



ارزیابی پارامتری مدل فنر هیسترتیک - چسبندگی خطی در شبیه‌سازی اجزا گسسته نشست صفحه در خاک

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 استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد؛ m.naderi@ut.ac.ir

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

چکیده

روش اجزا گسسته امروزه یکی از روش‌های توانمند و مورد توجه در شبیه‌سازی رابطه ماشین و ابزار با خاک است. با این وجود، تعیین میکرو پارامترهای مدل اجزا گسسته و ایجاد ارتباط بین میکرو پارامترها و رفتار توده ماده از جمله چالش‌های اساسی این روش است. در این مطالعه با شبیه‌سازی آزمون نشست صفحه، پارامترهای مدل و تأثیر آن بر رفتار فشار-نشست خاک بررسی شد. مدل تماس استفاده شده در این مطالعه فنر هیسترتیک - چسبندگی خطی است که پارامترهای آن شامل نسبت پواسون، مدول برشی، ضریب اصطکاک لغزشی، ضریب اصطکاک غلتشی، ضریب بازگشت، استحکام تسلیم و انرژی چسبندگی است. رابطه فشار-نشست به‌عنوان پاسخ توده خاک در حین نشست صفحه مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که مدول برشی، ضریب اصطکاک لغزشی، انرژی چسبندگی و استحکام تسلیم تأثیر بزرگی بر پاسخ فشار-نشست دارند، لذا کالیبره نمودن دقیق این پارامترها با آزمون‌های استاندارد نیاز به توجه ویژه دارد.

کلمات کلیدی: نشست صفحه، شبیه‌سازی، مدل اجزا گسسته، مدل فنر هیسترتیک-چسبندگی خطی

Parametric Evaluation of Hysteretic Spring- Linear Cohesion Contact Model in Discrete Element Simulation of Plate Sinkage in Soil

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

¹ PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
mostafa.bahrami.2@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
m.naderi@ut.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University;
ghanbarian-d@agr.sku.ac.ir

ABSTRACT

The discrete element (DEM) is a potent method in simulating soil-machine and soil-tillage tool interactions. However, calibration of the contact (micro) parameters and relating the micro parameters to the macro response of bulk soil is of the important challenges in application of DEM. In this study, the plate-sinkage behavior of soil was simulated and evaluated using DEM with varying the model parameters. The contact model was hysteretic spring- linear cohesion whose parameters include Poisson's ratio, shear modulus, friction coefficient, rolling friction coefficient, coefficient of restitution, cohesive energy and yield strength. The pressure- sinkage curves were evaluated as the bulk response of soil during plate sinkage into the soil. The results of sensitivity analyses of the model parameters showed that shear modulus, friction coefficient, cohesive energy and yield strength have significant impact on pressure- sinkage response and therefore need precise calibration with standard tests.

Keywords: plate sinkege, simulation, Discrete Element Method, H S LC contact model



در مطالعه اثر متقابل ماشین- خاک، رابطه بین عملکرد کششی، تأثیر وسیله کششی ماشین بر خاک و خواص خاک مورد توجه است (Onafeko and Reece, 1967). از جمله اثرات مهم تردد تیر یا تراک بر روی خاک نشست آن در خاک بوده که از طرفی باعث ایجاد نیروی مقاومت غلتشی در مقابل حرکت و از طرف دیگر تراکم خاک می‌گردد. برای تدوین یک نظریه جامع در مورد رفتار نشست خاک تحت تردد وسیله نقلیه، بکر (Bekker, 1960) از جمله پیشگامان بود که برای شبیه‌سازی و بررسی رفتار فشار- نشست خاک در آزمایشگاه آزمون نشست عمودی صفحه را پیشنهاد داد. در این آزمایش با نفوذ صفحه‌ای با شکل هندسی و ابعاد مشخص با سرعت ثابت در خاک و تا یک عمق از پیش تعیین شده، منحنی فشار- نشست خاک حاصل می‌شود که ثابت‌های تجربی مرتبط با اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک از این منحنی استخراج می‌شود. رابطه فشار نشست خاک و پارامترهای آن اساس تحلیلی برای نیروی مقاومت غلتشی یک تیر یا تراک را فراهم نمود (Onafeko and Reece, 1967). همچنین از این آزمون برای بررسی رفتار تراکم خاک در اثر اعمال تنش و تخمین مشخصه‌های تراکم خاک در شرایط مزرعه‌ای استفاده زیادی می‌شود (Alexandrou and Earl, 1997).

