

شبیه‌سازی خاک کشاورزی طی آزمون نشست صفحه‌ای توسط معیار تسلیم دراکر پراگر با استفاده از روش اجزاء محدود

مجتبی جابری معز^{۱*}، دنیا اکبری^۱ و مریم بیگلری^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۵

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

E-mail: m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

چکیده

افزایش تراکم خاک یکی از تهدیدات اصلی برای تخریب ساختمان خاک است که حتی ممکن است منجر به تجزیه خاک نیز شود. به منظور جلوگیری از پدیده افزایش تراکم خاک، دانستن ویژگی‌های مکانیکی خاک در تعیین حدود تنش مجاز حائز اهمیت است. تنش پیش تراکمی، به عنوان حداکثر تنشی که خاک می‌تواند تحمل کند بدون اینکه فشردگی آن افزایش یابد، یکی از مهم‌ترین مشخصات مکانیکی خاک است. آزمون نشست صفحه‌ای، روشی مناسب برای تعیین تنش پیش تراکمی خاک است. در این تحقیق، آزمون تجربی نشست صفحه‌ای، روی یک نمونه خاک زراعی (شنی رسی لومی) در سطح محتوای رطوبتی ۱۵ d.b. با چگالی 1500 kg. m^{-3} انجام شد و خواص مکانیکی خاک تعیین شدند. سپس آزمون نشست صفحه‌ای به روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی و متقارن توسط مدل دراکر-پراگر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و تنش پیش تراکمی با این روش پیش‌بینی شد. همچنین توزیع تنش و جابجایی در لایه‌های خاک در عمق تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مدل دراکر-پراگر با ضریب تبیین ۹۹٪ مطابقت خوبی با داده‌های به دست آمده از آزمایش تجربی داشت. بررسی توزیع تنش فشاری و جابجایی در لایه‌های مختلف در عمق خاک نشان داد که مقدار تنش و جابجایی در لایه‌های نزدیک به سطح بارگذاری بیشتر و با حرکت به سمت لایه‌های پایین‌تر مقدار تنش و جابجایی کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، تنش پیش تراکمی، توزیع تنش، مدل دراکر پراگر، نشست صفحه‌ای

Agricultural Soil Simulation during Plate Displacement Test Using Finite Element Method and Drucker-Prager Model

Mojtaba Jaberi Moaz^{1*}, Donia Akbari¹ and Maryam Beglari¹

Received: 17 Oct 2021

Accepted: 19 Nov 2021

¹Department of Bio-System Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamadan, Iran

*Corresponding author: E-mail: m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

Abstract

Soil compaction increase is one of the main threats to agricultural soil structure, which may even lead to soil decomposition. In order to prevent the phenomenon of soil compaction, knowing the mechanical properties of soil is important in the determination of the allowable stress limits. Pre-compaction stress, as the maximum stress that soil can withstand without increasing its compaction, is one of the most important mechanical properties of soil. The plate sinkage test is a suitable method for determining the soil pre-compaction stress. In this research, the experimental test of plate deposition on a sample of arable soil (loamy sandy loam) at the moisture content of 15% d.b. with density of 1500 kg.m^{-3} was performed and the soil mechanical properties were determined. Then, the plate sitting test was performed in two-dimensional and symmetrical methods by finite element method and Drucker Prager model in Abaqus software and pre-compression stress was predicted by this method. Stress distribution and displacement in the soil depth layers were also analyzed. The results showed that the Drucker-Prager model with a 99% explanation coefficient was in good agreement with the data obtained from the experiments. Examination of compressive stress and displacement in different layers in the soil depth showed that the amount of stress and displacement in the layers close to the load surface was higher than that for the lower layers.

Keywords: Drucker-Prager, Plate sinkage test, Pre-compression stress, Soil compaction

How to cite:

Jaberi Moaz, M., Akbari, D., Beglari, M. 2021. *Agricultural Soil Simulation During Plate Displacement Test Using Finite Element Method and Drucker-Prager Model*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (3): 13-21.

۱- مقدمه

مستلزم انجام آزمون‌های فراوانی است که انجام آن‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه‌های زیادی است.

روش اجزاء محدود یک روش محاسباتی برای حل تقریبی مسائل مقدار مرزی به کمک معادلات دیفرانسیلی در مهندسی است. شبیه‌سازی عددی فرآیند تراکم خاک می‌تواند به درک پدیده شناختی عوامل اثرگذار بر تراکم خاک کمک کند و همچنین جایگزینی مناسب برای بهینه‌سازی ماشین‌ها و ابزارهای کشاورزی جهت جلوگیری از تراکم خاک باشند. بنابراین، شبیه‌سازی به کمک رایانه با حذف آزمایش‌های مزرعه‌ای پرهزینه و کاهش زمان تحقیق، مدل‌های مناسبی را در اختیار محققان و طراحان حوزه ماشین‌های کشاورزی قرار می‌دهند (Ucgul *et al.*, 2016). به هنگام شبیه‌سازی فرآیند تراکم خاک به کمک روش‌های عددی می‌توان تأثیر عوامل مختلف را بر تغییر ساختار و رفتار تنش-کرنش خاک در تمامی زمان‌های بارگذاری یا باربرداری در هر ناحیه از خاک را با دقت بیشتری مطالعه نمود که این امر کمک زیادی به درک اثر این عوامل بر رفتار خاک دارد. همچنین به کمک این روش‌ها می‌توان نیروهای وارده بر ابزارهای کشاورزی و ناحیه گسیختگی خاک به وسیله این ابزارها را پیش‌بینی و شکل هندسی و چیدمان آن‌ها روی ماشین را بهینه کرد (Ucgul & Saunders, 2020).

