

مدل سازی خاک مزرعه طی آزمایش نشست صفحه‌ای توسط معیار تسلیم دراگر پراگر با استفاده از روش المان محدود

*مجتبی جابری معز^۱، دنیا اکبری^۲

۱. هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا (mjtbjaberi@gmail.com)

۲. کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم (donya.akbari74@gmail.com)

چکیده

تراکم خاک یکی از تهدیدات اصلی برای تخریب ساختمان خاک است که حتی ممکن است منجر به تجزیه‌ی خاک نیز شود. به منظور جلوگیری از پدیده تراکم خاک، دانستن ویژگی‌های مکانیکی خاک در تعیین حدود تنش مجاز حائز اهمیت است. تنش پیش‌تراکمی، به عنوان حداکثر تنش 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 پیش‌تراکمی خاک می‌باشد. 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 دو بعدی و متقارن توسط مدل دراگر پراگر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و تنش پیش‌تراکمی با این روش پیش‌بینی شد. همچنین توزیع تنش و جابجایی در لایه‌های خاک در عمق تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مدل دراگر-پراگر با ضریب تبیین ۹۹ درصد 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؛ همچنین مقدار تنش در سطح هر لایه از خاک با فاصله گرفتن از مرکز صفحه بارگذاری کاهش یافت.

کلمات کلیدی:

تراکم خاک، تنش پیش تراکمی، توزیع تنش، مدل دراگرپراگر، نشست صفحه‌ای

*مجتبی جابری معز

شبیه سازی خاک مزرعه طی آزمایش نشست صفحه‌ای توسط معیار تسلیم دراگر پراگر با استفاده از روش المان محدود

مقدمه

تراکم خاک به‌عنوان 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 به‌عنوان یک معضل در برابر کشاورزی پایدار است. تجهیزات سنگین کشاورزی پتانسیل این را دارند که باعث افزایش شدید تراکم خاک شوند [۲۳]. بافت، ساختمان، درصد آهک، مقدار رطوبت و میزان مواد آلی از جمله عوامل فیزیکی تأثیرگذار بر تراکم پذیری خاک هستند [۱]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که تراکم خاک با ایجاد لایه سخت در زیر خاک، منجر به کاهش رشد ریشه و دسترسی به مواد مغذی، ایجاد روان آب و تخریب مواد آلی خاک به‌وسیله آب شویی 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. 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 پیش تراکمی به‌عنوان حداکثر تنش مجازی است که خاک می‌تواند بدون آن که فشردگی آن افزایش یابد، تحمل کند [۱۱]. تنش پیش تراکمی به‌عنوان معیاری از مقاومت خاک جهت پایدار نگهداشتن بافت و ساختمان آن در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. 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 [۱۷]. آزمایش نشست صفحه‌ای (PST) یکی از روش‌های اندازه‌گیری تنش پیش تراکمی خاک است ([۲۱]، [۴]، [۲۶]). طی 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 [۱۷]. 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 بی‌خاک‌ورزی اشاره کرد [۱۸]. 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

¹Plate Sinkage Test

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 [۲۴]. 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 به‌وسیله این ابزارها را پیش‌بینی و شکل هندسی و چیدمان آنها روی ماشین را بهینه کرد [۲۵].

