

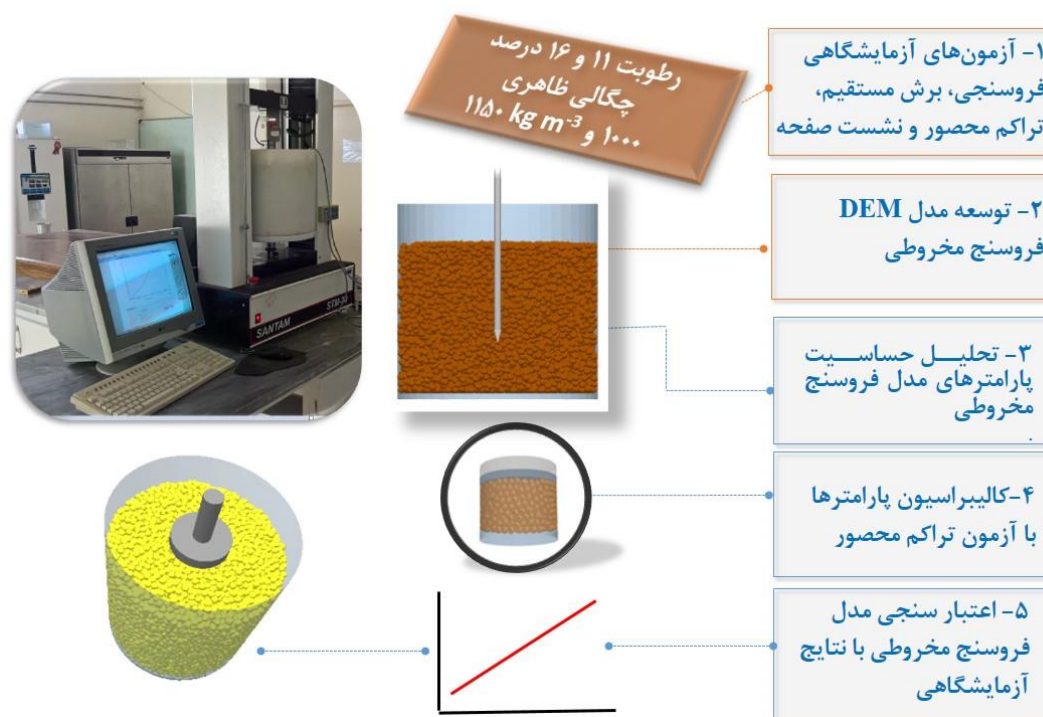
## Development and Calibration of a Discrete Element Model for Penetration Test in Cohesive Soil

Mostafa Bahrami<sup>1</sup>, Mojtaba Naderi-Boldaji<sup>\*</sup>, Davoud Ghanbarian<sup>2</sup>

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, College of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2. Department of Industrial Design, University of Art, Tehran, Iran.

(Received: May 16, 2021- Revised: Oct. 2, 2021- Accepted: Oct. 11, 2021)



**Abstract:** Cone penetration test is one of the methods widely used for measuring the soil mechanical strength. It can also be used as a simple method to calibrate soil parameters in the discrete element method (DEM) simulations. In this study, a DEM model for the interaction of a cone penetrometer with a clay loam soil was developed and the possibility of finding relationships between the cone index and the parameters of the model for different levels of moisture and soil density was investigated. A hybrid contact model, hysterical spring - linear cohesion was used to simulate the soil. Sensitivity analysis of the model parameters showed cohesion, coefficient of internal friction and particle yield strength are the most important parameters affecting the cone index. Laboratory cone penetration tests using a tension-compression loading frame were performed in remolded soil at two moisture contents of 11 and 16% each at two bulk densities of 1000 and 1150 kg m<sup>-3</sup>. By fitting the measured and simulated cone index- depth profiles, values for particle yield strength were obtained which showed a strong correlation ( $R^2 = 0.97$ ) with the maximum cone index in the tested soils. The results were validated using plate sinkage test. As a general conclusion, the cone penetration test can be used to calibrate the yield strength of soil particles in the discrete element simulations.

**Keywords:** Discrete element method, Calibration, Cone penetrometer, Soil-machine interaction.

## توسعه و واسنجی یک مدل اجزا گسسته آزمون فروسنجی در خاک

### چسبنده

مصطفی بهرامی<sup>۱</sup>، مجتبی نادری بلداجی<sup>۱\*</sup>، داود قنبریان<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد،

شهرکرد، ایران

۲. گروه طراحی صنعتی، دانشگاه هنر، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۷/۱۹)

چکیده: یکی از روش‌های متداول اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک، آزمون فروسنجی است. از این آزمون همچنین می‌توان به‌عنوان یک روش ساده برای واسنجی پارامترهای خاک در شبیه‌سازی با روش اجزا گسسته (DEM) استفاده نمود. در این مطالعه، یک مدل اجزا گسسته برای برهمکنش فروسنج با خاک لوم رسی توسعه داده شد و ارتباط بین شاخص مخروط و پارامترهای مدل اجزا گسسته با تغییر رطوبت و چگالی ظاهری خاک بررسی گردید. مدل تماسی هیبریدی فنر هیسترتیک - چسبندگی خطی برای شبیه‌سازی خاک استفاده شد. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که چسبندگی، ضریب اصطکاک داخلی و استحکام تسلیم ذرات از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر شاخص مخروط هستند. آزمون‌های آزمایشگاهی با یک مخروط استاندارد با استفاده از دستگاه کشش - فشار در خاک قالب‌گیری شده در دو رطوبت ۱۱ و ۱۶ درصد، هر کدام در دو سطح جرم مخصوص ظاهری ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شد. با انطباق رابطه شاخص مخروط - عمق اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، مقادیری برای تنش تسلیم ذرات استخراج گردید که همبستگی بسیار قوی ( $R^2=0.97$ ) با بیشینه شاخص مخروط نشان داد. این نتایج با آزمون نشست صفحه‌ای در خاک نیز اعتبارسنجی شد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، آزمون فروسنجی را می‌توان برای واسنجی تنش تسلیم ذرات خاک در مدل اجزا گسسته به کار گرفت.

واژه‌های کلیدی: نشست صفحه‌ای، واسنجی، فروسنج مخروطی، برهمکنش ماشین و خاک.

## مقدمه

فروسنج‌ها<sup>۱</sup> به‌طور گسترده به‌عنوان یک ابزار عملی برای ارزیابی مقاومت مکانیکی خاک نه تنها در مهندسی کشاورزی، بلکه در مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Vaz et al., 2011). شاخص مخروط (CI) بیانگر نیرو در واحد سطح مورد نیاز برای نفوذ یک مخروط با ابعاد و سرعت استاندارد در خاک است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که شاخص مخروط نه تنها به جرم مخصوص ظاهری خاک، بلکه به محتوای رطوبت و بافت خاک نیز بستگی دارد (Lin et al., 2014).

انجمن مهندسی کشاورزی و سامانه‌های زیستی آمریکا<sup>۳</sup> ابعاد و اندازه‌های مخروط، همچنین روش آزمون فروسنجی را در قالب استانداردهایی (ASABE Standards S313.3, 2013; ASABE Standards EP542, 2019) منتشر نموده است. مخروط‌ها در دو اندازه کوچک (با قطر ۱۲/۸۳ میلی‌متر) و بزرگ (با قطر ۲۰/۲۷ میلی‌متر) به ترتیب برای استفاده در خاک‌های متراکم و نرم توصیه شده‌اند. مخروط کوچک معمولاً بر روی فروسنج‌های دستی و مخروط بزرگ بر روی فروسنج‌های تراکتوری (Naderi-Boldaji et al., 2008) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌سازی برهم‌کنش ماشین - خاک شامل عملیات خاک‌ورزی، برش و جابجایی خاک و تردد ماشین بر روی خاک به دلیل تغییرپذیری مکانی، رفتار غیرخطی و اثرات دینامیکی و جریان پذیری خاک، یک فرایند پیچیده است (Asaf et al., 2007). روش‌های شبیه‌سازی عددی شامل روش المان محدود (FEM) و روش اجزا گسسته (DEM) برای شبیه‌سازی این برهم‌کنش‌ها و پرهیز از آزمون‌های آزمایشگاهی و مزرع‌ای پرهزینه و وقت‌گیر توسط مهندسان طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند. با پیشرفت‌های حاصل شده در فن‌آوری اطلاعات و کامپیوتر، شبیه‌سازی‌های عددی به‌ویژه برای

خاک و خاک‌ورزی و تعامل خاک و چرخ محبوبیت بیشتری پیدا کرده است (Mouazen & Neményi, 1998; Kotrocz et al., 2016). مطالعات زیادی تاکنون برای شبیه‌سازی رابطه ماشین و خاک با روش FEM (Navid & Mohammadi Bane., 2011; Naderi-Boldaji et al., 2018; Azimi-Nejadian et al., 2019) و یا DEM (Shahqoli & Shahi, 2010; Ucgul et al., 2017a; Zeng & Chen, 2019; Khairali pour., 2020; Saunders et al., 2021; Sadek et al., 2021; Zeng et al., 2021) انجام شده است.

روش اجزا گسسته یک روش عددی قدرتمند است که در ابتدا برای تحلیل مکانیک سنگ توسط Cundall & Strack (1979) معرفی شد. در مدل‌سازی روش اجزا گسسته، ماده توسط ذرات گسسته که از طریق نیروهای تماسی در تعامل هستند، شبیه‌سازی می‌شود. نیروهای تماسی بین ذرات با استفاده از مدل‌هایی از فنر و میراگر محاسبه می‌شوند. موقعیت‌ها و سرعت ذرات با ادغام قوانین حرکت نیوتن با در نظر گرفتن نیروی کل وارده بر هر ذره محاسبه می‌شود. نمایش گسسته مواد در DEM برخی از مزایای مهم را در مقایسه با مدل‌سازی با روش‌های مکانیک پیوسته ارائه می‌دهد. DEM قادر به شبیه‌سازی فرایندهایی است که تغییر شکل‌های ناپیوسته بزرگ در آن رخ می‌دهد (Janda & Ooi, 2016). استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای گسسته برای مهندسان طراحی ماشین‌های کشاورزی نیازمند تعیین پارامترهای DEM جهت مدل‌سازی مسائل است. به‌طور کلی برای تعیین پارامترهای یک مدل اجزا گسسته از دو روش اندازه‌گیری پارامترها در سطح ذرات و واسنجی پارامترها از طریق انطباق بین رفتارهای شبیه‌سازی شده و واقعی توده ذرات مورد نظر استفاده می‌شود (Coetzee, 2017). به‌طور معمول برای واسنجی مدل‌های اجزا گسسته در مسائل رابطه ماشین و خاک از آزمون‌های ساده مکانیک خاک از قبیل آزمون تراکم

