

Design, Development and Static Evaluation of Soil Moisture Capacitance Sensor Mountable on Multiple-tip Horizontal Penetrometer

SEYED MATIN MORTAZAVI¹, ABBAS HEMMAT^{2*}, SEYED AHMAD MIREEI³, MOJTABA NADERI-BOLDAJI⁴

1. Graduated MSc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(Received: Nov. 4, 2017- Revised: Dec. 31, 2017- Accepted: Feb. 18, 2018)

ABSTRACT

In this study, a two-ring capacitive sensor mountable on multiple-tip horizontal penetrometers has been developed. The size and shape of the electric field around the sensor was estimated to ensure that the sensor fields are not interfered with the adjacent probes of the multiple-tip penetrometer using finite element. The sensor function was then evaluated at different levels of volumetric moisture. The maximum radius of the soil located in the sensor's electric field is 30 mm in the wetted soil. So the usage of the sensor in combination with the penetrometers at distance of 10 cm from each other would not cause the interference of the electric fields of the sensors. Increasing volumetric moisture reduces the output voltage of sensor ($R^2=0.91$). The developed capacitive sensor is a suitable device for measuring soil moisture in the range of 0-PL which can be used to measure simultaneously resistance and soil moisture in several depths independently in combination with multiple-tip horizontal penetrometers.

Keywords: Soil Dielectric Constant, Capacitance Sensor, Volumetric Moisture, Finite Element

طراحی، ساخت و آزمون استاتیکی حسگر خازنی رطوبت‌سنج خاک قابل نصب روی فروسنج افقی چندنوک

سیدمتین مرتضوی^۱، عباس همت^{۲*}، سیداحمد میرهای^۳، مجتبی نادری بلداجی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹)

چکیده

در این پژوهش یک حسگر خازنی دوحلقه‌ای قابل نصب روی فروسنج‌های افقی چندنوک طراحی و ساخته شد. اندازه و شکل میدان الکتریکی اطراف حسگر با هدف مطمئن شدن از عدم تداخل میدان‌های حسگرهای نصب‌شده روی دو پراب فروسنج با استفاده از المان محدود تخمین زده شد. سپس، عملکرد حسگر در سطوح مختلف رطوبت حجمی ارزیابی گردید. بیشترین شعاع خاکی که در میدان الکتریکی حسگر قرار می‌گیرد، در خاک کاملاً مرطوب برابر با ۳۰ میلی‌متر از مرکز آن است؛ لذا، بکارگیری حسگر در ترکیب با فروسنج‌هایی که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند، موجب تداخل میدان الکتریکی حسگرها نمی‌شود. افزایش رطوبت حجمی، موجب کاهش ولتاژ خروجی حسگر ($R^2=0/91$) می‌شود. حسگر خازنی ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در محدوده صفر تا حد اشباع است که می‌تواند در ترکیب با فروسنج افقی چندنوک، به وسیله‌ای برای اندازه‌گیری همزمان مقاومت و رطوبت خاک در چند عمق به‌طور مستقل مبدل شود.

واژه‌های کلیدی: ثابت دی‌الکتریک خاک، حسگر خازنی، رطوبت حجمی، المان محدود.

مقدمه

چالش اصلی در استفاده از فروسنج‌های افقی به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری درحین حرکت مقاومت مکانیکی خاک، دخیل بودن همزمان چندین ویژگی خاک روی اندازه‌گیری‌های انجام شده است (Adamchuk *et al.*, 2008). در بین این ویژگی‌ها، محتوای رطوبتی خاک تأثیر معنی داری بر مقاومت مکانیکی آن دارد، به طوری که اندازه‌گیری سریع رطوبت خاک همزمان با مقاومت آن به منظور تمیز دادن اثر رطوبت از تراکم یکی از دغدغه‌های پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است (Sun *et al.*, 2003; Hummel *et al.*, 2004; Rahnama, 2012; Naderi-Boldaji *et al.*, 2012).

به طور کلی در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری، پاسخ دهی سریع، قیمت ارزان و دوام بالای حسگرهای الکتریکی و الکترومغناطیسی، آن‌ها را به در دسترس ترین فناوری برای اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، از جمله محتوای رطوبت خاک، تبدیل کرده است. وقتی خاک به عنوان بخشی از یک مدار الکترونیکی در نظر گرفته می‌شود، ویژگی‌های آن روی رفتار مدار و در نتیجه پارامتر مورد اندازه‌گیری مدار تأثیر می‌گذارد (Adamchuk *et al.*, 2004). در بین این ویژگی‌ها، از مدت‌ها پیش تشخیص داده شد که ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک یک ویژگی مهم برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت آن است و تغییر در مقدار آن ناشی از تغییر رطوبت حجمی خاک است (Huan *et al.*, 2017). دلیل این امر آن است که، برای فرکانس‌های زیر هزار مگا هرتز، مقدار ثابت دی‌الکتریک برای آب خالص (برابر با ۸۰) بسیار بیشتر از مقدار آن برای هوا و ذرات جامد خاک (به ترتیب برابر با ۱ و ۴) است (Ledieu *et al.*, 1986). امروزه در علوم خاک، زراعت و سیستم‌های آبیاری، استفاده از ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی آن روشی با محبوبیت بالا و درعین حال حساسیت مناسب نسبت به تغییرات کوچک محتوای رطوبت خاک محسوب می‌گردد (Dean *et al.*, 1987; Campbell & Anderson, 1998; Adamchuk *et al.*, 2004; Noborio *et al.*, 2017). به عنوان مثال، Gaskin & Miller (1996) عنوان کردند که مقاومت معادل خازنی که از خاک به عنوان واسط دی‌الکتریک استفاده می‌کند به صورت معنی داری به محتوای رطوبت خاک بستگی دارد. لذا زمانی که این خازن در ترکیب با یک اسپلاتور تشکیل یک مدار الکترونیکی دهند، هرگونه تغییر در محتوای رطوبت خاک از طریق دامنه ولتاژ بازتاب شده در طول کابل کواکسیال قابل شناسایی خواهد بود. به هر حال، حسگرهایی که از ثابت

