

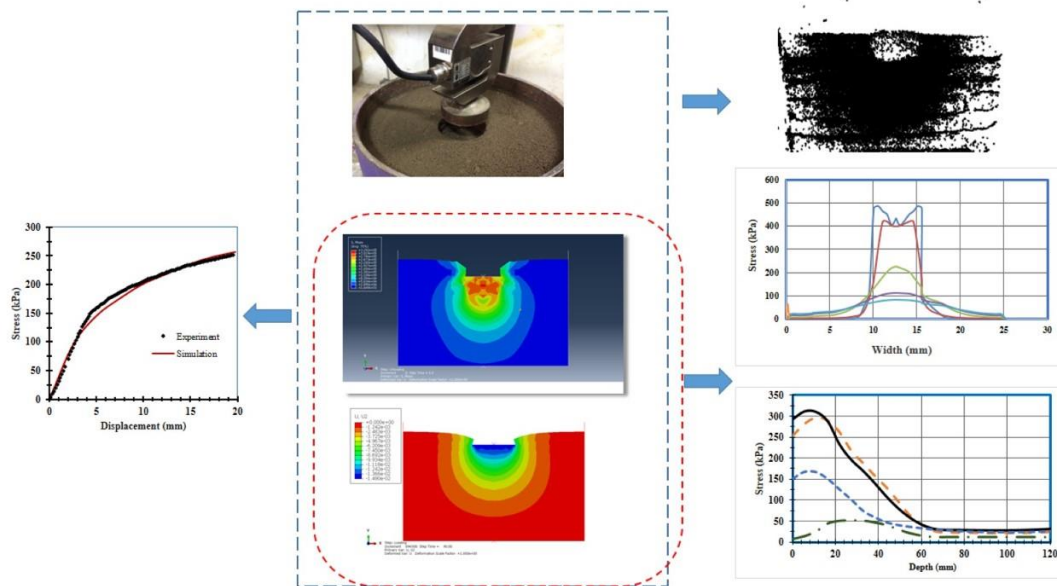
Simulation of Arable Soil Compaction Behavior by Finite Element Method and Image Processing Technique

Donya Akbari¹, Mojtaba Jaberimoeaz^{2*}

1. Graduate Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: Oct. 20, 2021- Revised: Feb. 3, 2022- Accepted: Aug. 31, 2022)



ABSTRACT: Soil compaction refers to process that increases density, decreases volume and continuity of pores, decreases water and air permeability, and increases mechanical strength. One of important parameters for evaluation of soil compaction is pre-compaction stress, which is often considered as stress at threshold of soil compaction. Plate sinkage test is an appropriate method for determining soil pre-compaction stress. In this research, for determining pre-compaction stress the experimental test of plate sinkage was used on a sample of arable soil (sandy clay loam) at the level of 15% moisture content based on dryness and density 1500 kg.m^{-3} . Then mechanical properties of soil was determined. Plate sinkage test was simulated as the form of two-dimensional and symmetric in Abaqus software and the pre-compression stress was also predicted by this method. Also, the amount of stress and displacement changes in the transverse and longitudinal layers of arable soil were analyzed. There was a high correlation ($R^2 = 0.99$) between the data extracted from the simulation model and the experimental data. Examination of compressive stress and displacement in different layers in the soil depth showed that the amount of stress and displacement in layers close to load level is more and decreases amount of stress and displacement as it progresses to the lower layers. Also, in this research, image processing technique by MATLAB software has been applied as a method to estimate soil compaction. As a general conclusion, the finite element method and image processing can be used for assessment of compacted region of soil.

Keywords: Drucker–Prager model, Plate sinkage, Pre-compression stress, Stress distribution.

شبیه‌سازی رفتار تراکم خاک زراعی با روش اجزاء محدود و تکنیک پردازش تصویر

دنیا اکبری^۱، مجتبی جابری معز^{۲*}

۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۶/۹)

چکیده: تراکم خاک به فرآیندی که سبب افزایش چگالی ظاهری، کاهش حجم و پیوستگی منافذ، کاهش نفوذپذیری آبی و هوایی خاک و افزایش مقاومت مکانیکی می‌گردد، اطلاق می‌شود. یکی از پارامترهای مهم ارزیابی تراکم خاک، تنش پیش-تراکمی می‌باشد که اغلب به عنوان تنش در آستانه تراکم خاک، محسوب می‌شود. آزمون نشست صفحه‌ای روشی مناسب برای تعیین تنش پیش تراکمی خاک می‌باشد. در این تحقیق، آزمون تجربی نشست صفحه‌ای، روی یک نمونه خاک زراعی (شنی رسی لومی) در سطح محتوای رطوبتی ۱۵ درصد بر پایه خشک و چگالی ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انجام شد و خواص مکانیکی خاک تعیین شدند. سپس آزمون نشست صفحه‌ای به روش اجزاء محدود به صورت دو بعدی و متقارن در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و تنش پیش تراکمی با این روش نیز پیش‌بینی شد. همچنین میزان تغییرات تنش و جابجایی در لایه‌های عرضی و عمقی خاک زراعی تجزیه و تحلیل شدند. بین داده‌های استخراج شده از مدل شبیه‌سازی و داده‌های تجربی تطابق بالایی بین آن‌ها وجود داشت ($R^2=0.99$). 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 پیشروی به سمت لایه‌های زیرین از مقدار تنش و جابجایی کاسته می‌شود. همچنین، در این پژوهش، از تکنیک پردازش تصویر نرم‌افزار متلب^۱ به عنوان روشی برای تخمین میزان تراکم خاک استفاده شد. به عنوان نتیجه‌گیری کلی، می‌توان از هر دو روش اجزاء محدود و پردازش تصویر برای تشخیص ناحیه فشرده شده خاک استفاده نمود.