با توسعه روش‌های نرم‌افزاری عددی، روش شبیه‌سازی اجزاء محدود (FEM) توجه محققین زیادی را برای مسائل برهمکنش ماشین- خاک (Cueto et al., 2013; Nakashima and Wong 1993; Yong and Fattah 1976) و همچنین مدل‌سازی رابطه ابزارهای خاک‌ورزی- خاک (Bentaher et al. 2013; Formato et all, 2005; Garus et al., 2014) را به خود جلب نمود. در این روش، خاک به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود که با مش‌بندی به المان‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود. در حالی که برخی از ویژگی‌های مفید در هنگام استفاده از FEM برای پیش‌بینی نیرو وجود دارد، فرض پیوستگی خاک همیشه معتبر نیست، زیرا نمی‌تواند شرایطی را که تغییر در ساختار یا جابجایی ذرات خاک رخ می‌دهد را پیش‌بینی نماید (Asaf et al., 2007). در کنار روش اجزای محدود، روش اجزای گسسته (DEM) می‌تواند با شبیه‌سازی محیط خاک به شکل ذرات مجزا، ضعف‌های روش FEM را برطرف نماید (Ucgu et al., 2017a). روش DEM هم در مدل‌سازی ارتباط چرخ و خاک (Smith and Peng 2013; Johnson et al., 2015) و همچنین ابزار و خاک (Ucgu et al., 2017a) در مطالعات زیادی استفاده شده است.

در استفاده از روش DEM، پیش‌بینی دقیق تنها در شرایطی که پارامترهای مدل به‌دقت تعیین شوند محقق خواهد شد. تعداد زیادی از محققان، در تلاش برای استفاده از روش DEM در مسائل مختلف، روش‌های کالیبراسیون برای برخی از پارامترهای این روش ارائه داده‌اند. با توجه به اینکه مواد گرانوله اغلب تحت تأثیر شرایط خارجی مختلف هستند، به دست آوردن مقادیر پارامتر ورودی مناسب می‌تواند بسیار چالش برانگیز باشد. در برخی موارد کالیبراسیون پارامترهای تماس ذرات می‌تواند بزرگ‌ترین گام یک پروژه شبیه‌سازی اجزای گسسته باشد (Coetzee, 2017). آزمون نشست صفحه در مطالعات مکانیک خاک برای ارزیابی استحکام خاک بسیار رایج است (Wong, 1989). این آزمون به‌عنوان یک مدل مفهومی و ساده از رفتار خاک تحت تردد چرخ (Bin et al., 2009) و هم به‌عنوان یکی از آزمون‌های کالیبراسیون برای مدل‌سازی DEM خاک و ابزار (Asaf et al., 2007) استفاده شده است. در مدل اجزای گسسته پارامترهای مختلف مدل بر پاسخ فشار- نشست صفحه تأثیر می‌گذارند. در مطالعات قبلی اثر این پارامترها در یک مدل بدون اثر چسبندگی و الاستیک‌ترین- میندینگ مورد بررسی قرار گرفت (Jang et al., 2016). مطالعه حاضر در مورد اثر این پارامترها با یک مدل الاستو پلاستیک خطی در ادغام با مدل چسبندگی خطی که توسط آنگال (Ucgu et al., 2015) ارائه شد، انجام گرفته است. این مدل توانایی خوبی در مدل‌سازی رفتار خاک دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۲-۱ مدل نظری تماس

DEM که توسط Cundall and Strack (1979) پیشنهاد شد، یک روش برای مطالعه رفتار مواد دانه‌ای است. این روش بر اساس فیزیک برخورد پایه‌ریزی شده است. در این روش با حل معادله حرکت نیوتن برای ذرات منفرد، تعیین حرکت توده ذرات ممکن می‌شود. معادلات ۱ و ۲ حرکت خطی و دورانی ذره i را توصیف می‌کنند.

$$\dot{r}_i = \sum_j \frac{f_{ij}}{m_i} + g \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\sum_i T_{ij}}{I_i} \quad (2)$$

در رابطه ۱، بردار موقعیت ذره i ، نیروی تماس با ذره j ، m_i جرم ذره i ، g شتاب گرانش، و در رابطه ۲ گشتاور وارده به علت مؤلفه مماسی نیروی برخورد با ذره j و I_i ممان اینرسی ذره i است. نقطه در معادلات ۱ و ۲ نشان دهنده مشتق زمانی است. نیروی تماس f_{ij} بر ذره j را می‌توان به f_N (مؤلفه عمودی) و f_T (مؤلفه مماسی) تجزیه کرد که هر مؤلفه با استفاده از عناصر ساده مکانیکی مانند فنر، یک میراگر و یک نوار لغزنده اصطکاکی مدل می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. فنر برای ایجاد نیروی دافعه بین ذرات و میراگر برای اتلاف انرژی، در طول یک برخورد با تغییر شکل الاستیک در نظر گرفته می‌شود. برای جهت مماسی یک لغزنده اصطکاکی برای لغزش بین ذرات به کار می‌رود (Tsuji et al., 2012).

