



مطالعه پتانسیل روش المان مجزا برای تعیین نیروهای مورد نیاز برای برهم‌کنش تیغه-مواد گرانوله

معصومه مشکانی^۱، اسعد مدرس مطلق^۲، سید محمدحسن کماریزاده^۳، یاسر نوربخش^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴. کارشناس ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

m_meshkani@live.com

چکیده

مدلسازی برهم‌کنش خاک-ابزار به دلیل تغییرپذیری سه‌بعدی خاک، تأثیرات دینامیکی، جریان و اختلاطی که در خاک اتفاق می‌افتد، فرایندی پیچیده است. روش المان مجزا^۱ (DEM) یک ابزار عددی برای مدلسازی مواد گرانوله است. روش‌های متفاوتی برای تعیین پارامترهای مدل وجود دارند. در اینجا دو مطالعه برای تعیین نیروهای کششی و عمودی مورد نیاز تیغه بیان شده است. یکی از مطالعات برهم‌کنش دانه‌های ذرت-تیغه و دیگری برهم‌کنش دانه‌های خاک-تیغه را بررسی کرده‌اند. در هر یک از این مطالعات روش خاصی برای تعیین پارامترهای میکرو مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه اول مشخص شد که برهم‌کنش مواد گرانوله-تیغه با خطای ماکزیمم ۲۶٪ می‌تواند مدلسازی شود. در مطالعه دوم نیز نتایج DEM با یافته مک‌کیز که در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی به نتایج عملی نزدیکتر است، مقایسه شدند. نتایج نیروی کششی شبیه‌سازی شده ۷/۲٪ بزرگتر و نیروی عمودی ۱/۷٪ کوچکتر از نتایج تحلیل مک‌کیز بود. واژگان کلیدی: روش المان مجزا؛ نیروی کششی؛ نیروی عمودی؛ برهم‌کنش تیغه-ماده گرانوله؛ برهم‌کنش تیغه-خاک

۱ مقدمه

عملیات خاکورزی در حدود نیمی از انرژی مورد استفاده در تولید محصول را به خود اختصاص می‌دهند (Kushwaha and Zhang, 1998). بهینه‌سازی طراحی ابزار خاکورزی به بهبود مصرف انرژی کمک می‌کند. مدلسازی دقیق برهم‌کنش خاک-ابزار کلید اساسی برای این بهینه‌سازی است و می‌تواند نیاز به تست‌های مزرعه‌ای گرانقیمت بیشمار و زمان توسعه و بررسی نمونه اولیه را کاهش دهد. هرچند برهم‌کنش خاک-ابزار به دلیل تغییرپذیری سه‌بعدی خاک، تأثیرات دینامیکی، جریان و اختلاطی که در خاک اتفاق می‌افتد یک فرایند پیچیده است (Shmulevich, et al., 2007).

¹ Discrete Element Method

روش‌های تحلیلی و تجربی (به طور مثال، Kushwaha and Zhang, 1998; McKyes and Ali, 1977) نیروهای توسعه‌یافته در برهم‌کنش خاک-ابزار را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کردند. این روش‌ها به شکل ساده‌ای از ابزار محدود می‌شوند. بعضی روش‌های عددی مثل المان محدود¹ (FEM) (Abo-Elnor et al., 2004; Fielke, 1999) یا دینامیک سیالات محاسباتی² (CFD) (Karmakar and Kushwaha, 2006) نیز استفاده شدند. اما به دلیل فرض پیوستگی در آن‌ها هیچ یک از روش‌های ذکر شده قادر نیستند تغییرات در ساختمان خاک در منطقه خاکورزی مثل پیدایش ترک‌ها یا جریانی که در منطقه بین ابزار خاکورز و خاک و همچنین بین ذرات خاک اتفاق می‌افتد را پیش‌بینی کنند.

روش المان مجزا (DEM) که برای مدل‌سازی رفتار مواد گرانوله استفاده می‌شود (Cundall and Strack, 1979) برای مدل‌سازی خاک‌ها و برهم‌کنش بین خاک و اجسام صلب یا انعطاف‌پذیر مناسب است (Owen et al., 2002). Tanaka و همکاران (۲۰۰۰) یک مدل DEM برای برهم‌کنش بین یک سابویلر و خاک را با همبستگی کیفی خوبی با کار آزمایشگاهی ارائه دادند. Hofstetter (۲۰۰۲) یک شبیه‌سازی از برهم‌کنش تیغه بولدوزر و خاک را با استفاده از مدل DEM سه‌بعدی توسعه داد. در جهت افقی نتایج به خوبی با نتایج آزمایشگاهی همبستگی داشت. این مطالعات توانایی مدل DEM را بعنوان یک ابزار بهینه‌سازی ابزار برای طراحی نشان می‌دهند. Shmulevich و همکاران (۲۰۰۷) برهم‌کنش تیغه برشی پهن را با استفاده از یک برنامه‌ی کدنویسی المان مجزای دوبعدی PFC2D مدل‌سازی کردند. ذرات خاک با مدل نیروی چسبندگی بین دو ذره مدل‌سازی شدند. همبستگی خوبی بین شبیه‌سازی المان مجزا و نتایج آزمایشگاهی بدست آمد.

