

شبیه‌سازی و ارزیابی رفتار تراکمی خاک زراعی توسط مدل‌های موهر کولمب و دراگر پراگر

مریم بیگلری^{۱*}، مجتبی جابری معز^۲

۱. mbiglari661@gmail.com

۲. jaberimoeaz@yahoo.com

چکیده

تراکم خاک‌های زراعی در مصرف انرژی ادوات کشاورزی، رشد ریشه و در نتیجه عملکرد زراعی محصولات کشاورزی تأثیرگذار است. یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی تراکم‌پذیری خاک تنش پیش تراکمی است. هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار تراکمی یک خاک زراعی یا بافت شنی، رسی و لومی طی سه آزمون نشست صفحه‌ای، فشردگی محصور و نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم و شبیه‌سازی آنها با مدل‌های عددی موهر-کولمب و دراگر-پراگر به منظور ارزیابی توزیع تنش و جابه‌جایی در عمق خاک و پیش‌بینی تنش پیش تراکمی خاک بود. طی آزمون‌های تجربی، نمودار تنش-جابه‌جایی از آزمون‌های فشردگی خاک رسم شد و تنش پیش تراکمی به روش الکساندرو وازال از آزمون نشست صفحه‌ای تعیین شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل دراگر-پراگر با ضریب تبیین ۹۹ درصد و موهر کولمب با ضریب تبیین ۹۸ درصد مطابقت خوبی با داده‌های به دست آمده از آزمایش تجربی داشتند. بررسی توزیع تنش فشاری و جابه‌جایی در لایه‌های مختلف در عمق خاک در نشان داد که مقدار تنش و جابه‌جایی در لایه‌های نزدیک به سطح بارگذاری بیشتر و با حرکت به سمت لایه‌های پایین‌تر مقدار تنش و جابه‌جایی کاهش یافت؛ همچنین مقدار تنش در سطح هر لایه از خاک با فاصله گرفتن از مرکز صفحه بارگذاری کاهش یافت. به طوری که در آزمون نشست صفحه‌ای در عمق زیاد تقریباً مقدار تنش ثابت شده و صفر می‌شود در صورتی که در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور (توأم باهم) تنش در خاک ثابت شده و ماندگار بود.

کلمات کلیدی:

کلمات کلیدی: نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم، موهر کولمب، دراگر پراگر

*مریم بیگلری

شبیه‌سازی و ارزیابی رفتار تراکمی خاک زراعی توسط مدل‌های موهر کولمب و دراکر پراگر

مقدمه

خاک به عنوان یک منبع طبیعی نقش مؤثری در کشاورزی و تأمین غذای انسان‌ها دارد. تخریب فیزیکی خاک به دست انسان یک مشکل جهانی است. از جمله عوامل اصلی تخریب فیزیکی خاک شامل تراکم خاک، مانداب شدن و نشست خاک‌های آلی می‌باشند. تراکم خاک یکی از مسائل عمده در کشاورزی مدرن است که در اثر عبور ماشین‌های کشاورزی در بسیاری از نقاط جهان به عنوان یک مسئله جدی مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. نشست طبیعی خاک، آبیاری غرقابی در خاک با ساختمان ضعیف و تردد ماشین‌های سنگین کشاورزی در سطح مزرعه دلایل اصلی به وجود آمدن تراکم خاک می‌باشند [۲۱]. تراکم خاک در زمین‌های زراعی ممکن است باعث کاهش رشد محصولات شده و همچنین اثرات محیطی نامطلوبی مانند کاهش نفوذ آب خاک، افزایش روان آب در دوره زمانی بارندگی زیاد و نهایت فرسایش خاک به همراه داشته باشد [۱۰]. در تحقیقات کشاورزی، مفهوم تنش پیش تراکم در مورد فشردگی سریع خاک‌های غیراشباع کاربرد دارد؛ که تنش پیش تراکم به عنوان حداکثر تنشی که خاک می‌تواند تحمل کند بدون اینکه فشردگی آن افزایش یابد، تعریف می‌شود [۱۷]. این تنش به عنوان معیاری از مقاومت خاک جهت پایدار نگهداشتن ساختمان خاک در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. هدف اصلی از تعیین تنش پیش تراکم، تعیین ظرفیت باربری خاک یا تنش در آستانه تراکم است تا با محدود نمودن بارگذاری (در اثر تردد) به مقادیر کمتر تنش پیش تراکم، خطر تراکم (تغییر شکل ماندگار) به حداقل برسد [۱۷]. آزمون‌های اندازه‌گیری تنش پیش تراکم خاک شامل آزمون فشردگی ادومتر، آزمون فشردگی محصور، آزمون فشردگی نیمه محصور و آزمون نشست صفحه‌ای می‌باشد. برخی تحقیقات اخیر حاکی از آن است که حتی با اعمال تنش تا حدی کمتر از تنش پیش تراکم، تغییر شکل‌های ماندگار معنی‌داری در خاک به‌جامانده که بیانگر این حقیقت است که استفاده از تنش پیش تراکم به‌عنوان حد تسلیم چندان هم قابل اطمینان نیست [۱۱]. یکی از راهکارهای مؤثر در بررسی چنین مسائلی شبیه‌سازی اجزای محدود مسئله می‌باشد به‌نحوی که به توان عوامل مختلف مؤثر بر رفتار تنش کرنش در آزمون‌های تک محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه‌ای خاک را بررسی نمود. این امر مستلزم این است که بتوان از مدلی مناسب به‌منظور پیش‌بینی رفتار خاک جهت بررسی جنبه‌های مختلف آن و عوامل مؤثر استفاده کنیم. کیفیت عملیات خاک‌ورزی از دیدگاه مدیریت خاک و تولید محصول همیشه مورد توجه قرار گرفته است و تلاش شده است تا ابزارها به‌گونه‌ای طراحی شوند تا در اثر تقابل آنها با خاک تا حد امکان از تخریبی خاک و نیز اتلاف انرژی که خود شامل محدودیت‌های اقتصادی و زیست محیطی می‌باشد، پیشگیری شود [۱۸]. بهینه‌سازی ابزارهای خاک‌ورزی و اصلاح آنها، مستلزم انجام آزمون‌های فراوانی در شرایط واقعی می‌باشند که این امر مستلزم زمان و هزینه‌های زیادی است، لذا جهت جلوگیری از صرف هزینه و زمان، شبیه‌سازی‌های عددی جایگزینی مناسب برای فرآیند بهینه‌سازی است که با حذف آزمایش‌های مزرعه‌ای پرهزینه و کاهش زمان تحقیق مدل‌های مناسبی را ارائه می‌دهند [۱۵]. مزیت روش‌های مدل‌سازی نسبت به روش‌های عملی و آزمایشگاهی این است که در روش‌های مدل‌سازی خواص خاک در هر نقطه را با دقت بیشتری می‌توان تعیین نمود و نیز امکان بررسی تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر تغییر شکل و تنش‌های ایجاد شده وجود دارد، هم‌چنین در این روش‌ها می‌توان نیروهای وارده بر ابزار را در هر مرحله از عملیات بارگذاری پیش‌بینی کرد [۲۳]. در مطالعه‌ای توسط همت و همکاران (۲۰۱۱) رفتار تنش نشست خاک لومی رسی شبیه‌سازی شد. مدل‌سازی خاک در محیط نرم‌افزار انسیس و رفتار خاک ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که روش المان محدود می‌تواند برای شبیه‌سازی رفتار تنش نشست استفاده شود. نامجو و گل‌بخشی (۲۰۱۴) تماس بین تایلر خاک را با نرم‌افزار سالدورک به‌صورت المان محدود شبیه‌سازی کردند. هدف از شبیه‌سازی، بررسی تراکم ایجاد شده در اثر حرکت تایلر بر روی سطح خاک بود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل هاپیر الاستیک و تایلر با مدل مونو ریویلینگ و