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 درآگر-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 [۲۷]. سطح گسیختگی ارائه شده در مدل درآگر-پراگر تقریبی از معیار موهر-کلمب است که توسط درآگر-پراگر به‌عنوان اصلاحی بر معیار ون‌میسز جهت تأثیر تنش هیدرو استاتیک در تسلیم منظور گردید [۳]. طی تحقیقی، آزمون‌های فشاری تک‌محوری محصور، نیمه‌محصور و نشست صفحه‌ای خاک با روش اجزا محدود شبیه‌سازی شد، در این تحقیق خاک به‌صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک (کشسان-خمیری) مدل‌سازی شد و گزارش شد که با افزایش مدول الاستیسیته و نسبت پواسون خاک، تنش پیش‌تراکمی نقطه بیشینه انحناء افزایش یافت، در حالی که افزایش زاویه اصطکاک داخلی درآگر-پراگر و سرعت نفوذ پروپ بارگذاری تأثیر معنی‌داری در مقدار تنش پیش‌تراکمی نقطه بیشینه انحناء نداشت [۱۷]. 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 روش اجزای محدود می‌تواند رفتار نشست خاک را طی بارگذاری‌های تکراری نسبتاً دقیق بیان کند [۱۹]. 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 [۶]. طی یک پژوهش، رفتار تراکم خاک زیر تأثیر 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 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 [۲۱]. در تحقیقی، رفتار تراکمی و توزیع تنش در خاک در اثر تردد ماشین‌های برداشت نیشکر در مزرعه توسط مدل درآگر-پراگر اصلاح شده به صورت 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 [۸]. توزیع تنش در عرض تحت تأثیر بار محوری 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 بار محوری را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند ([۱۰]، [۱۳]، [۲۰]). ولی برخی دیگر برای بررسی توزیع تنش در خاک تحت اثر بار محوری با استفاده از مدل‌های اجزاء محدود انجام داده‌اند [۱۲].

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

مواد و روش‌ها

روش تهیه نمونه خاک

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش، از خاک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان، در عمق صفر تا ۲۰ cm استفاده شد. بافت خاک مورد مطالعه از نوع شنی رسی لومی بود که ویژگی‌های فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. مقداری از خاک تهیه شده 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 ۱۵۰ g 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% d.b. 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 همزده شد تا رطوبت به طور یکنواخت در تمامی قسمت‌های آن پخش شود [۷]. سپس خاک مرطوب به صورت لایه‌لایه (۳ لایه ۴ cm) در ظرف ریخته شد تا فشردگی یکنواختی به دست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته 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

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

روش آزمایش نشست صفحه‌ای

جهت انجام آزمایش نشست صفحه‌ای، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی با قطر ۵ cm و ضخامت ۱۶mm با دستگاه^۱ CBR با سرعت^۱ $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ انجام شد [۷]. 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 با ظرفیت ۱ ton در کلاس دقت C3 ثبت می‌شد و نمودار نیرو-جابجایی رسم می‌گردید. نشست ۲۰mm به‌عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد. 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 به‌دست آمدند.



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

تعیین تنش پیش-تراکمی خاک

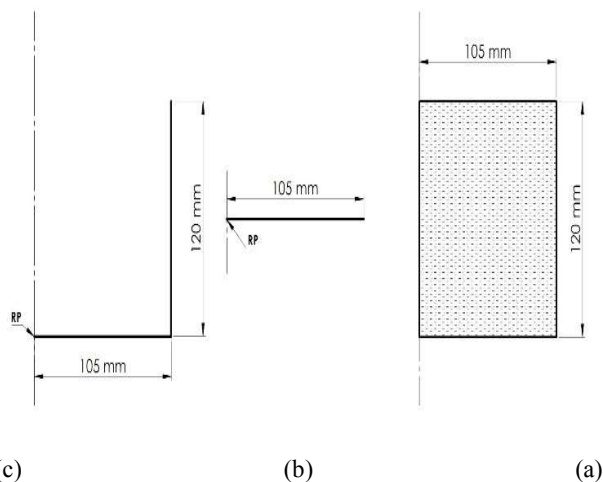
تنش پیش‌تراکمی، با استفاده از روش ارائه شده توسط الکساندرو و ارل (۱۹۹۵) با استفاده از داده‌های نمودار تنش-نشست حاصل از آزمایش نشست صفحه‌ای خاک تعیین شد. در این روش، نقطه تقاطع دو خط مماس بر منحنی تنش-نشست، تنش پیش‌تراکمی را نشان می‌دهد. بدین منظور یک خط مماس بر منحنی تنش-نشست، از مبدأ و خط دیگر، مماس بر قسمت انتهایی منحنی رسم شدند، از نقطه تقاطع این دو خط تنش پیش‌تراکمی به دست آمد [۱].

