

شبیه سازی تأثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر عملکرد زیرشکن ارتعاشی و خاک با استفاده از روش المان های

گسسته

ناصر کانیای^{۱*}، غلامحسین شاهقلی^۲

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲)

چکیده

برهم کنش بین خاک و ماشین چالشی اساسی برای محققان، توسعه دهنده گان، سازندگان و طراحان ماشین های کشاورزی است. مدلسازی ادوات شخم زنی کاری اساسی در مهندسی است. هرچند که مدلسازی برهم کنش های بین خاک و ماشین به علت تغییرات سه بعدی خاک، رفتار غیر خطی خاک، پدیده برخورد و جریان پذیری خاک منطقه فصل مشترک (ارتباط) بین خاک و ادوات و تاثیرات دینامیکی فرآیندی پیچیده است. شبیه سازی صحیح برهم کنش بین خاک و ادوات کلید اساسی برای این بهینه سازی است و ممکن است نیاز به تست های مزرعه ای زیاد با هزینه های گران را حذف کند. هدف این پژوهش توسعه مدل سه بعدی یک زیرشکن ارتعاشی با استفاده از روش المان های گسسته، شبیه سازی تأثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر عملکرد زیرشکن و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج شبیه سازی بود. برای مدلسازی توده ی خاک به عنوان یک ماده ی گرانه ای، از برنامه ی رایانه ای PFC^{3D} استفاده شده است. تیغه تحت سرعت زاویه ای و انتقالی در جهت مثبت محور x در داخل سوپل بین به حرکت در آمد. برای تیغه غیر ارتعاشی تنها سرعت انتقالی و برای تیغه ارتعاشی علاوه بر سرعت انتقالی، سرعت زاویه ای نیز تعریف شده بود. عمق کاری تیغه زیرشکن ۳۸ سانتی متر و سرعت انتقالی ۰/۸۹ متر بر ثانیه انتخاب شده بود. برای بررسی تأثیر زاویه ارتعاش بر عملکرد زیرشکن از زوایای ارتعاشی ۲۷، ۱۶، ۸، صفر، ۱۴/۵- و ۲۲/۵- درجه در فرکانس ۴/۹ هرتز و دامنه ±۶۹ میلی متر استفاده گردید. با افزایش زاویه ارتعاشی (مثبت و منفی)، میزان جابجایی عمودی تیغه در یک سیکل افزایش می یابد و در نتیجه حرکت بالاروی تیغه باعث گسیختگی بیشتر خاک می گردد. با توجه به نتایج شبیه سازی، میزان کار مرزی، انرژی جنبشی و کار اصطکاکی در زوایای ارتعاشی مثبت بیشتر از زوایای ارتعاشی منفی بود و با افزایش بیشتر در زوایای منفی کار مرزی و اصطکاکی کاهش بیشتری داشت. با تغییر زاویه از ۲۲/۵- به ۲۷ درجه میانگین انرژی پیوندی ذرات کاهش یافت.

واژه های کلیدی: روش المان گسسته، زیرشکن ارتعاشی، شبیه سازی عددی

مقدمه

خاک ورز روشی موثر برای کاهش نیروی کشش است. همچنین محققین دریافته اند که توان کل مورد نیاز در نتیجه ارتعاش افزایش می یابد و ارتعاش باعث گسیختگی و اختلاط بیشتر خاک می گردد. تئوری اینکه چرا ارتعاش مقدار نیروی کششی را کاهش می دهد، جنبه مهم دیگری از این تحقیق را نشان می دهد. برای خاک های خشک، ارتعاش ابزار، باعث شکستگی خاک شده و از این رو مقدار چسبندگی را کاهش می دهد. برای خاک های مرطوب تنش اضافی از طریق خاک انتقال داده می شود و باعث قطع فشار هیدرو دینامیکی منافذ شده که در این صورت باعث کاهش تنش موثر و مقاومت خاک می شود (Van der linde, 2007).

کاهش نیروی کشش چندین مزیت دارد از قبیل اینکه می توانیم از تراکتورهای سبک تر برای کاهش فشردگی خاک و

تراکم (فشردگی) خاک و وجود سخت لایه، نفوذ پذیری آب به خاک را کاهش داده و باعث مسدود شدن زهکشی خاک می گردد. همچنین از رشد مناسب ریشه گیاهان جلوگیری می کند. با وجود روش های حفاظتی، هنوز هم خاک ورزی لایه های زیرین و شکستن سخت لایه یکی از پرهزینه ترین عملیات کشاورزی است. عملیات خاک ورزی در عمق های زیرین، مانند زیرشکنی، به نیروی کششی زیادی نیاز دارد و در نتیجه باعث مصرف زیاد انرژی و زمان می گردد. بنابراین کاهش نیروی کشش می تواند هزینه های زیاد اولیه را کاهش دهد (Van der linde, 2007). محققان مختلفی به این نتیجه رسیده اند که ارتعاش ابزار

شبیه‌سازی ایجاد شده و از بین می‌روند (Itasca manual, 2006b).

در شروع هر گام‌زمانی با داشتن موقعیت‌های مکانی معلومی از المان‌های ساختاری، ابتدا تماس‌های موجود آمده مشخص می‌شوند. سپس قانون نیرو-تغییرشکل در هر تماس اعمال می‌شود، تا بر حسب میزان جابجایی نسبی بین دو جزء در تماس و مدل تماسی انتخاب شده، مقادیر نیروهای تماسی آپدیت شوند. سپس قانون حرکت روی هر المان اعمال می‌شود. بدین ترتیب بر اساس نیرو و گشتاور برآیند بوجود آمده در تماس‌ها و نیروهای حجمی وارد بر یک المان، سرعت، شتاب و موقعیت آن المان آپدیت می‌شود و همچنین محاسبات به صورت موازی با یکدیگر انجام می‌شوند (Itasca manual, 2006b).

ضرورت تحقیق و اهداف

آزمون‌های تجربی در بدست آوردن نتایج موثر هستند، اما به زمان و هزینه بیشتری برای ساخت و تست ادوات ارتعاشی به منظور ارزیابی تاثیر یک پارامتر نیاز دارند. همچنین مدل‌های ریاضی می‌توانند برای ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف مورد استفاده قرارگیرند. هرچند که این مدل‌ها تنها برای مسائل خیلی خاص فرمول‌بندی شده‌اند و شکل‌های مختلف ابزار، عمق‌های کاری و خواص خاک را به خوبی در نظر نمی‌گیرند (بدون نیاز به تنظیمات تجربی). از طرفی دیگر مدل‌های شبیه‌سازی عددی می‌توانند قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشند. این مدل‌ها می‌توانند خواص مختلف خاک و ابزار، بعلاوه پارامترهای مختلف کاری را با هم ترکیب کنند (Asaf et al, 2007).

مدلسازی برهم کنش بین خاک و ادوات با استفاده از المان محدود مزایایی نسبت به روش‌های تحلیلی دارد. در این مورد هر ابزارهندسی و رفتارخطی برهم کنش خاک و ابزارخاک‌ورز، به شرط انتخاب قانون ساختاری صحیح، می‌تواند مدلسازی شود (Updhyaya et al, 2002). مروری جامع در مورد استفاده المان محدود برای مدلسازی برهم کنش خاک و ادوات ارائه دادند و نتیجه گرفتند که مدلسازی با المان محدود اغلب برای تحلیل‌های پیوسته مناسب است. اما تغییر شکل خاک، مخصوصاً در فرآیند خاک‌ورزی، که درگیر جداسازی و مخلوط لایه‌های خاک است و همچنین ایجاد ترک‌ها و جریان ذرات خاک با المان محدود بطور صحیح قابل مدلسازی نیست (Shmulevich, 2010).

در کل رابطه بین خاک و تیغه ارتعاشی بسیار پیچیده بوده و ایجاد یک مدل به روش المان‌های گسسته کمک خواهد

مقاومت غلتشی کمتر ناشی از بالاست موردنیاز کمتر استفاده کنیم. همچنین لغزش چرخ نیز کاهش یافته که در نتیجه باعث کاهش ساییدگی لاستیک، افزایش سرعت واقعی و بازدهی کلی می‌گردد. همچنین کاهش نیروی کشش استفاده از ادوات بزرگتر را برای پوشش سطح بیشتر و تراکتهای کوچکتر را برای خاک‌ورزی عمیق، در جایی که سطح محدود باشد، مانند تاکستان و باغستان، امکان‌پذیر می‌سازد (Van der linde, 2007).

اثربخشی زیرشکن ارتعاشی بیشتر بستگی به پارامترهای کاری مانند فرکانس ارتعاش، دامنه، زاویه ارتعاش و سرعت پیشروی تراکتور دارد. همچنین پارامترهای خاک از قبیل محتوی رطوبتی و نوع خاک نقش بسزایی دارند. از این رو پارامترهای کاری بهینه ممکن است برای انواع مختلف خاک متفاوت بوده و بهینه‌سازی شرایط خاک را مشکل سازند (Van der linde, 2007).

به تدریج با افزایش سرعت رایانه‌ها، روش المان‌های گسسته تبدیل به یک روش موثرتر برای شبیه‌سازی محیط‌های گرانوله‌ای در زمینه بیومواد، خاک و همچنین مواد مهندسی شده است. این روش می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های رایج مربوط به محیط‌های پیوسته مانند روش المان-های محدود در تحلیل سیستم‌هایی که طبیعت گسسته‌ای دارند، استفاده گردد. با ظهور چنین روش‌هایی، تئوری‌های مربوط به مواد گرانوله‌ای، به خصوص آنهایی که در ابعاد ذرات گرانوله‌ای هستند، بیشتر به واقعیت نزدیک شده‌اند. دلیل این امر این است که این تئوری‌ها اکنون می‌توانند بر اساس جزئیات اندازه‌گیری شده‌ی تغییرشکل‌ها و نیروها در ابعاد ذرات گرانوله-ای ساخته شوند. روش المان گسسته توانایی شبیه‌سازی جابجایی‌های بزرگ درگیر در خاک‌ورزی خاک و همچنین رفتار خاک تحت بارگذاری ارتعاشی را دارد. این مزایا قابلیت مدلسازی زیرشکن ارتعاشی را با المان گسسته مناسب می‌سازد. برنامه‌ی PFC^{3D} حرکت و برهم‌کنش المان‌های کروی را با روش المان-های گسسته مدلسازی می‌نماید. این برنامه رفتار مکانیکی محیطی متشکل از ذره‌های کروی صلب و تحت بار، را مدلسازی می‌نماید (Coetzee, 2009).

