asaf, Z., Rubinstein, D. and Shmulevich, I., 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), pp.227-242.
14. Armin, A., Fotouhi, R. and Szyszkowski, W., 2017. Experimental and finite element analysis for mechanics of soil-tool interaction. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 11(2), pp.433-439.
15. Bentaher, H., Ibrahim, A., Hamza, E., Hbaieb, M., Kantchev, G., Maalej, A. and Arnold, W., 2013. Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 134, pp.11-16.
16. Tagar, A.A., Changying, J., Adamowski, J., Malard, J., Qi, C.S., Qishuo, D. and Abbasi, N.A., 2015. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions. *Soil and Tillage Research*, 145, pp.157-170.
17. Ibrahim, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A. and Mouazen, A.M., 2017. Advanced analytical method of mouldboard plough's design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1-4), pp.781-788.



18. Azimi-Nejadian, H., Karparvarfard, S.H., Naderi-Boldaji, M. and Rahmanian-Koushkaki, H., 2019. Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 186, pp.168-181.
19. Tekeste, M.Z., Raper, R.L., Tollner, E.W. and Way, T.R., 2007. Finite element analysis of cone penetration in soil for prediction of hardpan location. *Transactions of the ASABE*, 50(1), pp.23-31.
20. Tekeste, M.Z., Tollner, E.W., Raper, R.L., Way, T.R. and Johnson, C.E., 2009. Non-linear finite element analysis of cone penetration in layered sandy loam soil—Considering precompression stress state. *Journal of Terramechanics*, 46(5), pp.229-239.
21. Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Tekeste, M.Z. and Keller, T., 2013. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer–soil interaction. Part I: Development of the model and evaluation of the model parameters. *Soil and Tillage Research*, 134, pp.153-162.
22. Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Tekeste, M.Z. and Keller, T., 2014. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer–soil interaction. Part II: Soil bin verification of the model in a clay-loam soil. *Soil and Tillage Research*, 144, pp.211-219.
23. He, C., You, Y., Wang, D. and Wu, H., 2018. Estimating soil failure due to torsion via vane shear test by varying vane diameter and soil properties. *Soil and Tillage Research*, 177, pp.68-78.
24. Naderi-Boldaji, M., Hajian, A., Ghanbarian, D., & Bahrami, M., 2018. Finite element simulation of plate sinkage, confined and semi-confined compression tests: A comparison of the response to yield stress. *Soil and Tillage Research*, 179, pp. 63-70.
25. Drucker, D. C., & Prager, W., 1952. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, 10(2), pp. 157-165.
26. ABAQUS., 2010. ABAQUS User's Manuals Version 6.10.1. ABAQUS, Inc., Providence, RI.
27. Mouazen, A. M., & Ramon, H., 2002. A numerical–statistical hybrid modelling scheme for evaluation of draught requirements of a subsoiler cutting a sandy loam soil, as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil and Tillage Research*, 63(3-4), pp. 155-165.



Hadi Azimi-Nejadian¹, Seyyed Hossein Karparvarfard^{1*}, Mojtaba Naderi-Boldaji²

1. Department of Biosystems Engineering, Shiraz University
2. Department of Biosystems Engineering, Shahrekord University

Abstract

Soil compaction is one of the natural and manmade problem that negatively affects crop growth and yield. It directly results in increasing the cost of agriculture production due to the need for tillage operations. Shear vane and cone index are two common method to measure the soil strength. In this study, shear vane and cone index were simulated on 21 different samples of soil using finite element method. The linear form of Drucker-Prager yield criterion was used for simulation. The dependency of simulation results on mesh size and soil cube dimensions was analyzed to determine the best mesh size and soil cube dimensions. The results showed, the best mesh size and length, width and height of soil cube for simulation of shear vane are 4, 400, 400 and 300 millimeters, and for simulation of the cone index are 4, 300, 300 and 400 millimeters, respectively. The correlation between soil penetration strength and soil shear stress with Soil density, moisture content, and cohesion was studied. The results showed that the both soil penetration strength and soil shear stress have the more and less correlation with soil density and moisture content, respectively. Finally, the soil shear stress was plotted against the soil penetration strength and there was a high correlation ($R^2=0.90$) between these two variables.

Key words: Vane shear, Cone index, Finite element method, Soil density, Soil moisture content, Soil cohesion

*Corresponding author

E-mail: karparvr@shirazu.ac.ir