شبیه‌سازی آزمایش نشست صفحه‌ای به روش اجزاء محدود

به‌منظور شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۶.۱۴ استفاده شد. بدین منظور، خاک به‌صورت یک جسم تغییر شکل‌پذیر به صورت دو بعدی (یک مستطیل) و متقارن با ارتفاع ۱۲۰ mm و عرض ۱۰۵ mm (چون بارگذاری و شرایط مرزی متقارن بودند به‌منظور ساده‌سازی نیمی از خاک مدل شد و سپس نتایج به کل هندسه خاک تعمیم داده شد)، صفحه بارگذاری به‌صورت یک جسم صلب با عرض ۲۵ mm و ظرف حاوی خاک نیز به‌صورت جسم صلب به ارتفاع ۱۲۰ mm و عرض ۱۰۵ mm در نرم‌افزار آباکوس مدل

^۱California Bearing Ratio

شدند. شکل ۲ مدل خاک، صفحه بارگذاری و ظرف حاوی خاک طراحی شده در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد.



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

خصوصیات خاک مورد مطالعه

در این تحقیق جهت شبیه سازی آزمون نشست صفحه ای از مدل دراکر-پراگر خطی به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده شد. تابع تسلیم دراکر-پراگر خطی در رابطه (۱) آورده شده است [۱۴].

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

در رابطه (۱)، تنش انحرافی p (Pa)، 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 می شوند.

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

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

در روابط (۲) و (۳)، σ_1 بیشینه تنش اصلی، σ_3 کمینه تنش اصلی، q تنش متوسط ون 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 آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی خاک مورد آزمایش

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

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.

$$k = \frac{3 - \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \quad (۳)$$

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

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

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 به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۱۵].

$$\Phi = \Phi_{cv} + \psi \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، Φ_{cv} ثابت حجم زاویه اصطکاک داخلی برای مواد دانه‌ای نرم است. مقدار آن برای مدل‌های اجزا محدود بر اساس مشاهداتی که برای شن و سیلیکا دیده شد برابر با ۳۳ درجه در نظر گرفته شد [۱۶]. 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 نرم‌افزار آباکوس تعریف شد.

شرایط مرزی و مش‌بندی

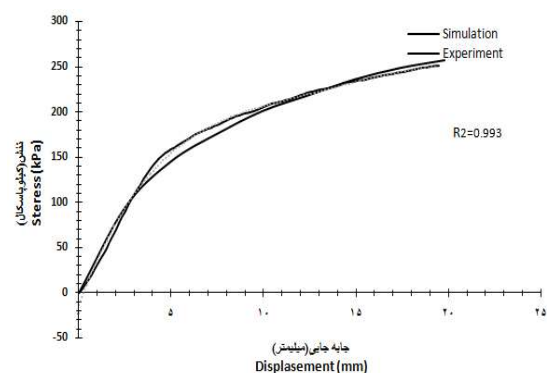
جهت شبیه‌سازی مرحله بارگذاری طی آزمون نشست صفحه‌ای خاک از روش دینامیک صریح استفاده شد. به منظور اعمال بار به خاک، صفحه بارگذاری با سرعت ثابت 1 mm.min^{-1} در جهت محور y به مقدار 20 mm در جهت محور y به سمت پایین جابجا شد. صفحه بارگذاری فقط می‌تواند در جهت محور y حرکت کند و در سایر جهات مقید شده بود و درجات آزادی ظرف حاوی 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.

نتایج و بحث

صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای خاک میانگین تنش فشاری و جابجایی گره‌های زیر صفحه بارگذاری طی مرحله بارگذاری محاسبه و با نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی نشست صفحه‌ای خاک مقایسه شدند. شکل ۳ نمودارهای تنش - نشست خاک بدست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود را در مقابل نتایج آزمایش تجربی نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج شکل ۳ قابل مشاهده است، روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراگر - گراگر به خوبی توانسته با دقت بالایی و ضریب تبیین ۹۹٪ رفتار تنش - نشست خاک را در زیر صفحه بارگذاری طی فرآیند تراکم خاک پیش‌بینی کند. بنابراین از روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراگر پراگر به خوبی می‌توان جهت پیش‌بینی و بررسی رفتار تراکمی خاک استفاده کرد. نادری و همکاران (۲۰۱۸)، نیز طی شبیه‌سازی رفتار تراکمی خاک با مدل دراگر پراگر به نتایج مشابهی دست یافتند.