دی‌الکتریک ظاهری خاک برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌کنند، در مقایسه با روش طیف سنجی مادون قرمز (NIR)، دارای قیمت ارزان، پاسخ دهی سریع و مناسب برای اندازه‌گیری‌های برخط (On-line)/آنی و قابلیت استفاده در انواع ابعاد و با اشکال هندسی متفاوت هستند (Sun *et al.*, 2006). از جمله روش‌های مبتنی بر ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک، روش خازنی است. در روش خازنی، خاک به عنوان تمام یا بخشی از واسط دی‌الکتریک یک خازن در نظر گرفته می‌شود (Roth *et al.*, 1990). در مقایسه با روش بازتاب‌سنجی حوزه زمان (TDR)، روش خازنی دارای مزایایی از قبیل صحت بالا بعد از انجام واسنجی، امکان به‌کارگیری در سطوح بالای شوری خاک، قدرت تشخیص بالاتر، قابلیت اتصال به داده نگارهای متداول، انعطاف‌پذیری در طراحی شکل هندسی (Naderi-Boldaji *et al.*, 2012) و همچنین پاسخگویی سریع، قیمت ارزان و ساختار مقاوم است (Sun *et al.*, 2006). از طرفی ناحیه تحت تأثیر نسبتاً کوچک، الزام در ایجاد تماس کافی بین خاک و حسگر برای اندازه‌گیری‌های مطمئن‌تر و تأثیرپذیری از دما، تراکم خاک، محتوای رُس و تخلخل، از محدودیت‌های به‌کارگیری این روش هستند (Naderi-Boldaji *et al.*, 2011).

(Sun *et al.*, 2003) یک فروسنج عمودی ترکیبی را به منظور فراهم آوردن همزمان جفت سیگنال‌هایی که نسبت به تغییرات مقاومت مکانیکی خاک و ثابت دی‌الکتریک خاک حساس باشد طراحی و ساختند. آن‌ها ابعاد حسگر اندازه‌گیر شاخص مخروط را بر اساس استاندارد ASAE1996 در نظر گرفته و مقدار نیروی لازم جهت نفوذ عمودی حسگر ترکیبی به خاک را توسط یک بارسنج با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن اندازه گرفتند. آن‌ها از نوک مخروطی شکل و یک حلقه از جنس برنج که توسط یک عایق از نوک مخروطی جدا می‌شد به عنوان الکترودهای حسگر خازنی استفاده کرده و تغییرات رطوبت خاک را با تغییر در امپدانس حسگر خازنی واسنجی کردند. ارزیابی این حسگر حاکی از وجود یک رابطه معنی دار بین خروجی حسگر و تغییرات رطوبت حجمی ($R^2=0.93$) بود. در پژوهش بعدی، Sun *et al.* (2006) یک فروسنج افقی تک‌نوکی ترکیبی برای اندازه‌گیری در حین حرکت مقاومت مکانیکی خاک به صورت ساق مینا، و اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش خازنی، طراحی و ساختند. نتایج ارزیابی‌های مزرعه‌ای آن‌ها حاکی از پاسخگویی دینامیکی مناسب حسگر خازنی به تغییرات رطوبت خاک و بی تأثیر بودن سرعت پیشروی بر داده‌های آن بود. (Naderi-Boldaji *et al.*, 2011) یک فروسنج افقی

است. این در حالی است که در صورت عدم تداخل، امکان بررسی و تعیین رابطه بین تغییرپذیری در مقاومت مکانیکی خاک با تغییر محتوای رطوبت خاک به منظور پیش‌بینی وضعیت تراکم خاک فراهم می‌شود. لذا اهداف پژوهش حاضر عبارت بودند از: الف) طراحی یک حسگر خازنی محتوای رطوبت خاک در ترکیب با یک فروسنج افقی چندنوک، ب) تخمین ناحیه خاک تأثیرگذار روی حسگر خازنی به منظور مطمئن شدن از عدم تداخل میدان‌های الکتریکی ایجاد شده در اطراف حسگرهای خازنی نصب شده روی دو پراب مجاور فروسنج افقی چندنوک (و ج) ساخت و آزمون استاتیکی حسگر خازنی در سطوح مختلف رطوبت حجمی.

