



روش اجزاء گسسته (DEM) و کاربرد آن در دینامیک خاک‌های کشاورزی

کامران خیرعلی‌پور

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام (k.kheiralipour@ilam.ac.ir)

چکیده

دینامیک خاک یا برهمکنش ماشین و خاک برای محققین، سازندگان و تولیدکنندگان امری چالش‌زا می‌باشد. طراحی ابزارهای خاک‌ورز، دینامیک خاک یعنی دانش رفتار خاک و برهمکنش خاک و ابزار را در بر دارد. روش اجزاء گسسته یکی از روش‌های شبیه‌سازی برای حل مسائل دینامیک خاک در طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای مرتبط با خاک می‌باشد. روش اجزاء گسسته به دلیل شبیه‌سازی خاک به صورت دانه‌های مجزا، چگونگی رفتار خاک در برخورد با ابزارهای خاک‌ورز نسبت به دیگر روش‌ها را بهتر نشان می‌دهد. لذا این روش می‌تواند یک روش قوی برای طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای خاک‌ورز باشد. در این مقاله، روش اجزاء گسسته تشریح و کاربرد آن در دینامیک خاک در ارتباط با طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای خاک‌ورز بررسی شده است.

کلمات کلیدی: روش اجزاء گسسته؛ دینامیک خاک‌های کشاورزی؛ طراحی ماشین‌های کشاورزی، خاک‌ورزی.

*نویسنده مسئول: k.kheiralipour@ilam.ac.ir



روش اجزاء گسسته (DEM) و کاربرد آن در دینامیک خاک‌های کشاورزی

مقدمه

خاک‌ورزی یکی از عملیات مهم کشاورزی است که به از دو جهت مورد توجه محققین قرار دارد: ۱- تأثیر خاک‌ورزی بر خاک و رشد گیاه و ۲- میزان مصرف انرژی. ادوات مورد استفاده در این عملیات شامل وسایل خاک‌ورزی اولیه و ثانویه می‌باشد که نحوه طراحی، ساخت، تنظیم و به کارگیری آن وسایل بر این دو مؤثر است.

تحقیقات مربوط به دینامیک خاک از سال ۱۹۲۰ شروع شده و از سال ۱۹۵۰ شدت بیشتری یافته، اما هنوز طراحی ماشین‌های خاک‌ورزی را بیشتر بر اساس تجربه و به عنوان یک هنر می‌شناسند تا بر اساس علم و دانش [۱]. طراحی این ماشین‌ها نه فقط بر اساس کاربرد آن‌ها نیست، بلکه شامل دانش رفتار خاک و برهمکنش خاک و ابزار نیز می‌باشد. نوع تغییر شکل خاک یک عامل اولیه در انتخاب ادوات خاک‌ورزی می‌باشد، اما این امر باید با در نظر گرفتن نیروی کشش و نفوذ مورد نیاز برای عملیات کارآمد باشد. تحقیق‌های زیادی برای تحلیل عملیات خاک‌ورزی انجام شده است که بسیاری از آن‌ها جهت بهینه‌سازی توان مالبندی مورد نیاز آن‌ها بوده است [۲۰].

روش‌های به کاررفته برای حل مسائل برهمکنش خاک و ابزار و مکانیزم شکست خاک به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند: ۱- استفاده از روابط تحلیلی، تجربی و نیمه تجربی، ۲- روش تحلیل ابعادی ۳- روش‌های هوش مصنوعی و ۴- روش شبیه‌سازی. در بین این روش‌ها، روش شبیه‌سازی بهترین، اما مشکل‌ترین روش، برای طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های میدانی و مزرعه‌ای می‌باشد، که این کار از وظایف مهم مهندسان مکانیک ماشین‌های کشاورزی می‌باشد.

اخیراً دانشمندان با استفاده از روش‌های عددی مختلفی مانند روش اجزاء محدود، روش اجزاء گسسته و دینامیک محاسباتی سیالات و روش‌های مشابه دیگر خاک را شبیه‌سازی می‌نمایند. روش اجزاء محدود و روش دینامیک سیالات محاسباتی عمدتاً برای تجزیه و تحلیل محیط‌های پیوسته مناسب می‌باشد. این دو روش برای شبیه‌سازی شرایط دینامیکی با شکست‌های پی‌درپی که در خاک‌ورزی معمول است دارای محدودیت‌های می‌باشد [۲۰].

امروزه شبیه‌سازی عددی دینامیک توده ذرات صلب در محیط اجزاء گسسته^۱ (DEM)، که توسط کندال و استراک [۱۲] توسعه یافته، برای شبیه‌سازی خاک، به دلیل این که خاک یک ماده غیر پیوسته (گسسته) است، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش به یک ابزار استاندارد برای شبیه‌سازی و مطالعه پدیده‌های فیزیکی در مکانیک و دینامیک خاک، تبدیل شده است.

