



مدلسازی برهم‌کنش خاک و تیغه زیرشکن و تاثیر سرعت و عمق بر عملکرد آن با روش المان

گسسته^۱ (DEM)

ناصر شاهی^۱، غلامحسین شاهقلی^۲ و مریم بیرانوند^۱

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی

دانشگاه محقق اردبیلی

nasersshahi2005@yahoo.com

چکیده

در سیستم‌های خاک‌ورزی پیش‌بینی دقیق نیروهای عمل‌کننده روی تیغه یکی از مهمترین پارامترهای رسیدن به راندمان بیشتر است. درک رابطه بین وسیله خاک‌ورز و خاک و اصلاح طرح ابزار خاک‌ورزی به بهبود بازده انرژی کمک خواهد کرد. تحلیل رفتار دینامیکی اطلاعات لازم جهت طراحی و اصلاح و بهینه‌سازی تجهیزاتی که با اینگونه مواد سروکار دارند را فراهم می‌سازد تحقیقات تجربی نتایج و دیدگاه باارزشی ارائه می‌دهند اما ممکن است پرهزینه باشند و به سرعت‌ها و عمق‌های خاصی محدود شده باشند و نتایج نیز بستگی به دقت ابزار اندازه‌گیری دارند. به هر حال با افزایش توان محاسباتی و گسترش اغلب مدل‌ها، روش المان‌های گسسته نتایج قابل قبولی در تحلیل پارامترهای تاثیرگذار برای برهم‌کنش بین تیغه-خاک داده است. در این تحقیق مدل سه بعدی المانهای گسسته (DEM) برای برهم‌کنش تیغه-خاک در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف برای پیش‌بینی نیروی کششی و نیروی عمودی مورد نیاز و همچنین مشاهده رفتار خاک در شرایط مختلف کاری استفاده شده است. براساس نتایج بدست آمده میتوان نتیجه گرفت که روش المان گسسته می‌تواند رفتار دینامیکی مواد گرانولی مانند خاک را به خوبی شبیه‌سازی نماید. همچنین می‌توان نقاط گسیختگی خاک و حرکت آن را مشاهده نمود. ارتباط نزدیکی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای پارامتر سرعت بدست آمد، اما برای پارامتر عمق، اختلاف معنی‌داری وجود داشت که با انتخاب مدل مناسب می‌توان این اختلاف را به حداقل کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: ادوات خاک‌ورزی، روش المان گسسته، تیغه زیرشکن، خاک، نیروی کشش

مقدمه

خاک‌ورزی چالشی اساسی برای محققان، توسعه دهندگان، کارخانجات (طراحان ادوات) و کشاورزان است. آماده سازی بستر بذر، اصلاح ساختار خاک و زیرشکنی قسمت‌هایی از خاک، امری حیاتی برای کشاورزی است. احتیاجات خاک‌ورزی باید با بهترین سیستم مدیریتی، به منظور رسیدن به کاهش مصرف انرژی و مصرف نهاده‌ها مدیریت شود. ملاحظات اقتصادی و محیطی کشاورزان را مجبور می‌سازد تا عمل خاک‌ورزی را با ابزارهایی با

^۱ -Discrete Element Method

طراحی بهینه برای دستیابی به شرایط نهایی مطلوب خاک انجام دهند. عملیات خاک‌ورزی نیمی از انرژی موردنیاز برای تولید محصول را مصرف می‌کند (کوشواهاو ژانگ، ۱۹۹۸). درک رابطه بین وسیله خاک‌ورز و خاک و اصلاح طرح ابزار خاک‌ورزی به بهبود بازده انرژی کمک خواهد کرد. تحلیل رفتار دینامیکی اطلاعات لازم جهت طراحی و اصلاح و بهینه‌سازی تجهیزاتی که با اینگونه مواد سروکار دارند را فراهم می‌سازد. تحلیل این رفتار با استفاده از مدل‌های فیزیکی و آزمایشگاهی بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد و حتی بعضی از خصوصیات این مواد ممکن است از طریق مدل‌های فیزیکی قابل حصول نباشند. امروزه به لطف پیشرفت تکنولوژی، مدل‌های تئوری و عددی گسترش زیادی یافته‌اند که تحلیل رفتار دینامیکی و خصوصیات فیزیکی مواد را ساده‌تر کرده‌اند. مدل‌های تئوری و عددی این قابلیت را دارند که با صرف زمان و هزینه کم، بیشترین اطلاعات را در مورد رفتار دینامیکی مواد دانه‌ای در اختیار قرار دهند. ضمن اینکه قادرند رفتار تک‌تک دانه‌ها را به صورت انفرادی مورد مطالعه قرار داده و با تغییر اطلاعات ورودی که اکثر خواص فیزیکی ماده هستند، اثر این تغییرات را به صورت آنی در رفتار دینامیکی مجموعه و تک‌تک دانه‌ها نشان دهند. مدل‌های عددی در تحلیل رفتار دینامیکی مواد دانه‌ای معمولاً بر اساس روش المان‌های گسسته طراحی می‌شوند. شبیه‌سازی صحیح برهم‌کنش بین خاک-ادوات کلید اساسی برای این بهینه‌سازی است و ممکن است نیاز به تست‌های مزرعه‌ای زیاد با هزینه‌های گران را حذف کند و همچنین زمان توسعه و تایید مدل (نمونه) پیشنهاد شده برای ساخت را کاهش دهد. هرچند که برهم‌کنش بین خاک-ادوات به علت تغییرات فضایی (سه بعدی) خاک، تأثیرات دینامیکی و جریان خاک فرآیندی پیچیده است. برهم‌کنش دینامیکی که در فرآیند خاک‌ورزی رخ می‌دهد شامل مقدار زیادی تغییر شکل پلاستیک و شکست خاک، ناشی از جریان خاک است. برهم‌کنش بین خاک-ادوات خاک‌ورزی که درگیر پارامترهای مختلفی از قبیل پروفیل خاک، مقاومت خاک، بالاروی خاک روی ابزار، جریان خاک و ترک‌های حین کار تیغه است امری بسیار پیچیده است. ایجاد این مدل کمک خواهد نمود تا چگونگی شکست خاک در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف مشاهده نمود و نیروهای وارده از خاک به تیغه خاک‌ورز و بلعکس را اندازه بگیریم. هدف تحقیق حاضر مطالعه توانایی (پتانسیل) روش المان‌های گسسته برای مدل‌سازی فرآیند برهم‌کنش بین خاک و یک ابزار خاک‌ورز می‌باشد. مهمترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

