



شبیه‌سازی و بررسی ارتباط بین شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک با مقاومت کششی خاک و رز برگردان دار با استفاده روش اجزا محدود

هادی عظیمی نژادیان^۱، سید حسین کارپرور فرد^۲، مجتبی نادرى 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

در این تحقیق، هدف استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی به منظور ارائه مدلی برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزار خاک و رز برگردان دار بدون اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک است. بدین منظور هر یک از آزمون‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی و همچنین برهمکنش خاک با ابزار خاک و رز با استفاده از روش المان محدود برای ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. از فرم خطی معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی خاک استفاده شد. به منظور توسعه مدل، ابتدا فرض شد خاک یکنواخت بوده و سپس سه مدل برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار ارائه شد. در مدل اول پارامترهای مدل عبارت بودند از شاخص مخروطی خاک، عمق و سرعت خاک‌ورزی و در مدل دوم به جای شاخص مخروطی از مقاومت پره برش استفاده شد و در نهایت در مدل سوم هر دو پارامتر شاخص مخروطی و مقاومت پره برش به همراه سرعت و عمق خاک‌ورزی در توسعه مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد مدل سوم از دو مدل دیگر دقیق‌تر و دارای ضریب تبیین ۰/۸۸ و جذر میانگین مربعات خطا آن نیز ۰/۷۵۳ کیلو نیوتن است. همچنین به طور مشابه بهترین مدل برای پیش‌بینی نیروی جانبی و عمودی وارد شده به ابزار خاک و رز نیز تعیین شد. ضریب تبیین مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی نیروی جانبی و عمودی به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۳۹ و جذر میانگین مربعات خطا آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۵۷۹ و ۰/۵۶ کیلو نیوتن به دست آمد.

کلمات کلیدی: پره برش، نفوذسنج مخروطی، روش المان محدود، خاک و رز برگردان دار، مقاومت کششی

*نویسنده مسئول: naderi.mojtaba@sku.ac.ir



شبیه‌سازی و بررسی ارتباط بین شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک با مقاومت کششی خاک و رز برگردان دار با استفاده روش اجزا محدود

مقدمه

خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین عملیات مزرعه‌ای است که به منظور بهبود ساختار و شرایط فیزیکی خاک و کمک به تهیه بستر رشد گیاه انجام می‌شود [1]. یکی از اهداف خاک‌ورزی کنترل علف‌های هرز می‌باشد، اما با استفاده روزافزون از انواع علف‌کش‌های موجود، کاربرد روش‌های مکانیکی (خاک‌ورزی) برای کنترل علف‌های هرز کمتر شده است [2]. به منظور کاهش انرژی مصرفی در عملیات آماده‌سازی بستر بذر، سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی جایگزین خاک‌ورزی مرسوم شده‌اند. با توسعه خاک‌ورزی حفاظتی، عملیات خاک‌ورزی ساده‌تر شده و همچنین مصرف سوخت، نیروی کار و فرسایش خاک کاهش می‌یابد [3]. بر اساس نتایج برخی از محققین، خاک‌ورزی حفاظتی برخلاف محاسن ذکر شده باعث افزایش و توسعه علف‌های هرز در سطح مزرعه می‌شود [4,7]. خاک‌ورزی نقش عمده‌ای در جابجایی و پراکندگی بذر علف‌های هرز در خاک دارد. این توزیع عامل مهمی برای بقای بذر، جوانه‌زنی و ظهور علف‌های هرز و در نتیجه اثربخشی کلی خاک‌ورزی به عنوان یک روش کنترل علف‌های هرز است [8]. استفاده موردی از خاک و رز برگردان دار روش مناسبی برای مبارزه با علف‌های هرز بوده و همچنین باعث کاهش استفاده از علف‌کش‌ها می‌شود، به عبارت دیگر می‌توان از آن به عنوان روش ارگانیک مبارزه با علف‌های هرز یاد کرد [9]. بنابراین تحقیقات زیادی به منظور بهبود اثربخشی خاک‌ورزی، درک روند حرکت خاک و نیروهای اعمالی از طرف توده خاک به ابزار خاک و رز برگردان دار انجام شده است. مدل‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی برخورد خاک و خاک و رز برگردان دار توسعه داده شده‌اند. برخی از رایج‌ترین این روش‌ها شامل روش‌های تحلیلی [10,11] و روش تجربی [12,13] هستند. به خاطر شبه استاتیک یا دینامیک فرض کردن رفتار خاک، این مدل‌ها تنها قادر به شبیه‌سازی گسیختگی یا شکست خاک می‌باشند و در شبیه‌سازی حرکت خاک ناتوان هستند [14]. اگرچه مدل‌های تجربی اطلاعات عملی را ارائه می‌دهند، اما اندازه‌گیری‌های متعدد و استخراج نتایج برای همه شرایط دشوار است. به منظور غلبه بر ضعف روش‌های تحلیلی و تجربی، رویکردهای مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی اثر متقابل خاک با ابزار خاک و رز مورد استفاده قرار می‌گیرد [14]. روش المان محدود، روشی مناسب برای شبیه‌سازی برهم‌کنش بین خاک و ابزار و فرایند برش خاک است [15]. همچنین این روش برای مطالعه نیروهای اعمالی به ابزار خاک و رز استفاده می‌شود [16,17]. تاگر و همکاران (۲۰۱۵) از روش المان محدود به منظور شبیه‌سازی الگوی شکست خاک استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده از مزرعه مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان داد که روش المان محدود یک روش قابل اعتماد برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک با ابزار می‌باشد [18]. در تحقیقی فرایند برش خاک توسط خاک و رز برگردان دار با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شد. خاک و ابزار خاک و رز به ترتیب به عنوان یک جسم شکل‌پذیر و صلب در نظر گرفته شدند. در این تحقیق اثر زاویه برش بر مؤلفه‌های نیروهای اعمالی به ابزار بررسی شد و نتایج نشان داد با افزایش زاویه برش، مقدار مؤلفه‌های نیروی اعمالی به خاک و رز افزایش می‌یابد [19]. ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش المان محدود اثر شرایط عملکردی یک خاک و رز برگردان دار را بر نیروهای اعمالی بر این ابزار خاک و رز بررسی کردند. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، همبستگی بالایی بین نتایج این دو روش مشاهده شد [20]. در تحقیقی مشابه اثر پارامترهای هندسی خاک و رز برگردان دار مانند زاویه استقرار، تنظیم و برش و همچنین انحناى صفحه برگردان‌دار بر نیروی وارد بر ابزار مطالعه شد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشخص شد که این پارامترها اثر معنی‌داری بر مقدار نیرو اعمالی بر خاک و رز دارند [21]. در تحقیقی به منظور توسعه مدلی برای پیش‌بینی سریع و دقیق مقاومت کششی ابزار خاک و رز برگردان دار از روش المان محدود استفاده شد. در این تحقیق، خاک را به عنوان یک جسم الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد و از معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک با ابزار دیگر استفاده