با وجود تحقیقات گسترده یکی از محدودیت‌های عملی DEM برای شبیه‌سازی، مشکل اندازه‌گیری پارامترهای ذره‌ای خاک است. بیشتر ابزارهای اندازه‌گیری خصوصیات خاک، برای اندازه‌گیری خصوصیات ماکرو خاک مناسبند، در حالی که پارامترهای مدل، خصوصیات میکرو هستند (Franco, et al., 2005).

Franco و همکاران (۲۰۰۵) روشی برای اندازه‌گیری پارامترها برای خاک‌های بدون چسبندگی ارائه دادند. Asaf و همکاران (۲۰۰۷) روشی برای تعیین پارامترهای DEM بر پایه‌ی تست مزرعه‌ای، با روش‌های حل معکوس توسعه دادند. Coetzee و Els (۲۰۰۹) نیز روشی برای کالیبراسیون پارامترهای ماده برای مدل‌سازی در DEM ارائه دادند و مقادیر این پارامترها را با مدل‌سازی برهم‌کنش تیغه-مواد گرانوله تایید کردند. بسیاری از محققان نیز از روش آزمون و خطا برای تعیین پارامترهای میکرو استفاده کردند (Asaf, et al., 2007).

در این مطالعه تحقیقات Franco و همکاران (۲۰۰۵) و Coetzee و Els (۲۰۰۹) که با استفاده از پارامترهایی که در ابتدا به دست آمده است، مدل‌های المان مجزا برای برهم‌کنش تیغه-مواد گرانوله ارائه شده است، بررسی شد و با توجه به نتایج آنها پتانسیل DEM برای پیش‌بینی نیروهای روی تیغه مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر خطا در هر شبیه‌سازی

¹ Finite Element Method

² Computational Fluid Dynamic

بیان شده است.

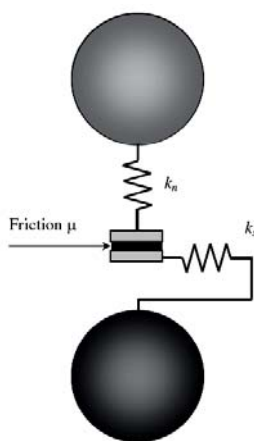
۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ مدل المان مجزا

محاسبات انجام شده در طول یک چرخه شبیه‌سازی بین قانون دوم نیوتن (اعمال شده به ذرات) و قانون نیرو-جابجایی (اعمال شده به تماس‌های بین ذرات) تغییر می‌کند. در این مطالعه همه‌ی شبیه‌سازی‌ها دوبعدی بوده و با استفاده از نرم-افزار تجاری DEM، PFC2D انجام شده است.

مدل‌های تماسی معمولاً شامل سه مکانیزم است:

۱. نیروی الاستیک که به عنوان نیروی دافعه بین اجسام تماسی به عنوان نتیجه‌ای از فشار داخلی ساختار مواد عمل می‌کند که به شکل فنر نشان داده می‌شود.
۲. مکانیزم‌های اتلاف‌کننده هنگامی که تغییر شکل‌های بزرگ (تغییر شکل پلاستیک) در مواد به وجود آید یا رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک فرض شود رخ می‌دهند که به صورت میرایی بیان می‌شود و در نرم‌افزار مورد استفاده به طور پیش‌فرض 0.7 تعریف شده است.
۳. در جهت مماس به سطح تماس هنگامی که چسبندگی وجود نداشته باشد سطوح روی هم می‌لغزند. این مکانیزم منبع دیگری از اتلاف انرژی است و معمولاً در طول تحلیل مالشی یا اصطکاکی مدلسازی می‌شود.



شکل ۱) مدل تماسی المان مجزا

یک مدل ساده به این صورت تعریف می‌شود که با در نظر گرفتن تماس نرم بین ذرات، هر تماس با یک فنر خطی در جهت عمود بر سطح تماس (سختی K_n) و یک فنر خطی در جهت مماس بر سطح تماس (سختی K_s) همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است مشخص می‌شود. لغزش اصطکاکی در جهت مماسی با یک ضریب اصطکاک μ نشان داده می‌شود. به دلیل فرض صلب بودن ذرات در نرم‌افزار و در نظر گرفتن تماس نرم بین ذرات به