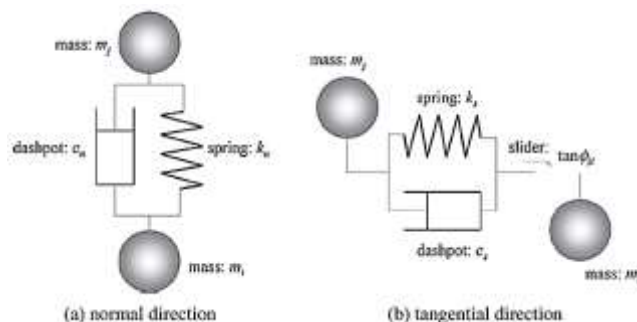


Figure 1. Interaction of two particles in perpendicular and tangential directions in discrete component models.

شکل ۱. اثر متقابل دو ذره در جهت عمود و مماسی در مدل اجزا گسسته.

در تماس کاملاً الاستیک، انرژی کرنش جذب شده در فنر در طول بارگذاری به طور کامل در باربرداری برگردانده می‌شود اما در مدل الاستیک-پلاستیک ارائه شده توسط Walton and Braun (1986) مقداری از این انرژی در باربرداری از بین می‌رود که مدل آن هیسترتیک نامیده شد و نیروی نرمال در طول بارگذاری اول برابر می‌شود با:

$$F_n = K_{1,n} \delta_n \quad (3)$$

در حالی که نیروی نرمال در هنگام باربرداری یا بارگذاری مجدد با رابطه ۴ برآورد می‌شود:

$$F_n = K_{2,n} (\delta_n - \delta_{n,p}) \quad (4)$$

جایی که δ_n همپوشانی نرمال در نقطه تماس و $\delta_{n,p}$ همپوشانی حاصل از تغییر شکل پلاستیک است. سختی در هنگام بار برداری بیشتر از زمان بارگذاری ($K_{2,n} > K_{1,n}$) است.

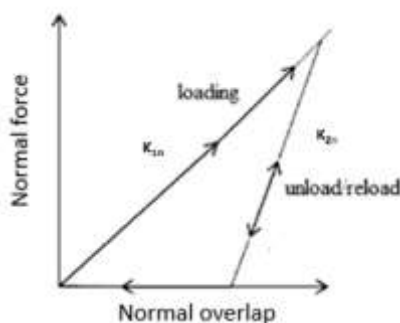


Figure 2. Hysteretic spring force – displacement relationship for yielding (Ucgu et al., 2014).

شکل ۲- رابطه نیرو - تغییر شکل فنر هیسترتیک برای تسلیم (Ucgu et al., 2014)

مدل تماس فنر هیسترتیک در ادغام با یک مدل چسبندگی خطی که توسط آگال (Ucgu et al., 2015) ارائه شده است به منظور مدل‌سازی نشست صفحه در خاک استفاده شد. این مدل به ذرات اجازه می‌دهد تا به صورت کششی خطی تا یک تنش از پیش تعیین شده رفتار الاستیک داشته باشد (شکل ۲) و هنگامی که کل تنش در ناحیه تماس به تنش از پیش تعریف شده (که استحکام تسلیم) در مدل است برسد، ذرات تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرند (Ucgu et al., 2017b). چسبندگی بین ذرات به طور مستقیم با افزودن نیروی چسبندگی به نیروهای نرمال تماس تعریف می‌شود (Ucgu et al., 2017b).

به طوری که نیروی نرمال از ترکیب سه نیروی فنر، دمپر و چسبندگی بدست آید.

۲-۲- شبیه‌سازی DEM نشست صفحه در خاک

در این مطالعه، شبیه‌سازی مسئله نشست صفحه در خاک با استفاده از نرم‌افزار EDEM (نسخه ۲۰۱۷ شرکت DEM Solutions) انجام شد. با توجه به نیاز پردازشی بالا در این مسئله از یک ابرکامپیوتر با واحد پردازش ۲۸ هسته‌ای و ۱۴۰ گیگابایت RAM مستقر در مرکز فناوری اطلاعات دانشگاه شهرکرد استفاده شد.