چرخه‌ی محاسبات در برنامه‌ی PFC^{3D} یک الگوریتم گام-زمانی است که در هر گام‌زمانی چند عملیات محاسباتی را تکرار می‌کند، عملیات‌هایی همچون اعمال قانون دوم نیوتن برای هر ذره، اعمال قانون نیرو-تغییرشکل برای هر تماس و به‌هنگام کردن موقعیت دیواره‌ها. تماس‌ها که ممکن است بین دو المان ساختاری مدل حادث شوند، به طور خودکار در طول مدت

(Shahgoli et al, 2009).

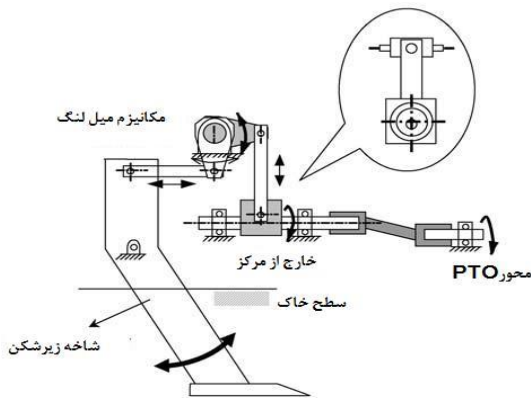
$$\lambda = \frac{V_{x(max)}}{V_0} = \frac{\omega \cos \beta}{V_0} \quad (1) \text{ (رابطه ۱)}$$

$V_{x(max)}$ = بیشترین سرعت ارتعاش نوک تیغه (m/s)

V_0 = سرعت پیشروی تراکتور (m/s)

α = دامنه ارتعاش نوک ابزار (m)

ω = سرعت زاویه ای ابزار نسبت به حامل ابزار (rad/s)



شکل ۱. نمایی از تیغه ارتعاشی

زاویه ارتعاش

یکی از مهمترین پارامترها که عملکرد و چگونگی حرکت تیغه رادر خاک ورزی ارتعاشی مشخص می‌کند، زاویه ارتعاش می‌باشد. اگر از مرکز اتکاء ارتعاش تیغه تا نوک تیغه خطی رسم کنیم به آن شعاع ارتعاش تیغه گفته میشود. زاویه بین شعاع ارتعاش و خط عمود از نقطه اتکاء تیغه را زاویه ارتعاش β می‌گویند (شکل 2) (Shahgoli et al, 2009).

زاویه ارتعاش به عنوان زاویه بین نوک تیغه و مرکز دوران تعریف شده است. باتوجه به قرارداد (Sakai et al, 1993)، زمانی که نوک تیغه در جلوی مرکز دوران است زاویه ارتعاش مثبت و زمانی که نوک تیغه پشت مرکز دوران قرار می‌گیرد زاویه ارتعاش منفی است و اگر نوک تیغه دقیقاً در امتداد عمود زیر مرکز دوران قرار گیرد در این صورت زاویه ارتعاش برابر صفر خواهد بود. مثبت، منفی و یا صفر بودن زاویه ارتعاش مسیر حرکت نوک تیغه در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

زاویه ارتعاش با استفاده از دو پارامتر زیر بدست می‌آید:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right) \quad (2) \text{ (رابطه ۲)}$$

x = فاصله افقی نوک تیغه نسبت به مرکز دوران (m)

y = فاصله عمودی نوک تیغه نسبت به مرکز دوران (m)

در زاویه ارتعاش مثبت (شکل ۲). تیغه در هنگام برش خاک به سمت بالا حرکت کرده و ضمن برش خاک، باعث بالابردن و شتاب خاک بریده شده خواهد گردید و هنگام برگشت

کرد تا مشخص گردد در زوایای ارتعاش مثبت، صفر و منفی، واکنش خاک در مقابل تیغه‌ی برش چگونه می‌باشد. هر چند بوسیله مدل شاید نتوان نیروی لازم را بطور دقیق پیش‌بینی کرد، چون این نرم‌افزار محدودیت‌هایی، مانند در نظر گرفتن رطوبت خاک را دارد، ممکن است پیش‌بینی نیروی کشش لازم برای شرایط مزرعه دارای همبستگی پایین باشد ولی این کافی می‌باشد تا نیروهای وارد بر تیغه را در هنگام فازهای مختلف برش، حرکت به عقب در خاک سست، متراکم کردن خاک زیرین هنگام حرکت به عقب و حرکت به جلو در خاک سست را نشان داد (Shahgoli et al, 2009).

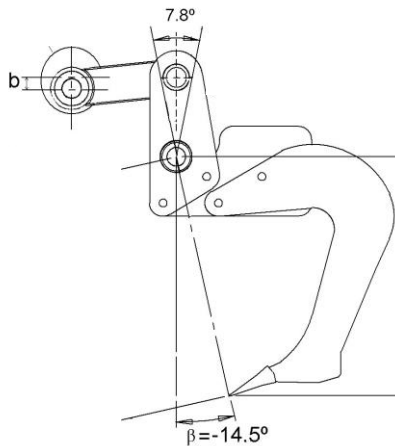
برهم‌کنش بین خاک و ادوات خاک ورزی که درگیر پارامترهای مختلفی از قبیل پروفیل خاک، مقاومت خاک، بالاروی خاک روی ابزار، جریان خاک و ترک‌های حین کار تیغه است، امری بسیار پیچیده است. ایجاد این مدل کمک خواهد نمود تا چگونگی شکست خاک را در زوایای مختلف ارتعاش مشاهده نموده و تنش‌های وارده از خاک به تیغه خاک‌ورز و بالعکس را اندازه بگیریم.

مهمترین اهداف این پژوهش عبارتند از:

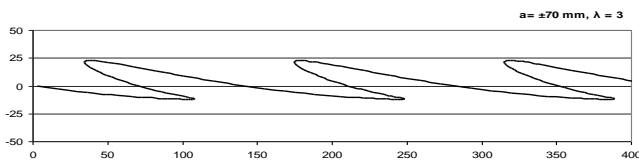
- ۱- مطالعه توانایی (پتانسیل) روش المان‌های گسسته برای مدلسازی فرآیند برهم‌کنش بین خاک و یک ابزار خاک‌ورز ارتعاشی.
- ۲- ایجاد مدل حرکت تیغه ارتعاشی در داخل جعبه‌ای از ذرات کروی که خواص خاک مورد نظر را دارند.
- ۳- مشاهده و درک چگونگی شکست خاک در زوایای مختلف ارتعاش.
- ۴- درک چگونگی تنش‌های وارده از تیغه به خاک در فازهای مختلف عملکرد تیغه.
- ۵- بدست آوردن نیروی کشش تیغه و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای.

کلیات و تعاریف

خاک‌ورزی ارتعاشی عبارتست از ارتعاش یک تیغه خاک‌ورز به حالت عمودی یا افقی، زمانی که در داخل خاک توسط تراکتور کشیده می‌شود. مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد خاک‌ورزی ارتعاشی دامنه، فرکانس، زاویه و سرعت پیشروی هستند. این پارامترها می‌توانند در فاکتور نسبت سرعت ترکیب شوند. نسبت سرعت می‌تواند برای بیان کیفیت پارامترهای ارتعاشی روی نیروی کششی، توان مورد نیاز و شتاب انتقالی به تراکتور استفاده شود. نسبت سرعت به عنوان ماکزیمم سرعت ابزار تقسیم بر سرعت پیشروی تراکتور تعریف می‌شود



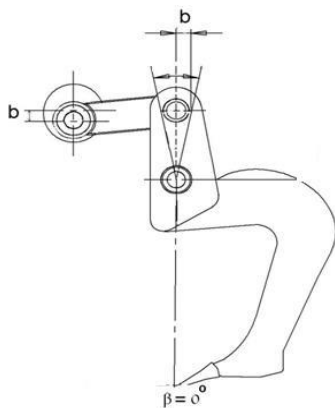
شکل ۴. ساقه زیر شکن با زاویه ارتعاش ۱۴/۵-درجه



جابجایی افقی تیغه، (mm)

شکل ۵. چگونگی حرکت نوک تیغه برای زاویه ارتعاش ۱۵-درجه

اگر نوک تیغه دقیقاً در امتداد عمود زیر مرکز دوران قرار گیرد در این صورت زاویه ارتعاش برابر صفر خواهد بود که اغلب تحقیقات در این زمینه انجام گرفته است. مسیر حرکت به طور تقریبی افقی در نظر گرفته می شود ولی در صورت نگاه دقیق تر مسیر حرکت آن ترکیبی از دو حالت قبلی است که بسیار پیچیده می باشد (شکل ۶)، (Shahgoli et al, 2009).



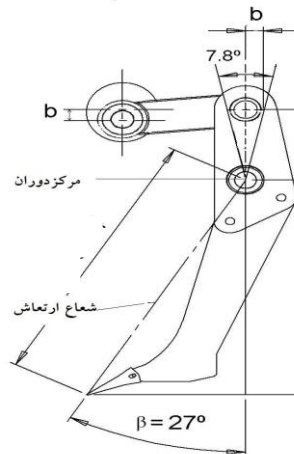
شکل ۶. ساقه زیر شکن با زاویه ارتعاش صفر درجه

مواد و روش ها

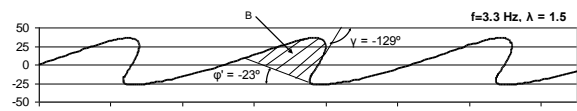
نرم افزار و رایانه

در این تحقیق برای مدلسازی توده‌ی خاک به عنوان یک ماده‌ی گرانوله‌ای، از برنامه‌ی رایانه‌ای PFC^{3D} استفاده شده است. این برنامه‌ی از مجموعه برنامه‌های ساخته شده توسط گروه

به عقب، در داخل خاک سست شده‌ی قبلی به سمت پایین حرکت می کند که باعث تراکم خاک زیرین تیغه می گردد و در انتها دوباره به سمت جلو در خاک سست شده حرکت کرده تا به خاک سفت برسد در این حالت اگر $\lambda < 1$ باشد تیغه عمل برش را انجام می دهد و در صورتیکه $\lambda > 1$ باشد تیغه علاوه بر برش، خاک زیرین تیغه را در هنگام برگشت به عقب متراکم می کند (شکل ۳). (Shahgoli et al, 2009).