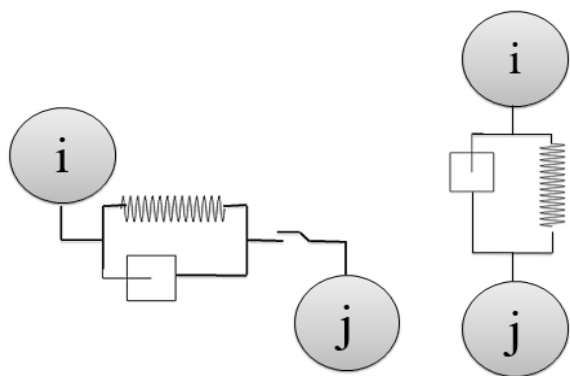
هرتز-میندلین با این آزمایش‌های فیزیکی نشان داد. Sadek *et al.* (2017) از آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامترهای مدل یک ستون سه لایه از خاک لومی در دو حالت خشک و تر به کمک مدل تماسی پیوند موازی (PBM) استفاده کردند. در این مطالعه بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده در مطالعه گذشته با استفاده از مدل تماسی هرتز-میندلین (Sadek & Chen, 2015)، سفتی ذره به‌عنوان پارامتر اصلی جهت واسنجی با استفاده از شاخص مخروط تعیین شد. Syed *et al.* (2017) هم از آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامترهای مدل هرتز-میندلین با تغییر در جرم مخصوص استفاده کردند. Zhang *et al.* (2019) برای واسنجی مدل ذرات شن کوارتز از آزمون فروسنجی با کنترل جرم مخصوص خاک و انرژی نفوذ استفاده کردند. Tamas & Toth (2019) در شبیه‌سازی حرکت پنجه غازی در خاک با دو لایه با رطوبت‌های مختلف، برای واسنجی پارامترهای ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی از آزمون فروسنجی استفاده کردند. در این مطالعه مدل تماسی پیوند موازی برای خاک رس شنی استفاده شد. Tekeste *et al.* (2020) واسنجی پارامترهای مدل مورد نیاز برای شبیه‌سازی حرکت بولدوزر در خاک شن لومی با مدل تماسی هرتز-میندلین را توسط آزمون فروسنجی انجام دادند. در مطالعه شبیه‌سازی حرکت خاک‌ورز قلمی توسط (2021) *et al.* Kesner از آزمون فروسنجی جهت واسنجی پارامتر چسبندگی خاک با سه لایه از ذرات با قطر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین توسط Aikins *et al.* (2021) به کمک آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامتر مدول یانگ و استحکام تسلیم ذرات در یک حالت خاک با مدل فنر هیسترتیک-چسبندگی خطی استفاده شده و حرکت خاک‌ورز قلمی شبیه‌سازی شده است. با توجه به سادگی آزمون فروسنجی در مطالعات

تک‌محوری (De Pue *et al.*, 2019)، نشست صفحه‌ای (Bahrami *et al.*, 2020)، برش مستقیم (Keppler *et al.*, 2015; Kanyawi & Shahgholi, 2018)، تحکیم سه‌بعدی (Bravo *et al.*, 2014)، زاویه استقرار (Barr *et al.*, 2020)، حرکت ابزار ساده در خاک (Sadek & Chen, 2015) و یا آزمون فروسنجی (Kesner *et al.*, 2021) استفاده می‌شود.

در حالت ایده‌آل، همه پارامترهای مدل DEM که بر رفتارهای واکنش خاک (نیروها و حرکت ذرات) در یک سیستم ماشین-خاک تأثیر می‌گذارند، می‌توانند واسنجی شوند. اندازه‌گیری پارامترها در سطح تعامل بین ذرات (یا در مقیاس دو ذره در تعامل) برای موادی مانند خاک عملاً غیر ممکن است. از این منظر معمولاً مقادیر پارامترهای حساس با اثرگذاری قابل توجه مورد واسنجی قرار می‌گیرند. رویکرد منطقی این است که در ابتدا با تحلیل حساسیت، تعداد محدودی از پارامترهای مهم مدل DEM که به شدت بر پاسخ توده‌ای خاک در برابر ابزارها تأثیر می‌گذارد را انتخاب نموده و سپس با واسنجی این پارامترهای مهم با آزمون‌های ساده، مدل اصلی توسعه داده شود (Coetze, 2017; Tekeste *et al.*, 2020).

مدل‌سازی واکنش خاک در حین نفوذ مخروط برای واسنجی پارامترهای مواد در مدل اجزا گسسته (DEM) می‌تواند برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی خاک از جمله فرایندهای توأم با برش و تراکم خاک مفید باشد (Tekeste *et al.*, 2020). به همین دلیل در برخی از مطالعات برهم‌کنش خاک و ابزار، از آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامترهای مدل در روش اجزا گسسته استفاده شده است. Ucgul *et al.* (2014) برای واسنجی یک مدل برای شبیه‌سازی حرکت پنجه غازی در خاک شنی از نفوذ مخروط و دیسک استفاده کردند. مدل تماسی هیسترتیک ارتباط بهتری نسبت به مدل تماسی

ذرات  $i$  و  $j$ ،  $m_i$  جرم ذره  $i$ ،  $g$  شتاب گرانشی، گشتاور  $T_{ij}$  حاصل از مؤلفه مماسی نیروی برخورد بین ذرات  $i$  و  $j$ ،  $I_i$  ممان اینرسی ذره  $i$  و  $\dot{\omega}_i$  سرعت زاویه‌ای ذره  $i$  است. نقطه‌های بالانویس در معادلات ۱ و ۲ نشان‌دهنده مشتق زمانی هستند. نیروی تماسی  $f_{ij}$  روی ذره  $i$  را می‌توان به  $f_N$  (مؤلفه عمودی) و  $f_s$  (مؤلفه مماسی) تجزیه کرد، که هر مؤلفه با استفاده از اجزا مکانیکی ساده مانند فنر، میراگر و یک لغزنده اصطکاکی مانند شکل ۱ مدل‌سازی می‌شود. فنر نشان‌دهنده ذخیره انرژی هنگام تغییر شکل الاستیک ذرات در تماس و میراگر نشان‌دهنده اتلاف انرژی در سیستم فنر و ذره است. در جهت مماس از یک لغزنده اصطکاکی برای در نظر گرفتن اصطکاک لغزشی بین ذرات استفاده می‌شود (Tsuji et al., 2012). با وجود لغزنده در جهت مماسی، نیروی مماسی بین دو ذره حداکثر می‌تواند به اندازه نیروی اصطکاک بین دو ذره باشد.



شکل ۱. مدل تماس دو ذره  $i$  و  $j$  در جهت عمود (راست) و مماس (چپ) در روش اجزا گسسته.

در یک تماس کاملاً الاستیک (یعنی یک فنر خطی)، انرژی کرنشی جذب شده در بارگذاری کاملاً در حین باربرداری بازیابی می‌شود در حالی که در یک تماس الاستیک-پلاستیک (یعنی فنر هیسترتیک)، انرژی کرنشی فقط تا یک تنش از پیش تعریف شده بازیابی می‌شود (Walton & Braun, 1986). همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در فنر هیسترتیک، نیروی باربرداری قبل از بازیابی جابجایی به نقطه تماس اولیه،

مزرعه‌ای یا در صندوق خاک، در این مطالعه امکان واسنجی پارامترهای DEM خاک‌های دارای چسبندگی در رطوبت و چگالی‌های ظاهری مختلف در شبیه‌سازی مسائل برهم‌کنش ماشین/ ابزار با استفاده از مدل هیبریدی فنر هیسترتیک-چسبندگی خطی مد نظر قرار گرفت. لذا هدف اصلی این مطالعه توسعه یک مدل آزمون فروسنجی در خاک با استفاده از روش DEM برای تعیین پارامترهای قابل واسنجی با استفاده از این آزمون است. با توجه به مدل تماسی مورد استفاده، در صورتی که بتوان برخی پارامترهای قابل اندازه‌گیری با روش‌های استاندارد مانند چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی را با اندازه‌گیری مستقیم بر روی خاک تعیین نمود، آزمون فروسنج می‌تواند برای واسنجی یک پارامتر غیر قابل اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. نظر به اینکه استفاده از آزمون فروسنج برای واسنجی پارامترهای مدل تماسی فنر هیسترتیک-چسبندگی خطی تاکنون کمتر مورد توجه بوده است. مطالعه حاضر برای توسعه دانش در روش شبیه‌سازی DEM و ارائه آزمون‌های ساده قابل استفاده برای واسنجی پارامترها دارای اهمیت است. در این مطالعه از آزمون نشست صفحه‌ای نیز برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از واسنجی پارامترها استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

### مدل تماسی فنر هیسترتیک - چسبندگی خطی

روش اجزای گسسته روشی برای مطالعه رفتار فیزیکی مواد دانه‌ای است. این روش مبتنی بر فیزیک تماس در برخورد است که در آن حرکت ذرات با حل معادله نیوتن برای ذرات منفرد مشخص می‌شود. رابطه‌های ۱ و ۲ حرکت خطی و چرخشی ذره  $i$  در تماس با ذره  $j$  را توصیف می‌کنند (Tsuji et al., 2012):

$$\ddot{r}_i = \sum_j \frac{f_{ij}}{m_i} + g \quad (\text{رابطه ۱})$$

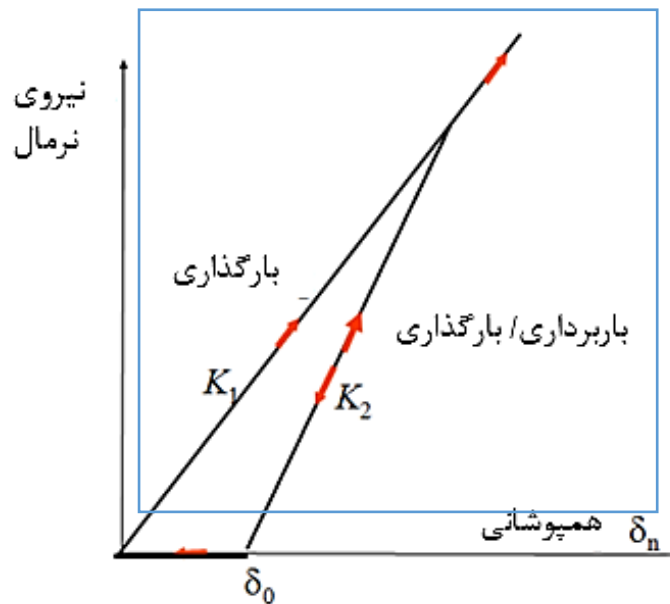
$$\dot{\omega}_i = \frac{\sum_i T_{ij}}{I_i} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که  $r$  بردار موقعیت ذره  $i$ ،  $f_{ij}$  نیروی تماس بین



بارگذاری جدید با شیب  $K_2$  بارگذاری می‌شود. هر بارگذاری مجدد قبل از نقطه اتصال دو مسیر نیرو از شیب  $K_2$  و پس از رسیدن به نقطه اتصال از شیب  $K_1$  پیروی می‌کند تا زمانی که باربرداری صورت پذیرد (DEM Solutions, 2014).

به صفر می‌رسد. مقدار  $\delta_0$  نشان‌دهنده همپوشانی باقیمانده بین دو ذره است که به دلیل تغییر شکل پلاستیک در منطقه تماس باقیمانده است. تماس اولیه در طول شیب  $K_1$  اتفاق می‌افتد اما باربرداری با شیب  $K_2$  صورت می‌پذیرد. تماس بعدی در طول مسیر



شکل ۲. رابطه نیروی فنر هیسترتیک - همپوشانی بین دو ذره در مدل تماسی فنر هیسترتیک (DEM Solutions, 2014).  $\delta_n$  همپوشانی عمودی کل،  $\delta_0$  همپوشانی باقی‌مانده،  $K_1$  سفتی فنر در بارگذاری اولیه و  $K_2$  سفتی فنر در بارگذاری مجدد است.