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

مقدمه

تراکم خاک به دلیل افزایش اندازه و وزن ماشین‌آلاتی که به‌طور معمول برای کارهای کشاورزی استفاده می‌شود، در کشاورزی مدرن یکی از نگرانی‌های مهم محسوب می‌شود. بیشتر قسمت‌های بزرگی از تجهیزات امروزه که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند به دلیل اندازه و وزنشان، توانایی فشرده‌سازی خاک در لایه‌های عمیق‌تر را دارند. چندین سال پیش، تراکم نسبتاً کم‌عمق بود زیرا تجهیزات مزرعه وزن کمتری داشت و بسیاری از محصولات پوششی به‌تأویب رشد می‌کردند (DeJong-Hughes *et al.*, 2001). برخی از شاخص‌های تراکم خاک شامل مقاومت خاک، شاخص مخروط (CI)، تخلخل، میزان رطوبت بر بسیاری از عملکردهای مهم خاک از جمله رشد و عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Batey, 2009; Hamza & Anderson, 2005). تراکم خاک به عنوان مشکلی پیچیده و چند بعدی تحت تأثیر متقابل عوامل مختلف خاک، ماشین، گیاه و اقلیم شناخته می‌شود که دارای آثار قابل توجه اقتصادی و زیست‌محیطی و به عنوان یک معضل در برابر کشاورزی پایدار است. تجهیزات سنگین کشاورزی پتانسیل این رادارند که باعث افزایش شدید تراکم خاک شوند (Sivarajan *et al.*, 2018).

شدت، عمق و مکان پیدایش تراکم در خاک به فشار در سطح تماس وسیله با خاک، مقدار وزن بر محور تراکتور، فشار باد لاستیک، نوع ادوات و سرعت و تعداد تردد ماشین‌ها بستگی دارد (Soan & Van, 1994). تراکم خاک با ایجاد لایه سخت در زیرخاک، منجر به کاهش رشد ریشه و دسترسی به مواد مغذی، ایجاد روان آب 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 کشت شده می‌شوند (Wallas *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.

تراکم خاک هنگامی اتفاق می‌افتد که تنش وارد شده توسط یک بار خارجی مقاومت فشاری خاک را بیش از حد بالا ببرد. مقاومت خاک در ارتباط با تراکم به‌طور معمول با تنش پیش تراکمی خاک بیان می‌شود. فرض می‌شود تغییر شکل خاک تا زمانی که تنش وارده کمتر از تنش پیش تراکمی باشد، کشسان و قابل برگشت است و در صورتی که از تنش پیش تراکمی فراتر رود، پلاستیک و دائمی می‌باشد (Casagrande, 1936; Lebert & Horn, 1991). مقاومت خاک به میزان قابل توجهی توسط محتوای آب خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ بنابراین افزایش بازه‌ی زمانی اعمال تنش به خاک توسط ماشین-آلات متناسب با محتوای خاک، یک استراتژی خوب جهت کمتر آسیب دیدن خاک است (Bennett *et al.*, 2017). حداکثر تنشی که خاک می‌تواند تحمل کند بدون اینکه ساختار فیزیکی خاک دچار آسیب شود، تنش پیش - تراکمی نام دارد. ویژگی‌های مکانیکی خاک در تعیین حدود تنش مجاز برای جلوگیری از تراکم خاک، مهم می‌باشند. یکی از پارامترهای مهم، تنش پیش - تراکمی می‌باشد که اغلب به عنوان معیاری برای تراکم‌پذیری خاک استفاده می‌شود (Keller & Arvidson, 2006). تنش پیش تراکمی به عنوان معیاری از مقاومت خاک جهت پایدار نگه‌داشتن ساختمان آن در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gregory *et al.*, 2006). هدف اصلی از به دست آوردن تنش پیش تراکمی، 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 (Naderi-boldaji *et al.*, 2018). آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) یکی از روش‌های اندازه‌گیری تنش

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 (Ucguil & Saunders, 2020).

در تحلیل‌های عددی، مدل مورد استفاده به عنوان 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 & Jia, 2014). سطح گسیختگی ارائه شده در مدل دراکر- پراگر تقریبی از معیار موهر- کلمب است که توسط دراکر- پراگر به عنوان اصلاحی بر معیار وان میسز 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 اجزا محدود شبیه‌سازی شد، در این تحقیق خاک به صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک (کشسان-خمیری) مدل‌سازی شد و گزارش شد که با افزایش مدول الاستیسیته و نسبت بواسون خاک، تنش پیش‌تراکمی 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 (Naderi-boldaji *et al.*, 2018). در تحقیقی دیگر، مدل نشست صفحه‌ای خاک به صورت ماده الاستوپلاستیک از طریق روش اجزا محدود به صورت بارگذاری تکراری شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داد

پیش‌تراکمی خاک است (Youssef & Ali, 1982; Erel & Alexandrou 2001; Alexandrou & Eral, 1995). آزمایش نشست صفحه‌ای، روی سطح خاکی که درون یک ظرف محصور شده 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 (Nderi-boldaji *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 به گونه‌ای طراحی شوند تا با حداقل کردن تعداد تردد آن‌ها در مزرعه تا حد امکان از تراکم و تخریب خاک جلوگیری شود و همچنین در مصرف سوخت و انرژی صرفه‌جویی گردد. از جمله کارهای صورت گرفته در این مورد می‌توان به توسعه روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و کشت بذر به صورت مستقیم به شیوه‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی اشاره کرد (Peixoto *et al.*, 2019). بهینه‌سازی ماشین‌های کشاورزی و بررسی تأثیر آن‌ها بر تراکم خاک، مستلزم انجام آزمون‌های فراوانی است که انجام آن‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه‌های زیادی می‌باشد.