۱. ایجاد مدل حرکت تیغه در داخل جعبه‌ای از ذرات کروی که خواص خاک مورد نظر را دارند
۲. مشاهده و درک چگونگی شکست خاک در سرعت و عمق‌های مختلف
۳. درک چگونگی نیروهای وارده از تیغه به خاک در فازهای مختلف عملکرد تیغه
۴. پیش‌بینی نیروی کشش کل تیغه و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای

تئوری المان‌های گسسته

روش المان‌های گسسته یکی از روش‌های عددی است که توانایی مطالعه رفتار مواد دانه‌ای یا مواد گسسته را دارد. در ابتدا این روش برای تحلیل مجموعه‌ای از ذرات گرانولی (دانه‌ای) معرفی شد. در این روش ماده به صورت مجموعه‌ای از المان‌های گسسته در نظر گرفته می‌شود و روابط مکانیکی بین المان‌ها با ثابت‌های فنر، مال، ثابت فنر مماسی و پارامترهای اصطکاکی تعیین می‌شوند. این روش بر اساس قوانین فیزیک پایه‌گذاری شده است. جابجایی ذرات با معادلات حرکت کنترل می‌شود و هر المان نیروهای تماسی را از المان‌های دیگر یا تیغه دریافت می‌کند. مقدار نیروی

تماسی با جابجایی نسبی و سرعت نسبی هرالمان مشخص می‌گردد. همچنین فرض شده است که بین ذرات هم-پوشانی رخ می‌دهد و نیروهای برخورد (تماسی) در زمان هم‌پوشانی محاسبه می‌گردند. به منظور بدست آوردن معادله‌ی حرکت، لازم است نیروهای عمل‌کننده روی المان‌ها را تخمین بزنیم. در این روش نیروهای عمل‌کننده هرالمان بر روی المان‌های دیگر، توسط یک سیستم ارتعاشی مدل‌سازی شده است (شکل 1). یک فنربا ثابت k و یک میراکننده با ضریب ویسکوزیته η و یک لغزنده با ضریب اصطکاک μ بین المان‌های i و j قرار گرفته‌اند. در جهت نرمال یک مفصل غیرکششی برای اشاره به اینکه در زمان جداسازی دو المان از هم هیچگونه نیروی کششی وجود ندارد قرار داده شده است. دیاگرام تماس بین دو المان در (شکل 2) نشان داده شده است. جهت نرمال n ، منطبق بر خط اتصال بین مراکز دو المان است در حالیکه جهت مماسی s عمود بر جهت نرمال در نقطه‌ی برخورد المان‌هاست. اگر زاویه بین خط اتصال مراکز دو المان و محور x ، α_{ij} باشد آنگاه:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

$$\cos \alpha_{ij} = \frac{(x_j - x_i)}{r_{ij}} \quad (2)$$

جابجایی نسبی المان i نسبت به المان j در جهت نرمال با معادله (3) و در جهت مماسی با معادله (4) بیان شده است.

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j) \cos \alpha_{ij} + (\Delta v_i - \Delta v_j) \sin \alpha_{ij} \quad (3)$$

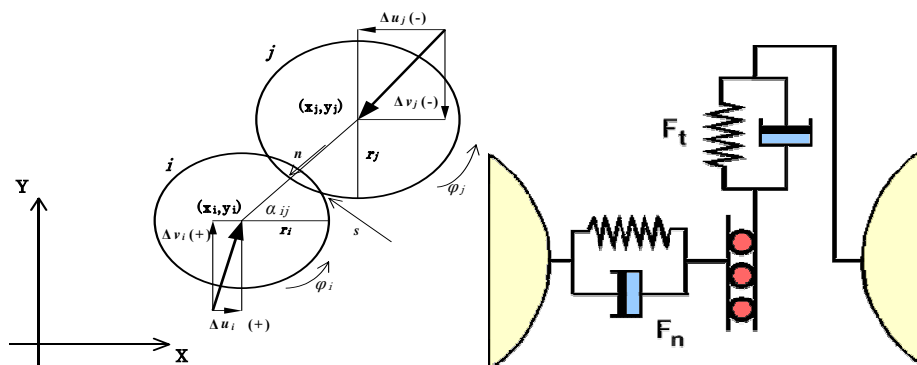
$$\Delta u_s = -(\Delta u_i - \Delta u_j) \sin \alpha_{ij} + (\Delta v_i - \Delta v_j) \cos \alpha_{ij} + r_i \Delta \phi_i + r_j \Delta \phi_j \quad (4)$$

Δu و Δv تغییرات جابجایی در جهت x و y هستند و $\Delta \phi$ تغییرات زاویه دوران و Γ شعاع المان است.

در جهت نرمال نیروی ناشی از فنر Δe_n و نیروی ناشی از میراکننده d_n با معادلات زیر بیان شده‌اند.