همچنین از معیار تسلیم خاک دراکر-پراگر استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت که بیان‌گر قابلیت روش اجزای محدود در تحلیل تماس بین تایر و خاک است. در مطالعه‌ای توسط مردانی و همکاران (۲۰۱۶) برای تحلیل برهم‌کنش تایر محرک خاک از دو روش عددی و تجربی استفاده شد تا تأثیر سرعت پیشروی و بار دینامیکی تایر روی تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در روش عددی از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شد. رفتار خاک، الاستوپلاستیک و تایر هایپرااستیک کرنش محدود و الاستیک استفاده شد. آزمون‌های تجربی با استفاده از آزمونگر تک چرخ و انباره خاک انجام گرفتند. مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش حاکی از مطابقت خوب نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی و تجربی بوده است. در هر دو آزمون، با افزایش سرعت پیشروی تایر منجر به کاهش تنش عمودی خاک در ترکیب‌های مختلف بار دینامیکی و عمق گردید. در مطالعه‌ای توسط نادری بولداجی و همکاران (۲۰۱۸)، آزمون‌های فشاری تک محوری محصور، نیمه محصور و نشست صفحه‌ای خاک با روش اجزای محدود شبیه‌سازی شد مدل خاک در نرم‌افزار آباکوس به صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک (کشسان-خمیری) جهت بررسی منحنی‌های تنش-کرنش و تعیین نقطه‌ی بیشینه انحناء نسبت به تنش تسلیم تعریف شد. نتایج شبیه‌سازی سه آزمون نشان داد که در صورت افزایش دادن مدول الاستیسیته و نسبت پواسون خاک، تنش پیش تراکمی روش نقطه بیشینه انحناء افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش زاویه اصطکاک داخلی دراکر-پراگر و سرعت نفوذ پیستون تأثیر در مقدار تنش پیش تراکمی نقطه بیشینه انحناء ندارد. همچنین آزمون‌های آزمایشگاهی تک محوری محصور بر روی نمونه‌ای خاک جهت بررسی رفتار آن در رطوبت و چگالی‌های متفاوت انجام شد. نتایج شبیه‌سازی و تجربی در این آزمون جواب نزدیک به هم داشتند. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی خاک، بهتر است که هر یک از مدل‌های رفتاری خاک در مدل‌سازی خاک استفاده گردد و پس از مقایسه نتایج بهترین مدل ارائه شود تا بتواند تمام جنبه‌های مختلف رفتاری را بررسی و معادلات رفتاری دقیقی را با توجه به پیشرفت روش‌های حل به دست آورد؛ که از این مدل مناسب جهت شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور (توأم باهم) در خاک استفاده کرد. در مطالعه‌ای توسط رشیدی و همکاران (۲۰۱۰)، مدل نشست صفحه‌ای خاک از طریق روش اجزای محدود به صورت بارگذاری مکرر شبیه‌سازی شد. مدل خاک در نرم‌افزار فورتن به صورت ماده الاستوپلاستیک جریان همرا خطی تعریف شد. همچنین آزمون آزمایشگاهی نشست صفحه‌ای جهت مقایسه با مدل شبیه‌سازی شده انجام شود. نتایج آزمون آزمایشگاهی نشان داد که روش اجزای محدود می‌تواند رفتار نشست خاک تحت بارگذاری‌های مکرر را نسبتاً دقیق بیان کند. اهداف اصلی در این پژوهش، ۱- انجام آزمون آزمایشگاهی نشست صفحه‌ای بر روی نمونه خاک جهت بررسی رفتار آن و به دست آوردن تنش پیش تراکم، ۲- شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم خاک و تعریف آن به صورت ماده‌ای با رفتار الاستیک پلاستیک (کشسان خمیری) و ارزیابی آن با مدل‌های تحلیل گسیختگی دراکرپراگر و موهر کولمب جهت بررسی منحنی‌های تنش-کرنش بودند.

مواد و روش‌ها

روش تهیه نمونه خاک

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش، از عمق صفر تا ۲۰ cm خاک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان نمونه خاک تهیه شد. بافت خاک مورد مطالعه از نوع سندی کلی لوم با ۴۶/۸۲ درصد ماسه، ۲۷/۲۸ درصد سیلت و ۲۵/۸ درصد رس بود. به منظور محاسبه چگالی ظاهری خاک از مقداری از یک ظرف استوانه‌ای شکل با قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۱۲ cm استفاده شد که مقدار چگالی برابر با kg.m^{-3} ۱۵۰۰ به دست آمد. سپس 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. یک لایه نازک از خاک در سطح سینی پخش شد و با آب پاش دستی اسپری شد و با خاک کاملاً مخلوط گردید. سپس خاک مرطوب با افشان کردن آب به طور یکنواخت تهیه گردید [۸]. نمونه‌ها داخل پاکت‌های پلاستیکی قرار داده شدند و درب پاکت‌ها کاملاً بسته شد. نمونه‌ها در داخل چندلایه پلاستیک دیگر قرار داده شدند تا رطوبت نمونه‌ها حفظ شود. نمونه‌ها برای تعادل رطوبتی به مدت ۲۴ ساعت داخل پاکت‌های پلاستیکی می‌ماندند و سپس برای مراحل بعدی آماده می‌شدند [۷]. با داشتن چگالی و حجم نمونه خاک، وزن هر نمونه محاسبه گردید. سپس خاک مورد نیاز وزن شده و به سه قسمت مساوی تقسیم و هر قسمت به صورت یک لایه داخل ظرف آزمایش ریخته شد.