می‌شود (Walton, 2006):

$$e = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در مدل چسبندگی خطی، نیروی تماس با اضافه کردن یک نیروی چسبندگی عمودی اصلاح می‌شود (Ucgul et al., 2017b) و معادله نیروی چسبندگی برابر است با

$$F = -kA \quad (\text{رابطه ۸})$$

که  $k$  چگالی انرژی چسبندگی (ژول بر متر مکعب) که با در نظر گرفتن ژول هم‌ارز با نیوتن در متر معادل چسبندگی (پاسکال) است و  $A$  مساحت همپوشانی بین ذرات است.

مدل‌سازی آزمون فروسنجی مخروط

برای مدل‌سازی اجزا گسسته آزمون فروسنجی از ذرات

نیروی تماس عمودی با روابط ۳ تا ۵ بیان می‌گردد:

$$\begin{cases} F_n = K_1 \delta_n & K_1 \delta_n < K_2 (\delta_n - \delta_0) & \text{بارگذاری} & (\text{رابطه ۳}) \\ F_n = K_2 (\delta_n - \delta_0) & \delta_n > \delta_0 & \text{باربرداری/بارگذاری} & (\text{رابطه ۴}) \\ F_n = 0 & \delta_n \leq \delta_0 & \text{باربرداری} & (\text{رابطه ۵}) \end{cases}$$

که  $\delta_n$  همپوشانی عمودی کل در نقطه تماس و  $\delta_0$  همپوشانی باقی‌مانده است. سفتی فنر در  $K_2 = K_1$  یک تماس کاملاً الاستیک را نشان می‌دهد. سفتی بارگذاری،  $K_1$ ، به استحکام تسلیم ذرات شرکت‌کننده در تماس مربوط می‌شود (Walton, 2006):

$$K_1 = 5R^* \min(Y_1 \text{ and } Y_2) \quad (\text{رابطه ۶})$$

که  $R^* = 1 / (1 / R_i + 1 / R_j)$  شعاع معادل دو ذره و  $Y_1$ ،  $Y_2$  استحکام تسلیم ذرات شرکت‌کننده در تماس است. ضریب بازگشت از  $K_1$  و  $K_2$  محاسبه

به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. از آنجا که ممکن است آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامترها در یک مدل بزرگ‌تر (برای مثال اثر متقابل چرخ-خاک) مورد استفاده قرار گیرد که تعداد ذرات در آن بیشتر خواهد بود، اندازه ذرات در مدل فروسنج با هدف امکان استفاده از این مدل در واسنجی پارامترها برای شبیه‌سازی مسائل بزرگ‌تر انتخاب شد، چرا که استفاده از ذرات خیلی ریز در مسائل با ابعاد بزرگ منجر به افزایش چشمگیر تعداد ذرات و زمان حل مسئله خواهد شد که کارایی این روش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقادیر اولیه برای پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی از مطالعه Ucgul et al. (2017c) استخراج شد که در یک خاک شن لومی انجام شده بود (جدول ۱).

جدول ۱. مقادیر اولیه پارامترهای اجزای گسسته به کار رفته در شبیه‌سازی آزمون فروسنج مخروطی در خاک (Ucgul et al., 2017c).

مقادیر	خواص
۲۶۰۰	جرم مخصوص ذره (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷۸۶۱	جرم مخصوص استیل (کیلوگرم بر متر مکعب)
۵۸۰	جرم مخصوص تفلون <sup>®</sup> ABS (کیلوگرم بر متر مکعب)
۵۰	مدول برشی ذرات خاک (مگا پاسکال)
۷۸	مدول برشی استیل (گیگا پاسکال)
۷۱۵	مدول برشی تفلون ABS (مگا پاسکال)
۰/۳	نسبت پواسون ذرات خاک
۰/۳	نسبت پواسون استیل
۰/۴	نسبت پواسون تفلون ABS
۱	استحکام تسلیم ذرات خاک (مگا پاسکال)
۰/۶	ضریب بازگشت خاک - خاک
۰/۵	ضریب اصطکاک داخلی خاک - خاک
۰/۵	ضریب اصطکاک لغزشی بین خاک و استیل
۰/۷	ضریب اصطکاک لغزشی بین خاک و ABS
۰/۲۸	ضریب اصطکاک غلتشی خاک - استیل
۰/۱۷	ضریب اصطکاک غلتشی خاک - خاک
۰/۰۵	ضریب اصطکاک غلتشی خاک - تفلون ABS
۵	چسبندگی (کیلوژول بر متر مکعب)

\*آکرپلونیتریل بوتادین استایرن

مورد استفاده در آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد (شکل ۳، الف). کنترل جرم مخصوص ظاهری اولیه ذرات در شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک صفحه دایره‌ای هم قطر با سیلندر و با اعمال تنش فشاری بر توده ذرات قبل از اجرای آزمون فروسنجی انجام شد. پس از توسعه مدل، شبیه‌سازی‌هایی جهت بررسی اثر سرعت نفوذ (در سه سطح ۸، ۱۶ و ۲۴ میلی‌متر بر ثانیه)، قطر مخروط (دو اندازه کوچک و بزرگ استاندارد ASABE) و ضریب اصطکاک میله با خاک (در سه سطح صفر، ۰/۵ و ۱) بر شاخص مخروط اجرا شد. هدف از اجرای این شبیه‌سازی‌ها، بررسی اثر سرعت نفوذ و اصطکاک میله با خاک بر شاخص مخروط جهت درک میزان اهمیت انتخاب مقادیر برای این پارامترها بود، چرا که در صورت عدم تاثیر معنی‌دار این پارامترها می‌توان برخی مقادیر فرضی برای آن در نظر گرفت. مقایسه دو قطر کوچک و بزرگ مخروط نیز با هدف بررسی اثر نسبت قطر مخروط به قطر ذرات بر میزان نوسانات شاخص مخروط در شبیه‌سازی انجام شد.

در این مطالعه ابتدا پارامترهای اصلی مدل که بیشترین تاثیر بر شاخص مخروط را داشتند با تحلیل حساسیت انتخاب شدند. برای تحلیل حساسیت هر پارامتر، سایر پارامترها در مقدار اولیه (فرضی) خود مطابق جدول ۱ قرار داده شد و پارامتر مربوطه در چند سطح متفاوت آزمون شد. میزان ضرایب اصطکاک داخلی، اصطکاک غلتشی و ضریب بازگشت در محدوده ۰/۱ تا ۰/۹ انتخاب گردید (Jang et al., 2016). مدول برشی ذرات نیز از ۵۰ مگا پاسکال (خاک لوم شنی) (Ucgul et al., 2017c) تا ۵۰ گیگا پاسکال (شن کوارتز) بررسی گردید (Asaf et al., 2007). چسبندگی از ۱۰ تا ۹۰ کیلو پاسکال (Tamas & Toth, 2019) و استحکام تسلیم ذرات هم در سطوح ۰/۲، ۰/۵ (Barr et al., 2018) تا ۱ مگا پاسکال (Ucgul et al., 2017c) و یک سطح بالاتر (۳ مگا پاسکال) مورد بررسی قرار گرفت. در همه آزمون‌های شبیه‌سازی شده در این بخش جهت

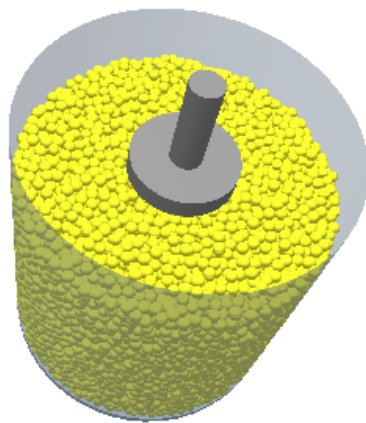
مخروط فولادی با قطر ۱۲/۸۳ میلی‌متر با زاویه نوک ۳۰ درجه مطابق با اندازه کوچک استاندارد ASABE S313 و سیلندر از جنس تفلون ABS با قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر مشابه ابعاد سیلندر

واسنجی شد. برای سایر پارامترها (با تاثیرگذاری ناچیز یا بی تاثیر) در شبیه‌سازی و قیاس با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی فروسنج، از مقادیر موجود در جدول ۱ استفاده شد (Ucgul et al., 2017c). در حل مسائل توسط نرم‌افزار EDEM گام زمانی حل برابر ۲۰-۴۰ درصد گام زمانی ریلی پیشنهاد می‌شود که در این مطالعه به‌طور میانگین ۳۰ درصد (Ucgul et al., 2017b) این زمان انتخاب شد. رابطه ۹ گام زمانی ریلی را نشان می‌دهد.

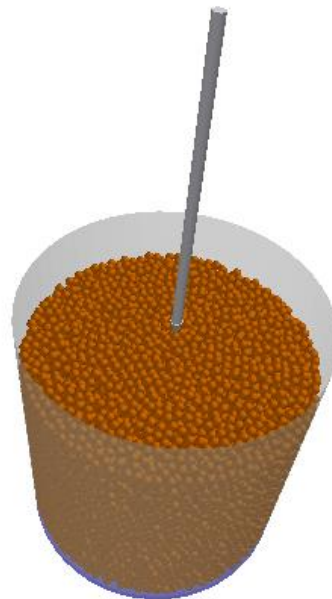
$$T_r = \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0.1631\nu + 0.8766} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن R شعاع ذرات، ρ جرم مخصوص ذرات، ν نسبت پواسون و G مدول برشی ذرات است.

کاهش زمان شبیه‌سازی، عمق نفوذ مخروط ۱۵۰ میلی‌متر و سرعت نفوذ ۸ میلی‌متر بر ثانیه بود. پس از تعیین پارامترهای حساس جهت واسنجی مدل با این فرض اولیه که دو پارامتر ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی در ذرات DEM می‌توانند با مقادیر متناظر خود از آزمون تجربی برش مستقیم در خاک برابر باشند (Ucgul et al., 2015)، آزمون آزمایشگاهی برش مستقیم برای خاک‌های مورد مطالعه با همان شرایط محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری انجام شد. دیگر پارامتر مهم مدل (استحکام تسلیم ذرات) بر اساس تحلیل حساسیت پارامترها، به کمک مدل آزمون فروسنجی با انطباق نتایج شاخص مخروط در مقابل عمق برای آزمون تجربی و شبیه‌سازی اجزای گسسته



(ب)



(الف)

شکل ۳. مدل شبیه‌سازی شده با روش اجزای گسسته برای (الف) آزمون فرو سنجی و (ب) آزمون نشست صفحه‌ای جهت اعتبار سنجی (Bahrami et al., 2020).

آزمون نشست صفحه‌ای مقایسه شد.

آزمون‌های آزمایشگاهی

آزمون‌های آزمایشگاهی نفوذ مخروط بر روی یک خاک لوم رسی (۳۴ درصد رس، ۳۰ درصد سیلت و ۳۶ درصد شن) در دو سطح رطوبتی ۱۱ و ۱۶ درصد هرکدام در

جهت اعتبار سنجی پارامترهای تعیین‌شده با آزمون فروسنجی از آزمون نشست صفحه‌ای در توده ذرات استفاده شد (شکل ۳، ب). در این آزمون با نشست یک صفحه دایره‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر در توده ذرات، نمودار تنش-نشست به دست آمده و با نتایج تجربی



تفلونی تا سطح جرم مخصوص ظاهری مد نظر متراکم گردید. دستگاه آزمون کشش- فشار دارای دو فک متصل به صفحات فولادی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر است که با اتصال به لودسل با ظرفیت‌های بار متفاوت قابلیت اندازه‌گیری و ثبت نیرو-جابجایی را دارد. این دستگاه دارای نرم‌افزاری جهت نمایش گراف‌ها و خروجی ثبت شده با توجه به نوع آزمون می‌باشد.

