

## توسعه و ارزیابی مزرعه‌ای یک حسگر نیوماتیکی افقی مجهز به چند نازل برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت

منا طهماسبی<sup>۱\*</sup>، محمد گهری<sup>۲</sup>، احمد شریفی‌مالواجردی<sup>۳</sup> و ابوالفضل هدایتی‌پور<sup>۴</sup>

### چکیده

فشردگی خاک‌های کشاورزی محدودیت اصلی رشد ریشه گیاهان است و منجر به کاهش عملکرد اکثر محصولات زراعی می‌شود. تراکم خاک، ساختار خاک را تغییر می‌دهد و نفوذ آب و هوا را محدود می‌کند. نفوذسنج عمودی به شیوه‌ی رایج برای اندازه‌گیری مقاومت خاک استفاده می‌شود ولی بسیار وقت‌گیر، هزینه‌بر و طاقت‌فرساست که باعث ایجاد محدودیت استفاده از نفوذسنج‌های عمودی در پهنه‌بندی فشردگی خاک مزارع شده است. یکی از روش‌های معرفی شده در دهه گذشته روشی پیوسته و در حال حرکت برای تعیین لایه فشرده خاک است. هدف از این تحقیق، اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در لایه‌های فشرده مختلف با استفاده از یک حسگر نیوماتیکی افقی چند نازلی در حال حرکت بود. در ابتدا تنش ایجاد شده بر روی تیغه حسگر محاسبه و سپس ساقه حسگر مورد نظر در محیط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و تحلیل تنش شد. پس از طراحی، سه نازل مخروطی در سه عمق متفاوت (۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) برای تزریق جریان هوا به خاک بر روی حسگر نیوماتیکی نصب و مقاومت در برابر نفوذپذیری هوا به داخل خاک نیز به وسیله سه فشارسنج اندازه‌گیری شد. نتایج این حسگر با نتایج نفوذسنج عمودی استاندارد در طول مسیر موردنظر در سه تکرار ارزیابی و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که حسگر، توانایی نشان دادن تغییرات مقاومت مکانیکی خاک را در عمق‌های مختلف، حتی در مکان‌هایی که نفوذسنج عمودی امکان ورود در خاک را نداشت، دارد. رابطه معنی‌داری بین مقاومت به نفوذ هوا در خاک با مقاومت به نفوذ عمودی در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر به دست آمد ( $R^2=0.73$ ). مقدار مقاومت به نفوذ هوا در خاک با افزایش عمق افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** حسگر نیوماتیکی، لایه خاک فشرده، مقاومت خاک در برابر نفوذ هوا، نفوذپذیری هوا، مقاومت در برابر نفوذ عمودی.

**ارجاع:** طهماسبی م.، گهری م.، شریفی‌مالواجردی ا. و هدایتی‌پور ا. ۱۴۰۲. توسعه و ارزیابی مزرعه‌ای یک حسگر نیوماتیکی افقی مجهز به چند نازل برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک در حال حرکت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۷: ۱۰۱-۹۱.  
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14013.609>

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.  
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.  
۳- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.  
۴- مربی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران.

\* نویسنده مسئول: [tahmasebi.mona@gmail.com](mailto:tahmasebi.mona@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

## مقدمه

یک نفوذسنج افقی ساخته و روی یک تراکتور نصب شد. هدف از این کار دستیابی به روش دقیق‌تر، سریع‌تر و تلاش کم‌تر برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر نفوذ خاک و تولید نقشه‌های تراکم خاک برای لایه‌های عمقی مختلف خاک بود (Meselhy, 2020). این سامانه با موفقیت در شرایط مزرعه‌ای آزمایش شد و نتایج نشان داد که با افزایش سرعت رو به جلو از ۰/۵ به ۴/۵ کیلومتر بر ساعت، درصد نیروی کشش، میزان مصرف سوخت و ظرفیت مزرعه‌ای واقعی به ترتیب در حدود ۱۹۷، ۱۹۱ و ۶۱۰ درصد افزایش یافت.

(Horn (2002 گزارش داد که تنش‌های معمول و برشی تأثیر گسترده‌ای بر توزیع اندازه منافذ خاک، نفوذپذیری هوا و هدایت هیدرولیکی در حجم منافذ ثابت دارند. همچنین (Mosaddeghi et al., 2007) توصیه کردند که علاوه بر ویژگی‌های مربوط به تغییر شکل در اندازه‌گیری مقاومت فشردگی خاک، ویژگی‌های کیفی خاک بیشتری باید در نظر گرفته شود. در برخی پژوهش‌ها، آب به عنوان سیال در خاک با فشار وارد شده تا نفوذپذیری سیال را اندازه‌گیری و سپس تراکم خاک را تعیین کنند (Sakai et al., 2007; Hemmat et al., 1992). علاوه بر این، حسگرهای صوتی و نیوماتیکی متصل به ساقه خاک‌ورز برای تخمین فشردگی و تعیین بافت خاک استفاده می‌شود. حسگرهای نیوماتیکی بر اساس فشار مورد نیاز برای عبور جریان هوای معین از خاک کار می‌کنند. این حسگر شامل یک انژکتور هوا است که در تماس مستقیم با خاک قرار می‌گیرد و جریان هوا را به خاک تزریق و فشار مقاومت را با حفظ جریان ثابت اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه این حسگر را می‌توان برای تشخیص تغییرات در رطوبت، تراکم و بافت خاک توسعه داد، اما هنوز هیچ ابزار تجاری‌ای وجود ندارد (Tekeste et al., 2002; Clement & Stombaugh, 2000; Koostra & Stombaugh, 2003; Adamchuk et al., 2004). دستگاه ساخته شده در تحقیقات پیشین، فشردگی خاک را در یک عمق ثابت اندازه‌گیری می‌کرد زیرا از یک نازل برای تزریق هوا استفاده می‌شد. بنابراین، داشتن یک حسگر با نازل-حسگر چندگانه برای اندازه‌گیری نفوذپذیری هوا در خاک در لایه‌های مختلف، می‌تواند نقشه فشردگی خاک را در آن لایه‌ها ارائه دهد و به کشاورزان کمک کند تا از یک سامانه خاک‌ورزی دقیق در مزرعه‌ها استفاده کنند.