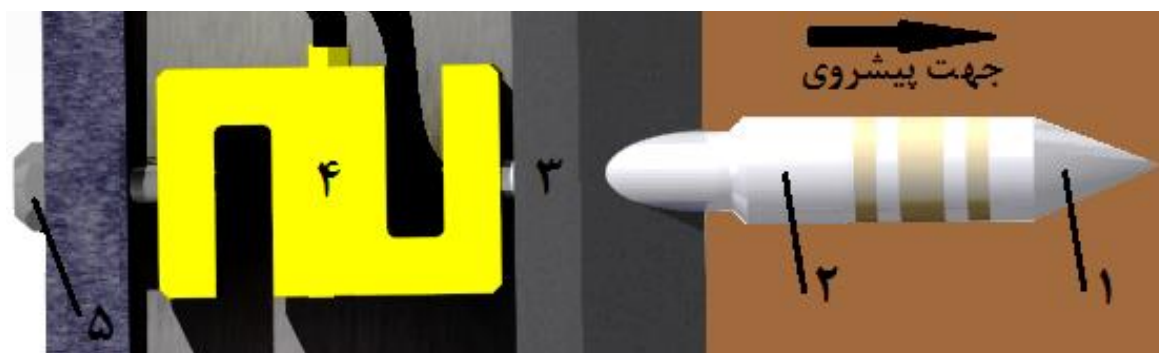
مواد و روش‌ها

فروسنج افقی:

فروسنج افقی در این پژوهش به صورت یک پراب فلزی شامل سه قسمت نوک مخروطی شکل، نشیمن حسگر خازنی و میله رابط است. نوک مخروطی شکل نفوذ فروسنج در داخل خاک را فراهم نموده و اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک را امکان‌پذیر می‌سازد. نشیمن، محلی است که اجزای حسگر خازنی روی آن سوار می‌شوند تا اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک اطراف حسگر ترکیبی در حین نفوذ آن به داخل نیم‌رخ خاک فراهم شود. میله رابط و نشیمن حسگر خازنی وظیفه اتصال نوک مخروطی به بارسنجی را بر عهده دارند که در پشت ساق فروسنج چندنوک نصب شده و نیروی حاصل از مقاومت مکانیکی خاک وارد بر فروسنج را اندازه می‌گیرد. همچنین، میله رابط و نشیمن حسگر خازنی وظیفه محافظت از کابل کواکسیال متصل‌کننده الکترودهای حسگر خازنی به مدار الکترونیکی آن را بر عهده دارند (شکل ۱).

تکنوکی ترکیبی برای اندازه‌گیری درحین حرکت مقاومت مکانیکی خاک، نوک مینا، و رطوبت خاک، روش خازنی، طراحی و ساختند. تفاوت اصلی حسگر خازنی آن‌ها در مقایسه با نمونه ساخته شده توسط Sun *et al.* (2006) در پیکربندی حسگر بود. واسنجی حسگر خازنی در آزمایشگاه حاکی از وجود یک رابطه درجه دوم بین خروجی حسگر و رطوبت حجمی ($R^2=0/91$) بود. همچنین، ارزیابی فروسنج افقی در صندوقچه خاک، حاکی از قدرت تشخیص مناسب حسگر خازنی در گذار از لایه‌های رطوبتی متفاوت بود. در ادامه، Naderi-Boldaji *et al.* (2012) حسگر خود را پس از ایجاد تغییرات لازم در مدار الکترونیکی حسگر خازنی به منظور بهبود قدرت تشخیص آن در تغییرات کوچک محتوای رطوبت و همچنین، انجام شبیه‌سازی‌های میدانی از روش المان محدود، به منظور تشخیص آن ناحیه‌ای از خاک که حسگر از آن تأثیر می‌پذیرد، تحت آزمون‌های مزرعه‌ای قرار دادند. آن‌ها برای ارزیابی سیستم حسگر خود از شرایط رطوبتی مختلف و سرعت‌های پیشروی متفاوت استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از وجود یک رابطه درجه دوم بین خروجی حسگر و رطوبت حجمی ($R^2=0/96$) بود. همچنین آن‌ها گزارش کردند که افزایش سرعت پیشروی موجب ایجاد تغییرات معنی داری در مقادیر حسگر خازنی نشد.

تاکنون، حسگر خازنی فقط در ترکیب با فروسنج‌های افقی تکنوکی، مورد استفاده قرار گرفته و امکان اندازه‌گیری همزمان رطوبت و مقاوت خاک را در یک عمق مشخص فراهم نموده است. این در حالی است که بکارگیری این حسگر برای استفاده ترکیبی با یک فروسنج افقی چندنوک می‌تواند امکان اندازه‌گیری همزمان رطوبت و مقاوت خاک در چند عمق مختلف را به منظور تهیه نقشه‌های تغییرپذیری آن‌ها فراهم کند. از طرفی، فاصله مناسب برای جلوگیری از تداخل میدان‌های الکتریکی دو حسگر خازنی مجاور که روی پراب‌های فروسنج افقی چندنوک نصب می‌شوند، تاکنون بررسی نشده



شکل ۱. فروسنج افقی (۱) نوک مخروطی شکل، (۲) میله رابط، (۳) ساق، (۴) بارسنج و (۵) پیچ حمایت‌کننده بارسنج.