در تحلیل‌های عددی، مدل مورد استفاده به‌عنوان معیار تسلیم، خواص مواد، شرایط بارگذاری و مرزی و نوع و تعداد المان‌ها از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نتایج خروجی تحلیل است. معیار تسلیم دراکر پراگر یکی از مدل‌های رفتاری پرکاربرد در شبیه‌سازی مواد دانه‌ای مانند ماسه، سنگ و خاک و موادی که مقاومت فشاری آن‌ها تحت بارگذاری فشاری افزایش می‌یابند، مناسب است (Zhu and Jia, 2014). سطح گسیختگی ارائه‌شده در مدل دراکر-پراگر تقریبی از معیار موهر-کلمب است که توسط دراکر-پراگر به‌عنوان اصلاحی بر معیار وان‌میسز جهت تأثیر تنش هیدرو استاتیک در تسلیم منظور گردید (Cueto *et al.*, 2013). طی تحقیقی، آزمون‌های فشاری تک‌محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه‌ای خاک با روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد، در این تحقیق خاک به‌صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک (کشسان-خمیری) مدل‌سازی و گزارش شد که با افزایش مدول الاستیسیته و نسبت پواسون خاک، تنش پیش تراکمی نقطه بیشینه انحناء افزایش یافت، درحالی‌که افزایش زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر و سرعت نفوذ پروپ بارگذاری تأثیر معنی داری در مقدار تنش پیش‌تراکمی نقطه بیشینه انحناء نداشت (Naderiboldaji *et al.*, 2018). در تحقیقی دیگر، مدل نشست صفحه‌ای خاک به‌صورت ماده الاستو-پلاستیک از طریق روش اجزاء محدود به‌صورت بارگذاری تکراری شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داد روش اجزاء محدود می‌تواند رفتار نشست خاک را طی بارگذاری‌های تکراری نسبتاً دقیق بیان کند (Rashidi *et al.*, 2010). طی تحقیقی، رفتار تنش-نشست خاک لومی رسی به روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. در این تحقیق رفتار خاک ویسکو-الاستیک خطی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که روش المان محدود می‌تواند جهت شبیه‌سازی رفتار تنش-نشست استفاده شود (Hemmat *et al.*, 2012). طی یک

تراکم خاک به‌عنوان مشکلی پیچیده و چندبعدی تحت تأثیر متقابل عوامل مختلف خاک، ماشین، گیاه و اقلیم شناخته می‌شود که دارای آثار قابل توجه اقتصادی و زیست‌محیطی و به‌عنوان یک معضل در برابر کشاورزی پایدار است. تجهیزات سنگین کشاورزی پتانسیل این را دارند که باعث افزایش شدید تراکم خاک شوند (Sivarajan *et al.*, 2018). بافت، ساختمان، درصد آهک، مقدار رطوبت و میزان مواد آلی از جمله عوامل فیزیکی تأثیرگذار بر تراکم‌پذیری خاک هستند (Alexandrou & Earl, 1995). نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که تراکم خاک با ایجاد لایه سخت در زیرخاک، منجر به کاهش رشد ریشه و دسترسی به مواد مغذی، ایجاد رواناب و تخریب مواد آلی خاک به‌وسیله آب‌شویی و همچنین از بین رفتن میکرو ارگانیزم‌های خاک با کاهش تخلخل خاک (هوادهی به خاک و ریشه) می‌شوند که این عوامل منجر به افت عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی کشت‌شده می‌شوند (Walas *et al.*, 2017). همچنین تراکم خاک با ایجاد لایه‌های سخت و متراکم در زیر بستر خاک سبب افزایش مقاومت کششی ادوات خاک‌ورزی و کاشت شده که منجر به افزایش استهلاک و فرسایش این ادوات و افزایش مصرف سوخت می‌شود.

تنش پیش‌تراکمی به‌عنوان حداکثر تنش مجازی است که خاک می‌تواند بدون آن که فشردگی آن افزایش یابد، تحمل کند (Keller *et al.*, 2004). تنش پیش‌تراکمی به‌عنوان معیاری از مقاومت خاک جهت پایدار نگه‌داشتن بافت و ساختمان آن در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gregory *et al.*, 2006). هدف اصلی از به دست آوردن تنش پیش‌تراکمی، تعیین ظرفیت باربری خاک یا تنش در آستانه تراکم خاک است تا با محدود نمودن اعمال فشار به خاک در اثر تردد ماشین‌آلات در سطح مزرعه، خطر تراکم خاک یا تغییر شکل ماندگار آن به حداقل برسد (Nderiboldaji *et al.*, 2018). آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) یکی از روش‌های اندازه‌گیری تنش پیش‌تراکمی خاک است (Youssef and Ali, 1982; Erel, 1997; Alexandrou & Eral, 2001). طی آزمایش نشست صفحه‌ای، روی سطح خاکی که درون یک ظرف محصورشده توسط یک صفحه، بارگذاری عمودی انجام می‌شود و نیرو وارد به سطح خاک و جابجایی عمودی صفحه بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، در پایان نمودار تنش-نشست رسم می‌گردد که رفتار خاک در برابر تنش‌های عمودی اعمالی به خاک را نشان می‌دهد (Nderiboldaji *et al.*, 2018). عملیات خاک‌ورزی از دیدگاه مدیریت خاک و تولید محصول همیشه مورد توجه محققان قرار گرفته است و تلاش شده تا ماشین‌آلات کشاورزی به‌گونه‌ای طراحی شوند تا با حداقل کردن تعداد تردد آن‌ها در مزرعه تا حد امکان از تراکم و تخریب خاک جلوگیری شود و همچنین مصرف سوخت و انرژی را نیز بهینه کرد. از جمله کارهای صورت گرفته در این مورد می‌توان به توسعه روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و کشت بذر به‌صورت مستقیم به شیوه‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی اشاره کرد (Peixoto *et al.*, 2019). بهینه‌سازی ماشین‌های کشاورزی و بررسی تأثیر آن‌ها بر تراکم خاک،

