

شبیه‌سازی رفتار تراکم خاک و تخمین تنش پیش تراکم در آزمون‌های نشست صفحه و تراکم محصور با استفاده از روش اجزا گسسته

مصطفی بهرامی^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، داود قنبریان^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ mostafa.bahrami.2@gmail.com

۲. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ naderi.mojtaba@sku.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ ghanbarian-d@sku.ac.ir

چکیده

آزمون‌های نشست صفحه (PST) و تراکم محصور (CCT) دو آزمون متداول در مکانیک خاک برای ارزیابی رفتار تراکم خاک و تخمین تنش پیش تراکم می‌باشند. در صورتی که تنش وارد شده بر خاک بیش از تنش پیش تراکم باشد خاک دچار تغییر حجم ماندگار می‌شود. در این مطالعه رفتار و فازهای تراکم خاک در آزمون‌های نشست صفحه (PST) و تراکم محصور (CCT) با استفاده از روش اجزا گسسته (DEM) شبیه‌سازی و نتایج با نظریه‌های تجربی ارائه شده مقایسه شد. در مرحله بعد اثر پارامترهای اجزای گسسته بر استحکام توده ذرات برحسب تنش پیش تراکم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جز در نقاط با انرژی چسبندگی بالا، تنش پیش تراکم در آزمون CCT بالاتر از PST است. افزایش ضریب اصطکاک، مدول برشی و انرژی چسبندگی تأثیر افزایشی بر تنش پیش تراکم در PST داشت. افزایش انرژی چسبندگی و استحکام تسلیم اثر کاهشی و افزایشی بر تنش پیش تراکم در CCT داشت. همچنین مشخص شد که تغییر و ارتباط در تنش پیش تراکم تحت اثر پیش بارهای معین بین CCT و PST تحت تأثیر پارامترهای DEM از توابع یکسانی تبعیت نمی‌کند.

کلمات کلیدی: نشست صفحه؛ تراکم محصور؛ اجزا گسسته؛ تنش پیش تراکم.

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



شبیه‌سازی رفتار تراکم خاک و تخمین تنش پیش تراکم در آزمون‌های نشست صفحه و تراکم محصور با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزا گسسته

مقدمه

برای تدوین یک نظریه جامع از رفتار تراکم خاک، بیکر [۱] برای ارزیابی رفتار تنش-نشست خاک تحت تردد وسایل نقلیه، آزمایش نشست صفحه (PST) را پیشنهاد کرد. در PST، صفحات دایره‌ای یا بیضی شکل تا عمق معین در خاک نفوذ داده می‌شود و رابطه تنش-نشست خاک در ارتباط با توسعه رد اثر چرخ و مقاومت غلته‌شی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. علاوه بر این، PST به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک آزمون میدانی برای ارزیابی ویژگی‌های تراکم خاک به عنوان مثال ظرفیت باربری خاک برحسب تنش پیش تراکم استفاده می‌شود [۲-۳-۴].

آزمون تراکم محصور (CCT) روش دیگری برای ارزیابی آزمایشگاهی رفتار تراکم خاک بر روی نمونه‌های خاک گرفته‌شده از مزرعه است. CCT معمولاً بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌شود که تحت بارگذاری گام به گام یا پیوسته قرار می‌گیرند. رفتار تراکم به صورت ترسیمی توسط یک متغیر حجم خاک (به عنوان مثال کرنش، چگالی ظاهری یا نسبت پوکی) در مقابل لگاریتم تنش نشان داده می‌شود. اگرچه در CCT کرنش جانبی خاک در حین آزمون را که احتمالاً در شرایط واقعی رخ می‌دهد، امکان‌پذیر نیست، از این روش به دلیل سهولت و سادگی آن برای ارزیابی رفتار تراکم خاک به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۵-۶-۷].

همت و همکاران [۸] شبیه‌سازی PST نمونه‌های خاک با اختلاط سطوح مختلف کود را با روش اجزای محدود (FEM) انجام دادند و در نتیجه تنش پیش تراکمی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد. نادری بلداجی و همکاران [۹]، PST و CCT را با استفاده از FEM شبیه‌سازی کردند و تنش پیش تراکم (σ_{pc}) را از نمودار تنش-نشست شبیه‌سازی (برای PST) یا تنش-کرنش (برای CCT) برای خاک‌هایی با استحکام‌های تسلیم متفاوت شبیه‌سازی و تحلیل کردند. نتایج نشان داد σ_{pc} که از نقطه حداکثر انحناء برآورد شده بود، به‌خوبی با تنش تسلیم شبیه‌سازی شده برای CCT توافق داشت اما تنش تسلیم برای PST را کمی کمتر پیش‌بینی کرد.

