

مدل سازی عملکرد تیغه های مختلف زیرشکن با استفاده از روش المان های مجزا

غلامحسین شاهقلی^{۱*}، سیروان حاجی مامندی^۲

۱. استادیار، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. کارشناس ارشد، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۷/۷)

چکیده

بر اساس تحقیقات انجام گرفته برای مواد دانه ای مانند خاک، روش عددی المان مجزا از نظر شبیه سازی دقیق تر از سایر روش ها مانند روش های تحلیلی و المان محدود است. در این تحقیق عملکرد سه نوع ساقه کج ساق، پاراپلو و مرسوم در دو حالت آزمایشی و مدلسازی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش ها در انباره خاکی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. فاکتورهای مورد بررسی سرعت پیشروی و نوع تیغه بودند. سرعت پیشروی در ۵ سطح ۱، ۱/۵، ۲، ۳ km/h و ۲/۵ و عمق ثابت ۳۵cm بر روی نیروی مقاوم کشتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین نشان داد که سرعت پیشروی و نوع تیغه در سطح احتمال ۱٪ تاثیر معنی داری روی نیروی مقاوم کشتی داشتند. بیشترین نیروی مقاوم کشتی ۱۵۴۱ N مربوط به تیغه مرسوم در سرعت ۳ km/h و کمترین مقدار نیروی مقاوم کشتی ۲۹۴/۸ N مربوط به تیغه کج ساق در سرعت ۱ km/h می باشد. با افزایش سرعت حرکت تیغه انرژی پیوندی در واحد زمان، مقدار کار اصطکاکی بین سطح تیغه و ذرات خاک و انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته که این پارامترها از عوامل موثر در افزایش نیروی کشش می باشند. در تمامی سرعت ها کمترین نیروی مقاوم کشتی مربوط به تیغه کج ساق و بیشترین نیروی مقاوم کشتی مربوط به تیغه مرسوم است. ضریب تبیین بالا بین نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی ($R^2=0.9935$) نشان می دهد که مدل المان مجزا تاثیر سرعت پیشروی و نوع تیغه را بر روی نیروی مقاوم کشتی به خوبی نشان می دهد. میانگین خطای نسبی مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از روش المان مجزا ۶/۸۷۱٪ برای میانگین نیروی مقاوم کشتی بدست آمد.

واژه های کلیدی: زیرشکن، تیغه کج ساق، پاراپلو، نیروی کشش

مقدمه

آماده کردن زمین زراعی مستلزم برش خاک، برگرداندن و خرد کردن خاک می باشد. عملیات اولیه آماده کردن زمین زراعی توسط ادواتی مثل گاوآهن برگردان دار، گاوآهن بشقابی و زیرشکن ها انجام می گیرد. به لحاظ مصرف انرژی، آماده سازی زمین زراعی همیشه برای محققان، طراحان، تولید کنندگان و کشاوران یک مسئله مهم بوده است. تهیه بستر بذر و زیرشکن کردن زمین زراعی در کشاورزی دقیق از اهمیت خاصی برخوردار است. عملیات خاک ورزی در حدود نیمی از انرژی مکانیکی مورد استفاده در تولید محصول را به خود اختصاص می دهند (Kushwaha & Zhang, 1998). از این رو پیش بینی دقیق نیروهای عمل کننده روی تیغه خاک ورز و بهینه سازی طراحی ابزار خاک ورز به بهبود بازده انرژی کمک خواهد کرد. از زیرشکن ها برای شکستن لایه های سخت خاک که در

زیر لایه سطحی خاک قرار دارند، استفاده می شود. لایه های سخت تولید شده در خاک زراعی بیشتر به علت فشار پاشنه های گاوآهن برگرداندار و فشار چرخ های تراکتور بخصوص در اراضی مرطوب می باشد (Gueirf, 1994). از جمله عوامل محدود کننده استفاده از زیرشکن ها، مصرف بالای انرژی در واحد سطح، افزایش هزینه عملیات و احتمال ایجاد تراکم مجدد خاک را می توان نام برد (Raofat & Mashhadi, 2000). از آنجا که تراکتورهای پر قدرت در اختیار کلیه زارعین نیست، کاربرد این ادوات محدود می باشد. در این راستا، کاهش نیروی مقاوم کشتی زیرشکن همواره مورد توجه محققین بوده است. زیرشکن کج ساق و پاراپلو از جمله ادوات جدیدی هستند که بدین منظور طراحی و ساخته شدند. شاخه کج ساق متشکل از یک ساق و تیغه مورب می باشد که در انواع تجاری، ضمایمی از قبیل کفشک و نوک گوه ای که به انتهای تیغه متصل می گردد که پاراپلو نامیده شده است (Esehaghbeygi et al., 2005).

یا مواد گسسته به کار رفته و برای مطالعه رابطه بین رفتارهای میکرو و ماکرو مواد گرانوله بسیار مناسب می‌باشد. همچنین این روش قابلیت مدل‌سازی تغییرات پلاستیکی بزرگ و ناپیوستگی در ماده را دارد. از جمله مزایای دیگر شبیه‌سازی به روش المان مجزا این است که اطلاعات توزیع نیروهای افقی و عمودی را در سطح مشترک بین تیغه و خاک فراهم می‌کند و برای مدل‌سازی بر هم کنش بین خاک و تیغه خاک‌ورز مناسب بوده و به عنوان روشی برای مطالعه جنبه دینامیکی این بر هم کنش به کار می‌رود. رفتار غیرخطی خاک و بر هم کنش خاک و ابزار به خوبی توسط این روش مدل می‌شود. در این روش مواد به صورت مجموعه از المان‌های مجزا در نظر گرفته می‌شوند. روابط مکانیکی بین المان‌ها با ثابت‌های فنر نرمال، ثابت فنر مماسی و پارامترهای اصطکاکی تعیین می‌شوند. روش المان‌های مجزا مبتنی بر کاربرد مکرر معادلات حرکت نیوتنی برای تحلیل یک مجموعه متشکل از تعداد زیادی عناصر مجزا می‌باشد. در این روش مقدار نیروی تماسی، انتقال و دوران ذرات، از حل گام به گام زمانی معادلات دینامیکی در فضای سه بعدی که مبتنی بر قانون دوم نیوتن می‌باشد، بدست می‌آید.

قابلیت روش المان مجزا برای مدل‌سازی بر هم کنش خاک- ابزار در یک فرآیند خاک‌ورزی با استفاده از شبیه‌سازی بر هم کنش تیغه برشی پهن- خاک بررسی شده و چهار شکل متفاوت تیغه انتخاب گردید و همبستگی خوبی بین نتایج شبیه- سازی المان مجزا و نتایج آزمایشگاهی برای منحنی شکست بدست آمد (Shmulevich et al., 2007).

