



## تخمین پیوسته فشردگی خاک با حسگرهای آکوستیک

سعید مینایی<sup>۱</sup>، عباس معلمی اوره<sup>۲</sup>، احمد شریفی مالواجردی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، استادیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج  
sminae@gmail.com

### چکیده

فشردگی خاک‌های کشاورزی به عنوان یک مشکل اساسی در تولید محصول شناخته شده است و بررسی آن همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این تحقیق، سامانه‌ای صوتی برای تخمین پیوسته فشردگی خاک با استفاده از سه میکروفن که در میله‌هایی با نوک مخروطی قرار گرفته و بر روی تیغه‌ای به صورت افقی با فاصله‌های یکسان نصب شده‌اند، طراحی گردید. سامانه آکوستیک فشردگی خاک را در سه لایه (۲۵-۳۵، ۱۵-۲۵، ۵-۱۵) بر اساس اندازه‌گیری چگالی طیف توان ((power spectral density (PSD)) صدای تولید شده ناشی از حرکت تیغه در خاک، برآورد می‌کند. این سامانه در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت به طوریکه میکروفن‌ها در هنگام کار در عمق-های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری حرکت می‌کردند. چهار سطح فشردگی توسط تردد تراکتور (بدون تردد، ۱، ۴ و ۸ تردد) ایجاد گردید. آنالیز تبدیل فوریه سریع روی داده‌ها ارتباط مستقیمی را بین بلندی صدا و سطوح فشردگی خاک در بازه فرکانسی ۵/۵ kHz تا ۷/۵ نشان داد. بنابراین یک بانک فیلتر شامل ۵ باند بسامدی در محدوده‌های شامل ۵/۵-۵/۹، ۶/۳-۶/۷، ۶/۷-۷/۱، ۷/۱-۷/۵ و ۷/۱-۷/۵ کیلو هرتز بکار برده شد. در هر بازه بسامدی میانگین PSD اندازه‌گیری و پیوند آن با شاخص مخروط خاک مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که در لایه ۱۵-۲۵ سانتیمتری در هیچ یک از بازه‌های بسامد ارتباط معنی‌داری بین مقادیر PSD و شاخص مخروط وجود نداشت. زیرا حرکت کاوشگر در عمق ۱۰ سانتیمتری، در بالای عمق بحرانی قرار داشت. اما، این ارتباط بطور معنی‌دار در لایه‌های ۲۵-۱۵ سانتیمتری ( $R^2=0/88$ ) و ۳۵-۲۵ سانتیمتری ( $R^2=0/78$ ) در بسامد ۷/۱-۷/۵ کیلو هرتز مشاهده گردید. حسگر صوتی (میکروفن) ساده، ارزان و بسیار کوچک می‌باشد که به راحتی میتوان آن را در تیغه‌های مختلف خاک‌ورزی برای کسب اطلاعات درباره فشردگی خاک به منظور خاک‌ورزی موضعی و دیگر روش‌های مدیریتی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: فشردگی خاک، حسگر صوتی، خاک‌ورزی دقیق

### مقدمه

سال‌های زیادی فشردگی خاک‌های کشاورزی موضوع قابل توجه کشاورزان، تولید کنندگان ماشین‌های کشاورزی و پژوهشگران قرار گرفته و به عنوان یک مشکل اساسی در تولید محصولات شناخته شده است. فشردگی خاک از

طریق بکارگیری بیش از حد ماشین‌های کشاورزی، تولید افراطی محصول، دوره تناوب کوتاه محصول، چراندن بیش از اندازه دام و مدیریت نامناسب خاک، به وجود می‌آید (Hamza & Anderson, 2005). هنگامی که خاک فشرده می‌شود، خصوصیات فیزیکی آن مانند ساختار، پایداری و استحکام (چسبندگی و پیوستگی)، تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک تغییر می‌کند که نقش مهمی در رشد و تولید گیاه دارد (Sudduth *et al.*, 2008).