برای اجرای آزمون فروسنجی از مخروط فولادی با ابعاد توصیه‌شده در استاندارد ASABE مشابه مخروط شبیه‌سازی شده استفاده گردید. میله‌ای با قطر ۹/۵۳ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متر از یک طرف به انتهای مخروط و از طرف دیگر به لودسل دستگاه آزمون کشش- فشار (Bongshin, South Korea) به ظرفیت ۲۰ کیلو پاسکال متصل شد (شکل ۴، الف). برای هر شرایط خاک، آزمون فروسنجی با سه تکرار انجام گرفت.

دو سطح جرم مخصوص ظاهری ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. خاک مورد نظر از الک با قطر ۲ میلی‌متر عبور داده شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشکانده شد. پس از خروج از آون و سرد شدن، رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به سطح رطوبت انتخاب شده با اسپری به خاک اضافه شد و پس از اختلاط کامل خاک به مدت یک روز درون یخچال قرار داده شد تا به یک رطوبت کاملاً یکنواخت برسد. جهت به دست آوردن جرم مخصوص مورد نظر در هر سطح رطوبت، خاک در یک سیلندر از جنس تفلون ABS به کمک دستگاه آزمون کشش- فشار اینسترون (Santam, STM20, Iran) در دو لایه متراکم گردید. بدین منظور، جرم خاک هر لایه توزین شده و سپس با یک صفحه فلزی هم قطر با سیلندر



(ب)



(الف)

شکل ۴- (الف) آزمون فروسنجی مخروطی و (ب) آزمون نشست صفحه‌ای با استفاده از دستگاه آزمون کشش- فشار اینسترون

با ابعاد  $20 \times 100 \times 100$  میلی‌متر قالب‌گیری شدند. آزمون در سه سطح تنش عمودی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلو پاسکال در سرعت برش ۰/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه و در سه تکرار انجام شد. نتایج ضریب اصطکاک داخلی و

آزمون برش مستقیم جهت اندازه‌گیری چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی بر روی خاک‌ها انجام گرفت. خاک‌های مورد مطالعه در همان شرایط محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری در جعبه دستگاه برش مستقیم

چسبندگی در جدول ۲ نشان داده شده است.

در مرحله بعد جهت اعتبارسنجی پارامترهای واسنجی شده با آزمون فروسنجی، آزمون‌های تجربی نشست صفحه‌ای (شکل ۴-ب) در دو شرایط محتوای رطوبت ۱۱٪ - جرم مخصوص ظاهری ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و محتوای رطوبت ۱۶٪ - جرم مخصوص ظاهری ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شد. این آزمون توسط صفحه بارگذاری به قطر ۱۰۰ میلی‌متر (فک بالایی دستگاه اینسترون) تا عمق ۲۰ میلی‌متر با سرعت نشست ۸ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد.

جدول ۲. ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی بدست آمده از آزمون برش مستقیم برای نمونه خاک‌های آزمون شده

چسبندگی (کیلو پاسکال)	ضریب اصطکاک	سطح محتوای رطوبت (%) - جرم مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر متر مکعب)
۴/۱۱	۰/۲۵	۱۰۰۰ - ۱۱
۶/۷۹	۰/۲۴	۱۱۵۰ - ۱۱
۵/۹۳	۰/۱۸	۱۰۰۰ - ۱۶
۶/۹۴	۰/۱۷	۱۱۵۰ - ۱۶

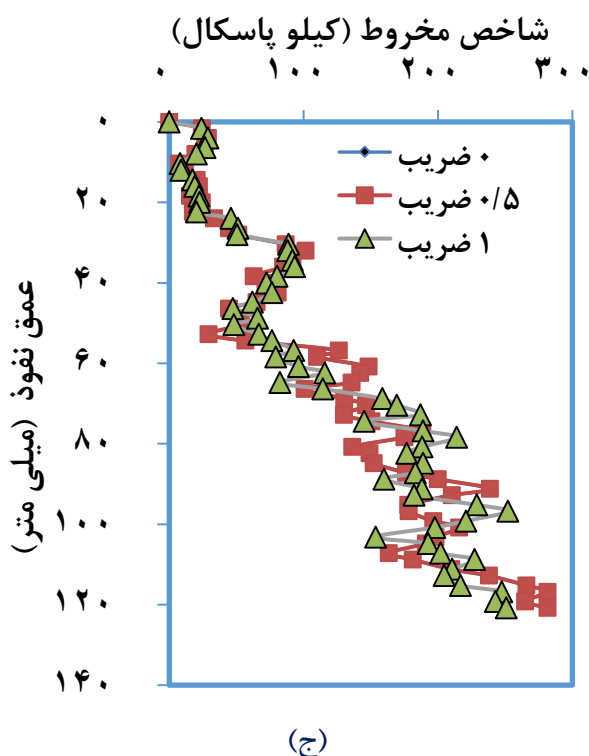
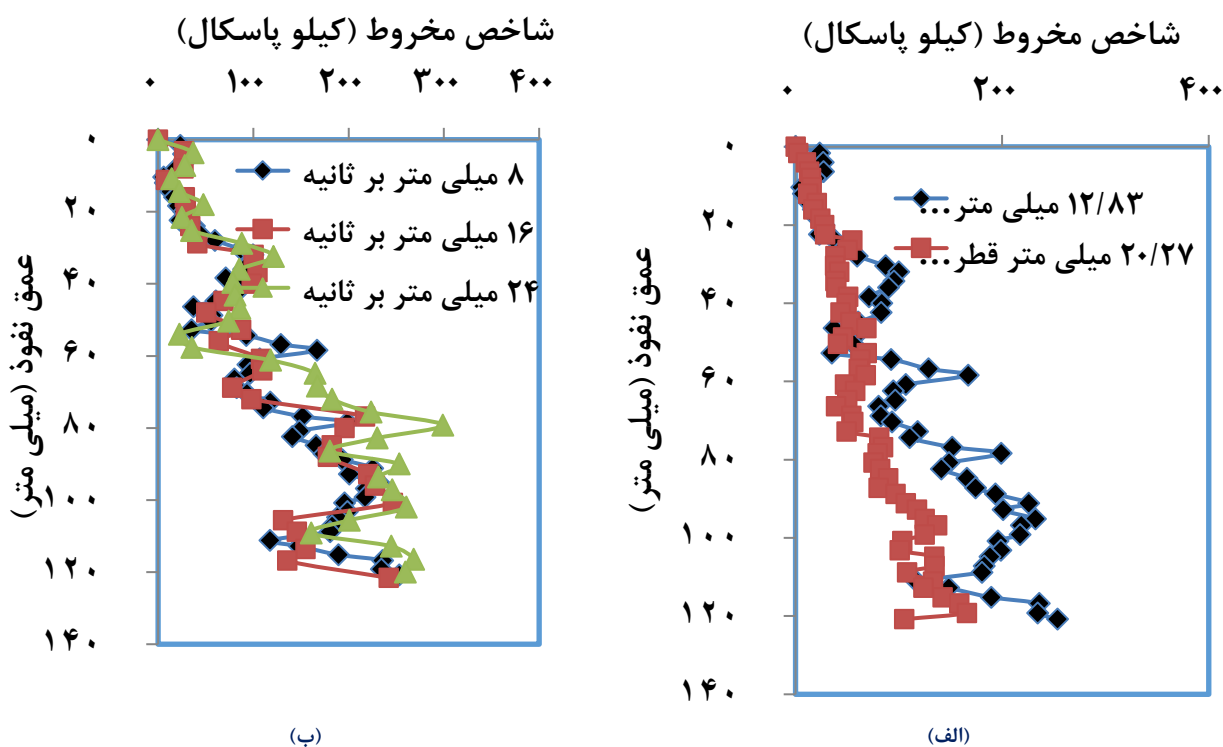
## نتایج و بحث

آنالیز حساسیت پارامترهای آزمون فروسنجی و خصوصیات خاک

شکل ۵-الف شاخص مخروط با عمق را برای دو مخروط کوچک (با قطر ۱۲/۸۳ میلی‌متر) و بزرگ (با قطر ۲۰/۲۷ میلی‌متر) استاندارد ASABE نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای خصوصیات یکسان خاک، شاخص مخروط برای مخروط با قطر بزرگ‌تر به‌طور میانگین ۲۵٪ کمتر از شاخص مخروط به دست آمده با مخروط کوچک‌تر شده است. این نتیجه انطباق بسیار نزدیکی با نتایج تجربی (Sudduth et al., 2004) دارد که شاخص مخروط حاصل از مخروط بزرگ‌تر را حدود ۳۰ درصد کوچک‌تر از مخروط کوچک استاندارد گزارش نمودند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده نوسانات بیشتر شاخص مخروط با عمق برای مخروط

کوچک‌تر نسبت به مخروط بزرگ‌تر است. این نتیجه می‌تواند تا حد زیادی در ارتباط با نسبت قطر مخروط به قطر ذرات شبیه‌سازی شده باشد که با بزرگ‌تر شدن این نسبت، تعداد ذرات در تماس با مخروط افزایش یافته و شدت نوسانات در شاخص مخروط را کاهش داده است. با اینحال استفاده از مخروط با قطر بزرگ‌تر بخصوص در خاک‌های متراکم امکان اندازه‌گیری با فروسنج‌های دستی را محدود نموده و مستلزم بکارگیری فروسنج‌های هیدرولیکی است.

شکل ۵-ب اثر سرعت نفوذ بر شاخص مخروط را نشان می‌دهد. برای محدوده آزمون شده، سرعت نفوذ اثر معنی‌داری بر شاخص مخروط نشان نمی‌دهد. (Sudduth et al., 2004) در بررسی اثر سرعت نفوذ مخروط، هیچ تفاوتی را در محدوده ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه (مقدار توصیه شده در استاندارد ASABE) تا ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه گزارش نکردند. عدم تاثیر سرعت بر شاخص مخروط می‌تواند باعث سهولت در اندازه‌گیری شود چرا که نیاز به کنترل دقیق سرعت نمی‌باشد. در شکل ۵-ج اثر ضریب اصطکاک بین میله با توده ذرات بررسی شده است. تغییرات ضریب اصطکاک میله با توده ذرات اثر مشخصی بر تغییر شاخص مخروط نداشته است، لذا تعیین مقدار دقیق برای ضریب اصطکاک میله با خاک ضروری به نظر نمی‌رسد. علت کوچک‌تر بودن قطر میله از قطر مخروط در استاندارد ASABE نیز با ملاحظه کاهش اثر چسبندگی و اصطکاک میله با خاک بوده است که با نتایج شبیه‌سازی شده در این مطالعه مطابقت دارد. اثر پارامترهای DEM شامل ضریب اصطکاک غلتشی، ضریب اصطکاک داخلی و ضریب بازگشت ذرات، نسبت پواسون، مدول برشی، انرژی چسبندگی و استحکام تسلیم بر شاخص مخروط در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش ضریب اصطکاک غلتشی (شکل ۶-الف) میزان شاخص مخروط کاهش یافت.