همچنین نتیجه کالیبراسیون پارامترها در بر هم کنش تیغه و ذرات مورد بررسی قرار گرفت (Coetzee & Els, 2009). نیروی کششی در شبیه‌سازی‌های روش المان‌های مجزا تا جابجایی ۱۲۰ mm با نتایج آزمایشگاهی یکسان بود و در جابجایی بیشتر به دلیل افزایش اصطکاک ذرات با دیواره نیروی کششی افزایش نشان داد. نیروی عمودی در هر دو حالت آزمایش و شبیه‌سازی دارای نوسان‌های زیادی بود که انجام مقایسه را مشکل می‌ساخت. آنها همچنین رفتار تیغه با مواد دانه‌ای را با یافته‌های تحلیلی مانند تئوری پلاستیسیته مقایسه نمودند. نتایج مقایسه تطابق خوبی برای نیروی کششی اندازه- گیری شده کمتر از ۱۵۰ N نشان داد. برای نیروهای کششی اندازه‌گیری شده بیشتر از این مقدار، روش المان‌های مجزانیروها را کمتر از نیروهای اندازه‌گیری شده پیش بینی کرد.

در تحقیقی نتایج نفوذ میله با پیش‌بینی به روش المان مجزا مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان دادند که نمی‌توان ویژگی‌های مکانیکی واقعی زمین و پارامترهای استفاده شده در

زیرشکن کج‌ساق از نظر ساختمان اصلی و نحوه کار مشابه گاوآهن پاراپلو بوده و در عین حال به دلیل نداشتن نوک گوه‌ای و کفشک، مقاومت کششی کمتری دارد (Harrison et al., 1988). زیرشکن کج‌ساق عملیات شخم را نسبت به گاوآهن پاراپلو، با بازده انرژی بالاتری انجام می‌دهد و به کمک تیغه‌ی برش که به طور مایل قرار دارد و به دلیل نداشتن نوک گوه‌ای از فشردگی مجدد خاک نیز جلوگیری می‌کند. این ادوات با ساختار ویژه خود در عین اینکه خاک را زیرورو می‌کنند ساختمان خاک را در هم شکسته و از این‌رو به انرژی کششی کمتری نیاز دارند (Harrison, 1990; Williams, 1981).

هر چند که سرعت پیشروی جزء پارامترهای طراحی نیست ولی سرعت پیشروی نیز یکی از عوامل موثر بر نیروی مقاوم کششی زیرشکن‌ها می‌باشد. گزارش‌های متفاوتی از روند تغییرات مقاومت کششی با تغییر سرعت پیشروی ارائه شده است. برخی محققین افزایش مقاومت کششی ادوات خاک‌ورزی را تابعی درجه دوم از افزایش سرعت پیشروی گزارش کرده اند (Owen, 1989) ولی رابطه خطی نیز بین افزایش نیروی کشش با افزایش سرعت پیشروی نتیجه‌گیری شده است (Summers et al., 1986). این اختلاف در نتیجه اینرسی لازم جهت شتاب به ذرات خاک و همچنین تاثیر نرخ برشی روی مقاومت برشی و تاثیر نرخ برش در روی اصطکاک فلز- خاک بوده و همه اینها با توجه به نوع خاک و شرایط خاک متفاوت می‌باشند. در خاک- های شنی نیروی اینرسی خیلی مهم می‌باشد (Lut and Wismer, 1971). از آنجایی که نیروی اینرسی با مربع سرعت افزایش می‌یابد بنابراین در این خاکها نیروی کشش با مربع سرعت افزایش می‌یابد. در خاکهای رسی اثر نرخ برش در روی مقاومت برشی و مقاومت چسبندگی مهم می‌باشد (Stafford, 1979). در کل با افزایش سرعت در عملیات خاک‌ورزی، شتاب داده شده به ذرات خاک افزایش یافته و به همین دلیل افزایش نیروی مقاوم کششی را در بر خواهد داشت.

ساختار خاک به عنوان یک ترکیب چند فازی، به طور طبیعی مجزا است. بر هم کنش خاک و ابزار که شامل شخم، حفاری و جابجایی خاک است، به دلیل تغییرات سه بعدی خاک، تاثیرات دینامیکی، جریان خاک و اختلاطی که در لایه- های خاک اتفاق می‌افتد یک فرآیند پیچیده است. تاکنون روش‌های متفاوتی برای تعیین بر هم کنش خاک- ابزار مورد مطالعه قرار گرفته است. روش المان‌های مجزا (DEM) یکی دیگر از روش‌های عددی است که برای مدل‌سازی مواد دانه ای و

اساس آزمون های مزرعه ای پیشنهاد کرده که مطابق با نتایج (Yong *et al.* 1984) بود.

زیرشکن ارتعاشی با استفاده از روش المان مجزا، شبیه سازی گردید و تاثیر فرکانس و زوایای مختلف ارتعاشی بر عملکرد زیرشکن بررسی شد (Shahi & Shahgholi, 2010). عمق کاری تیغه زیرشکن ۳۸ سانتی متر و سرعت پیشروی ۰/۸۹ متر بر ثانیه انتخاب شده بود. برای بررسی تاثیر فرکانس بر عملکرد زیرشکن، از فرکانس های ۱/۹۴، ۳/۳، ۴/۹، ۶ و ۸/۸ هرتز در دامنه ± 69 استفاده گردید. در همه آزمایش های ارتعاشی نسبت به آزمایش های غیر ارتعاشی، با افزایش فرکانس میزان کار مرزی، انرژی جنبشی و کار اصطکاکی روند افزایشی نشان داد ولی با افزایش فرکانس، میانگین انرژی پیوندی روند کاهشی نشان داد.

روش المان های گسسته برای مدلسازی خاک های چسبنده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. رفتار غیر خطی خاک و برهم کنش خاک- ابزار می تواند به آسانی با استفاده از این روش شرح داده شود. در نتیجه به نظر می رسد این روش راه امید بخشی برای مدلسازی برهم کنش خاک دانه ای - ابزار باشد و می تواند به عنوان روشی برای بهینه سازی فرآیند طراحی به کار گرفته شود.

با وجود چنین پیش زمینه از عملکرد زیرشکن ها و کاربرد المان های مجزا در شبیه سازی رفتار ابزار خاکورزی در برش خاک، مهمترین اهداف این تحقیق عبارت بودند از: ۱- مطالعه توانایی روش المان گسسته برای مدلسازی فرآیند برهم کنش بین خاک و ابزارهای خاکورزی ۲- ایجاد مدل برش خاک توسط زیرشکن کج ساق، پاراپلو و مرسوم در محیط المان- های گسسته ۳- بررسی و مقایسه عملکرد تیغه های کج ساق، پاراپلو و مرسوم از نظر نیروی مقاوم کششی در سرعت های مختلف پیشروی و عمق ثابت کاری به روش آزمایشی و مدلسازی.

مواد و روش ها

ابتدا تیغه های مذکور مطابق مطالعات با اندازه های استاندارد در محیط نرم افزار Solid works 2010 طراحی و سپس اقدام به ساخت تیغه های مذکور شد (شکل ۱).