گردید. در نهایت معادله‌ای به روش رگرسیون چند متغیره منظور پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز برگردان‌دار بر اساس چگالی، درصد رطوبت خاک و عمق و سرعت خاک‌ورزی ارائه شد. محققین گزارش کردند که معادله ارائه شده معادله قابل اعتماد برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار می‌باشد [22].

در این تحقیق، هدف استفاده از نتایج حاصل آزمون‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی به منظور پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز برگردان‌دار بدون اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک است. بدین منظور هر یک از آزمون‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی با استفاده از روش المان محدود برای ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. همچنین برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز نیز برای هر نمونه خاک شبیه‌سازی گردید، در نهایت با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره معادله‌ای به منظور پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های پره برش و شاخص مخروطی ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق هر یک از شبیه‌سازی‌ها برای خاک یکنواخت و خاک غیریکنواخت (خاک دارای لایه سخت) انجام شد. در شبیه‌سازی‌های مربوط به خاک غیریکنواخت، مکعب خاک در هر دو شبیه‌سازی آزمون نفوذسنج مخروطی و برهم‌کنش خاک با خاک ورز برگردان‌دار به سه لایه ۹۰ میلی‌متری تقسیم شد. بنابراین می‌توان خواص مکانیکی و فیزیکی یک خاک سخت برای هر کدام از لایه‌ها تعریف کرده و آن لایه را به عنوان لایه سخت در نظر گرفت.

نفوذسنج مخروطی

شبیه‌سازی آزمون نفوذسنج مخروطی در چهار مرحله انجام شد. در مرحله اول شبیه‌سازی، مکعب خاک یکنواخت فرض گردید و برای هر کدام از ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی انجام شد. در مرحله دوم لایه اول به عنوان لایه سخت تعریف شده و شبیه‌سازی‌ها تکرار گردید خصوصیات خاک برای لایه سخت در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت بود. به همین ترتیب در مراحل سوم و چهارم از شبیه‌سازی نفوذسنج، به ترتیب لایه‌های دوم و سوم به عنوان لایه سخت تعریف شدند. در هر شبیه‌سازی میانگین نیروی مقاومت خاک در برابر نفوذ ابزار اندازه‌گیری گردید. مدل سه بعدی برهم‌کنش خاک شامل شاخص مخروطی صلب و مکعب خاک شکل‌پذیر می‌باشد. مطالعات متعددی در شبیه‌سازی به روش المان محدود خاک را به عنوان یک جسم الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته و از معیار تسلیم دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک با ابزار دیگر استفاده کرده‌اند [21,23,24]. 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].

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

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

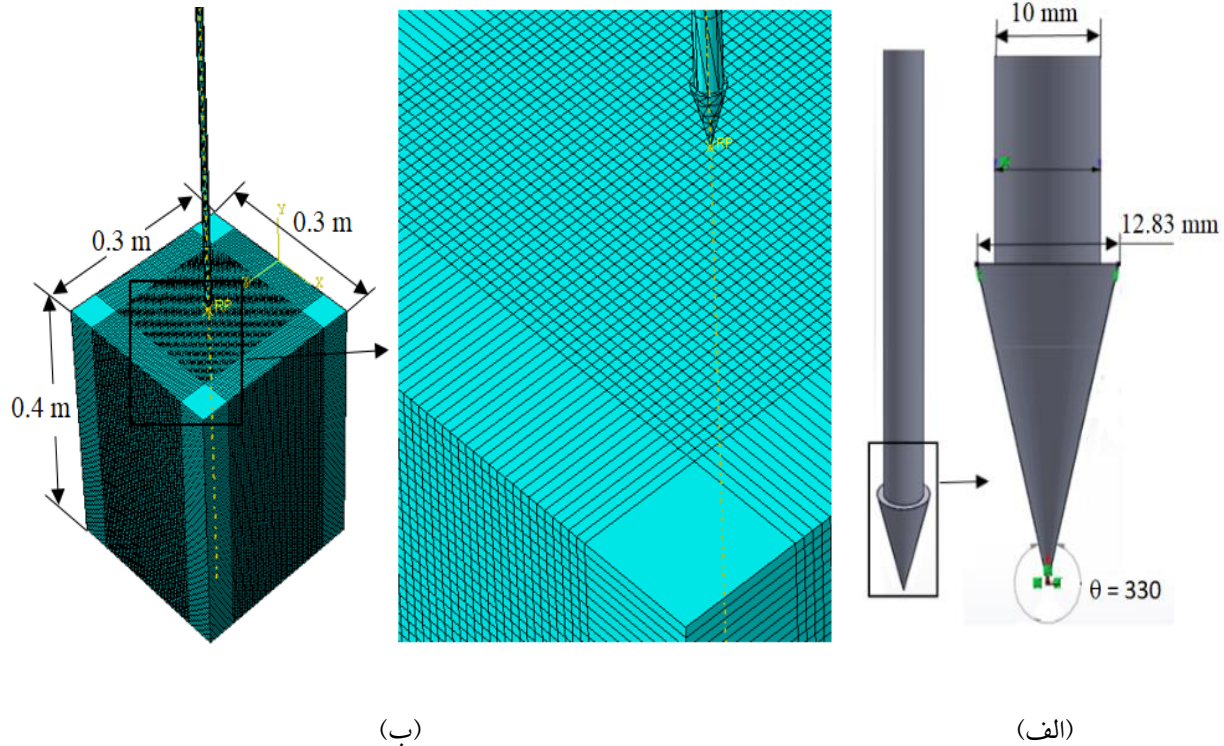
$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} \right)^3 \right] \quad (4)$$

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 [23, 26].