در ایران برای بالا بردن رشد محصول هر سال به طور معمول از خاک‌ورزی عمیق در عمق یکنواخت برای شکست لایه سخت خاک در سراسر مزرعه، استفاده می‌شود. این روش معایب زیادی دارد، زیرا کشاورز از نیاز واقعی به خاک‌ورزی عمیق آگاهی ندارد و نمی‌تواند تشخیص دهد کدام قسمت مزرعه دارای لایه فشرده است و این لایه در چه عمقی قرار دارد. افزون بر این، در یک مزرعه مشخص از یک مکان تا مکان دیگر، عمق و ضخامت سخت لایه بسیار متغیر است (Gorucu *et al.*, 2006). بنابراین خاک‌ورزی عمیق یکنواخت در سراسر مزرعه ضروری نیست. از این رو خاک‌ورزی متغیر به عنوان یک روش مدیریتی سبب صرفه جویی اقتصادی و بالا بردن بازدهی تولید می‌گردد، زیرا موجب ذخیره انرژی و کاهش پتانسیل فرسایش خاک می‌شود. ریپر و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از زیرشکن در پلات‌های دارای سخت لایه کم عمق (۲۵ cm) و متوسط (۳۵ cm) در مقایسه با زیرشکنی یکنواخت در عمق (۴۵ cm) در همان پلات‌ها به کاهش ۴۳٪ و ۲۷٪ در مصرف سوخت و ۵۹٪ و ۳۵٪ در کاهش کشت دست یافتند. در اجرای خاک‌ورزی دقیق فاکتور اساسی، تعیین محل ناحیه تراکم و عمق آن در مزرعه می‌باشد.

در ایران پژوهش‌هایی در زمینه اندازه‌گیری پیوسته فشردگی خاک به روش نیروسنجی انجام شده است. معمار و مینایی (۱۳۸۳) با طراحی و ساخت سامانه‌ای الکترونیکی به اندازه‌گیری پیوسته مقاومت افقی خاک در انباره خاک و در مزرعه پرداختند. یافته‌های ایشان نشان داد که شاخص مقاومت افقی خاک (SRI) پیوند خطی مستقیمی با شاخص مخروطی عمودی (CI) دارد و تفاوت‌های سختی خاک را به خوبی نشان می‌دهد (معمار و همکاران، ۱۳۸۵). در ادامه کار، نیکبخت و همکاران با استفاده از نوک‌های منشوری و مخروطی سوار بر دستگاه اندازه‌گیری پیوسته مقاومت افقی خاک، به بررسی جزئیات گسیختگی خاک در اثر حرکت کاوشگرهای موازی پرداختند. در این پژوهش تاثیر زاویه نوک منشور و مخروط، سرعت پیشروی، نوع و رطوبت خاک بر تغییرات SRI مورد بررسی قرار گرفت (Nikbakht *et al.*, 2007).

در حوزه مطالعات خاک، تاکنون روش‌های صوتی در کارهای مختلف بکار گرفته شده است، از جمله اندازه‌گیری نوع بافت خاک (Liu *et al.*, 1993)، تشخیص ناهمواری سطح خاک توسط اندازه‌گیری سرعت انتشار و بازگشت صوت (Oelze *et al.*, 2003)، تعیین ناهمواری خاک کشاورزی (Chambers & Sabatier, 2003)، بررسی اثر سرعت صوت بر فشردگی خاک در آزمایشگاه (Lu *et al.*, 2004)، تشخیص عمق و ضخامت سخت لایه خاک در انباره خاک (Grift *et al.*, 2005) و بررسی اثرات بافت خاک و دامنه انتشار بر پخش و فرسایش انرژی موج در شرایط غیر اشباع و اشباع (Lo *et al.*, 2007; 2008). مرور منابع نشان می‌دهد که تا کنون روش آکوستیک برای تخمین فشردگی خاک در عمق‌های مختلف بکار گرفته نشده است.