روش اجزای 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 (Ucguil *et al.*, 2018). به هنگام شبیه‌سازی فرآیند تراکم خاک به کمک روش‌های عددی می‌توان

قدرتمند در علم الکترونیک است. این روش پیش از این نیز در مطالعات متعددی در زمینه‌های مختلف، بسیار مؤثر بوده است (Alshibli & Sture, 2000). به‌طور کلی هر سیستم بینایی ماشین شامل قسمت‌های دوربین، عکس‌برداری و نورپردازی، مبدل و تصاویر، تحلیل‌گر، نرم‌افزار تجزیه و تحلیل تصاویر و عملگرها و نمایشگرها می‌باشد (Gonzalez & Weed, 2008). کرنش موضعی در آزمایش سه محوری خاک، یکی از مسائلی است که نظر محققان را به خود جلب کرده است. در تحقیق Komakpanah & Valinejad (2006) از پردازش دیجیتال تصاویر برای اندازه‌گیری کرنش‌های موضعی استفاده شد. نتایج نشان داد پردازش دیجیتال تصاویر روش بسیار قدرتمندی در اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل‌های موضعی در مصالح دانه‌ای است. در مطالعه‌ای توسط Naveed *et al.* (2016) توزیع تنش در خاک و اثر فشردگی بر روی تخلخل خاک تحت آزمون فشردگی نیمه محصور با استفاده از عکس‌برداری اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توزیع تنش در خاک، شدیداً به مقدار تنش وارده به خاک و استحکام اجزاء خاک وابسته است.

با توجه اهمیت تنش پیش‌تراکمی، شبیه‌سازی و درک رفتار تراکمی خاک‌های زراعی، اهداف این پژوهش: ۱- شبیه‌سازی خاک طی آزمون نشست صفحه‌ای به کمک روش اجزاء محدود ۲- تخمین تنش پیش‌تراکمی خاک با استفاده از روش المان محدود و مقایسه نتایج آن با آزمایش تجربی ۳- تعیین سطح فشردگی خاک با استفاده از تکنیک پردازش تصویر و مقایسه آن با روش اجزاء محدود بودند.

مواد و روش‌ها

روش تهیه نمونه خاک به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش، از خاک شنی رسی لومی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان، در عمق صفر تا ۲۰ cm استفاده شد. مقداری از

روش اجزای 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 ویسکوالاستیک 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 پژوهش، رفتار تراکم خاک زیر تایلر تراکتور با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه مدل‌سازی و تأثیر رطوبت، سرعت پیشروی و عمق در آن بررسی شد و مشاهده شد که شبکه عصبی با دقت بالایی می‌تواند 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 اصلاح شده به‌صورت دو بعدی شبیه‌سازی 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 مورد بررسی قرار داده‌اند (Keller & Arvidsson, 2006; Farhadi *et al.*, 2013; Senator *et al.*, 2014) ولی برخی دیگر برای بررسی توزیع تنش در خاک تحت اثر بارمحوری با استفاده از مدل‌های اجزاء محدود انجام داده‌اند (Keller, 2005).

در این تحقیق از روش پردازش تصویر برای تعیین میزان فشردگی خاک استفاده شد؛ زیرا علاوه بر سادگی اجرای آن، نسبت به روش‌های دیگر دقت بسیار خوبی نیز دارد. پردازش تصاویر یکی از روش‌های جدید و بسیار

به منظور تعیین ضریب پواسون و مدول یانگ از آزمایش فشردگی تک محوری استفاده شد. مقدار چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی خاک نیز از آزمون برش مستقیم به دست آمد.

تعیین تنش پیش-تراکمی خاک

تنش پیش تراکمی، با استفاده از روش (1995) Alexandrou & Eral 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 شد. از نقطه تقاطع این دو خط تنش پیش تراکمی به دست آمد.

شبیه‌سازی آزمایش نشست صفحه‌ای به روش اجزاء محدود به منظور شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۶،۱۰،۱ (ABAQUS version 6.10.1) 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 ساده‌سازی 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 به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۵ میلی‌متر در نرم‌افزار آباکوس مدل شدند.