ذرات با قطر ۷ mm در یک استوانه به قطر ۳۰۰ و تا ارتفاع ۳۰۰ mm تولید شدند (شکل ۳). یک صفحه دایره‌ای به قطر ۱۰۰ mm جهت نشست بر روی ذرات شبیه‌سازی شد. سرعت نشست صفحه در خاک به صورت ثابت ۰/۰۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به اثر آرایش ذرات قرار گرفته در سیلندر بر روی پاسخ فشار- نشست صفحه، جهت ثابت ماندن آرایش اولیه ذرات در طی شبیه‌سازی‌های متفاوت، ابتدا توده‌ی ذرات با پارامترهای اولیه ساخته شد. پارامترهای اولیه در شبیه‌سازی‌ها از مطالعه آگال و همکاران استخراج شد (Ucgul et al., 2017a) که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. سپس در هر تکرار یکی از پارامترهای مدل تغییر داده شد. پس از تغییر پارامتر، به مدت ۰/۳ ثانیه مدل در حالت استراحت قرار داده شد تا اثر تغییر پارامتر بر روی آرایش ذرات و تغییر در چگالی ظاهری توده معین شود. در گام بعد، حرکت صفحه در خاک (نشست صفحه) تا عمق ۲۰ mm انجام شد.



Figure 3. Discrete element model of plate sinkage in soil.

شکل ۳- مدل اجزای گسسته نشست صفحه در خاک.

جدول ۱- پارامترهای اجزای گسسته مورد استفاده در شبیه‌سازی (Ucgul et al., 2017a).

Table 1. DEM parameters used in the simulations (Ucgul et al., 2017a).

Property	Value
Particle density (kg/m^3)	2600
Density of steel (kg/m^3)	7861
Shear modulus of soil particle (Pa)	5×10^7
Shear modulus of steel (Pa)	7.9×10^{10}
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 friction of soil-soil	0.5
Coefficient of friction of soil-steel	0.5
Coefficient of rolling friction of soil-soil	0.28
Coefficient of rolling friction of soil-steel	0.05
Cohesive energy density between soil-soil (J/m^3)	5000

در این مطالعه ابتدا اثر شرایط مرزی بر پاسخ فشار- نشست مورد ارزیابی قرار گرفت. پنج سیلندر با قطرهای ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ شبیه‌سازی شد به‌نوعی که در هر سیلندر تا ارتفاع ۳۰۰ mm توده ذرات با خواص ثابت ریخته شد. تعداد ذرات قرار داده‌شده در این سیلندرها به ترتیب ۴۴۹۷۳، ۶۴۲۴۷، ۱۱۷۷۸۶، ۱۸۲۰۳۴ و ۲۶۴۴۸۴ ذره بود. صفحه دایره‌ای به قطر ۱۰۰ mm از سطح بالایی توده ذرات تا عمق ۲۰ mm با سرعت ثابت ۲۰ mm/s نفوذ کرد و پاسخ فشار- نشست تحلیل گردید. در مرحله بعد اثر سرعت نفوذ مورد مطالعه قرار گرفت به این صورت که سه سرعت نفوذ مختلف ۲، ۲۰ و ۴۰ mm/s با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و ابعاد مدل آزمون شد.

اثر تغییر پارامترهای مدل تماس بر پاسخ فشار- نشست مورد ارزیابی قرار گرفت. این شبیه‌سازی‌های پارامتری به‌منظور یافتن پارامترهای با تأثیر بزرگ بر پاسخ فشار- نشست مدل انجام شد. اساساً پارامترهای تأثیرگذار نیاز به تعیین دقیق با روش‌های کالیبراسیون دارند. در بررسی‌های پارامتری، با تغییر هر کدام از این پارامترها در یک محدوده مشخص، پاسخ فشار- نشست متناظر شبیه‌سازی شد. در این مرحله خصوصیات ذره و تماس شامل نسبت پواسون (در سه سطح ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵)، چگالی ذرات (با توجه به اینکه امکان تغییر چگالی بعد از ساخت ذرات در نرم افزار وجود نداشت در این مطالعه مورد ارزیابی قرار نگرفت) و مدول برشی (در سطوح ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ MPa) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین خواص برهمکنش بین ذرات خاک شامل ضریب اصطکاک بین ذرات، ضریب اصطکاک غلتشی بین ذرات و ضریب بازگشت بین ذرات با مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ ارزیابی شد. خواص مربوط به مدل تماسی از قبیل استحکام تسلیم برای مدل تماسی فتر هیسترتیک با مقادیر ۱۰، ۱۰^۲، ۱۰^۳ × ۱۰^۲، ۲ × ۱۰^۲، ۳ × ۱۰^۲، ۵ × ۱۰^۲، ۷ × ۱۰^۲، ۱ × ۱۰^۳، ۲ × ۱۰^۳، ۳ × ۱۰^۳، ۱۰^۳ × ۱۰^۳ و انرژی چسبندگی برای مدل تماسی چسبندگی خطی با مقادیر ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ kJ/m^3 مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل ۴-الف نشان داده شده، قطر سیلندر ۲۵۰ mm باعث افزایش قابل توجهی در فشار در مقایسه با قطرهای ۳۰۰ mm و بزرگ‌تر شده که به دلیل تأثیر شرایط مرزی بوده است. در قطرهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ mm اختلاف نمودارها بسیار ناچیز است. لذا در شبیه‌سازی‌های پارامتریک، قطر ۴۰۰ mm به‌عنوان حداقل قطر مورد نیاز جهت حداقل کردن اثر شرایط مرزی در نظر گرفته شد. شکل ۴-ب اثر سرعت نشست در سه سطح ۲، ۲۰ و ۴۰ mm/s را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت، فشار نشست افزایش یافته است. علت این امر می‌تواند در افزایش شتاب ذرات و نیروهای حاصل از افزایش اینرسی ذرات باشد.