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n \quad (5)$$

$$d_n = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (6)$$



شکل 1- دیاگرام تماس بین دو المان

افزایش نیرو در جهت مماسی ناشی از فنر Δe_s و نیروی میراکننده ویسکوز d_s با روابط زیر بیان شده‌اند:

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s \quad (7)$$

$$d_s = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (8)$$

نیروی فنر در زمان t ، یعنی $[e_n]_t$ از جمع نیروی فنر e_n و نیروی فنر در زمان قبلی $[e_n]_{t-\Delta t}$ بدست می‌آید:

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + k_n \Delta u_n \quad (9)$$

نیروی برخورد نرمال المان آروی المان [از جمع نیروی میراکننده $[d_n]_t$ و نیروی فنر $[e_n]_t$] بدست می آید:

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t = ([e_n]_{t-\Delta t} + k_n \Delta u_n) + \frac{\eta_n \Delta u_n}{\Delta t} \quad (10)$$

به همین روش نیروی برخورد در مماسی مانند زیر محاسبه میگردد:

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t = ([e_s]_{t-\Delta t} + k_s \Delta u_s) + \frac{\eta_s \Delta u_s}{\Delta t} \quad (11)$$

برآیند نیرووهایی که در جهت افق، عمود، جهت دورانی F_x, F_y, M بر المان اعمال می کنند به صورت زیر بیان می - شوند:

$$[F_x]_t = \sum_j (-[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij}) \quad (12)$$

$$[F_y]_t = \sum_j (-[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij}) \quad (13)$$

$$[M]_t = -r_i \sum_j ([f_s]_t) \quad (14)$$

شتاب هر المان در جهت های افقی، عمودی، دورانی با روابط زیر بیان می شوند:

$$[\ddot{u}]_t = \frac{[F_x]_t}{m_i} \quad (15)$$

$$[\ddot{v}]_t = \frac{[F_y]_t}{m_i} \quad (16)$$

$$[\ddot{\phi}]_t = \frac{[M]_t}{I_i} \quad (17)$$

پیشینه تحقیق :

مطالعات مختلفی در مورد فرآیند خاک ورزی صورت پذیرفته است. بررسی میزان کارآمدی ادوات، توصیف رفتار خاک، تحقیق در مورد عوامل موثر بر کارکرد ادوات خاک ورزی، تاثیر خاک ورزی بر میزان تولید محصول، نوع ترکیب ادوات مورد استفاده در سیستم های خاک ورزی عنوان برخی از این تحقیقات می باشد. در حدود ۴۰ سال پیش، واندنبرگ و گیل^۲ (۱۹۶۸) اظهار داشتند که عملکرد ویژه ی یک ابزار خاص خاک ورزی نمی تواند محاسبه گردد. این اظهار نظر هنوز در مورد تعیین شرایط نهایی صادق است. هر چند امروزه اطلاعات زیادی در مورد استفاده از روشهایی برای اندازه گیری نیروهای عمل کننده روی ابزارها در دسترس است. روش های تحلیلی و تجربی نیروهای گسترش یافته بر هم کنش بین خاک-ادوات را با دقت قابل قبولی پیش بینی کرده اند، هر چند که این روشها به ادوات ساده محدود شده اند. تعدادی نظریه عددی مانند روش المان محدود (FEM) و یا دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده اند که هنوز به علت فرضیه های پیوستگی این روشها، هیچکدام از این روشها قادر به پیش بینی تغییرات ساختار ترکیبی خاک در منطقه خاک ورزی مانند مشاهده ترک ها و جریان حاصل در منطقه مرزی بین ابزار خاک ورزی و خاک و بین ذرات خاک نیستند. شبیه سازی واقعی برهم کنش بین

² -Gill and Vandenberg

خاک-ادوات در حالتیکه تاثیرات دینامیکی در نظر گرفته شوند، پیچیده میشود. روش المان‌های گسسته برای شبیه-سازی مواد دانه‌ای و همچنین مطالعه رابطه بین رفتار میکروسکوپی و ماکروسکوپی مواد است. روش المان‌های گسسته تشکیل یا شکستن المان‌ها را فراهم میکند و میتواند در فرآیند شکستن یا رشد ترک‌ها استفاده شود. این روش که برای شبیه‌سازی رفتار مواد دانه‌ای (گرانولی) استفاده شده است (کاندال و استراک^۳، ۱۹۷۹). برای شبیه‌سازی خاک، برهم‌کنش بین خاک و اجسام صلب (جامد) یا انعطاف‌پذیر نیز مناسبند (اون^۴ و همکاران، ۲۰۰۲). رفتار غیرخطی خاک و برهم‌کنش بین خاک-ادوات به آسانی قابل توصیف با این روش است و ممکن است به عنوان وسیله‌ای برای بهینه‌سازی ادوات خاک ورزی به کار رود. در ۱۰ سال گذشته، مطالعات زیادی توانایی (پتانسیل) روش المان‌های گسسته برای شبیه‌سازی برهم‌کنش بین خاک-ادوات نشان داده‌اند. شمولویچ^۵ و همکاران (۲۰۰۷) برهم‌کنش بین خاک و تیغه برشی را با استفاده از روش المان‌های گسسته انجام دادند. همبستگی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای نیروهای بکاربرده شده روی تیغه بدست آمد. همچنین شباهت زیادی را بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی منحنی گسیختگی مشاهده کردند. نتایج شبیه‌سازی با تئوری‌های کلاسیک مکانیک خاک مک‌کیز^۶ (۱۹۹۷)، برای تیغه‌های مستقیم مقایسه شد، ارتباط معنی‌داری بین نتایج شبیه‌سازی و تئوری کلاسیک مک‌کیز در نیروهای بکاربرده شده روی تیغه در جهت افقی وجود داشت ولی در جهت عمودی ارتباط چندان معنی‌دار نبود که ناشی از جریان ذرات خاک زیرلبه تیغه است. مشاهدات شبیه‌سازی نشان داد که منحنی گسیختگی با خط مستقیم قابل توصیف هستند. همچنین نیروهای روی تیغه اغلب در پایین‌ترین قسمت تیغه متمرکز شده‌اند. باین وصف، شکل تیغه نقش معنی‌داری در مقدار نیروهای بکاربرده شده در زمان عملیات دارند. مقدار نیروی افقی در تیغه مستقیم در زمان عملیات خاک‌ورزی کمترین و نیروی عمودی روی تیغه سهموی نزدیک به صفر است. خوت^۷ و همکاران (۲۰۰۷)، ارزیابی تجربی روش المان‌های گسسته برای برهم‌کنش دینامیکی بین خاک-چرخ ارائه دادند. آنها در یافتن که زمان حرکت روبه جلوی چرخ صلب، ابتدا نیروی کششی افقی افزایش یافته و بعد از مدتی ثابت می‌ماند. همچنین مشاهده کردند که نیروی کششی روی چرخ صلب برای کل بارگذاری‌های عمودی در خاک شنی نرم (ریز) بیشتر از خاک شنی متوسط بود. همچنین نفوذ چرخ صلب در خاک شنی ریز بیشتر از خاک شنی متوسط آمده بود. زمان افزایش بار عمودی برای هر دو نوع خاک، نفوذ شبیه‌سازی شده افزایش یافته است. از نظر کیفی تغییر شکل برای خاک شنی متوسط، ارتباط بهتری بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود داشت. تاناکا^۸ و همکاران (۲۰۰۷)، فرآیند خاک-ورزی ناشی از یک زیرشکن ارتعاشی را با روش المان‌های گسسته شبیه‌سازی کردند. در توصیف رفتار ماکروسکوپی، در صورت انتخاب صحیح پارامترهای مدل، همبستگی زیادی بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی بدست آمد. همچنین نشان دادند که نه تنها منحنی گسیختگی، بلکه میتوان توزیع ترک‌ها را در ناحیه گسیختگی با این روش شبیه‌سازی کرد. آزاف^۹ و همکاران (۲۰۰۷)، پارامترهای روش المان‌های گسسته مورد نیاز برای فرآیند خاک-