برای انجام شبیه‌سازی شاخص مخروط، ابزار طراحی شده به عنوان یک جسم صلب وارد نرم‌افزار اباکوس شد (شکل ۱- الف). 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 [27]. ابزار تا عمق ۳۰۰ میلی‌متر در نمونه خاک حرکت کرده و میانگین نیرو مقاومت خاک در هر شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. برای المان‌بندی مکعب خاک و شاخص مخروط به ترتیب از بلوک‌های هشت‌گانه (C3D8) و المان‌های مثلثی چهار گره‌ای (R3D4) استفاده شد (شکل ۱- ب). برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها و مکعب خاک، فرایند استقلال اندازه المان و مکعب خاک بر نتایج شبیه‌سازی انجام شد و اندازه مناسب المان‌ها ۴ میلی‌متر به دست آمد.

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



شکل ۱- (الف) نمایش نفوذسنج مخروطی شبیه‌سازی شده و ابعاد آن (ب) نمایش المان‌بندی نفوذسنج مخروطی و مکعب خاک.

آزمایش برش پره

شبیه‌سازی آزمایش برش پره برای تمام نمونه‌های خاک جدول ۱ انجام شد و در هر شبیه‌سازی مکعب خاک یکنواخت فرض شد. مقاومت خاک به طور مستقیم مرتبط با گشتاور اعمال شده به پره‌ها می‌باشد. با استفاده از معادلات (۵-۱) می‌توان گشتاور اعمال شده به پره‌ها را به مقاومت برشی خاک تبدیل کرد [28].

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

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

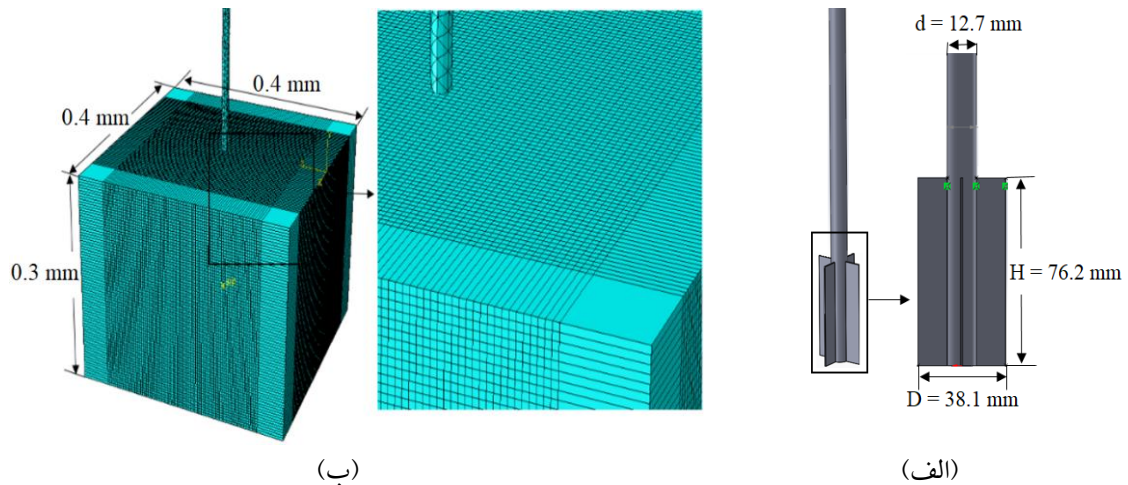
$$T_{e1} = \int_{r_1}^R 2\pi r dr \cdot \sigma \cdot r = \frac{2}{3} \pi \sigma (R^3 - r_1^3) = \frac{1}{12} \pi \sigma (D^3 - d^3) \quad (3)$$

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

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

در معادلات بالا T گشتاور شکست خاک، TS گشتاورهای اعمال شده توسط نواحی جانبی، Te1 و Te2 مقادیر گشتاورهای اعمال شده توسط ناحیه بالایی و پایینی پره، σ تنش برشی، 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 ۲-الف).

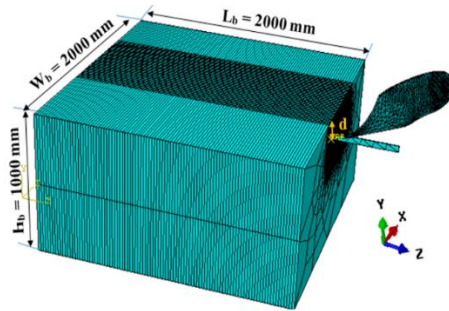
برای انجام شبیه‌سازی آزمون پره برش، پره برش طراحی شده وارد نرم‌افزار اباکوس شد. نقطه مرجعی به منظور اعمال شرایط مرزی، به آن اختصاص داده شد. ابزار در عمق مناسب ثابت شده و تنها قادر چرخش حول محور Y با سرعت ثابت بود. برای المان‌بندی مکعب خاک و پره برش به ترتیب از بلوک‌های هشت گرهی (C3D8) و المان‌های مثلثی چهار گرهی (R3D4) استفاده شد (شکل ۲-الف). برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها (۴ میلی‌متر) و مکعب خاک (شکل ۲-ب)، فرایند استقلال اندازه المان و مکعب خاک بر نتایج شبیه‌سازی انجام شد.