خصوصیات خاک مورد مطالعه

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای از مدل دراکر-پراگر خطی به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده شد. تابع تسلیم دراکر-پراگر خطی در رابطه (۱) آورده شده است (Tekeste et al., 2009). در رابطه (۱) تنش انحرافی t (Pa)، p تنش متوسط،

خاک در یک ظرف استوانه‌ای شکل با قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر ریخته شد و چگالی ظاهری آن تعیین شد که مقدار آن برابر با ۱۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بود. سپس مطابق با استاندارد ASTM D 2216 درصد رطوبت خاک با قرار دادن ۱۵۰ گرم از نمونه خاک مورد آزمایش درون یک آون در دمای 110 ± 5 درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت تعیین شد و مقدار آب مورد نیاز برای رساندن رطوبت نمونه‌ها به سطح رطوبت وزنی مورد آزمایش ۱۵ درصد محاسبه شد. سپس خاک مرطوب با افشان کردن آب به طور یکنواخت تهیه گردید. مقدار آب لازم پس از محاسبه، به خاک توسط یک آب‌پاش به صورت افشان بر خاک پاشیده و خاک مرطوب به هم زده شد تا رطوبت به طور یکنواخت در تمامی قسمت‌های آن پخش شود (Jaberi et al., 2018). سپس خاک مرطوب به صورت ۶ لایه ۲ سانتیمتری در ظرف ریخته شد تا فشردگی یکنواختی به دست آید و بین تمامی لایه‌ها گچ ریخته شد. در هر لایه با ضربه‌های آهسته خاک فشرده گردید تا چگالی ظاهری خاک به مقدار ۱۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب برسد. پیش از اضافه کردن لایه جدید، شیارهایی در سطح لایه پیشین ایجاد شد تا پیوستگی بین لایه‌ها ایجاد شود.

روش آزمایش نشست صفحه‌ای

جهت انجام آزمایش نشست صفحه‌ای، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی با قطر ۵ سانتیمتر و ضخامت ۱۶ میلی‌متر با دستگاه سی بی آر ۱ با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام شد (Jaberi et al., 2018). در 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 با ظرفیت ۱ تن در کلاس دقت C3 ثبت می‌شد و نمودار نیرو-جابجایی رسم می‌گردید. نشست ۲۰ میلی‌متر به عنوان پایان آزمایش لحاظ شد.

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 در جدول ۱ آورده شده است.

(رابطه ۲)

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

(رابطه ۳)

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

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, 2010).

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در روابط (۲) و (۳)، σ_1 بیشینه تنش اصلی، σ_3 کمینه تنش اصلی، q تنش متوسط وان میسر، r

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی خاک مورد آزمایش

Table 1. Mechanical properties of tested soil

زاویه آماس (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	نسبت جریان تنش	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	رطوبت (درصد)	چسبندگی (کیلو پاسکال)
۱۴	۳۶	۰/۷۸	۰/۳	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۵	۲۶/۱۲

و سیلیکا دیده شد برابر با ۳۳ درجه در نظر گرفته شد (Bolton, 1986). رفتار سخت شدگی فشاری برای خاک مورد نظر از آزمایش سه محوری به دست آمد به نحوی که کرنش پلاستیک در مقابل تنش تسلیم در نقاط مختلف محاسبه شد و رفتار سخت شدگی فشاری در نرم افزار آباکوس تعریف شد.

شرایط مرزی و مش بندی

جهت شبیه سازی مرحله بارگذاری طی آزمون نشست صفحه ای خاک از روش دینامیک صریح استفاده شد. به منظور اعمال بار به خاک، صفحه بارگذاری با سرعت ثابت ۱ میلی متر بر دقیقه در جهت محور y به مقدار ۲۰ میلی متر در جهت محور y به سمت پایین جابجا شد. صفحه بارگذاری فقط می تواند در جهت محور y حرکت کند و در سایر جهات مقید شده بود و درجات آزادی ظرف حاوی خاک در تمامی جهت مقید شد. گره های 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. گره های پایینی و زیرین خاک در نقاط $y=0$ بر روی محور x حرکتی ندارند اما در جهت محور y می توانند

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.

$$k = \frac{3 - \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$d = c \frac{\cos \Phi}{3 - \sin \Phi} \quad (\text{رابطه ۶})$$

زاویه آماس (ψ) جهت جریان پلاستیک بعد از گسیختگی را تعیین می کند. زمانی که این زاویه برابر با زاویه اصطکاک داخلی (β) باشد، جهت جریان پلاستیک عمود بر سطح گسیختگی می باشد که این حالت قانون جریان پلاستیک وابسته نامیده می شود. برای جریان های غیر وابسته، رابطه زاویه آماس با اصطکاک داخلی مدل موهر-کلمب به صورت رابطه (۷) بیان می شود (Susila & Hryciw, 2003).

$$\Phi = \Phi_{cv} + \psi \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه (۷)، Φ_{cv} ثابت حجم زاویه اصطکاک داخلی برای مواد دانه ای نرم است. مقدار آن برای مدل های اجزا محدود بر اساس مشاهداتی که برای شن

خطوط گچی در تصویر، حدود آستانه بر روی آن اعمال شد. پس انجام مراحل پیش‌پردازش و اعمال فیلترهایی بر روی تصویر، خروجی از نرم‌افزار گرفته شد.