شکل ۲. ساقه زیر شکن با زاویه ارتعاش ۲۷ درجه



جابجایی افقی تیغه، (mm)

شکل ۳. چگونگی حرکت نوک تیغه برای زاویه ارتعاش ۲۷ درجه

اگر زاویه ارتعاش منفی باشد (شکل ۴)، نوک تیغه در هنگام عمل برش، برعکس زاویه مثبت، به سمت پایین حرکت می کند و در هنگام برگشت در درون خاک سست شده به سمت بالا حرکت می کند و عمل بالابری و شتاب خاک بریده شده را انجام می دهد. بنابراین در زاویه ارتعاش مثبت عمل بالابری و شتاب همزمان با برش انجام می گیرد که این می تواند نیروی برشی را تحت تأثیر قرار دهد در حالیکه در زاویه ارتعاش منفی این عمل در فازهای جداگانه انجام می گیرند. در حالتی که $\lambda < 1$ باشد تیغه عمل برش را انجام می دهد و در صورتیکه $\lambda > 1$ باشد تیغه علاوه بر برش خاک سفت، با حرکت به عقب در خاک سست شده، سپس در خاک سست به جلو حرکت می کند تا به خاک سفت برسد (شکل ۵)، (Shahgoli et al, 2009).

شده هرترز-میندلین می‌باشد. در مدل خطی رابطه بین نیرو و تغییر مکان نسبی رابطه‌ای خطی است که شیب این خط سختی تماسی می‌باشد که خود تابعی از سختی‌های ذاتی دو پدیده در حال تماس است. در حالیکه رابطه بین نیرو و تغییر مکان نسبی در مدل هرترز-میندلین غیرخطی می‌باشد و ضریب تناسب نیز سختی تماسی متغییری است که خود تابعی از شکل و خواص دو پدیده در حال تماس و نیروی نرمال می‌باشد. مدل هرترز-میندلین برای شرایطی که بین ذرات مجموعه هیچگونه پیوندی وجود ندارد و با کرنش‌های کوچک سروکار داریم و منحصر در شرایط تنش‌های فشاری، مدل بسیار مناسبی است. در مواردی غیر از موارد ذکر شده مدل خطی توصیه می‌گردد. مدل‌های سختی و لغزشی رفتار فیزیکی تماس‌های بین ذره و دیواره و همچنین تماس بدون پیوند بین ذرات را تشریح می‌کنند در حالیکه ممکن است دو نوع پیوند در نقاط تماس بین دو ذره شکل بگیرد که شامل پیوند تماسی و پیوند موازی است. پیوندهای تماسی اثر چسبندگی را که در سطح بسیار کوچک نقطه تماس عمل می‌کند شبیه‌سازی می‌کند. پیوندهای موازی اثر مواد اضافی (ملات مانند) را که بعد از تماس ذرات شکل می‌گیردند را شبیه‌سازی می‌کند. خواص مواد نیز از جمله پارامترهای مهم و اثرگذار بر نتایج شبیه‌سازی است. مهمترین این خواص شامل ضریب اصطکاک بین ذرات، اصطکاک بین ذرات و دیواره-ها، سختی ذرات و دیواره‌ها، ضریب ارتجاعی و پیوندهای بین ذرات می‌باشند.

اعمال نیرو و حل مسئله

موضوع اعمال نیرو ارتباط تنگاتنگی با موضوعات شرایط مرزی و حدی دارد بطوریکه تفکیک آنها بسیار مشکل است. در PFC^{3D} دو نوع سیستم اعمال نیرو وجود دارد که شامل روش اعمال نیروی فعال و غیرفعال می‌باشد. در روش غیرفعال معمولاً با ایجاد تغییر در خود مدل (مثلاً تغییر در تخلخل ذرات و یا اعمال شتاب جاذبه) نیرویی داخلی به سیستم وارد می‌شود. در روش اعمال نیروی فعال معمولاً از سرعت یا نیروی خارجی استفاده می‌شود. معمول‌ترین فرم اعمال نیرو در این روش، دادن سرعتی معین به یکی از دیواره‌هاست. حل مدل PFC^{3D} با صدور دستور اجرا برای چرخه محاسبات شروع می‌شود و با مشاهده رفتار سیستم بعد از اجرائ محاسبات کامل می‌شود. هرکدام از چرخه‌های محاسباتی به اندازه یک گام زمانی طول می‌کشد و تعداد چرخه‌ها باید طوری انتخاب شوند تا در پایان محاسبات برآیند نیروهای نامتعادل کننده به صفر یا حد قابل قبولی برسد. حل مدل شامل حل استاتیکی و حل دینامیکی می‌باشد که تفاوت آنها در این است که در حل استاتیکی ضریب میرایی

مهندسی مشاور آی‌تسکا (ITASCA Consulting Group) است که به صورت یک نرم‌افزار تجاری به بازار عرضه شده است. در این تحقیق از ویرایش سوم نسخه‌ی ۳٫۱ برنامه‌ی PFC^{3D} که در جولای ۲۰۰۶ منتشر گردیده استفاده گردید.

مراحل طراحی مدل در نرم‌افزار PFC^{3D}

طراحی سطوح نگهدارنده ذرات و ایجاد ذرات

این سطوح به صورت دیواره‌های مرزی مدل طراحی می‌شوند تا ذرات ایجاد شده در درون آنها قرار گیرند. در زمان معرفی ابعاد دیواره‌ها، باید سطح داخلی آنها (سطحی که با ذرات در تماس خواهد بود) نیز برای سیستم تعریف شوند. جهت اعمال نیرو به مجموعه ذرات از همین دیواره‌ها استفاده می‌شود.

بعد از ایجاد سطوح نگهدارنده، ذرات کروی که نقش مواد دانه‌ای را بازی می‌کنند با دامنه شعاع مشخص ایجاد می‌شوند. دامنه شعاع انتخاب شده برای ذرات همان دامنه شعاع مواد کالیبره شده است. البته به دلیل اینکه ذرات ابتدا به صورت بی-وزن (بدون اعمال شتاب جاذبه) ایجاد می‌شوند، شعاع ذرات به صورت کسری از شعاع واقعی تعریف شده تا ذرات در ظرف طراحی شده گنجانده شوند و سپس با اعمال ضریب مناسب شعاع ذرات به شعاع واقعی افزایش می‌یابند.

اعمال شرایط اولیه و مرزی

از دیواره‌های ایجاد شده می‌توان برای اعمال شرایط مرزی استفاده کرد. مثلاً با اعمال سرعتی معین (ثابت یا متغیر) به دیواره‌ها و یا کنترل سرعت دیواره با استفاده از یک سیستم خودکار شرایط مرزی اعمال می‌شود. 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 را معمولاً با تغییر در تخلخل اولیه سیستم، بطوریکه ایجاد میزان معینی تنش در سیستم ایجاد کن اعمال می‌نمایند.

انتخاب مدل تماسی و خواص مواد

نوع رفتار فیزیکی ذرات که در نقطه تماس شکل می‌گیرد بوسیله مدل تماسی تعیین می‌گردد. هر مدل تماسی ممکن است حداکثر شامل سه قسمت مدل سختی تماسی، مدل لغزشی و مدل پیوندی باشد. مدل سختی تماسی یک رابطه ارتجاعی بین نیروی تماسی و جابجایی نسبی مربوطه فراهم می‌کند. سختی تماسی شامل سختی تماسی برشی و نرمال می‌باشد که نیروی تماسی برشی و نرمال را به جابجایی نسبی مربوطه‌شان مرتبط می‌سازد. در PFC^{3D} دو نوع مدل سختی تماسی در نظر گرفته می‌شود که شامل مدل خطی و مدل ساده

کاربردی است. تست فشاری محدود شده برای کالیبره کردن پارامترهای سختی ذرات و تست برش مستقیم برای کالیبره کردن اصطکاک و چسبندگی ذرات استفاده شده بود.

پارامترهایی که نیاز به کالیبره داشتند عبارتند از: چگالی و سختی ذرات، ضریب اصطکاک ذرات، ضریب اصطکاک خاک و فلز و ثابت میراکنندگی. 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 شبیه سازی تست برش مستقیم انجام شد.

شکل و اندازه ذرات

اندازه ذرات شبیه سازی با توان محاسباتی محدود شده است. زمان مورد نیاز برای شبیه سازی بطور مستقیم وابسته به تعداد ذرات استفاده شده در یک مجموعه است از این رو باید مجموعه ای که شامل ذرات مشابهی با ذرات واقعی خاک است ایجاد نماییم. برای زمان شبیه سازی معقول با یک سیستم تک هسته ای (هفته ها بجای ماه ها) اندازه مجموعه ذرات محدود به ۱۰۰۰۰۰ با شعاع ذرات ۱۰ تا ۱۵ میلی متر شده بود.

نرم افزار PFC^{3D} از ذرات کروی استفاده می کند، هر چند که ذراتی با اشکال دیگر نیز می توانند ایجاد شوند. برای به حداقل رساندن زمان مورد نیاز برای شبیه سازی از ذرات کروی استفاده گردید و چون تمام ذرات با استفاده از پیوندهای تماسی و موازی باهم متصل شده بودند نیازی به ذرات با اشکال کلوخه-ای یا کپه ای نبود.