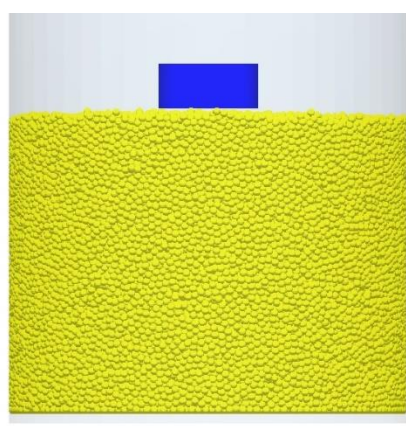
DEM یک روش عددی قدرتمند است که برای اولین بار توسط کاندال و استروک [۱۰] برای تحلیل مکانیک سنگ مورد استفاده قرار گرفت. DEM اکنون روشی مفید برای مدل‌سازی مجموعه‌ای از مواد دانه‌ای است و در کاربردهای علمی و صنعتی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. به عنوان مثال، DEM در مطالعات بی‌شماری از برهمکنش خاک با ابزارهای خاک‌ورزی استفاده شده است [۱۲-۱۳-۱۴-۱۵]. با توجه به رضایت‌بخش بودن نتایج استفاده از DEM برای آزمون‌های مربوط به خاک، در این مطالعه از این روش با هدف بررسی رفتار تراکم خاک تحت آزمون‌های PST و CCT در مقایسه با مدل‌های ارائه شده توسط ارل [۱۶] و همچنین اثر میکرو پارامترهای اجزای گسسته در پیش‌بینی تنش پیش تراکم و مقایسه آن در دو آزمون PST و CCT مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی DEM

DEM روشی مبتنی بر فیزیک برخورد است که در آن حرکت ذرات با حل معادله نیوتن برای ذرات منفرد مشخص می‌شود و همچنین نیروی برخورد عمودی و مماسی با کمک فنر و دمپرهایی که بین ذرات تعبیه شده است محاسبه می‌شود (شکل ۱). در یک تماس کاملاً الاستیک (فنر خطی)، انرژی کرنش جذب شده در بارگذاری به‌طور کامل در حین باربرداری آزاد می‌شود. در حالی که در یک تماس الاستیک-پلاستیک (فنر هیسترتیک) ارائه شده توسط والتون و براون [۱۷]، انرژی کرنش تا یک تنش از پیش تعریف شده به‌طور کامل بازیابی می‌شود در صورتی که تنش بین این ذرات از این حد از تنش تجاوز نماید، ذرات تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرند.

شبه‌سازی مدل‌های DEM برای آزمون‌های PST و CCT در نرم‌افزار EDEM 2017، DEM Solutions Company، انجام شد. برای کاهش زمان محاسباتی شبه‌سازی‌ها، از یک رایانه ۲۸ هسته‌ای با حافظه RAM ۱۴۰ گیگابایتی استفاده شد. برای شبه‌سازی PST از یک سیلندر به قطر ۳۰۰ میلی‌متر که تا ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متری با ذرات به قطر ۷ میلی‌متر پر شده بود استفاده شد. قطر پیستون هم ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این شبه‌سازی برای CCT شامل یک سیلندر به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر با پیستونی هم قطر سیلندر بود (شکل ۱). میزان نشست صفحه در حال بارگذاری ۲۰ میلی‌متر برای PST و ۱۰ میلی‌متر برای CCT بود. به منظور تثبیت آرایش اولیه ذرات برای شبه‌سازی با پارامترهای ورودی متفاوت، ذرات با مقادیر اولیه پارامترها که برای خاک لومی شنی توسط اوجگل و همکاران [۱۸] استفاده شده بود، ایجاد شدند (جدول ۱). برای مطالعه اثر یک پارامتر درحالی‌که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند در سطوح مختلف تغییر داده می‌شد (مقادیر اولیه، جدول ۱).



PST



CCT

شکل ۱. مدل‌های اجزا گسسته PST و CCT.

جدول ۱. مقادیر اولیه پارامترهای DEM مورد استفاده در شبه‌سازی‌ها [۱۸]

Property	Value
Particle density (kg m^{-3})	2600
Density of steel (kg m^{-3})	7861
Shear modulus of soil particle (kPa)	5×10^4
Shear modulus of steel (kPa)	7.9×10^7
Poisson's ratio of soil particle	0.3
Poisson's ratio of steel	0.3
Yield strength of the soil particle (kPa)	1×10^3
Coefficient of restitution of soil-soil	0.6
Coefficient of sliding friction of soil-soil	0.5
Coefficient of sliding friction of soil-steel	0.5
Coefficient of rolling friction of soil-soil	0.05
Coefficient of rolling friction of soil-steel	0.05
Cohesive energy density of soil-soil (kJ m^{-3})	10

محاسبه تنش پیش تراکم

تنش پیش تراکم (σ_{pc}) یک عامل برای ارزیابی پایداری مکانیکی / مقاومت خاک تحت بار خارجی است. تنش پیش تراکم اغلب به عنوان معیاری برای حساسیت خاک به تراکم استفاده می‌شود. اگر تنش اعمالی به خاک کوچکتر از تنش پیش تراکم باشد، تغییر شکل ماندگار در خاک رخ نمی‌دهد و انتظار می‌رود که بازیابی تراکم پس از حذف تنش رخ دهد (تغییر شکل الاستیک). این فرضیه وجود داشت که استحکام مکانیکی اولیه (بدون اعمال پیش بار) ذرات با پارامترهای ورودی DEM تغییر می‌کند. با توجه به این مسئله، خاک شبیه‌سازی شده توسط آزمون‌های PST و CCT برای تخمین تنش پیش تراکم و تغییر آن با تغییر پارامترهای مدل مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج گریگوری و همکاران [۱۹]، تنش در نقطه حداکثر انحنای نمودار لگاریتم تنش - نشست به عنوان تنش پیش تراکم برآورد شد [۲۰]. تابع سیگموئید گومپرتز [۲۱] بر داده‌های لگاریتم تنش - نسبت تخلخل آزمون CCT (شکل ۴) برازش شد. نسبت تخلخل (e) برای توده ذرات از رابطه (۱) به دست آمد:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\pi r^2(H-d) - V_s}{V_s} \quad (1)$$