فشرده گردید تا چگالی ظاهری خاک به مقدار 1500 kg.m^{-3} رسانده شد. پیش از اضافه کردن لایه جدید، شیارهایی در سطح لایه پیشین ایجاد شد تا پیوستگی بین لایه‌ها ایجاد شود.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد آزمایش

Table 1. Physical properties of the experiment soil

درصد وزنی			بافت خاک Soil texture
Weight percentage			
رس Clay	سیلت Silt	ماسه Sand	شنی رسی لومی Sandy clay loam
25.8	27.28	46.82	

۲-۲- روش آزمایش نشست صفحه‌ای

جهت انجام آزمایش نشست صفحه‌ای، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی با قطر سانتی‌متر و ضخامت ۱۶ میلی‌متر با دستگاه CBR با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام شد (JaberiMoeaz et al., 2017). همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، طی آزمایش نشست صفحه‌ای، صفحه بارگذاری در مرکز ظرف استوانه‌ای نمونه خاک قرار گرفت. به ازای هر یک میلی‌متر نشست، مقدار نیرو وارده بر نمونه توسط نیروسنج فشاری S شکل در کلاس دقت C3 ثبت می‌شد و نمودار نیرو-جابجایی رسم می‌گردید. نشست ۲۰ میلی‌متر به‌عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین ضریب پواسون و مدول یانگ از آزمایش فشرده‌گی تک‌محوری استفاده شد. مقدار چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی خاک نیز از آزمون برش مستقیم به‌دست آمدند.



شکل ۱- نمایی از نیروسنج و صفحه بارگذاری طی آزمون نشست صفحه‌ای خاک

Fig 1. A view of the load cell and the loading plate during the plate sinkage test

پژوهش، رفتار تراکم خاک زیر تاینر تراکتور با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه مدل‌سازی و تأثیر رطوبت، سرعت پیشروی و عمق در آن بررسی شد و مشاهده شد که شبکه عصبی با دقت بالایی توانست تراکم خاک را تخمین بزند. نتایج نشان داد تراکم خاک با عمق رابطه معکوس دارد و افزایش محتوای رطوبتی خاک سبب کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود (Shahghol et al., 2018). در تحقیقی، رفتار تراکمی و توزیع تنش در خاک در اثر تردد ماشین‌های برداشت نیشکر در مزرعه توسط مدل دراکر-پراگر اصلاح‌شده به صورت دو بعدی شبیه سازی شد، نتایج نشان داد، عبور ماشین‌های برداشت نیشکر می‌تواند تنش‌های بیشتر از تنش پیش‌تراکمی خاک را تا عمق یک متری به خاک اعمال کند (Jimenez et al., 2021). توزیع تنش در عرض تحت تأثیر بارمحوری ناشی از بار وارد از طرف چرخ ماشین‌ها و ادوات کشاورزی، موضوع تحقیق بسیاری از محققان بوده است. برخی از این محققان توزیع تنش در عرض ناشی از بارمحوری را به‌صورت تجربی موردبررسی قرار داده‌اند (Keller, 2005; Frhadi et al., 2013; Senator et al., 2014). ولی برخی دیگر برای بررسی توزیع تنش در خاک تحت اثر بارمحوری با استفاده از مدل‌های اجزاه‌محدود انجام داده اند (Keller, 2005; Keller et al., 2014; Senator et al., 2013).

با توجه اهمیت تنش پیش‌تراکمی، شبیه‌سازی و درک رفتار تراکمی خاک‌های زراعی، هدف از انجام این پژوهش: ۱- شبیه‌سازی خاک طی آزمون نشست صفحه‌ای به کمک روش اجزاه‌محدود با معیار تسلیم دراکر-پراگر و ۲- تخمین تنش پیش‌تراکمی خاک با استفاده از روش المان محدود و مقایسه نتایج آن با آزمایش تجربی بودند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تهیه نمونه خاک

به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش، از خاک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان، در عمق صفر تا 20 cm استفاده شد. بافت خاک مورد مطالعه از نوع شن رسی لومی بود که ویژگی‌های فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. مقداری از خاک تهیه‌شده در یک ظرف استوانه‌ای شکل با قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۱۲ cm ریخته شد و چگالی ظاهری آن تعیین شد که مقدار آن برابر با 1500 kg.m^{-3} بود. سپس مطابق با استاندارد ASTM D 2216 درصد رطوبت خاک با قرار دادن ۱۵۰g از نمونه خاک مورد آزمایش درون یک آون در دمای 110 ± 5 درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت تعیین شد و مقدار آب موردنیاز برای رساندن رطوبت نمونه‌ها به سطح رطوبت وزنی مورد آزمایش ۱۵٪ d.b. محاسبه شد، سپس خاک مرطوب با افشان کردن آب به‌طور یکنواخت تهیه گردید. مقدار آب لازم پس از محاسبه، به خاک توسط یک آب‌پاش به‌صورت افشان بر خاک پاشیده و خاک مرطوب به هم زده شد تا رطوبت به‌طور یکنواخت در تمامی قسمت های آن پخش شود (JaberiMoeaz et al., 2016). سپس خاک مرطوب به‌صورت لایه‌لایه (۳ لایه 4 cm) در ظرف ریخته شد تا فشرده‌گی یکنواختی به دست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته خاک

تسلیم دراکر-پراگر خطی در رابطه (۱) آورده شده است (Tekeste et. al., 2009).

$$F = t - p \tan(\beta) - d = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، t تنش انحرافی (Pa)، p تنش متوسط، β زاویه تابع تسلیم خطی در صفحه تنش $p-t$ و d عرض از مبدأ خط تابع تسلیم در صفحه تنش $p-t$ هستند. β و d به ترتیب شبیه به زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در معیار تسلیم موهر-کلمب هستند. مقدار t و p به ترتیب از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شوند (ABAQUS Documentation, 2017).