چگالی ذرات

کالیبراسیون چگالی ذرات شبیه سازی با اندازه گیری جرم حجم خاصی از ذرات انجام شد و چگالی ذرات تا زمانی که به مقدار چگالی خاک واقعی رسید تنظیم گردید. ذرات در یک جعبه مکعبی شکل قرار گرفتند و به ذرات اجازه داده شد تا تحت نیروی گرانشی به حالت تعادل برسند. سپس تحت فشار ۱۰ KPa قرار گرفته و فشار به آرامی آزاد گردید تا ذرات دوباره به حالت تعادل برسند. ذرات از محدوده خاصی حذف گردیدند تا به حجم خاصی شامل ذرات را برجای بگذارند. نیروی عمودی روی دیواره پایینی به منظور تعیین جرم ذرات در یک حجم خاص اندازه گیری شد. با تقسیم کردن جرم مجموعه ذرات بر حجم مشخص، چگالی توده ای بدست آمد. کالیبراسیون برای ذرات با شعاع ۱۰ تا ۱۵ میلی متر در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱. چگالی ذرات برای چگالی توده ای (۱۶۹۰ kg/m³) خاک

شعاع ذرات (mm)	چگالی ذرات (kg/m ³)
۱۵	۳۰۰۰
۱۵ - ۱۰	۲۹۶۰

خارجی اعمال نمی شود در حالیکه در حل دینامیکی ضریب میرایی که متناسب با نوع مواد مدل شده و رفتار فیزیکی آنها است به مدل اضافه می شود.

استخراج نتایج و تفسیر آنها

اولین نتیجه ای که از مدل استخراج می شود، تعیین وضعیت مدل است که مشخص می کند مدل به تعادل رسیده است یا خیر. نرم افزار PFC^{3D} می تواند همزمان با اجزای چرخه محاسبات ماکزیمم و میانگین نیروهای نامتعادل کننده را ترسیم نماید. بسته به نوع و هدف مدل و مواد مدل شده نتایج مورد انتظار از مدل متفاوت خواهد بود، اما معمولاً پارامترهایی مانند سرعت و موقعیت ذرات، تنش در بین ذرات، نیروها و گشتاورهای عمل کننده روی دیواره ها و انواع انرژی های تولید شده در مدل از جمله اطلاعاتی هستند که می توان از مدل استخراج نمود.

کالیبراسیون خواص مواد

در روش المان های گسسته رفتار ذرات وابسته به پارامترهای میکروسکوپی مانند سختی ذرات و ضریب اصطکاک ذرات و تماس ها است. پارامترهای میکروسکوپی به عنوان پارامترهای ورودی برای شبیه سازی رفتار توده ای مواد مورد نیاز هستند. در خاک واقعی اندازه گیری پارامترهای میکروسکوپی بطور مستقیم قابل اندازه گیری نیست، چون ذرات واقعی مواد بطور فیزیکی برای اندازه گیری این پارامترها خیلی کوچک هستند. بعلاوه ذرات شبیه سازی شده دارای اندازه و شکل یکسانی مانند ذرات واقعی، به علت محدودیت های زمانی و اجرایی نرم افزارهای شبیه سازی و کامپیوترها هستند. از این رو پارامترهای میکروسکوپی ذرات شبیه سازی برای ارائه رفتار توده ای مانند ذرات واقعی نیاز به کالیبره شدن دارند.

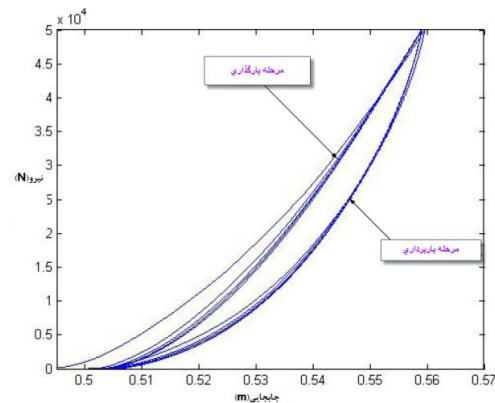
تست های فیزیکی مواد که برای کالیبره کردن استفاده شده اند شامل تست های مزرعه ای از قبیل نفوذ شاخص مخروطی و تست نفوذ میله، تست های آزمایشگاهی از قبیل تست برش مستقیم، فشار سه محوری و تست فشاری محدود شده هستند. (Asaf et al, 2006) از تست های مزرعه ای برای کالیبراسیون پارامترهای میکروسکوپی روش المان گسسته استفاده کرده اند، در حالی که (franco et al, 2006) تنها از تست برشی مستقیم استفاده کرده اند. این مقالات شامل الگوریتم های محاسباتی به عنوان بخشی از این فرآیند کالیبراسیون هستند، از این رو این الگوریتم ها تنها برای مواد غیر چسبنده بدون پیوند بین ذرات کاربردی هستند. (Coetzee, 2000) از تست برشی مستقیم بعلاوه تست فشاری محدود شده برای کالیبراسیون پارامترهای میکروسکوپی ذرات المان گسسته در ذرات غیر چسبنده استفاده کرده است. این روش برای مواد چسبنده نیز

سختی ذرات

سختی ذرات شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی تست فشاری محدود شده کالیبره شد. چون اندازه ذرات بزرگتر از ذرات واقعی انتخاب شده بودند پس نیاز به افزایش مقیاس داشتند. مدل شبیه‌سازی ۱۰ برابر تست فیزیکی بود. با انجام این مراحل اندازه ذرات تاثیری بر خواص توده‌ای مجموعه ذرات نداشتند.

اندازه جعبه شبیه‌سازی عبات بود از طول و عرض ۶۰۰mm و ارتفاع ۲۰۰ mm (شبه جعبه تست برش مستقیم و کالیبراسیون چگالی).

همچنین بارگذاری نیرویی به اندازه ۱۰۰ برابر افزایش یافته تا به مقدار فشار واقعی ذرات خاک برسد. سپس نیروها بین صفر تا ۵۰ کیلونیوتن در حالت گردش بودند. این حالت ماکزیمم فشار ۱۳۸/۸۹ کیلوپاسکال نسبت به ماکزیمم فشار واقعی خاک ۱۳۷/۶۲ را اجازه می‌دهد. نیرو به آرامی افزایش یافته تا به مقدار ماکزیمم برسد و سپس به آرامی نیرو برداشته شده تا به مقدار صفر برسد (شکل ۷).



شکل ۷. نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای کالیبراسیون سختی ذرات

شیب منحنی بین مقادیر ۱۵ kN و ۴۵ kN به عنوان مقدار سختی ذرات تعیین گردیده بود. برای آزمایش خاک این شیب بین ۱۵۰ نیوتن و ۴۵۰ نیوتن تعیین شده بود. ماکزیمم میانگین نیروی تماسی بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی ذرات با شعاع ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر ۳۴/۲۴ نیوتن بود. اگر این نیرو تقسیم بر این مقدار سختی گردد، مقدار هم‌پوشانی ذرات ۱۰٪ شعاع کوچکترین ذره خواهد بود. برای جبران این مشکل سختی ذرات ۱۰ برابر افزایش یافته بود. و این افزایش ماکزیمم میانگین نیروی تماسی ۸۲/۴۳ نیوتن با مقدار هم‌پوشانی ۲/۶٪ شعاع کوچکترین ذره را نتیجه خواهد داد. با افزایش مقدار سختی ذرات میزان هم‌پوشانی (تغییرشکل)، تنها ۲۵٪ میزان هم‌پوشانی با سختی کالیبره شده خواهد بود. جدول ۲ و ۳ سختی ذرات کالیبره شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. سختی ذرات کالیبره شده

سختی مجموعه ذرات (N/m)	سختی ذرات (N/m)	شعاع ذرات (mm)
$1/15 \times 10^6$	$3/7 \times 10^4$	۱۵
$1/16 \times 10^6$	$3/2 \times 10^4$	۱۵-۱۰

جدول ۳. سختی ذرات استفاده شده در شبیه‌سازی

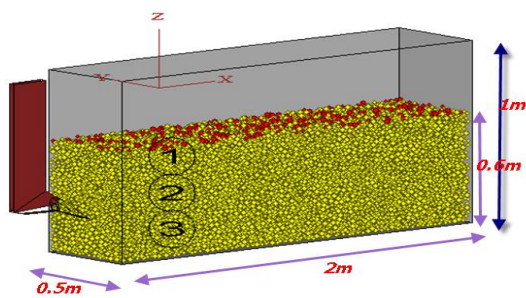
سختی مجموعه ذرات (N/m)	سختی ذرات (N/m)	شعاع ذرات (mm)
$5/69 \times 10^6$	$3/7 \times 10^5$	۱۵
$8/02 \times 10^6$	$3/2 \times 10^5$	۱۵-۱۰

زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذرات شبیه‌سازی با شبیه‌سازی تست برشی مستقیم کالیبره شده بودند. جعبه مدلسازی شامل یک قطعه بالایی و یک قطعه پایینی هرکدام با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بود (شکل ۸). حرکت قطعه بالایی جعبه کنترل شده بود بطوریکه نیروی عمودی ثابتی می‌توانست به مجموعه ذرات در کل شبیه‌سازی بکار رود. نیروهای عمودی روی مجموعه ذرات هزار برابر نمونه تست خاک بود، تا تنش‌های یکسانی قابل دستیابی باشد. تنش‌های عمودی بکاربرده شده به ترتیب ۲۷/۵، ۵۵/۳ و ۸۲/۶ کیلوپاسکال بودند. قطعه پایینی جعبه با سرعت ثابت ۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه به منظور برش مجموعه ذرات حرکت داده شد. سرعت تست برش فیزیکی نیز ۱۰ برابر شد، از این رو زمان شبیه‌سازی طولانی در این مدلسازی ۱۰۰ برابر سرعت تست برشی شد. در مدلسازی نیز باید سرعت برشی به اندازه کافی کم باشد تا نیروهای دینامیکی روی نتایج شبیه‌سازی تاثیر معنی‌داری نداشته باشند. سپس نیروهای برابند روی قطعه پایینی به منظور اندازه‌گیری ماکزیمم تنش برشی در مجموعه ذرات اندازه‌گیری گردید. ضریب اصطکاک ذرات و مقاومت پیوندی به منظور دستیابی به زاویه اصطکاک و چسبندگی مشابه با تست مزرع‌ای تنظیم شد. در جایی که از پیوندهای موازی استفاده شده بود مقدار سختی پیوند نیز تنظیم گردید اما ضریب شعاع پیوندی ثابت فرض شد. ضریب شعاع پیوندی برای کاهش تعداد متغیرهای کالیبراسیون ثابت نگه‌داشته شده و تاثیر شعاع پیوند بررسی نگردید. اندازه ضریب شعاع در محدوده بین صفر (پیوند تماسی) تا یک (پیوند موازی) انتخاب شد.