حسگر صوتی (میکروفن) در مقایسه با حسگرهای بکار رفته در سامانه‌های اندازه‌گیری پیوسته فشردگی خاک بسیار کوچک می‌باشد و به راحتی می‌توان آن را در تیغه‌های خاک‌ورز قرار داد. به علاوه، در این پژوهش صدا در

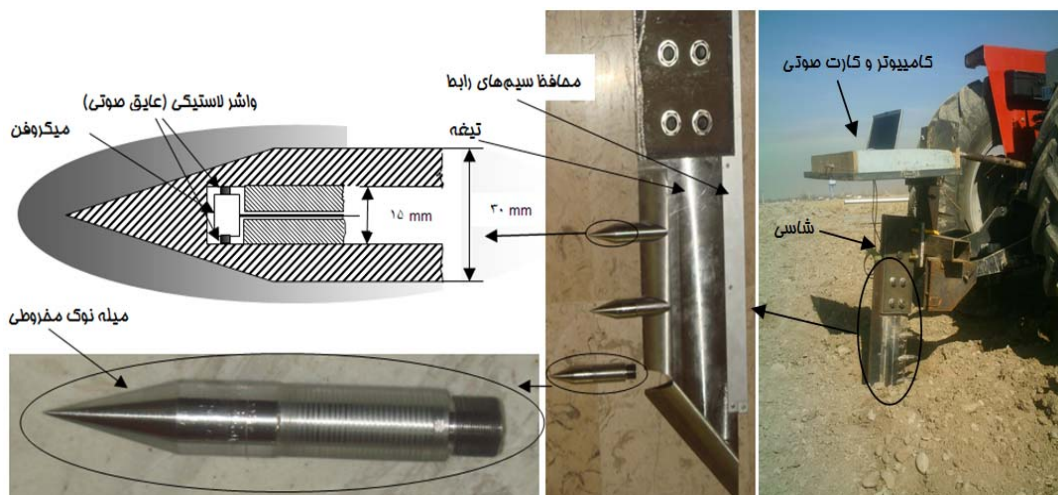
ناحیه شنیداری ( ۲۰kHz تا ۲۰Hz) بررسی می شود، لذا می توان از یک حسگر ارزان قیمت استفاده کرد. با فرض این که با افزایش مقاومت خاک، شدت صدای تولید شده ناشی از حرکت سامانه در خاک بیشتر می شود، سامانه اندازه‌گیری صوتی فشردگی خاک طراحی شده است. هدف از این پژوهش طراحی سامانه آکوستیک اندازه‌گیری پیوسته فشردگی خاک در سه لایه، ارزیابی آن و بدست آوردن پیوند میان شاخص مخروط و چگالی طیف توان (power spectral density (PSD)) در رطوبت ثابت در مزرعه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

سامانه آکوستیک اندازه‌گیری فشردگی خاک از یک تیغه که بر روی آن سه میله با نوک‌های مخروطی سوار شده، تشکیل شده است (شکل ۱). تیغه اصلی از فولاد با کربن متوسط و عملیات حرارتی (فولاد CK45) ساخته شد و به صورت عمودی توسط مکانیزم پین برشی بر یک شاسی سوار و شاسی به اتصال سه نقطه تراکتور متصل گردید. طول و عرض و ضخامت تیغه به ترتیب ۷۳۰، ۱۸۰ و ۳۰ میلی‌متر و برای برش راحت‌تر خاک زاویه برش (لبه تیغه) ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. برای راحتی نفوذ آن با کمترین نیروی عمودی در خاک، پایین تیغه با زاویه ۴۵ درجه بریده و لبه آن نیز به صورت گوه‌ای با زاویه ۳۰ درجه تیز شد. برای هماهنگی با تیغه، سه میله با نوک مخروطی و زاویه مخروط ۳۰ درجه از فولاد ضدزنگ ساخته و روی تیغه سوار شد. با توجه به تحقیقات گذشته (Chung et al., 2006) فاصله نوک آنها از لبه تیغه و فاصله عمودی بین آنها به ترتیب ۱۰۰ و ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا شکست خاک بر روی اندازه‌گیری‌ها کمترین اثر را بگذارد. انتهای میله‌ها و تیغه رزوه شد تا میله در تیغه پیچ گردد. در داخل آنها سه میکروفن استاندارد خازنی (model: electret condenser GM-5212L, JTS Co.) مشابه با قطر ۱۳ میلی‌متر و با بازه فرکانسی ۶۰ هرتز تا ۱۸ کیلو هرتز به همراه عایق صوتی قرار داده شد. درون تیغه و میله‌ها سوراخ شده بود تا سیم‌های رابط از آن عبور کند. هر یک از مجموعه‌ها را یک کاوشگر می‌نامیم. پشت تیغه محفظه-ای تعبیه گردید و سیم‌های رابط از آن به سمت بالا هدایت شد.