روش اجزاء گسسته

روش اجزاء گسسته، بنابر گفته مهندسان، یا دینامیک ذره، بنابر گفته فیزیک دانان، یک روش شبیه‌سازی ذره-مبنا یا به گفته کندال [۱۰]، یک مدل جریان-ذره است که رفتار مکانیکی مجموعه‌ای از ذرات نامنظم شکل یافته و برهمکنش آن با اجسام صلب یا ارتجاعی را مدل می‌نماید. روش اجزاء گسسته به خصوص برای شبیه‌سازی مواد دانه‌ای و برای مطالعه رفتار جزئی و کلی ذرات در برابر اجسام مناسب می‌باشد. روش اجزاء گسسته امکان شبیه‌سازی ایجاد یا شکستن تماس بین اجزاء را فراهم می‌کند و لذا می‌تواند برای به دست آوردن بینش فرایندهای جدا شدن ذرات و انتشار ترک استفاده شود.

مفهوم عمومی روش اجزاء گسسته

بنیان روش اجزاء گسسته شکل‌گیری قوانین تماس بین ذرات است. بر اساس این قوانین، معادلات حرکت ذرات با در نظر گرفتن نیروهای داخلی و خارجی وارد بر کل مجموعه توسعه یافته است. رفتار کل مجموعه با شبیه‌سازی این معادلات تعیین می‌شود. برای این کار دو روش مختلف بر اساس برهمکنش ذرات وجود دارد. روش ذرات سخت و روش ذرات نرم. برای مطالعه رفتار مواد دانه‌ای مانند خاک، روش ذرات نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱؛ ۳۳].

معادلات حرکت

بر طبق روش نیوتن، حرکت یک ذره صلب بر اساس برآیند نیروها و بردارهای گشتاور وارد بر آن تعیین می‌شود و بر طبق روش‌های نیوتن و اوایلر می‌تواند به‌عنوان حرکت مستقیم یک نقطه (در مرکز جرم ذره) و حرکت چرخشی آن حول همان نقطه بیان شود [۳۰].

مراحل زمانی

روش‌های پیوسته زمانی توسط محققین تشریح شده است [۲؛ ۶؛ ۱۶؛ ۲۸]. در بین این روش‌ها، روش اوایلر که فقط برای معادلات مرتبه اول دقیق است، با توجه به پیاده‌سازی ساده آن، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{aligned} V_{t+\Delta t} &= V_t + a_t \Delta t \\ X_{t+\Delta t} &= X_t + V_t \Delta t \quad (3) \end{aligned}$$

معادلات بالا به شکل زیر اصلاح شده است [۳]:

$$\begin{aligned} V_{t+\Delta t} &= V_t + a_t \Delta t \\ X_{t+\Delta t} &= X_t + (V_t + V_{t+\Delta t}) \frac{\Delta t}{2} \quad (4) \end{aligned}$$

افزایش زمانی (Δt) یک مشخصه مهم برای رسیدن به یک حل فیزیکی و پایدار در شبیه‌سازی می‌باشد. این افزایش زمانی باید جهت کاهش زمان محاسبات، به‌خصوص برای موقعی که تعداد زیادی ذرات مدنظر باشد، بهینه شود. بر طبق تیجسکنز و همکاران [۳۵]، در بسیاری از شبیه‌سازی‌های اجزاء گسسته گزارش شده که برای هر ضربه، انتگرال زمانی بین ۱۰ و ۲۰ مرحله زمانی در نظر گرفته شده است.

تانسور تنش و کرنش در مواد دانه‌ای

مقادیر تنش و کرنش کمیت‌های پیوسته‌ای هستند و باید برای حجم جسم تعریف شود. در روش اجزاء گسسته نیروهای تماس و جابجایی ذرات محاسبه می‌شوند. این نیروها برای اجسام مقیاس کوچک (ذره) هستند و نمی‌توان آن‌ها را تنش و کرنش نامید. بنابراین، محققین زیادی [۱۳؛ ۲۹] روابطی را بین تنش اعمال شده بر ذرات و اعمال شده بر کل مجموعه، در یک حالت تعادل یا شبه ایستا، را از طریق میانگین‌گیری ذرات به‌صورت یک ساختار پیوسته، ارائه نمودند. برای N حجم (N^V) تنش میانگین برای یک حجم مشخص به شکل زیر می‌باشد:

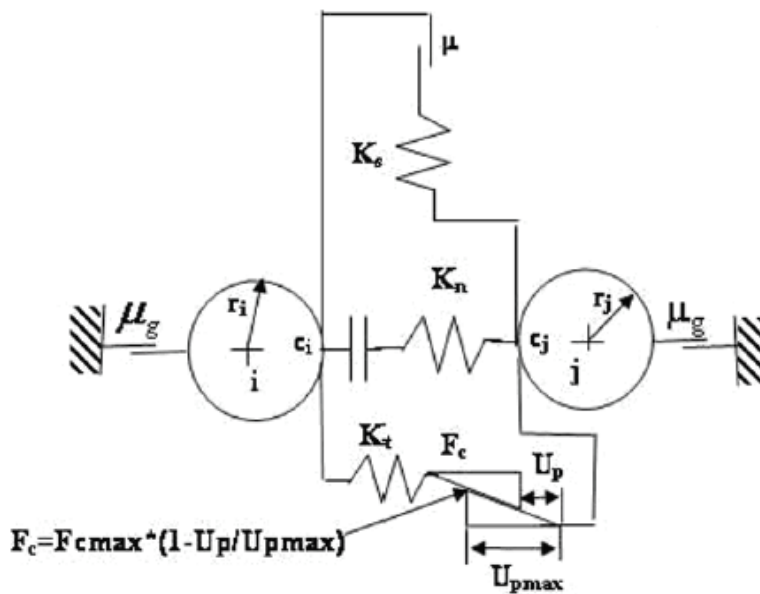
$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{N^V} F_{jc} L_i^c \quad (12)$$

که L^c فاصله بین مراکز دو ذره است که در نقطه c با هم تماس دارند.

تانسور مقدار کرنش می‌تواند با استفاده از روش کمترین مربعات به دست آید که مقدار خطا را به حداقل می‌رساند. این روش در نرم‌افزارهای تجاری نظیر PFC توسط ایتاسکا [۱۰] استفاده شده است.

مدل تماس

مشخصه‌های اجزاء تماس برای رفتار فیزیکی مدل موردنظر ضروری است. کندال و استراک [۱۲] مدل فنر-دمپر-لغزنده را برای برهمکنش ذره با ذره ارائه نمودند. بر اساس این مدل نیروی وقتی عمل می‌کند که دو ذره در تماس با هم باشند. مدل نرم جابجایی الاستیک-پلاستیک میرا محلی برای تشریح رفتار خاک پیشنهاد شده است [۴-۵؛ ۱۹]. برهمکنش بین دو ذره i و j در نقطه تماس C توسط یک مدل به روش مدل ذرات نرم شبیه‌سازی شده است (شکل ۱). این مدل دارای یک فنر خطی با ثابت K_n در جهت عمودی و یک فنر خطی با ثابت K_s در جهت مماسی و یک ثابت اصطکاکی μ به صورت سری با این دو فنر می‌باشد. کولمب میرا با ضریب μ_g در خلاف جهت سرعت مجموعه و متناسب با برآیند نیروهای وارد بر ذره عمل می‌کند.



شکل ۱. مدل تماسی نرم جابجایی الاستیک-پلاستیک میرا محلی بین دو ذره i و j [۱۲].

برای نشان دادن به هم چسبی، نیروی به هم چسبی (F_c) در هر دو جهت عمودی و مماسی، فنر کششی با ضریب K_t و فاصله پلاستیکی بیشینه برای جدا شدن U_{pmax} به عنوان نسبتی از مجموع شعاع دو ذره به مدل اضافه شده است. معادلات نیروی تماس دو ذره تحت فشار با در نظر گرفتن به هم چسبی به شکل زیر می‌باشد:

$$F_n = -\sum K_n \Delta U_n \quad (13)$$

$$F_s = \begin{cases} \sum K_s \Delta U_s & \text{for } \sum |K_s \Delta U_s| < \mu |F_n| + F_c \\ (\mu |F_n| + F_c) \cdot \text{sign}(\sum \Delta U_s) & \text{for } \sum |K_s \Delta U_s| \geq \mu |F_n| + F_c \end{cases} \quad (14)$$

که F_n نیروی عمود بر سطح تماس، F_s نیروی مماس بر سطح تماس و ΔU_n و ΔU_s افزایش جابجایی عمودی و مماسی در یک دستگاه مختصات محلی است.

اگر در این ناحیه برش اتفاق بیافتد افزایش برش پلاستیک در جهت نیروی برش خواهد بود. هنگامی که ذرات بخواهند از هم جدا شوند نیروی به هم چسبی تا زمانی که به مقدار F_c برسد توسط فنر کششی اعمال می‌شود، بعد از رسیدن آن به F_c ، تا زمانی که به حد پلاستیک $U_{p \max}$ می‌رسد حالت نرم (تسلیم) اتفاق می‌افتد. افزایش جابجایی پلاستیک در جهت برآیند نیروهای تماس می‌باشد. معادلات کشش به شکل زیر می‌باشند:

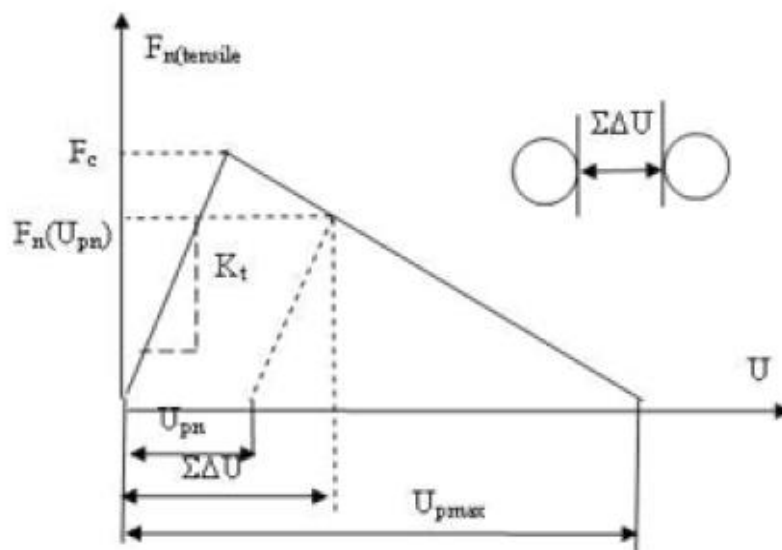
$$F_n = \sum K_t \Delta U_n \quad F_c > F \quad \text{برای}$$

$$F_n = \sum K_t \Delta U_s \quad (16)$$

هنگامی که $F_c < F$ تماس به تسلیم می‌رسد و نیروها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_n = F_c \left(1 - \frac{U_{pn}}{U_{p \max}} \right) \quad \text{و} \quad F_s = F_c \left(1 - \frac{U_{ps}}{U_{p \max}} \right) \quad (17)$$

که U_{ps} و U_{pn} مجموع تغییر شکل‌های پلاستیک در جهت عمودی و مماسی هستند. هنگامی که مجموع تغییر شکل‌های پلاستیک در هر جهتی به $U_{p \max}$ می‌رسند نیروی کششی در همان جهت صفر می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. نیروی به هم چسبی عمودی به عنوان تابعی از فاصله U بین دو ذره [۱۲].

مشخصه‌های مورد نیاز مدل (مشخصه‌های جزئی ذرات):

شکل و اندازه:

مشاهده شده است که نتایج روش اجزاء گسسته به تغییرات مشخصه‌های مدل حساس می‌باشد. به دلیل محدودیت‌های محاسباتی، اندازه ذرات مدل به طور معنی‌داری بزرگ‌تر از اندازه واقعی ذرات خاک در نظر گرفته می‌شود [۳۶]. بنابراین در هر روش اندازه‌گیری مشخصه‌ها مورد نیاز در روش اجزاء گسسته، باید اختلاف اندازه ذرات در نظر گرفته شود و این اختلاف با تعیین مقادیر دیگر مشخصه‌ها جبران شود.

اشکال نامنظم ممکن است زمان انجام محاسبات را تا بیش از چهار برابر اشکال کروی افزایش دهند [۲۲]. به این دلیل استفاده از ذرات کروی توده‌ای جهت شبیه‌سازی شکل واقعی ذرات و با تداخل‌های مختلف را پیشنهاد شد [۱۵].

سفتی فنر

ثابت فنرهای K_n و K_s در مدل را می‌توان با استفاده از نظریه تماسی هرتز برای اجسام اریب با فرض ارتجاعی و همگن بودن مواد محاسبه نمود. بر طبق نظریه تماسی هرتز رابطه بین نیرو و تغییر شکل دو ذره اریب در تماس با هم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_n = \frac{4}{3} \left[\frac{E_{p1} E_{p2}}{(1-\nu_{p1}^2)E_{p1} + (1-\nu_{p2}^2)E_{p2}} \right] \left[\frac{R_{p1} R_{p2}}{R_{p1} + R_{p2}} \right]^{\frac{1}{2}} \Delta_n^{\frac{3}{2}} = K_n \Delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (18)$$

که R_{p1} ، R_{p2} ، E_{p1} ، E_{p2} ، ν_{p1} و ν_{p2} به ترتیب شعاع، مدول ارتجاعی و نسبت پواسن ذرات ۱ و ۲ و Δ_n تغییر شکل عمودی می‌باشد. معادله زیر برای ضریب K_s ارائه شده است [۱۰؛ ۱۴؛ ۳۴]:

$$F_s = K_s (\Delta T) \Rightarrow K_s = \frac{2G_p^{\frac{2}{3}} [3(1-\nu_p) \bar{R} F_n]^{\frac{1}{3}}}{2-\nu_p} \quad (22)$$

میراگر

ضریب میراگر در جهت‌های عمودی و مماسی C_n و C_s محاسبه می‌شود [۱۲؛ ۳۳؛ ۳۶]. ضرایب میراگر به صورت ثابت میرایی بحرانی C_{cr} در معادله زیر بیان می‌شود:

$$C_{cr(n,s)} = 2 \sqrt{\frac{m_i m_j K_{n,s}}{m_i + m_j}} \quad (27)$$

که m_i و m_j جرم ذرات در تماس با هم می‌باشد.