ذرات امکان هم‌پوشانی داده شده است. مقدار هم‌پوشانی در ترکیب با سختی فنر برای محاسبه مولفه‌های نیروی تماسی به کار می‌رود. نیروی تماسی در جهات عمودی و مماسی به ترتیب با روابط زیر بدست می‌آید:

$$F_n = - \sum K_n \Delta U_n \quad (1)$$

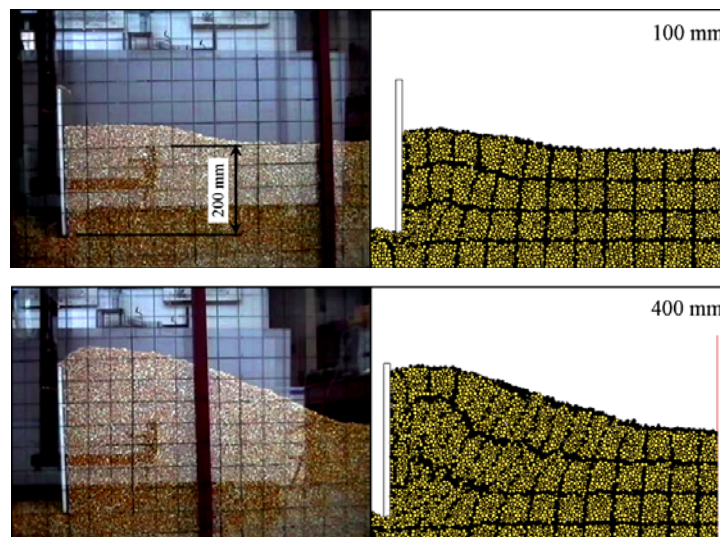
$$F_t = \begin{cases} \sum K_t \Delta U_t & \text{for } |F_t| < |\mu F_n| \\ \mu F_n \text{ sign} \left(\sum \Delta U_t \right) & \text{for } |F_t| \geq |\mu F_n| \end{cases} \quad (2)$$

۲-۲ برهم‌کنش تیغه-ذرت

پارامترهای میکرو توسط Coetzee و Els (۲۰۰۹)، به روش کالیبراسیون پارامترها تعیین شدند. فرایند کالیبراسیون بر اساس تست‌های برشی و تست فشار تک محوری DEM و آزمایشگاهی بود. خلاصه پارامترهای میکرو برای دانه ذرت در جدول ۱. **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. این پارامترها در شبیه‌سازیهای DEM تیغه-ذرت مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و تئوری پلاستیسیته مقایسه شدند. در این مطالعه برای شبیه‌سازی از ذرت استفاده شد تا امکان مدلسازی سایز واقعی ذره وجود داشته باشد و کالیبراسیون با دقت بیشتری انجام گیرد، زیرا ذرات مورد استفاده در نرم‌افزار PFC2D که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت توانایی مدلسازی ذرات بسیار کوچک را ندارد و در صورت مدلسازی ذرات بسیار کوچک سرعت محاسبات کاهش می‌یابد و ممکن است محاسبات روزها به طول انجامد (Itasca, 2002).

آزمایشگاهی

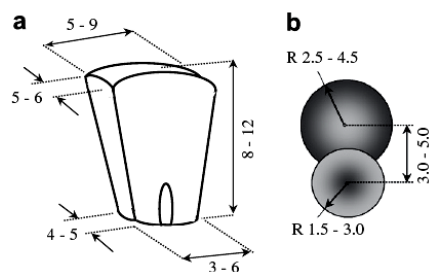
شبیه‌سازی



شکل ۲) نمایش حرکت تیغه در مواد گرانوله (ذرت)

برای انجام آزمایش، تیغه فولادی صاف بین دو دیوار شیشه‌ای با فاصله اندکی از دیوارها در عمق اولیه $h=200$ mm و

زاویه شیب $\alpha=90^\circ$ از بین دانه‌های ذرت حرکت داده شد. فاصله دیوارها از یکدیگر 200 mm بود. (شکل ۲). دانه‌های ذرت در این مطالعه به صورت دو دیسک که در یک خوشه^۱ قرار گرفتند و دارای شعاعهای متفاوت بودند شبیه‌سازی شدند (شکل ۳. **Error! Reference source not found.**). ذرات پایه در یک خوشه به صورت دیسک (در حالت دوبعدی) یا کره (در حالت سه‌بعدی) هستند و دیسک‌ها یا کره‌های موجود در هر خوشه دارای فاصله ثابت هستند و بین آنها هیچ نیرو یا گشتاوری ایجاد نمی‌شود. (Itasca, 2002). شکل ۲ تیغه را با جابجایی‌های 100 و 400 میلی‌متر نشان می‌دهد. هرچند توده پیش‌بینی شده جلوی تیغه در بعضی قسمت‌ها کوچکتر بود، اما شکل ظاهری آن، بخوبی با آزمایش هماهنگی داشت. در جابجایی 400 mm ماکزیمم جابجایی عمودی 175 میلی‌متر بود، در حالیکه مدل 145 میلی‌متر پیش‌بینی کرد (۱۷٪).