فشرده‌گی خاک یکی از مشکلات تولید محصولات کشاورزی در دنیاست. فشرده‌گی خاک رشد گیاه و نفوذ ریشه در خاک را کاهش داده و همچنین حرکت آب و هوا در خاک را محدود ساخته و در نتیجه باعث کاهش دریافت عناصر غذایی برای گیاه و خروج آهسته جوانه از خاک شده و در نهایت باعث کاهش عملکرد محصول می‌گردد. تراکم، یک مشکل فیزیکی حیاتی خاک است که ممکن است به دلیل فرآیند طبیعی مکرر تر و خشک شدن در یک مزرعه کشاورزی در طولانی مدت رخ دهد (Hillel, 1998). از سوی دیگر، فشرده‌گی خاک ممکن است به دلایل انسانی مانند کاربرد ماشین‌های سنگین کشاورزی و/یا انتخاب نامناسب عملیات خاک‌ورزی رخ دهد. از آنجایی که تراکم خاک یک نگرانی در تولید محصول و محیط زیست است، چندین رویکرد برای تعیین کمیت تراکم شامل اندازه‌گیری تخلخل، نفوذپذیری، چگالی ظاهری و استحکام خاک استفاده شده است (Canarache, 1991). در کشاورزی، تراکم خاک یک مسئله پیچیده است که دلیل آن می‌تواند اثرات متقابل عواملی مانند خاک، محصولات زراعی، آب و هوا و ماشین آلات باشد. با مدیریت صحیح و به کارگیری روش‌های اندازه‌گیری فشردگی خاک می‌توان این مشکل را به راحتی حل کرد. نفوذسنج عمودی به شیوه‌ی رایج برای اندازه‌گیری مقاومت خاک استفاده می‌شود (ASAE, 2002) اما بسیار وقت‌گیر، هزینه‌بر و طاقت‌فرساست و روشی عملی برای تعیین فشردگی خاک در مزارع وسیع نیست. از این رو نمی‌توان برای اندازه‌گیری‌های در حال حرکت از آن استفاده کرد (Chung et al., 2004). بر اساس این محدودیت، در دهه‌های گذشته روش پیوسته و در حال حرکت برای تعیین مقاومت خاک معرفی شده است و از روش‌های جایگزین مانند نیروسنج و کرنش‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری نیروهای وارد بر ابزار خاک‌ورزی استفاده نموده‌اند (Owen et al., 1987; Alihamsyah et al., 1990; Andrade et al., 2002; Chung et al., 2003; Verschoore et al., 2003; Adamchuk et al., 2003; Chung et al., 2004; Sharifi, 2004; Abbaspour-Gilandeh et al., 2005; Sharifi & Mohsenimanesh, 2012; Vernekar, 2015).

همانطور که ذکر شد یکی از سامانه‌های اندازه‌گیری در حال حرکت تراکم خاک، نفوذسنج افقی است. در تحقیقی

مگا پاسکال است. نیروی برش بر روی ابزار خاک‌ورزی، مثلی در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ساقه کاملاً به صورت عمودی در نظر گرفته شد (الگوبرداری از تحقیقات *Tekeste et al., 2002* و *Sharifi et al., 2004*) و ابعاد آن  $0.6 \times 0.1 \times 0.2$  متر بود (شکل ۱). اگر ضخامت تیغه  $t$  باشد ( $t=b$ )، نیروی معادل بر روی ساقه ( $w$ )  $4.5 \times 10^6 t$  نیوتن بر متر خواهد شد.

از آنجایی که توزیع این نیرو مثلی است (شکل ۱)، نیروی متمرکز معادل ( $F$ ) و گشتاور نیروی معادل فشار خاک حول نقطه انتهای ساقه ( $M$ ) به ترتیب از معادله (۱) و (۲) محاسبه گردید. همچنین تنش قائم ناشی از خمش با استفاده از معادله (۳) به دست آمد.

$$F = \frac{wL_1}{2} N \quad (1)$$

$$M = F \times \left( \frac{2L_1}{3} + L_2 \right) Nm \quad (2)$$

$$S = \frac{Mc}{I} = \frac{F \times \left( \frac{2L_1}{3} + L_2 \right) \times c}{\frac{bh^3}{12}} Pa \quad (3)$$

که در آن‌ها  $L_1$  عمق کار تیغه (متر)،  $L_2$  طول ساقه منهای عمق کار تیغه (متر)،  $S$  تنش قائم (پاسکال)،  $M$  گشتاور خمش (نیوتن‌متر)،  $I$  ممان اینرسی (متر به توان چهار) و  $c$  نصف پهنای ساقه (متر) است.

ساقه حسگر به صورت یک تیر مستطیل شکل در نظر گرفته شد و ممان اینرسی مقطعی از معادله  $I = \frac{bh^3}{12}$  به دست آمد.

تنش برشی بیشینه ( $t_{max}$ ) در محل اتصال ساقه به شاسی نیز از معادله (۴) محاسبه گردید:

$$t_{max} = \frac{VQ}{It} = \frac{3V}{2A} Pa \quad (4)$$

که در آن  $V$  نیروی برشی (نیوتن)،  $A$  سطح مقطع (مترمربع)،  $Q$  گشتاور اول سطح (مترمکعب)،  $I$  گشتار دوم سطح (متر به توان چهار) و  $t$  ضخامت ساقه (متر) هستند. بنابراین با استفاده از معادلات، تنش معمول و حداکثر تنش برشی به ترتیب  $2/4$  و  $15/2$  مگا پاسکال محاسبه شد. با توجه به معیار فون میسس، تنش معادل برابر با  $473/7$  مگا پاسکال بود. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان  $1/5$ ، تنش فون میسس کمتر از تنش تسلیم فولاد مورد نظر (SPK) است و تحمل نیروی خاک‌ورزی را داشته است.