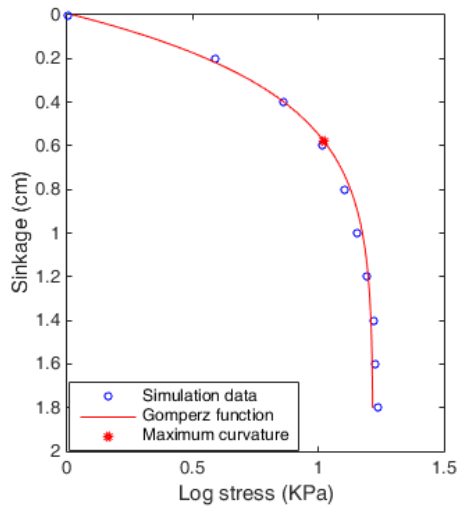
که در آن V_v حجم فضاهای خالی، V_s حجم مواد جامد، r شعاع سیلندر، H ارتفاع اولیه توده ذرات و d جابجایی صفحه بارگذاری است. کد MATLAB جهت برازش تابع گومپرتز (معادله ۲) بر منحنی با روش حداقل مربعات نوشته شد:

$$e = a + c \exp\{-\exp[b(\log \sigma - m)]\} \quad (2)$$

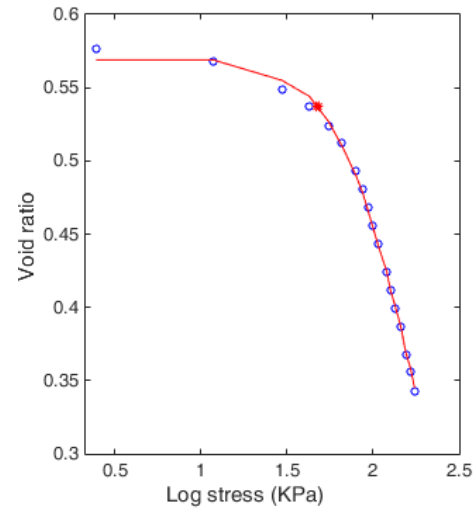
که در آن، a ، b ، c و m پارامترهای تابع، e نسبت تخلخل و $\log \sigma$ ، لگاریتم تنش بر پایه ۱۰ است. انحنای تابع به کمک رابطه (۳) به دست آمد:

$$k = \frac{\frac{d^2 e}{d(\log \sigma)^2}}{\left[1 + \left(\frac{de}{d(\log \sigma)}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3)$$

تنش متناظر با نقطه حداکثر انحنای تنش پیش تراکم را مشخص می‌کند (شکل ۲-الف). برای PST، تابع گومپرتز با جایگزین کردن نسبت تخلخل توسط میزان نشست (سانتی‌متر) اصلاح شد و همین روش پیاده‌سازی شد (شکل ۲-ب).



(ب)



(الف)

شکل ۲. برازش تابع گومپرتز برای برآورد تنش پیش تراکم در (الف) CCT و (ب) PST

برای آزمودن ارتباط σ_{pc} تخمین زده شده از CCT و PST زمانی که توده ذرات (در همان پارامترهای ورودی DEM) در برابر سطوحی از پیش بار قرار می گیرند هم شبیه سازی های بیشتری انجام شد. فرض شد که برای CCT و PST برای σ_{pc} پیش بارهای یکسان بدون در نظر گرفتن پارامترهای ورودی DEM از یک تابع یکسان پیروی می کند. برای این کار، توده ذرات در CCT و PST با چهار سطح پیش بار با پیستونی با قطری برابر با قطر سیلندر برای هر یک از آزمایش ها در معرض پیش تراکم قرار گرفتند. آزمایش ۱ با پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ با تغییر مدول برشی به 500 MPa انجام شد، در حالی که برای آزمایش ۲ انرژی چسبندگی به 200 kJ m^{-3} تغییر یافت. این ذرات به ترتیب در آزمون های ۱ و ۲ تحت بارهای ۲۳، ۴۷، ۷۵، ۱۰۶ و ۱۳، ۲۸، ۴۶، ۶۵ kPa قرار گرفتند. پیش بارها توسط نشست پیستون بارگذاری کنترل می شدند. پس از اعمال پیش بارها، آزمون های CCT و PST به همان روش قبلی انجام و تنش پیش تراکم با برازش تابع گومپرتز در نقطه بیشینه انحناء تخمین زده شد.