^۳-Cundall and Strack

^۴-Owen

^۵-Shmulevich

^۶-McKeys

^۷-Khot

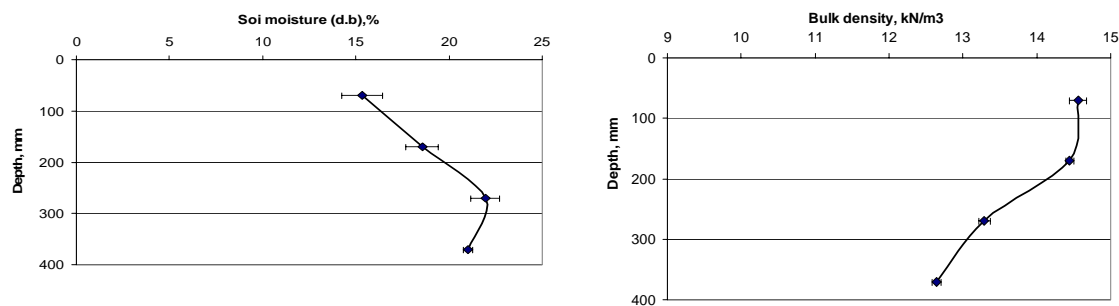
^۸-Tanaka

^۹-Azaf

ورزی را تعیین کردند. این آزمایش به صورت شبه‌استاتیک و در خاک غیرچسبنده و به صورت دوبعدی محدود شده بود. تعیین پارامترها بر اساس آزمایشات مزرعه‌ای و بانفوذسنج‌های گوه‌ای با زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه و صفحه تخت انجام گرفت. ارتباط معنی داری بین نتایج شبیه‌سازی با کارهای تجربی بدست آمد.

مواد و روش‌ها

جهت تعیین رابطه بین نیروی کششی و نیروی عمودی روی زیرشکن استاندارد، با سرعت حرکت و عمق یکسری آزمایشهای مزرعه‌ای در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی در خاک لومی شنی انجام گرفت. شکل ۲ رطوبت و دانسیته خاک مورد نظر را در اعماق مختلف تا ۴۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. جهت بررسی اثر سرعت، چهار سرعت پیشروی ۰/۵۱، ۰/۷۴، ۱، ۱/۲۲ متر بر ثانیه و پنج عمق متفاوت ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر با سرعت ثابت ۱ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲- محتوی رطوبتی و چگالی توده‌ای خاک لومی شنی

جهت اندازه‌گیری نیروهای کششی و عمودی روی تیغه از دینامومتر شاسی دار شکل (۳)، که در آن عمق کار به صورت الکترولیکی توسط جکهای هیدرولیک از کابین تراکتور کنترل می‌شده استفاده گردید. برای اندازه‌گیری نیروی افقی از دولودسل نوع S با ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن به صورت موازی وصل شده بود و تا ۵۰ کیلونیوتن را اندازه‌گیری می‌کرد، استفاده شد. یک لودسل ۲۵ کیلونیوتنی، نیروی عمودی را اندازه می‌گرفت.