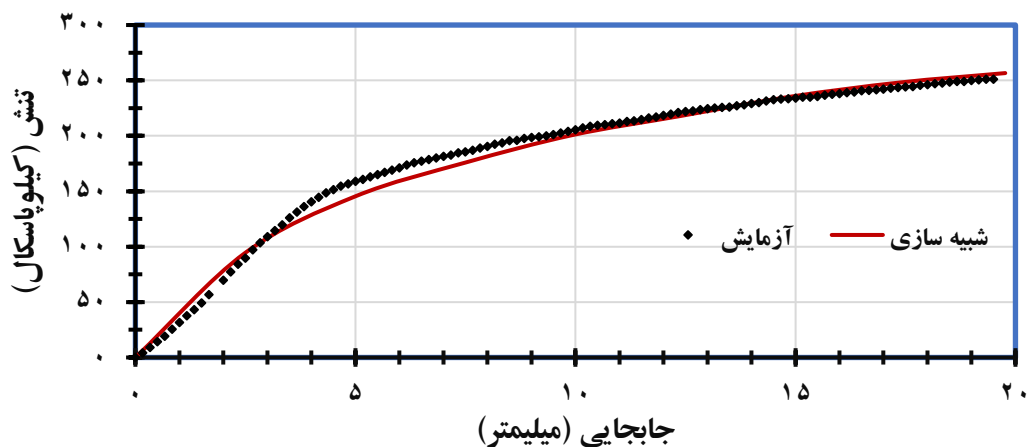
نتایج و بحث

صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای خاک میانگین تنش فشاری و جابجایی گره‌های زیر صفحه بارگذاری طی مرحله بارگذاری محاسبه و با نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی نشست صفحه‌ای خاک مقایسه شدند. شکل ۱ نمودارهای تنش-نشست خاک به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود را در مقابل نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج شکل قابل مشاهده است، روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراکر-پراگر به‌خوبی توانسته با دقت بالایی و ضریب تعیین ۰.۹۹ رفتار تنش-نشست خاک را در زیر صفحه بارگذاری طی فرآیند تراکم خاک پیش‌بینی کند؛ بنابراین از روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراکر-پراگر به‌خوبی می‌توان جهت پیش‌بینی و بررسی رفتار تراکمی خاک استفاده کرد (Naderi-Boldaji *et al.* (2018) نیز طی شبیه‌سازی رفتار تراکمی خاک با مدل دراکر-پراگر به نتایج مشابهی دست یافتند.

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 ساختار یافته برای مش بندی محیط خاک با استفاده از المان‌های آجری خطی متقارن چهار گره‌ای (CAX4R) برای مش بندی خاک انتخاب شد. در نهایت ۵۵۰ المان برای شبیه‌سازی خاک استفاده شد.

تعیین سطح فشردگی خاک با استفاده از تکنیک پردازش تصویر به‌منظور تشخیص میزان فشردگی خاک در آزمون نشست صفحه‌ای از تکنیک پردازش تصویر نرم‌افزار متلب استفاده شد. بدین منظور نمونه خاک پس از بارگذاری، توسط یک ورقه آهنی به دو نیمه مساوی برش زده شد. با استفاده از یک دوربین دیجیتال از تمام مراحل خشک شدن نمونه خاک در فواصل معین عکس-برداری شد. برای تأمین یکنواختی نور در هنگام تصویربرداری، از محفظه‌ی تصویربرداری مجهز به لامپ LED در چهار طرف محفظه استفاده شد. پس از آزمون و خطا و ارزیابی چشمی تصاویر، میزان شدت نور محیط تصویربرداری تنظیم شد. دوربین در فاصله ۲۵ سانتیمتر در بالای نمونه، داخل محفظه‌ی تصویربرداری نصب شد تا تصاویر واضحی از نمونه‌های خاک به دست آید. تصاویر گرفته شده از نمونه به رایانه منتقل شد. پس از فراخوانی تصویر در محیط کاری نرم‌افزار متلب به‌منظور یافتن



شکل ۱. نمودارهای تنش-جابجایی حاصل از آزمون تجربی و خروجی شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود
Figure 1. Displacement-stress diagrams obtained from experimental test and FEM simulation output

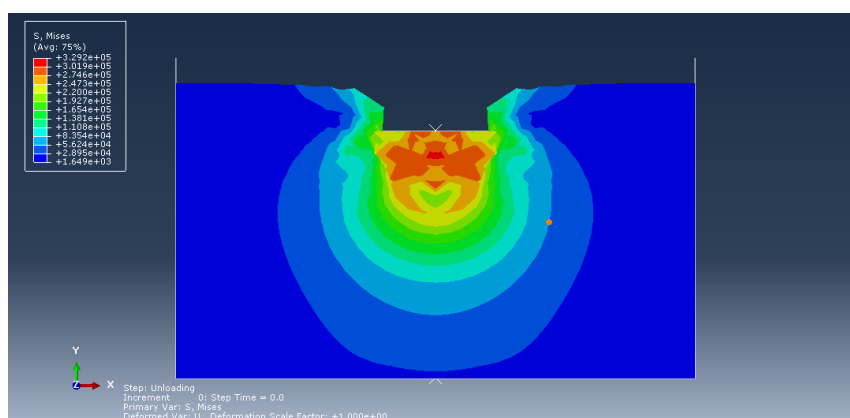
تنش پیش تراکمی

به منظور تعیین مقدار تنش پیش تراکمی از روش Alexandrou & Eral (1995) استفاده شد. مقدار تنش پیش تراکمی به دست آمده از نتایج شبیه سازی به روش المان محدود برابر با ۱۶۵ کیلو پاسکال و مقدار تنش پیش تراکمی به دست آمده از آزمون نشست صفحه ای خاک نیز برابر با ۱۷۸ کیلو پاسکال به دست آمد. همان طور که ملاحظه می شود، مدل دراگر - پراگر

توانست با دقت خوبی و با خطای ۷ درصد تنش پیش تراکمی را تخمین بزند؛ بنابراین از روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراگر - پراگر می توان با دقت خوبی تنش در آستانه تراکم را برای خاک زراعی پیش بینی کرد.