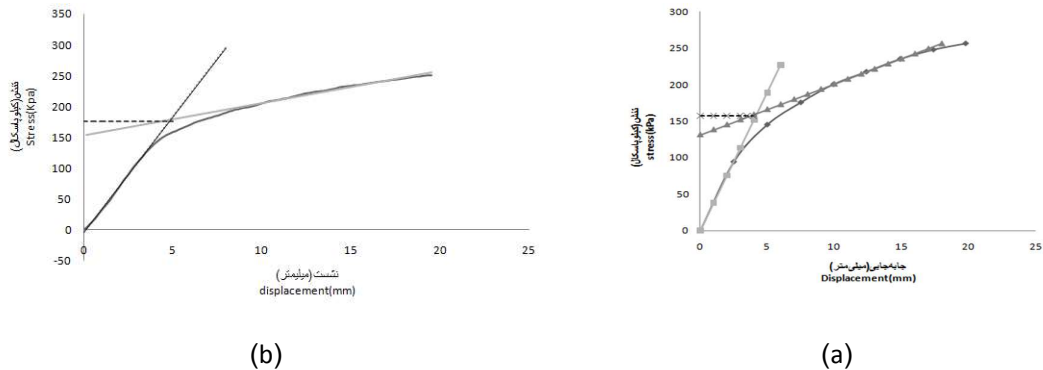


شکل ۳- مقایسه نتایج تنش-جابجایی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

تنش پیش‌تراکمی

شکل ۴ (a) و (b) به ترتیب نمودار تنش - نشست خاک بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی از المان محدود و داده‌های آزمون تجربی نشست صفحه‌ای خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پیش‌تراکمی به دست آمده در هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به منظور تعیین مقدار تنش پیش‌تراکمی از روش الکساندرو و ارال (۱۹۹۵) استفاده شد. همانطور که از نتایج شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار تنش پیش‌تراکمی بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی به روش المان محدود برابر با ۱۶۵ کیلوپاسکال و مقدار تنش پیش‌تراکمی بدست آمده از آزمون نشست صفحه‌ای خاک نیز برابر با ۱۷۸ کیلوپاسکال بدست آمد. همانطور که ملاحظه می‌شود،

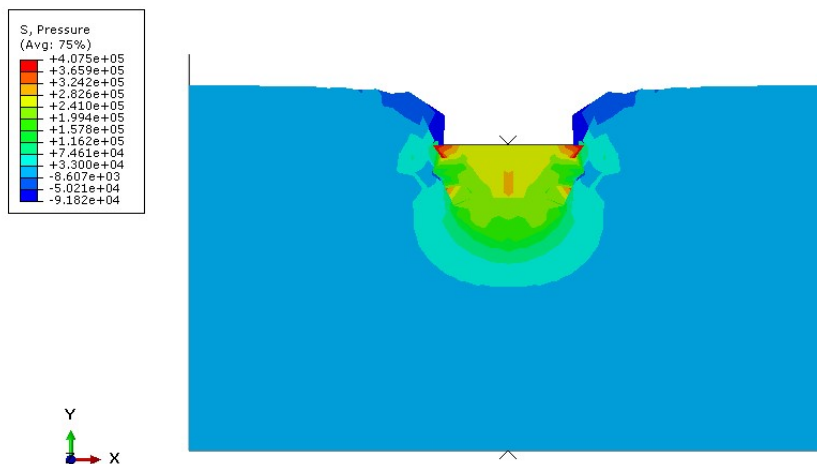
مدل دراگر پراگر توانست با دقت خوبی و با خطای ۷ درصد تنش پیش تراکمی را تخمین بزند. بنابراین از روش اجزاءمحدود و معیار تسلیم دراگر پراگر می توان با دقت خوبی تنش در آستانه تراکم را برای خاک زراعی پیش بینی کرد.