شکل ۳ a-ابعاد فیزیکی ذرت b-مدل DEM ذرت

جدول ۱) پارامترهای کالیبره شده از تحقیقات Coetzee و Els

¹ clump

پارامترها	
زاویه اصطکاک داخلی، Φ	23°
زاویه تخلیه Φ_r	$25 \pm 2^\circ$
دانشسته میانگین، ρ	778 Kg m^{-3}
مدول بالک محبوس، E'	$1/60 \text{ MPa}$
ضریب ماده-فولاد، Φ_s	14°
اصطکاک ماده-شیشه، Φ_g	12°
خصوصیات میکرو کالیبره شده	
سختی ذره، $k_n = k_s$	450 kN m^{-1}
دانشسته ذره، ρ_p	855 kg m^{-3}
ضریب اصطکاک ذره، μ	$0/12$
خصوصیات دیگر	
میرایی، C	$0/7$
عرض مدل	$0/2 \text{ m}$

۳-۲ برهم کنش خاک-تیغه بولدوزر

در این قسمت روش به کار رفته توسط Franco و همکاران (۲۰۰۵) شرح داده شده است، که برای تعیین خصوصیات میکرو از روش کالیبراسیون معکوس استفاده نمودند. این خصوصیات در مدلسازی برهم کنش خاک-تیغه بولدوزر به کار برده شدند. در این تحقیق ماده بدون چسبندگی فرض شد. بر پایه نتایج DEM ضریب اصطکاک ذره و سختی از اصول انرژی و تست‌های برش مستقیم تعیین شدند. خطای ماکزیمم پارامترهای مدل پیشنهادشده در مقایسه با پارامترهای خاک واقعی ۲۲/۸٪ یافت شد. انتخاب ثابت فنر بهینه می‌توانست خطا را کاهش دهد.

نیروی کششی و نیروی عمودی بر تیغه همزمان با پیش‌بینی DEM با مدل محاسبه مک‌کیز مقایسه شدند، زیرا از بین روش‌های تحلیلی، نتایج تحقیقات مک‌کیز به نتایج عملی نزدیکتر بود. هر ذره خوشه‌ای از دو ذره با شعاع یکسان که فاصله مراکز آنها برابر با شعاع هر ذره است، تشکیل یافته بود. پارامترهای تعیین شده با میانگین ۳۰۰۰ ذره خوشه‌ای با پارامترهای نشان داده شده در جدول ۲ تعیین شدند. برای تیغه بولدوزر از ۲۷۰۰۰ ذره خوشه‌ای با همان خصوصیات ۳۰۰۰ ذره خوشه‌ای استفاده شده است.

شبیه‌سازی دوبعدی شامل یک تیغه بولدوزر مستقیم در زوایای مختلف نسبت به افق (45° تا 90°)، عمق‌های ($0/1$ تا $0/2$ متر) زاویه اصطکاک داخلی میانگین (14° تا 35°) بود. سرعت افقی تیغه $0/1 \text{ m/sec}$ بود. نیروی مثبت در جهت عمودی، بسمت پایین تیغه بولدوزر روی خاک بود.

(جدول ۲) پارامترهای خاک بدست آمده از تحقیق Franco و همکاران (۲۰۰۵)

پارامترها	
1710 kg m^{-3}	وزن مخصوص، γ
1873 kg m^{-3}	وزن مخصوص خشک، γ_s
1.08 N m^{-1}	سختی فنر، $k=k_n=k_s$
$0.75 < D < 1.3$	۳۰٪ از ذرات D(cm)
$0.22 < D < 0.7$	۷۰٪ از ذرات D(cm)
۳۰۰۰	تعداد خوشه‌ها
۸/۷	تخلخل، n
۳/۷۰	زاویه اصطکاک قفل‌شدگی ($\Phi_{\text{interlocking}}^\circ$)