نتایج توزیع تنش فشاری

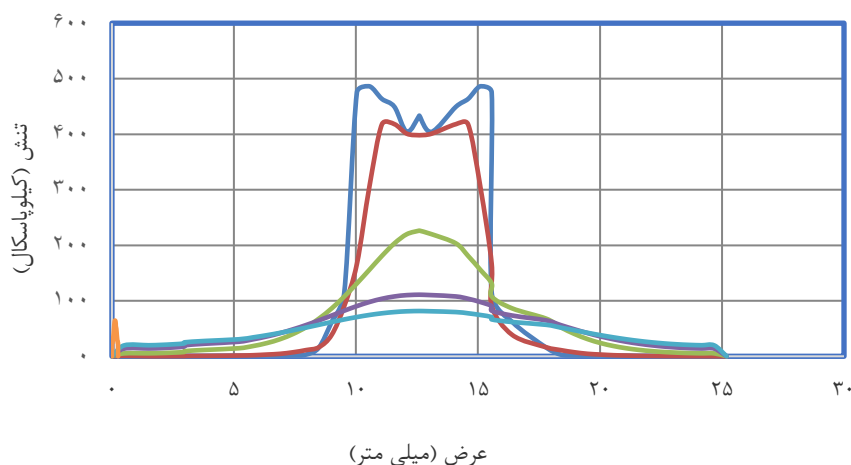
توزیع تنش در خاک در انتهای بارگذاری در شبیه سازی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- توزیع تنش حاصل از مدل اجزاء محدود در خاک (انتهای بارگذاری)
Figure 2. Stress distribution in soil obtained from FEM (end of loading)

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

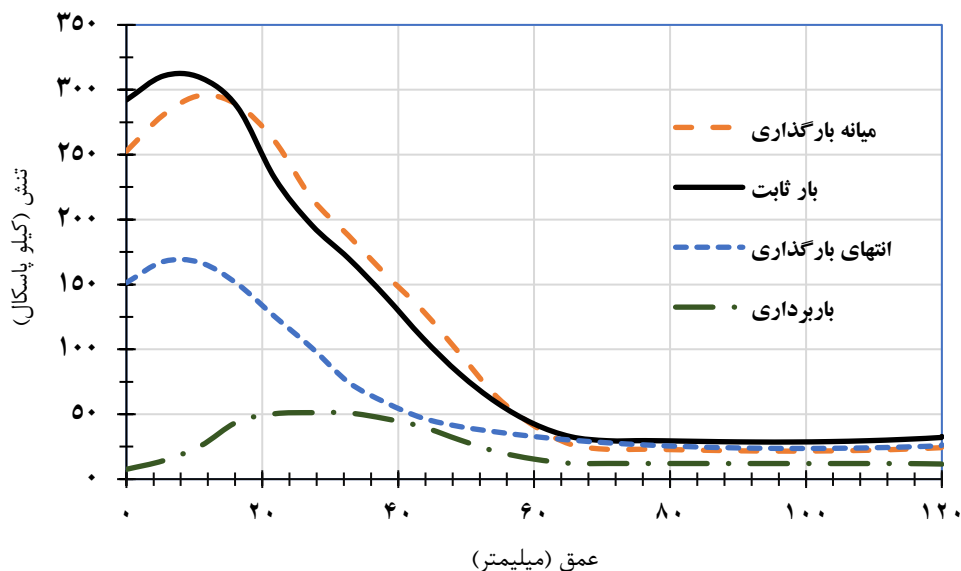
نامتوازن است و این امر باعث ایجاد تراکم در خاک در زیر سطح بارگذاری و اطراف محل بارگذاری می شود. شکل ۳ نحوه توزیع تنش در عرض نمونه خاک را نشان می دهد.



شکل ۳- توزیع تنش در امتداد محور افقی تحت تأثیر بارمحوری در خاک (مستخرج از مدل اجزاء محدود)
Figure 3. Distribution stress across horizontal axes influence axial load in soil (Extracted from FEM)

باعث تراکم خاک نگردد. در صورتی که اعمال بار بیش از ظرفیت باربری خاک اجتناب ناپذیر باشد، میزان تراکم خاک در لایه‌های مختلف قابل پیش‌بینی 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.

نکته دیگر در مورد اعمال بار محوری 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 ۴ 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



شکل ۴- نمودار توزیع تنش در عمق نمونه خاک مورد آزمایش تحت تأثیر بارمحوری مستخرج از مدل اجزاء محدود
Figure 4-Stress distribution in depth of soil sample influence of axial load extracted from FEM

خاک در انتهای مرحله‌ی بارگذاری تقریباً ۲۰ میلی‌متر فشرده شده است. همچنین بیشترین مقدار تغییرات برای پارامتر جابه‌جایی در لایه‌های سطحی خاک و در مرکز ناحیه‌ی اعمال بار زیر صفحه بارگذاری می‌باشد و با پیشروی از لایه‌های اولیه خاک به سمت لایه‌های زیرین از مقدار آن کاسته می‌شود به طوری که در لایه‌های زیرین میزان جابه‌جایی به صفر نزدیک می‌شود. تشخیص میزان جابه‌جایی خاک با استفاده از تکنیک پردازش تصویر بر طبق شکل ۷ که از تکنیک پردازش تصویر به

همچنین در شکل ۵ توزیع تنش در عرض نمونه خاک تحت اعمال بارمحوری نمایش داده شده است. بر طبق این تصویر تمرکز تنش در قسمت اعمال بار رخ می‌دهد و با دور شدن از مرکز اعمال بار، از مقدار تنش نیز کم می‌شود.