شکل ۴- تنش پیش تراکمی به دست آمده از روش الکساندرو وارال (a) داده های شبیه سازی (b) داده های تجربی

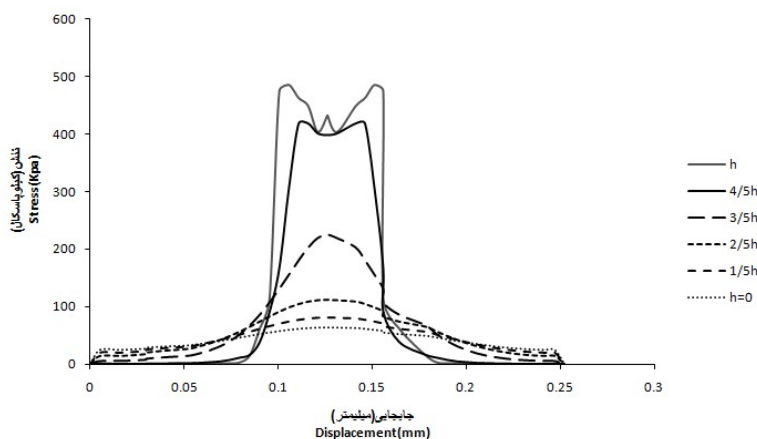
نتایج توزیع تنش فشاری

توزیع تنش در خاک در انتهای بارگذاری در شبیه سازی در شکل ۵ آورده شده است.



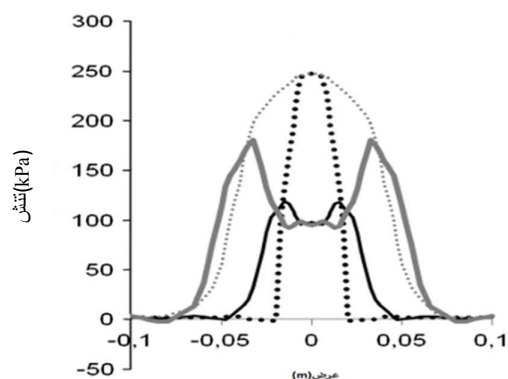
شکل ۵- توزیع تنش در خاک در انتهای مرحله ی بارگذاری

در اعمال بار محوری 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.



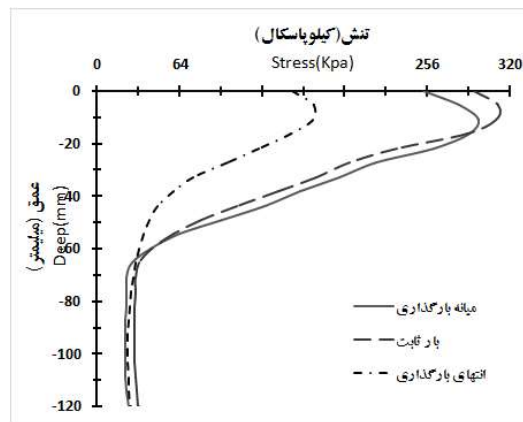
شکل ۶- نحوه توزیع تنش در عرض تحت تاثیر بار محوری

کلر و همکاران (۲۰۱۴) بررسی توزیع تنش در خاک تحت اثر بار محوری با استفاده از مدل‌های اجزاء محدود 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 بار محوری 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 در عرض از لحاظ الگوی توزیع تنش با گونزالز و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. شکل ۷ نمودار توزیع تنش تحت تاثیر بار و فشار باد لاستیک را نشان می‌دهد.

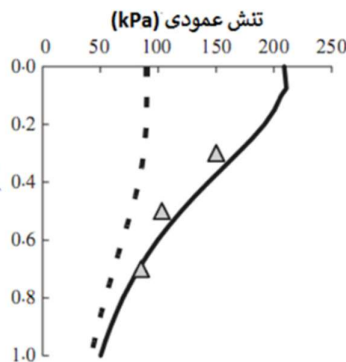


شکل ۲- پیش‌بینی توزیع تنش در عرض اقتباس از گونزالز و همکاران (۲۰۱۶).