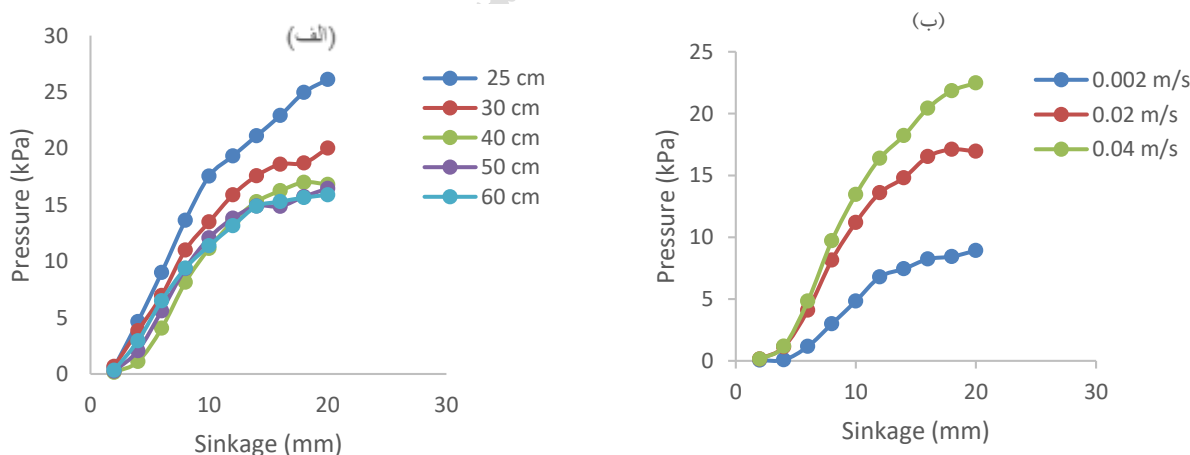


Figure 4. The effect of cylinder diameter (A) and sinkage speed (B) on the pressure-sinkage response.

شکل ۴- الف) اثر قطر سیلندر (الف) و سرعت نفوذ (ب) بر نمودار فشار- نشست.

شکل ۵-الف اثر نسبت پواسون بر پاسخ فشار- نشست را نشان می‌دهد که تغییری در این پاسخ با تغییر نسبت پواسون دیده نمی‌شود. با افزایش مدول برشی فشار نشست صفحه به طور معنی داری افزایش یافت (شکل ۵-ب). شکل ۶ اثر پارامترهای ضریب اصطکاک لغزشی (۶-الف)، ضریب اصطکاک غلتشی (۶-ب) و ضریب بازگشت (۶-ج) بر پاسخ فشار- نشست را نشان می‌دهد. مشخص است که ضریب اصطکاک لغزشی تأثیر نسبتاً زیادی بر فشار نشست صفحه دارد و لذا تعیین دقیق آن بسته به نوع و رطوبت خاک امری ضروری به نظر می‌رسد.