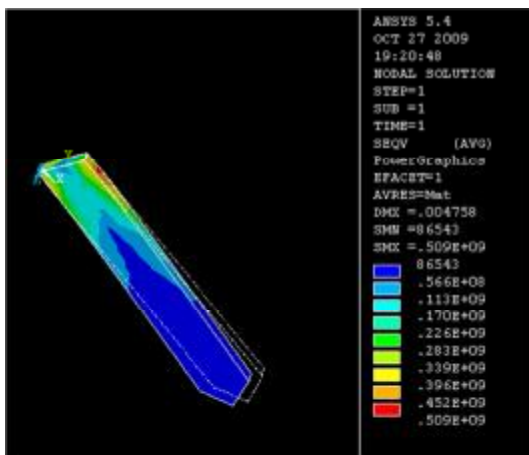
در واقع همان‌طور که بررسی نتایج تحقیقات محققان مشخص می‌کند، کشاورزی دقیق منجر به کاهش هزینه‌ها، وقت و استفاده کمتر از نهاده‌ها می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌ورزی دقیق عمق عملیات با توجه به تغییرپذیری مکانی مقاومت سخت لایه خاک تعیین می‌شود. بنابراین، امروزه اندازه‌گیری مقاومت خاک در اعماق چندگانه برای به کارگیری روش خاک‌ورزی با عمق متغیر در مکان‌های مختلف یک مزرعه مورد نیاز است. هدف اولیه این تحقیق، توسعه یک حسگر نیوماتیکی خاک بود که می‌تواند فشردگی خاک را به طور مداوم و به صورت افقی با استفاده از روش منحصر به فرد اندازه‌گیری نفوذپذیری هوا که سریع، دقیق، قابل حمل و آسان است، اندازه‌گیری کند. بنابراین آزمایش با اهداف زیر انجام شد.

- ساخت حسگر نیوماتیکی افقی چند نازلی و بررسی تغییرات نفوذپذیری هوای خاک در سه عمق مجزا به طور همزمان.

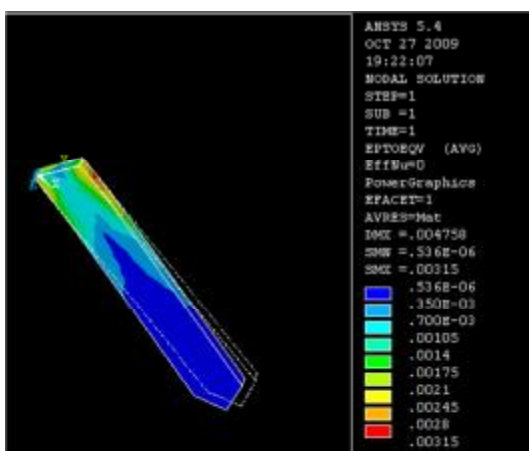
- ارزیابی عملکرد حسگر پیشنهادی نسبت به یک نفوذسنج مخروطی استاندارد عمودی در محل.

## مواد و روش‌ها

برای دستیابی به هدف تحقیق، یک حسگر نیوماتیکی افقی طراحی و ساخته شد که بتواند تغییرات مقاومت مکانیکی خاک را در عمق‌های مختلف خاک تخمین بزند. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت خاک (حسگر نیوماتیکی)، یک خاک‌ورز مجهز به سه نازل هوا در سه عمق متفاوت (حداکثر ۴۵ سانتی‌متر) بود. نازل‌های هوا به طور پیوسته هوا را در خاک تزریق می‌کردند و مقاومت در برابر نفوذپذیری هوا به داخل خاک به وسیله سه فشارسنج اندازه‌گیری و براساس آن مقاومت مکانیکی خاک در لایه‌های مختلف تخمین زده شد. در مرحله اول، طراحی یک ساختار مقاوم برای ساقه حسگر بسیار مهم است و بنابراین محاسبات ریاضی برای طراحی یک ساقه انجام شد. بر اساس تحقیقات قبلی (Campbell & O'Sullivan, 1991; Adamchuk et al., 2001)، از آنجایی که فشار خاک بر روی تیغه به ازای هر  $10$  سانتی‌متر عمق نفوذ در خاک برابر  $1$  مگا پاسکال است و با توجه به در نظر گرفتن عمق  $45$  سانتی‌متر جهت بیشینه عمق کار حسگر و طبق رابطه تشابه مثلث‌ها، فشار وارد بر ساقه، معادل  $4/5$



الف

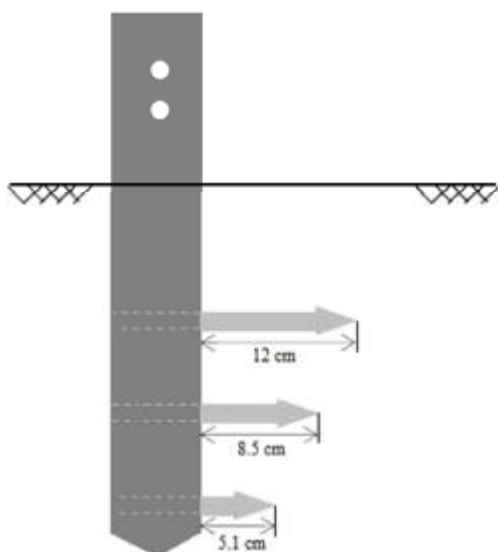


ب

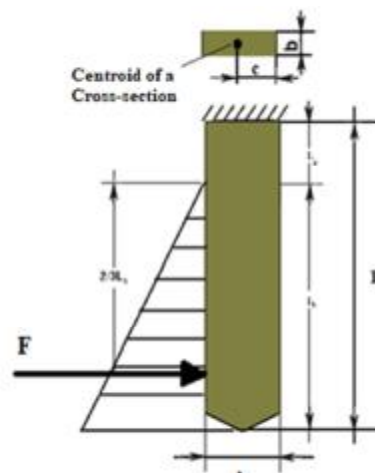
شکل ۲- الف) تنش‌ها و ب) کرنش‌های ایجاد شده روی ساقه در نرم‌افزار ANSYS

سپس ساقه حسگر در نرم‌افزار ANSYS 5.1 مدل‌سازی و پس از تعیین نیرو و اعمال شرایط مرزی تحلیل انجام شد و تنش‌ها و کرنش‌ها براساس معیار فون میسیس به دست آمد (شکل ۲). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود حداکثر تنش ۵۰۹ مگاپاسکال و کمتر از تنش تسلیم فولاد بود.