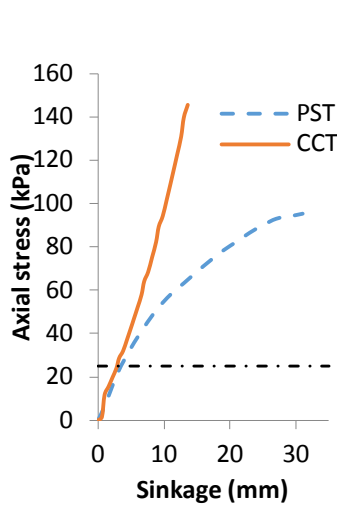
نتایج و بحث

فرآیند تراکم خاک در CCT و PST

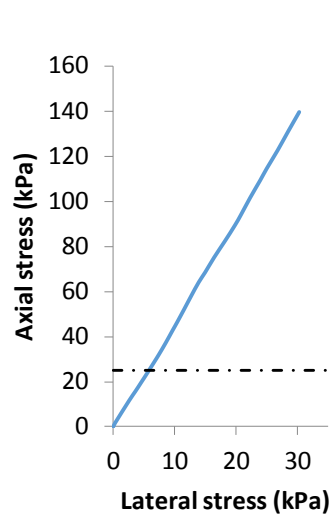
شکل ۳ مثالی از نتیجه شبیه سازی DEM برای CCT و PST است که نمودار تنش-نشست هر دو آزمایش (شکل ۳-الف)، تنش محوری در مقابل تنش جانبی در CCT (شکل ۳-ب) و تنش محوری در مقابل ضریب فشار جانبی در حال سکون (نسبت تنش های جانبی به تنش محوری) در CCT (شکل ۳-ج) را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، تنش در منحنی های تنش-نشست CCT و PST تا یک سطح تنش مشخص یک مسیر مشابه را دنبال می کنند و پس از آن منحنی ها نسبت به هم واگرا می شوند. مقایسه نتایج شبیه سازی با مدل های نظری توسعه یافته توسط ارل [۱۶] و ارل و الکساندرو [۲۲-۲۳] نشان داد که فرآیند تراکم خاک در آزمون PST از سه مرحله تشکیل شده است (شکل ۳-د): (۱) خاک بلافاصله پس از اعمال فشار صفحه با تنش جانبی ثابت فشرده می شود، (۲) افزایش تنش جانبی تا حدی که به بالاتر از تنش محصورکننده خاک های اطراف برسد و (۳) مخروطی از خاک در زیر صفحه تشکیل شده و با آن به سمت پایین حرکت می کند و باعث متراکم شدن بیشتر خاک می شود. تفاوت اصلی تراکم با PST در فاز ۳ است که در طی آن، هیچ شرایط مرزی به شکل مخروط نمی تواند تشکیل شود. به این ترتیب می توان در CCT کاهش حجم خاک را تحت شرایط تراکم خالص در نظر گرفت [۱۶]. اگر برای یک خاک معین، نتایج حاصل از CCT و PST در مقابل هم به نمایش درآید، فرض می شود

نقطه‌ای که دو منحنی از هم جدا می‌شود، نقطه‌ای است که مقاومت محصورکننده خاک اطراف صفحه بارگذاری دیگر نمی‌تواند در مقابل افزایش تنش جانبی مقاومت کند و بنابراین در این نقطه حالت تغییر شکل از تراکم خالص به تراکم و جابجایی جانبی خاک تغییر می‌کند. این نقطه، نقطه تراکم (C_p) نامیده می‌شود که نشانگر شروع فاز ۳ در فرآیند تراکم خاک تحت PST است.

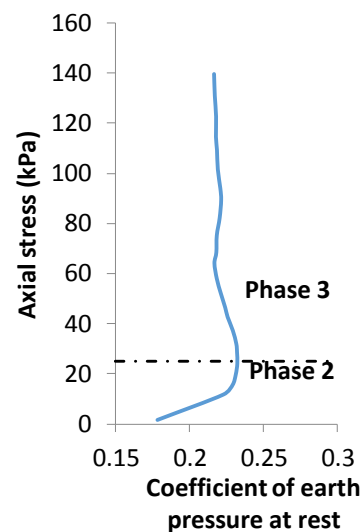
یک نقطه تراکم به‌طور واضح در شکل ۳-الف در نمودار PST و CCT برای ذرات DEM با خصوصیات تماسی یکسان قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۳-ب و ج نشان داده شده است، از تنش محوری شیب‌سازی شده در مقابل تنش جانبی و تنش محوری در مقابل ضریب فشار در حالت سکون برای CCT، تشخیص فاز ۱ فشرده‌سازی خاک مانند نظریه ارائه شده توسط ازل [۱۶] (شکل ۳-ج) امکان‌پذیر نبود. یک دلیل بالقوه نبرای این حالت ناشی از ذرات بسیار بزرگ‌تر DEM نسبت به ذرات خاک در واقعیت است. شروع تغییر شکل خاک تحت فشرده‌سازی با جاگیری مجدد ذرات از حالت سست (به عنوان مثال با نیروهای تماس کوچک) همراه است تا هوای بین خاکدانه‌ها خارج شود. این امر تا زمان ایجاد زنجیره‌های محکم بین ذرات باعث افزایش تنش جانبی روی دیواره سیلندر ادامه می‌یابد (شروع فاز ۲). با توجه به بزرگ‌تر شدن ذرات در DEM، تعداد نقاط تماس بسیار کمتر از سیستم ذرات خاک است و در نتیجه نیروهای تماس بزرگ‌تر با افزایش تنش محوری به دیواره سیلندر منتقل می‌شوند. به احتمال زیاد به همین دلیل هیچ فاز با تنش جانبی ثابت در شیب‌سازی‌ها مشاهده نمی‌شود. شکل ۴ مراحل زمانی تکامل سرعت ذرات را در طی آزمون PST نشان می‌دهد. تشکیل گوه مخروطی زیر صفحه به وضوح مشاهده می‌شود. همان‌طور که در بالا بحث شد، تشکیل مخروط زیر صفحه در نقطه تراکم یعنی شروع فاز ۳ آغاز می‌شود.