متناسب است و با افزایش Z_P (مترادف با کاهش رطوبت خاک) افزایش می‌یابد (Gaskin & Miller., 1996; Naderi-Boldaji *et al.*, 2011):

$$\rho = \frac{Z_P - Z_L}{Z_P + Z_L} \quad (\text{رابطه ۱})$$

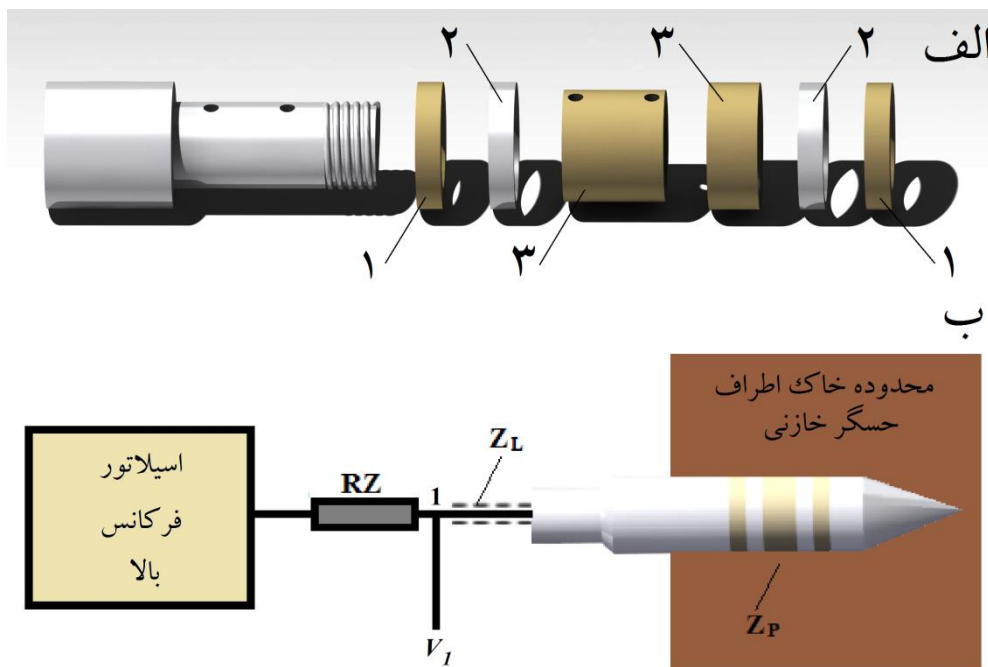
بازتابش سیگنال ناشی از اختلاف مقادیر Z_P و Z_L ، باعث ایجاد پدیده‌ای به نام نسبت موج ایستا در طول کابل کواکسیال می‌گردد (Naderi-Boldaji *et al.*, 2011). لذا می‌توان رفتار حسگر خازنی در اثر تغییرات رطوبت خاک را با استفاده از پارامتر ولتاژ نسبت موج ایستا VSWR، مطالعه نمود (رابطه ۲):

$$VSWR = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = \frac{Z_P}{Z_L} \quad (\text{رابطه ۲})$$

لازم به ذکر است، جنس الکترودها و عایق‌های حسگر خازنی به ترتیب از فولاد AISI304 و ABS در نظر گرفته شد که خواص الکترومغناطیسی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. طراحی حسگر خازنی در نرم‌افزار Catia نسخه V5R20 به نحوی انجام شد که کلیه مراحل ساخت آن با استفاده از دستگاه تراش اتوماتیک انجام شود.

حسگر خازنی؛ پیکربندی، اساس کار، مدار الکترونیکی، شبیه‌سازی المان محدود:

حسگر خازنی شامل دو حلقه فلزی است که نقش الکترودهای یک خازن که از خاک اطراف خود به عنوان واسط دی‌الکتریک استفاده می‌کند را بر عهده دارند. دو عایق در دو طرف و یک عایق بین این حلقه‌های فلزی، از هرگونه اتصال الکترودها با یکدیگر و با بدنه فلزی نشیمن جلوگیری کرده (شکل ۲-الف) و باعث تأثیرپذیری میدان الکتریکی اطراف حسگر خازنی (Fringe field) از ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک اطراف آن می‌شوند. انتخاب پیکربندی دو حلقه‌ای، امکان تأثیرپذیری حسگر از تمام محدوده خاک اطراف خود را فراهم می‌کند. بنابراین، ظرفیت این خازن با ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک اطراف آن متناسب است. با انتشار موج اسیلاتور فرکانس بالا در حسگر خازنی از طریق کابل کواکسیال (شکل ۲-ب)، در صورتیکه مقادیر مقاومت الکتریکی معادل حسگر خازنی Z_P و مقاومت الکتریکی کابل کواکسیال Z_L با یکدیگر برابر نباشد، نسبتی از موج ارسال شده به سمت اسیلاتور بازتاب می‌شود که به آن ضریب بازتاب ρ می‌گویند (رابطه ۱). ضریب بازتابش با مقادیر Z_P و Z_L



شکل ۲. الف) قسمت‌های مختلف حسگر خازنی (۱) عایق‌های خارجی، (۲) الکترودها، (۳) عایق‌های داخلی. ب) طرحواره‌ای از نحوه کار حسگر خازنی.

جدول ۱. مشخصات AISI304 و ABS.