یک نما از ساقه حسگر شامل نازل-حسگرها در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سه نازل با قطر ۰/۱ متر در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری روی حسگر نیوماتیکی نصب گردید. با توجه به اینکه ناحیه گسیختگی خاک در جلوی تیغه باریک به صورت یک تابع نمایی از نوک تیغه به سطح خاک گسترش می‌یابد، آرایش نازل‌ها براساس پژوهش‌های Sharifi & Mohsenimanesh, 2012; Chung et al., (2004) به گونه‌ای پیشنهاد شد که گسیختگی خاک حاصل از نوک نازل‌ها همپوشانی نداشته باشند. براساس تحقیقات ذکر شده و با توجه به زودتر حس شدن لایه‌های خاک توسط نوک نازل بالایی و عدم تداخل نوک نازل پایینی با نوک نازل بالایی و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر، مقدار ۵/۱ سانتی‌متر برای نوک پایین‌ترین نازل در نظر گرفته شد. طول ساقه دو نازل دیگر به طور خطی با کاهش عمق کار افزایش یافت و از بالا به پایین به ترتیب ۱۲، ۸/۵ و ۵/۱ سانتی‌متر بود (شکل ۳).



شکل ۳- نمای آرایش نوک نازل‌ها (بدون در نظر گرفتن مقیاس)



شکل ۱- نمای شماتیک ساقه حسگر و نیروی معادل خاک (F) بر آن (در مقیاس نیست)



شکل ۴- نمایی از حسگر نیوماتیکی پس از نصب بر روی تراکتور و آماده آزمون شامل (۱) شاسی و ساقه حسگر، (۲) نازل‌ها



شکل ۵- اتصال موتور هیدرولیک به پمپ هوا و مخزن فشار، تجهیزات شامل (۱) پمپ هوا، (۲) موتور هیدرولیکی و (۳) مخزن

تجهیزات شامل پمپ هوا، موتور هیدرولیکی، مخزن و کلیدهای حساس به فشار روی شاسی پشت تراکتور نصب شد. پمپ با یک اتصال به موتور هیدرولیکی (سری BMR/OMR) متصل شد تا نیروی خود را از پمپ کمکی هیدرولیک خروجی تراکتور تأمین کند. پمپ به این روش دبی موردنظر را تولید می‌کند و به یک مخزن پیش فشار می‌فرستد (شکل ۵). از یک مخزن فشار با ظرفیت ۸ لیتر جهت انباشتن هوای ایجاد شده توسط پمپ استفاده شد. خروجی هوای مخزن به سه فشارسنج برای سه عمق موردنظر متصل گردید تا به‌طور هم‌زمان هوا وارد سه نازل شود. میزان فشار هوا در سه نازل و در نتیجه مقاومت به نفوذ هوا در خاک از روی سه فشارسنج به‌طور هم‌زمان توسط کاربر ثبت می‌گردید. در شکل ۶ نمای مدار نیوماتیکی به‌طور نشان داده شده است.

از آنجایی‌که نازل‌های حسگر، جریان هوا را به لایه‌های خاک تزریق می‌کنند تا نفوذ آن را اندازه‌گیری کنند، سرعت جریان هوا و اندازه روزنه عوامل اصلی هستند که باید از طریق طراحی نازل-حسگر تعیین شوند. محاسبه نرخ جریان هوا ضروری است زیرا دبی بسیار بالا، باعث اختلاط بیش از حد خاک در حال اندازه‌گیری می‌شود و دبی بسیار کم، محدوده پاسخ فشار مناسبی را ارائه نمی‌دهد (Koostra & Stombaugh, 2003). فشار بیشینه در نازل‌ها برابر مقاومت مکانیکی بیشینه در خاک است. از آنجایی‌که براساس شاخص نفوذ مخروطی، مقدار بیشتر از ۲ مگاپاسکال نشان دهنده سختی لایه است. همچنین با توجه به نمودارهای ارائه شده در پژوهش‌های پیشین (Clement, 2000; Koostra & Stombaugh, 2003)، بیشینه فشار ایجاد شده (در زمانی‌که شاخص مخروطی در شرایط مختلف ۲ تا ۴ مگاپاسکال به دست آمده بود) در نازل و لوله‌های انتقال هوا به‌طور میانگین حداکثر ۶۰ پوند بر اینچ مربع بود. با توجه به اینکه فشردگی خاک‌های ایران نسبت به خاک‌های اروپا بیشتر است، ضریب اطمینان ۵ در محاسبات در نظر گرفته شد. از این رو دبی مورد نظر در لوله‌های تخلیه از معادله (۵) به دست آمد (Streeter & Benjamin, 1962):

$$Q = 28.9 D^2 \sqrt{\Delta P} \quad (5)$$

که در آن  $D$  قطر سطح مقطع نازل (اینچ)،  $P$  فشار هوای تزریق شده (مگاپاسکال) و  $Q$  دبی هوا (گرم بر دقیقه) است. بر این اساس که قطر نازل ۱ میلی‌متر بود دبی ۶/۳۴ گرم بر دقیقه محاسبه شد.

در مرحله دوم حسگر نیوماتیکی موردنظر ساخته شد که در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. اجزای اصلی سامانه حسگر شامل (۱) شاسی و ساقه حسگر، (۲) نازل‌ها، (۳) پمپ هوا (۴) موتور هیدرولیکی، (۵) مخزن، (۶) اتصال مکانیکی پمپ به موتور، (۷) فشارسنج و (۸) لوله و اتصالات نیوماتیکی بودند. سه نازل به قطر ۱۰ میلی‌متر، در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر بر روی تیغه حسگر برای تزریق جریان هوا به خاک نصب شد و مقاومت در برابر نفوذپذیری هوا به داخل خاک با فشارسنج اندازه‌گیری شد. حسگر در جلوی تراکتور (ITM 399) با شاسی که برای نگه داشتن آن طراحی شده بود، نصب شد (شکل ۴).

بین مقادیر شاخص مخروطی و فشار نفوذ هوا در خاک نیز توسط حسگر انجام گرفت. با توجه به آن‌که پایین‌تر از عمق ۳۰ سانتی‌متر سختی خاک مزرعه بالا بود و همچنین دستگاه نفوذسنج مورد استفاده محدودیت اندازه‌گیری داشت، بنابراین مقاومت به نفوذ در عمق ۴۵ سانتی‌متر حدنهایی عدد بر روی صفحه مدرج (معادل ۱۰۰۰ نیوتن) در نظر گرفته شد.