برای انتقال داده‌ها از یک کارت صدای خارجی متصل به یک کامپیوتر قابل حمل استفاده گردید که با نرم افزار مطلب (Matlab R2009a) کنترل می‌شد. آهنگ داده برداری روی ۱۸۰۰۰ نمونه بر ثانیه تنظیم شد. بنابراین، سامانه سیگنال‌های صوتی ناشی از حرکت تیغه را به طور پیوسته از سه لایه (۲۵-۳۵ cm، ۱۵-۲۵ cm، ۵-۱۵ cm) دریافت کرده و مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

آزمایش‌هایی برای ارزیابی این سامانه در مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی با بافت خاک لومی شنی رسی شامل ۵۸/۳۳٪ شن، ۲۵/۳۶٪ رس و ۱۶/۲۴٪ سیلت اجرا گردید. چهار سطح فشردگی با تردد تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ (بدون تردد، ۱، ۴ و ۸ تردد) در مسیرهای ۳۰ متری روی خاک شخم و دیسک خورده و مسطح شده، در رطوبت ثابت ایجاد گردید.



شکل ۱- اجزای سامانه آکوستیک اندازه‌گیری فشردگی خاک

پیش از انجام آزمایش‌ها میزان رطوبت و شاخص مخروط خاک به طور میانگین در سه لایه (۲۵-۳۵ cm و ۱۵-۲۵، ۱۵-۵) تعیین شد. برای اندازه‌گیری رطوبت، در هر مسیر به صورت تصادفی ۳ نمونه خاک تهیه و برای ۴۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شد. شاخص مخروط خاک، تا عمق ۴۰ سانتیمتری قبل و بعد از اعمال تیمارها، به صورت تصادفی از ۶ نقطه در وسط هر مسیر تردد شده توسط فروسنج مخروطی (Eijkelkamp, Model 06-15, Netherlands) اندازه‌گیری گردید.

برای شروع آزمایش سامانه توسط تراکتور در بالای خاک و بدون بار، حرکت داده شد تا صدای ناشی از تراکتور به عنوان نقطه شروع فیلتر قرار گیرد. سرعت انجام آزمایش‌ها ۰/۵ متر بر ثانیه و طول مسیر حرکت داده برداری ۱۰ متر بود. برای بررسی سیگنال‌های صوتی ناشی از حرکت سامانه در خاک در سه لایه خاک به طور همزمان تبدیل فوریه سریع (FFT) روی داده‌ها انجام شد و توسط یک بانک فیلتر به بررسی میانگین PSD در سطوح مختلف فشردگی خاک پرداخته شد.

## نتایج و بحث

قبل از اعمال تیمار، مقادیر شاخص مخروط خاک در سطح کل زمین مورد آزمایش اختلاف معنی‌داری نداشت. جدول (۱) میانگین شاخص مخروط و رطوبت خاک بعد از اعمال تیمار در سه لایه (۲۵-۳۵ cm و ۱۵-۲۵، ۱۵-۵) را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول با افزایش تردد تراکتور، شاخص مخروط خاک افزایش پیدا کرده است. رطوبت خاک در لایه زیرین بیشتر از لایه‌های بالایی بود که به علت اثر خشک شدن از سطح خاک به سمت پایین می‌باشد. با این وجود اختلاف زیادی در رطوبت بین لایه‌های خاک مشاهده نمی‌شود. البته در تحقیقات آینده لازم است اثر رطوبت در گستره بازتری در اندازه‌گیری این سامانه مورد ارزیابی قرار گیرد.