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

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، σ_1 بیشینه تنش اصلی، σ_3 کمینه تنش اصلی، q تنش متوسط فن میسر، r نامتغیر تنش سوم و k نسبت جریان تنش یا نسبت تنش تسلیم در کشش سه محوری به تنش تسلیم در فشار سه محوری هستند. خصوصیات خاک مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی خاک مورد آزمایش
Table 2- Mechanical properties of the experiment soil

نام	زاویه انقباض Dilation angle	زاویه اصطکاک داخلی Internal friction angle	نسبت جریان تنش Flow stress ratio	نسبت پواسون Poisson ratio	مدول الاستیسیته Elastic Modulus	چگالی Density	رطوبت Moisture	چسبندگی Adhesion
	14°	36°	0.78	0.3	1100 kPa	1500 kg.m ⁻³	15 %	26.12 kPa

با داشتن زاویه اصطکاک داخلی خاک (Φ) و چسبندگی خاک (C) در مدل موهر کلمب، مقادیر k ، β و d به ترتیب از روابط (۴) تا (۶) محاسبه شدند.

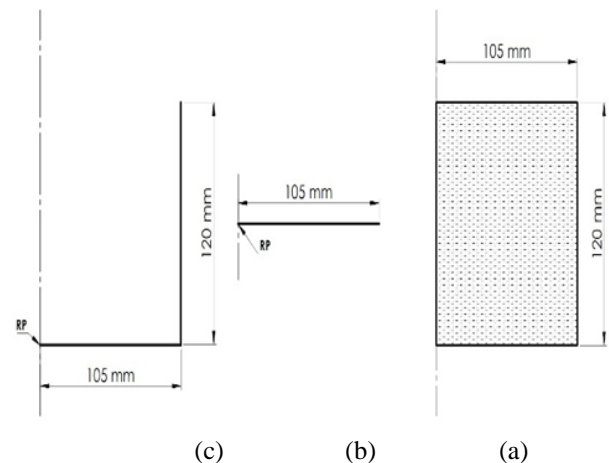
$$k = \frac{3 - \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \quad (3)$$

۳-۲- تعیین تنش پیش تراکمی خاک

تنش پیش تراکمی، با استفاده از روش ارائه شده توسط (Alexandrou and Eral, 1995) با استفاده از داده‌های نمودار تنش- نشست حاصل از آزمایش نشست صفحه‌ای خاک تعیین شد. در این روش، نقطه تقاطع دو خط مماس بر منحنی تنش- نشست، تنش پیش-تراکمی را نشان می‌دهد. بدین منظور یک خط مماس بر منحنی تنش- نشست، از مبدأ و خط دیگر، مماس بر قسمت انتهایی منحنی رسم شدند، از نقطه تقاطع این دو خط تنش پیش تراکمی به دست آمد.

۴-۲- شبیه سازی آزمایش نشست صفحه‌ای به روش اجزای محدود

به منظور شبیه سازی آزمون نشست صفحه‌ای از نرم افزار آباکوس ورژن ۱۴٫۶ استفاده شد. بدین منظور، خاک به صورت یک جسم تغییر شکل پذیر به صورت دو بعدی (یک مستطیل) و متقارن با ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۵ میلی‌متر (چون بارگذاری و شرایط مرزی متقارن بودند به منظور ساده سازی نیمی از خاک مدل شد و سپس نتایج به کل هندسه خاک تعمیم داده شد)، صفحه بارگذاری به صورت یک جسم صلب با عرض ۲۵ میلی‌متر و ظرف حاوی خاک نیز به صورت جسم صلب با ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۵ میلی‌متر در نرم افزار آباکوس مدل شدند. شکل ۲ مدل خاک، صفحه بارگذاری و ظرف حاوی خاک طراحی شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل های طراحی شده در نرم افزار آباکوس: (a) خاک، (b) صفحه بارگذاری و (c) ظرف حاوی خاک

Fig 2. Designed models in Abaqus: a) Soil, b) Loading plate, c) Container of soil

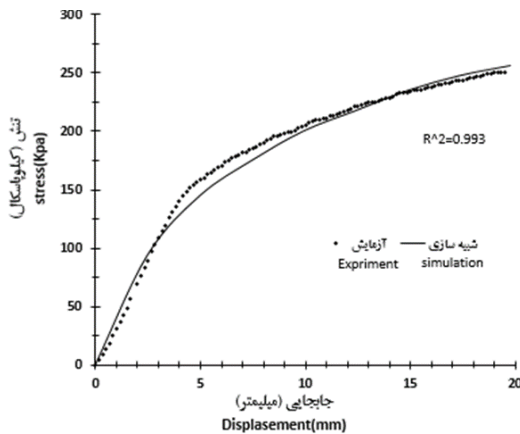
۵-۲- خصوصیات خاک مورد مطالعه

در این تحقیق جهت شبیه سازی آزمون نشست صفحه‌ای از مدل دراکر-پراگر خطی به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده شد. تابع

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای خاک میانگین تنش فشاری و جابجایی گره‌های زیر صفحه بارگذاری طی مرحله بارگذاری محاسبه و با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی نشست صفحه‌ای خاک مقایسه شدند. شکل ۳ نمودارهای تنش-نشست خاک به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی اجزاءمحدود را در مقابل نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج شکل ۳ قابل‌مشاهده است، روش اجزاءمحدود و معیار تسلیم دراگر-پراگر به‌خوبی توانسته با دقت بالایی و ضریب تبیین ۰.۹۹ رفتار تنش-نشست خاک را در زیر صفحه‌ای بارگذاری طی فرآیند تراکم خاک پیش‌بینی کند؛ بنابراین از روش اجزاءمحدود و معیار تسلیم دراگر-پراگر به‌خوبی می‌توان جهت پیش‌بینی و بررسی رفتار تراکمی خاک استفاده کرد. (Naderiboldaji *et al.*, 2018) نیز طی شبیه‌سازی رفتار تراکمی خاک با مدل دراگر-پراگر به نتایج مشابهی دست یافتند.