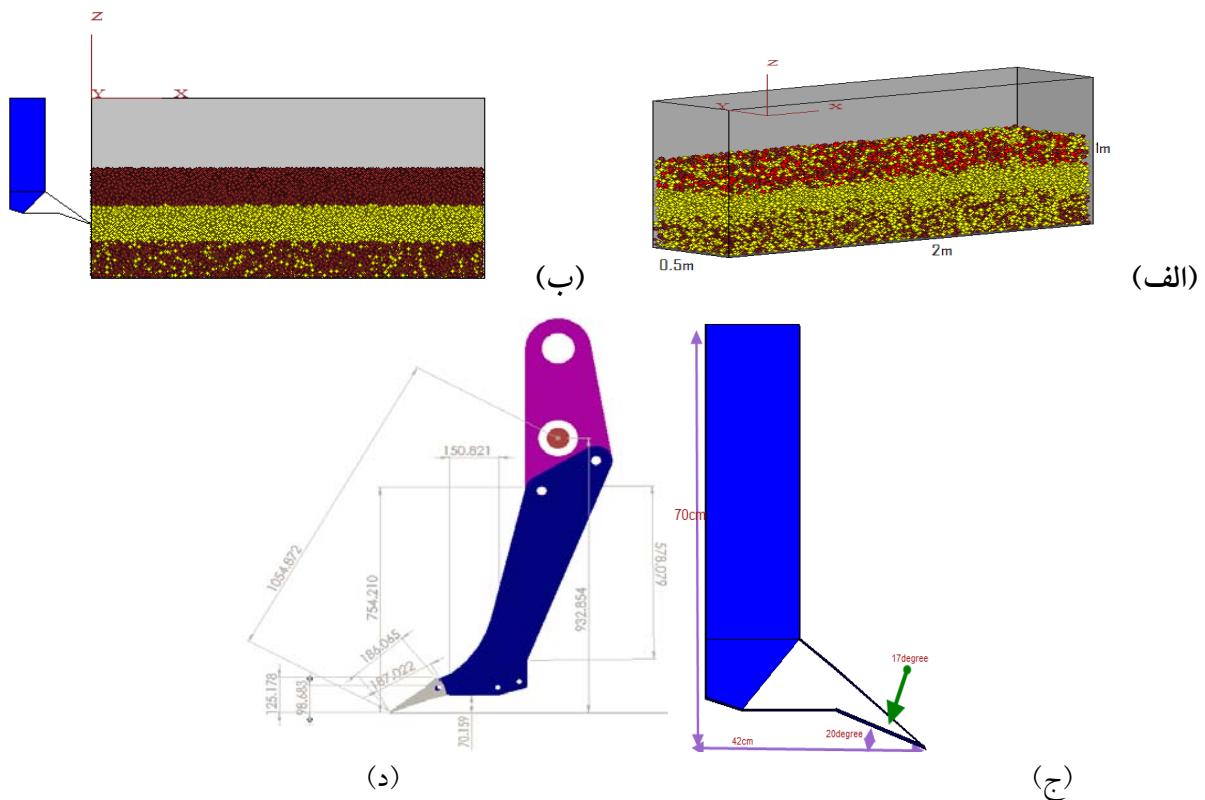
شکل ۳-نمایی از دینامومتر شاسی دار

برای انجام شبیه‌سازی از نرم افزار PFC^{3D} محصول شرکت آی‌تسکا استفاده شد. از مدل تماسی خطی و تئوری تماسی هرترز استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز این مدل ضرایب سختی نرمال و برشی، ضریب اصطکاک بین ذرات، ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و چگالی خاک مورد نیاز (خواص خاک لومی شنی) هستند. گام زمانی مورد نیاز به صورت اتوماتیک تنظیم شد، به علت محدودیت‌های محاسباتی، اندازه ذرات مدل بطور معنی‌داری بزرگتر از

ذرات واقعی خاک هستند (تینگ و همکاران، ۱۹۸۹) چون اندازه ذرات بزرگتر از اندازه واقعی ذرات خاک انتخاب شده بودند، برای انجام شبیه‌سازی پارامترهای خاک نیاز به کالیبره‌ی متناسب با اندازه ذرات داشتند، برای کالیبره کردن پارامترهای مورد نیاز از تست‌های برش مستقیم و تنش محوری در شبیه‌سازی استفاده شد. سپس جعبه‌ی با ابعاد طول ۲ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۱ متر ساخته شد و آنرا تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از ذرات کروی با مشخصات داده شده در جدول ۱ پرگردید و بعد از رسیدن ذرات به تعادل تیغه زیر شکن تحت زاویه ۳۷ درجه نسبت به افق با سرعت‌ها و عمق‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت.

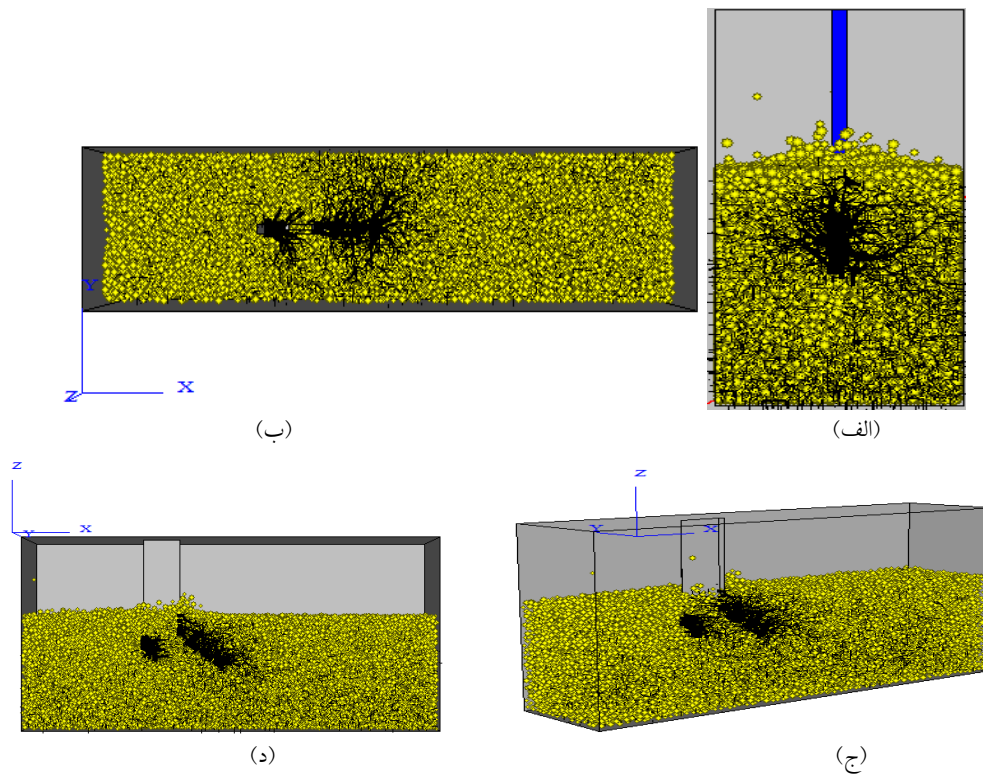
جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
شعاع ذرات	۰/۰۱۵-۰/۰۱m
ضریب پواسون	۰/۲-۰/۴۵
چگالی ذرات	۲۰۰۰kg/m ³
ضریب اصطکاک	۰/۵
سختی نرمال	۲/۲*۱۰ ^۶ (N/M)
سختی برشی	۲/۲*۱۰ ^۶ (N/M)
تعداد ذرات	۳۹۵۸۲