شکل ۵. اثر الف - قطر مخروط، ب - سرعت نفوذ و ج - ضریب اصطکاک میله مخروط با خاک بر شاخص مخروط شبیه‌سازی شده با روش اجزا گسسته.

افزایش اصطکاک داخلی برای نفوذ صفحه در ذرات برای مدل تماسی هرتز- میندلین مشاهده کردند. تغییرات ضریب بازگشت (شکل ۶-ج) جز در حالت ۰/۱ اثر مشهودی بر شاخص مخروط نشان نداد. در مطالعه‌ای توسط Simons et al. (2015) عدم تغییر مقاومت برشی

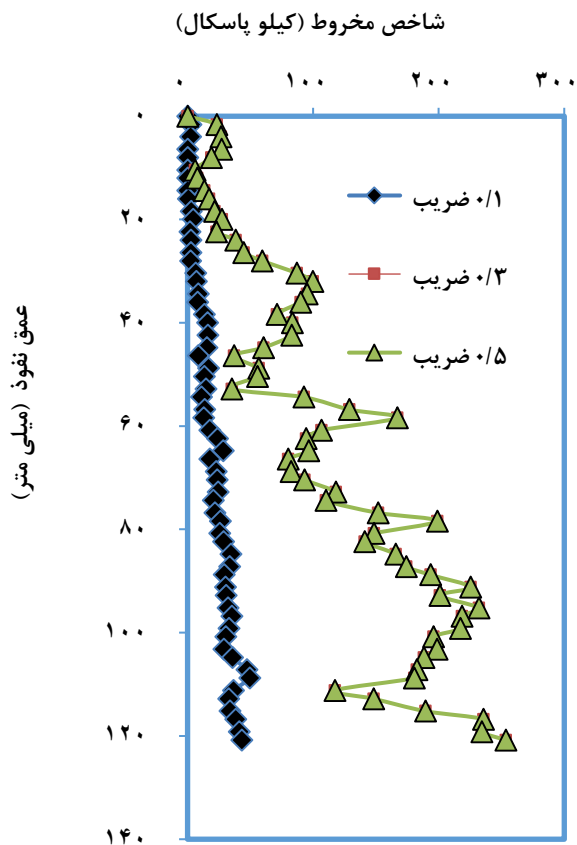
درحالی‌که افزایش ضریب اصطکاک داخلی بین ذرات سبب افزایش قابل توجه شاخص مخروط شد (شکل ۶-ب). نتایج (Asaf et al. (2007) نیز افزایش انرژی نفوذ با افزایش ضریب اصطکاک داخلی را نشان داد. (2016) Jang et al. نتایج مشابهی برای افزایش تنش مقاوم با

یکدیگر را محدود می‌کند، با چسباندن چند ذره کروی به هم شکل پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند و یا مقدار ضریب اصطکاک غلتشی را بزرگ انتخاب می‌کنند (Coetzee, 2017). در این مطالعه نیز مقدار بزرگ  $0.9$  برای واسنجی مدل اجزا گسسته انتخاب شد (Smith, 2014). مدول برشی ذره نیز می‌تواند بر خروجی شبیه‌سازی اثرگذار باشد. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، مدول برشی اثر قابل توجهی در محدوده زیر  $500$  مگا پاسکال نشان نداد، لذا مقدار این پارامتر از نتایج دیگر مطالعات انتخاب شد (Ucgu et al., 2017c). رابطه بین مدول برشی و گام زمانی حل در معادله ۹ ارائه شده است به طوری که افزایش مدول برشی سبب کاهش گام زمانی و در نتیجه افزایش زمان کل برای حل مسئله خواهد شد.

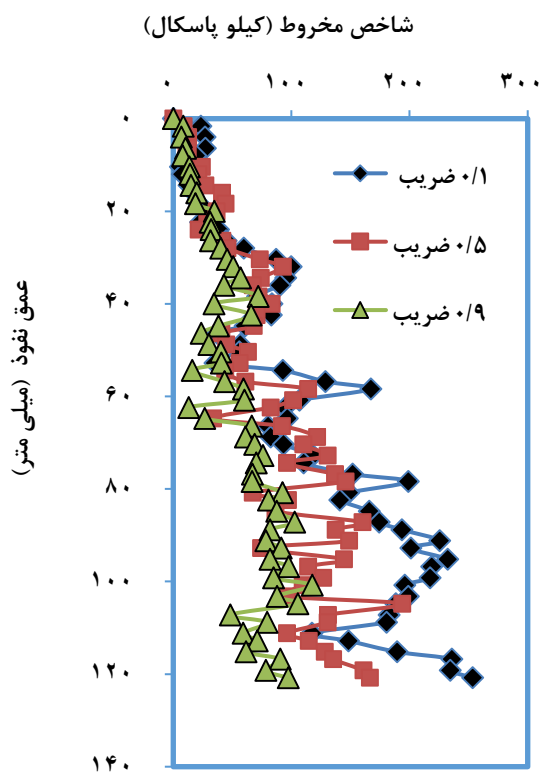
شکل ۷ تغییرات شاخص مخروط در مقابل عمق نفوذ را در خاک‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد. برای هر مقدار محتوای رطوبتی خاک، افزایش جرم مخصوص باعث افزایش شاخص مخروط شد. با افزایش محتوای رطوبت در جرم مخصوص ظاهری  $1150$  کیلوگرم بر متر مکعب، شاخص مخروط کمتری به دست آمد در حالی که برای جرم مخصوص ظاهری  $1000$  کیلوگرم بر متر مکعب میزان شاخص مخروط با افزایش رطوبت افزایش یافت. این نتیجه با تنش فشاری اعمال شده در هنگام فشرده‌سازی در خاک توجیه‌پذیر است. خاک با رطوبت  $11$  درصد و جرم مخصوص ظاهری  $1000$  کیلوگرم بر متر مکعب به دلیل سستی با استفاده از میزان کمتری از تنش فشاری تهیه شد در حالی که برای تهیه خاک با رطوبت  $16$  درصد تنش بیشتری برای رسیدن به جرم مخصوص  $1000$  کیلوگرم بر متر مکعب اعمال گردید. این افزایش تنش در تهیه خاک به دلیل افزایش حجم خاک با افزایش محتوای رطوبت است.

با تغییر ضریب بازگشت در آزمون برش مستقیم مشاهده شد. همچنین، تغییر نسبت پواسون بین  $0.3$  تا  $0.5$  بر شاخص مخروط اثر معنی‌داری نداشت (شکل ۶-د). اثر مشابهی برای تغییر نسبت پواسون در نفوذ صفحه توسط Bahrami et al. (2020) گزارش شد. با تغییر مدول برشی ذره بین  $50$  و  $500$  مگا پاسکال اثری بر شاخص مخروط مشاهده نشد ولی در مقدار گیگا پاسکال  $50$  اثر این پارامتر بر شاخص مخروط مشهود شد (شکل ۶-ه). Lommen et al. (2014) گزارش داد که در شبیه‌سازی نفوذ گوه برای مدل تماسی هرتز-میندلین تغییر مدول برشی بین  $10$  مگا پاسکال تا  $10$  گیگا پاسکال اثر محسوسی بر نتایج خروجی نداشت. در شکل ۶-و افزایش قابل توجه شاخص مخروط با افزایش چسبندگی نشان داده شده است که این تغییرات بیشترین تاثیرپذیری در بین پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. افزایش در میزان استحکام تسلیم ذرات هم تا یک سطح مشخص ( $1$  مگا پاسکال) سبب افزایش شاخص مخروط شده است (شکل ۶-س). با افزایش استحکام تسلیم ذرات به سطوحی بالاتر، به سبب افزایش سفتی (رابطه ۶) و کاهش تغییر شکل و همپوشانی ذرات، فشار وارد بر ذرات به جای همپوشانی با لغزش بین ذرات امحاء می‌شود. تغییرات مشاهده شده در مقاومت نفوذ با تغییر در چسبندگی و استحکام تسلیم ذرات به طور مشابه در مطالعه نشست صفحه‌ای نیز مشاهده شد (Bahrami et al., 2020).

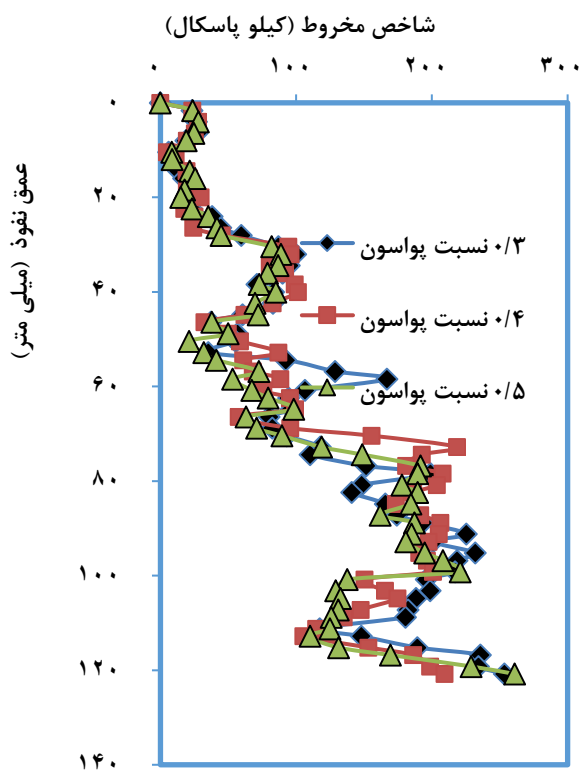
تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که پارامترهای مقاومت برشی شامل ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی، ضریب اصطکاک غلتشی و استحکام تسلیم از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای مربوط به خصوصیات ذرات بر شاخص مخروط بوده است. معمولاً در بسیاری از مطالعات به دلیل غیر کروی بودن شکل هندسی ذرات خاک که امکان غلتش ذرات نسبت به



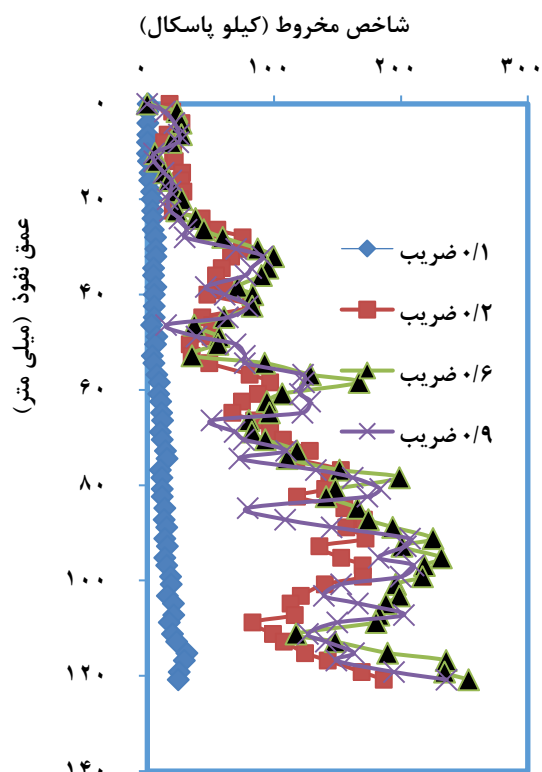
(ب)