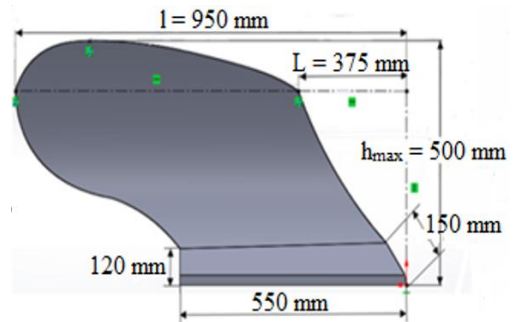
شکل ۲- (الف) نمایش دستگاه پره برش شبیه‌سازی شده و ابعاد آن، (ب) نمایش المان‌بندی پره و مکعب خاک.

شبیه‌سازی برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز برگردان دار

مدل سه بعدی خیش برگردان دار در نرم‌افزار Solid Works ترسیم و به عنوان یک جسم صلب وارد نرم‌افزار اباکوس گردید. نقطه مرجعی به منظور اعمال شرایط مرزی، به این جسم اختصاص داده شد. ابزار در عمق ۳۰۰ میلی‌متر ثابت گردید و تنها در یک جهت (جهت شخم) با سرعت ثابت قادر به حرکت بود. ابعاد مکعب خاک در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. برای تعیین اندازه مناسب المان‌ها مکعب خاک، استقلال اندازه المان بررسی شده و اندازه مناسب المان‌ها ۲۰ میلی‌متر به دست آمد. قسمت بالایی مکعب خاک به سه لایه با ضخامت ۹۰ میلی‌متر تقسیم شد. شبیه‌سازی برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز نیز در چهار مرحله انجام شد. در مرحله اول شبیه‌سازی، مکعب خاک یکنواخت فرض گردید و برای هر کدام از ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی انجام شد. در مرحله دوم لایه اول به عنوان لایه سخت تعریف شده و شبیه‌سازی‌ها تکرار گردید خصوصاً خاک برای لایه سخت در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت بود. به همین ترتیب در مراحل سوم و چهارم نیز به ترتیب لایه‌های دوم و سوم به عنوان لایه سخت تعریف شدند. در هر شبیه‌سازی میانگین نیروی مقاومت کششی ابزار خاک ورز اندازه‌گیری گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) نمایش خیش برگردان استفاده شده و ابعاد آن، (ب) نمایش المان بندی مکعب خاک و ابعاد آن [22].

مدل پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز برگردان دار

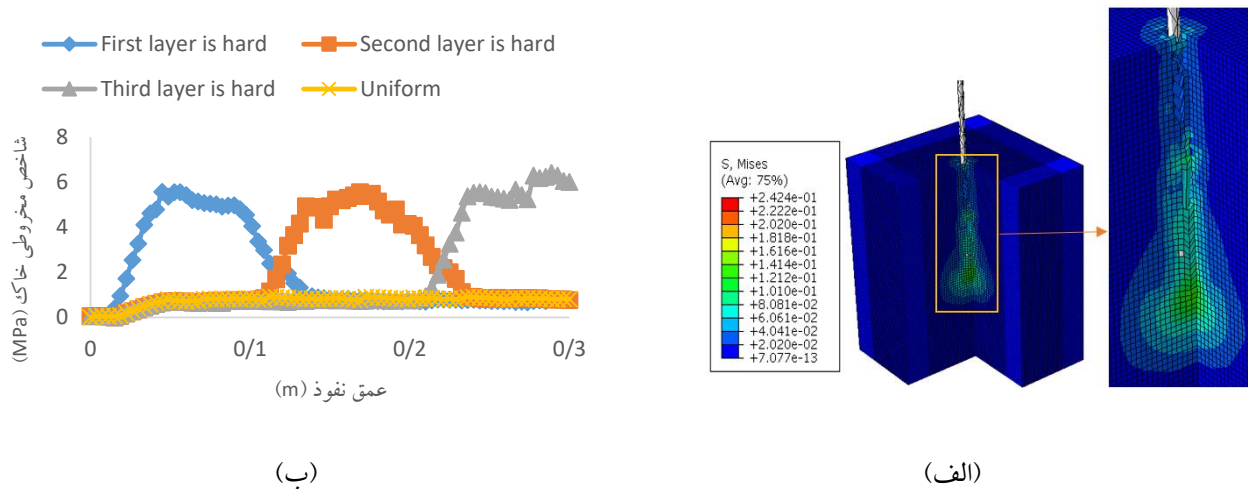
به منظور توسعه مدلی برای پیش‌بینی مقاومت کششی (R_L)، نیروی جانبی (R_S) و نیروی عمودی (R_V) ابزار خاک ورز برگردان دار بر اساس داده‌های مقاومت برشی خاک به دست آمده از آزمایش‌های پره برش و شاخص مخروطی، از رگرسیون چند متغیره و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ استفاده شد. حدود ۸۰ درصد از داده‌های موجود در جدول ۱ برای آموزش مدل و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای تست مدل استفاده شد. برای توسعه مدل فرض شد خاک استفاده شده در شبیه‌سازی همگن است. شبیه‌سازی برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز در سه سرعت پیشروی (۰/۹، ۱/۳۳ و ۲/۲۵ متر بر ثانیه) و در چهار عمق (۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۰ متر) انجام شد. در هر یک از شبیه‌سازی‌ها مقادیر نیروهای وارد بر ابزار به دست آمد. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی دو آزمون نفوذسنج مخروطی و پره برش نیز به دست آمد و در نهایت سه مدل جداگانه به منظور پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار، نیروهای جانبی و عمودی ارائه شد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی 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 در هر چهار حالت ذکر شده اندازه‌گیری شد. شکل (۴-الف) نحوه توزیع تنش وان میسر در یک نمونه خاک همگن (نمونه شماره ۱ جدول ۱) بر اثر حرکت نفوذسنج مخروطی را نشان می‌دهد. مقادیر نیرو با استفاده از سطح مقطع مخروط به مقاومت نفوذ خاک تبدیل شد. شکل (۴-ب) نمونه‌ای از روند تغییرات مقاومت نفوذ نسبت به جابجایی نفوذسنج در چهار حالت خاک غیریکنواخت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-ب) بالا آمدگی‌های ایجاد شده در نمودار به علت وجود لایه سخت در مکعب خاک است. اختلاف نیروی مقاومت در سه حالت خاک غیریکنواخت کمتر از ۲ درصد است. بنابراین محل قرارگیری لایه سخت تأثیری بر میانگین مقاومت به نفوذ خاک در آزمون نفوذسنج مخروطی ندارد.