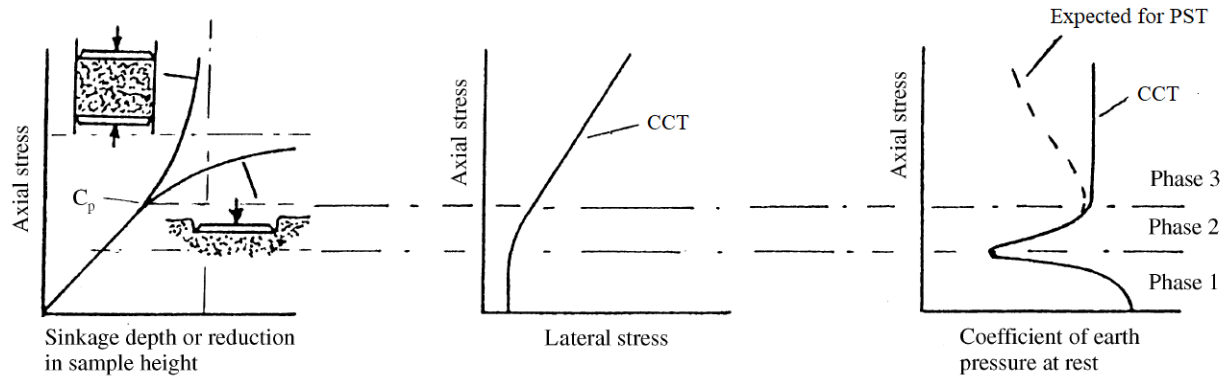
(الف)



(ب)

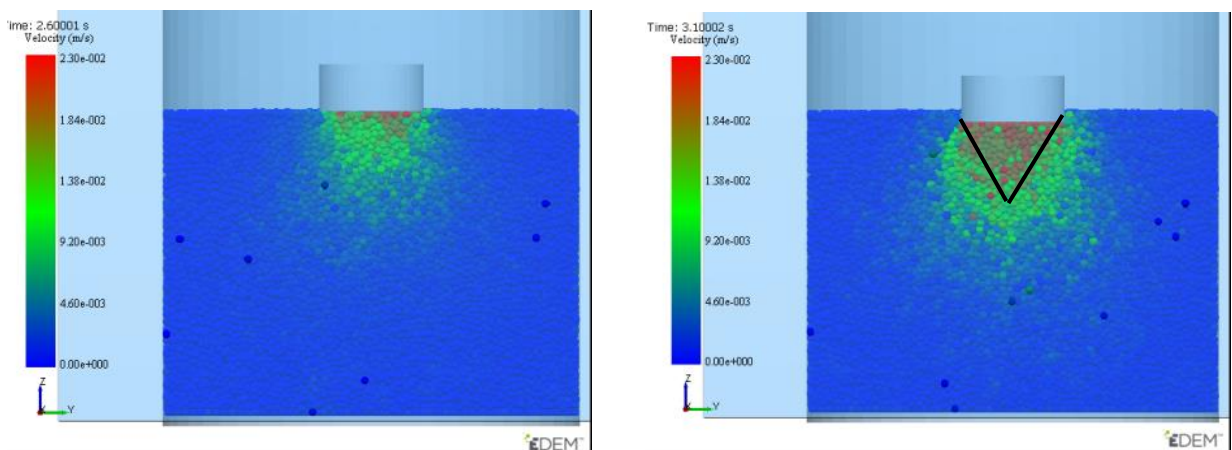


(ج)



(د)

شکل ۳. الف) شبیه‌سازی تنش محوری در مقابل نشست برای CCT و PST، (ب) تنش محوری شبیه‌سازی شده در مقابل تنش جانبی برای CCT، (ج) تنش محوری شبیه‌سازی شده در مقابل ضریب فشار جانبی در حال سکون برای CCT و (د) نتایج نظری با اقتباس از ازل [۱۶].