استفاده از رابطه زیر برای محاسبه میرایی بحرانی در یک معادله مرتبه دوم پیشنهاد شده است [۱۲].

$$C_{cr(n,s)} = 2 \sqrt{m_i K_n} \quad (28)$$

در این مورد، جرم می‌تواند به صورت میانگین جرم دو ذره در تماس با هم (m_i) آورده شود. ضریب میراگر در جهت‌های عمودی و مماسی $C_{n,s}$ توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{n,s} = \xi \cdot C_{cr(n,s)} \quad (29)$$

که در آن ξ ضریب میراگر در حالت تعادل می‌باشد.

به هم چسبی

روابط نظری بین به هم چسبی داخلی ذرات و به هم چسبی کل توده خاک برای ذرات کروی هم‌اندازه، شرایط کرنش صفحه‌ای و ضریب اصطکاک کمتر از ۰/۵۶ به شکل زیر ارائه شده است [۲۱]:

$$C = n \sqrt{\frac{15}{6-19\mu^2}} \cdot C' \quad (34)$$



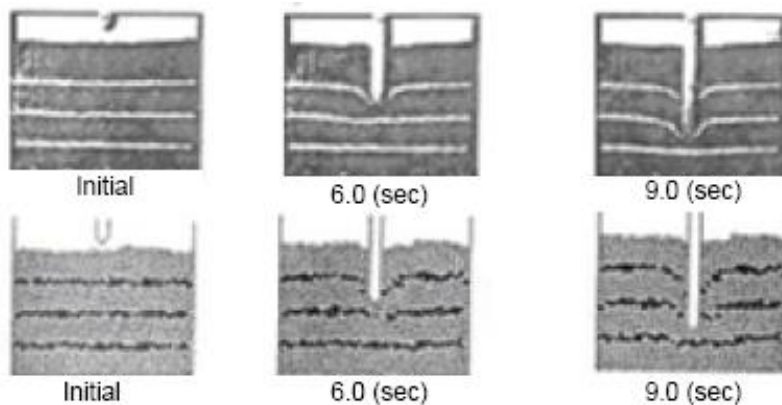
که 'C' به هم چسبی داخلی، μ اصطکاک داخلی و Π تخلخل می‌باشد.

اصطکاک

محاسبه ضریب اصطکاک بین ذرات خاک ممکن است خیلی پیچیده باشد زیرا شامل مقاومت در برابر غلتش و نیروی کششی بین ذرات است [۳۶]. رابطه مستقیمی برای ضریب اصطکاک بین ذرات و ضریب اصطکاک (حجمی) در شبیه‌سازی آزمایش سه محوری در روش اجزاء گسسته ارائه شده است. این ضریب اصطکاک بیشتر از ضریب اصطکاک فرض شده بین ذرات است [۲۴].

شبیه‌سازی دینامیک خاک‌های کشاورزی به روش اجزاء گسسته

تینگ و همکاران [۳۶] یک مدل اجزاء گسسته را برای خاک به روش کندال ارائه نمودند. آن‌ها اجزاء خاک را به شکل بشقاب گرد فرض نمودند و به هم چسبی را نیز در نظر گرفتند. جهت به دست آوردن ارتباط بین مشخصه‌های کلی خاک (E, ν, ϕ, C) و مشخصه‌های جزئی ذرات، آزمایشات نفوذ و برش را انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها همبستگی خوبی بین مشخصه‌های مدل روش اجزاء گسسته و مشخصه‌های الاستیک (E, ν) برای خاک لومی شنی را نشان داد. اما برای ضرایب اصطکاک همبستگی به دست نیامد. تاناکا و همکاران [۳۲] نتایج نفوذ میله را با پیش‌بینی‌های مدل مقایسه نمودند (شکل ۳). این محققان نتوانستند مشخصه‌های مکانیکی واقعی خاک را به مشخصه‌های مدل اجزاء گسسته نسبت دهند. اگرچه همبستگی کیفی بین پیش‌بینی‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی وجود داشت. این محققین عدم همبستگی را به تماس‌های نادرست استفاده‌شده در مدل اجزاء گسسته نسبت دادند و پیشنهاد نمودند که مؤلفه چسبندگی بایستی به مدل اضافه شود.



شکل ۳. مقایسه کیفی نتایج آزمایش نفوذ و مدل اجزاء گسسته [۳۲].

مامازو و همکاران [۲۳] مدل اجزاء گسسته را با اضافه نمودن مشخصه به هم چسبی در جهت عمودی توسعه دادند. وقتی که ذرات در اثر نیروی تماسی بین آن‌ها شروع به جدا شدن از هم می‌کنند، تا زمانی رسیدن به یک فاصله مشخص عمل می‌کند، با بیشتر شدن آن فاصله فنر بریده می‌شود.