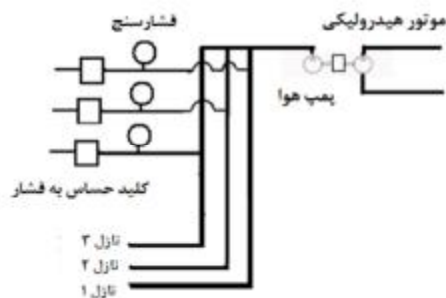
شکل ۷- نفوذسنج عمودی مدل Hand penetrometer Eijkelkamp

### نتایج و بحث

مقایسه مقدار فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک (نتایج به دست آمده از حسگر نیوماتیکی) با مقادیر شاخص مخروطی در هر یک از عمق‌های ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر و ۳۰ تا ۴۵ سانتی‌متر در شکل‌های ۸-الف تا ۸-ج نشان داده شده است.

شکل ۸-الف تغییر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک را با مسافت طی شده توسط حسگر نیوماتیکی در عمق ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در هر سه قسمت (۰-۱۵ سانتی‌متر، ۱۵-۳۰ سانتی‌متر و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر) روند تغییرات فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک، مشابه روند تغییرات شاخص مخروطی است. نکته قابل توجه این است که در قسمت اول (۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) همگرایی بین اعداد تغییرات فشار هوا لازم برای نفوذ در خاک با شاخص مخروطی در مقایسه با قسمت دوم و سوم کمتر است.

در شکل ۸-ب مقایسه تغییر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و شاخص مخروطی برحسب مسافت طی شده در عمق ۳۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همانند عمق ۱۵ سانتی‌متر در قسمت‌های دوم (۱۵-۳۰ سانتی‌متر) و سوم (۳۰-۴۵ سانتی‌متر) نسبت به قسمت اول (۰-۱۵ سانتی‌متر) انطباق بیشتری در روند تغییرات فشار هوا با



شکل ۶- مدار پنوماتیک حسگر نیوماتیکی شامل موتور هیدرولیکی؛ پمپ هوا؛ فشارسنج و کلیدهای حساس به فشار

به منظور ارزیابی حسگر نیوماتیکی، آزمایش‌ها در قطعه منتخب مزرعه‌ای در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، ایران انجام شد. طول ۹۰ متر در مزرعه برای قطعه اصلی انتخاب که به سه قطعه فرعی به طول ۳۰ متر تقسیم گردید تا هر ۳۰ متر به عنوان یک تکرار در نظر گرفته شود. بافت خاک مزرعه مورد آزمایش لومی رسی بود و اندازه‌گیری رطوبت و جرم مخصوص در سه عمق و سه تکرار موردنظر انجام و رطوبت خاک به روش وزنی (براساس وزن خشک) اندازه‌گیری شد. نمونه‌گیری جهت تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک نیز از عمق‌های مذکور به وسیله استوانه استاندارد نمونه‌گیری انجام و براساس وزن خشک محاسبه گردید. مقادیر میانگین در جدول ۱ آورده شده است. پس از آن‌که رطوبت خاک برای انجام آزمایش مناسب تشخیص داده شد، آزمایش دستگاه اجرا گردید.

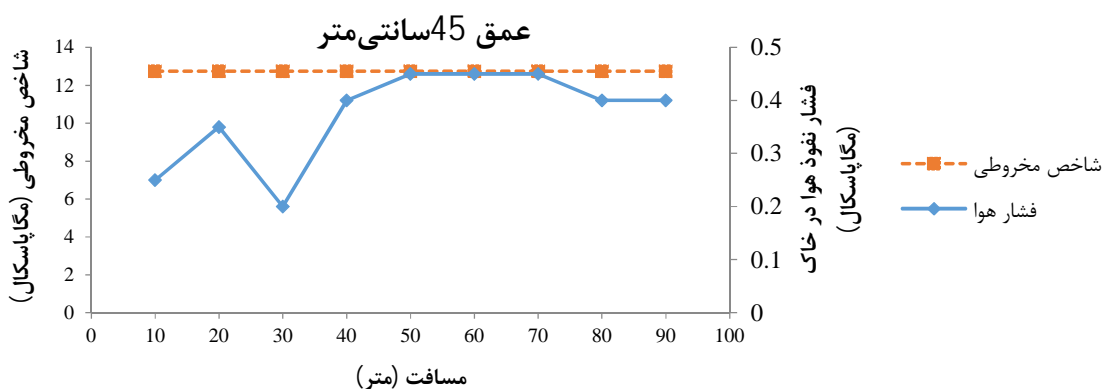
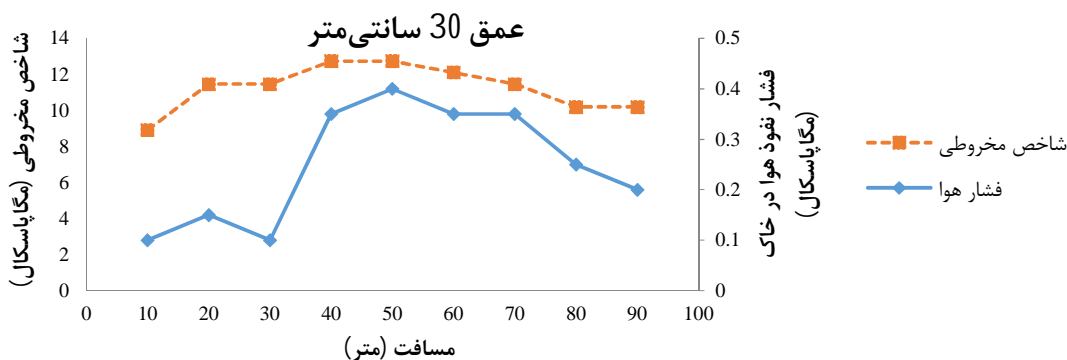
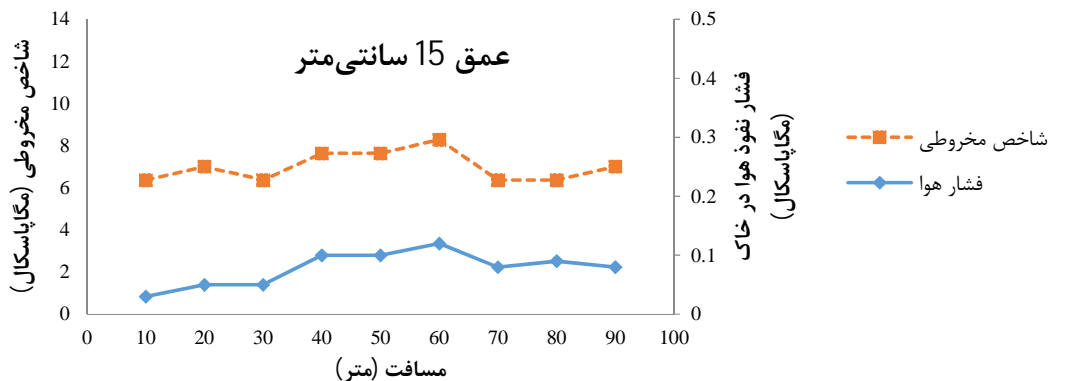
جدول ۱- برخی از خصوصیات خاک مانند رطوبت و چگالی