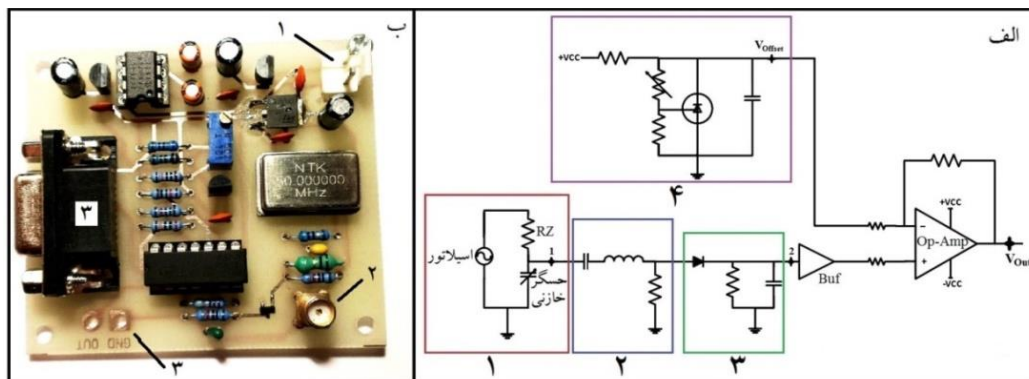
ماده	هدایت الکتریکی (MS/m^*)	ثابت دی‌الکتریک	تراوایی مغناطیسی
AISI304	۱/۳۸	بی‌نهایت	۱
ABS	صفر	۲/۸	۱

*مگا زیمنس بر متر

V_{osc} در رابطه ۳، دامنه ولتاژ اسیلاتور فرکانس بالا است. ولتاژ متناوب نقطه ۱ ابتدا از یک فیلتر نوارگذر غیرفعال RLC که صرفاً به فرکانس‌های محدوده فرکانس کاری اسیلاتور اجازه عبور می‌دهد می‌گذرد. سپس، با استفاده از یک آشکارساز پوش، پیک (بیشینه) موج خروجی از فیلتر استخراج شده و یک ولتاژ ثابت به بافر، Buf در شکل ۳-الف، تحویل داده می‌شود. بافر بارگذاری امپدانس را بر عهده دارد چرا که به خاطر مقاومت پایین بافر در خروجی آن امکان بارگذاری خروجی ثابت آن توسط دستگاه قرائت‌کننده نظیر اسیلوسکوپ یا ولت متر وجود ندارد. در پایان، خروجی بافر با استفاده از یک تقویت کننده تفاضلی، Op-Amp در شکل ۳-الف، تقویت می‌شود. تقویت کننده تفاوت ولتاژ خروجی از بافر را با یک ولتاژ ثابت که مقدار آن با استفاده از مدار آفست قابل تنظیم است، به صورت غیر وارونه ساز تقویت کرده و ولتاژ خروجی نهایی، V_{out} در شکل ۳-الف، را به دست می‌دهد.

حسگر خازنی در ترکیب با یک اسیلاتور، که فرکانس تحریک آن به منظور کمینه کردن اثر شوری خاک برابر با ۵۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده (Gaskin & Miller., 1996; Singh) مگهرتز در نظر گرفته شده (et al., 1997; Naderi-Boldaji et al., 2011)، یک مدار الکترونیکی را تشکیل می‌دهند. با استفاده از این مدار الکترونیکی می‌توان هر گونه تغییر در مقدار ظرفیت خازنی حسگر را به صورت تغییر در دامنه ولتاژ متناوب خروجی مدار ظرفیت خازنی مشاهده نمود. با این تفسیر یک مدار الکترونیکی به منظور تبدیل تغییرات دامنه ولتاژ متناوب نقطه ۱ در شکل ۳-الف به یک ولتاژ ثابت آنالوگ که برای سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات معمول قابل دریافت باشد، طراحی و ساخته شد. اساس کار مدار ظرفیت خازنی، تقسیم ولتاژ خروجی از اسیلاتور بین حسگر خازنی و مقاومت تعادلی RZ است که باعث می‌شود با تغییر ظرفیت خازنی حسگر، V_I دامنه ولتاژ در نقطه ۱ تغییر کند (رابطه ۳):

$$V_I = \left(\frac{Z_P}{Z_P + RZ} \right) \times V_{osc} \quad (\text{رابطه ۳})$$



شکل ۳. الف) مدار الکترونیکی حسگر خازنی (۱) مدار ظرفیت خازنی، (۲) فیلتر RLC، (۳) آشکارساز پوش، (۴) مدار آفست. ب) تصویری از مدار الکترونیکی حسگر (۱) ورودی تغذیه، (۲) محل نصب کابل و (۳) خروجی‌های مدار.

تعریف شده و حسگر خازنی با سیگنالی مشابه با سیگنال اسیلاتور تحریک شد. اندازه میدان الکتریکی حسگر، بر اساس مقادیر VSWR در فواصل مختلف از مرکز حسگر خازنی مورد مطالعه گرفت و فاصله‌ای از مرکز حسگر که مقدار VSWR در آن کمینه می‌شود و بعد از آن افزایش معنی داری ندارد به عنوان بیشترین اندازه میدان الکتریکی حسگر در نظر گرفته شد (Naderi-Boldaji et al., 2012).