روش آزمایش‌های تجربی

آزمایش نشست صفحه‌ای

جهت انجام آزمایش نشست صفحه‌ای، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده از یک صفحه فلزی با قطر ۵۰ mm و ضخامت ۱۶ mm با دستگاه CBR با سرعت 1 mm.min^{-1} انجام شد [۸]. 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 ۲۰ mm به عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد.

آزمایش نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم

جهت انجام آزمایش نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم، بارگذاری بر سطح خاک با استفاده هم‌زمان از دو صفحه فلزی یکی با قطر ۵۰ mm و ضخامت ۱۶ mm و دیگری با قطر ۲۱۰ mm و ضخامت ۱۶ mm با دستگاه CBR با سرعت 1 mm.min^{-1} انجام شد. طی آزمایش نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم، صفحه‌های بارگذاری در مرکز ظرف استوانه‌ای نمونه خاک ابتدا صفحه با قطر ۵۰ mm و سپس صفحه با قطر ۲۱۰ mm 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 ۳۰ mm به عنوان 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 به دست آمدند.

تعیین تنش پیش-تراکمی خاک

تنش پیش تراکمی، 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 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 [۳].

شبیه‌سازی آزمایش نشست صفحه‌ای به روش اجزاء محدود

به منظور شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه‌ای از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۶.۱۴ استفاده شد. بدین منظور، خاک به صورت یک جسم تغییر شکل پذیر به صورت دو بعدی (یک مستطیل) و متقارن با ارتفاع ۱۲۰ mm و عرض ۱۰۵ mm (چون بارگذاری و شرایط مرزی متقارن

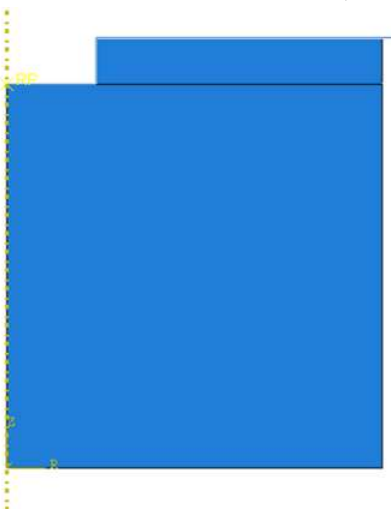
بودند به منظور ساده‌سازی نیمی از خاک مدل شد و سپس نتایج به کل هندسه خاک تعمیم داده شد، صفحه بارگذاری به صورت یک جسم صلب با عرض ۲۵ mm و ظرف حاوی خاک نیز به صورت جسم صلب به ارتفاع ۱۲۰ mm و عرض ۱۰۵ mm در نرم‌افزار آباکوس مدل شدند. شکل ۱ طرحواره آزمون نشست صفحه‌ای در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



اشکل: مدل هندسی آزمون نشست صفحه‌ای در نرم‌افزار آباکوس

شبیه‌سازی آزمایش نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم به روش اجزاء محدود

مدل هندسی آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم شامل سه قسمت مدل نمونه خاک، ظرف استوانه و صفحه بارگذاری توأم باهم بودند. خاک و ظرف حاوی خاک همانند آزمایش نشست صفحه‌ای در نرم‌افزار آباکوس مدل شدند. شکل ۲ طرحواره آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.



اشکل ۲: مدل هندسی آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم در نرم‌افزار آباکوس

خصوصیات خاک مورد مطالعه

به منظور حل مسئله نیاز است تا خواص خاک تعریف گردد. همچنین با توجه به این که صفحه بارگذاری و ظرف خاک به صورت صلب در نظر گرفته شده اند نیاز به تعریف خواص ندارند. پس یک نوع مصالح برای خاک تعریف شد. در این تحقیق جهت شبیه سازی آزمون نشست صفحه‌ای از مدل‌های موه‌ر کولمب و دراکر پراگر خطی به عنوان معیار گسیختگی خاک استفاده شد. تابع تسلیم موه‌ر کولمب و دراکر پراگر خطی به ترتیب در رابطه (۲) و (۳) آورده شده است [۱۲].

$$\tau = C + \sigma_n \tan \Phi \quad (۲)$$

$$F = t - p \tan(\beta) - d = 0 \quad (۳)$$

در رابطه (۲)، C چسبندگی، Φ زاویه اصطکاک داخلی، σ_n تنش قائم و τ مقاومت برشی هستند. در رابطه (۳)، 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-کولمب هستند. K نسبت تنش تسلیم در کشش سه محوری به تنش تسلیم در فشار سه محوری است که وابستگی سطح تسلیم را بر مقدار تنش اصلی میانه کنترل می‌کند. با داشتن زاویه اصطکاک داخلی خاک (Φ)، مقدار K را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود. مقادیر d و β از رابطه (۵) محاسبه می‌شوند [۲۳].

$$K = \frac{3 - \sin \Phi}{3 + \sin \Phi} \quad (۴)$$

$$\begin{cases} \tan \beta = \frac{6 \sin \Phi}{3 - \sin \Phi} \\ d = c \frac{6 \cos \Phi}{3 - \sin \Phi} \end{cases} \quad (۵)$$

ψ زاویه آماس نامیده می‌شود که جهت جریان پلاستیک بعد از گسیختگی را تعیین می‌کند. رابطه (۶)، ارتباط زاویه آماس با زاویه اصطکاک داخلی مدل موه‌ر-کولمب را نشان می‌دهد [۱۳]، [۱۶].

$$\Phi = \Phi_{cv} + \psi \quad (۶)$$

Φ_{cv} زاویه اصطکاک داخلی برای حالت ثابت حجم برای مواد دانه‌ای نرم است. مقدار آن برای مدل‌های اجزاء محدود بر اساس مشاهداتی که برای شن و سیلیکا دیده شد برابر با 33° در نظر گرفته شد [۱۶].