ظاهری			
عمق (متر)	۱۵-۰	۱۵-۳۰	۳۰-۴۵
محتوای رطوبتی (درصد)	۵/۴۲	۶/۶۸	۲/۷۵
چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	۱/۵۵	۱/۶۳	۱/۵۹

جهت تعیین دقت اندازه‌گیری و عمل نمودن دقیق دستگاه حسگر نیوماتیکی در عمق‌های مختلف موردنظر و در همان شرایط رطوبتی ذکر شده در بالا، از نفوذسنج عمودی مدل Hand penetrometer Eijkelkamp (Eijkelkamp North America Inc.) با به‌کارگیری مخروط شماره ۱ با قطر ۱ سانتی‌متر و زاویه رأس مخروط ۶۰ درجه استفاده شد و تا عمق ۴۵ سانتی‌متر در ۹ نقطه (هر قطعه ۳ نقطه به فاصله ۱۰ متر) نزدیک به مسیر حرکت، مقاومت به نفوذ عمودی اندازه‌گیری شد. واسنجی

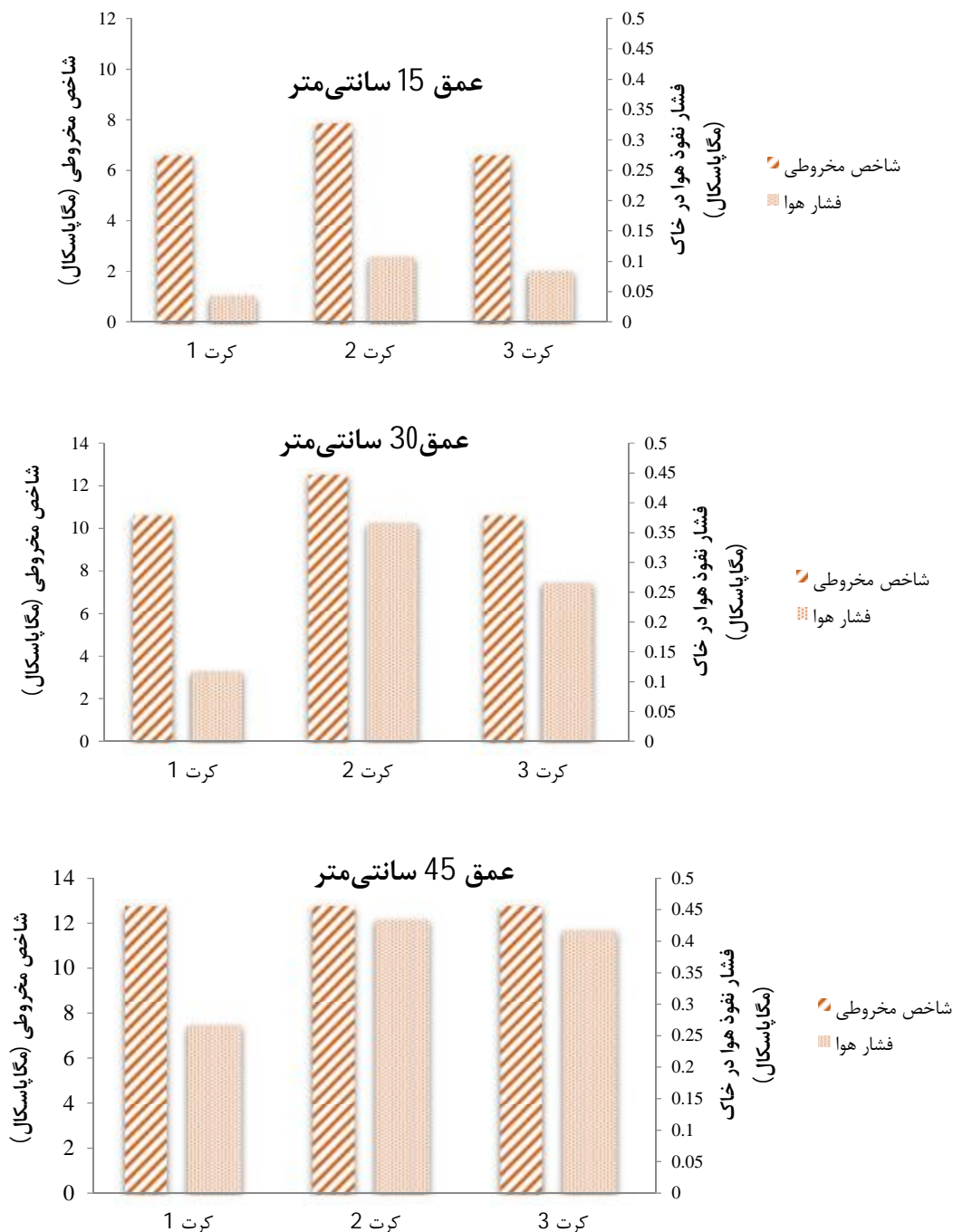
عمودی (۱۰۰۰ نیوتن) برای تمام نقاط در نظر گرفته شد و لذا نمودار به صورت خط مستقیم ترسیم شد و مقایسه موردنظر میسر نشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است حسگر نیوماتیکی تغییر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک را با روندی مشابه عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر ثبت کرده است.

شاخص مخروطی مشهود است. در شکل ۸-ج هدف نشان دادن مقایسه تغییر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و شاخص مخروطی برحسب مسافت طی شده در عمق ۴۵ سانتی‌متر موردنظر بوده است اما از آنجا که در این عمق لایه خاک بسیار سخت و مقاومت عمودی خاک بیشتر از ۱۰۰۰ نیوتن بود پس بیشینه عدد بر روی صفحه نفوذسنج



شکل ۸- تغییر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک برحسب مسافت طی شده در عمق‌های ۱۵ سانتی‌متر، ۳۰ سانتی‌متر و ۴۵ سانتی‌متر میانگین فشار هوا و شاخص مخروطی در عمق‌های مختلف نشان داد که در همه عمق‌ها روند تغییرات مقادیر با یکدیگر مشابه هستند.