شکل ۳- مقایسه نتایج تنش-جابجایی نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاءمحدود
Fig 3. Comparison of stress-displacement results obtained from experiment and simulation results by finite element method

۳-۲- تنش پیش‌تراکم

شکل ۴ (a) و (b) به ترتیب نمودار تنش-نشست خاک به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی از المان محدود و داده‌های آزمون تجربی نشست صفحه‌ای خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پیش‌تراکمی به‌دست‌آمده در هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین مقدار تنش پیش‌تراکمی از روش (Alexandrou & Eral, 1995) استفاده شد. همان‌طور که از نتایج شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار تنش پیش‌تراکمی به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی به روش المان محدود برابر با ۱۶۵ کیلو پاسکال و مقدار تنش پیش‌تراکمی به‌دست‌آمده از آزمون نشست صفحه‌ای خاک نیز برابر با ۱۷۸ کیلو پاسکال به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل دراگر-پراگر

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \quad (5)$$

$$d = c \frac{\cos \Phi}{3 - \sin \Phi} \quad (6)$$

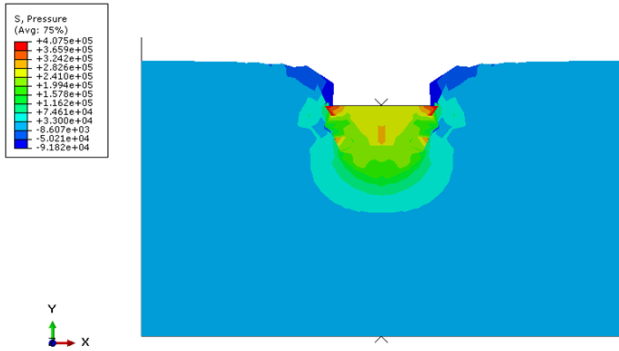
زاویه آماس (Ψ) جهت جریان پلاستیک بعد از گسیختگی را تعیین می‌کند. زمانی که این زاویه برابر با زاویه اصطکاک داخلی (β) باشد جهت جریان پلاستیک عمود بر سطح گسیختگی می‌باشد که این حالت قانون جریان پلاستیک وابسته نامیده می‌شود. برای جریان‌های غیر وابسته، رابطه زاویه آماس با اصطکاک داخلی مدل موهر-کلمب به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود (Susila & Hryciw, 2003).

$$\Phi = \Phi_{cv} + \psi \quad (7)$$

در رابطه (۷)، Φ_{cv} ثابت حجم زاویه اصطکاک داخلی برای مواد دانه‌ای نرم است. مقدار آن برای مدل‌های اجزاءمحدود بر اساس مشاهداتی که برای شن و سیلیکا دیده شد برابر با ۳۳ درجه در نظر گرفته شد (Bolton, 1980). رفتار سخت‌شدگی فشاری برای خاک موردنظر از آزمایش سه‌محوری به دست آمد به‌نحوی که کرنش پلاستیک در مقابل تنش تسلیم در نقاط مختلف محاسبه شد و رفتار سخت‌شدگی فشاری در نرم‌افزار تعریف شد.

۲-۶- شرایط مرزی و مش‌بندی

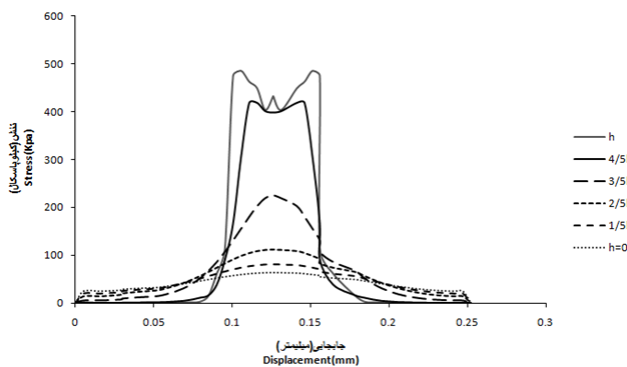
جهت شبیه‌سازی مرحله بارگذاری طی آزمون نشست صفحه‌ای خاک از روش دینامیک صریح استفاده شد. به‌منظور اعمال بار به خاک، صفحه بارگذاری با سرعت ثابت $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ در جهت محور y به مقدار 20 mm در جهت محور y به سمت پایین جابجا شد. صفحه بارگذاری فقط می‌تواند در جهت محور y حرکت کند و در سایر جهات مقید شده بود و درجات آزادی طرف‌های خاک در تمامی جهت مقید شد. گره‌های مرکزی خاک در نقاط $x=0$ بر روی محور y در جهت محور x مقید شدند و دوران آن‌ها در جهت محور y بسته شد. گره‌های پایینی و زیرین خاک در نقاط $y=0$ بر روی محور x حرکتی ندارند اما در جهت محور y می‌توانند دوران کنند. همچنین زاویه اصطکاک بین گره‌های خاک در تماس با ظرف حاوی خاک و صفحه بارگذاری برابر با ۲۰ درجه در نظر گرفته شد. در این پژوهش، از روش مش ساختاریافته برای مش‌بندی محیط خاک با استفاده از المان‌های آجری خطی متقارن چهار گره‌ای (CAX4R) برای مش‌بندی خاک انتخاب شد. در نهایت ۵۵۰ المان برای شبیه‌سازی خاک استفاده شد.