جدول ۱- خصوصیات خاک مورد آزمایش

| ψ | K | β | d | مدول الاستیسیته (kPa) | نسبت پواسن | زاویه اصطکاک داخلی (deg.) | چسبندگی (kPa) | چگالی (kg.m ⁻³) |
|--------|------|---------|-------|--------------------------|---------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|
| (deg.) | | (deg.) | (kPa) | | | | | |
| ۱۴ | ۰/۷۸ | ۳۶ | ۲۵/۱۴ | ۱۱۰ | ۰/۳ | ۱۹ | ۷/۱۹ | ۱۵۰۰ |

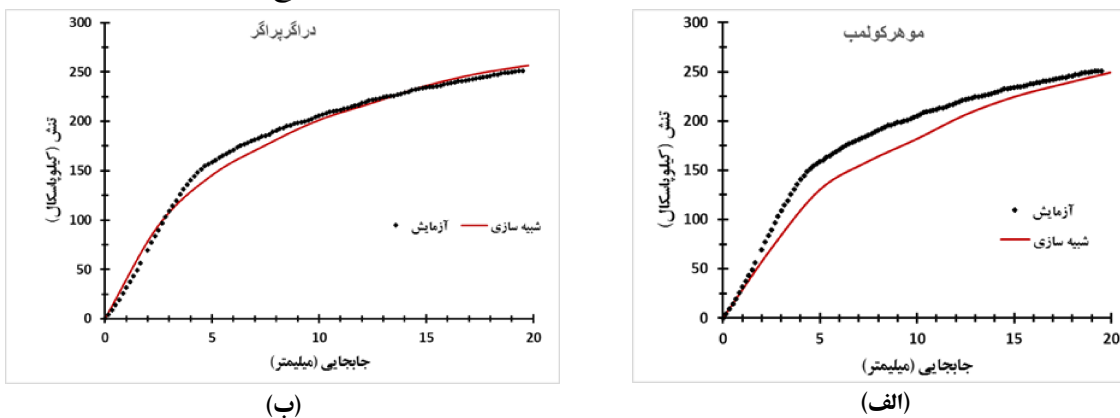
شرایط مرزی و مش بندی

برای حل مسئله بررسی فشردگی خاک طی آزمایش‌های نشست صفحه‌ای و نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم با هم از روش دینامیکی آباکوس / اکسپلیسیت استفاده شد. که تحلیل نمونه خاک در شبیه سازی را نشان می‌دهد. به منظور اعمال بار به خاک، صفحه

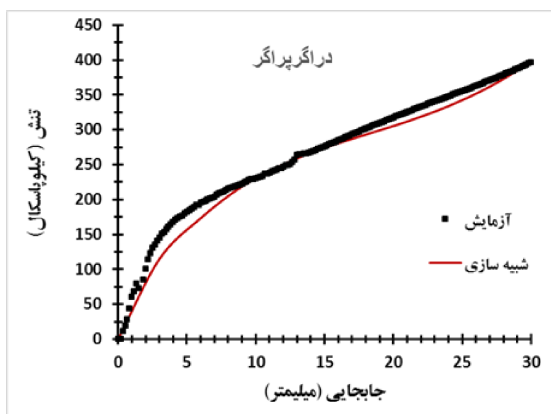
بارگذاری در آزمون نشست صفحه‌ای با سرعت ثابت 1 mm.min^{-1} در جهت محور y به مقدار 20 mm ، صفحه بارگذاری در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم با هم در جهت محور y به مقدار 30 mm به سمت پایین جابجا شدند. در هر دو آزمون، صفحه بارگذاری فقط می‌تواند در جهت محور y حرکت کند و در سایر جهات مقید شده بود و درجات آزادی ظرف حاوی خاک در تمامی جهت مقید شد و 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. 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 در آزمون نشست صفحه‌ای و ۱۰۲۲ المان برای آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم با هم استفاده شد.

نتایج و بحث

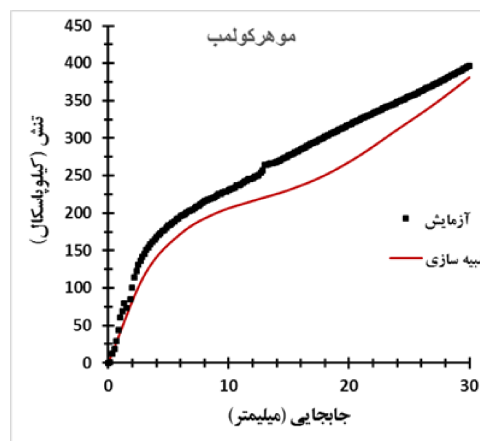
با توجه به نتایجی که از هر دو مدل رفتاری خاک در شبیه‌سازی هر دو آزمون نشست صفحه‌ای و نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم با هم به دست آمدند مدل رفتاری دراکر پراگر در مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار آباکوس نسبت به مدل موهر کولمب با ضریب تبیین ۹۹٪ تطبیق مناسبی با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی داشت. شکل ۴ و ۵ نمودارهای تنش-نشست خاک به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود هر دو آزمون را در مقابل نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج شکل ۳ و ۴ قابل مشاهده است، روش اجزاء محدود و معیار تسلیم دراکر پراگر به خوبی توانسته با دقت بالایی 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 به خوبی می‌توان جهت پیش‌بینی و بررسی رفتار تراکمی خاک استفاده کرد. نادری و همکاران (۲۰۱۸)، نیز طی شبیه‌سازی رفتار تراکمی خاک با مدل دراکر پراگر به نتایج مشابهی دست یافتند.



شکل ۳: مقایسه نتایج تنش-جابجایی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود در نشست صفحه‌ای: الف- با معیار تسلیم موهر کولمب و ب- با معیار تسلیم دراکر پراگر



(ب)

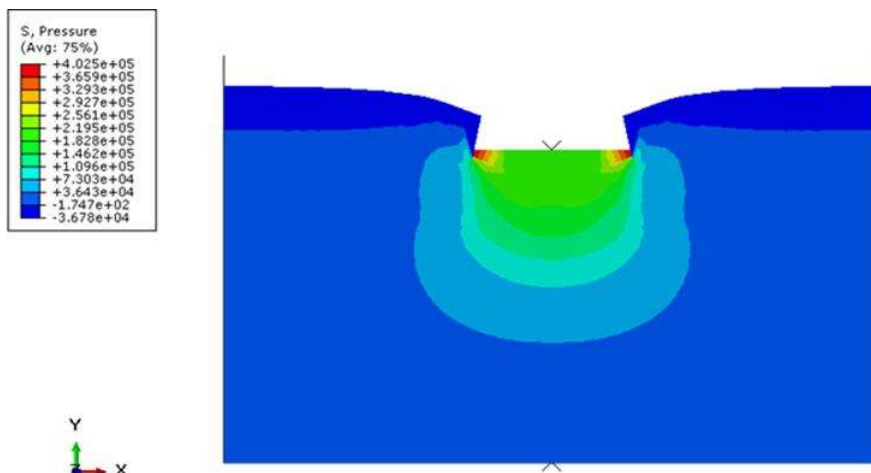


(الف)