1 Design Expert software (V.11) Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN USA.



شکل ۴- (الف) نمایش کانتور تنش وان میسز خاک همگن در شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی، (ب) نمونه‌ای از نمودار مقاومت در برابر نفوذ خاک‌های همگن و غیر همگن در شبیه‌سازی نفوذسنج مخروطی.

شبیه‌سازی آزمون برش پره

آزمون برش پره نیز برای ۲۱ نمونه خاک همگن شبیه‌سازی شد. شکل ۵ نمونه‌ای از کانتور تنش وان میسز 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 معادلات (۱-۵) به تنش برشی مورد نیاز برای گسیختن خاک تبدیل شد.

شبیه‌سازی برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز برگردان دار

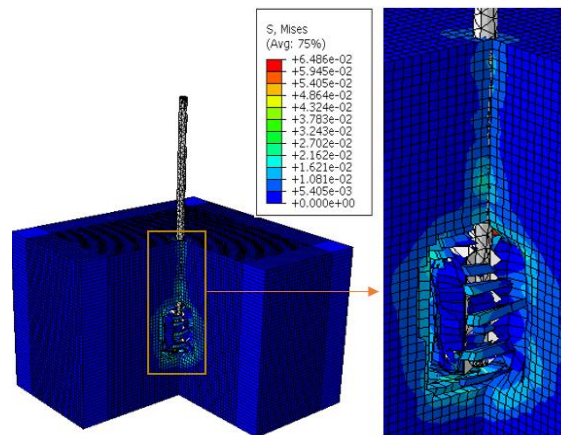
شبیه‌سازی برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز نیز برای خاک یکنواخت و سه حالت خاک غیریکنواخت انجام شد. میانگین نیروی مقاومت ابزار در چهار حالت خاک شبیه‌سازی شده در جدول ۲ نشان داده شده است. آخرین ستون این جدول نشان دهنده اختلاف بین کمترین و بیشترین مقدار مقاومت کششی در هر نمونه خاک بر حسب درصد است. اختلاف بین میانگین نیروی مقاومت ابزار در سه حالت خاک غیر همگن در همه نمونه‌های خاک بین ۲ تا ۱۰ با میانگین ۶/۶ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت محل قرارگیری لایه سخت در محدوده عمق کار ابزار خاک ورز تأثیر ناچیزی بر مقدار مقاومت کششی ابزار دارد.

پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز برگردان دار

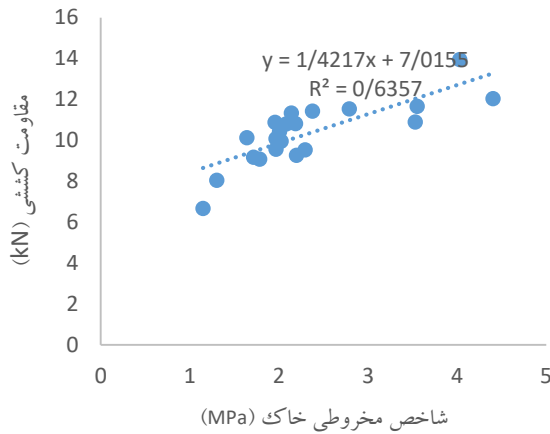
برای هر کدام از چهار حالت خاک (سه حالت غیر همگن و حالت همگن) مقادیر میانگین مقاومت کششی در مقابل مقادیر مقاومت به نفوذ به دست آمده از شبیه‌سازی شاخص مخروطی برای ۲۱ نمونه خاک رسم شد (شکل ۶). همان‌طور که از شکل پیداست ارتباط بین نیروی مقاومت کششی ابزار خاک ورز و نیروی مقاومت به نفوذ در خاک همگن از ضریب تبیین بیشتری (۰/۷۸) بیشتری نسبت به خاک غیر همگن برخوردار است. بنابراین با اطمینان بیشتری می‌توان گفت که استفاده از شاخص مخروط در خاک همگن می‌تواند معیار مناسبی برای پیش‌بینی نیروی مقاومت کششی ابزار خاک ورز باشد.

جدول ۲- نتایج مقاومت کششی ابزار خاک ورز در خاک ناهمگن.