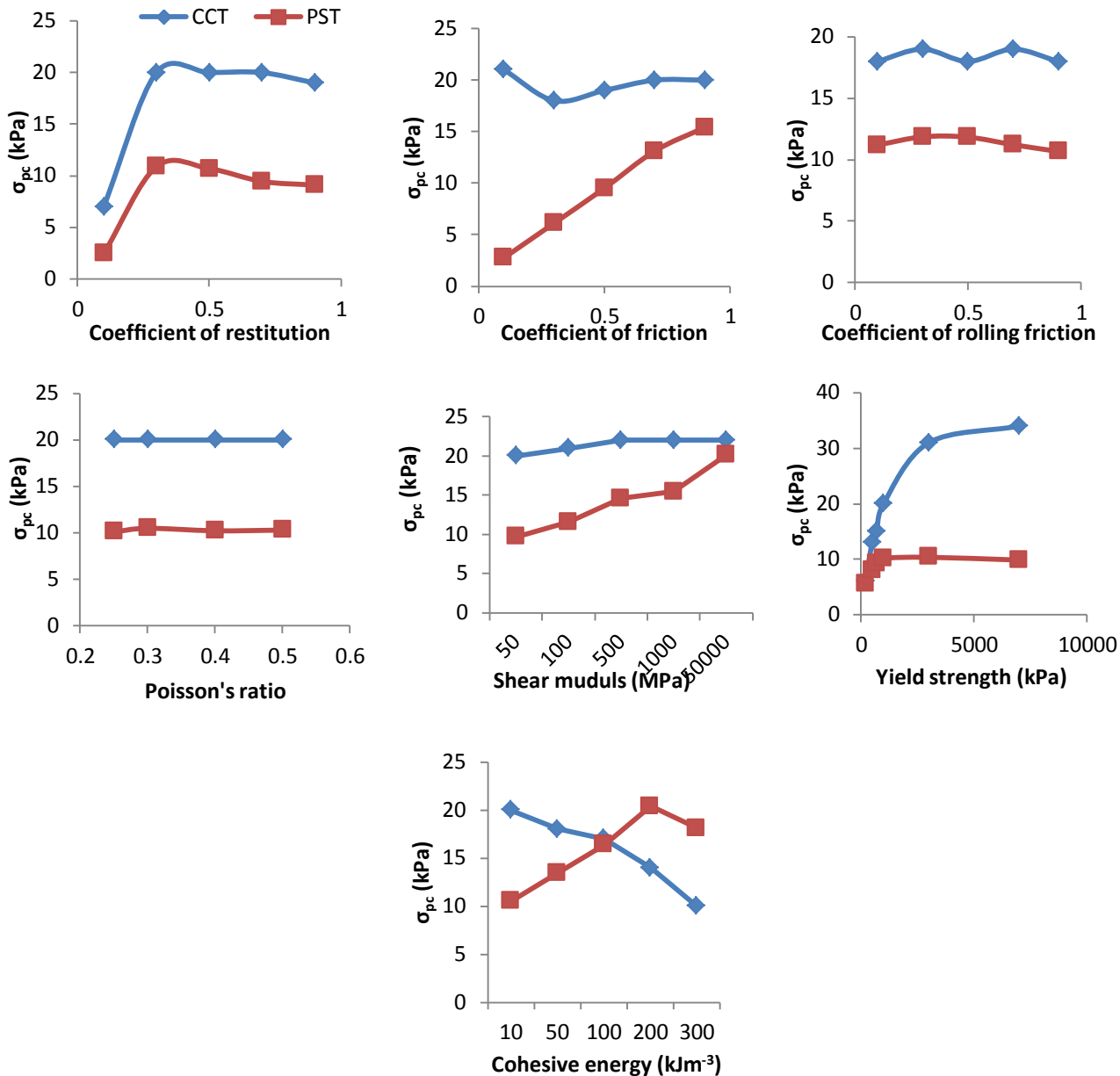


شکل ۴. مراحل زمانی تغییرات در سرعت ذرات در شبیه‌سازی DEM برای PST که نشان‌دهنده تشکیل گوهی مخروطی در زیر صفحه در حال نشست است.

استحکام فشاری (تنش پیش تراکم) توده ذرات تحت تأثیر پارامترهای ورودی DEM

شکل ۵ استحکام فشاری اولیه خاک (تنش پیش تراکم بدون بارگذاری، σ_{pc}) به دست آمده از CCT و PST را توابعی از پارامترهای ورودی DEM نشان می‌دهد. σ_{pc} در نقطه حداکثر انحنای منحنی تنش در مقابل نشست، همان‌طور که توضیح داده شد برآورد شد. به‌طور کلی، می‌توان دریافت که σ_{pc} به دست آمده برای CCT برای توده ذرات با خصوصیات تماسی معین، بزرگ‌تر از PST است. این نشان می‌دهد که فشار جانبی محصورکننده در CCT تنش اعمالی و در نتیجه استحکام محوری فشاری را افزایش داده است. برخی پارامترها از جمله ضریب اصطکاک غلتشی و نسبت پواسون هیچ تأثیری بر σ_{pc} نداشته است. σ_{pc} با ضریب بازگشت تا ۰/۳ افزایش یافته و سپس با یک روند مشابه برای CCT و PST کاهش یافته است. ضریب اصطکاک σ_{pc} را تنها در PST افزایش داد. این به احتمال زیاد به دلیل درجه

آزادی بیشتر ذرات موجود در PST برای لغزش‌های مماس نسبت به CCT است. افزایش مدول برشی و استحکام تسلیم ذرات باعث افزایش σ_{pc} برای هر دو آزمون PST و CCT شد. تغییر σ_{pc} با انرژی چسبندگی در CCT و PST در یک جهت نیست. افزایش انرژی چسبندگی منجر به کاهش و افزایش σ_{pc} به ترتیب در CCT و PST شد. این نتیجه را می‌توان با افزایش مقاومت در برابر لغزش بین ذرات در PST و افزایش نیروی عمودی تماس در CCT با افزایش انرژی چسبندگی توجیه نمود.