از برای آزمایشگاهی تیغه های مذکور در انباره خاکی موجود در کارگاه گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه ارومیه انجام گرفت. سوپل بین مذکور دارای طول ۲۰ متر و عرض ۲ متر بود که ارتفاع خاک موجود در داخل کانال سوپل بین به یک متر می رسید (شکل ۲). آزمایش تعیین بافت

روش المان مجزا را به همدیگر مرتبط ساخت (Tanaka *et al.*, 2000). اگر چه ارتباط ظاهری خوبی بین پیش بینی مدل و نتایج تجربی حاصل گردید ولی اختلاف معنی داری بین آن دو وجود داشت. این محققین عدم همبستگی را به ثابت های نادرست استفاده شده در مدل روش المان مجزا نسبت داده و پیشنهاد کردند که باید یک المان چسبنده به مدل اضافه گردد. بنابراین مدل دیگری ارائه شد که شامل چسبندگی بود (Oida *et al.*, 1999). در اینجا عملکرد فنر نرمال به وسیله حرکت نسبی بین ذرات تعیین شده بود. از این رو فرض شده بود که نیروها تنها زمان هم پوشانی بین ذرات عمل می کنند به طور مثال تا زمانی که هم پوشانی بین ذرات وجود داشته باشد فنر نرمال مانند فنر فشاری عمل می کند. آن ها نتایج شبیه سازی حرکت یک چرخ روی خاک را ارائه دادند. بعد از کالیبراسیون مدل، نسبت به نیروهای اندازه گیری شده روی یک دندان چرخ، همبستگی خوبی بین داده های تجربی و پیش بینی روش المان مجزا حاصل گردید. مدل روش المان مجزا اصلاح شده که شامل یک المان برای مشخص کردن چسبندگی در جهت نرمال بود ارائه گردید (Momzo *et al.*, 2003). در یک زمان مشخص المان ها در نتیجه نیروهای تماسی بین ذرات از یکدیگر جدا می گردند، فنر کششی تا زمان رسیدن ذرات به یک فاصله خاص از یکدیگر عمل نموده و سپس فنر جدا شده و مدل عادی بدون فنر به وجود می آید. از این مدل برای توصیف نفوذ یک تیغه چرخشی در زمین استفاده کردند. از آنجا که هیچ نتیجه یا تصویری فراهم نشده بود اهمیت این تحقیق، بیشتر اصلاح فرآیند مدلسازی به روش المان گسسته است.

مدل های دو بعدی و خاک های بدون چسبندگی با استفاده از روش روش المان های مجزا به دست آمد (Asaf *et al.*, 2007). تعیین پارامترهای مدل بر اساس آزمون های نفوذ صورت گرفت که در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه سازی انجام شد. برای به حداقل رساندن خطا از روش حل معکوس با الگوریتم نلدر- مید^۱ استفاده گردید. خطای تخمین اولیه در این کار کمتر از ۱۵٪ گزارش شد. همبستگی خوبی برای رفتار مکانیکی خاک بین آزمایش ها و شبیه سازی های المان مجزا بدست آمد. بعضی از پارامترهای مدل، مثل پارامترهای فنری می توانند با استفاده از مکانیک پیوسته و تئوری های برخورد هرتز تعیین شوند. اما روش قدرتمندی برای تعیین همه پارامترهای مدل وجود ندارد. نتایج ارائه شده توسط (2006) Asaf *et al.* روشی را برای تعیین پارامترهای مدل المان مجزا بر

زاویه حمله (زاویه کج شدگی به سمت جلو در راستای حرکت تیغه بوده) و زاویه تمایل (زاویه خم شدگی عرضی که عمود بر جهت حرکت می باشد) برای تیغه کج ساق و پاراپلو برابر با ۱۵ و ۴۵ درجه گردیده و زاویه حمله تیغه مرسوم ۲۷ درجه می باشد. سپس برای سرعت‌های مختلف پیشروی از اینورتور ۳ فاز کنترل سرعت استفاده شد. به طوری که با ارائه فرکانس‌های مشخص با توجه به کاتالوگ اینورتور، سرعت پیشروی مورد نظر برای تیغه فراهم گردید. با حرکت کردن تیغه و نفوذ آن در داخل خاک، لودسلی که برای اندازه‌گیری نیروی کشش در نظر گرفته شده بود، تحت کشش قرار گرفت و خروجی لودسل از طریق دیتالاگر (DT800) به لپ‌تاب منتقل شد.

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام گرفت. در این تحقیق از نرم افزار Mstac 1.42 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و همچنین از محیط اکسل^۱ نرم افزار آفیس ۲۰۱۰ برای رسم نمودارها و بدست آوردن منحنی برازش داده‌ها استفاده شد.

کالیبراسیون خواص خاک

مدلسازی ذرات بسیار کوچک در حد ذرات خاک، در نرم افزار PFC_{3D} با توجه به قدرت کامپیوترهای در دسترس، برای انجام تحلیل بر روی ذرات بسیار کوچک توسط این نرم‌افزار ممکن است روزها و حتی هفته‌ها به طول انجامد. بنابراین در این تحقیق برای مدلسازی ذرات خاک آزمایشی، قطر ذرات بزرگتر از قطر ذرات واقعی خاک انتخاب گردید. به طوری که اندازه شعاع ذرات در بازه ۳ تا ۵ میلی‌متر انتخاب شدند. چون شعاع ذرات ایجاد شده در محیط نرم افزار، بزرگتر از حالت واقعی هستند بنابراین ذرات ایجاد شده نیاز به کالیبره شدن داشتند تا رفتار مشابه به ذرات واقعی خاک را از خود نشان دهند. در روش المان مجزا، رفتار ذرات وابسته به پارامترهای میکروسکوپیک مانند سختی ذرات و ضریب اصطکاک ذرات و تماس‌ها است. در خاک واقعی اندازه‌گیری پارامترهای میکروسکوپیک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، چون ذرات واقعی مواد به طور فیزیکی برای اندازه‌گیری این پارامترها خیلی کوچک هستند. از این رو پارامترهای میکروسکوپیک ذرات شبیه‌سازی برای ارائه رفتار توده‌ای مانند ذرات واقعی نیاز به کالیبره شدن دارند. شرکت آیتسکا پیشنهاد کرده که باید آزمایش خواص فیزیکی روی مواد واقعی انجام گیرند و سپس با روش المان مجزا مدلسازی شوند (Itasca, 2005). سپس پارامترهای

خاک مورد نظر به روش هیدرومتری و براساس استاندارد ASTM-C131 انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که خاک شامل ۸۵٪ شن، ۵٪ سیلت و ۱۰٪ رس بوده و نشان‌دهنده بافت شنی خاک مورد آزمایش بود.



شکل ۱- الف تیغه کج ساق، ب- تیغه پاراپلو، ج- تیغه مرسوم

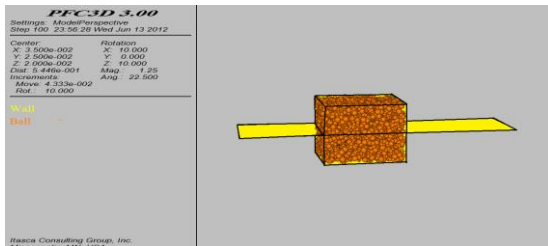


شکل ۲ - انبار خاک کارگاه گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

مکانیزم حماله انبار خاک طوری طراحی شده که می‌توان در عرض سوپل‌بین بسته به عرض کار ابزار خاک‌ورز چند آزمون را انجام داد. چون خاک فرآوری شده در داخل سوپل‌بین تقریباً دارای شرایط یکسانی می‌باشد. برای فرآوری خاک داخل کانال، ابتدا آن را مسطح کرده و سپس برای رسیدن به تراکم مورد نظر عمل غلتک زدن انجام گرفت. البته تعداد عبور غلتک طوری تنظیم گردید که در تمامی آزمون‌ها خاک دارای تراکم یکسانی باشد. برای اندازه‌گیری تراکم از دستگاه نفوذ سنج (Rimik CP20, Australia) استفاده شد. رطوبت خاک مورد نظر در هنگام انجام آزمایش ۱۴٪ (db) بود.