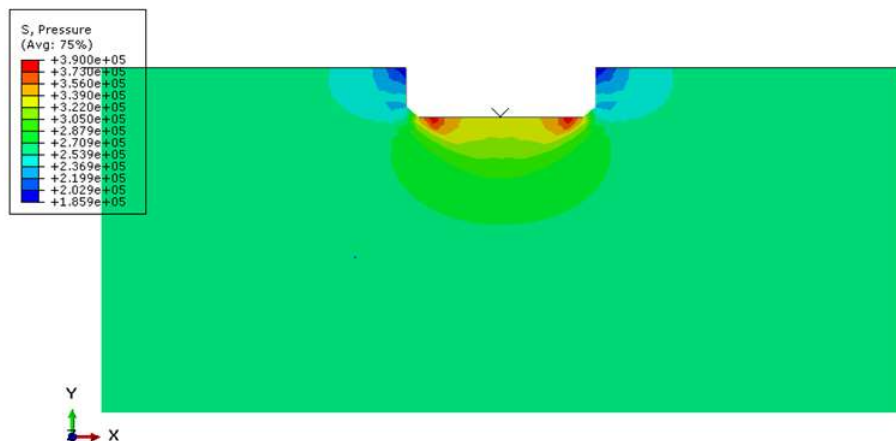
شکل ۴: مقایسه نتایج تنش-جابجایی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود در نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم: الف- با معیار تسلیم موهر کولمب و ب- با معیار تسلیم دراگر پراگر

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. در تحقیق حاضر توزیع تنش در عمق با استفاده از مدل اجزاء محدود ارائه شده، استخراج گردید. نتایج حاصل از هر دو آزمون نشست صفحه‌ای و نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم در شکل ۵ قابل مشاهده است.



(الف)

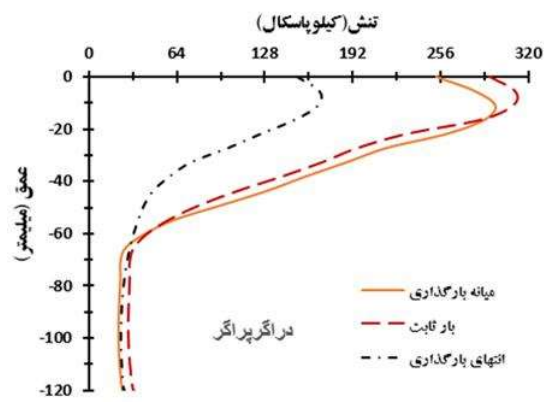


(ب)

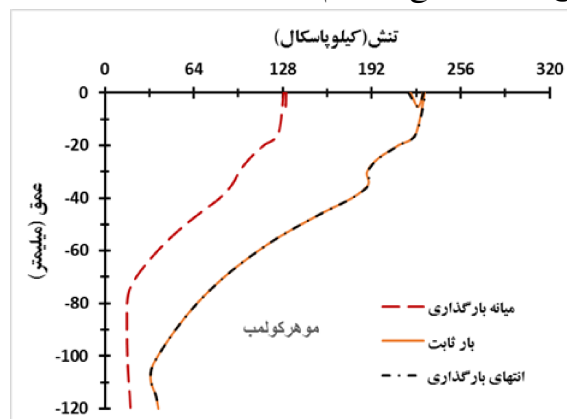
شکل ۵: توزیع تنش در خاک انتهای مرحله‌ی بارگذاری: الف- آزمون نشست صفحه‌ای و ب- آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم

با مقایسه نتایج توزیع تنش فشاری در لایه‌های خاک در هر دو آزمون در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در آزمون نشست صفحه‌ای تنش در زیر صفحه بارگذاری و اطراف آن بوده و در کناره‌های خاک تنش تقریباً صفر می‌باشد ولی در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم تنش در تمام لایه‌های خاک وجود دارد و کل سطح خاک را در بر گرفته که این تفاوت در توزیع تنش در هر دو آزمون را می‌توان چنین بیان کرد که در آزمون نشست صفحه‌ای ذرات خاک در کناره‌ها می‌توانند آزادانه حرکت کنند ولی در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم به علت این که خاک در این آزمون محصور است و ذرات خاک اجازه جابه‌جایی ندارند و تنش ناشی از بار اعمالی به ذرات خاک آزاد نمی‌شود و در خاک باقی‌مانده تراکم تمام لایه‌های خاک را در بر می‌گیرد.

تعیین مقدار دقیق تنش ناشی از وزن خاک و سربار یکی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. تنش عبارت است از عکس‌العمل ذاتی و درونی یک جسم در مقابل نیروی وارده بر واحد سطح آن جسم. به عبارت دیگر اگر بر واحد سطح جسمی نیروی وارد شود در داخل جسم نیرویی معادل نیروی وارد شده اما در جهت مخالف، تولید می‌شود که به این نیروی ایجاد شده در واحد سطح، تنش گفته می‌شود. [۱]. نتایج حاصل از توزیع تنش قائم خاک با استفاده از مدل‌های دراگرپراگر و موهر کولمب به شرح زیر می‌باشد:

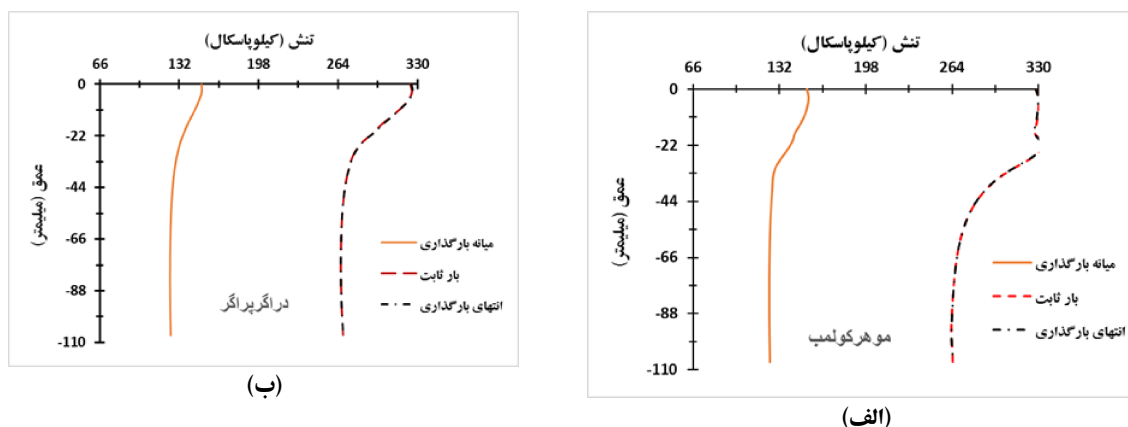


(ب)