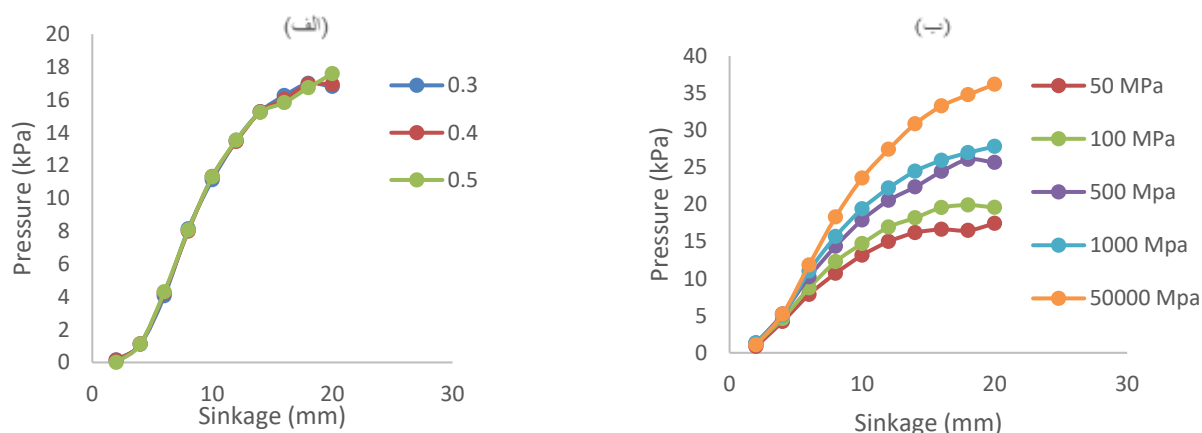


Figure 5. The effect of Poisson's ratio (A) and Shear modulus (B) on the pressure-sinkage response.

شکل ۵- اثر نسبت پواسون (الف) و مدول برشی (ب) بر نمودار فشار- نشست.

در ضریب اصطکاک ۰/۱ به دلیل سرش ذرات روی همدیگر سطح توده ذرات نشست کرده و بین صفحه و سطح توده ذرات فاصله افتاده به نحوی که تماس بین صفحه و ذرات خاک در حدود نشست ۲۰ mm اتفاق افتاده است. به نظر می‌رسد فشار نشست در انتهای کورس با ضریب اصطکاک به شکل خطی افزایش یافته است. تغییر در ضریب اصطکاک غلتشی تأثیر بسیار ناچیزی بر پاسخ فشار- نشست داشته است و اساساً فرض یک عدد در بازه ۰/۹-۰/۱ کفایت می‌کند که پیشنهاد می‌شود ضریب ۰/۵ در اعتبار سنجی مدل استفاده شود و نیازی به تعیین و اندازه‌گیری دقیق آن احساس نمی‌شود.

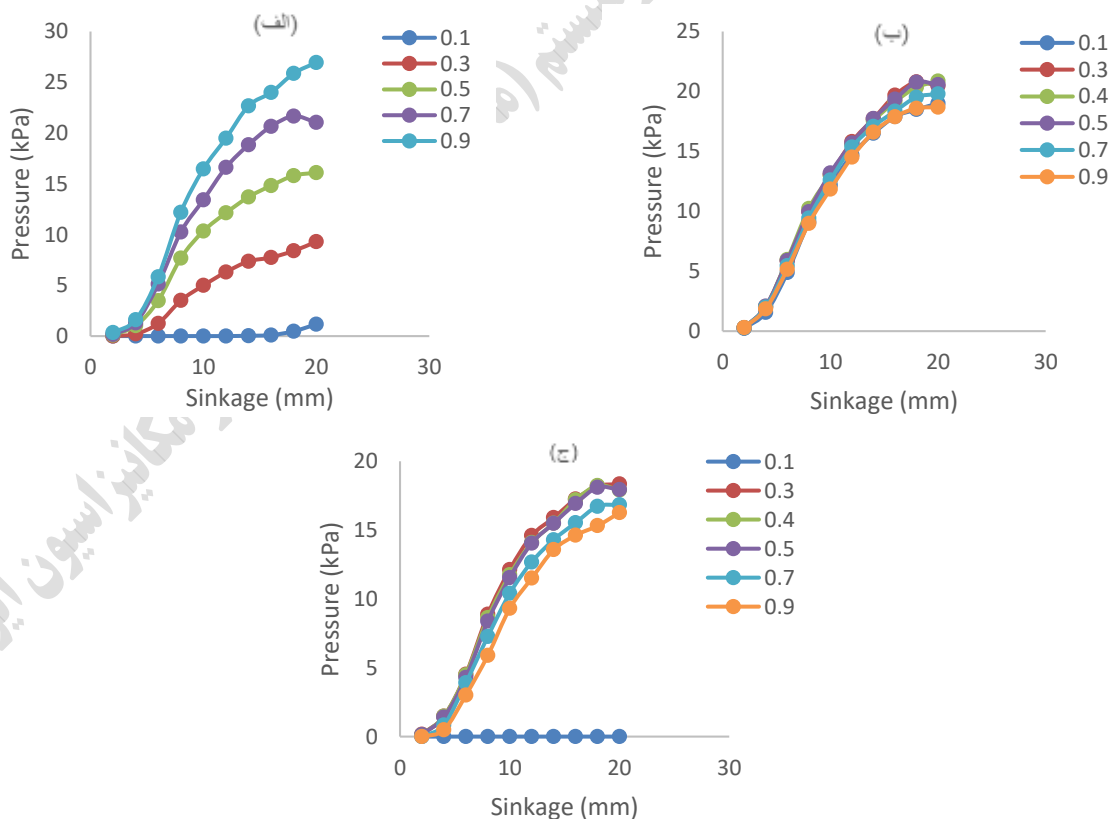


Figure 6. The effect of coefficient of friction (A), coefficient of rolling friction (B) and coefficient of restitution (C) on the pressure-sinkage response.