برای بررسی تاثیر سرعت بر روی نیروی مقاوم کششی در سه نوع تیغه کج ساق، پاراپلو و مرسوم با ثابت نگه داشتن عمق کار تیغه‌ها در حدود ۳۵ cm، سرعت پیشروی بر روی سرعت‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ km/h تنظیم شد. برای این کار، تیغه‌ها روی بازوی مخصوصی که روی حماله قرار دارد سوار شد به طوری

جعبه برش را تشکیل دادند. نمونه جعبه برش مدلسازی شده در شکل (۴) مشاهده می‌شود. برای جلوگیری از بیرون ریختن ذرات بعد از عبور دیوارها از روی ذرات، دو دیوار اضافی در طرفین تعبیه شده است (Yan, 2009). دیوار اضافی سمت چپ، مربوط به قسمت بالایی جعبه برش و دیگری مربوط به نیمه تحتانی آن است. برای اعمال نیرو به مجموعه ذرات نیز از همین دیوارها استفاده شد.



شکل ۴- مجموعه متراکم شبیه‌سازی آزمون برش مستقیم پس از رسیدن به تعادل

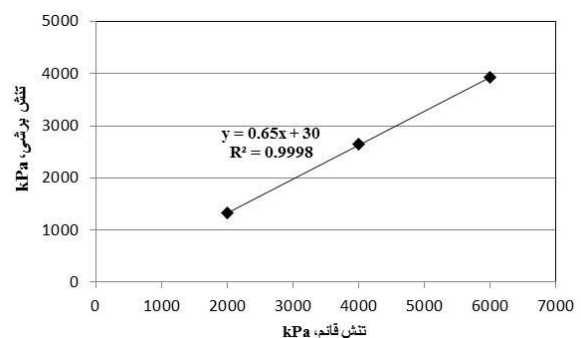
بعد از ایجاد سطوح نگهدارنده، ذرات کروی که نقش مواد دانه‌ای را دارند با دامنه شعاع مشخص ایجاد شدند. دامنه شعاع انتخاب شده برای ذرات همان دامنه شعاع مواد کالیبره شده بود (شکل ۴). برای انجام آزمایش برش مستقیم در محیط نرم افزار PFC_{3D} بارگذاری عمودی با حرکت دادن دیوار بالایی در خلاف جهت محور Z انجام شد. با حرکت این دیوار به سمت پایین به علت ایجاد تراکم در مجموعه ذرات باعث می‌شود که نیروی در راستای محور Z بر دیوار مذکور وارد گردد. حرکت دیوار تا جایی ادامه پیدا خواهد کرد که نیروی وارد بر این دیوار برابر با بار گذاری عمودی در حالت آزمایشگاهی باشد. از دیوارهای ایجاد شده می‌توان برای اعمال شرایط مرزی استفاده کرد. مثلاً با اعمال سرعت معین (ثابت یا متغیر) به دیوارها و یا کنترل سرعت دیواره‌ها با استفاده از یک سیستم خودکار شرایط مرزی اعمال کرد. همچنین با ایجاد صفحه‌ای از ذرات متصل به هم و اعمال سرعت ثابت به آن یا ثابت نگهداشتن آن می‌توان شرایط مرزی را برای سیستم تعریف کرد. شرایط اولیه معمولاً با تغییر در تخلخل اولیه سیستم، به طوری که ایجاد میزان معینی تنش در سیستم نماید، اعمال می‌شود.

انتخاب مدل ساختاری تماسی

مدل ساختاری تماسی اول به عنوان مدل تماسی انتخاب شد که ترکیبی از مدل تماسی خطی، مدل لغزشی و مدل میرایی محلی می‌باشد. بین ذرات ایجاد شده در این مدل هیچ گونه اتصالی برقرار نیست. مشخصات المان‌های تماسی می‌تواند توسط یک تابع خطی یا غیر خطی ارائه شود. برای ارائه رفتار فیزیکی ماده شبیه‌سازی شده احتیاج به تعیین این تابع می‌

میکروسکوپی ذرات مواد شبیه‌سازی برای اینکه رفتار توده‌ای مشابهی با مواد واقعی را از خود نشان دهند، تنظیم شوند. آزمایش‌های فیزیکی مواد که برای کالیبره کردن استفاده شده‌اند شامل آزمایش‌های مزرعه‌ای از قبیل شاخص مخروطی و تست نفوذ میله و آزمایش‌های آزمایشگاهی از قبیل آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری هستند. در این تحقیق از آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. پارامترهایی که نیاز به کالیبره داشتند عبارت بودند از چگالی و سختی ذرات، ضریب اصطکاک ذرات، ضریب اصطکاک خاک و فلز و ثابت میرا کننده. از آنجا که خاک یک ماده چسبنده است از مدل‌های اتصالی استفاده شد، از این رو مقاومت پیوندی تماسی همراه با مقاومت پیوندی موازی نیاز به کالیبره شدن دارند. کالیبراسیون با کالیبره کردن چگالی شروع شد چون وابسته به سختی ذرات یا ضریب اصطکاک نیست و سپس سختی ذرات که مستقل از ضریب اصطکاک بود کالیبره گردید و در نهایت شبیه‌سازی آزمایش برش مستقیم انجام شد.

برای تعیین پارامترهای خاک در این مطالعه، آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM-D3080 به روش کرنش کنترل شده مورد استفاده قرار گرفت. سودمندی آزمایش با کنترل کرنش در این است که رفتار نمونه حتی بعد از گسیختگی نمونه قابل مشاهده و اندازه‌گیری می‌باشد، در این آزمایش زاویه اصطکاک داخلی خاک 33° و چسبندگی برابر با ۳۰ kPa تعیین شد (شکل ۳).



شکل ۳- پوش گسیختگی از تست برش مستقیم آزمایشگاهی

شبیه‌سازی آزمایش برش مستقیم در نرم افزار PFC_{3D}

سطوح به صورت دیواره‌های مرزی مدل طراحی شدند تا ذرات ایجاد شده در درون آنها قرار گیرند. در زمان معرفی ابعاد دیواره‌ها، سطح داخلی آن‌ها نیز (سطحی که با ذرات در تماس خواهد بود) نیز برای سیستم تعریف شدند. برای مدلسازی جعبه برش مستقیم ده دیوار مورد استفاده قرار گرفت. پنج دیوار بالایی، نیمه فوقانی جعبه برش و پنج دیوار پایینی نیمه تحتانی

- R = شعاع متوسط، m
- R_{p1} و R_{p2} = شعاع ذرات در تماس با هم، m
- E = مدول الاستیسیته خاک، Pa
- ν = ضریب پواسون خاک، -
- K_n = سختی عمودی، N/m
- K_s = سختی برشی، N/m