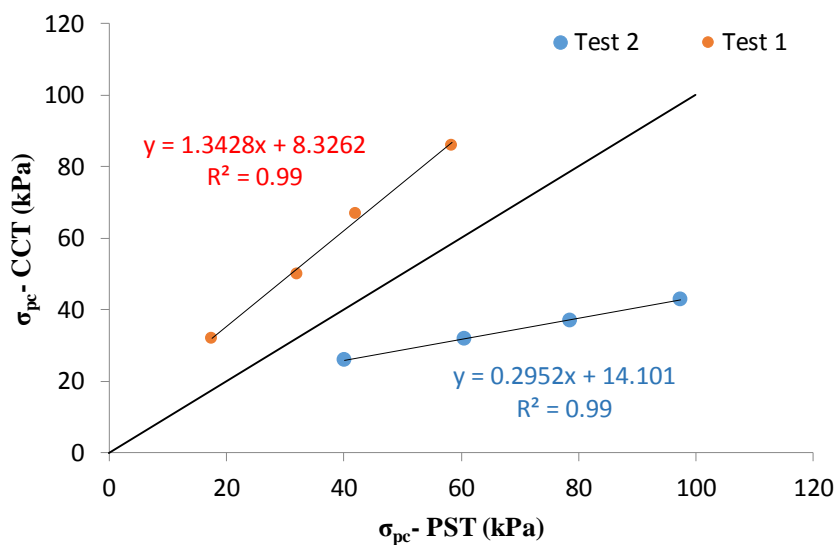


شکل ۵. استحکام فشاری توده ذرات تحت تأثیر پارامترهای DEM.

شکل ۶ تخمین σ_{pc} را برای CCT در مقابل PST (σ_{pc} -PST) برای دو آزمون شرح داده شده در بخش مواد و روش‌ها نشان می‌دهد که در این آزمون‌ها توده ذرات قبل از شبیه‌سازی آزمون تحت پیش بارهای مشخص قرار گرفت. اساساً انتظار می‌رود که مقادیر تخمین زده شده σ_{pc} از شبیه‌سازی‌های هر دو آزمون با اعمال مقادیر پیش بار یکسان، برابر باشد. با این حال همبستگی قوی بین σ_{pc} -CCT و σ_{pc} -PST برای دو آزمایش یافت شد اما تابع برازش برای دو آزمایش یکسان نبود. برای آزمون ۱، σ_{pc} -CCT بیشتر از σ_{pc} -PST و



برای آزمون ۲ نتایج برعکس بود. برآورد بیشتر σ_{pc} -PST با اغلب یافته‌های تجربی به عنوان مثال [۴-۹-۲۴] توافق دارد. مصدقی و همکاران [۴] برآورد بیشتر σ_{pc} -PST را با توجه به تفاوت در شرایط مرزی که امکان تغییر شکل جانبی خاک در PST را اجازه می‌دهد و همچنین اصطکاکی که بین ذرات خاک و دیواره داخلی استوانه در CCT وجود دارد از اصطکاک داخلی بین ذرات موجود در PST که در بین ذرات زیر صفحه بارگذاری و ذرات جانبی قرار دارد متفاوت است، توضیح می‌دهد. با این حال، برخی از مطالعات نتایج کاملاً برعکس را نشان داده‌اند که در آن σ_{pc} -PST > σ_{pc} -CCT (به عنوان مثال، همت و همکاران [۲۵]؛ کولن [۲۶]). نتایج نشان می‌دهد که σ_{pc} برای آزمون‌های تراکم خاک‌های مختلف ممکن است بر اثر خصوصیات متفاوت خاک متفاوت باشد. برای ایجاد یک رابطه بین σ_{pc} برآورد شده از CCT و PST با تغییر خصوصیات خاک ارزیابی بیشتری مورد نیاز است.



شکل ۶ تخمین زده شده برای CCT در مقابل PST برای آزمون‌های ۱ و ۲.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شبیه‌سازی تراکم خاک با آزمون‌های CCT و PST با روش اجزاء گسسته (DEM) انجام شد. مقایسه شبیه‌سازی DEM فرایند تراکم خاک با مدل‌های نظری ارائه انطباق نسبتاً خوبی نشان داد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها جز در مدل‌های با انرژی چسبندگی بالا، تنش پیش تراکم در CCT بالاتر از PST بود. با افزایش ضریب اصطکاک و مدول برشی تنش پیش تراکم در PST روند صعودی نشان داد در حالی که در CCT تقریباً ثابت بود. افزایش استحکام تسلیم در CCT و PST در مقادیر پایین استحکام تسلیم دارای سیر صعودی و در مقادیر بالاتر به شکل ثابت درآمد. یک تابع خطی می‌تواند تغییر نقطه تنش پیش تراکم در CCT و PST با افزایش بار را نشان دهد که این تابع با تغییر پارامترهای DEM تغییر می‌کند. نحوه و دلایل تغییر این تابع با تغییر پارامترهای DEM نیاز به مطالعات بیشتری دارد.