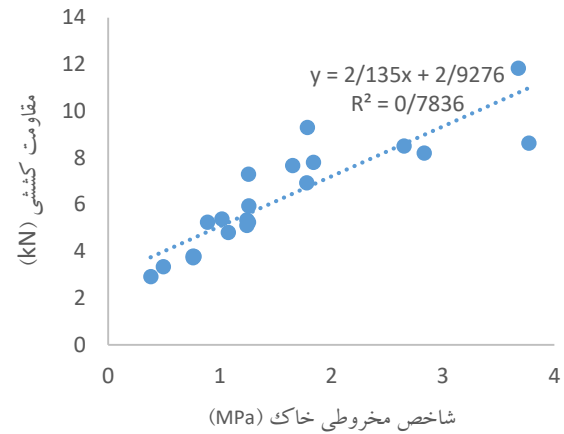
شماره نمونه خاک	میانگین مقاومت کششی در خاک با لایه اول سخت (kN)	میانگین مقاومت کششی در خاک با لایه دوم سخت (kN)	میانگین مقاومت کششی در خاک با لایه سوم سخت (kN)	اختلاف بیشینه و کمینه مقادیر مقاومت کششی در خاک غیر همگن (%)
۱	۹/۲۲۸	۸/۵۵۸	۹/۰۲۳	۷/۲۶
۲	۶/۶۶	۶/۵	۶/۵۷۱	۲/۴۷۳
۳	۸/۰۳۷	۷/۷۸۷	۷/۲۵۲	۹/۷۶۹
۴	۱۰/۸۶۹	۱۰/۴۹۲	۱۰/۶۷۵	۳/۴۶۶
۵	۱۰/۸۰۲	۱۰/۷۷۶	۱۰/۲۰۸	۵/۵۰۴
۶	۹/۸۶۶	۹/۴۹۲	۹/۰۶۰	۸/۱۶
۷	۹/۵۳۵	۹/۵۹۹	۱۰/۰۴۲	۵/۰۵۵
۸	۹/۰۷۷	۸/۱۷۱	۸/۵۹۷	۹/۹۷۸
۹	۹/۱۷۰	۸/۴۱۸	۸/۴۳۰	۸/۱۹۹
۱۰	۱۱/۵۲۸	۱۱/۵۲۸	۱۰/۹۶۹	۴/۸۴۹
۱۱	۱۱/۳۲۴	۱۰/۷۲۴	۱۱/۶۷۸	۸/۱۷۳
۱۲	۱۱/۶۶۰	۱۲/۲۷۲	۱۲/۴۶۹	۶/۴۸۸
۱۳	۱۰/۸۹۴	۱۱/۴۲۲	۱۱/۲۱۲	۴/۶۲۲
۱۴	۹/۲۵	۹/۷۹۵	۹/۹۰۲	۶/۵۲۹
۱۵	۹/۹۴۹	۹/۹۱۳	۹/۶۰۸	۳/۴۲۸
۱۶	۱۲/۰۳۶	۱۲/۱۵۱	۱۳/۰۴۶	۷/۷۳۹
۱۷	۱۱/۴۲۲	۱۰/۳۲۱	۱۱/۰۹۹	۹/۶۴۴
۱۸	۹/۸۹۲	۹/۳۷۳	۹/۲۸۲	۶/۱۶۴
۱۹	۱۰/۰۷۴	۹/۵۰۴	۹/۳۶۰	۷/۰۸۴
۲۰	۱۳/۹۴۱	۱۳/۴۸۴	۱۴/۷۰۸	۸/۳۲۱
۲۱	۱۰/۸۱۳	۱۰/۱۹۸	۱۰/۷۲۷	۵/۶۹۴
میانگین	۱۰/۲۸۰	۱۰/۰۲۳	۱۰/۱۸۷	۶/۶



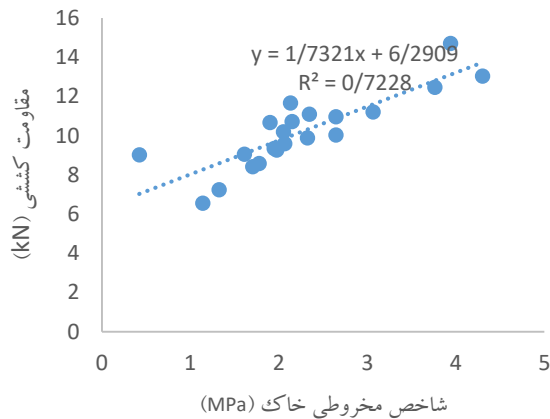
شکل ۵- نمایش کانتور تنش وان میسز خاک در شبیه سازی پره برش.



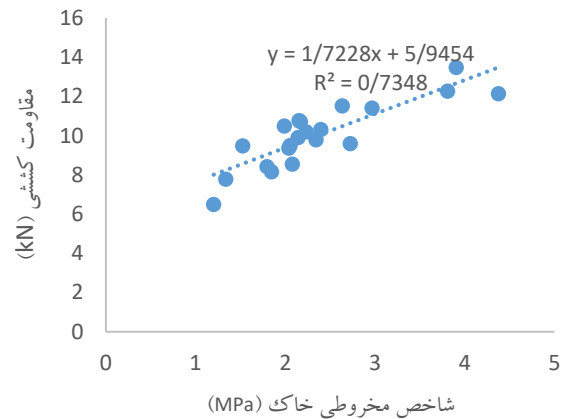
(ب)



(الف)



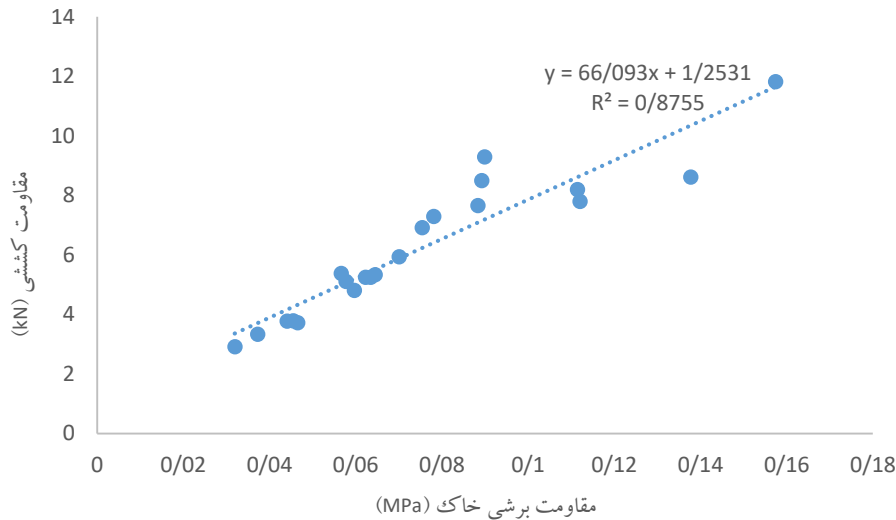
(د)



(ج)

شکل ۶- مقاومت کششی ابزار خاک ورز در مقابل شاخص مخروطی در خاک (الف) همگن، (ب) غیر همگن با لایه اول سخت، (ج) غیر همگن با لایه دوم سخت، (د) غیر همگن با لایه سوم سخت.