شکل ۵- توزیع تنش در خاک انتهای مرحله بارگذاری
Fig 5. Soil stress distribution at the end of the loading phase

نتایج این تحقیق در زمینه توزیع تنش در عمق از لحاظ الگوی توزیع تنش با نتایج مطالعه (Jamal khandani 2000) تحت عنوان آنالیز الاستیک و آنالیز الاستوپلاستیک توزیع تنش در خاک مطابقت دارد.

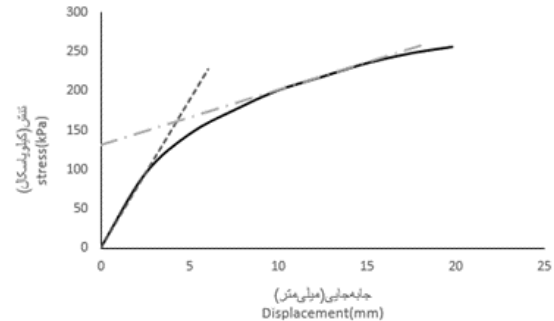
در اعمال بارمحوری به خاک، نحوه توزیع تنش در عرض خاک تحت بارگذاری زیر صفحه بارگذاری و اطراف آن است. در هنگام بارگذاری به خاطر ایجاد تمرکز تنش در اطراف عامل بارگذاری، توزیع تنش نامتوازن است و این امر باعث ایجاد تراکم در خاک در زیر سطح بارگذاری و اطراف محل بارگذاری می‌شود. شکل ۶ نحوه توزیع تنش در عرض نمونه خاک را نشان می‌دهد.



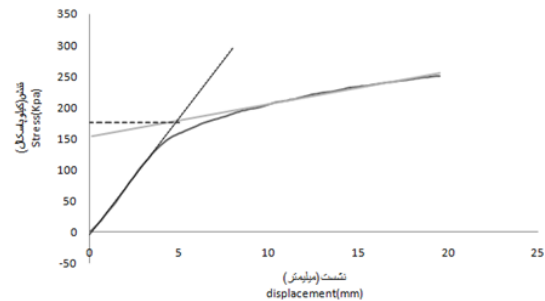
شکل ۶- نحوه توزیع تنش در عرض تحت تأثیر بارمحوری
Fig 6. The stress distribution across the width is influenced by the axial load

(Keller et al., 2014) بررسی توزیع تنش در خاک تحت اثر بارمحوری با استفاده از مدل‌های اجزاءمحدود را انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توزیع تنش در عرض زیر عامل بارگذاری به صورت منحنی است. شکل توزیع تنش در خاک تحت شرایط بارگذاری و شرایط خاک است. هر چه سطح تماس اعمال بارمحوری کوچک‌تر باشد، تنش بیشتری در خاک ایجاد شده و شکل توزیع تنش سهمی است. در صورت افزایش سطح تماس، شکل توزیع تنش به صورت U شکل خواهد بود. نتایج این تحقیق در زمینه توزیع تنش

توانست با دقت خوبی و با خطای ۷ درصد تنش پیش تراکمی را تخمین بزند؛ بنابراین از روش اجزاءمحدود و معیار تسلیم دراکر-پراگر می‌توان با دقت خوبی تنش در آستانه تراکم را برای خاک زراعی پیش‌بینی کرد.



(a)



(b)

شکل ۴- تنش پیش تراکمی به دست آمده از روش الکساندرو و ارال (a داده‌های شبیه‌سازی (b) داده‌های تجربی)

Fig 4. Comparison of recompression stress obtained from a- simulation results by finite element method and b- results obtained from experimental soil plate meeting test

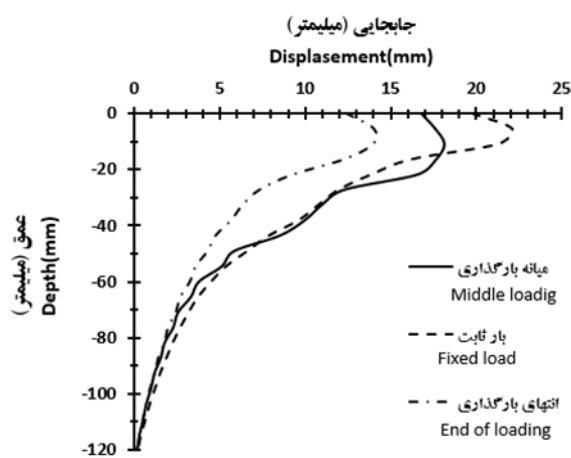
۳-۳- نتایج توزیع تنش فشاری

مسئله مهمی که در مورد اعمال بار محوری بر خاک وجود دارد، نحوه توزیع تنش در لایه‌های خاک است. در صورت دانستن مقدار تنش در نقاط مختلف خاک زیر عامل بارگذاری، میزان تراکم خاک قابل تخمین است. توزیع تنش در خاک در انتهای بارگذاری در شبیه‌سازی در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود هرچه از محل مقدار بارمحوری وارد شده دورتر می‌شویم توزیع تنش قائم در سطح خاک کاهش می‌یابد. در گوشه‌ها به علت این که خاک از این قسمت گسیخته می‌شود تنش بیشترین مقدار خود را دارد.

مختصات تنش کاهش یافته و به محور عمودی مختصات نزدیک می‌شود.