تاناکا و همکاران [۳۱] مدلی را ارائه نمودند که شامل نیروهای کششی فرمول‌بندی شده توسط مامازو و همکاران [۲۳] بوده و نیروهای به هم چسبی در جهت مماسی را نیز اضافه نمودند.

اویدا و همکاران [۲۵] مدلی را ارائه نمودند که چسبندگی را نیز شامل می‌شد. در مدل ایشان جهت حرکت فنر کششی برحسب جابجایی نسبی بین ذرات تعیین شد. فرض شد که فقط زمانی نیروها عمل می‌کنند که همپوشانی بین ذرات ایجاد شود یعنی در حین وجود

همپوشانی بین ذرات فتر معمولی به عنوان یک فتر فشاری عمل کند. در این حالت مراکز ذرات (دقیقاً مانند مدل معمولی) به هم نزدیک می شود. اما در صورت وجود همپوشانی و جدا بودن مراکز ذرات از یکدیگر، طول فتر مانند یک فتر کششی بر اساس فاصله بین مراکز ذرات در مرحله زمانی قبلی تغییر می کند. اخیراً این روش توسط رابینستین و همکاران [۲۷] با استفاده از نرم افزار تجاری PFC2D [۱۹] به منظور بررسی عملکرد تیغه های مختلف بولدزر در خاکی با به هم چسبی کم استفاده شد. ذرات خاک به صورت تجمع دو بشقاب مدل شدند.

آسف و همکاران [۴] (۲۰۰۶ الف) یک مدل دوبعدی اجزاء گسسته برای برهمکنش یک ابزار کششی با خاک ارائه نمودند. از نرم افزار تجاری PFC2D code استفاده نمودند. در مدل خود ذرات با دو شکل متفاوت، کره و دو کره چسبیده به هم در نظر گرفتند. مشخصه های خاک مورد تحقیق را بر اساس نظریه تماس هرتر تعیین نمودند. زاویه اصطکاک داخلی (بین ذرات خاک) و به هم چسبی خاک بر اساس مدل و مشخصه های خاک و شبیه سازی آزمون دوماحوری محاسبه نمودند. نتایج مدل نشان داد که وقتی از شکل کروی استفاده می شود زاویه اصطکاک داخلی نایستی بیشتر از ۰/۶۵ شود. برای مقادیر بیشتر باید ذرات خاک به شکل دو کره چسبیده به هم در نظر گرفته شود.

هوفستتر [۱۷] جهت بهینه سازی تیغه بولدزر، برهمکنش بین آن و خاک را به صورت سه بعدی در محیط اجزاء گسسته مدل نمود. نیروی افقی به دست آمده از نتایج شبیه سازی ایشان همبستگی خوبی با نتایج تجربی داشت.

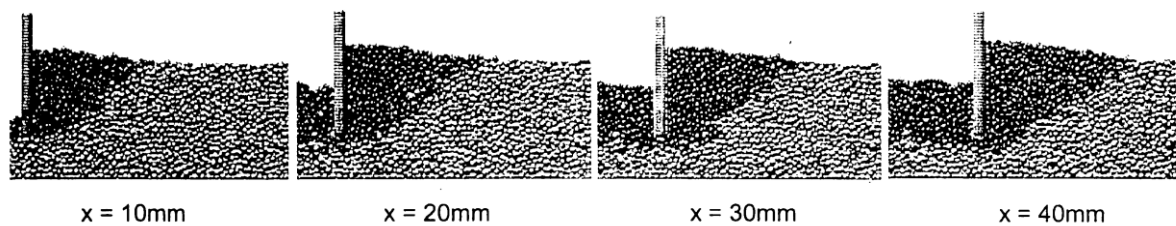
کلیری [۸] مدل دوبعدی اجزاء گسسته را برای پر شدن سطل خاک بردار جهت بهینه نمودن شکل سطل و فرایند حفاری را ارائه نمود. مدل دوبعدی با استفاده از نرم افزار PFC2D code ایجاد شد.

مقاله ای در مورد مدل سه بعدی سطل خاک بردار توسط اوون و همکاران [۲۶] به چاپ رسید. نتایج شبیه سازی آن ها همبستگی قابل قبولی را با نتایج تجربی به دست آمده از سطل کوچک نشان داد.

کوئتری و الس [۹] سطل خاک بردار به روش اجزاء گسسته شبیه سازی نمودند. هورنر و همکاران [۱۸] یک مدل سه بعدی اجزاء گسسته برای برهمکنش بین خیش و خاک را ارائه نمودند. نتایج کیفی مدل آن ها را قادر ساخت تا تغییر شکل خاک حین و بعد از عبور خیش را بررسی کنند.

تاناکا و همکاران [۳۲] مدل اجزاء گسسته را برای برهمکنش زیرشکن با خاک را به منظور تعیین و بهینه سازی شکل ساقه زیرشکن ارائه نمودند. مدل ایشان همبستگی کیفی خوبی با نتایج تجربی داشت.