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در مدل ترکیبی تماسی اول

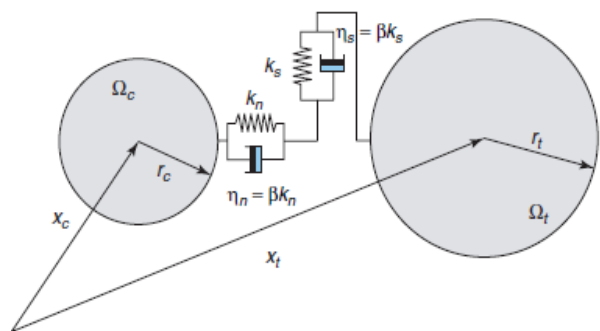
دیواره جعبه خاک	تیغه	ذره	پارامتر
-	-	۳۱۷۸۷۵	تعداد ذرات
-	-	۰/۰۰۳-۰/۰۰۵	شعاع ذرات، m
9×10^5	9×10^5	9×10^5	سختی عمودی، N/m
9×10^4	9×10^4	9×10^4	سختی برشی، N/m
-	-	۰/۰۲-۰/۰۴۵	ضریب پواسون
-	-	۱۶۵۰	جرم مخصوص، kg/m^3
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۶۵	ضریب اصطکاک
-	-	۰/۳	ضریب میرایی محلی

مدلسازی تیغه و جعبه خاک در نرم افزار PFC_{3D}

بعد از کالیبره کردن خواص ماکروسکوپی و میکروسکوپی ذرات خاک، اقدام به مدلسازی تیغه و انباره خاک با استفاده از نرم افزار PFC_{3D} شد (شکل ۷). انباره خاک شامل ۶ دیواره با ضریب سختی 9×10^5 و ضریب اصطکاک ۰/۲۵ بود و ابعاد جعبه خاک به ترتیب برابر با طول ۱ متر و عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر بودند که توسط دیواره‌ها ایجاد شد. سپس با ۳۱۷۸۷۵ ذره کروی که قبلاً کالیبره شده بودند تا ارتفاع ۰/۴ متری پرگردید. قابل ذکر است تمامی مراحل که برای مدلسازی جعبه برش مستقیم تشریح شد برای مدلسازی انباره خاک نیز در نظر گرفته شد. این ضرائب برای اینکه ذرات در اثر نیروهای وارد از طرف زیرشکن، از انباره خاک خارج نشوند و تحمل نیروها را داشته باشند، انتخاب گردیدند. در این مدلسازی از پیوندهای موازی استفاده گردید چون نسبت به مدل پیوندهای تماسی، رفتار شکننده خاک و تغییر شکل و ناحیه گسیختگی (شکست) خاک را بهتر نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی مدل پیوند موازی شامل سختی پیوندی نرمال و برشی، مقاومت پیوندی نرمال و برشی و ضریب شعاع پیوندی بودند. سپس تیغه در عمق ۳۵ سانتی‌متری در داخل ذرات خاک قرار داده شد. ابعاد سویل بین بر اساس ماکزیمم تعداد ذرات و خنثی کردن تاثیر لبه‌ها انتخاب شده بود. اگر انباره خاک خیلی کوچک باشد، نیروها یا تنش از

باشد. نیروهای تماسی نسبت به سطح تماس به اجزاء عمودی و مماسی تجزیه می‌شوند. یک مدل ویسکوالاستو پلاستیک بر اساس مجموع مدل‌های پارامتری می‌تواند برای شرح ارتباط بین دو ذره با فنرها، میراکننده‌ها، اصطکاک یا المان‌های دیگر که پدیده فیزیکی را ارائه می‌دهند، به کار رود. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، مدل ساختاری تماسی اول ترکیبی از مدل تماسی خطی، مدل لغزشی و مدل میرایی محلی است. در مدلسازی مجموعه ذراتی که شامل این مدل بودند، هیچ گونه اتصالی بین ذرات برقرار نگردید. دستور Property برای تعریف مدل، K_n برای تعیین سختی عمودی، K_s برای تعیین سختی برشی، η_n برای تعیین دانسیته مدل و η_s برای تعیین ضریب اصطکاک ذرات و ν برای تعیین میرایی مدل به کار رفته است.

مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای این مدل در جدول (۱) مشاهده می‌شوند. این پارامترها هنگامی مقبول واقع شدند که مجموعه ذرات درون جعبه برش، رفتاری مشابه با خاک واقعی نشان دادند، یعنی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذرات مدل با نمونه خاک واقعی یکسان باشند. وزن مخصوص ذرات برابر با وزن مخصوص واقعی خاک، برابر با 1650 kg/m^3 و سختی عمودی و سختی برشی ذرات با در نظر گرفتن مدل ساختاری تماسی اول طبق مقادیر آورده شده در جدول (۱) تعریف شدند. شتاب گرانش نیز برابر با 9.81 m/s^2 در جهت خلاف محور Z تعریف شد.



شکل ۵- شماتیکی از مدل ساختاری تماسی اول

سختی عمودی و برشی از روابط زیر محاسبه شدند.

$$R = 2 \frac{R_{p1} R_{p2}}{R_{p1} + R_{p2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

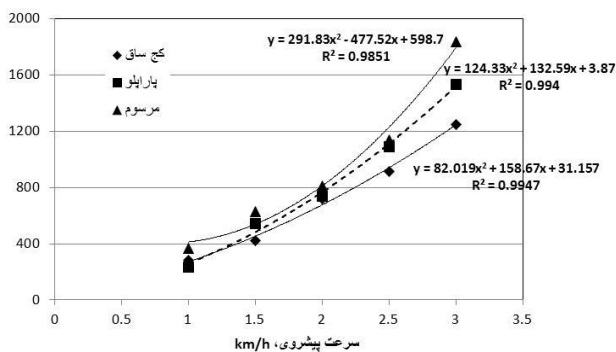
$$k_n = \frac{\sqrt[4]{E\sqrt{R}}}{\sqrt[3]{(1-\nu^2)}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\nu = \frac{k_n - k_s}{\sqrt[4]{k_n + k_s}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

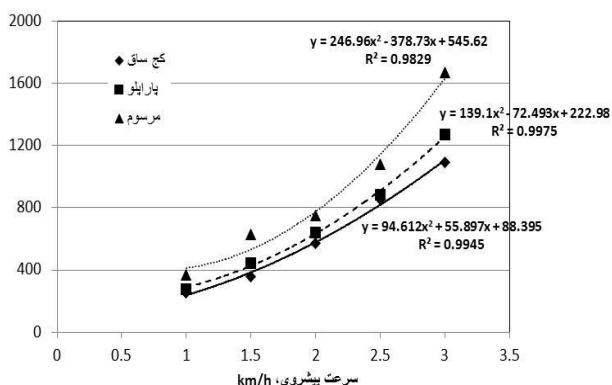
در این روابط:

مرسوم و کچ‌ساقی قرار دارد. همچنین در تمامی سرعت‌های پیشروی، اختلاف نیروی مقاوم کششی بین تیغه‌ها معنی‌دار بوده است.