۴-۳- تغییر شکل در لایه‌های خاک

در شکل ۸ تغییر شکل در المان‌های خاک و فرورفتگی خاک از نرم‌افزار آباکوس آورده شده است. با حرکت صفحه‌ی بارگذاری در راستای قائم، خاک در اثر نیروی وارد شده از طرف صفحه، در جهت عمودی جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی از تغییرهای پلاستیک و الاستیک تشکیل یافته است؛ که بعد از باربرداری از روی خاک قسمت الاستیک جابه‌جایی عمودی ذرات خاک برگشته و تنها جابه‌جایی پلاستیک باقی می‌ماند.



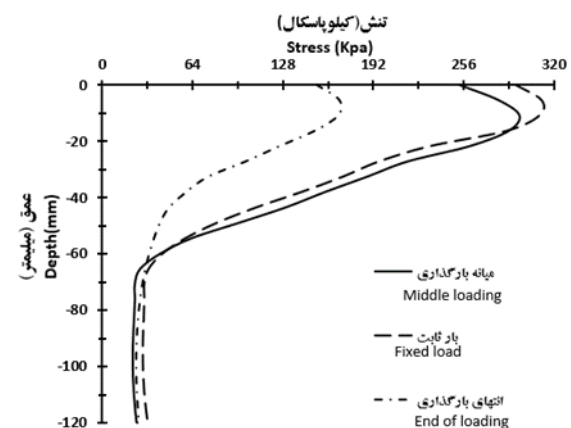
شکل ۹- جابه‌جایی در عمق تحت تأثیر بارمحوری حاصل از مدل اجزاء محدود

Fig 9. Depth displacement is affected by the axial load resulting from the finite executive model

شکل ۹ جابه‌جایی خاک در عمق را نشان می‌دهد؛ که بافاصله گرفتن از سطح مرکز اعمال بارمحوری به سمت لایه‌های زیرین جابه‌جایی در خاک (تغییر شکل) کم‌تر می‌شود و سپس مقدارش به صفر می‌رسد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق میزان نشست (تراکم) ناشی از تنش وارد بر خاک کاهش می‌یابد. این نتایج با داده‌های Sarbazvatan (2013) در تحقیق اندازه‌گیری تراکم خاک زیر تاپر تراکتور با استفاده از روش المان محدود با مدل اصلاح شده دراکر-پراگر در نرم‌افزار آباکوس هم‌خوانی دارد.

در عرض از لحاظ الگوی توزیع تنش با (Gonzalez et al., 2016) مطابقت دارد.

نکته دیگر در مورد اعمال بارمحوری بر خاک، توزیع تنش در عمق است. در صورت دانستن مقدار تنش در نقاط مختلف خاک زیر عامل بارگذاری، میزان تراکم خاک قابل تخمین است. در تحقیق حاضر توزیع تنش در عمق با استفاده از مدل اجزاء محدود ارائه شده، استخراج گردید. نتایج حاصل در شکل ۸ قابل مشاهده است. با دانستن مقدار تنش در هر نقطه از خاک در محدوده بارگذاری، مقدار اثر بار وارده بر خاک مشخص می‌گردد. در هنگام بارگذاری باید دقت نمود که بار وارده باعث تراکم خاک نگردد. در صورتی که اعمال بار بیش از ظرفیت باربری خاک اجتناب‌ناپذیر باشد، میزان تراکم خاک در لایه‌های مختلف قابل پیش بینی است. در به‌کارگیری ماشین‌ها و ادواتی که باعث اعمال بار فشاری به خاک می‌گردند باید دقت شود که تراکم ناشی از اعمال بارمحوری فشاری از دامنه به‌کارگیری ادوات خاک‌ورزی و دامنه اثر فرآیندهای طبیعی فراتر نرود. در غیر این صورت هزینه اصلاح ساختمان خاک افزایش یافته و کیفیت خاک نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۷- توزیع تنش در عمق تحت تأثیر بارمحوری حاصل از مدل اجزاء محدود

Fig 7. Depth stress distribution under axial load resulting from finite elements

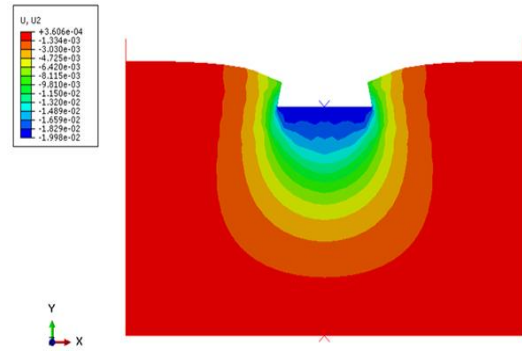
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود هرچه از محل مقدار بارمحوری وارد شده دورتر می‌شویم کشیدگی نمودار روی محور افقی

دراکر-پراگر، با داده‌های گزارش شده در آزمایش تجربی تطابق خوبی داشتند و مشخص شد که همان‌طور که در شبیه‌سازی اثبات شده است، تردد تراکتور و ماشین‌های کشاورزی، مقدار بارگذاری، افزایش عمق و فاصله گرفتن از مرکز سطح اعمال بار از عوامل تأثیرگذار بر تراکم خاک هستند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر است:

آزمون نشست صفحه‌ای با تخمین خوب تنش پیش تراکمی، روش مناسبی برای بررسی رفتار خاک در اثر عبور و مرور ادوات و ماشین‌های کشاورزی است، همچنین تنش پیش تراکم به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشست صفحه‌ای تقریباً نزدیک به مقدار به‌دست‌آمده از آزمون تجربی بود. مدل با ضریب تبیین ۹۹٪ تطبیق مناسبی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی داشت. نتایج شبیه‌سازی با مدل دراکر-پراگر به روش اجزاءمحدود نشان داد که توزیع تنش در عرض بافاصله گرفتن از مرکز سطح اعمال بارمحوری در جهت افقی و قائم کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عمق توزیع تنش فشاری و جابه‌جایی لایه‌های خاک کاهش یافته و سپس به صفر می‌رسد