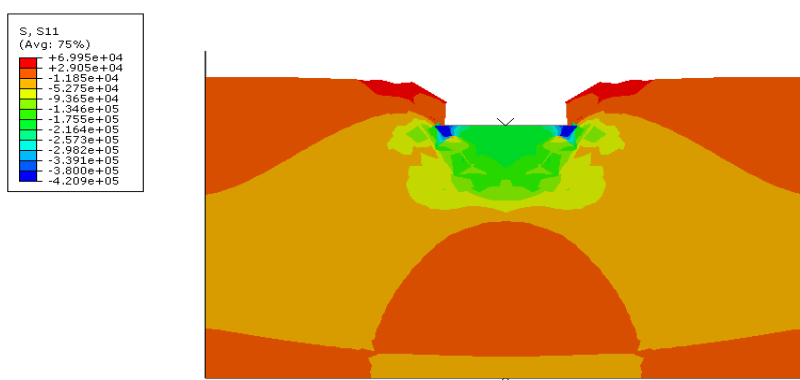
تصویر به دست آمده جابه‌جایی نهایی خاک در انتهای بارگذاری به روش اجزاء محدود

در پژوهش انجام شده، نحوه تغییر شکل خاک پس از اعمال بار توسط مدل دراکر پراگر ارائه گردید.

شکل ۶ نشان داد در اثر اعمال نیروی محوری،

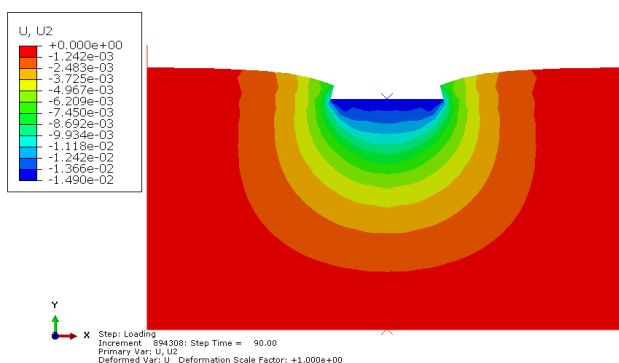
المان‌های عرضی و رسیدن به حداکثر تنش وارده به خاک، خطوط گچی به سمت پایین قوس پیدا می‌کنند و در لایه‌های خاک فرو می‌روند، این تغییر نشان دهنده‌ی متراکم شدن خاک می‌باشد. بر طبق این شکل، قسمت‌هایی که رنگ آن‌ها تیره‌تر می‌باشد، تراکم در این نواحی بیشتر از نواحی سفید و روشن می‌باشد.

دست آمده است، به‌خوبی مشاهده می‌شود که موقعیت مکانی خطوط گچی نسبت به موقعیت آن، قبل از اعمال بار تغییر کرده و این خطوط از سطح به سمت لایه‌های زیرین خاک حرکت کرده‌اند. بیشترین مقدار این جابه‌جایی و تغییر مکان در قسمت مرکزی نمونه (زیر صفحه‌ی بارگذاری) می‌باشد. با افزایش جابه‌جایی



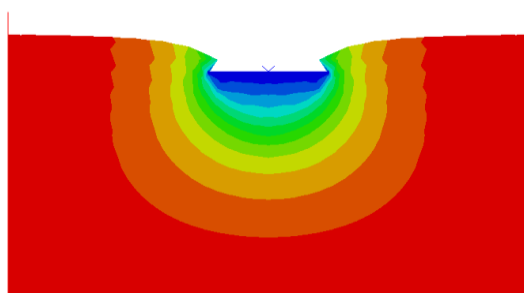
شکل ۵- تصویر نهایی توزیع تنش در عرض خاک مستخرج از مدل اجزاء محدود

Figure 5. Final image of stress distribution in the horizontal axis in soil extracted from FEM



شکل ۶- تصویر نهایی میزان جابه‌جایی خاک پس از پایان آزمایش مستخرج از مدل اجزاء محدود

Figure 6-Final image of soil displacement after the end of experiment extracted from FEM



ب



الف

شکل ۷- تصاویر مستخرج از نرم‌افزارها

الف: تصویر به‌دست‌آمده از تکنیک پردازش تصویر. ب: تصویر به‌دست‌آمده از روش اجزاء محدود

Figure 7. Images extracted from softwares

a. Image obtained from image processing technique, b. Image extracted from FEM

مناسبی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی داشت. نتایج شبیه‌سازی با مدل دراکر-پراگر به روش اجزاء محدود نشان داد که توزیع تنش در عرض با فاصله گرفتن از مرکز سطح اعمال بار محوری در جهت افقی و قائم کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عمق، توزیع تنش کاهش یافته و سپس به صفر می‌رسد. تصاویر به دست آمده از تکنیک پردازش تصویر، میزان تراکم خاک و نواحی که بیشترین تراکم را داشتند به خوبی نشان می‌دهند و در تصویر پردازش شده، هر چه یک قسمت تیره‌تر باشد، تراکم در آن ناحیه بیشتر است.