تا ارتفاع ۰/۶ متری با مشخصات مندرج در جداول ۱ تا ۵ پرگردید. سویل‌بین شامل ۶ دیواره با ضرائب سختی 1×10^8 و ضریب اصطکاک ۱ بودند (شکل ۱۰). این ضرائب برای اینکه ذرات در اثر نیروهای وارد از طرف زیرشکن از سویل‌بین 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 با ابعاد مندرج در شکل (۱۱) تا عمق ۳۸ سانتی‌متری در داخل ذرات خاک قرار گرفت.

ابعاد سویل‌بین براساس ماکزیمم تعداد ذرات و خنثی کردن تاثیر لبه‌ها انتخاب شده بودند. تیغه زیرشکن در بیرون سویل‌بین قرارداشت و بعداز مشخص کردن سرعت و معادلات حرکت تیغه در داخل سویل‌بین حرکت داده شد. برای اینکه تیغه طول جابجایی کافی برای متعادل کردن نیروها داشته باشد ابعاد سویل‌بین به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده بودند. ابعاد کلی تیغه زیرشکن هم‌اندازه با نوع واقعی آن بود، اما قسمت برشی تیغه با دیواره‌های تخت طراحی شده بود چون تیغه از طریق برنامه‌نویسی طراحی شده بود.



شکل ۱۰. ابعاد سویل بین حاوی ذرات خاک

حرکت تیغه

حرکت تیغه با تعیین سرعت‌های انتقالی و زاویه‌ای امکان‌پذیر بود. برای تیغه غیر ارتعاشی تنها سرعت انتقالی و برای تیغه ارتعاشی علاوه بر سرعت انتقالی، سرعت زاویه‌ای نیز تعریف شده بود و سرعت زاویه‌ای بصورت زیر بود:

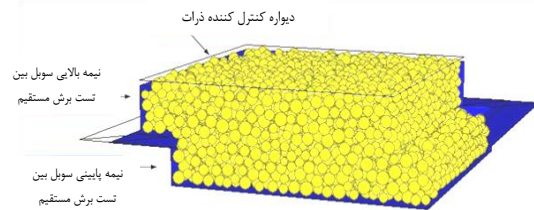
$$\Omega = A\omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$\Omega = \text{سرعت زاویه‌ای تیغه (rad/s)}$$

$$A = \text{دامنه جابجایی تیغه (m)}$$

$$\omega = \text{سرعت زاویه‌ای (rad/s)}$$

$$t = \text{زمان (s)}$$



شکل ۸. جعبه برشی برای شبیه سازی تست برش مستقیم

جدول ۴. پارامترهای تست برشی ذرات در پیوندهای تماسی

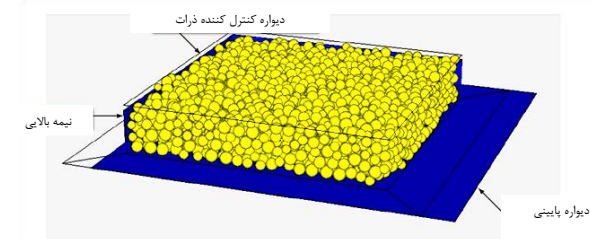
مقاومت پیوندی برشی (N)	مقاومت پیوندی نرمال (N)	ضریب اصطکاک	شعاع ذرات (mm)
۴۷	۴۷	۱/۵	۱۵
۳۵	۳۵	۱/۲	۱۵-۱۰

جدول ۵. پارامترهای تست برشی ذرات در پیوندهای موازی

ضریب شعاع ذرات (mm)	ضریب اصطکاک	مقاومت پیوندی نرمال و برشی (Pa)	سختی پیوندی برشی و نرمال (Pa/m)
۱۵	۱/۸	$1/15 \times 10^5$	5×10^7
۱۵-۱۰	۱/۳	$1/13 \times 10^5$	5×10^7

ضریب اصطکاک خاک-فلز

برای تعیین ضریب اصطکاک خاک-فلز از تستی شبیه به مدلسازی تست برش مستقیم استفاده شد، با این تفاوت که قطعه پایینی جعبه برش با یک دیواره جایگزین شده بود (شکل ۹). در این مدلسازی ضریب اصطکاک دیواره در زمانی که زاویه اصطکاک داخلی به مقدار بدست آمده از تست فیزیکی خاک رسید، تعیین شد. در این مدلسازی‌ها هیچگونه نیروی پیوندی بین دیواره‌ها و ذرات وجود ندارد، از این رو چسبندگی بین خاک و فلز نمی‌تواند کالیبره گردد. ضریب اصطکاک دیواره برابر ۱/۵ تعیین شد.



شکل ۹. جعبه برش برای کالیبراسیون ضریب اصطکاک خاک و فلز

شبیه سازی مدل تیغه و جعبه خاک در PFC^{3D}

جعبه خاک دارای طول ۲متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۱ متر بود که توسط دیواره‌هایی ساخته شد و سپس با ۴۶۷۰۶ ذره کروی

۱۴/۵- و ۲۲/۵- درجه در فرکانس ۴/۹ هرتز و دامنه ± 69 mm استفاده گردید. شبیه‌سازی نهایی با ذراتی در محدوده شعاعی بین ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر و با پیوندهای موازی انجام گرفت. خواص ذرات و پیوندهای مورد استفاده در جداول ۱ و ۲ داده شده‌اند.

اندازه‌گیری محاسبه شده‌اند. برای محاسبه تنش سه حجم یکسان در موقعیت‌های مختلف تعیین و تنش وارد بر ذرات در این حجم‌ها محاسبه شدند. موقعیت مرکز کره‌ها در جهت محور x در ۰/۵ متری، در جهت محور y در ۰/۲۵ متری و در جهت محور z ، مرکز کره ۱، در ۱۰ سانتی‌متری زیرخاک، مرکز کره ۲ در ۳۰ سانتی‌متری زیرخاک و مرکز کره ۳ در ۵۰ سانتی‌متری زیرخاک قرار داشتند (شکل ۱۰).

نتایج شبیه‌سازی

تاثیر زاویه ارتعاش بر مسیر و عملکرد تیغه ارتعاشی

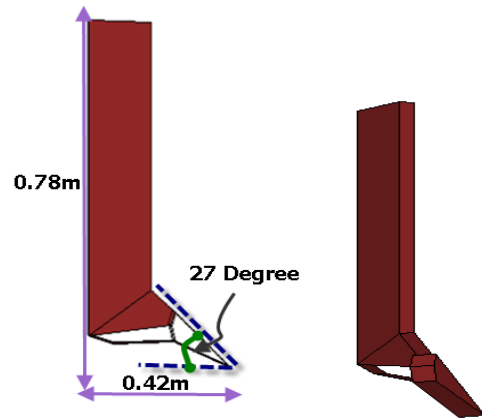
(Shahgoli et al, 2009) مسیرهای ارتعاشی تیغه را در ترکیباتی از دامنه، فرکانس و زوایای ارتعاشی مختلف بیان کردند و اظهار داشتند که روشی مناسب برای ارزیابی یک ابزار ارتعاشی است. نمودار مسیر نوک تیغه نشان می‌دهد که تیغه چگونه در خاک حرکت می‌کند. آنها تقارن حول نقطه میانی را تنها برای زوایای ارتعاشی صفر درجه صحیح دانستند.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد وقتی زاویه ارتعاش منفی باشد، نوک تیغه در هنگام عمل برش به سمت پایین حرکت می‌کند، در این حالت قسمت زیرین ساقه و تیغه زیرشکن به مقدار جزئی خاک را متراکم می‌کند (شکل ۱۲) و در هنگام برگشت در درون خاک سست شده به سمت بالا حرکت می‌کند و عمل بالابری و شتاب خاک بریده شده را انجام می‌دهد (شکل ۱۲).

شکل (۱۳) حرکت تیغه غیرارتعاشی را نشان می‌دهد. در حالت غیرارتعاشی گسیختگی پیوندهای بین ذرات خیلی کمتر از حالت ارتعاشی است.

در صورتیکه زاویه ارتعاش مثبت باشد در این حالت تیغه در هنگام برش خاک به سمت بالا حرکت کرده و ضمن برش خاک، باعث بالابردن و شتاب خاک بریده شده خواهد گردید (شکل ۱۴ تصویر بالا) و هنگام برگشت به عقب، در داخل خاک سست شده‌ی قبلی به سمت پایین حرکت می‌کند که باعث تراکم خاک زیرین تیغه می‌گردد (شکل ۱۴ تصویر پایین) و در انتها دوباره به سمت جلو حرکت کرده و باعث بریده شدن خاک سفت می‌گردد. برای زاویه ارتعاشی مثبت نوک تیغه در زمان برش به طرف بالا حرکت کرده و جابجایی عمودی آن در بالای نقطه میانی بزرگتر از قسمت پایینی نقطه میانی است.