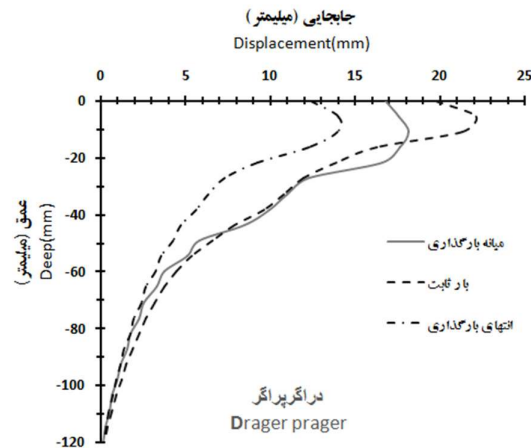
نکته دیگر در مورد اعمال بار محوری بر خاک، توزیع تنش در عمق است. در صورت دانستن مقدار تنش در نقاط مختلف خاک زیر عامل بارگذاری، میزان تراکم خاک قابل تخمین است. در تحقیق حاضر توزیع تنش در عمق با استفاده از مدل اجزاء محدود ارایه شده، استخراج گردید. نتایج حاصل در شکل ۸ قابل مشاهده است. با دانستن مقدار تنش 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 پیش‌بینی است. در بکارگیری ماشین‌ها و ادواتی که باعث اعمال بار فشاری به خاک می‌گردند باید دقت شود که تراکم ناشی از اعمال بار محوری فشاری از دامنه بکارگیری 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 ۸- توزیع تنش در عمق تحت تاثیر بار محوری حاصل از مدل اجزاء محدود



شکل ۹- توزیع تنش در عمق: تنش محوری اندازه‌گیری شده (مثلث)، تنش محاسبه شده طبق مدل سوهن (۱۹۵۳) خط سیاه توپر، تنش محاسبه شده طبق مدل آرویدسون و همکاران (۲۰۰۲) خط چین سیاه. اقتباس از کلر (۲۰۰۵).



شکل ۱۰- توزیع تنش در عمق تحت تاثیر بار محوری حاصل از مدل اجزاء محدود

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی عددی فشردگی خاک با نرم‌افزار ABAQUS و در نظر گرفتن ماهیت خاک به عنوان جسم الاستیک-پلاستیک و با معیار دراگر 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 تاثیرگذار بر تراکم خاک هستند. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشد:

آزمون نشست صفحه‌ای با تخمین خوب تنش پیش‌تراکمی، روش مناسبی برای بررسی رفتار خاک در اثر عبور و مرور ادوات و ماشین‌های کشاورزی است، همچنین تنش پیش‌تراکم به دست آمده از شبیه‌سازی نشست صفحه‌ای تقریباً نزدیک به مقدار به دست آمده از آزمون تجربی بود. مدل با ضریب تبیین ۹۹٪ تطبیق مناسبی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی داشت. نتایج شبیه‌سازی با مدل دراگر 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.

1. Alexandrou, A. and Earl, R., (1995) In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61,6.71-7.
2. Alexandrou A. and Earl R (2001). "Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: theoretical approach." *Journal of Terramechanics* 38:163-183..
3. 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, pp.146-152.
4. Earl, R. (1997). "Assessment of the behaviour of field soils during compression." *Journal of Agricultural Engineering Research* 68(2): 147-157.
5. Gregory, A., et al.(2006). "Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data." *Soil and Tillage Research* 89: 45-57.
6. Hemmat, A., Nankali, N., & Aghilinategh, N. (2010). "Simulating stress–sinkage under a plate sinkage test using a viscoelastic 2D axisymmetric finite element soil model." *Soil and Tillage Research*, 118, 107-116.
7. Jaberimoez, m., &jafari, a., &keyhani, a., &shorafa, m., (2017) Effect of freezing and thawing process on soil compaction. *Journal of Agricultural Mechanization* 4.1.
8. Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrío, 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, 104847
9. 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, 85-96.
10. Keller, T. &Arvidsson, J., (2006) Prevention of traffic-induced subsoil compaction in Sweden: Experiences from wheeling experiments: (Vermeidung von UnterbodenverdichtungendurchLandwirtschaftsmaschinen in Schweden: ErfahrungenausBefahrungsversuchen). *Archives of Agronomy and Soil Science* 52, 207-222.
11. Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B. &Koolen, A.J., (2004) Soil precompression stress. *Soil and Tillage Research* 77, 97-108.