(الف)

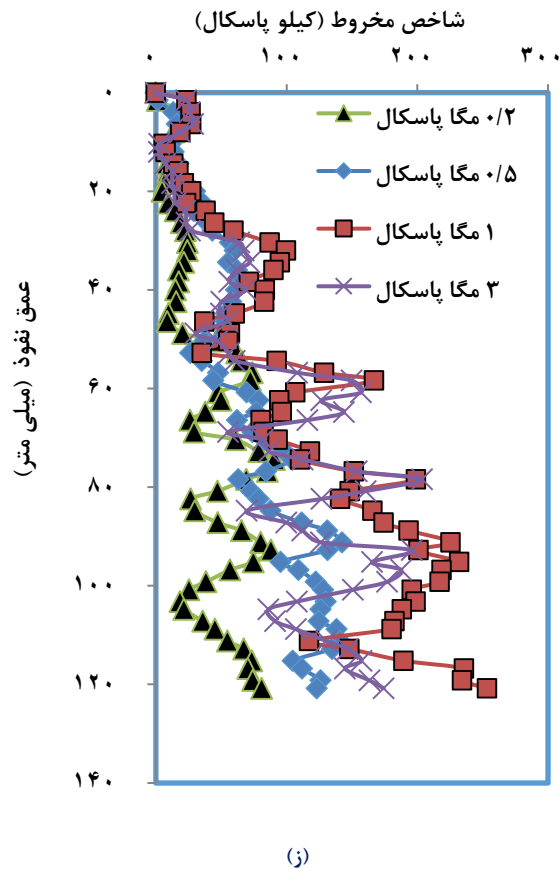
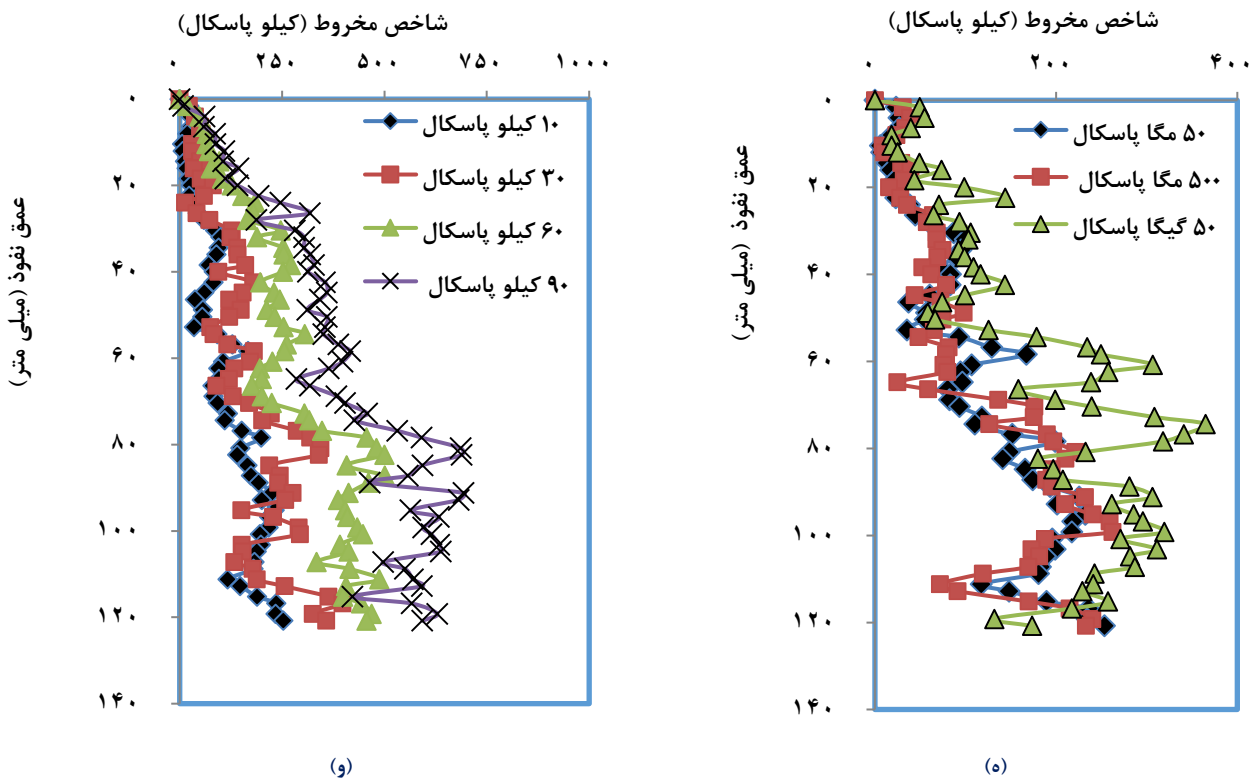


(د)

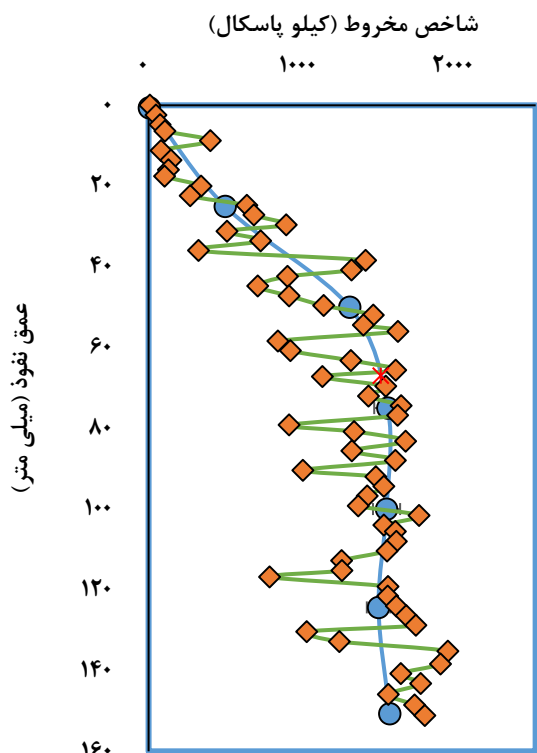


(ج)

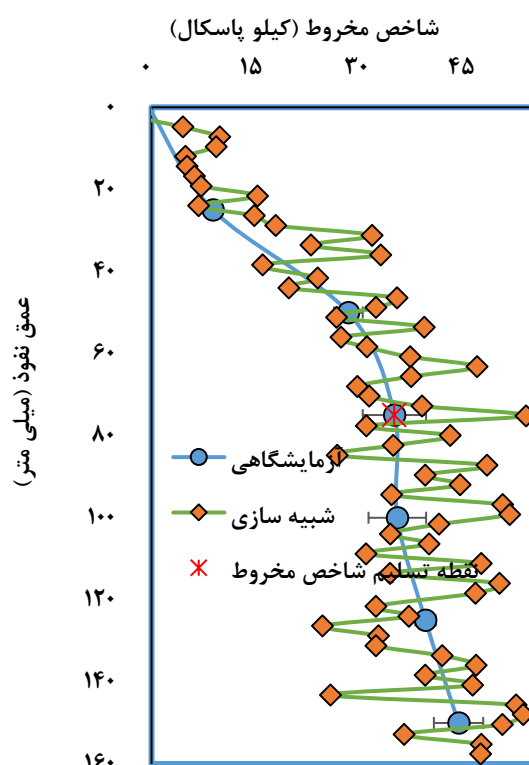




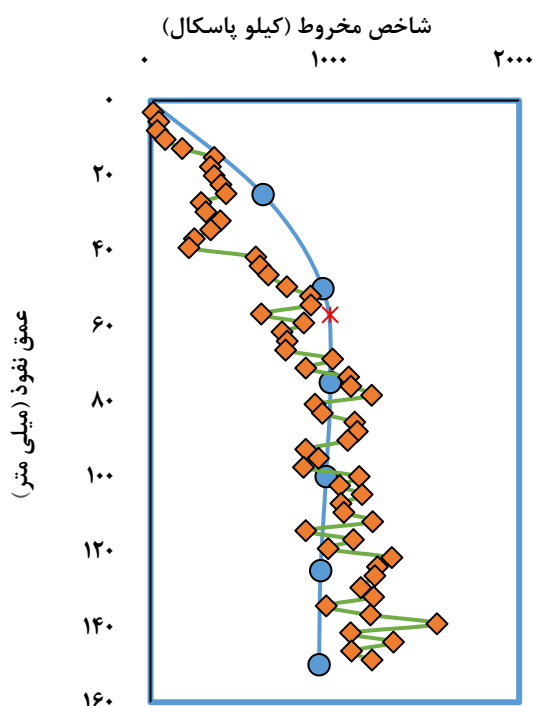
شکل ۶. اثر تغییر پارامترهای مدل فنر هسترتیک-چسبندگی خطی شامل الف- ضریب اصطکاک غلتشی ذره-ذره، ب- ضریب اصطکاک ذره-ذره، ج- ضریب بازگشت ذره-ذره، د- نسبت پواسون ذره، ه- مدول برشی ذره، و- انرژی چسبندگی بین ذرات و ز- استحکام تسلیم ذره بر شخص مغروط شبیه سازی شده با روش اجزا گسسته.



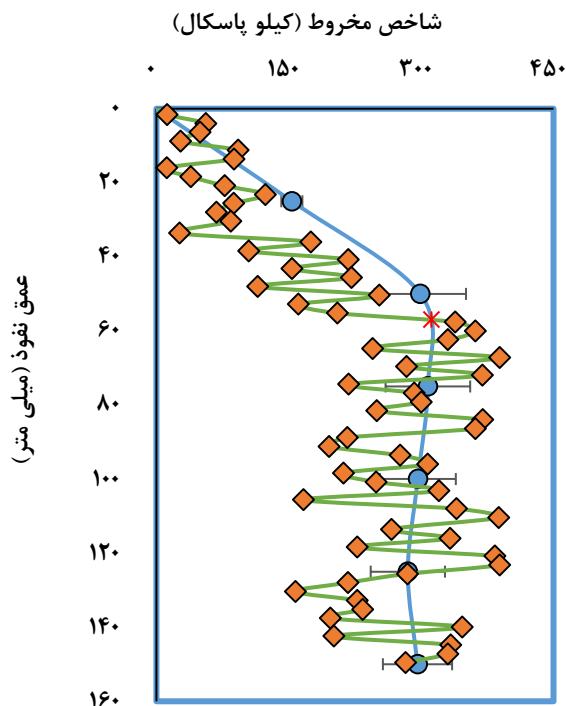
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

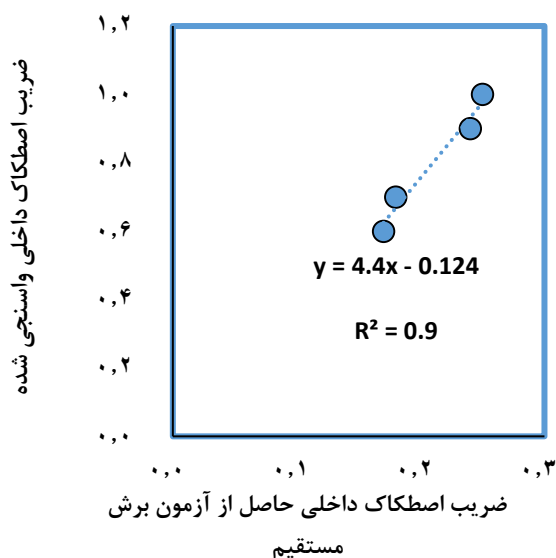
شکل ۷. شاخص مخروط (CI) در مقابل عمق برای آزمایش فروسنج مخروطی آزمایشگاهی و شبیه سازی شده برای خاک مورد آزمایش در سطح محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری (الف) ۱۱ درصد - ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، (ب) ۱۱٪ - ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، (ج) ۱۶ درصد - ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و (د) ۱۶ درصد - ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب (میللهای افقی خطای استاندارد تکرارها در اندازه گیری را نشان می دهد).