زمانیکه شبیه‌سازی شروع شد، تیغه تحت سرعت زاویه‌ای و انتقالی در جهت مثبت محور x در داخل سویل‌بین به حرکت در آمد. عمق کاری تیغه زیرشکن ۳۸ سانتی‌متر و سرعت انتقالی ۰/۸۹ متربرثانیه انتخاب شده بود. برای بررسی تاثیر زاویه ارتعاش بر عملکرد زیرشکن از زوایای ارتعاشی ۲۷، ۱۶، ۸، صفر،



شکل ۱۱. تیغه طراحی شده در (Solidwork چپ) و تیغه طراحی شده در (PFC^{3D} راست)

استخراج پارامترها

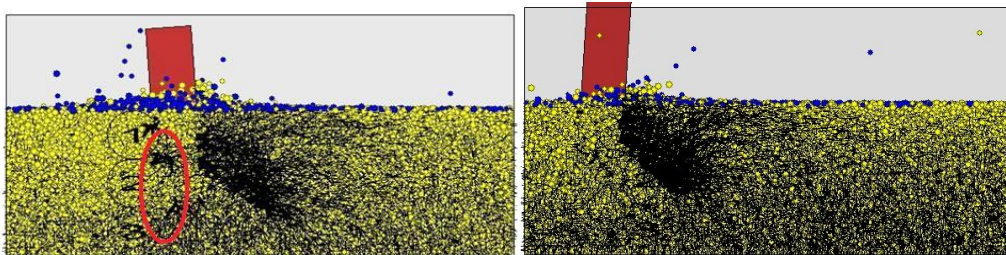
پارامترهای مختلفی از نتایج شبیه‌سازی محاسبه و استخراج گردید. پارامترهایی که مستقیماً توسط دستورات نرم‌افزار قابل محاسبه بودند عبارتند از:

- ۱- نیروهای افقی و عمودی تیغه.
- ۲- کارمرزی انجام شده توسط تیغه بر روی ذرات.
- ۳- کار اصطکاکی تلف شده در تماس‌ها.
- ۴- انرژی جنبشی ذرات.
- ۵- انرژی پیوندی ذرات.
- ۶- مسیرهای جابجایی تیغه تحت فرکانس و زوایای ارتعاشی مختلف.
- ۷- محاسبه تنش‌ها در کره‌های ۱، ۲ و ۳.

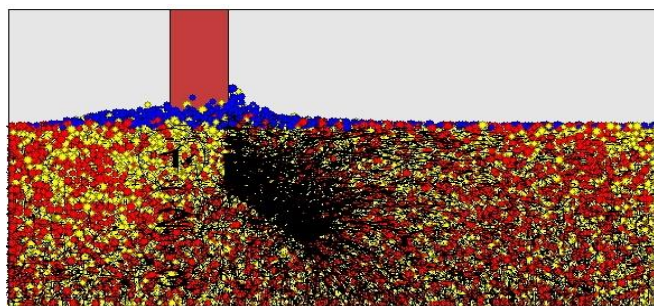
پارامترهای انرژی برای فهم تاثیر ارتعاش بر روی خاک استخراج شده بودند. برای مشخص کردن تاثیرات بیشتر ارتعاش، تنش‌های وارد بر خاک برای هر سه حجم تعیین شده استخراج گردیدند.

بخاطر اینکه DEM یک تکنیک شبیه‌سازی گسسته است و تنش کمیتی پیوسته است از این رو در هر نقطه از مجموعه ذرات تنش موجود نیست باید در حجم‌های مشخص شده تعیین گردند. نیروهای تماسی و جابجایی ذرات در روش DEM بطورمستقیم به مدلی پیوسته برای محاسبه تنش‌ها نمی‌تواند منتقل شوند.

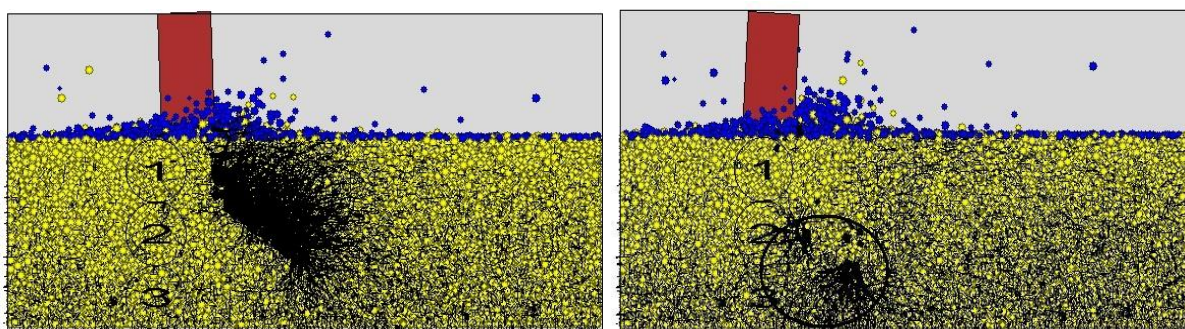
در نرم‌افزار PFC^{3D} نسبت تنش‌ها و کرنش‌ها با روش میانگین‌گیری در حجم مشخصی از ذرات قرارگرفته در کره‌های



شکل ۱۲. نمایی از فاز برش (بالا) و فاز برگشت (پایین) تیغه ارتعاشی در زاویه ارتعاش ۲۲/۵- درجه



شکل ۱۳. نمایی از فاز برش تیغه غیر ارتعاشی



شکل ۱۴. نمایی از فاز برش (بالا) و فاز برگشت (پایین) تیغه ارتعاشی در زاویه ارتعاشی ۲۷ درجه

شبیه‌سازی نتایج تست برشی یکسانی با خاک واقعی ارائه دهند اما رفتار دینامیکی ذرات (مواد) کاملاً دقیق نیست. یکی از عوامل تاثیر گذار دیگر بر روی رفتار دینامیکی مواد ضریب میرایی است که در این پژوهش کالیبره نشده بود. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان گفت که با افزایش زاویه ارتعاشی در حالت مثبت و منفی میزان نیروی کشش کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۵) با کاهش زاویه منفی نیروی کشش افزایش و در زوایای بین صفر تا ۸ درجه روندی ثابت و از زاویه ۸ تا ۲۷ درجه کاهش شدیدی در میزان نیروی کشش بدست آمد. در زوایای ارتعاشی مثبت از زاویه ۸ تا ۲۷ درجه مقدار کاهش کشش نسبت به زوایای منفی بیشتر است بطوریکه بیشترین درصد کاهش کشش در زاویه ۲۷ درجه به میزان ۳۲/۸٪ و کمترین درصد کاهش کشش در زاویه ۸ درجه به میزان ۱۴/۳٪ نسبت به حالت بدون ارتعاش بدست آمد (شکل ۱۶).

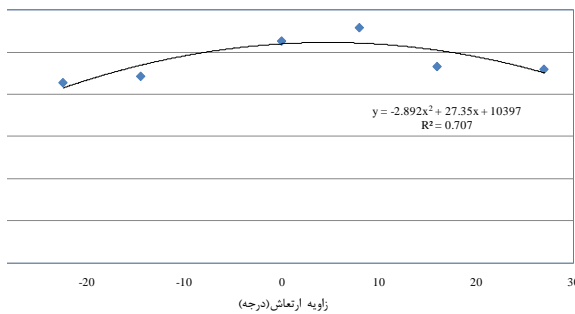
تأثیر زاویه ارتعاش بر نیروی کشش تیغه ارتعاشی

نتایج شبیه‌سازی همانند نتایج تجربی نشان دادند که تغییرات زاویه ارتعاش در تعیین نیروی کشش و توان مورد نیاز بوده و افزایش یا کاهش و همچنین مثبت یا منفی بودن زاویه ارتعاشی می‌تواند عملکرد تیغه ارتعاشی را تحت تاثیر قرار دهد. مقادیر مطلق نیروهای کشش بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی کمتر از مقادیر نیروی کشش حاصل از آزمایش هستند. علت اصلی اینست که مواد شبیه‌سازی در نظر گرفته شده خاک واقعی را به اندازه کافی دقیق نشان نمی‌دهند و کاملاً عین خاک واقعی رفتار نمی‌کنند. قطر ذرات تاثیر زیادی بر روی نتایج دارد. برای خاک واقعی ۷۰٪ قطر ذرات بین ۵۳ تا ۵۰۰ میکرومتر است در حالیکه قطر ذرات شبیه‌سازی بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر است. کاهش قطر ذرات باعث افزایش تعداد ذرات هم‌جوار با یکدیگر گشته و تعداد پیوندهای درگیر با ذرات دیگر را افزایش و در نتیجه باعث افزایش نیروی کشش می‌گردد. ممکن است مواد

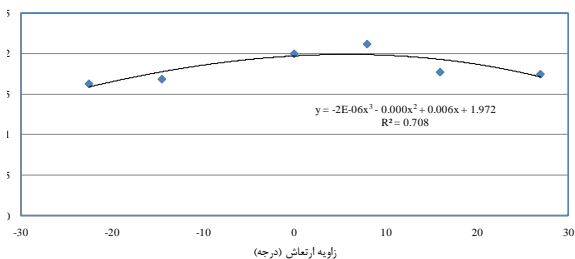
زاویه‌ای بهینه است.

تاثیر زاویه ارتعاش بر توان مورد نیاز تیغه ارتعاشی

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر توان و نسبت توان تیغه ارتعاشی را نشان می‌دهند. برای زوایای ارتعاشی مثبت، که ابزار بطور مایل بطرف بالا حرکت می‌کند، نیروهای بالابری، اصطکاکی و شتابی بعلاوه نیروهای فشاری و اصطکاکی سطح پایینی ابزار به مقاومت برشی افزوده می‌شوند. بر عکس، برای زوایای ارتعاشی منفی، ابزار در فاز برش بطور مایل بطرف پایین حرکت می‌کند، که زاویه حمله لحظه‌ای آن کاهش می‌یابد و تنها نیروهای برشی و اصطکاکی بر روی کشش موثر هستند. باتوجه به نتایج حاصل از کار مرزی، چون در زوایای منفی میزان کارمرزی انجام شده بر روی ذرات تقریباً کمتر از زوایای ارتعاشی مثبت است در نتیجه نسبت توان در زوایای منفی کمتر از زوایای مثبت خواهد شد (شکل ۱۸). همچنانکه مشاهده می‌کنیم در زاویه $22/5$ تا صفر درجه میزان توان موردنیاز افزایش یافته و سپس از زاویه صفر تا 8 درجه روندی ثابت و دوباره از زاویه 8 تا 27 درجه کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مصرف توان (11151 وات) در زاویه 8 درجه و کمترین مقدار مصرف توان (8575 وات) در زاویه $22/5$ بدست آمد.