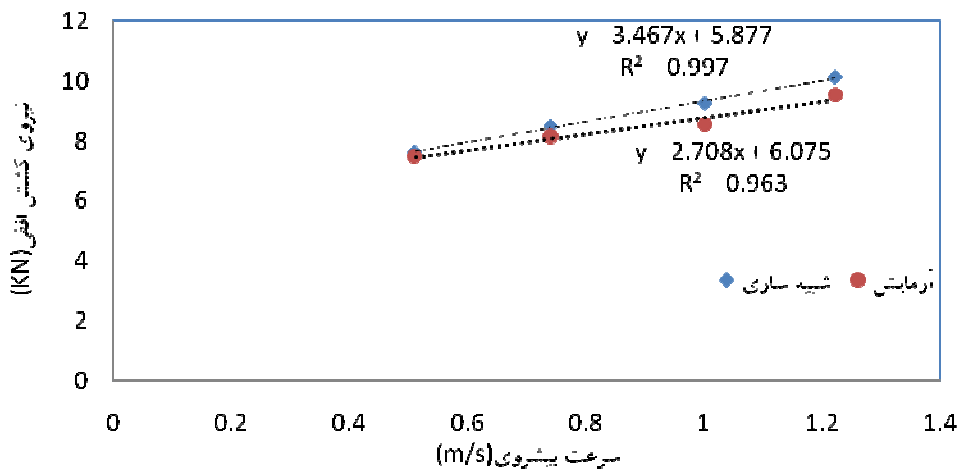
شکل ۴- ابعاد تیغه و جعبه خاک ساخته شده در PFC3D (الف، ب، ج) و تیغه طراحی شده در Solidworks (د)

نتایج و بحث

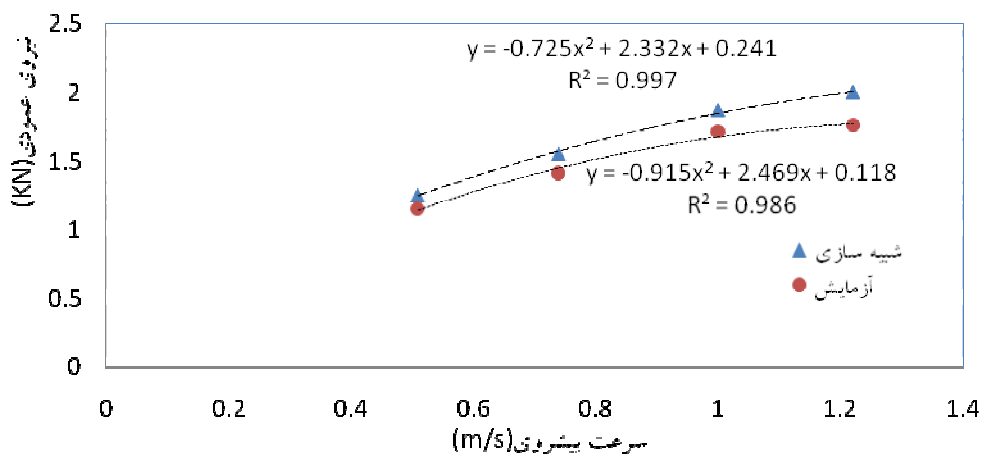


شکل ۵- نمایی از برهم کنش تیغه-خاک با سرعت ۱/۲۲ متر بر ثانیه در عمق ۳۰ سانتی متری (الف)-نمای بالا، (ب)-نمای جلو، (ج)-نمای روبرو، (د)-نمای کلی

شکل ۵ نماهای مختلف از برهم کنش تیغه-خاک را نشان می دهد، نقاط گسیختگی بطور واضح دیده می شود. همانطور که در قسمت (ب) دیده می شود، نقاط گسیختگی به صورت هلالی هستند. شکل ۶ و ۷ نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی را نشان می دهد. در هر دو مورد با افزایش سرعت پیشروی مقادیر نیروی کشش افقی و عمودی افزایش می یابد. سرعت پیشروی یکی از عوامل موثر بر افزایش نیروی کششی زیر شکن ها می باشد. بر اساس تحقیقات شون (۱۹۵۶) نیروی کشش تابعی از مقدار نیروی شتاب دهنده است و نیروی شتاب دهنده نیز خود متناسب با مجذور سرعت پیشروی است. بنابراین با افزایش سرعت پیشروی نیروی کششی افزایش می یابد. گزارشهای متفاوتی از روند تغییرات نیروی کششی با تغییر سرعت پیشروی ارائه شده است. این تغییرات ناشی از شرایط مختلف مزرعه آزمایشی و نوع وسیله خاک ورز می باشد. آون (۱۹۸۹) افزایش مقاومت کششی را تابعی درجه دوم از افزایش سرعت پیشروی گزارش کرد، اما سامرز و همکاران (۱۹۸۶) رابطه فوق را خطی گزارش کردند. همبستگی نزدیکی بین نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی، تاثیر سرعت بر نیروی کششی افقی و عمودی بدست آمد.