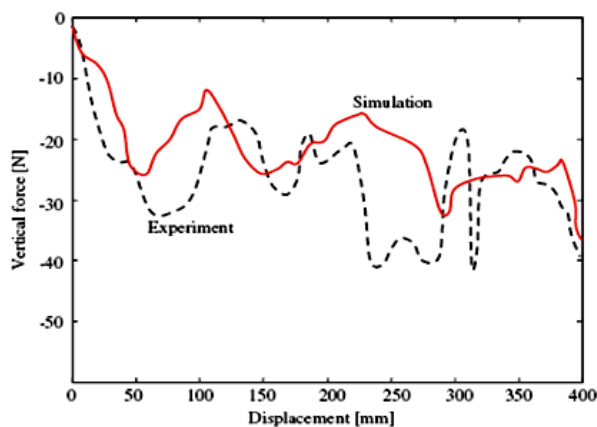
۳ نتایج و بحث

۱-۳ برهم‌کنش تیغه-ذرت

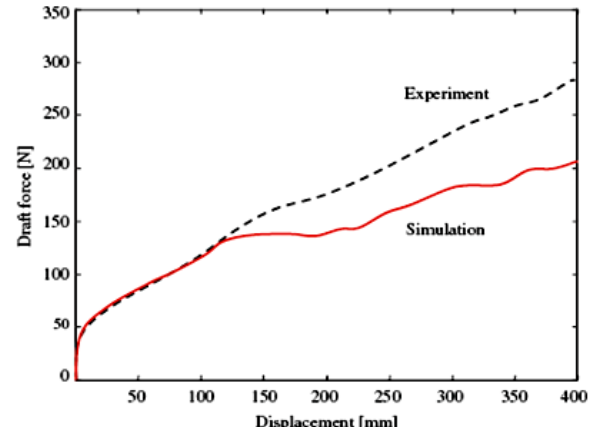
تفاوت ۱۷٪ در ارتفاع توده بوجود آمده می‌تواند به دلیل تفاوت در تخلخل اولیه باشد زیرا تخلخل در روش کالیبراسیون این مطالعه شامل نشده بود و نیاز به بررسی بیشتر داشت.

شکل ۴-الف نیروی کششی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روی تیغه با عمق اولیه ۲۰۰ میلی‌متر و زاویه شیب ۹۰° را نشان می‌دهد. نیروی شبیه‌سازی شده تا جابجایی ۱۲۰ میلی‌متر با نیروی اندازه‌گیری شده یکسان بود. در حالیکه در جابجایی بیشتر، نیروی کششی کمتر از مقدار اندازه‌گیری را پیش‌بینی کرد. در جابجایی ۴۰۰ میلی‌متر خطا تقریباً ۲۶٪ بود. شکل ۴-ب نیروی عمودی روی تیغه را نشان می‌دهد. نیروی اندازه‌گیری شده نوسانات زیادی را نشان می‌دهد که باعث ایجاد مشکل مقایسه مستقیم می‌شود، هرچند نیروی پیش‌بینی شده نیز همان مسیر را دارد. این نوسانات را می‌توان حاصل از جمع شدن بذر زیر نوک تیغه دانست (Shmulevich, et al., 2007).

روش‌های تحلیلی توده بالایی مواد را در پیش‌بینی نیروهای تیغه به حساب نمی‌آورند. تاثیر توده تنها اگر شکل دقیقش از قبل معلوم باشد تعیین می‌شود. برای انجام مقایسه، آزمایشات با عمق‌های متفاوت تیغه تکرار شدند (۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ میلی‌متر) و زوایای شیب (۶۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰). تیغه با سرعت 0.5 mm s^{-1} به سمت جلو حرکت داده شد و ماده اضافی (توده بالایی) به دقت حذف شد. در طول شبیه‌سازی‌ها طبق همان فرایند همه ذرات بالای ارتفاع مشخصی به سادگی از مدل حذف شدند. نیروهای کششی ثبت شدند و با پیش‌بینی تئوری پلاستیسته مقایسه شدند.



ب



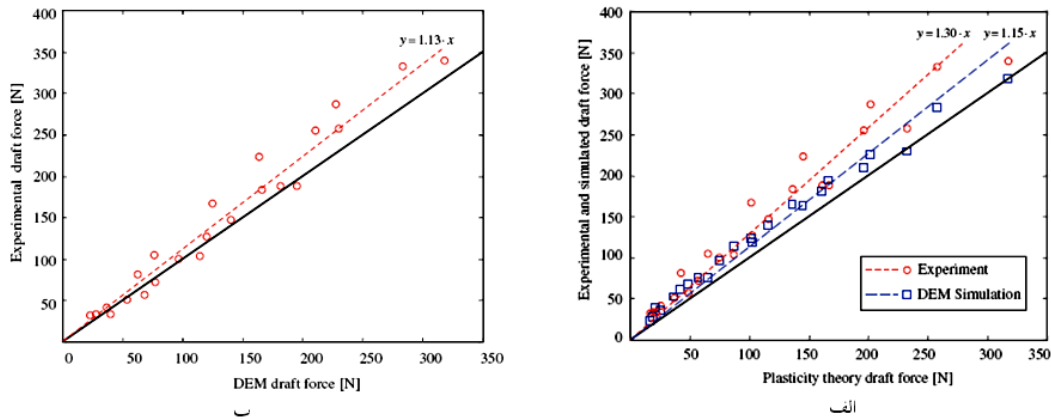
الف

شکل ۴) الف-نیروی کششی تیغه. ب- نیروی عمودی روی تیغه

نیروی روی تیغه با استفاده از تئوری پلاستیسیته و تنش‌های خاک در مقابل تیغه محاسبه شد. با استفاده از روش تفاضل محدود گره‌ها در طول تیغه قرار می‌گیرند. هنگامی که یک حل بدست آید، تنشها در طول تیغه می‌تواند روی سطح تیغه انتگرالگیری شود تا نیروی کل عمل کننده روی تیغه بدست آید.