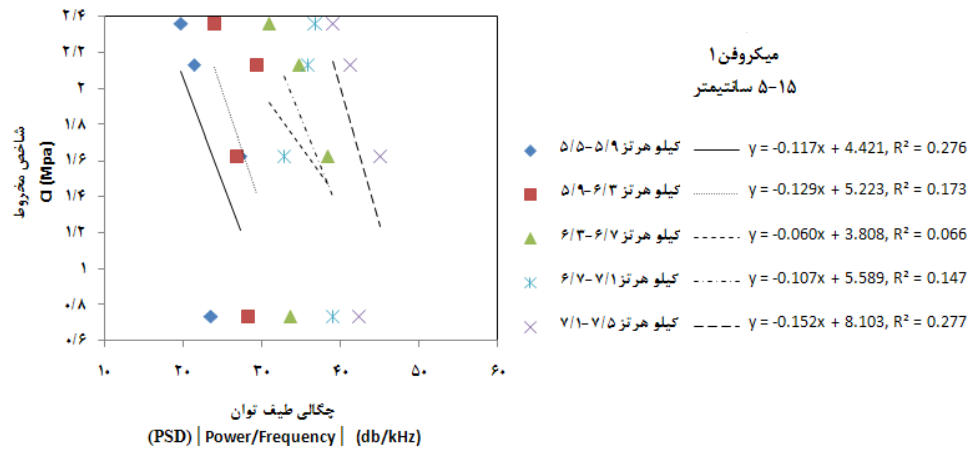
جدول ۱- رطوبت و شاخص مخروط خاک در سطوح مختلف فشردگی

شاخص مخروط خاک (CI)(MPa)			رطوبت خاک (% w/w)			سطوح فشردگی خاک
CI <sub>25-35</sub>	CI <sub>15-25</sub>	CI <sub>5-15</sub>	cm <sub>25-35</sub>	cm <sub>15-25</sub>	cm <sub>5-15</sub>	
۱/۱۰	۰/۸۴	۰/۷۳	۱۳/۱	۱۱/۴	۱۰/۱	بدون تردد
۱/۰۹	۱/۱۹	۱/۶۲	۱۲/۸	۱۰/۵	۹/۶	۱ تردد
۱/۱۸	۱/۴۴	۲/۱۳	۱۲/۷	۱۰/۹	۹/۸	۴ تردد
۱/۲۷	۱/۵۲	۲/۳۶	۱۳/۲	۱۰/۶	۱۰/۷	۸ تردد