از نتایج این تحقیق استنباط می‌شود که روش اجزاء محدود و تکنیک پردازش تصویر، وضعیت ناحیه‌ی متراکم شده پس از اعمال بار و آسیب فشاری نمونه خاک را مشابه هم نشان می‌دهند و هر دو روش دارای دقت کافی برای ارزیابی میزان جابه‌جایی و کرنش در سطح نمونه می‌باشند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

در هر دو تصویر فوق، وضعیت خاک پس از اعمال بار آشکار است و تصاویر به خوبی نشان می‌دهند که نمونه خاک پس از اعمال بار متراکم شده و لایه‌های سطحی خاک به سمت لایه‌های زیرین حرکت کرده‌اند. این تغییر وضعیت، در لایه‌های سطحی خاک بیشترین مقدار را دارد و هر چه از سطح به سمت عمق نمونه می‌رویم میزان جابه‌جایی و تراکم خاک کمتر می‌شود. همچنین این تغییر وضعیت در قسمت مرکزی نمونه بیشترین میزان را دارد و هر چه به سمت کناره‌های ظرف می‌رویم میزان تغییر کمتر می‌شود.

نتیجه‌گیری

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 تراکمی به دست آمده از شبیه‌سازی نشست صفحه‌ای تقریباً نزدیک به مقدار به دست آمده از آزمون تجربی بود. مدل با ضریب تعیین ۰.۹۹٪ تطبیق

REFERENCES

- ABAQUS (2010). ABAQUS Theory Manuals Version 6.10.1. ABAQUS, Inc., Providence, RI.
- Alexandrou, A., & Earl, R. (1995). In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1), 67-71.
- Alshibli, K. A., & Sture, S. (2000). Shear band formation in plane strain experiments of sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 495-503.
- ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. (2005). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345.
- Bennett, J. M., Robertson, S. D., Jensen, T. A., Antille, D. L., & Hall, J. (2017). A comparative study of conventional and controlled traffic in irrigated cotton: I. Heavy machinery impact on the soil resource. *Soil and Tillage Research*, 168, 143-154.
- Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, 36(1), 65-78.
- Casagrande, A. (1936). The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 22-26 June, Cambridge, MA, Vol. 3, pp.60-64.
- Cueto, O.G., Coronel, C.E.I., Morfa, C.A.R., Sosa, G.U., Gómez, L.H.H., Calderón, G.U., & 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.
- DeJong-Hughes, J., Moncrief, J., Voorhees, W., Swan, J. (2001). *Soil Compaction: Causes, Effects and Control*. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service FO-3115-S.

- Earl, R., & Alexandrou, A. (2001). Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: experimental approach. *Journal of Terramechanics*, 38(3), 153-162.
- Farhadi, P., Mohsenimanesh, A., & Alimardani, R. (2013). Evaluation of soil-tire interaction on a soil bin. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 37-42.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). Digital image processing: Pearson prentice hall. *Upper Saddle River, NJ, 1*, 376-376.
- Gregory, A.S., Whalley, W.R., Watts, C.W., Bird, N.R.A., Hallett, P.D., & Whitmore, A.P. (2006). Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89(1), 45-57.
- Hamza, M.A., & Anderson, W.K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage research*, 82(2), 121-145.
- Hemmat, A., Nankali, N., & 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.
- Jaberi, M., Jafari, A., Keyhani, A., & Shorafa, M. (2018). Effects of freezing and thawing process on soil compressibility. *Agricultural Mechanization*, 4(1), 45-55. (In Farsi)
- Jimenez, K.J., Rolim, M. M., Gomes, I.F., de Lima, R.P., Berrio, L.L.A., & Ortiz, P. F. (2021). Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, 206, 1-10.
- 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., & Arvidsson, J. (2006). Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden: Experiences from wheeling experiments: (*Vermeidung von Unterbodenverdichtungen durch Landwirtschaftsmaschinen in Schweden: Erfahrungen aus Befahrungsversuchen*). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52(02), 207-222.
- Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P., & Selvadurai, A. P. (2014). Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, 140, 106-117.
- Komakpanah, A., & valinejad, N. (2006). Local strain measurement in soil specimen of triaxial test by digital image processing method. *Modares Technical and Engineering*, (23), 41-45. <https://www.sid.ir/Journal/viewpaper.aspx?id=63940>
- Lebert, M., & Horn, R. (1991). A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19(2-3), 275-286.
- 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, 63-70.
- Naveed, M., Schjønning, P., Keller, T., de Jonge, L. W., Moldrup, P., & Lamandé, M. (2016). Quantifying vertical stress transmission and compaction-induced soil structure using sensor mat and X-ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 158, 110-122.
- Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 194, 1-12.
- Rashidi, M., & Gholami, M. (2010). Prediction of soil sinkage by multiple loadings using the finite element method. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12, 911-915.
- Senatore, C. & Iagnemma, K. (2014). Analysis of stress distributions under lightweight wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 51, 1-17.
- Shahgholi, G., Chiyaneh, H. G., & 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.
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due

- to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, 175, 234-243.
- Soane, B.D. & Van Ouwerkerk, C. (1994). Soil compaction problems in world agriculture. In *Developments in Agricultural Engineering*, 11, 1-21.
- Susila, E., & 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.
- Tekeste, M. Z., Tollner, E. W., Raper, R. L., Way, T. R., & 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., & Saunders, C. (2020). Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 190, 58-70.
- Ucgul, M., Saunders, C., & 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.
- Wallace, C. W., Flanagan, D. C., & 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., & Ali, G. A. (1982). Determination of soil parameters using plate test. *Journal of Terramechanics*, 19(2), 129-147.
- Zhu, X. H., & Jia, Y. J. (2014). 3D Mechanical modeling of soil orthogonal cutting under a single reamer cutter based on Drucker–Prager criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 255-262.