نتایج در شکل ۵ که هر سری داده با معادله خط متناسب با آن نشان داده شده‌اند، خلاصه شدند. اکثر نیروهایی که با تئوری پلاستیسیته محاسبه شدند، از نیروهای شبیه‌سازی شده با DEM کوچکتر بودند. انتظار می‌رفت اصطکاک صفحه کناری نیروهای اندازه‌گیری شده را افزایش دهد. بررسی بیشتر نشان داد که دقت روش تحلیلی با کاهش زاویه شیب α کاهش یافت. در مقایسه بین نیروهای کششی با شبیه‌سازی DEM و اندازه‌گیری شده در شکل ۵ تطابق خوبی برای نیروهای کششی اندازه‌گیری شده کمتر از 150 N وجود داشت.

با نیروهای کششی اندازه‌گیری شده بیشتر از این مقدار، DEM نیروهای کمتر از نیروهای اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی کرد. دلیل این امر این نکته بود که هنگامی که عمق تیغه بیشتر شد، مقدار ماده و بنابراین نیروی اصطکاک روی دیواره‌های کناری بزرگتر شد. از آنجا که نیروی اصطکاک در شبیه‌سازی شامل نمی‌شد، انتظار می‌رفت که نیروهای شبیه‌سازی شده در مقایسه با نیروهای اندازه‌گیری شده کمتر باشند.



شکل ۵) الف-مقایسه نیروی کششی تیغه: آزمایشگاهی، DEM، تئوری پلاستیسیته ب-مقایسه نیروی کششی تیغه: آزمایشگاهی، تئوری پلاستیسیته

با استفاده از پارامترهای ذرت یک تیغه صاف در دانه‌های ذرت حرکت کرد و مدلسازی شد و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج نشان داد در طول مراحل اولیه جابجایی تیغه، DEM توانست به دقت نیروهای تیغه را پیش‌بینی کند. در جابجایی بیشتر DEM نیرو را کمتر از نیروی اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کرد. در انتهای جابجایی تیغه خطا ۲۶٪ بود.

توده بالایی مواد مانع از امکان انجام مقایسه با تئوری پلاستیسیته شد. در کل، تئوری پلاستیسیته نیروهای کششی را کمتر از نیروهای اندازه‌گیری شده با خطای ماکزیمم ۳۳٪ تخمین می‌زند. بدون توده بالایی، همبستگی خوبی بین نیروی کششی شبیه‌سازی DEM و آزمایشی با ماکزیمم خطای ۲۲٪ بدست آمد.

مطالعه بیشتر شامل خاک‌هایی به صورت شن و مواد چسبنده مثل رس مورد نیاز است. در این مطالعه، دانه‌های ذرت برای راحتی در آزمایشات و شبیه‌سازی‌های DEM استفاده شدند. گام بعدی استفاده از خاک بدون چسبندگی مثل شن است. سپس خاکهای چسبنده مثل رس باید مدلسازی شوند. هنگامی که این انواع مواد مدلسازی می‌شوند ذره مدلسازی به دقت سایز ذرات فیزیکی در حالت عملی نیست. در DEM سایزهای ذره بزرگتر باید استفاده شود و تاثیر سایز ذره در ترکیب با پارامترهای میکرووی دیگر روی رفتار ماکرو نیاز به مطالعه دارد.

در روش کالیبراسیون پیشنهاد شده در روش Coetzee و Els (۲۰۰۹)، تخلخل مواد اندازه‌گیری نشده بود. مطالعات بعدی باید شامل تخلخل در روش کالیبراسیون باشد، به گونه‌ای که یک تطابق نزدیک بین تخلخل اندازه‌گیری شده و تخلخل مدلسازی شده وجود داشته باشد. توزیع سایز ذره و دقت در ارائه شکل، تخلخل مدلسازی شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۲-۳ برهم‌کنش خاک-تیغه بولدوزر

مقایسه بین DEM و تحلیل مک‌کیز (۱۹۸۵) درباره پیش‌بینی نیروی کششی و عمودی در جدول ۳ نشان داده شده