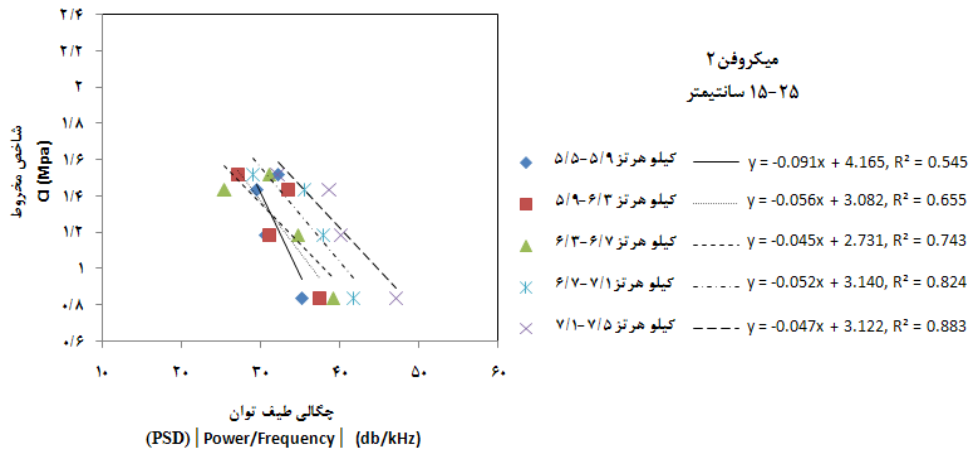
در شروع آزمایش، سامانه در بالای خاک حرکت داده شد و صدای ناشی از تراکتور و محیط توسط میکروفن‌ها حدود ۴۲۰۰ Hz تعیین گردید. این نقطه شروع خوبی برای فیلتر کردن در هنگام آزمایش می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها و بررسی داده‌های خام، بیشترین اختلاف در بازه‌های بسامدی بالا (۵/۵ تا ۷/۵ کیلو هرتز) بین تیمارهای تردد مشخص شد. لذا از یک بانک فیلتر دارای ۵ باند بسامدی شامل ۵/۵-۵/۹، ۵/۹-۶/۳، ۶/۳-۶/۷، ۶/۷-۷/۱ و ۷/۱-۷/۵ کیلو هرتز استفاده گردید. در هر باند میانگین PSD اندازه‌گیری و ارتباط آن با شاخص مخروط خاک مورد بررسی قرار گرفت. تمامی مقادیر PSD منفی بود که شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب پیوند میان قدر مطلق PSD و شاخص مخروط در عمق‌های ۱۵-۵، ۲۵-۱۵ و ۳۵-۲۵ سانتیمتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، در هیچ یک از بازه‌های بسامدی ارتباط معنی‌داری در لایه ۱۵-۵ سانتیمتری میان مقادیر قدر مطلق PSD و شاخص مخروط (CI<sub>5-15</sub>) وجود ندارد (همبستگی ضعیف). در صورتی‌که در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پیوند معنی‌داری در لایه‌های ۲۵-۱۵ سانتیمتری ( $R^2=0/88$ ) و ۳۵-۲۵ سانتیمتری ( $R^2=0/78$ ) در فرکانس ۷/۱-۷/۵ کیلو هرتز میان مقادیر قدر مطلق PSD و شاخص مخروط (CI<sub>15-25</sub>, CI<sub>25-35</sub>) مشاهده می‌شود.

با توجه به همبستگی قوی در عمق‌های ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری و عدم همبستگی در عمق ۱۰ سانتیمتری در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه می‌توان دریافت که میکاوشگر در عمق ۱۰ سانتیمتری، در بالای عمق بحرانی واقع در مکان هلالی شکل شکست خاک حرکت می‌کند. زیرا در این ناحیه با توجه به تماس نامناسب بین میله مخروطی و خاک، سیگنال‌های صوتی با فرکانس‌های بالا به میکروفن انتقال پیدا نمی‌کند.

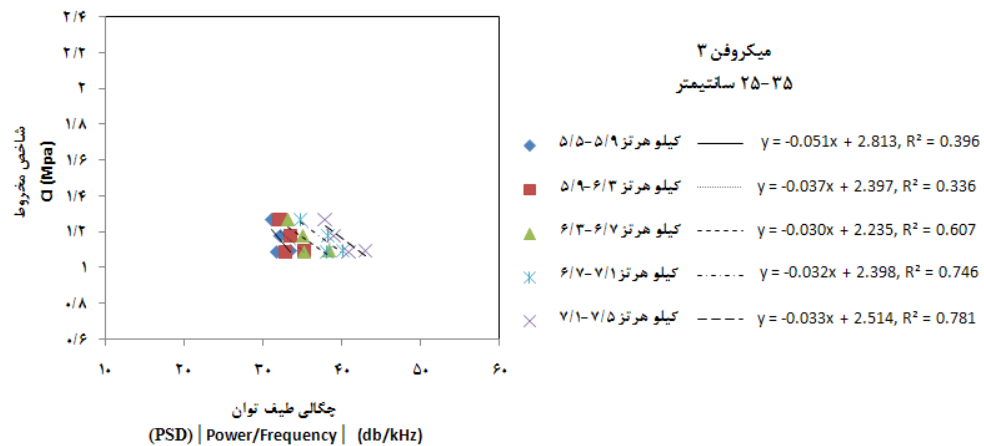
در تحقیقی مشابه برای اندازه‌گیری فشردگی خاک بر مبنای اندازه‌گیری مقاومت خاک سامانه‌ای طراحی و تست گردید (Chung et al., 2006). پژوهشگران در ارزیابی این سامانه در مزرعه گزارش کردند که برخلاف عمق ۱۰ سانتیمتری در عمق ۳۰ سانتیمتری بین شاخص منشوری مقاومت خاک و شاخص مخروط رابطه خطی بدست آمد. ایشان در حرکت این سامانه در انباره خاک با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه ارتباط غیر معنی‌دار در عمق ۱۰ سانتیمتری و معنی‌دار در ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری بین شاخص منشوری مقاومت خاک و شاخص مخروط بدست آوردند ولی با افزایش سرعت به ۱/۵ و ۲/۵ متر بر ثانیه در تمامی عمق‌ها رابطه معنی‌دار حاصل شد (Chung et al., 2004). این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه حسگر واقع در عمق ۱۰ سانتیمتری در بالای عمق بحرانی واقع در مکان هلالی شکل شکست خاک حرکت می‌کند در حالی‌که در سرعت‌های بالاتر عمق بحرانی کمتر شده و کاوشگر در زیر این ناحیه قرار می‌گیرد.