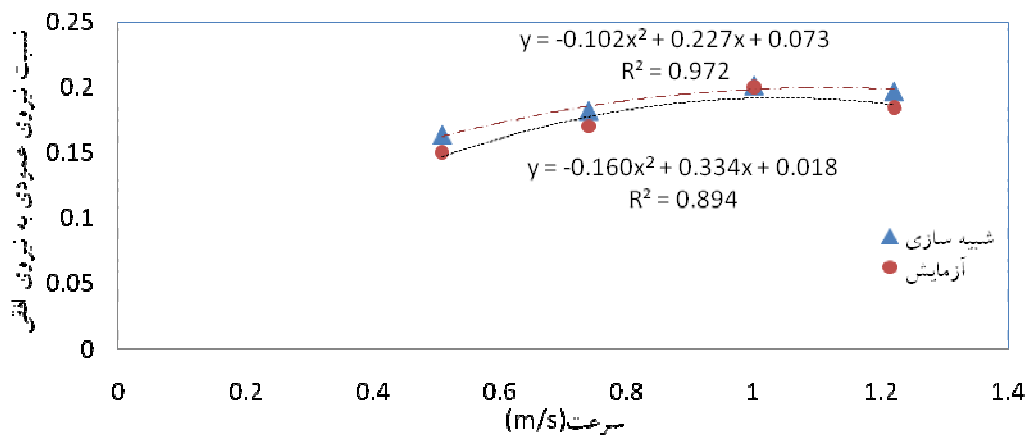


شکل ۶- تاثیر سرعت پیشروی بر نیروی کشش افقی



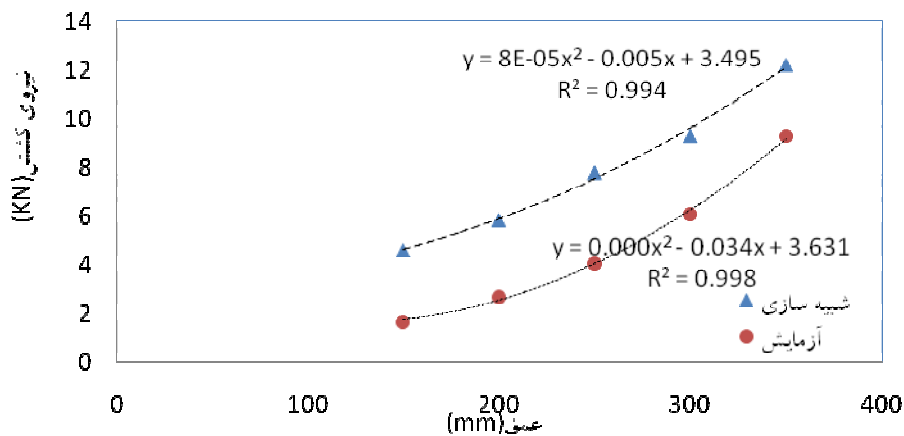
شکل ۷- تاثیر سرعت پیشروی بر نیروی عمودی

شکل ۸ رابطه بین سرعت و نسبت نیروی عمودی به نیروی افقی را نشان می دهد با افزایش سرعت این نسبت ابتدا افزایش می یابد ولی از سرعت ۱ متر بر ثانیه به بعد دوباره روند کاهشی پیدامی کند، بیشترین مقدار این نسبت در سرعت ۱ برابر با ۲۰ درصد است.