(الف)

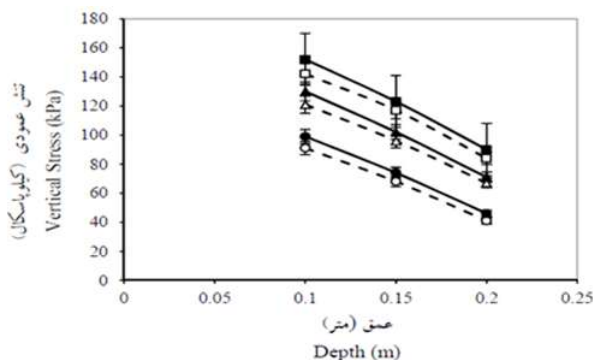
شکل ۶: توزیع تنش در عمق تحت تأثیر بار محوری حاصل از مدل اجزاء محدود در آزمایش نشست صفحه‌ای: الف- با معیار تسلیم موهر کولمب و ب- با معیار تسلیم دراگرپراگر



شکل ۷: توزیع تنش در عمق تحت تأثیر بار محوری حاصل از مدل اجزاء محدود در آزمایش نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم: الف- با معیار تسلیم موهر کولمب و ب- با معیار تسلیم دراگرپراگر

نمودارهای رسم شده در شکل‌های ۶ و ۷ توزیع تنش قائم در خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود هر چه از محل مقدار بار محوری وارد شده دورتر می‌شویم توزیع تنش قائم در سطح خاک کاهش می‌یابد و کشیدگی نمودار روی محور افقی مختصات تنش کاهش یافته و به محور عمودی مختصات نزدیک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با وارد شدن بار محوری در خاک تنش افزایش یافته ولی با افزایش عمق تنش در خاک کاهش یافته است. حیبی بردبری و همکاران (۱۳۹۷) نیز به این نتیجه دست یافتند که با قرار گرفتن سربار بر روی خاک به مقدار تنش موجود در خاک افزوده می‌شود و هر چه در جهت افقی و قائم از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می‌شود که از تأثیر سربار کم می‌شود. نتایج این تحقیق در زمینه توزیع تنش در عمق با نتایجی که توسط مردانی و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیق تحلیل اجزاء محدود برهم کنش چرخ محرک-خاک که برای برآورد توزیع تنش عمودی خاک انجام شده بود در مقایسه تغییرات تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف در آزمون‌های عددی و تجربی که در شکل (۸) آورده شده است هم‌خوانی دارد. بررسی تغییرات تنش عمودی خاک در عمق‌های مختلف نشان داد که در هر دو آزمون عددی و تجربی در ترکیب‌های مختلف بار عمودی و سرعت پیشروی، با افزایش عمق، تنش عمودی خاک با پیروی از یک الگوی توانی کاهش یافته است. با افزایش عمق خاک بار وارده از سوی تیر بر سطح خاک منتشر می‌شود. انتشار حباب‌وار سبب کاهش تنش وارده بر لایه‌های زیرین خاک می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد کاهش تنش در عمق‌های زیرین خاک در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم اتفاق نیفتاده است و تنش باقی‌مانده است. در نتایجی که از نمودار توزیع تنش در عمق از آزمون نشست صفحه‌ای حاصل شد مشخص گردید کاهش تنش تا لایه‌های زیرین خاک اتفاق افتاده و تقریباً به صفر رسیده است. که این اختلاف تنش را می‌توان این‌گونه بیان کرد که هر چه از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می‌شود تنش در آزمایش نشست صفحه‌ای کم شده به دلیل این که سطح بارگذاری کم‌تر بوده و کناره‌های سطح خاک آزاد بوده و ذرات اجازه جابه‌جایی داشتند ولی در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم به دلیل این که سطح بارگذاری بزرگ بوده و تمام سطح خاک را در بر گرفته و خاک محصور شده در نتیجه ذرات در خاک اجازه جابه‌جایی نداشته و مقدار تنش در خاک نسبت به آزمون نشست صفحه‌ای در

لایه‌های زیرین بیش تر بوده و در خاک باقی مانده 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 به‌کارگیری ماشین‌ها و ادواتی که باعث اعمال بار فشاری به خاک می‌گردند باید دقت شود که تراکم ناشی از اعمال بار محوری 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.

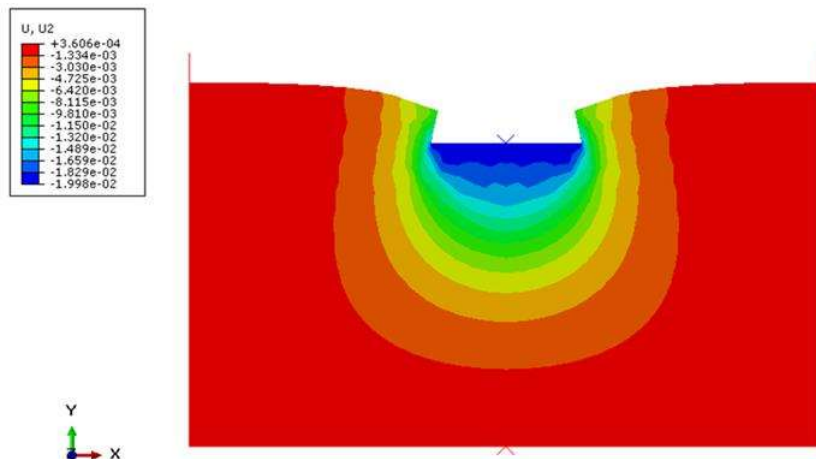


شکل ۸: نمودار تغییرات تنش عمودی خاک نسبت به عمق در بارهای دینامیکی مختلف و سرعت پیشروی ۰/۴ متر بر ثانیه در آزمون‌های تجربی (خط

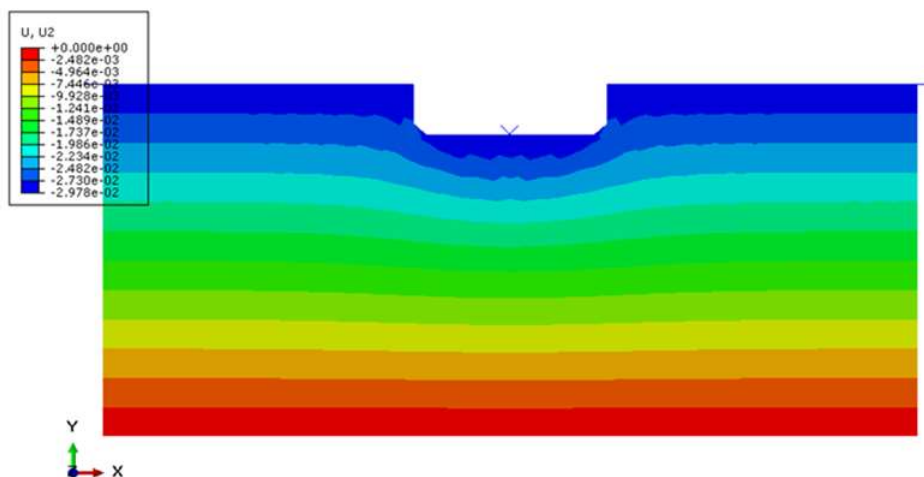
پررنگ) و عددی (خط‌چین) [۱۵].