ارزیابی استاتیکی حسگر خازنی

برای مطالعه رفتار حسگر خازنی به گونه‌ای که بتوان علاوه بر به دست آوردن پاسخ حسگر به رطوبت حجمی‌های مختلف نحوه تأثیرپذیری آن از چگالی ظاهری را نیز بررسی نمود، یک طرح آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی که

به منظور تخمین شکل و اندازه آن محدوده‌ای از خاک اطراف حسگر خازنی که در میدان الکتریکی حسگر قرار گرفته و حسگر می‌تواند تغییر در رطوبت آن را احساس کرده و از آن تأثیر پذیرد، اندازه میدان الکتریکی حسگر، یک سری شبیه‌سازی‌های المان محدود در نرم‌افزار Comsol نسخه 5.1 انجام شد. ابتدا قسمت‌های مختلف حسگر خازنی در نرم‌افزار مدل سازی شده و بعد، ویژگی‌های الکترومغناطیسی هریک از آن‌ها مطابق جدول ۱ در نرم‌افزار وارد شد. حجم خاک اطراف حسگر به صورت یک استوانه همگن با قطر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر که دارای ثابت دی‌الکتریک در محدوده ۵ (خاک خشک‌شده در آن) تا ۳۰ (خاک کاملاً مرطوب)، بوده و فاقد هدایت الکتریکی و تراوایی مغناطیسی است در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. در نهایت، الکترودها به صورت پورت کواکسیال

بررسی شود. در این تحلیل آماری از مجموع مربعات نوع سوم استفاده شد. همچنین، مقایسه تیمارها با استفاده از روش LSD انجام شد.

نفوذ ایمن و با سرعت ثابت حسگر خازنی با استفاده از فک متحرک دستگاه جامع کشش- فشار، مجهز شده به بارسنج ۲۰۰۰ کیلوگرمی و سه‌نظام ۱۳ میلی‌متری (شکل ۴-الف)، انجام شد. برای تسهیل در نفوذ حسگر خازنی از نوک مخروطی شکل فروسنج افقی استفاده شد. پس قرارگیری کامل حسگر خازنی در داخل نمونه خاک و توقف فک متحرک دستگاه جامع کشش- فشار (شکل ۴-ب)، خروجی مدار الکترونیکی حسگر خازنی که لحظه به لحظه توسط سامانه جمع‌آوری اطلاعات ثبت می‌شد از صفحه نمایشگر رایانه همراه قرائت شده و به عنوان پاسخ حسگر خازنی به سطح رطوبتی مورد نظر ثبت شد. با معلوم بودن مقادیر رطوبت وزنی GWC و چگالی ظاهری BD برای هر نمونه، مقدار رطوبت حجمی VWC آن از رابطه ۴ (Vafaeiyan, 1995) محاسبه شد. همچنین، برای تمامی نمونه‌ها درصد اشباع $S\%$ ، درصد پوکی $e\%$ ، درصد تخلخل $n\%$ ، درصد کسر حجمی ذرات جامد f_s و درصد کسر حجمی هوا f_a محاسبه شد (Vafaeiyan, 1995) تا امکان مطالعه نحوه تغییرات خروجی حسگر خازنی با توجه به آن‌ها فراهم شود.

$$VWC = BD \times GWC \quad (\text{رابطه ۴})$$

دارای دو فاکتور رطوبت وزنی (در پنج سطح $0/2PPL$ ، $0/4PPL$ ، $0/6PPL$ ، $0/8PPL$ و $1/0PPL$) و چگالی ظاهری (در سه سطح $1/2$ ، $1/4$ و $1/6 \text{ g/cm}^3$) است، ترتیب داده شد. ماده آزمایشی مورد استفاده در این طرح خاک با 30% رس، 34% شن و 36% سیلت، لوم رسی، بود که دارای حد خمیری (PL) و حد روانی (LL) به ترتیب برابر با $17/9\%$ و $26/8\%$ است که به منظور همگن ساختن آن از الک ۲ میلی‌متر استفاده شد. خاک پس از قرار گرفتن در آن به مدت ۴۸ ساعت در دمای 10.5 درجه سلسیوس، با افزودن آب به رطوبت وزنی مورد نظر رسیده، سپس در داخل ظروفی با دیواره از جنس لوله پلی‌اتیلن قرار گرفته و با استفاده از دستگاه CBR متراکم سازی شد تا به چگالی ظاهری مورد نظر برسد. در پایان عمل متراکم سازی، نمونه خاک متراکم شده به مدت ۳۰ دقیقه در زیر فک ثابت دستگاه CBR نگهداری شد تا تراکم در تمامی قسمت‌های آن به صورت یکنواخت توزیع شود. پس از این، واحد آزمایشی سیلفون پیچی شده و به مدت ۲۴ ساعت، به دور از نور آفتاب، نگهداری شد تا به تعادل رطوبتی رسیده و برای آزمون آماده گردد. برای لحاظ کردن خطای موجود در تهیه نمونه‌ها، ۳ تکرار برای هر نمونه در نظر گرفته شد. برای تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمون آزمایشگاهی حسگر خازنی از نرم‌افزار آماری SAS، رویه GLM، استفاده شد تا امکان مطالعه میزان تأثیرپذیری حسگر از رطوبت وزنی و چگالی ظاهری و همچنین بررسی اثر متقابل احتمالی بین این دو فاکتور بر پاسخ حسگر



شکل ۴. الف) تصویر واقعی از حسگر خازنی، متصل به سه‌نظام ۱۳ میلی‌متری و ب) قرارگیری کامل حسگر خازنی در نمونه خاک.