شکل (۸) تاثیر سرعت و نوع تیغه را بر روی نیروی مقاوم کششی در سه نوع تیغه‌ی کچ‌ساقی، معمولی و پاراپلو با استفاده از مدلسازی را نشان می‌دهد. در این نمودار دیده می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی نیروی مقاوم کششی تیغه‌های مذکور افزایش می‌یابد. به طوری که آهنگ افزایش نیروی مقاوم کششی در برابر افزایش سرعت پیشروی به صورت یک معادله درجه دو بوده که با تئوری ارائه شده توسط شان (Sohne, 1956) مطابقت دارد. میانگین خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از روش المان مجزا $1/6/871$ برای میانگین نیروی مقاوم کششی بدست آمد. با توجه به این که مقدار خطای نسبی پیش‌بینی شده کمتر از حد قابل قبول (۱۰٪) بوده می‌توان گفت که مدلسازی صورت گرفته در پیش‌بینی مقدار نیروی مقاوم کششی توانایی خوبی را دارد.



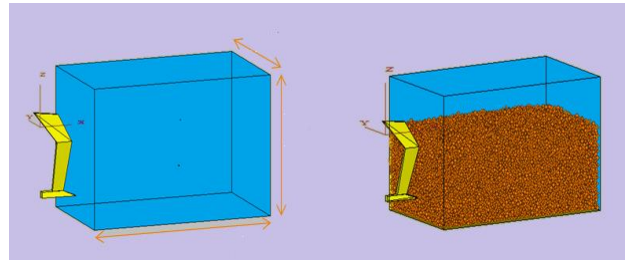
شکل ۷- تغییرات نیروی مقاوم کششی ۳ نوع تیغه با افزایش سرعت



شکل ۸- نتایج مدلسازی برای تغییرات نیروی کششی لازم ۳ نوع تیغه در سرعت‌های متفاوت

تیغه پاراپلو علاوه بر وجود نوک گوه‌ای، دارای کفشک بوده که باعث نفوذ راحت‌تر به داخل خاک می‌گردد. از طرفی دیگر وجود کفشک به هنگام حرکت تیغه باعث بالا آوردن،

طریق ذرات به عقب یا جلو منتقل می‌شوند و بر روی نتایج شبیه‌سازی تاثیرگذار خواهند بود. تیغه زیر شکن در بیرون از انباره خاک قرار گرفته و بعد از مشخص کردن سرعت و معادلات حرکت تیغه به سمت سویل بین حرکت می‌کند (شکل ۶).



شکل ۶- ابعاد انباره خاک حاوی ذرات خاک و تیغه خاک‌ورز

با توجه به این که در این تحقیق اثر سرعت بر روی نیروی مقاوم کششی تیغه‌های معمولی، کچ‌ساقی و پاراپلو مورد بررسی قرار گرفته، برای حالت مدلسازی با دادن سرعت‌هایی مطابق با سرعت ارائه شده در حالت آزمایشگاهی، مجموعه شبیه‌سازی شده به اجرا در آمد.

نتایج و بحث

با توجه به جدول ۲، اثرات اصلی سرعت پیشروی و نوع تیغه در سطح احتمال ۱٪ تاثیر معنی‌داری بر نیروی مقاوم کششی را داشت. هم‌چنین اثر متقابل دو تایی سرعت پیشروی و نوع تیغه بر روی نیروی مقاوم کششی در سطح احتمال (۱٪) معنی‌دار بوده است.

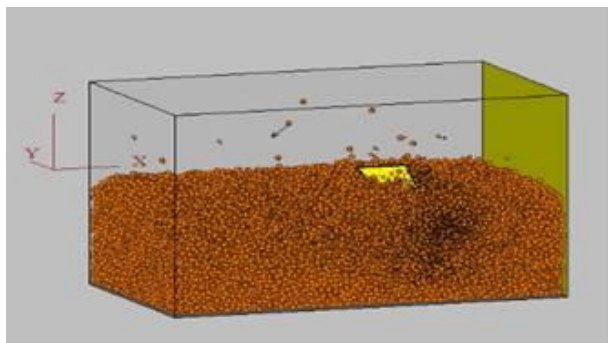
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر سرعت و نوع تیغه بر نیروی مقاوم کششی

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
نوع تیغه	۲	۴۳۰۲۰۹/۴۲	۲۱۵۱۰۴/۷۱	۷۷/۸۲۲**
سرعت	۴	۸۴۱۴۸۵۵/۱۴	۲۱۰۳۷/۷۸	۷۶۱/۱۰۳**
سرعت×نوع تیغه	۸	۲۷۳۴۷۰/۹۶	۳۴۱۸۳/۸۷	۱۲/۳۶**
خطا	۳۰	۸۲۹۲۰/۹۱	۲۷۶۴/۰۳	
مجموع	۴۴	۹۲۰۱۴۵۶/۴۳		

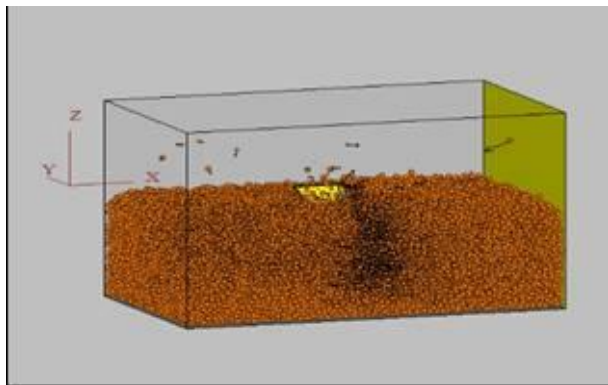
** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

اثر متقابل سرعت پیشروی و نوع تیغه بر روی نیروی مقاوم کششی

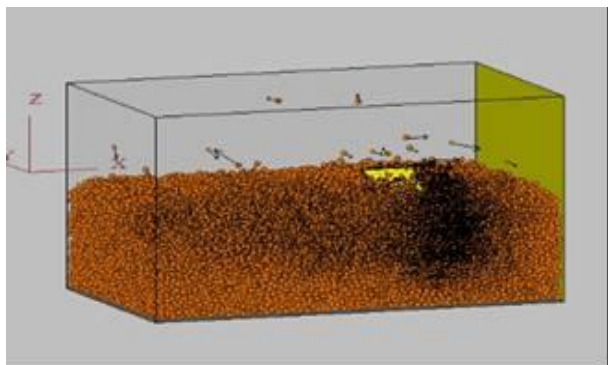
با توجه به شکل ۷ که اثر متقابل سرعت پیشروی و نوع تیغه را نشان می‌دهد، در تمامی سرعت‌ها بیشترین نیروی مقاوم کششی مربوط به تیغه‌ی مرسوم و کمترین آن مربوط به تیغه کچ‌ساقی می‌باشد. این در حالی است که تیغه پاراپلو در تمامی سرعت‌ها به غیر از سرعت ۱ km/h در حد واسط دو تیغه



الف

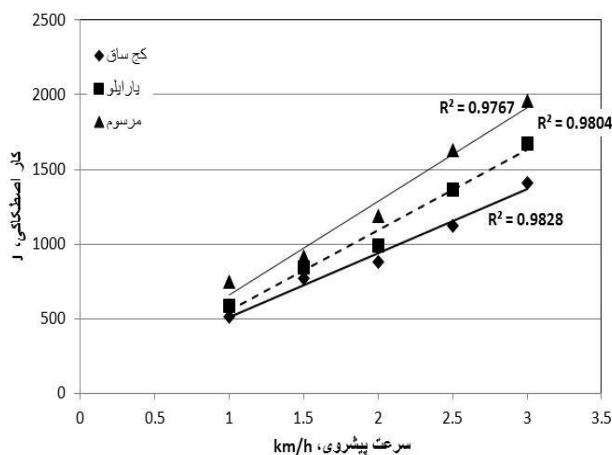


ب



ج

شکل ۹- اثر سرعت پیشروی بر روی نیروی تماسی در تیغه کج ساق الف- ۱ km/h، ب- ۲ km/h، ج- ۳ km/h