جرم مخصوص ظاهری ۱۰۰۰ و ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شود واسنجی شد. با جایگذاری مقادیر

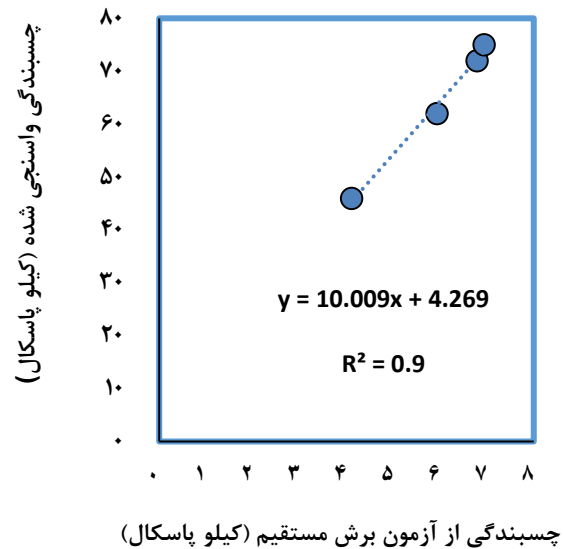
جرم مخصوص ظاهری توده خاک با تغییر پارامتر جرم مخصوص ذره و تعداد ذرات به طوری که جرم

برای هر شرایط خاک تعیین شوند. با این حال امکان دارد با مقادیر بسیار بالای مدول برشی، بدون افزایش در ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی نتایج شبیه‌سازی شاخص مخروط با نتایج آزمایشگاهی یکسان شود، اما افزایش مدول برشی سبب افزایش فوق‌العاده زمان حل مسئله می‌شود. (Hærviig et al. (2017 بیان داشتند که یکی از راه‌های استفاده از مدول برش کمتر برای کاهش زمان حل مسئله استفاده از ضریب اصلاح افزایشی برای چسبندگی است. نمودار تغییرات شاخص مخروط با عمق اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای چهار آزمون در شکل ۷ نشان داده شده و مقادیر به دست آمده برای پارامترهای واسنجی شده برای چهار ترکیب رطوبت-جرم مخصوص ظاهری در جدول ۳ آمده است. توافق رضایت‌بخش را می‌توان بین نمودار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با DEM در جدول ۳ ملاحظه کرد. برای خاک با ۱۶ درصد محتوای رطوبت و جرم مخصوص ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب (شکل ۷.د)، افزایش در شاخص مخروط از عمق ۱۲۰ میلی‌متر برای شاخص مخروط شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود که ممکن است به دلیل اثر مرز پایین سیلندر باشد که در این شرایط واضح‌تر از شرایط دیگر نشان داده شده است.

ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصل از نتایج آزمون تجربی برش مستقیم تلاش شد که با تغییر استحکام تسلیم ذرات نتایج شاخص مخروط-عمق برای شبیه‌سازی DEM با نتایج آزمون آزمایشگاهی فرسنگی منطبق شود. اما سطح شاخص مخروط شبیه‌سازی شده به‌ویژه در شرایط جرم مخصوص ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب با افزایش ضریب اصطکاک تسلیم ذرات در همه مقادیر به‌طور قابل توجهی کمتر از سطح شاخص مخروط آزمایشگاهی شد. اما با افزایش ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب به ۴/۴ و ۱۰ برابر مقادیر به دست آمده از آزمون برش مستقیم، انطباق پروفیل شاخص مخروط-عمق اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حاصل شد. همبستگی قوی بین ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی واسنجی شده با مقادیر متناظر به دست آمده از آزمون آزمایشگاهی برش مستقیم توسط برازش خطی (به ترتیب با ۰/۹۶ و  $R^2=0/99$ ) در شکل ۸ نشان داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که برای همه شرایط خاک ضرایب افزایش چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی یکسان بوده است و حاکی از وجود قاعده‌ای در انطباق نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی است تا اینکه این ضرایب به شکل تصادفی



(ب)



(الف)

شکل ۸. برازش بین (الف) چسبندگی واسنجی شده برای ذرات DEM و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده از آزمون برش مستقیم و (ب) ضریب اصطکاک داخلی واسنجی شده برای ذرات DEM و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده از آزمون برش مستقیم برای شرایط مختلف خاک.

جدول ۳. پارامترهای واسنجی شده با انطباق نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شاخص مخروط- عمق برای خاک‌های آزمون شده

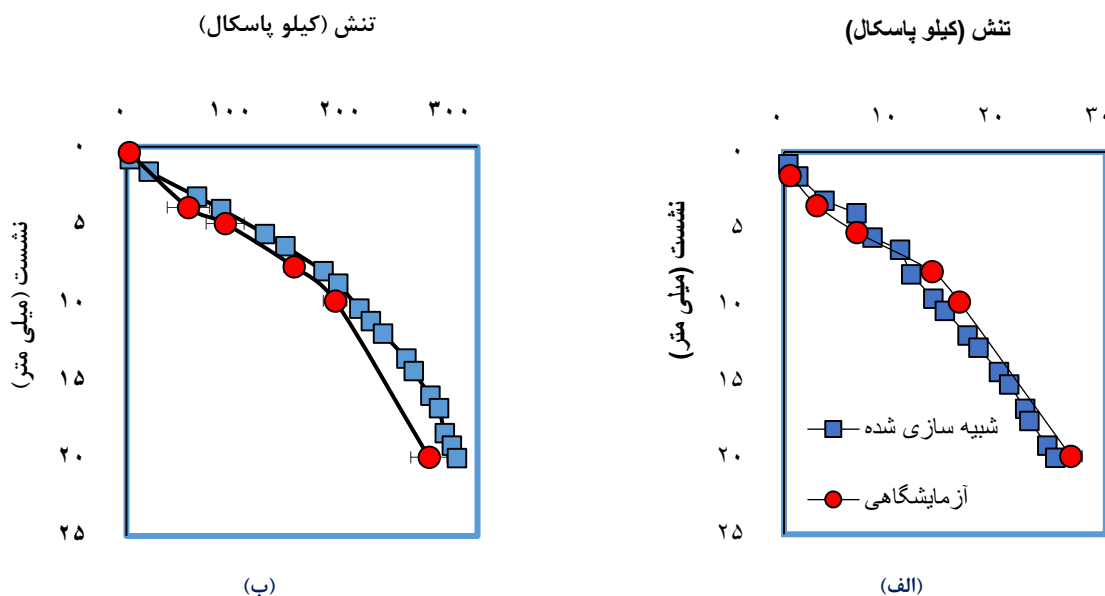
سطح محتوای رطوبت (درصد) - جرم مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب اصطکاک	چسبندگی (کیلو پاسکال)	استحکام تسلیم ذرات خاک (مگا پاسکال)	جرم مخصوص ذرات (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۱ - ۱۰۰۰	۱	۴۶	۰/۳	۱۸۰۰
۱۱ - ۱۱۵۰	۰/۹	۷۲	۱/۴	۱۸۰۰
۱۶ - ۱۰۰۰	۰/۷	۶۲	۰/۷	۱۸۰۰
۱۶ - ۱۱۵۰	۰/۶	۷۵	۱/۲	۱۸۰۰

تعیین شده در مطالعه حاضر می‌تواند به دلیل تفاوت معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک باشد. با این حال در مطالعه Aikins *et al.* (2021) واسنجی فقط برای یک شرایط خاک مورد آزمون انجام شده است.

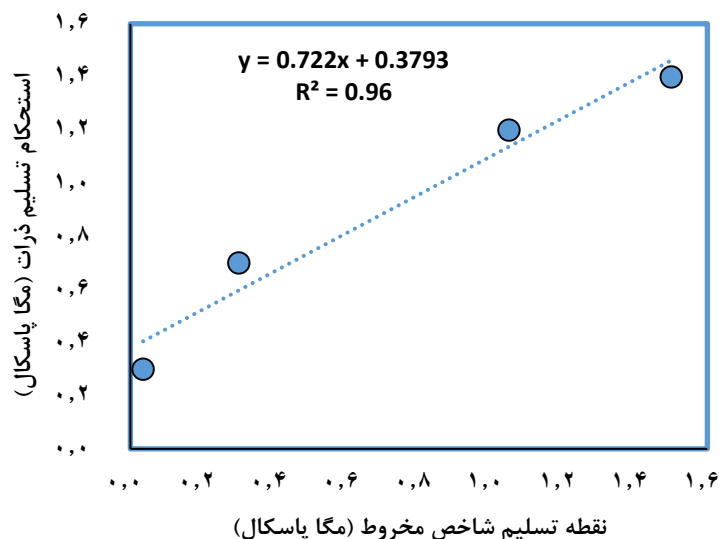
شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی و آزمون آزمایشگاهی نشست صفحه‌ای در محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری ۱۱ درصد - ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱۶ درصد - ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب را نشان می‌دهد. مقادیر پارامترها در مدل شبیه‌سازی نشست صفحه‌ای برای این دو شرایط خاک همان مقادیر واسنجی شده با آزمون فروسنج بودند. تطابق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تنش- نشست بیانگر اعتبار مقادیر واسنجی شده برای پارامترهاست. همچنین یک ارتباط خطی قوی ( $R^2=0/98$ ) بین نقطه تسلیم شاخص مخروط (نقاط نشان داده شده با ستاره در شکل ۷) و استحکام تسلیم ذرات یافت شد (شکل ۱۰). این رابطه می‌تواند مبنای واسنجی استحکام تسلیم ذرات با استفاده از آزمون فروسنج در سایر مطالعات باشد. در مطالعه‌ای توسط Ucgul *et al.* (2014) در یک خاک شنی بدون چسبندگی، ارتباط یک‌به‌یک بین استحکام تسلیم ذره و بیشینه تسلیم (نقطه شکست نمودار) در نمودار تنش در برابر نفوذ برای مسئله‌ی نفوذ شمعی ۱ به قطر ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

(Asaf *et al.* (2007) بیان کرد که در مدل هرترز-

میندلین دو بعدی، ضریب اصطکاک داخلی و سفتی فتر (مدول یانگ) پارامترهای حساس برای واسنجی برهمکنش ابزار با خاک است. در مطالعه توسط Sadek *et al.* (2017) برای واسنجی ذرات جهت شبیه‌سازی نفوذ مخروط با مدل تماسی هرترز-میندلین، پارامتر سفتی فتر عمودی (مدول یانگ) به‌عنوان پارامتر مؤثر واسنجی شد و سایر پارامترها از مطالعات دیگر استخراج گردید. نتایج (Tamas & Toth (2019) نشان داد که در مدل پیوند موازی اثر تغییر پارامتر اصطکاک داخلی برای نشان دادن تغییر محتوای رطوبت بیشتر از چسبندگی است که با نتایج حاصل از مطالعه حاضر جز در حالت خاک با رطوبت ۱۱٪ و جرم مخصوص ظاهری ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب همراستایی دارد. همچنین *et al.* (2021) Kesner نشان دادند که با انتخاب ذرات با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر می‌توان خاک را با مخروط کوچک استاندارد ASABE واسنجی کرد. در مطالعه‌ی Aikins *et al.* (2021) که از آزمون فروسنجی برای واسنجی پارامترهای اجزای گسسته یک خاک رسی با رطوبت ۲۳ درصد و جرم مخصوص ظاهری ۱۵۰۴ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شد مقدار پارامتر استحکام تسلیم ذرات ۲/۸ مگا پاسکال تعیین شد. انتخاب این مقدار از استحکام تسلیم ذرات در مقایسه با مقادیر



شکل ۹. نتایج اعتبار سنجی با آزمون نشست صفحه‌ای در سطح محتوای رطوبتی و جرم مخصوص ظاهری (الف) ۱۱ درصد - ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، (ب) ۱۶ درصد - ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب (نوار خط‌های افقی، خطی استاندارد تکرارها را نشان می‌دهد).