جابه‌جایی صفحه بارگذاری در خاک

در شکل (۹) تغییر شکل در لایه‌های خاک در انتهای بارگذاری از مدل درآگرپراگر از نرم‌افزار آباکوس آورده شده است.



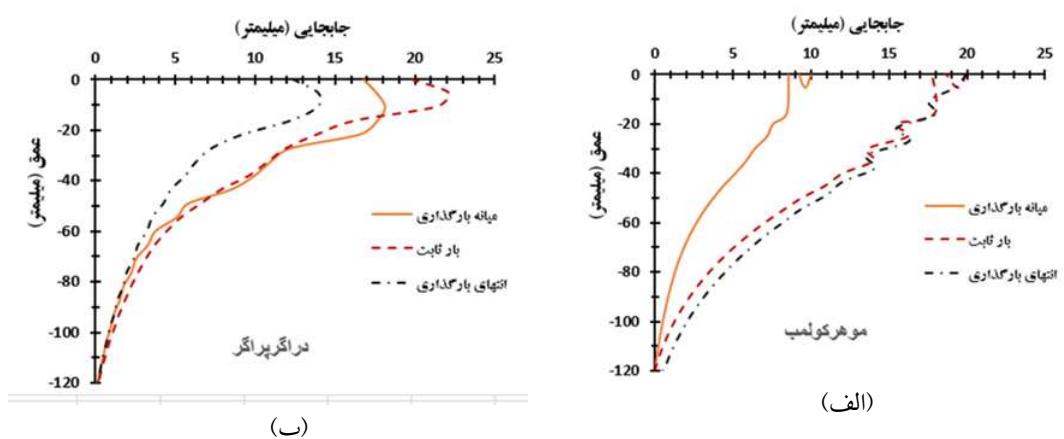
(الف)



(ب)

شکل ۹: نمایش تغییر شکل لایه‌های خاک در جهت قائم در آزمون: الف- نشست صفحه‌ای و ب- نشست صفحه‌ای فشرده‌گی محصور توأم باهم

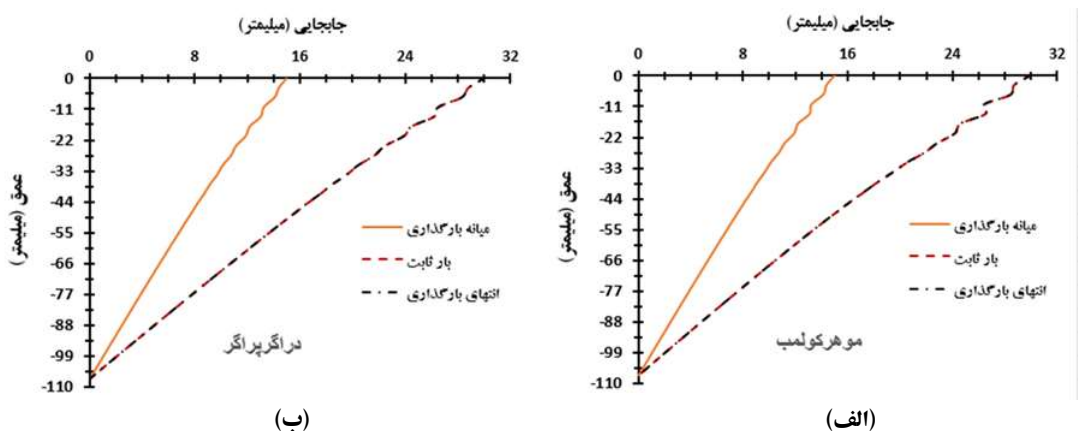
با حرکت صفحه‌ای بارگذاری در راستای قائم، خاک در اثر نیروی وارد شده از طرف صفحه، در جهت عمودی جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی از تغییر شکل‌های پلاستیک و الاستیک تشکیل یافته است. که بعد از باربرداری از روی خاک قسمت الاستیک جابه‌جایی عمودی ذرات خاک برگشته و تنها جابه‌جایی پلاستیک باقی می‌ماند. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) جابه‌جایی خاک در عمق را نشان می‌دهد.



(الف)

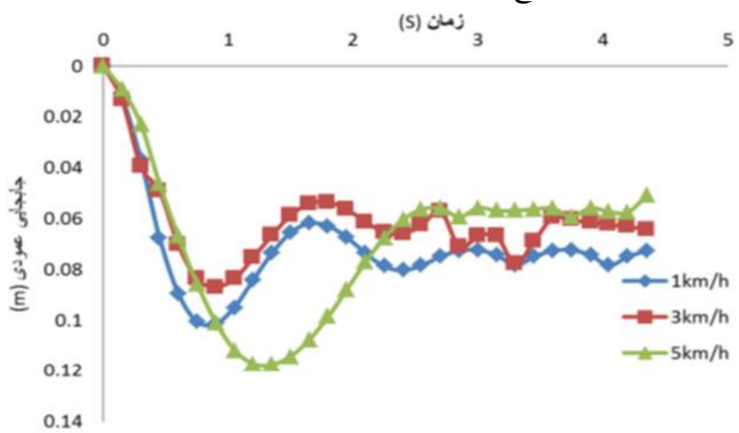
(ب)

شکل ۱۰: جابه‌جایی لایه‌های خاک در عمق در آزمون نشست صفحه‌ای: الف- با معیار موهر کولمب و ب- با معیار دراگر پراگر



شکل ۱۱: جابه‌جایی لایه‌های خاک در عمق در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم: الف- با معیار موهر کولمب و ب- با معیار دراگرپراگر