برای مقایسه و درک بهتر، میانگین مقادیر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و شاخص مخروطی در هر قسمت و هر سه عمق مورد نظر به دست آمد و به صورت نمودار میله‌ای ترسیم (شکل ۹-الف تا ۹-ج) شد. مقایسه مقادیر

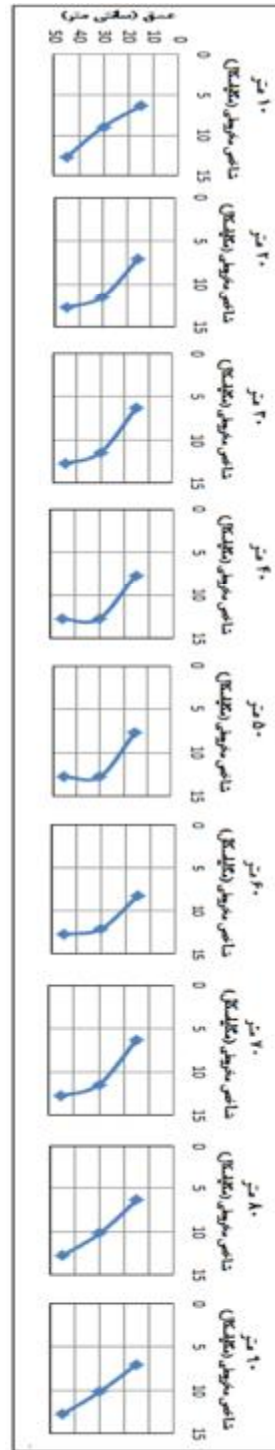


شکل ۹- میانگین مقادیر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و شاخص مخروطی در هر قسمت سه‌گانه در عمق‌های پیشنهادی ۱۵ سانتی‌متر، ۳۰ سانتی‌متر و ۴۵ سانتی‌متر

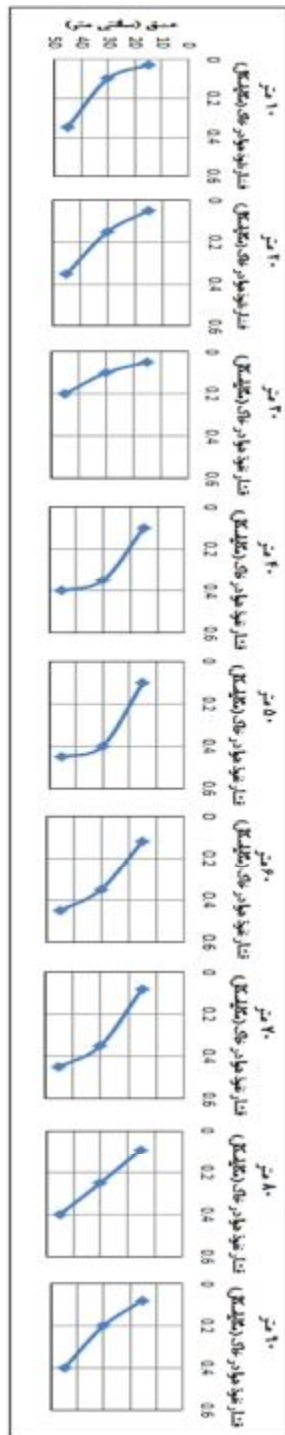
ترسیم و نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد روند افزایش مقاومت مکانیکی خاک توسط هر دو سامانه از عمق ۱۵ تا ۴۵ سانتی‌متری در هر نقطه اندازه‌گیری مشابه یکدیگر بوده است.

برای مقایسه بهتر تفاوت و شباهت‌های داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سامانه موردنظر با داده‌های شاخص مخروطی استاندارد خاک، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقدار فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و شاخص مخروطی در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر





شکل ۱۰- مقادیر شناختی مخروطی بر حسب عمق در طول مسیر آزمایش



شکل ۱۱- مقادیر فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک بر حسب عمق در طول مسیر آزمایش

رابطه بین فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و مقاومت عمودی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری با ضریب تعیین معنی‌دار  $R^2=0/73$  به دست آمد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از آنجایی‌که در عمق ۴۵ سانتی‌متری داده‌های نفوذسنج به بیشینه خود رسیده و تغییراتی را نشان نمی‌داد و لذا قابل استناد و مقایسه نبود،

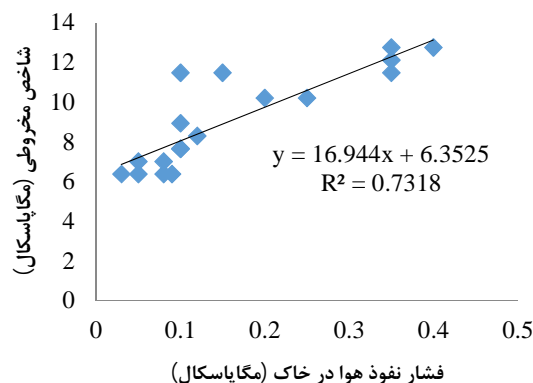
در این رابطه همبستگی نقاط مربوط به این عمق حذف شد. در حقیقت رابطه بین فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و مقاومت عمودی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری باتوجه به معنی‌دار بودن آن، از نظر کاربردی حائز اهمیت است، چرا که به وسیله آن می‌توان با داشتن فشارهوای

مقاومت مکانیکی خاک مزارع را در عمق‌های مختلف تهیه کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد برای به دست آوردن نقشه تراکم خاک، مطالعاتی در شرایط آزمایشگاهی انجام شود تا رابطه بین یک شاخص تراکم خاک مانند چگالی ظاهری یا چگالی نسبی خاک با عواملی مانند اندازه‌بندی ذرات و میزان رطوبت بررسی گردد.