شکل ۶- اثر ضریب اصطکاک (الف) ضریب اصطکاک غلتشی (ب) و ضریب بازگشت (ج) بر نمودار فشار- نشست.

شکل ۷ اثر پارامترهای مدل تماسی شامل استحکام تسلیم فنر هیستریک (۷-الف) و انرژی چسبندگی پیوند ذرات (۷-ب) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در استحکام تسلیم ۱۰ kPa به دلیل کاهش استحکام ذرات در مقابل وزن اعمالی از طرف ذرات بالاتر در توده ذرات مقداری تغییر شکل پلاستیک در توده صورت گرفت. این تغییر شکل پلاستیک سبب تغییر در حجم توده ذرات و چگالی و ارتفاع ذرات شد. با تغییر ارتفاع ذرات به سمت پایین سبب شد که صفحه با حرکت به سمت پایین با ذرات برخورد نداشته باشد. در استحکام تسلیم 1×10^2 kPa تغییر ارتفاع وجود داشت اما کمتر از حالت قبل بود و صفحه در ۱۸ mm از حرکت خود با توده خاک برخورد کرد. در شبیه‌سازی نشان داده شد که در مقادیر کمتر از مقدار اولیه استحکام تسلیم کاهش چگالی و در مقادیر بالاتر از مقدار اولیه مقداری افزایش چگالی وجود داشت. شیب منحنی هم در مقادیر کمتر از مقدار اولیه کمتر و در مقادیر بیشتر از مقادیر اولیه بیشتر بود. افزایش انرژی چسبندگی در سطوح ۱۰ تا 200 kJ/m^3 تغییری در ارتفاع اولیه توده ذرات نداشت اما این تغییر سبب افزایش شیب نمودار نیرو نفوذ و تغییر این نمودار از حالت منحنی به سمت خطی گردید. افزایش این انرژی به 300 kJ/m^3 افزایش نیرو سبب شد تا حدی توده خاک متراکم شود و صفحه دو میلی‌متر پایین‌تر با توده برخورد کند. با افزایش مجدد این انرژی به 400 kJ/m^3 میزان نیروی چسبندگی به‌طور کامل بر استحکام ذرات فائق آمد و سبب از بین رفتن ذرات شد.

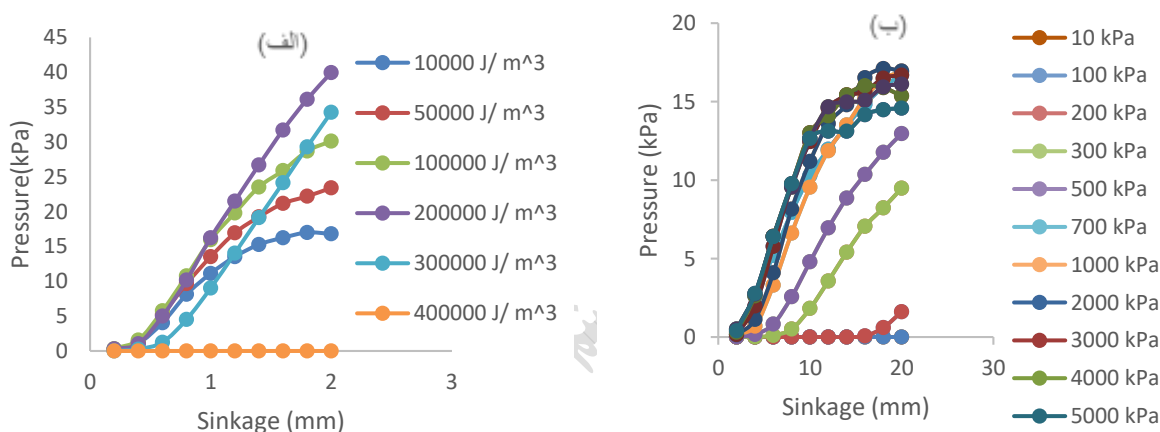


Figure 7. The effect of cohesive energy (A) and yield strength (B) on the force-sinkage curve.

شکل ۷- انرژی چسبندگی (الف) و استحکام تسلیم (ب) بر نمودار نیرو-نشست.

۴- نتیجه‌گیری

با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده جهت ارزیابی پارامتریک مدل فنر هیستریک - چسبندگی خطی نشست صفحه در خاک نتایج زیر قابل استخراج هستند.