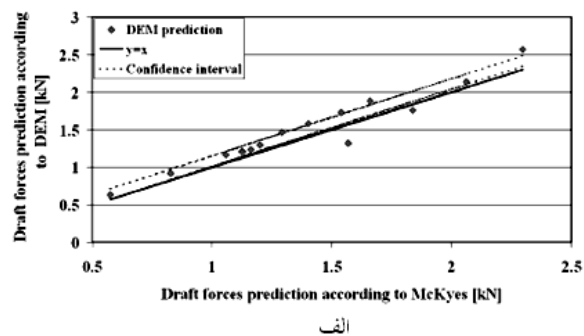
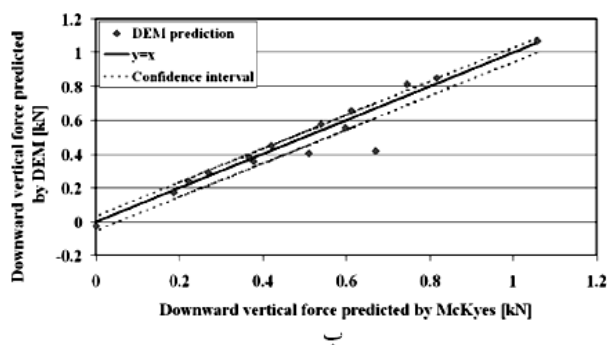
است. شبیه‌سازی‌های دوبعدی برای حرکت تیغه بولدوزر در میانگین ۲۷۰۰۰ ذره خوشه‌ای در زوایای تیغه و عمق‌های متفاوت و در پارامترهای خاک مختلف اجرا شدند. نتایج DEM با یافته مک‌کیز مقایسه شدند. DEM نیروی کششی میانگین را ۷/۲٪ بزرگتر و نیروی عمودی را ۱/۷٪ کوچکتر از نیروهای پیش‌بینی شده توسط تحقیقات مک‌کیز پیش‌بینی می‌کرد.

جدول ۱) نتایج پیش‌بینی با DEM و تحقیق مک‌کیز

تفاوت در نیروهای افقی (%)	تفاوت در نیروهای عمودی (%)	نیروی کششی توسط مک‌کیز (kg)	نیروی عمودی توسط مک‌کیز (kg)	نیروی کششی با DEM (kg)	نیروی عمودی با DEM (kg)	عمق (cm)	Φ (°)	α (°)
-۶/۰۱	۵/۴۹	۱/۱۶	۰/۳۸	۱/۲۳	۰/۳۶	۱۵	۱۴	۷۲
-۱۳/۷۹	-۷/۴۴	۱/۲۹	۰/۴۲	۱/۴۷	۰/۴۵	۱۵	۱۸	۷۲
۱۶/۱۱	۲۰/۶۵	۱/۵۷	۰/۵۱	۱/۳۲	۰/۴	۱۵	۲۵	۷۲
۴/۱۷	۷/۲۳	۱/۸۴	۰/۶	۱/۸۶	۰/۵۵	۱۵	۳۱	۷۲
-۳/۶۲	۳۷/۷۰	۲/۰۶	۰/۶۷	۲/۱۳	۰/۴۲	۱۵	۳۵	۷۲
-۱۰/۴۵	۸/۳۶	۰/۵۷	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۱۷	۱۰	۱۸	۷۲
-۱۱/۴۴	-۸/۴۱	۰/۸۳	۰/۲۷	۰/۹۲	۰/۲۹	۱۲	۱۸	۷۲
-۷/۶۹	-۴/۵۴	۱/۱۲	۰/۳۷	۱/۲۱	۰/۳۸	۱۴	۱۸	۷۲
-۱۳/۶۹	-۶/۷۲	۱/۶۶	۰/۵۴	۱/۸۹	۰/۵۸	۱۷	۱۸	۷۲
-۱۱/۹۷	-۹/۳۶	۲/۲۹	۰/۷۵	۲/۵۷	۰/۸۲	۲۰	۱۸	۷۲
-۱۰/۲۱	-۱/۱۸	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۱۷	۱/۰۷	۱۵	۱۸	۴۵
-۶/۸۲	-۴/۱۶	۱/۱۲	۰/۸۲	۱/۲	۰/۸۵	۱۵	۱۸	۵۴
-۸/۱۰	-۶/۶۹	۱/۲	۰/۶۱	۱/۳	۰/۶۵	۱۵	۱۸	۶۳
-۱۲/۹۱	-۷/۳۰	۱/۴	۰/۲۲	۱/۵۸	۰/۲۴	۱۵	۱۸	۸۱
-۱۲/۲۱	--	۱/۵۴	۰	۱/۷۳	-۰/۰۳	۱۵	۱۸	۹۰

مقایسه‌ای از نتایج نیروی کششی بدست‌آمده با DEM و تحقیق مک‌کیز (همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است) در شکل ۶-الف نشان داده شده است؛ همچنین مقایسه‌ای از نیروهای عمودی بر طبق DEM و تحلیل مک‌کیز در شکل ۶-ب نشان داده شده است. یک منحنی خطی بر اساس DEM نسبت به نتایج بر پایه تحقیق مک‌کیز انجام شد. انحرافات استاندارد نیروهای عمودی و کششی به ترتیب ۰/۰۸ kN و ۰/۱۲ است. ضریب اطمینان ۹۵٪ با استفاده از تابع توزیع t بدست آمد.