شکل ۲- ارتباط بین شاخص مخروط (CI) و چگالی طیف توان (PSD) در لایه ۵-۱۵ سانتیمتری



شکل ۳- ارتباط بین شاخص مخروط (CI) و چگالی طیف توان (PSD) در لایه ۱۵-۲۵ سانتیمتری



شکل ۴- ارتباط بین شاخص مخروط (CI) و چگالی طیف توان (PSD) در لایه ۲۵-۳۵ سانتیمتری

لذا برای حل مشکل سامانه صوتی در عمق ۱۰ سانتیمتری، سرعت حرکت را با توجه به نیروی کشش تراکتور می‌توان افزایش داد. به علاوه، به نظر می‌رسد که با خارج کردن کاوشگر از ناحیه هلالی شکل شکست خاک، یعنی

با افزایش طول میله نوک مخروطی در عمق ۱۰ سانتیمتری نیز این مشکل قابل حل باشد. با این وجود، در آزمایش‌های آتی باید اثر سرعت و افزایش طول کاوشگر بر شکست خاک و سامانه صوتی مورد بررسی قرار گیرد. با مقایسه شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد که قابلیت اندازه‌گیری این سامانه در فشردگی و عمق بالاتر بیشتر می‌باشد. زیرا با افزایش عمق (لایه‌های ۲۵-۱۵ و ۳۵-۲۵ سانتیمتری) کاوشگر خارج از عمق بحرانی قرار می‌گیرد. همچنین، با افزایش فشردگی در لایه ۲۵-۱۵ سانتیمتری نسبت به لایه ۳۵-۲۵ سانتیمتری ارتباط معنی‌دارتری نشان داده شده است. زیرا در فشردگی بالاتر، تماس بهتری بین میله کاوشگر و خاک برقرار است تا به خوبی بسامدهای بالای سیگنال صوتی به میکروفن منتقل گردد. در نهایت پیشنهاد می‌شود که این سامانه توسط آنالیز موجک نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، سامانه‌ای صوتی برای تخمین پیوسته فشردگی خاک، بر اساس اندازه‌گیری چگالی طیف توان (PSD) صدای تولید شده ناشی از حرکت تیغه در خاک، طراحی گردید. نتایج آزمایش‌ها در مزرعه نشان داد که پیوند معنی‌داری بین مقادیر PSD و شاخص مخروط در لایه‌های ۲۵-۱۵ سانتیمتری ( $R^2=0/88$ ) و ۳۵-۲۵ سانتیمتری ( $R^2=0/78$ ) در گستره بسامدی ۷/۱-۷/۵ کیلو هرتز وجود دارد. اما در لایه ۱۵-۵ سانتیمتری در هیچ یک از بازه‌های فرکانس ارتباط معنی‌داری به علت حرکت کاوشگر در عمق ۱۰ سانتیمتری (بالای عمق بحرانی)، وجود نداشت. قابلیت اندازه‌گیری این سامانه در فشردگی و عمق بالاتر بیشتر می‌باشد. زیرا با افزایش عمق، کاوشگر خارج از عمق بحرانی قرار می‌گیرد. همچنین، با افزایش فشردگی تماس بهتری بین کاوشگر و خاک برقرار است تا به خوبی بسامدهای بالای سیگنال آکوستیک به میکروفن منتقل گردد. بطور کلی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سامانه آکوستیک پس از ارزیابی آن در آزمایش‌های مختلف می‌تواند به عنوان ابزاری ارزان و ساده در تخمین فشردگی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