شکل ۱۰- نمودار تغییرات کار اصطکاکی بر حسب طول جعبه خاک در سرعت‌های مختلف پیشروی

جابجایی و در نهایت اختلاط بیشتر خاک می‌گردد که عاملی دیگر جهت افزایش مقدار نیروی مقاوم کششی آن نسبت به کج‌ساق است. همچنین وجود نوک گوه‌ای و کفشک، سطح تماس بین تیغه و خاک را افزایش می‌دهد. بنابراین با افزایش سطح تماس به دلیل وجود اصطکاک در فصل مشترک تیغه و خاک، نیروی مقاوم کششی افزایش می‌یابد (Ramadan, 2014).

با افزایش سرعت پیشروی از ۱ km/h تا ۳ km/h نیروی مقاوم کششی به صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرده است که بیشترین نیروی مقاوم کششی ۱۵۴۱ N مربوط به تیغه مرسوم در سرعت ۳ km/h و کمترین مقدار نیروی مقاوم کششی N ۲۹۴/۸ مربوط به تیغه کج ساق در سرعت ۱ km/h می‌باشد.

دلیل افزایش نیروی مقاوم کششی با افزایش سرعت پیشروی، تاثیر عواملی نظیر اصطکاک خاک با فلز، فشار شکست خاک، نیروی مربوط به شتاب ذرات خاک می‌باشد. از مزایای روش المان‌های مجزا برای تعیین برهم‌کنش بین خاک و ابزار خاک‌ورز این است که می‌توان به راحتی عوامل موثر بر نیروی مقاوم کششی را مدل‌سازی نمود. با استفاده از روش المان مجزا می‌توان عوامل اصلی و تاثیر گذار بر روی نیروی مقاوم کششی نظیر کار اصطکاکی و انرژی جنبشی ذرات (نیروی مربوط به شتاب ذرات) را مدل‌سازی نموده و مقدار عددی این دو فاکتور را به دست آورد.

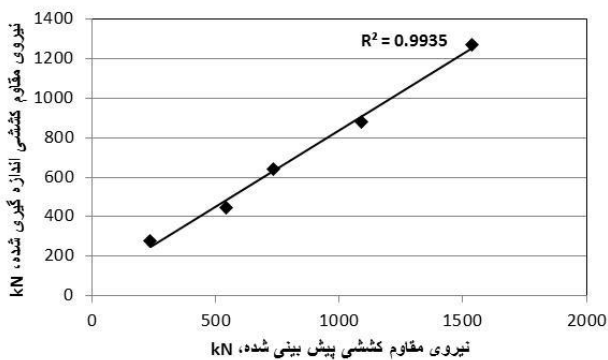
شکل ۹ اثر سرعت پیشروی تیغه را روی نیروی تماسی نشان می‌دهد در این شکل‌ها برای نمایش دادن نیروی تماسی بین ذرات و تیغه از رنگ سیاه استفاده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی میزان رنگ سیاه بیشتری در اطراف تیغه ظاهر می‌گردد. یعنی با افزایش سرعت تیغه تعداد پیوندهایی که در واحد زمان بایستی گسیخته شوند، افزایش می‌یابد.

تاثیر کار اصطکاکی بر نیروی مقاوم کششی

شکل ۱۰ مقدار کار اصطکاکی بین خاک و تیغه را در سرعت‌های پیشروی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ km/h در طول یک متر از طول جعبه خاک را برای سه نوع تیغه‌ی کج‌ساق، معمولی و پاراپلو نشان می‌دهد. با افزایش سرعت پیشروی، مقدار کار اصطکاکی موجود بین ذرات خاک و سطح تیغه افزایش می‌یابد که یکی از عوامل اصلی افزایش نیروی مقاوم کششی در برابر افزایش سرعت پیشروی می‌باشد. افزایش مقدار کار اصطکاکی تحت تاثیر دو عامل بوده بنابراین عامل اصلی که باعث افزایش مقادیر اصطکاک و نیروی مقاوم کششی می‌گردد، این است که

ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

رابطه‌ی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و روش تجربی را به همراه ضریب تبیین مدل برای مقدار نیروی مقاوم کششی در سرعت‌های متفاوت برای سه نوع تیغه کج ساق، مرسوم و پاراپلو در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ضریب تبیین بالا نشان می‌دهد که مدل المان مجزا تاثیر سرعت پیشروی و نوع تیغه را بر روی نیروی مقاوم کششی به خوبی نشان می‌دهد. میانگین خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از روش المان مجزا $6/1871\%$ برای میانگین نیروی مقاوم کششی به دست آمد. با توجه به این که مقدار خطای نسبی پیش‌بینی شده کمتر از حد قابل قبول (10%) بوده می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت گرفته در پیش‌بینی مقدار نیروی مقاوم کششی توانایی خوبی را دارد.



شکل ۱۲- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده برای نیروی مقاوم کششی

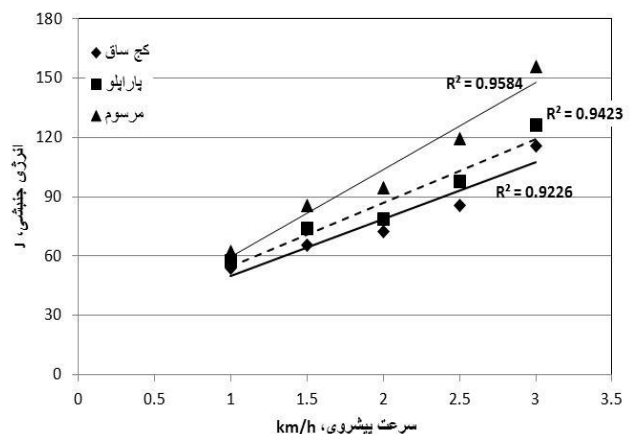
نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی و تجربی تطابق خوبی از لحاظ پیش‌بینی نیروی مقاوم کششی لازم با تغییرات سرعت پیشروی و نوع تیغه نشان داد. نیروهای مقاوم کششی حاصل از روش تجربی بزرگتر از نیروهای متناظر در روش المان مجزا می‌باشد. در روش المان مجزا برای شبیه‌سازی دانه‌های خاک از توپ‌هایی با اندازه بزرگ‌تر از ذرات واقعی خاک استفاده شد که همین امر، عامل اصلی اختلاف بین نتایج تجربی و مدل‌سازی می‌باشد. همچنین با افزایش شعاع ذرات ایجاد شده در محیط نرم افزار PFC_{3D} به علت کاهش سطح تماس، نیروی تماسی بین ذرات کاهش می‌یابد که باعث کاهش مقدار نیروی کشش می‌شود. با وجود فرضیات در نظر گرفته شده به هنگام کالیبراسیون و محاسبه نیروها در مدل المان مجزا، نتایج حاصل از روش المان مجزا از نظر کمی تطابق قابل قبولی با روش تجربی از خود نشان داد.