#### منابع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Reza, A., Alireza, K., & Sadati, S. H. (2005). Energy savings with variable-depth tillage. In *Proceedings of the 27th Southern Conservation Tillage Systems Conference, Florence, South Carolina, USA, 27-29 June, 2005* (pp. 84-91). North Carolina Agricultural Research Service, North Carolina State University.
- Adamchuk, V. I., Morgan, M. T., & Sumali, H. (2001). Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *Transactions of the ASAE*, 44(6): 1377-1383.
- Adamchuk, V. I., Skotnikov, A. V., Speichinger, J. D., & Kocher, M. F. (2003). Instrumentation system for variable depth tillage. In *2003 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1): 71-91.
- Alihamsyah, T., Humphries, E. G., & Bowers, C. G. (1990). A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. *Transactions of the ASAE*, 33(1): 73-77.
- Andrade, P., Rosa, U., Upadhyaya, S., Jenkins, B., Agueria, J., & Josiah, M. (1998). Soil profile force measurements using an instrumented tine. Paper No. 01-1060. In *2001 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Andrade, P., Upadhyaya, S. K., Jenkins, B. M., & S Filho, A. G. (2002). Evaluation of the UC Davis compaction profile sensor. Paper No. 02-1185. In *2002 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- ASAE Standards, 49th ed., (2002). S313.2. Soil Cone Penetrometer. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Campbell, D. J., & O'Sullivan, M. F. (1991). The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. *IN:*

لازم برای نفوذ در خاک به تخمینی از شاخص مخروطی رسید. نتایج نشان داد که حسگر نیوماتیکی توانایی نشان دادن فشردگی‌های متفاوت را در عمق‌های مختلف، حتی در مکان‌هایی که نفوذسنج عمودی امکان ورود در خاک را نداشت، دارد. زیرا امکان سنجش مقاومت به نفوذ عمودی به وسیله نفوذسنج عمودی در عمق‌های بالا در خاک با میزان رطوبت کم و مناسب برای عملیات زیرشکنی وجود نداشت. همچنین مقدار مقاومت به نفوذ با افزایش عمق افزایش یافت که با نتایج تحقیقات پژوهشگران دیگر هم‌خوانی داشت (Sharifi & Mohsenimanesh, 2012; Gohari et al., 2010; Gohari & Hemmat, 2007; Andrade, 2001).



شکل ۱۲- رابطه بین فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و مقاومت عمودی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

#### نتیجه‌گیری

از آنجا که تعیین لایه تراکم خاک در مدیریت آن مهم است، یک حسگر نیوماتیکی در حال حرکت جهت دمش هوا به درون خاک و اندازه‌گیری میزان مقاومت به نفوذ هوا در خاک طراحی و ساخته شد. حسگر شامل یک تیغه زیرشکن با سه نازل در سه عمق ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری بود. مقاومت به نفوذ هوا در خاک توسط سه فشارسنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. نتایج نشان داد که امکان اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک توسط میزان مقاومت به نفوذ هوا در خاک به وسیله حسگر نیوماتیکی به صورت پیوسته در سه عمق موردنظر وجود دارد. مقدار مقاومت به نفوذ هوا در خاک با افزایش عمق افزایش یافت. بین فشار هوای لازم برای نفوذ در خاک و مقاومت عمودی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر رابطه معنی‌داری وجود داشت. با استفاده از این حسگر می‌توان نقشه

- Meselhy, A. A. (2020). Evaluation of locally made horizontal penetrometer to measure soil compaction under Egyptian conditions. *Bioscience Research*, 17(3): 2331-2357.
- Mosaddeghi, M. R., Koolen, A. J., Hajabbasi, M. A., Hemmat, A., & Keller, T. (2007). Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Engineering*, 98(1): 90-101.
- Owen, G. T., Drummond, H., Cobb, L., & Godwin, R. J. (1987). An instrumentation system for deep tillage research. *Transactions of the ASAE*, 30(6): 1578-1582.
- Sakai, K., Upadhyaya, S. K., & Sime, M. (1992). Variability of a double ring infiltration test. *Transactions of the ASAE*, 35(4): 1221-1226.
- Sharifi, Malvajerdi, A. S. (2004). *Development of a soil compaction profile sensor* (Doctoral dissertation, Cranfield University, UK).
- Sharifi, A., & Mohsenimanesh, A. (2012). Soil mechanical resistance measurement by a unique multi-cone tips horizontal sensor. *International Agrophysics*, 26(1): 61-64.
- Streeter, V. L., & Benjamin, W.E. (1962). *Fluid Mechanics McGraw-Hill. Inc., New York, NY.*
- Tekeste, M. Z., Grift, T. E., & Raper, R. L. (2002). Acoustic compaction layer detection. Paper No. 02-1089. In *2002 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Vernekar, S. R. (2015). *Design and Development of Smart Soil Monitoring System Based on Embedded Technology* (Doctoral dissertation, Goa University).
- Verschoore, R., Pieters, J. G., Seps, T., Spriet, Y., & Vangeyte, J. (2003). Development of a sensor for continuous soil resistance measurement. *Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands*, 689-695.
- Soil Analysis: Physical Methods. Marcel Dekker, Inc., New York, NY. 1991. p 399-429, 10 fig, 1 tab, 82 ref.*
- Canarache, A. (1991). Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19(2-3): 145-164.
- Clement, B. R. (2000). *Development of a continuously measuring soil compaction sensor* (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- Chung, S. O., Sudduth, K. A., Plouffe, C., & Kitchen, N. R. (2004). Evaluation of an on-the-go soil strength profile sensor using soil bin and field data. Paper No. 041039. In *2004 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Chung, S. O., Sudduth, K. A., & Hummel, J. W. (2003). On-the-go soil strength profile sensor using a load cell array. Paper No. 03-1071. In *2003 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Clement, B. R., & Stombaugh, T. S. (2000). Continuously-measuring soil compaction sensor development. *Continuously-measuring soil compaction sensor development.*, 1-15.
- Gohari, M., & Hemmat, A. (2007). A tractor-mounted soil cone penetrometer for mapping spatial variability of soil strength. *New Finding in Agriculture*, 1(3(Spring 2007)): 233-240.
- Gohari, M., Hemmat, A., & Afzal, A. (2010). Design, construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 41(1).
- Hemmat, A., Ahmadi, I., & Masoumi, A. (2007). Water infiltration and clod size distribution as influenced by ploughshare type, soil water content and ploughing depth. *Biosystems engineering*, 97(2): 257-266.
- Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.
- Horn, R. (2002). Stress strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. In *17. World congress of soil science, Bangkok (Thailand): 14-21 Aug 2002.*
- Koostra, B. K., & Stombaugh, T. S. (2003). Development and evaluation of a sensor to continuously measure air permeability of soil. In *2003 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