تشکر و قدردانی

از مرکز محاسبات سریع (HPC) دانشگاه شهر کرد جهت در اختیار قرار دادن رایانه با توان پردازش بالا جهت انجام این مطالعه قدردانی می‌شود.

منابع:



1. Bekker. M.G. 1960. Off the Road Locomotion, University of Michigan Press, Ann Arbor.11-16.
2. Alexandrou, A., and Earl, R. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1), 67-71.
3. Alexandrou, A., and Earl, R. 1997. Development of a technique for assessing the behaviour of soil under load. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68(2), 169-180.
4. Mosaddeghi, M. R., Hemmat, A., Hajabbasi, M. A., Vafaeian, M., and Alexandrou, A. 2006. Plate sinkage versus confined compression tests for in situ soil compressibility studies. *Biosystems Engineering*, 93(3), 325-334.
5. Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., Hemmat, A., and Alexandrou, A. 2004, October. Determination of pre-compaction stress of in situ tractor pre-compacted soil by plate sinkage and confined compression tests. In *Proceedings of 2004 CIGR International Conference*. Beijing, China (pp. 11-14).
6. Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J.B. and Koolen, A.J. 2004. Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research*, 77, 97-108.
7. Arvidsson, J., and Keller, T. 2004. Soil precompression stress, I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, 77, 85-95.
8. Hemmat, A., Nankali, N., and Aghilinategh, N. 2012. Simulating stress-sinkage under a plate sinkage test using a viscoelastic 2D axisymmetric finite element soil model. *Soil and Tillage Research*, 118, 107-116.
9. 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.
10. Cundall, P. A., and Strack, O. D. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
11. Chung, Y. C., and Ooi, J. Y. 2007. Influence of discrete element model parameters on bulk behavior of a granular solid under confined compression. *Particulate Science and Technology*, 26(1), 83-96
12. Chen, Y., Munkholm, L. J., and Nyord, T. 2013. A discrete element model for soil–sweep interaction in three different soils. *Soil and Tillage Research*, 126, 34-41.
13. Milkevych, V., Munkholm, L. J., Chen, Y., and Nyord, T. 2018. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 183, 60-71.
14. Tekeste, M. Z., Balvanz, L. R., Hatfield, J. L., and Ghorbani, S. 2019. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow. *Journal of Terramechanics*, 82, 1-11.
15. Zeng, Z., and Chen, Y. 2019. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction. *Biosystems Engineering*, 180, 25-35.
16. Earl, R. 1997. Assessment of the behaviour of field soils during compression. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68(2), 147-157.
17. Walton, O. R., and Braun, R. L. 1986. Viscosity, granular- temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *Journal of rheology*, 30(5), 949-980.



18. Ucgul, M., Saunders, C., and Fielke, J. M. 2017. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 155, 44-54.
19. Gregory, A. S., Whalley, W. R., Watts, C. W., Bird, N. R. A., Hallett, P. D., and Whitmore, A. P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89(1), 45-57.
20. Keller, T., Lamandé, M., Schjønning, P., and Dexter, A. R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163(1-2), 13-23.
21. Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. In a letter to Francis Baily, Esq. FRS andc. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 115, 513-583.
22. Earl, R., and Alexandrou, A. 2001a. Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: experimental approach. *Journal of Terramechanics*, 38(3), 153-162.
23. Earl, R., and Alexandrou, A. 2001b. Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: theoretical approach. *Journal of Terramechanics*, 38(3), 163-183.
24. Dawidowski, J. B., Morrison Jr, J. E., and Snieg, M. 2001. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Transactions of the ASAE*, 44(5), 1059-1064.
25. Hemmat, A., Tahmasebi, M., Vafaeian, M., and Mosaddeghi, M.R. 2009. Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystems Engineering*, 102, 219-226.
26. Koolen, A.J. 1982. Precompaction stress determination on precompacted soil. In: *Proceedings of the Ninth Conference of International Soil Tillage Research Organisation*, Osijek, Yugoslavia, pp. 225-230.



Simulation of soil compaction behavior and estimation of precompression stress in plate sinkage and confined compression tests using discrete element method

Mustafa Bahrami¹, Mojtaba Naderi-Boldaji^{2*}, Davoud Ghanbarian³

1. PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;

Abstract

Plate sinkage (PST) and confined compression (CCT) tests are widely used in soil mechanics to assess the soil compression process and estimate the soil precompression stress. If the stress applied on the soil exceeds the precompression stress, the soil undergoes plastic deformation. In this study, the soil compression process phases under PST and CCT were simulated using discrete element method (DEM) and the results were compared with the experimental theories. Then, the effect of DEM parameters on the precompression stress was investigated. The results showed generally higher precompression stress in CCT than PST. The increase in friction coefficient, shear modulus and cohesive energy had an increasing effect on the precompression stress in PST. Increase in cohesive energy and yield strength decreased and increased the precompression stress estimated in CCT, respectively. It was also found that the correlation between precompression stress obtained from PST and CCT with simulated preloads changed with DEM properties.

Key words: Plate sinkage; confine compression; discrete element; pre - compression stress.

*Corresponding author

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