با افزایش سرعت پیشروی میزان شکست و خرد شدن ذرات خاک بیشتر می‌شود. با ریزتر شدن ذرات سطح تماس بین خاک و سطح تیغه افزایش می‌یابد و همچنین اگر خاک چسبنده باشد، با افزایش سطح تماس نیروی تماسی و نیروی مقاوم کششی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. عاملی دیگر که قبلاً به آن اشاره شد این است که با افزایش سرعت پیشروی تیغه، حجم خاک جمع شده در جلوی تیغه افزایش می‌یابد. هرچه سرعت پیشروی بیشتر می‌شود مقدار خاکی که در جلوی تیغه جمع می‌گردد بیشتر می‌شود و این جمع شدن خاک باعث تراکم خاک می‌شود به طوری که در این حالت، عمل گسیختگی خاک تحت تنش‌های فشاری صورت می‌گیرد. این در حالی است که خاک در مسیر حرکت این ابزارها اغلب تحت تنش‌های برشی قرار گرفته و عمل شکست خاک اتفاق می‌افتد و عمل شکست پروفیل‌های خاک تحت تنش‌های برشی راحت‌تر از تنش‌های فشاری صورت می‌گیرد. البته قابل ذکر است که فشار ایجاد شده باعث افزایش اصطکاک موجود بین سطوح ذرات و تیغه می‌گردد.

تاثیر انرژی جنبشی ذرات بر روی نیروی مقاوم کششی

شکل ۱۱ انرژی جنبشی ذرات خاک را که در اثر حرکت تیغه خاک‌ورز ایجاد می‌شود نشان می‌دهد که میانگین انرژی جنبشی کل ذرات در مجموعه ذرات می‌باشد. با توجه به نمودار، در هر سه نوع تیغه با افزایش سرعت پیشروی مقدار انرژی جنبشی روند افزایشی را از خود نشان داده است. یعنی وقتی که سرعت پیشروی ابزار خاک‌ورز افزایش می‌یابد سرعت حرکت و انرژی جنبشی ذرات افزایش یافته که در نتیجه جابجایی نسبی بین ذرات بیشتر شده و همچنین تعداد پیوندهای شکسته شده و میزان لغزش اصطکاکی در واحد زمان افزایش می‌یابد که این عوامل باعث افزایش مقدار نیروی مقاوم کششی می‌گردند.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات انرژی جنبشی بر حسب طول جعبه خاک در سرعت‌های مختلف پیشروی

مقاوم کششی با توان دوم سرعت پیشروی متناسب است. دلیل تغییر نیروی مقاوم کششی مشاهده شده با تغییر نوع تیغه را می‌توان با تفاوت‌هایی که در پروفیل شکست خاک ظاهر می‌گردد بیان کرد. بنابراین می‌توان گفت میزان شکست و جابجایی در پروفیل خاک با نیروی مقاوم کششی رابطه مستقیم دارد.

یکی از عوامل تاثیر گذار بر روی نیروی مقاوم کششی تیغه‌ها سرعت پیشروی است. در هر دو حالت تجربی و مدلسازی مشاهده می‌شود که سرعت پیشروی تاثیر خود را بر روی نیروی مقاوم کششی به خوبی نشان داده است. به طوری که در تمامی تیغه‌ها با افزایش سرعت پیشروی، نیروی مقاوم کششی روند افزایشی داشته است. البته این رابطه طوری است که نیروی

REFERENCES

- Asaf, Z., Rubinstein, D. & Shmulevich I. (2006). Evaluation of link-track performances using DEM. *Journal of Terramechanics*, 43, 141-161.
- Asaf, Z., Rubinstein, D. & Shmulevich I. (2007). Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil & Tillage Research*, 92, 227-242.
- Coetzee, C. J. & Els D. N. J. (2009). Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction. *Agriculture Engineering Research*, 109, 63-84
- Esehaghbeygi, A., Tabatabaefar, A., Keyhani, A.R., & Raoufat M. H. (2005). Depth and rake angle's influence on the draft force of an oblique blade subsoiler. *Journal of Iranian Agricultural science*, 364, 1045-1052. (In Farsi)
- Gueirf, J. (1994). *Effect of compaction on soil strength parameters*. Series 11. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp.191-214.
- Harrison, H. P. (1988). Soil reacting forces for a bentleg plow. *Transaction of the ASABE*, 31(1), 47-51.
- Harrison, H. P. (1990). Soil reacting forces for two tapered bentleg plows. *Transaction of the ASABE*, 33(5), 1473-1476.
- Itasca manual. (2005). *PFC3D user's guide*, version 3.10., Itasca consulting group, Inc. Minneapolis, USA.
- Kushwaha, R. L. & Zhang, Z. X. (1998). Evaluation of factors and current approaches related to computerized desing of tillage tool: A review. *Journal of Terramechanics*, 35(2), 69-86.
- Luth, H.J. & Wismer, R.D. (1971). Performance of plane cutting blades in sand. *Transaction of ASAE*, 14(2), 255-262.
- 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.
- Oida, A., Schwanghart, H. & S. Ohakubo. (1999). Effect of tire lug cross section on tire performance simulated by distinct element method, In: *Proceedings of the 13th International Conference of the ISTVS*, Munich, Germany, pp.345-352.
- Owen, D. (1989). Force-depth relationships in a pedogenetically compacted caly loam soil. *Applied Egieering in Agriculture*, 5 (2), 185-191.
- Ramadan, M.N. (2014). Development and performance evaluation of the double tines subsoiler in silty clay soil part1: draft force, disturbed area and specific resistance, *Mesopotamia Journal of Agriculture*, 42(1), 293-313.
- Raoufat, M. H. & Mashhadi, H. (2000). Determination the distance between bent leg plow tines to get optimum tillage. *Journal of Iranian Agricultural science*, 3(2), 319-330. (In Farsi)
- Shahi, N. & Shahgholi, G. (2010). *Modeling soil and oscillatory tine interaction using discrete element method*. McS dissertation, University of Mohaghegh Ardabili. (In Farsi)
- Sohne, W. (1956). Einge Grundlagen für eine landtechnische bodenmechanik (Some basic considerations of soil mechanics as applied to agricultural engineering). *Grundlage derland technic 7*. Translation 53, Library, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe.
- Shmulevich, I., Asaf, Z. & Rubinstein, D. (2007). Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil & Tillage Research*, 97, 37-50.
- Stafford, J.V. (1979). The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24, 41-57.
- Summers, J.O., Khalilian, A. & Batchelder, D. G. (1986). Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. *Transaction of the ASABE*, 29 (1), 37 - 39.
- Tanaka, H., Momzu, M., Oida, A. & Yamazaki, M. (2000). Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by distinct element method. *Journal of Terramechanics*, 37 (1), 41-56.
- Williams, M. (1981). Enter a new kind of plow. *Power Farming Magazing*, October, pp. 34-35.
- Yan, W. M. (2009). Fabric evolution in numerical direct shear test. *Computers geotechnics*, 36, 597-603.
- Yong, R. N., Fattah, E. A. & Skiadas, N. (1984) *Vehicle Traction Mechanics*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.