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، در آزمون نشست صفحه‌ای با فاصله گرفتن از سطح مرکز اعمال بار محوری 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 سجاد سربازوطن (۱۳۹۲) در تحقیق اندازه‌گیری تراکم خاک زیر تایلر تراکتور با استفاده از روش المان محدود با مدل اصلاح‌شده دراگرپراگر در نرم‌افزار آباکوس که در شکل (۱۲) آورده شده است هم‌خوانی دارد که به این نتیجه دست یافتند که با افزایش عمق تأثیر نیروی تایلر بر تراکم خاک کاهش می‌یابد. ولی با توجه به این که تحقیقی در زمینه‌ی شبیه‌سازی و بررسی رفتار خاک در زیر سطح بارگذاری نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم باهم صورت نگرفته بود نتایج این شبیه‌سازی و نمودار حاصل از آن می‌تواند گویای این باشد که سطح خاک مورد آزمایش به دلیل محصور بودن در زیر سطح بارگذاری فشردگی محصور تماماً وارد فاز پلاستیک شده و تراکم کل سطح خاک را در این آزمایش در بر گرفته است. ولی با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون نشست صفحه‌ای مشاهده شد که تراکم ایجاد شده در خاک در زیر سطح بارگذاری و اطراف محل بارگذاری بود و قسمت‌هایی که از سطح بارگذاری فاصله داشتند وارد فاز پلاستیک نشدند.



شکل ۱۲: جابه‌جایی ذرات خاک در عمق [۲].

نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی رفتار خاک طی عملیات فشردگی و ارزیابی آن با مدل‌های تحلیل گسیختگی به روش اجزاء محدود در سطح رطوبتی ۱۵ درصد بود. که مشخص گردید مدل دراگرپراگر در مقایسه با مدل موهر کولمب مطابقت بهتری با آزمایش تجربی دارد. در تحقیق حاضر نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- نتایج نشان دادند که روش المان محدود قابلیت مدل‌سازی با ۹۹٪ اطمینان در این تحقیق توانست نتایج مشابه نتیجه‌ی به‌دست آمده از روش آزمایشگاهی ارائه دهد.
- ۲- با افزایش بارگذاری روی خاک میزان تنش و نشست خاک افزایش یافته و توزیع تنش عمق بیش تری از خاک را در برمی‌گیرد. بنابراین وزن تراکتور و ماشین‌های کشاورزی عامل مهمی در تراکم می‌باشند.
- ۳- نتایج توزیع تنش فشاری و جابجایی در لایه‌های مختلف خاک در عمق نشان داد که مقدار تنش و جابجایی در لایه‌های نزدیک به سطح بارگذاری بیشتر و با حرکت به سمت لایه‌های پایین تر مقدار تنش و جابجایی کاهش می‌یابد.
- ۴- در آزمون فشردگی محصور و نشست صفحه‌ای توأم با هم نتایج نشان داد با افزایش عمق تنش در خاک کاهش یافته هرچه در جهت قائم از محل اثر بار فاصله گرفته شود مشاهده می‌شود تنش کم شده و ثابت شده ولی این کاهش تنش در عمق‌های زیرین خاک اتفاق نیفتاده است و تنش باقی‌مانده است.
- ۵- جابه‌جایی ذرات خاک در عمق در آزمون نشست صفحه‌ای و فشردگی محصور توأم با هم تابعی از جابه‌جایی صفحه بارگذاری می‌باشد.
- ۶- در صورت بکارگیری مدلی مناسب برای شبیه‌سازی رفتار متقابل خاک و اعمال کننده بار به خاک، روش المان محدود می‌تواند با کمترین هزینه، جواب‌های قابل قبولی را ارائه دهد.

مراجع:

۱. حبیبی، ب.، زمانی لنگانی، م.، پرویزی، م. ۱۳۹۷. بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای توزیع تنش قائم تحت بارگذاری‌های مختلف واقع در سطح و عمق خاک، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، دانشگاه تهران.
۲. سربازوطن، سجاد. ۱۳۹۲. اندازه‌گیری تراکم خاک زیر تایلر تراکتور با استفاده از روش المان محدود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده‌ی فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

3. 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.Hao, X.Z., Zhou, D.M., Li, D.D., and Jiang. P. 2012. Growth, Cadmium and Zinc accumulation of ornamental Sunflower (*Helianthus annuus L.*) in contaminated soil with different amendments. *Pedosphere*, 22(5): 631-639.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Hemmat, A., Nankali, N., and 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.
8. Jaberimoez, m., and jafari, a., and keyhani, a., and shorafa, m. 2017. Effect of freezing and thawing process on soil compaction, *Journal of Agricultural Mechanization* 4.1.
9. Jimenez, K. J., Rolim, M. M., Gomes, I. F., de Lima, R. P., Berrío, L. L. A., and 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: 104-847.
10. Keller, T., and Arvidsson, J. 2004. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, 77(1): 85-95.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions, *Soil and Tillage Research* 82(2): 121-145.
15. Mardani, A., Dibagar, N., Modaresmotlagh, A. 2016. Finite element analysis of drive-soil wheel interaction to estimate vertical soil stress distribution, *Agricultural Engineering*, 39: 113-125.
16. M.D., Bolton. 1986. The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36(1): 65–78.
17. 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.
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: 104-307.



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. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

Simulation and Behavior of Crop Soil Compaction Behavior by Mohr-Coulomb and Drucker Prager Models

Maryam biglari^{1*}, Mojtaba jabermoeaz²

1. Biosystems Engineering Department, Bu-Ali sina University, Hamedan, Iran
2. Biosystems Engineering Department, Bu-Ali sina University, Hamedan, Iran

Abstract

Density of arable soils is effective in energy consumption of agricultural implements, root growth and consequently crop yield of agricultural products. One of the most important criteria for assessing soil compaction is pre-compaction stress. The purpose of this study was to investigate the compaction behavior of arable soil or sandy, loamy and loamy soil during three tests of plate subsidence, confined compaction and combined subsidence and compactness and simulated them with Mohr-Coulomb and Drucker-Prager numerical models. Evaluation of stress distribution and displacement in soil depth and prediction of soil pre-compaction stress. During the experimental tests, the stress-displacement diagram of the soil compaction tests was drawn and the pre-compression stress was determined by the Alexandro Varal method from the plate subsidence test. The results showed that both Drucker-Prager models with an explanation coefficient of 99% and Mohr-Coulomb with an explanation coefficient of 98% were 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; Also, the amount of stress on the surface of each layer of soil decreased with distance from the center of the loading plate. Thus, in the plate subsidence test at a great depth, the amount of stress is almost fixed and becomes zero, while in the plate subsidence test and the compacted compaction (together) the stress in the soil was fixed and permanent.

Key words: Test Simultaneous pst and cct, Mohr-Coulomb, Drucker prager

*Corresponding author

E-mail: mbiglari661@gmail.com