فواصل اطمینان نتیجه‌ی DEM حول برازش خطی در شکل‌های ۶ الف و ب ارائه شد (بین خطوط نقطه‌چین). خط نیروی عمودی DEM که برابر با نیروی عمودی مک‌کیز است بین خطوط نقطه‌چین در فاصله اطمینان ۹۵٪ است (شکل ۶-ب). در شکل ۶-الف خط نیروی کششی DEM برابر با نیروی کششی مک‌کیز است و فاصله اطمینان تقریباً همان است. نتیجه‌گیری می‌شود که نتایج DEM همبستگی خوبی با نتایج مک‌کیز داشته باشد.



شکل ۶ الف-مقایسه نیروی کششی پیش‌بینی شده با DEM و مک‌کیز ب-مقایسه نیروی عمودی به سمت پایین پیش-بینی شده با DEM و مک‌کیز

۳-۳ بحث و نتیجه نهایی

در اینجا دو مطالعه بررسی شدند که هر کدام روش خاصی را برای تعیین پارامترهای مواد گرانوله را استفاده کرده بودند. در مطالعه اول نتیجه DEM نسبت به آزمایشات برای نیروی کششی ۲۶٪ خطا داشت و نیروی عمودی نیز بدلیل نوساناتی که در آن وجود داشت قابل مقایسه نبود، با این حال مشاهده شد که بین نتایج نیروی کششی از نظر کیفی تطابق خوبی وجود داشت. در مطالعه دوم نیز نتیجه DEM نسبت به یافته مک‌کیز نیروی کششی ۷/۲٪ بزرگتر و نیروی عمودی ۱/۷٪ کوچکتر از آن را پیش‌بینی کرد. مشاهده می‌شود که به شرط تعیین دقیق پارامترها می‌توان نتایج خوبی برای نیروهای مورد نیاز برای برهم‌کنش مواد گرانوله و تیغه بدست آورد.

۴ منابع و مواخذ

<Book:>

Itasca, 2005. PFC3D User's Manual, Version 3. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Min., 55415, USA.

<Reviwe articles:>

Abo-Elnor, M., Hamilton, R., Boyle, J.T., 2004. Simulation of soilblade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis. Soil Tillage Res. 75, 61-73.

Asaf, Z., Rubinstein, D., Shmulevich, I., 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. Soil & Tillage Res. 92, 227-242.

Coetzee C.J. and Els D.N.J., 2009. Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction. Journal of Terramechanics. 46, 15-26.

Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. J. Geotechnique 29 (1), 47-65.

Fielke, J.M., 1999. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implement with soil. *J. Agric. Eng. Res.* 74, 91–101.

Hofstetter, K., 2002. Analytic method to predict the dynamic interaction of dozer blade with earthen material. In: *Proceedings of the 14th International Conference of the ISTVS*, Vicksburg, MS, USA.

Karmakar, S., Kushwaha, R.L., 2006. Dynamic modeling of soil-tool interaction: an overview from a fluid flow perspective. *J. Terramechanics*. 43 (4), 411–425.

Kushwaha, R.L., Zhang, Z.X., 1998. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. *J. Terramechanics* 35, 69–86.

Owen, D., Feng, R.J., Souza, Y., Neto, T., Cottrell, E.A., Wang, M., Pires, F.M., Yu, A.J., 2002. The modeling of multi-fracturing solids and particulate media. In: *Proceedings of the 5th World Congress on Computational Mechanics*, Vienna, Austria.

Shmulevich, I., Asaf, Z., Rubinstein, D., 2007. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Journal of Soil & Tillage Research*. 97, 37-50.

<Proceedings with only a conference title>

Franco, Y., Rubinstein, D., Shmulevich, I., 2005. Determination of discrete element model parameters for soil-bulldozer blade interaction. In: *Proceedings of the 15th International Conference of the ISTVS Hayama*, Japan, September 25–29.

Tanaka, H., Inooku, K., Nagasaki, Y., Miyzaki, M., Sumikawa, O., Oida, A., 2000. Simulation of loosening at subsurface tillage using a vibrating type subsoiler by means of the distinct element method.

In: *Proceedings of the 8th European ISTVS Conference*, Umea.

Abstract

Modeling interaction between soil and implement because of the 3D variabilities in soil, dynamic effects, flow and mixing that occurs in the soil, is a complex process. Discrete element method is a numerical method to modeling granular materials. There are different methods for determining the model parameters. Two studies are described here for determining draft and vertical forces.

One of these studies evaluated the corn-blade interaction and the other one described soil-blade interaction. In each of these studies special method is used to determine micro parameters for model. From the first study it was demonstrated that corn-blade interaction can be modeled with maximum error of 26%. In the second study results of DEM were compared with McKyes approach, that is the closet analytical approach to empirical one. Draft force results were 7.2% greater than and vertical force results were 1.7% less than results of McKyes approach.

Keywords: Discrete element method; Draft force; Vertical force; blade-granular material interaction; soil-blade interaction