۵- منابع

- Alexandrou, A. and Earl, R. (1995). *In situ determination of the pre-compaction stress of a soil*. Journal of Agricultural Engineering Research, 61(1): 67-71.
- Bolton, M. D. (1986). *The strength and dilatancy of sands*. Geotechnique, 36(1); 65-78.
- Cueto, O. G., Coronel, C. E. I., Morfa, C. A. R., Sosa, G. U., Gómez, L. H. H., Calderón, G. U. and Suárez, M. H. (2013). *Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic*. Computers and electronics in agriculture, 99: 146-152.
- Eral, R. and Alexandrou, A. (2001). *Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: theoretical approach*. Journal of Terramechanics, 38(1):163-183.
- Earl, R. (1997). *Assessment of the behaviour of field soils during compression*. Journal of agricultural engineering research, 68(2): 147-157.
- Gregory, A.S., Whalley, W.R., Watts, C.W., Bird, N.R.A., Hallett, P.D. and Whitmore, A.P., (2006). *Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data*. Soil and Tillage Research, 89(1), pp.45-57.
- Hemmat, A., Nankali, N. and Aghilinategh, N. (2012). *Simulating stress-sinkage under a plate sinkage test using a viscoelastic 2D axisymmetric finite element soil model*. Soil and Tillage Research, 118: 107-116.
- Jaberimoez, M., Jafari, A., Keyhani, A. and Shorafa, M. (2017). *Effect of freezing and thawing process on soil compaction*. Journal of Agricultural Mechanization 4.1.
- Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrío, L. L. A. and Ortiz, P. F. (2021). *Numerical*



شکل ۸- نمایش تغییر شکل خاک در جهت قائم
Fig 8. Soil deformation display in the vertical direction

۴- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج شبیه‌سازی عددی فشردگی خاک با نرم‌افزار آباکوس و در نظر گرفتن ماهیت خاک به‌عنوان جسم الاستیک-پلاستیک و با معیار

- analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest*. Soil and Tillage Research, 206: 104847.
- Keller, T. (2005). *A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters*. Biosystems engineering, 92(1): 85-96.
- Keller, T. and Arvidsson, J. (2006). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52(02): 207-222.
- Keller, T. and Arvidsson, J. (2004). *Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils*. Soil and Tillage Research, 77(1): 85-95.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P. and Selvadurai, A. P. (2014). *Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations*. Soil and Tillage Research, 140: 106-117.
- Khandani, J. (2000). *Comparison of elastic analysis and stal acetoplastic analysis of soil stress distribution and its effect on estimation of consolidation meeting*" M.Sc. thesis of Civil Engineer, Faculty of Engineering, Shaheed Chamran University of Ahvaz. (In Persian).
- Farhadi, P., Mohsenimanesh, A. and Alimardani, (R. 2013). *Evaluation of soil-tire interaction on a soil bin*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15(1): 37-42.
- Naderi-Boldaji, M., Hajian, A., Ghanbarian, D. and 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: 63-70.
- Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F. and Curi, N. (2019). *A soil compaction diagnosis method for occasional tillage*

- recommendation under continuous no tillage system in Brazil.* Soil and Tillage Research, 194: 104307.
- Rashidi, M. and Khabbaz, B. G. (2011). *Finite element modeling of soil sinkage by multiple loadings.* In Proceedings of the CIGR 2011 International Symposium on Sustainable Bioproduction-Water, Energy, and Food (WEF 2011). University of Southern Queensland.
- Sarbazvatan, S. (2013). *Measurement of soil compaction under tractor titration using finite element method,* M.Sc. thesis on Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, Mohaqiq Ardebili University. (In Persian).
- Senatore, C. and Iagnemma, K. (2014). *Analysis of stress distributions under lightweight wheeled vehicles.* Journal of Terramechanics, 51: 1-17.
- Shahgholi, G., Chiyaneh, H. G. and Gundoshmian, T. M. (2018). *Modeling of soil compaction beneath the tractor tire using multilayer perceptron neural networks.* Journal of Agricultural Machinery, 8(1): 105-118.
- Soehne, W. (1953). *Distribution of pressure in the soil and soil deformation under tractor tires.* Grundl. Landtech 5: 49-59.
- Sivarajan, S., et al. (2018). *Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield.* Soil and Tillage Research, 175: 234-243.
- Susila, E. and Hryciw, R. D. (2003). *Large displacement FEM modelling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand.* International Journal for Numerical and Analytical methods in geomechanics, 27(7): 585-602.
- Ucgul M., Saunders C. and Fielke J. M. (2018). *Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge.* Biosystems Engineering 169:199-208.
- 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): 229-239.
- Ucgul, M. and Saunders, C. (2020). *Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling.* Biosystems Engineering, 190, pp.58-70.
- Wallace, C. W., Flanagan, D. C. and Engel, B. A. (2017). *Quantifying the effects of conservation practice implementation on predicted runoff and chemical losses under climate change.* Agricultural water management, 186, 51-65.
- Youssef, A.F. A. and Ali, G. A. (1982). *Determination of soil parameters using plate test.* Journal of terramechanics, 19(2): 129-147.
- Zhu, X.H. and Jia, Y.J. (2014). *3D Mechanical modeling of soil orthogonal cutting under a single reamer cutterbased on Drucker–Prager criterion.* Tunnelling and Underground Space Technology, 41, pp.255-262.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)