بوی و همکاران [۷] تیغه ساده را به روش اجزاء گسسته مدل نمودند (شکل ۴) و نیروی کششی تیغه را به دست آوردند. اما ایشان مدل خود را ارزیابی ننمودند.



شکل ۴. مدل تیغه ساده، نمای کناری [۷].

نتیجه گیری

در طی چند سال گذشته، محققین زیادی عملکرد خوبی از روش اجزاء گسسته در شبیه‌سازی میکرومکانیک رفتار دینامیکی ذرات تشکیل دهنده مواد گزارش داده‌اند. مزیت مهم روش اجزاء گسسته در شبیه‌سازی برهمکنش ابزار خاک‌ورز با خاک، نسبت به دیگر روش‌های شبیه‌سازی، شبیه‌سازی خاک به صورت دانه‌های جدا از هم می‌باشد و مطالعه رفتار خاک در برهمکنش با ابزارهای خاک‌ورز را فراهم می‌کند. همچنین این روش قادر به محاسبه نیروهای وارد بر ابزار می‌باشد و لذا می‌تواند یک روش قوی برای طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای خاک‌ورز باشد.

علاوه بر استفاده زیاد از این روش، اما این روش به دلیل محدودیت‌های هنوز در کارهای مهندسی به‌طور گسترده استفاده نمی‌شود. اگرچه محققین زیادی همبستگی‌های خوبی بین شبیه‌سازی‌های این روش و نتایج تجربی گزارش داده‌اند، این روش به دلیل فقدان روش‌های دقیق تعیین مشخصه‌های مکانیکی کلی مدل (که نشان‌دهنده خواص مکانیکی خاک هستند) و همچنین به دلیل این که خواص جزئی این روش (که متصل‌کننده ذرات به همدیگر هستند) لزوماً خواص فیزیکی کل ماده را دنبال نمی‌کنند، هنوز در مراحل اولیه خود قرار دارد. لذا تعیین مشخصه‌های این روش یعنی خواص فیزیکی و مکانیکی موردنیاز مدل مهم می‌باشد.

منابع

1. شهیدی، س.ک.، احمدی‌مقدم، پ. ۱۳۸۴. رابطه ماشین و خاک: فیزیک و مکانیک خاک و خاک‌ورزی. جهاد دانشگاهی، واحد ارومیه.
2. Allen, M. P., and Tildesley, D. J. 1994. Computer Simulation of Liquids. Oxford Univ. Press.
3. Asaf, Z. 2006. Determination of discrete element model parameters required for simulation of soil-implement interaction. PhD thesis. Haifa, Israel: Technion – Israel Inst. Techn.
4. Asaf, Z., Rubinstein, D., and Shmulevich, I. 2006. Evaluation of link-track performances using DEM. J. Terramechanics, 43, 141-161.
5. Asaf, Z., Shmulevich, I., and Rubinstein, D. 2006. Predicting soil vehicle performances using distinct element methods. Trans. ASAE 49(3): 607-616.
6. Ascher, U. M., and Petzold, L. 1998. Computer methods for ordinary differential equations and differential algebraic equations. Philadelphia, Pa. SIAM.
7. Bui, Ha. H. Fukagawa, R. Kobayashi, T. Tamoi, K. 2004. DEM simulation of three-dimensional soil failure with cutting blade. 7th APISTVS conference. September 14 -16, Changchun, China.
8. Cleary, P.W. 1998. The filling of dragline buckets. Math. Eng. Ind. 7(1): 1-24.
9. Coetzee, C.J., and Els, D.N.J. 2009. The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM. Journal of Terramechanics, 46, 217-227.
10. Cundall, P.A. 1988. Computer simulations of dense sphere assemblies micromechanics of granular materials. In Mechanics of Granular Materials, 113-123. J. T. Jenkins and M. Satake, eds. Amsterdam: Elsevier.
11. Cundall, P.A., and Hart, D.R. 1992. Numerical modeling of discontinua, J. Eng. Computations, 9, 101-113.
12. Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. J. Geotechnique, 29, 47-65.
13. Cundall, P., and Strack, O.D.L. 1982. Modeling of microscopic mechanics in granular material: New models and constitutive relations. In Mechanics of Granular Materials, 137-149.