در شکل ۷ نیروی مقاومت کششی در مقابل بیشینه گشتاور برشی در شبیه‌سازی پره برش برای ۲۱ نمونه خاک همگن رسم شده است. با توجه به شکل ضریب تبیین ارتباط دو کمیت برابر ۰/۸۷ است که این مقدار از ضریب تبیین ارتباط بین مقاومت کششی و شاخص مخروطی در خاک همگن بیشتر است. بنابراین استفاده از تست پره برش نسبت به نفوذسنج مخروطی می‌تواند نتایج قابل اعتمادتری برای پیش‌بینی مقاومت کششی داشته باشد.



شکل ۷- مقاومت کششی ابزار خاک ورز در مقابل مقاومت برشی خاک.

مدل پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز بر گردان دار

به منظور توسعه مدلی برای پیش‌بینی مقاومت کششی (R_L)، نیروی جانبی (R_S) و نیروی عمودی (R_V) ابزار خاک ورز بر گردان دار، ابتدا مدلی بر پایه شاخص مخروطی خاک (C.I)، عمق خاک ورزی (d) و سرعت خاک ورزی (v) توسعه داده شد (معادله ۶). ضریب تبیین (R^2) این مدل برابر ۰/۸۵ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) آن برابر ۰/۸۴۳ کیلو نیوتن به دست آمد. به طور مشابه به جای شاخص مخروطی از پره برش در توسعه مدل استفاده شد و مدلی دیگر ارائه شد (معادله ۷)، ضریب تبیین آن برابر ۰/۸۷ و جذر میانگین مربعات خطا این مدل نیز ۰/۷۸۶ کیلو نیوتن به دست آمد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد، به منظور توسعه مدلی برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز بر گردان دار استفاده از آزمایش برش پره نسبت به شاخص مخروطی می‌تواند نتایج دقیق‌تری داشته باشد. در نهایت برای توسعه مدلی کامل‌تر از هر دو متغیر شاخص مخروطی و پره برش به طور هم‌زمان استفاده شد (معادله ۸). ضریب تبیین مدل حاصل ۰/۸۸ و جذر میانگین مربعات خطا آن نیز ۰/۷۵۳ کیلو نیوتن به دست آمد که از دو مدل قبلی خطای کمتری دارد.

$$R_L = (23.54 d + 15.58 d^2) + 2.41 C.I + 0.071 v - 4.33 \quad (۶)$$

$$R_L = (23.54 d + 15.58 d^2) + 66.85 S.V + 0.071 v - 5.70 \quad (۷)$$

$$R_L = (23.54 d + 15.58 d^2) + 0.89 C.I + 43.69 S.V + 0.071 v - 5.31 \quad (۸)$$

به طور مشابه بهترین مدل برای پیش‌بینی نیروی جانبی و عمودی وارد شده به ابزار خاک ورز نیز تعیین شد (معادلات ۹ و ۱۰). ضریب تبیین مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی نیروی جانبی ۰/۷۴ و جذر میانگین مربعات خطا آن در پیش‌بینی نیروی جانبی برابر ۰/۵۷۹ کیلو نیوتن به دست آمد. مدل پیش‌بینی نیروی عمودی نیز دارای ضریب تبیین ۰/۳۹ و جذر میانگین مربعات خطا آن ۰/۵۶۰ کیلو نیوتن بود.

$$R_S = 16.38 d + 0.168 C.I + 24.20 S.V + 0.107 v - 3.32 \quad (۹)$$

$$R_V = 7.83 d - 0.495 C.I + 24.80 S.V + 0.089 v - 1.57 \quad (۱۰)$$



تحقیقی مشابه به منظور ارائه مدلی برای پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز بر گردان‌دار بر اساس خواص فیزیکی خاک (محتوای رطوبت، چگالی خاک)، عمق و سرعت خاک‌ورزی انجام شد. در این تحقیق سه معادله برای پیش‌بینی مقاومت کششی، نیروی جانبی و عمودی پیشنهاد شد. محققین گزارش کردند که ضریب تبیین هر یک از معادلات به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۸ و ۰/۷۹ و جذر میانگین مربعات خطا آن‌ها به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۳۹ و ۰/۲۷ کیلو نیوتن است [22]. با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آزمایش‌های نفوذسنج مخروطی و پره برش برای پیش‌بینی نیروهای جانبی و عمودی وارد بر ابزار خاک ورز کافی نبوده و نتایج دقیقی ندارد. اما با مقایسه نتایج حاصل از دو تحقیق در پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز بر گردان‌دار مشاهده می‌شود که استفاده از آزمایش‌های پره برش و شاخص مخروطی خاک روش مناسب، دقیق و سریع برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار خاک ورز بر گردان‌دار بوده و پیشنهاد می‌شود در مواقعی که هدف فقط مقاومت کششی این ابزار است از این روش استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمون‌های برش پره در خاک همگن و نفوذسنج مخروطی و همچنین برهمکنش خاک با ابزار خاک ورز بر گردان‌دار در خاک همگن و ناهمگن با استفاده از روش المان محدود روی ۲۱ نمونه خاک شبیه‌سازی شد. مقاومت کششی ابزار خاک ورز در مقابل شاخص مخروطی برای هر دو نوع خاک همگن و غیر همگن رسم شد. ارتباط بین مقاومت کششی ابزار خاک ورز و شاخص مخروطی در خاک همگن دارای ضریب تبیین بالاتری (۰/۷۸) نسبت به خاک ناهمگن بود. با ترسیم مقاومت کششی ابزار در مقابل داده‌های حاصل از پره برش مشخص شد ارتباط قوی با ضریب تبیین ۰/۸۷ بین این دو متغیر وجود دارد. بنابراین برای توسعه مدلی به منظور پیش‌بینی سریع و دقیق نیروهای وارد بر ابزار خاک ورز بر گردان‌دار از نتایج آزمون‌های پره برش و شاخص مخروطی استفاده شد. بدین منظور ابتدا فرض شد خاک یکنواخت بوده و سپس سه مدل برای پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار ارائه شد. در مدل اول پارامترهای مدل عبارت بودند از شاخص مخروطی خاک، عمق و سرعت خاک‌ورزی و در مدل دوم به جای شاخص مخروطی از پره برش استفاده شد و در نهایت در مدل سوم هر دو پارامتر شاخص مخروطی و پره برش به همراه سرعت و عمق خاک‌ورزی در توسعه مدل استفاده شدند. نتایج نشان داد مدل سوم از دو مدل دیگر دقیق‌تر و دارای ضریب تبیین ۰/۸۸ و جذر میانگین مربعات خطا آن نیز ۰/۷۵۳ کیلو نیوتن بود. همچنین به طور مشابه بهترین مدل برای پیش‌بینی نیروی جانبی و عمودی وارد شده به ابزار خاک ورز نیز تعیین شد. ضریب تبیین مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی نیروی جانبی ۰/۷۴ و جذر میانگین مربعات خطا آن در پیش‌بینی نیروی جانبی برابر ۰/۵۷۹ کیلو نیوتن به دست آمد. مدل پیش‌بینی نیروی عمودی نیز دارای ضریب تبیین ۰/۳۹ و جذر میانگین مربعات خطا ۰/۵۶۰ کیلو نیوتن بود. بنابراین استفاده از آزمایش‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی مناسب برای پیش‌بینی نیروهای جانبی و عمودی نبوده و پیشنهاد می‌شود فقط در مواقعی که هدف پیش‌بینی مقاومت کششی ابزار است از این روش استفاده شود.