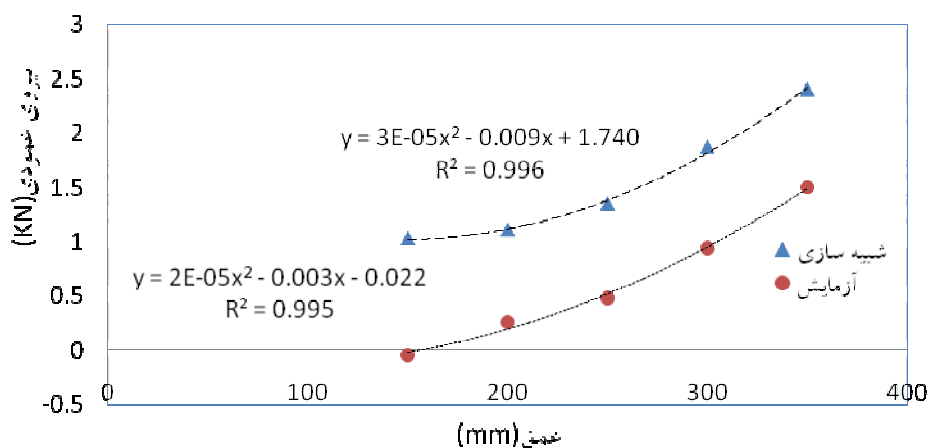


شکل ۸- نسبت نیروی عمودی به نیروی افقی در سرعت های مختلف پیشروی

شکل ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی را نشان می‌دهد. در هر دو مورد با افزایش عمق نیروی کشش افقی و عمودی افزایش می‌یابد. افزایش نیروی کششی با افزایش عمق خاک‌ورزی رامی توان ناشی از افزایش وزن و جرم مخصوص خاک دانست که منجر به افزایش نیروی اصطکاک بین خاک و تیغه و نیروی بیشتر برای بالا آوردن توده خاک می‌باشد. تحقیقات سایر محققین نشان داد که مقاومت کششی، تابعی درجه دوم از عمق و نیز ترکیبی از پهنای تیغه و عمق کار می‌باشد. همچنین این احتمال نیز وجود دارد که با افزایش عمق کار، نیروی عمودی واکنش خاک بزرگتر شده و موجب فشردگی مجدد لایه‌های فوقانی خاک گردیده و در نتیجه مقاومت کششی افزایش می‌یابد. اختلاف بین پیش‌بینی المان گسسته با استفاده از ذرات کروی و نتایج آزمایش ناشی از مقاومت غلتشی بیشتر ذرات مدل در مقایسه با رفتار واقعی خاک، ذرات خاک (که بزرگتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شده است) و پارامترهای واقعی خاک است. همچنین می‌تواند بخاطر مدل انتخاب شده (مدل تماسی خطی) باشد که پارامترهای اصلی آن تنها سختی نرمال و برشی می‌باشد.



شکل ۹- تاثیر عمق بر نیروی کشش افقی



شکل ۱۰- تاثیر عمق بر نیروی کشش عمودی

نتیجه گیری

۱- بر اساس نتایج بدست آمده میتوان گفت که روش المان گسسته می‌تواند رفتار دینامیکی مواد گرانولی مانند خاک به خوبی شبیه سازی نماید.

۲- با حرکت تیغه در خاک می‌توان براحتی نقاط گسیختگی خاک و حرکت آن را مشاهده نمود.

۳- ارتباط نزدیکی بین نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی برای پارامتر سرعت بدست آمد، اما برای پارامتر عمق اختلاف معنی‌داری وجود داشت که با انتخاب مدل تماسی مناسب می‌توان این اختلاف را به حداقل کاهش داد.

۴- اختلاف بین پیش‌بینی المان گسسته با استفاده از ذرات کروی و نتایج آزمایش ناشی از مقاومت غلتشی بیشتر ذرات مدل در مقایسه با رفتار واقعی خاک، ذرات خاک (که بزرگتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شده است) و پارامترهای واقعی خاک است.

منابع و مأخذ

1. Asaf, Z., Rubinstein, D., Shmulevich, I. 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92: 227-242.
2. Coetzee, C. J., Els, D. N. J. 2009. Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade-granular material interaction. *Journal of Terramechanics*. 46(1): 15-26.
3. Cundall, P. A., Strack, O. D. L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Journal of Geotech*. 29 (1): 47-65.
4. Franko, Y., Rubinstein, D., Shmulevich, I., 2006. Prediction of soil-bulldozer blade interaction using Discrete Element Method. *Trans. ASABE*. 50(2): 345-353.
5. Khot, L. R., Salokhe, V. M., Jayasuriya, H. P. W., Nakashima, H. 2007. Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction. *Journal of Terramechanics*. 44(6): 429-437.
6. Kushwaha, R. L., Zhang, Z. X. 1998. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. *Journal of Terramechanics*. 35 :69-86.
7. McKeys, E. and Ali, O. S. 1977. The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*. 14(2), 43-58.
8. Momozu, M., Oida, A., Yamazaki, M., Koolen, A. J. 2003. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method. *Journal of Terramechanics*. 39(4): 207-220
9. Shahgoli, G. 2009. Dynamic characteristics of oscillatory tillage. paper in the E-Proc. of 18 International Soil Tillage Research Organisation Conference, Izmir, Turkey, T2-006: 1-11
10. Shahgoli, G., Saunders, C., Desbiolles, J., Fielke, J. 2009. The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 97-105.
11. Shmulevich, I., Asaf, Z., Rubinstein, D. 2007. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil and Tillage Research*. 97: 37-50.
12. Tanaka, H., Momozu, M., Oida, A., Yamazaki, M., 2000. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the Distinct Element Method. *Journal of Terramechanics*. 37(1): 41-56.
13. Tanaka, H., Oida, A., Daikoku, M., Inooku, K., Sumikawa, O., Nagasaki, Y. 2007. DEM simulation of soil loosening process caused by a vibrating subsoiler. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal*, IX: PM-05-10.
14. Zhang, R., Li, J. 2006. Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by Distinct Element Method. *Journal of Terramechanics*. 43 : 303-316.
15. Srivastava, A. K., Carroll, E., Goering, R. P., Rohrbach, D. R., Buckmaster. 2006. *Engineering principles of agricultural machines*. Second edition, p.169-230.

17. Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R., Greco, C. 1989. Discrete numerical-model for soil mechanics. *Journal of Geotechnical Engineering-ASCE*. 115(3) : 379-398.

Modeling of soil-blade interaction and effect of speed and depth on subsoiler performance using Discrete Element Method(DEM)

Abstract

Predicting acting forces on tillage tool is one of the most important parameters to achieve greater efficiency. Understanding the relationship between the soil and tillage tool and tillage tool design modification will help to improve energy efficiency. Dynamic analysis of soil and tillage tool behavior provides the necessary information for tillage tool design, modification and optimization. Experimental results provide valuable results, however may be costly and are limited to specific speed and depths. Also the results accuracy depends on measuring instruments. With increasing computational power and developing numerical models, discrete element method gave acceptable results in the analysis of effective parameters for blade and soil interaction. In this research, discrete element modeling (DEM) was considered to analysis soil and tool interaction and predict required draft and vertical force on a tine. Also soil behavior was visualized using this model. The results showed that DEM was able to simulate dynamic behavior of granular material like soil. Soil movement and soil failure was visualized. Close agreement between simulation and experimental results was found for travel speed. However investigation of working depth effect on acting force showed that there was significant difference between experimental and model results. The difference can be minimized using appropriate model.

Key words: Tillage tool, DEM, subsoiler tine, soil, draft