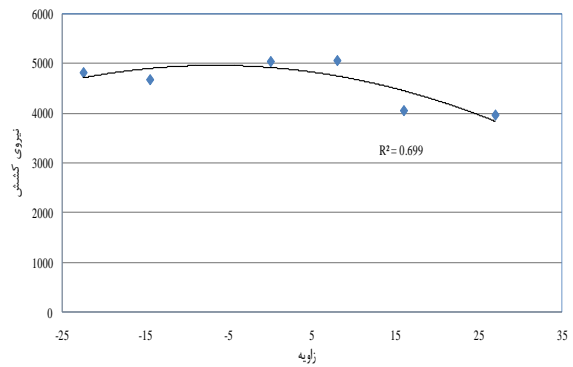
شکل ۱۷: نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر توان تیغه ارتعاشی در فرکانس $4/9$ هرتز



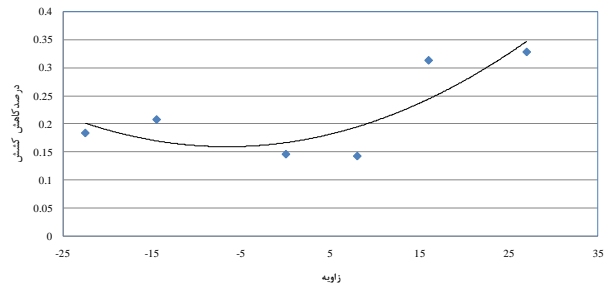
شکل ۱۸: نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر نسبت توان تیغه ارتعاشی در فرکانس $4/9$ هرتز

تاثیر زاویه ارتعاش بر کارمرزی، انرژی جنبشی، کار اصطکاکی و انرژی پیوندی

شکل (۱۹) مقدار کارمرزی انجام شده توسط تیغه بر روی ذرات



شکل ۱۵: نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر نیروی کشش در فرکانس $4/9$ هرتز

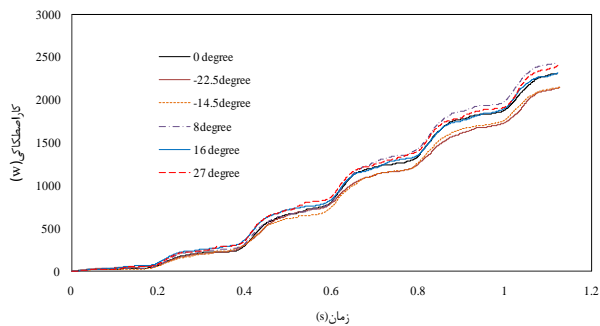


شکل ۱۶: نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر نسبت کاهش کشش در فرکانس $4/9$ هرتز

Eggenmuller (1958) با استفاده از تحلیل‌های تئوری به این نتیجه رسید که زوایای ارتعاشی منفی نسبت به زوایای ارتعاشی مثبت در کاهش نیرو و توان مورد نیاز موثرترند. وی اظهار داشت که برای زوایای ارتعاشی مثبت، که ابزار بطور مایل بطرف بالا حرکت می‌کند، نیروهای بالابری، اصطکاکی و شتابی بعلاوه نیروهای فشاری و اصطکاکی سطح پایینی ابزار به مقاومت برشی افزوده می‌شوند. وی بیان داشت که این نیروها کشش را افزایش می‌دهند اما بطور تجربی تأیید نشد. برعکس، برای زوایای ارتعاشی منفی، ابزار در فاز برش بطور مایل بطرف پایین حرکت می‌کند، که زاویه حمله لحظه‌ای آن کاهش می‌یابد و تنها نیروهای برشی و اصطکاکی بر روی کشش موثر هستند. همچنین بطور تجربی به این نتیجه رسید که تغییر زاویه ارتعاش از صفر تا 30 درجه محدود از سرعت‌های خاص بطور معنی‌داری نیروی کشش را کاهش می‌دهد، اما با افزایش بیشتر در زاویه ارتعاش میزان نیروی اصطکاکی زیرین ابزار افزایش می‌یابد که از میزان کاهش کشش بیشتر جلوگیری می‌کند.

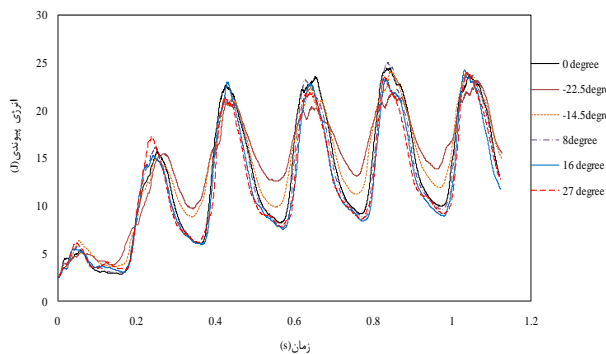
Sakai *et al.*, (1993) تاثیر زاویه ارتعاش بین 15 تا 30 درجه را با تغییر موقیت جلو و عقب تیغه مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند زمانیکه زاویه ارتعاش 30 درجه است، بیشترین کاهش کشش قابل دستیابی است و این نتیجه مخالف با گفته اگن مولر بود. (Sakai *et al* 1993) بطور تجربی نشان دادند که زاویه 30 درجه در میزان کاهش کشش و توان،

افزایش زاویه مثبت تا ۸ درجه کار اصطکاکی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. زیرا برای زوایای ارتعاشی مثبت، که ابزار بطور مایل بطرف بالا حرکت می‌کند، نیروهای بالابری، کار اصطکاکی خاک بیشتر بوده و برعکس، برای زوایای ارتعاشی منفی، ابزار در فاز برش بطور مایل بطرف پایین حرکت می‌کند، که زاویه حمله لحظه‌ای آن کاهش می‌یابد و کار اصطکاکی کمتر می‌شود. همچنانکه تیغه شروع به برگشت می‌کند الاستیسیته خاک فشرده شده نیروی مخالفی بر روی تیغه ایجاد کرده و خاک اطراف و زیر ابزار نیروی اصطکاکی و کشش منفی را بر ابزار وارد می‌کند. نیروهای اصطکاکی و اینرسی ابزار از نیروهای غالب در فاز برگشت خاک‌ورزی هستند.



شکل ۲۱. نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر میزان کار اصطکاکی تیغه ارتعاشی در فرکانس ۴/۹ هرتز

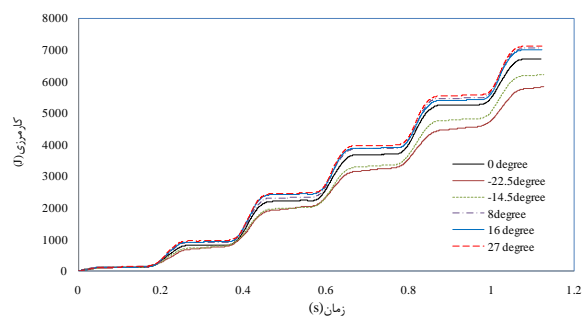
شکل‌های (۲۲) تغییرات انرژی پیوندی بر حسب زمان را در زوایای ارتعاشی مختلف را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌کنیم که از زاویه $-22/5$ به 27 درجه در میانگین انرژی روندی کاهشی بوجود آمده است. بطوریکه با تغییر در زاویه ارتعاشی از $-22/5$ به 27 میانگین انرژی پیوندی ذخیره شده در ذرات از $16/34$ به $12/8$ ژول کاهش یافته است و بیانگر این حالت است که زوایای ارتعاشی مثبت نسبت به زوایای ارتعاشی منفی گسیختگی بیشتری در ذرات خاک بوجود می‌آورند و پیوند بین ذرات را سست‌تر می‌سازند.



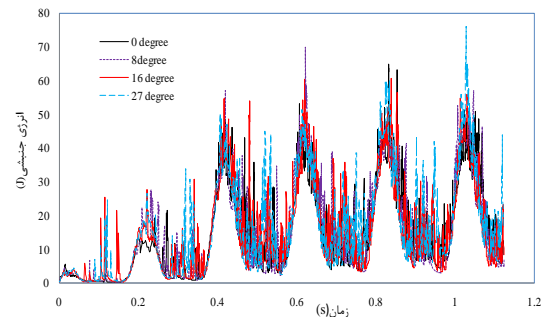
شکل ۲۲. نمودار تغییرات انرژی پیوندی بر حسب زمان در زوایای ارتعاشی مختلف

در مسافت ۱ متر حرکت تیغه نشان می‌دهد. رفتاری مشابه با مصرف توان نشان می‌دهد. با افزایش زاویه منفی میزان کار انجام شده از طرف تیغه بر روی ذرات کاهش یافته و با افزایش زوایای مثبت از صفر تا 27 درجه کار مرزی بیشتر شده است.

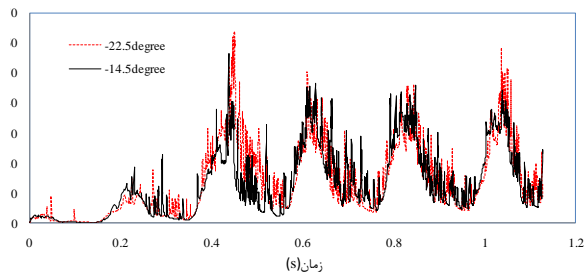
شکل (۲۰) انرژی جنبشی زوایای مثبت و شکل (۲۱) انرژی جنبشی زوایای منفی را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه در حالت منفی و مثبت، میزان انرژی جنبشی افزایش می‌یابد. انرژی جنبشی بالاتر اشاره بر این دارد که ذرات به علت افزایش سرعت دارای انرژی بیشتری هستند.