افزایش ثابت دی‌الکتریک خاک اطراف حسگر خازنی، اندازه میدان الکتریکی حسگر نیز افزایش پیدا می‌کند (شکل ۵-الف)، به‌طوری‌که کمترین و بیشترین اندازه میدان الکتریکی حسگر در خاک‌های خشک‌شده با آن و کاملاً مرطوب به ترتیب در شعاعی برابر با $27/6$ و $30/1$ میلی‌متر از مرکز حسگر (بین $1/28$ تا $1/4$ برابر اندازه حسگر) است. لذا با توجه به

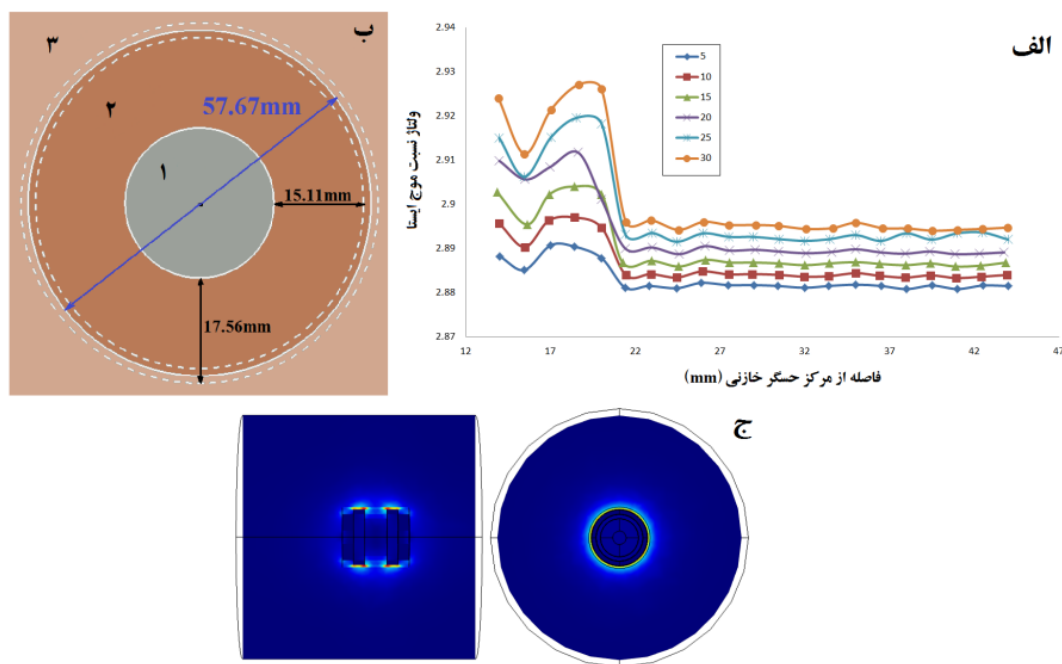
نتایج و بحث

شبیه‌سازی المان محدود حسگر خازنی

نمودار مقادیر VSWR در فواصل مختلف از مرکز حسگر خازنی D برحسب متر، برای حسگر خازنی که در خاک با ثابت دی‌الکتریک در محدوده ۵ تا ۳۰ قرار دارد نشان می‌دهد که با

(Chukwu & Bowers., 2005; Hemmat *et al.*, 2014) حسگرهای خازنی در ترکیب با پراب‌های فروسنج افقی چندنوک، با یکدیگر تداخل ندارند. توزیع میدان الکتریکی اطراف حسگر خازنی در ثابت دی‌الکتریک ۱۵ از نمای جانبی و نمای روبه‌رو در شکل ۵-ج قابل مشاهده است.

شبه‌سازی‌های انجام‌شده، ناحیه خاکی که حسگر خازنی از آن تأثیر می‌پذیرد، به‌صورت یک استوانه با قطر میانگین ۵۷/۷ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر است (شکل ۵-ب). بنابراین، باتوجه به اینکه در فروسنج‌های افقی چندنوک فاصله بین فروسنج‌ها معمولاً ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود



شکل ۵. الف) توزیع مقادیر ولتاژ نسبت موج ایستا در فواصل مختلف از مرکز حسگر، ب) حسگر خازنی از نمای روبه‌رو (۱) نوک مخروطی شکل، (۲) میانگین محدوده نفوذ حسگر خازنی و (۳) محدوده آزاد. و ج) توزیع میدان الکتریکی اطراف حسگر خازنی از نمای جانبی (سمت چپ) و نمای روبه‌رو (سمت راست).

ارزیابی استاتیکی حسگر خازنی

نمودار پاسخ حسگر خازنی

پس از انجام ارزیابی آزمایشگاهی، نمودار ولتاژ خروجی حسگر خازنی (متغیر وابسته) برحسب سطوح رطوبت حجمی (متغیر مستقل)، ترسیم شد. آزمون معنی داری معادلات خطی، درجه دوم و درجه سوم برازش شده بر داده‌ها با استفاده از رویه REG در نرم‌افزار SAS نشان داد که یک رابطه درجه دوم بین خروجی حسگر خازنی و رطوبت حجمی وجود دارد (جدول ۲). بنابراین، می‌توان گفت که با افزایش رطوبت حجمی، ولتاژ خروجی حسگر به‌صورت یک منحنی با معادله درجه دوم ($R^2=0/91$) کاهش پیدا می‌کند که میزان کاهش آن با افزایش رطوبت حجمی افزایش می‌یابد (شکل ۶). چنین روندی پیش از این توسط Sun *et al.* (2006) و Naderi-Boldaji *et al.* (2012) نیز مشاهده شده است. با توجه به شکل ۶، ارتباط بین رطوبت حجمی و خروجی حسگر V_{Out} به‌صورت زیر در نظر گرفته شد