- ۱- برای قطر ذرات ۷ mm با نسبت ۱ به ۴ برای قطر صفحه بارگذاری به قطر استوانه حاوی ذرات اثر شرایط مرزی حداقل می‌شود.
- ۲- سرعت نفوذ بر فشار نشست صفحه تأثیر بزرگی داشته لذا برای اعتبارسنجی مدل‌ها نیاز به انطباق و یا مقیاس بندی پاسخ‌های مدل نسبت به پاسخ واقعی با تغییر سرعت می‌باشد.
- ۳- نسبت پواسون تنها پارامتری است که تغییر آن هیچ تأثیری بر پاسخ فشار- نشست و چگالی ظاهری توده نداشت.
- ۴- مدول برشی، ضریب اصطکاک و انرژی چسبندگی اثر زیادی بر پاسخ فشار-نشست دارند.
- ۵- ضریب اصطکاک غلتشی تأثیر بسیار ناچیزی بر پاسخ فشار- نشست داشت.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از مرکز محاسبات سریع HPC دانشگاه شهرکرد جهت در اختیار قرار دادن ابرکامپیوتر جهت انجام این مطالعه قدردانی می‌کنند.



- Asaf, Z., Rubinstein, D., & Shmulevich, I. (2007). Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 227-242.
- Alexandrou, A., & Earl, R. (1997). Development of a technique for assessing the behaviour of soil under load. *Journal of agricultural engineering research*, 68(2), 169-180.
- Bentaher, H., Ibrahim, A., Hamza, E., Hbaieb, M., Kantchev, G., Maalej, A., & Arnold, W. (2013). Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 134, 11-16.
- Bekker, M.G. (1960). *Off the Road Locomotion*, University of Michigan Press, Ann Arbor. 11-16.
- Bin, C., Jianqiao, L., Rui, Z., & Yinwu, L. (2009, June). Pressure-sinkage model and experimental research of interaction between rigid-wheel and simulant lunar soil. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE* (pp. 1328-1333). IEEE.
- Coetzee, C. J. (2017). Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104-142.
- 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.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Formato, A., Faugno, S., & Paolillo, G. (2005). Numerical simulation of soil-plough mouldboard interaction. *Biosystems Engineering*, 92(3), 309-316.
- Garus, S., Nowak, M., Garus, J., Nabiałek, M., Szota, M., & Błoch, K. (2014). The influence of pressure to the stresses inside the plough body. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 66(2), 73-80.
- Jang, G., Lee, S., & Lee, K. J. (2016). Discrete element method for the characterization of soil properties in Plate-Sinkage tests. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(6), 2743-2751.
- Johnson, J. B., Kulchitsky, A. V., Duvoy, P., Iagnemma, K., Senatore, C., Arvidson, R. E., & Moore, J. (2015). Discrete element method simulations of Mars Exploration Rover wheel performance. *Journal of Terramechanics*, 62, 31-40.
- Micklethwaite, E. W. E. (1944). *Soil Mechanics in Relation to Fighting Vehicles*, Military College of Science, Chertsey.
- Nakashima, H., & Wong, J. Y. (1993). A three-dimensional tire model by the finite element method. *Journal of Terramechanics*, 30(1), 21-34.
- Onafeko, O., & Reece, A. R. (1967). Soil stresses and deformations beneath rigid wheels. *Journal of Terramechanics*, 4(1), 59-80.
- Smith, W., & Peng, H. (2013). Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 50(5-6), 277-287.
- Ucugul, M., Fielke, J. M., & Saunders, C. (2014). Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil. *Biosystems Engineering*, 121, 105-117.
- Ucugul, M., Fielke, J. M., & Saunders, C. (2015). Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: Accounting for soil cohesion and adhesion. *Biosystems Engineering*, 129, 298-306.
- Ucugul, M., Saunders, C., & Fielke, J. M. (2017a). Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 155, 44-54.
- Ucugul, M., Saunders, C., & Fielke, J. M. (2017b). Particle and geometry scaling of the hysteretic spring/linear cohesion contact model for discrete element modelling of soil-tool simulation. *ASABE Annual International Meeting*. Paper No. 1701372. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, MI, USA.
- Yong, R. N., & Fattah, E. A. (1976). Prediction of wheel-soil interaction and performance using the finite element method. *Journal of Terramechanics*, 13(4), 227-240.
- Tsuji, T., Nakagawa, Y., Matsumoto, N., Kadono, Y., Takayama, T., & Tanaka, T. (2012). 3-D DEM simulation of cohesive soil-pushing behavior by bulldozer blade. *Journal of Terramechanics*, 49(1), 37-47.