12. Keller, T., Berli, M., Ruiz, S., Lamandé, M., Arvidsson, J., Schjønning, P. & Selvadurai, A.P.S., (2014) Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research* 140, 106-117.
13. Farhadi, P., Mohsenimanesh, A. & Alimardani, R., (2013) Evaluation of soil-tire interaction on a soil bin. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15, 37-42
14. M.Z. Tekeste, E.W. Tollner, R.L. Raper, T.R. Way and C.E. Johnson, 2009, *Non-linear finite element analysis of cone penetration in layered sandy loam soil – Considering precompression stress state*, *J. of Terramech.* 46; 229–239.
15. E. Susila and R.D. Hryciw, 2003, Large displacement FEM modeling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated soil, *Int J. Numer Anal Meth Geomech*, 27; 585–602.
16. M.D. Bolton, 1986, The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36(1); 65–78.
17. 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.
18. 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, 104307.
19. Rashidi M. Gholami M. Ranjbar I. and Abbassi S. (2010). "Finite Element Modeling of Soil Sinkage by Multiple Loadings". *American-Eurasian Journal Agricultural and Environmental Sciences* 8(3): 292-300.
20. Senatore, C. & Iagnemma, K., (2014) Analysis of stress distributions under lightweight wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* 51, 1-17.
21. Shahghol, G.H., Ghafouri Chiyaneh, H. and Mesri Gundoshmian, T. 2018, Modeling of Soil Compaction Beneath the Tractor Tire using Multilayer Perceptron Neural Networks, *Journal of Agricultural Machinery*, 8(1), 105-118.
22. Soehne, W., (1953) Distribution of pressure in the soil and soil deformation under tractor tires. *Grundl. Landtech* 5, 49-59.
23. 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.
24. Ucgul M, Saunders C, Fielke JM. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge. *Biosystems Engineering*. 2018 May 1;169:199-208.

25. 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.
26. Youssef, A.-F. A. and G. A. Ali (1982). "Determination of soil parameters using plate test." *Journal of terramechanics*, 19(2): 129-147.
27. 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

Simulation of field soil during plate subsidence test by Drager Prager yield criterion using finite element method

Mojtaba jaberi Moez^{1*}, Donya akbari²

1. Biosystems Engineering Department, Boali Sina University, Hamedan, Iran

2. Master of Biosystems Engineering

Abstract

Soil compaction is one of the main threats to the destruction of soil structure, which may even lead to soil decomposition. In order to prevent soil compaction, it is important to know the mechanical properties of soil in determining the allowable stress limits. Pre-compaction stress, as the maximum stress that the soil can withstand without increasing its compaction, is one of the most important mechanical characteristics of the soil. In this research, the experimental test of plate subsidence on a sample of arable soil (loamy sandy loam) at the level of moisture content of % d.b.15 with density kg. 1500 m⁻³ was performed and soil mechanical properties were determined. Then, the two-dimensional and symmetric plate-sided plate test was simulated by Dragerprager model in Abacus software and pre-compression stress was predicted by this method. Stress distribution and displacement in soil layers were also analyzed in depth. The results showed that the Drager-Prager model with an explanation coefficient of 99% was in good agreement with the data obtained from the experimental experiment. 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 and by moving to the lower layers the amount of stress and displacement decreased; Stress at the surface of each soil layer decreased with distance from the center of the loading plate.

Key words: Soil compaction, Pre-compaction stress, Stress distribution, Drager-Prager model, Plate subsidence

*Mojtaba Jaberi moez

E-mail: mjtbjaberi@gmail.com