شکل ۱۹. نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر میزان کار مرزی تیغه ارتعاشی در فرکانس ۴/۹ هرتز

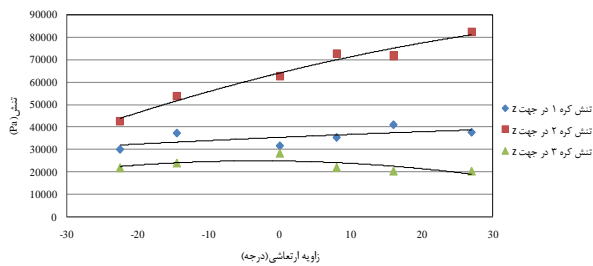


شکل ۱۹. نمودار تاثیر زوایای مثبت ارتعاشی بر میزان انرژی جنبشی ذرات در فرکانس ۴/۹ هرتز



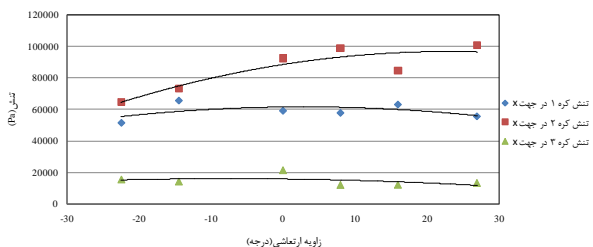
شکل ۲۰. نمودار تاثیر زوایای منفی ارتعاشی بر میزان انرژی جنبشی ذرات در فرکانس ۴/۹ هرتز

شکل (۲۱) تغییرات کار اصطکاکی در طول ۱ متر از مسیر زیرشکنی را در زوایای مختلف نشان می‌دهد، با توجه به نتایج شبیه‌سازی، با افزایش زاویه منفی کار اصطکاکی کاهش و با



شکل ۲۴. نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر تنش کره های ۱، ۲ و ۳ در جهت عمودی

شکل (۲۵) میانگین تنش‌های افقی وارده بر کره ۱، ۲ و ۳ را در جهت طولی نشان می‌دهد. میزان تنش در کره ۲ که بین دو کره ۱ و ۳ قرار دارد بیشترین مقدار تنش ماکزیمم را به خود اختصاص داده است، زیرا درگیری بیشتری با تیغه دارد. در کره ۲ با تغییر زاویه از $22/5$ تا 27 درجه تنش وارد بر ذرات افزایش شدیدی دارد بطوریکه از 64720 پاسکال در زاویه $22/5$ - به 100860 پاسکال در زاویه 27 درجه می‌رسد و در کره ۱ از زاویه $22/5$ - تا 16 درجه میزان تنش روندی افزایشی و سپس کاهش می‌یابد، همچنین در کره ۳ که مشخص کننده میزان تراکم زیر تیغه است تنش وارد بر ذرات در زوایای مختلف ارتعاشی تقریباً روندی ثابت دارد.



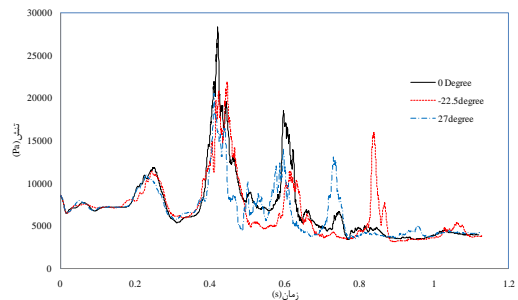
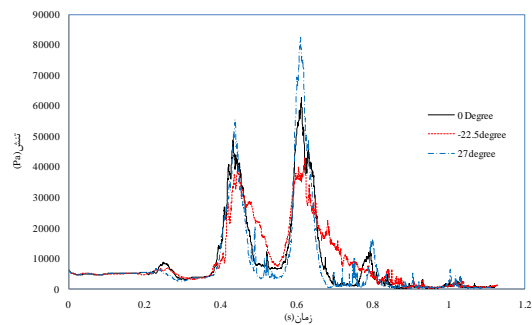
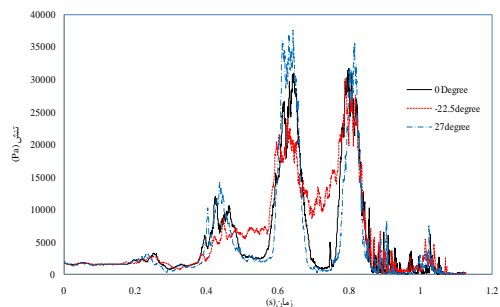
شکل ۲۵. نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر تنش کره های ۱، ۲ و ۳ در جهت X

نتایج

۱- با کاهش زاویه منفی نیروی کشش افزایش و در زوایای بین صفر تا 8 درجه روندی ثابت و از زاویه 8 تا 27 درجه کاهش شدیدی در میزان نیروی کشش بدست آمد. در زوایای ارتعاشی مثبت از زاویه 8 تا 27 درجه مقدار کاهش کشش نسبت به زوایای منفی بیشتر است بطوریکه بیشترین درصد کاهش کشش در زاویه 27 درجه به میزان $32/8\%$ و کمترین درصد کاهش کشش در زاویه 8 درجه به میزان $14/3\%$ بدست آمد.

۲- در زوایای منفی میزان کارمرزی انجام شده بر روی ذرات تقریباً کمتر از زوایای ارتعاشی مثبت است در نتیجه نسبت توان در زوایای منفی کمتر از زوایای مثبت خواهد شد. همچنانکه مشاهده می‌کنیم در زاویه $22/5$ - تا صفر درجه میزان توان

تاثیر زاویه ارتعاش بر تنش وارد بر ذرات ناشی از تیغه ارتعاشی شکل (۲۳) تنش‌های وارده بر کره ۱، کره شماره ۲ و کره شماره ۳ را در جهت عمودی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان مشاهده کرد که با نزدیک شدن تیغه به کره‌های موجود، تنش افزایش می‌یابد. بعداز رسیدن به ماکزیمم مقدار ممکن در اثر عبور تیغه از کره، با دور شدن تیغه از کره مقدار تنش دوباره به مقدار ثابتی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۲۴) میزان تنش در کره ۲ که بین دو کره ۱ و ۳ است بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است چون درگیری بیشتری با تیغه دارد. در کره ۲ با تغییر زاویه از $22/5$ - تا 27 درجه تنش وارد بر ذرات افزایش شدیدی دارد بطوریکه از 42807 پاسکال در زاویه $22/5$ - به 82538 پاسکال در زاویه 27 درجه می‌رسد و در کره ۱ از زاویه $22/5$ - تا 16 درجه میزان تنش از 30104 به 41000 پاسکال افزایش و سپس در زاویه 27 روندی کاهش مشاهده می‌گردد. تنش وارده بر کره ۳ بیانگر این حالت است که تیغه در زوایای ارتعاشی منفی در فاز برش و در زوایای ارتعاشی مثبت در فاز برگشت خاک زیرین را به مقدار جزئی، متراکم می‌کند و این تراکم در زوایای منفی بیشتر است.



شکل ۲۳. نمودار تاثیر زوایای مختلف ارتعاشی بر تنش کره (بالا)، کره ۲ (وسط) و کره ۳ (پایین) در جهت عمودی

در زاویه ۲۷ درجه می‌رسد و در کره ۱ از زاویه ۲۲/۵- تا ۱۶ درجه میزان تنش روندی افزایشی و سپس کاهش می‌یابد. در جهت عمود کره ۲ که بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است چون درگیری بیشتری با تیغه دارد. در کره ۲ با تغییر زاویه از ۲۲/۵- تا ۲۷ درجه تنش وارد بر ذرات افزایش شدیدی دارد بطوریکه از ۴۲۸۰۷ پاسکال در زاویه ۲۲/۵- به ۸۲۵۳۸ پاسکال در زاویه ۲۷ درجه می‌رسد و در کره ۱ از زاویه ۲۲/۵- تا ۱۶ درجه میزان تنش از ۳۰۱۰۴ به ۴۱۰۰۰ پاسکال افزایش و سپس در زاویه ۲۷ روندی کاهشی مشاهده می‌گردد. تنش وارده بر کره ۳ بیانگر این حالت است که تیغه در زوایای ارتعاشی منفی در فاز برش و در زوایای ارتعاشی مثبت در فاز برگشت خاک زیرین را به مقدار جزئی متراکم می‌کند و این تراکم در زوایای ارتعاشی منفی بیشتر است.

مورد نیاز افزایش یافته و سپس از زاویه صفر تا ۸ درجه روندی ثابت و دوباره از زاویه ۸ تا ۲۷ درجه کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مصرف توان (۱۱۵۱ وات) در زاویه ۸ درجه و کمترین مقدار مصرف توان (۸۵۷۵ وات) در زاویه ۲۲/۵- بدست آمد. ۳- با توجه به نتایج شبیه‌سازی، میزان کار مرزی، انرژی جنبشی و کار اصطکاکی در زوایای ارتعاشی مثبت بیشتر از زوایای ارتعاشی منفی بود و با افزایش بیشتر در زوایای منفی کار مرزی و اصطکاکی کاهش بیشتری داشت. با تغییر زاویه از ۲۲/۵- به ۲۷ درجه میانگین انرژی پیوندی ذرات کاهش یافت. ۴- در جهت x میزان تنش در کره ۲ که بین دو کره ۱ و ۳ قرار دارد بیشترین مقدار تنش ماکزیمم را به خود اختصاص داده است، زیرا درگیری بیشتری با تیغه دارد. در کره ۲ با تغییر زاویه از ۲۲/۵- تا ۲۷ درجه تنش وارد بر ذرات افزایش شدیدی دارد بطوریکه از ۶۴۷۲۰ پاسکال در زاویه ۲۲/۵- به ۱۰۰۸۶۰ پاسکال

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 and Tillage Research*. 92, 227-242.
- 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.
- Franco, Y., Rubinstein, D., Shmulevich, I. (2006). Prediction of soil-bulldozer blade interaction using Discrete Element Method. *Trans. ASABE*. 50(2): 345-353.
- Eggenmuller, A. (1958). Oscillation tools for soil cultivation: Kinematics and testing of single model tools. *Grundlagen der. Landtechnik*. 10, 55-70.
- Itasca manual, (2006b). PFC3D User's Manual, Version 3.1., Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minn, USA.
- Sakai, K., Hata, S.I., Takai, M., Nambu, S. (1993). Design parameters of four-shank vibrating subsoiler. *Trans. ASAE*. 36(1):23-26.
- 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.
- Upadhyaya SK, Rosa UA, Wulfsohn D, 2002. Application of the finite element method in agricultural soil mechanics. *Adv Soil Dynamics*, 2, 117-153.
- Shmulevich, I, (2010). State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method. *Soil and Tillage Research*. 111, 41-53.
- Van der linde, J. (2007). Discrete element modelling of vibratory subsoiler. Master thesis, University of Stellenbosch, South Africa.