### منابع و مآخذ

- معمار دستجردی، ر. و مینایی، س. ۱۳۸۳. تاثیر عمق و سرعت پیشروی بر شاخص مقاومت مکانیکی خاک به صورت افقی. سومین کنگره ملی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی. دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- معمار دستجردی، ر. مینایی، س. مستوفی سرکاری، م.ح. ۱۳۸۵. طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیری پیوسته مقاومت مکانیکی خاک. چهارمین کنگره ملی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی. دانشگاه تبریز.
- Chambers, J.P. & Sabatier, J.M., (2002). Recent advances in utilizing acoustics to study surface roughness in agricultural surfaces. *Applied Acoustics*, 63, 795-812.
- Chung, S.O., Sudduth, K.A. & Hummel, J.W., (2006). Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *Trans. ASABE*, 49(1), 5-14.
- Chung, S.O., Sudduth, K.A., Motavalli, P.P. & Kitchen, N.R., (2004). Relating on-the-go-soil strength data to cone index. *ASAE Paper No. MC04205*. ASAE, St. Joseph, MI.
- Gorucu, S., Khalilian, A., Han, Y.J., Dodd, R.B. & Smith, B.R., (2006). An algorithm to determine the optimum tillage depth from soil penetrometer data in coastal plains soils. *App. Eng. Agric.* 22(5), 625-631.

- Grift, T.E., Tekeste, M.Z. & Raper, R.L., (2005). Acoustic compaction layer detection. *Trans of the ASAE*, 48(5), 1723–1730.
- Hamza, M.A. & W.K. Anderson. (2005). Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82, 121–145.
- Liu, W., Gaultney, L.D. & Morgan, M.T., (1993). Soil texture detection using acoustic methods. ASAE Paper No. 931015. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Lo, W.C., Yeh, C.L. & Jan, C.D., (2008). Effect of soil texture and excitation frequency on the propagation and attenuation of acoustic waves at saturated conditions. *J. Hydro.* 357, 270–281.
- Lo, W.C., Yeh, C.L. & Tsai, C.T., (2007). Effect of soil texture on the propagation and attenuation of acoustic wave at unsaturated conditions. *J. Hydro.* 338, 273– 284.
- Lu, Z., Hickey, C.J. & Sabatier, J.M., (2004). Effects of compaction on the acoustic velocity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 7–16.
- Mouazen, A.M. & Roman, H., (2006). Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture. *Soil Till. Res.* 86, 218–229.
- Nikbakht, A.M., Minaei, S. and Ghobadian, B. (2007). Study of Soil Mechanical Parameters using Horizontal Sensor. International Agricultural Engineering Conference (IAEC2007), Bangkok , Thailand.
- Oelze, M.L., Sabatier, J.M. & Raspert, R., (2003). Roughness measurements of soil surfaces by acoustic back scatter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(1), 241–250.
- Raper, R.L., Reeves, D.W., Shaw, J.N., van Santen, E. & Mask, P.L., (2007). Benefits of site-specific subsoiling for cotton production in Coastal Plain soils. *Soil Till. Res.* 96, 174–181.
- Sudduth, K.A., Chung, S.O., Andrade-Sanchez, p. & Upadhyaya, S.K., 2008. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *Comput. Electron. Agric.* 61(1), 20–31.