منابع

1. Or, D. and Ghezzehei, T.A., 2002. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. *Soil and Tillage Research*, 64(1-2), pp.41-59.
2. Renton, M. and Flower, K.C., 2015. Occasional mouldboard ploughing slows evolution of resistance and reduces long-term weed populations in no-till systems. *Agricultural Systems*, 139, pp.66-75.
3. Derpsch, R. and Friedrich, T., 2009, June. Development and current status of no-till adoption in the world. In *Proceedings on CD, 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)*.



4. Cirujeda, A., Recasens, J. and Taberner, A., 2003. Effect of ploughing and harrowing on a herbicide resistant corn poppy (*Papaver rhoeas*) population. *Biological agriculture & horticulture*, 21(3), pp.231-246.
5. Légère, A. and Samson, N., 2004. Tillage and weed management effects on weeds in barley-red clover cropping systems. *Weed science*, 52(5), pp.881-885.
6. Murphy, S.D., Clements, D.R., Belaoussoff, S., Kevan, P.G. and Swanton, C.J., 2006. Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science*, 54(1), pp.69-77.
7. Givens, W.A., Shaw, D.R., Kruger, G.R., Johnson, W.G., Weller, S.C., Young, B.G., Wilson, R.G., Owen, M.D. and Jordan, D., 2009. Survey of tillage trends following the adoption of glyphosate-resistant crops. *Weed technology*, 23(1), pp.150-155.
8. Renton, M. and Flower, K.C., 2015. Occasional mouldboard ploughing slows evolution of resistance and reduces long-term weed populations in no-till systems. *Agricultural Systems*, 139, pp.66-75.
9. Colbach, N., Roger-Estrade, J., Chauvel, B. and Caneill, J., 2000. Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing. *European Journal of Agronomy*, 13(2-3), pp.111-124.
10. Grisso, R.D. and Perumpral, J.V., 1980. A soil-tool interaction model for narrow tillage tools. *A soil-tool interaction model for narrow tillage tools.*, (80-1518).
11. Godwin, R.J., O'dogherty, M.J., Saunders, C. and Balafoutis, A.T., 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosystems engineering*, 97(1), pp.117-129.
12. Zhang, Z.X. and Kushwaha, R.L., 1999. Operating speed effect on the advancing soil failure zone in tillage operation. *Canadian Agricultural Engineering*, 41(2), pp.87-92.
13. Pytka, J. and Konstankiewicz, K., 2002. A new optical method for soil stress and strain investigation. *Soil and Tillage Research*, 65(2), pp.243-251.
14. 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.
15. 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.
16. Aluko, O.B. and Chandler, H.W., 2004. Characterisation and modelling of brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Biosystems engineering*, 88(3), pp.369-381.
17. Davoudi, S., Alimardani, R., Keyhani, A. and Atarnejad, R., 2008. A two dimensional finite element analysis of a plane tillage tool in soil using a non-linear elasto-plastic model. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 3(3), pp.498-505.
18. 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.
19. Bentaher, H., Ibrahmi, 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.
20. Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A. and Mouazen, A.M., 2015. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, pp.268-275.



21. Ibrahmi, 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.
22. 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.
23. 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.
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. 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.
28. 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.
- 29.



Simulation and Investigation of the relationship between cone index and soil shear strength with mouldboard draught using finite element method

Hadi Azimi-Nejadian¹, Seyyed Hossein Karparvarfard¹, Mojtaba Naderi-Boldaji^{2*}

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

Abstract

The purpose of the present study is to use the results of shear vane and cone index to propose a model for predicting the forces applied to the mouldboard plough without measuring the physical and mechanical parameters of the soil. For this purpose, both shear vane and cone index tests as well as the interaction between the soil tillage tool were simulated using finite element method for 21 soil samples. The linear form of Drucker-Prager yield criterion was used for simulation. To develop the model, the soil was assumed to be uniform and then, three models were proposed to predict the tillage tool's draught. Soil cone index, tillage depth and forward speed were the model parameters in the first model, and in the second model, the shear vane was used instead of the cone index. Finally, both cone index and shear vane and also forward speed and tillage depth were used to develop the third model. The results showed that the third model is more accurate than the other two models and has a determination coefficient (R^2) of 0.88 and its root mean square error (RMSE) is 0.753 kN. Similarly, the best model for predicting the side and vertical forces applied to the tillage tool were also determined. Two models with determination coefficient of 0.74 and 0.39 and the RMSE of 0.579 and 560 were obtained for predicting the side and vertical forces, respectively.

Key words: Shear Vane, Cone index, Finite element method, Mouldboard plough, Draught.

*Corresponding author

E-mail: naderi.mojtaba@sku.ac.ir