14. Dobry, R., and Tangtat, N. 1992. Discrete modeling of stress strain behavior of granular media at small and large strains. *J. Eng. Computations*, 9, 129-143.
15. Favier, J.F., Abbaspour-Fard, M.H. Kremmer, M. and Raji, A.O. 1999. Shape representation of axi-symmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multielement model particles. *Eng. Computations*, 16, 467-480.
16. Golub, G.H., and Ortega, J.M. 1991. *Scientific Computing and Differential Equations: An Introduction to Numerical Methods*. New York, N.Y.: Academic Press.
17. Hofstetter, K. 2002. Analytic method to predict the dynamic interaction of dozer blade with earthen material. In *Proc. 14th Intl. Conf. ISTVS*.
18. Horner, D.A., Peters, J.F., and Carrillo, A. 2001. Large scale discrete element modeling of vehicle-soil interaction. *J. Eng. Mechanics*, 127, 1027-1032.
19. Itasca. 2002. *PFC2D User's Manual*. Version 3.0. Minneapolis, Minn.: Itasca Consulting Group Inc.
20. Jayasuriya, H.P.W., Salokhe, V.M. 2001. A Review of Soil-tine Models for a Range of Soil Conditions. *J. agric. Engng Res*, 79, 1-13.
21. Kanatani, K.I. 1983. Mechanical properties of ideal granular materials: New models and constitutive relations. In *Mechanics of Granular Materials*, 235-244.
22. Loughran, J.G., Anderson, S.I., Rance, J.M., Mak, K.M., and Owen, R.J. 2001. Development of computational system for modeling of ground engineering processes with application to mining. In *Computational Mechanics (Proc. 1st Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney)*.
23. Momozu, M., Oido, A., Yamazaki, M., and Koolen, A. J. 1999. Simulation of soil loosening process by pendulum type blade by means of modified distinct element methods. In *Proc. 13th Intl. Conf. ISTVS*, 71-78.
24. Ng, T.T., Dobry, R., and Patrakis, E. 1994. Numerical simulation of monotonic and cyclic loading of granular soil. *J. Geotechnical Eng.* 120(2).
25. Oida, A., Schwanghart H., Ohakubo, S., and Yamazaki, M. 1997. Simulation of soil deformation under a track shoe by DEM. In *Proc. 7th European ISTVS Conf.*, 155-162.
26. Owen, D., Feng, R.J., Souza, Y.T., Neto, E.A., Cottrell, M., Wang, F.M., Pires, A., and Yu, J. 2002. The modeling of multi-fracturing solids and particulate media. In *Proc. 5th World Congress on Computational Mechanics*.
27. Rubinstein, D., Asaf, Z., and Shmulevitch, I. 2006. Analyzing and optimizing soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method. In *Proc. 10th European ISTVS Conf.*
28. Rapaport, D.C. 1995. *The Art of Molecular Dynamics Simulation*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
29. Rothenburg, L., and Bathurst, J.R. 1989. Analytical study of anisotropy in idealized granular materials. *Geotechnique*, 39, 601-614.
30. Shmuevich, I., Rubinstein, D., and Asaf, Z. 2009. *Advance in Soil Dynamic*, volum 3. ASABE.
31. Tanaka, H., Inooku, K., Nagasaki, Y., Miyzaki, M., and Sumikawa, O. 1999. Numerical analysis of soil loosening in subsurface tillage by a vibrating type subsoiler by means of the distinct element method. In *Proc. 13th Intl. Conf. ISTVS*, 791-798.
32. Tanaka, H., Inooku, K., Nagasaki, Y., Miyzaki, M., Sumikawa, O., and Oida, A. 2000. Simulation of soil loosening at subsurface tillage using a vibrating type subsoiler by means of the distinct element method. In *8th European ISTVS Conf.*, 32-37.
33. Taylor, L.E., and Preece, D.S. 1992. Simulation of blasting induced rock motion using spherical element model. *J. Eng. Computations*, 9, 243-252.



34. Thornton, C. and Antony, J.S. 2000. Quasi static shear deformation of soft particle system. Powder Technology, 109, 179-191.
35. Tijssens, E., Ramon, H., and De Baerdemaeker, J. 2003. Discrete element modeling for process simulation in agriculture. J. Sound Vib. 266: 493-514.
36. Ting, M.J., Corkum, T.B., Kauffman, C.R., and Greco, C. 1989. Discrete numerical model for soil mechanics. J. Geotechnical Eng. 115(3): 379-398.
37. Upadhyaya, S.K., Rosa, U.A., and Wulfsohn, D. 2002. Application of the finite element method in agricultural soil mechanics. In Advances in Soil Dynamics, 2, 117-153.



Discrete element method (DEM) and its application in agricultural soil dynamic

Kamran Kheiralipour

Mechanical Engineering of Biosystems Department, Ilam University.

Abstract

Soil dynamic, soil-machine interactions, present a continuous challenge for researchers, developers and manufacturers. Design of tillage implements includes soil dynamic, i.e. knowledge of the behavior of soils and soil-implement interactions. Discrete element method is one of the simulation technics used to solve soil dynamic problems regard to design and optimization of implements. Comparing with other simulation methods, discrete element method can better depict soil behavior dealing with implements due to simulate soil as collection of particles. Therefore, discrete element method can be a powerful method to design and to optimize implements. In this paper, discrete element method introduced and its application in soil dynamics in relation with design and optimization of tools was investigated.

Key words: Discrete element method, Soil dynamic, Design of agricultural machinery, Tillage.

*Corresponding author

E-mail: k.kheiralipour@ilam.ac.ir