شکل ۱۰. همبستگی بین استحکام تسلیم شبهه سازی شده ذرات و نقطه تسلیم شاخص مخروط اندازه‌گیری شده.

## نتیجه‌گیری

به‌خوبی آزمون فروسنجی در یک خاک با چسبندگی را تحت تغییرات رطوبت و جرم مخصوص ظاهری مدل‌سازی نمود. با انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب اصطکاک داخلی، چسبندگی و استحکام تسلیم به‌عنوان حساس‌ترین پارامترهای مدل انتخاب شدند. دو پارامتر اول به ترتیب با ضرایب افزایشی اصلاحی ۴/۴ و ۱۰ از مقادیر حاصل از آزمون برش مستقیم بر روی خاک قابل تعیین است. مشخص شد که استحکام تسلیم ذرات

در این مطالعه از روش اجزا گسسته (DEM) برای شبهه‌سازی آزمون فروسنجی (نفوذ مخروط) در یک خاک لوم رسی با یک مخروط کوچک استاندارد، با هدف ایجاد ارتباط بین شاخص مخروط و پارامترهای مدل DEM جهت واسنجی پارامترهای مدل اجزا گسسته استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل هیبریدی فنر هیسترتیک-چسبندگی خطی می‌توان



بزرگ استاندارد (ASABE) و با سایزی از ذرات که نسبت قطر مخروط به قطر ذرات مطلوب حاصل شود استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود اثر قطر ذرات بر انطباق بین ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصل از شبیه‌سازی و آزمون تجربی برش مستقیم مورد توجه و مطالعه بیشتر قرار گیرد.

### سپاسگزاری

از مرکز محاسبات سریع (HPC) دانشگاه شهرکرد جهت در اختیار قرار دادن رایانه با توان پردازش بالا جهت انجام این مطالعه قدردانی می‌شود. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

### REFERENCES

- Aikins, K. A., Ucgul, M., Barr, J. B., Jensen, T. A., Antille, D. L., & Desbiolles, J. M. (2021). Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis. *Soil and Tillage Research*, 213, 105123.
- ASABE Standards EP542.(2019). Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. ASABE, St. Joseph, MI.
- ASABE Standards S313.3. (2013). *Soil Cone Penetrometer*. ASABE, St. Joseph, MI.
- 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.
- Azimi-Nejadian, H. Karparvarfard, S. H. Naderi-Boldaji, M. & Rahmanian-Koushkaki, H. (2019). Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 186, 168-181.
- Bahrami, M., Naderi-Boldaji, M., Ghanbarian, D., Ucgul, M., & Keller, T. (2020). Simulation of plate sinkage in soil using discrete element modelling: Calibration of model parameters and experimental validation. *Soil and Tillage Research*, 203, 104700.
- Barr, J., Desbiolles, J., Ucgul, M., & Fielke, J. M. (2020). Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method. *Biosystems Engineering*, 189, 99-115.
- Bravo, E. L., Tijkskens, E., Suárez, M. H., Cueto, O. G., & Ramon, H. (2014). Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106, 120-127.
- Coetzee, C. J. (2017). Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104-142.
- Cundall, P. A. & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- De Pue, J., Di Emidio, G., Flores, R. D. V., Bezuijen, A., & Cornelis, W. M. (2019). Calibration of DEM material parameters to simulate stress-strain behaviour of unsaturated soils during uniaxial compression. *Soil and Tillage Research*, 194, 104303.
- DEM Solutions. (2014). *EDEM 2.6 Theory Reference Guide*. Edinburgh, United Kingdom.
- Hærvig, J., Kleinhans, U., Wieland, C., Spliethoff, H., Jensen, A. L., Sørensen,

را می‌توان با اعمال ضریب  $0.722$  بر مقدار بیشینه شاخص مخروط برای خاک با رطوبت و جرم مخصوص ظاهری متفاوت واسنجی نمود. لذا آزمون فروسنجی را می‌توان به عنوان یک آزمون ساده برای واسنجی استحکام تسلیم ذرات در شبیه‌سازی با روش DEM مد نظر قرار داد. با این حال با توجه به اینکه نسبت اندازه ذرات به ابعاد مخروط بر روی نتایج شبیه‌سازی و نوسانات شاخص مخروط شبیه‌سازی شده اثرگذار است و همچنین در بعضی مسائل با ابعاد بزرگ استفاده از ذرات با قطر زیاد اجتناب ناپذیر می‌باشد، توصیه می‌گردد جهت اطمینان بیشتر نسبت به نتایج آزمون فروسنجی با مخروط با قطر بزرگ‌تر (برای مثال قطر

- K., & Condra, T. J. (2017). On the adhesive JKR contact and rolling models for reduced particle stiffness discrete element simulations. *Powder Technology*, 319, 472-482.
- Janda, A. & Ooi, J. Y. (2016). DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids. *Powder Technology*, 293, 60-68.
- 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.
- Kanyawi, N & Shahgholi, gh (2018). Simulation of the effect of different vibration angles on the performance of vibrating substrate and soil using discrete element method. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49 (2), 181-194.
- Keppler, I., Hudoba, Z., Oldal, I., Csatar, A., & Fenyvesi, L. (2015). Discrete element modeling of vibrating tillage tools. *Engineering Computations*.
- Kešner, A., Chotěborský, R., Linda, M., Hromasová, M., Katinas, E., & Sutanto, H. (2021). Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment. *Biosystems Engineering*, 209, 125-138.
- Khairaliipour, K. (2020). Discrete element method (DEM) and its application in agricultural soil dynamics, *12th National Congress of Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization of Iran, Ahvaz*.
- Kotroc, K. Mouazen, A. M. & Kerényi, G. (2016). Numerical simulation of soil-cone penetrometer interaction using discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 63-73.
- Lin, J. Sun, Y. & Lammers, P. S. (2014). Evaluating model-based relationship of cone index, soil water content and bulk density using dual-sensor penetrometer data. *Soil and Tillage Research*, 138, 9-16.
- Lommen, S., Schott, D., & Lodewijks, G. (2014). DEM speedup: Stiffness effects on behavior of bulk material. *Particuology*, 12, 107-112.
- Mouazen, A. M. & Neményi, M. (1998). A review of the finite element modelling techniques of soil tillage. *Mathematics and Computers in Simulation*, 48(1), 23-32.
- Naderi-Boldaji, M.; Alimardani, R., Sharifi, A. & Tabatabaeifar, A., (2008), Design, construction and evaluation of manual digital intrusion gauge, 5th national congress of agricultural machinery and mechanization engineering, *Iranian Congress on Agricultural Machinery and Mechanization Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad
- 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.
- Navid, H., & Mohammadi Baneh, N. (2011). Three-dimensional finite element analysis of wide tillage tools in sandy loam soils. *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 41 (1), 67-72.
- Sadek, M. A. Tekeste, M. & Naderi-Boldaji, M. (2017). Calibration of soil compaction behavior using Discrete Element Method (DEM). In 2017 ASABE Annual International Meeting (p. 1). *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Sadek, M. A., & Chen, Y. (2015). Feasibility of using PFC3D to simulate soil flow resulting from a simple soil-engaging tool. *Transactions of the ASABE*, 58(4), 987-996.
- Sadek, M. A., Chen, Y., & Zeng, Z. (2021). Draft force prediction for a high-speed disc implement using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 202, 133-141.
- Saunders, C., Ucgul, M., & Godwin, R. J. (2021). Discrete element method (DEM) simulation to improve performance of a mouldboard skimmer. *Soil and Tillage*

- Research*, 205, 104764.
- Shahqoli, Gh & Shahi, N. (2010), Modeling of Soil Interaction and Narrow Blades Using Discrete Elements Method, *First National Conference on Mechanization and New Technologies in Agriculture of Ahvaz*.
- Simons, T. A., Weiler, R., Strege, S., Bensmann, S., Schilling, M., & Kwade, A. (2015). A ring shear tester as calibration experiment for DEM simulations in agitated mixers—a sensitivity study. *Procedia Engineering*, 102, 741-748.
- Smith, W. C. (2014). Modeling of Wheel-Soil Interaction for Small Ground Vehicles Operating on Granular Soil (Doctoral dissertation).
- Sudduth, K. A., Hummel, J. W., & Drummond, S. T. (2004). Comparison of the Veris Profiler 3000 to an ASAE-standard penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 535.
- Syed, Z. Tekeste, M. & Way, T. (2017). Discrete Element Modeling (DEM) of Cone Penetration Testing on Soil With Varying Relative Soil Density. In *2017 ASABE Annual International Meeting* (p. 1).
- Tamás, K., & Tóth, M. F. (2019). Modeling the soil heterogeneity in the discrete element model of soil-sweep interaction. *Particles* . 294-304.
- Tekeste, M. Z., Way, T. R., Syed, Z., & Schafer, R. L. (2020). Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM). *Journal of Terramechanics*, 88, 41-52.
- 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.
- Ucugul, M. Fielke, J. M. & Saunders, C. (2014). 3D DEM tillage simulation: Validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil. *Soil and Tillage Research*, 144, 220-227.
- 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. In *2017 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. St. Joseph, MI.
- Ucugul, M., Saunders, C., & Fielke, J. M. (2017c). Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions. *Biosystems Engineering*, 160, 140-153.
- Vaz, C. M. Manieri, J. M. De Maria, I. C. & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, 166(1), 92-101.
- Walton, O. (2006). (Linearized) Elastic-Plastic Contact Model. DEM Solutions.
- Walton, O. R. & Braun, R. L. (1986). Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *Journal of Rheology*, 30(5), 949-980.
- Zeng, Z. & Chen, Y. (2019). Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction. *Biosystems Engineering*, 180, 25-35.
- Zeng, Z., Thoms, D., Chen, Y., & Ma, X. (2021). Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.
- Zhang, N., Arroyo, M., Ciantia, M. O., Gens, A., & Butlanska, J. (2019). Standard penetration testing in a virtual calibration chamber. *Computers and Geotechnics*, 111, 277-289.