(رابطه ۵):

$$V_{Out} = -13.8(VWC)^2 + 205(VWC) + 1304.8 \quad (\text{رابطه ۵})$$

با در نظر گرفتن مقادیر درصد اشباع نمونه‌ها دیده شد که خروجی حسگر خازنی با مقادیر درصد اشباع نمونه‌ها ارتباط معنی داری دارد. آزمون معنی داری معادلات خطی، درجه دوم و درجه سوم برازش شده بر داده‌ها با استفاده از رویه REG در نرم‌افزار SAS نشان داد که یک رابطه درجه دوم ($R^2=0/92$) بین خروجی حسگر خازنی و درصد اشباع نمونه‌ها وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که خروجی حسگر خازنی با افزایش درصد اشباع نمونه‌ها، به صورت یک منحنی درجه دوم کاهش می‌یابد (شکل ۷). لازم به ذکر است که درصد اشباع تابعی از رطوبت وزنی، چگالی ظاهری و درصد تخلخل نمونه خاک است که با رطوبت وزنی و چگالی ظاهری رابطه مستقیم و با درصد تخلخل رابطه معکوس دارد. از طرفی، درصد تخلخل خود تابعی از چگالی ظاهری است و با آن رابطه معکوس دارد. به عبارت

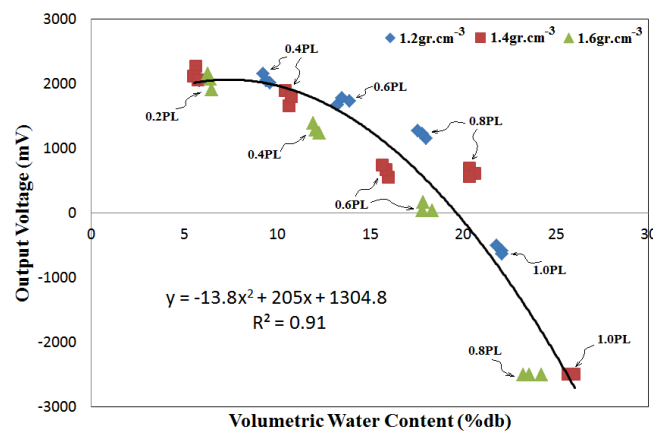
دیده شد که خروجی حسگر خازنی با مقادیر درصد کسر حجمی هوا ارتباط معنی داری دارد. آزمون معنی داری معادلات خطی، درجه دوم و درجه سوم برازش شده بر داده‌ها با استفاده از رویه REG در نرم‌افزار SAS نشان داد که یک رابطه درجه دوم ($R^2=0.73$) بین خروجی حسگر خازنی و درصد کسر حجمی هوا نمونه‌ها وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که خروجی حسگر خازنی با افزایش کسر حجمی هوا در نمونه‌ها، به صورت یک منحنی درجه دوم افزایش می‌یابد (شکل ۸). بررسی‌ها نشان داد که هیچگونه رابطه معنی داری بین مقادیر خروجی حسگر خازنی با کسر حجمی ذرات جامد وجود ندارد.

دیگر، با افزایش چگالی ظاهری درصد تخلخل کاهش می‌یابد. لذا می‌توان استدلال کرد که درصد اشباع بیشتر تحت تأثیر چگالی ظاهری است و با افزایش چگالی ظاهری، درصد اشباع قطعاً افزایش می‌یابد. لذا، می‌توان گفت که ارتباط بین داده‌های حسگر با مقادیر درصد اشباع، بیشتر ناشی از اثر چگالی ظاهری بوده و نشان‌دهنده تأثیرپذیری حسگر خازنی از رطوبت حجمی است. بررسی‌ها نشان داد که هیچگونه رابطه معنی داری بین مقادیر خروجی حسگر خازنی با درصد پوکی و درصد تخلخل وجود ندارد. همچنین، با در نظر گرفتن مقادیر درصد کسر حجمی هوا

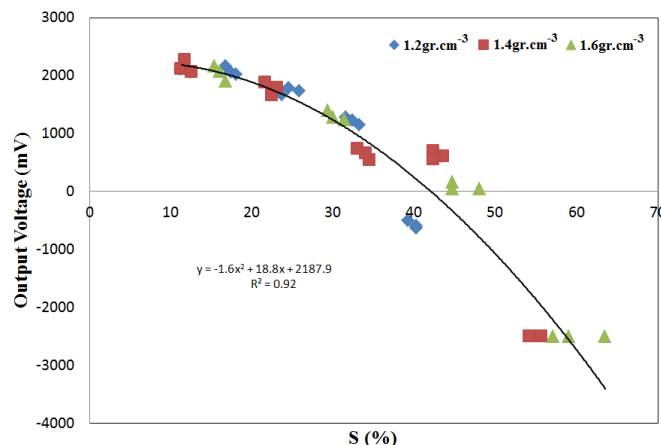
جدول ۲. نتایج آزمون معنی داری ضرایب معادله برازش شده بر خروجی حسگر خازنی در سطوح رطوبت حجمی

معنی داری ضرایب معادله ⁺				R ²	معادله برازش شده
x ³	x ²	x	ثابت		
		***	***	۰/۷۹	$y = -210/8 x + 3845/3$
	***	**	*	۰/۹۱	$y = -13/8 x^2 + 205 x + 1304/8$
ns	ns	ns	*	۰/۹۱	$y = -0/6 x^3 + 15/3 x^2 - 196/2 x + 2868/6$

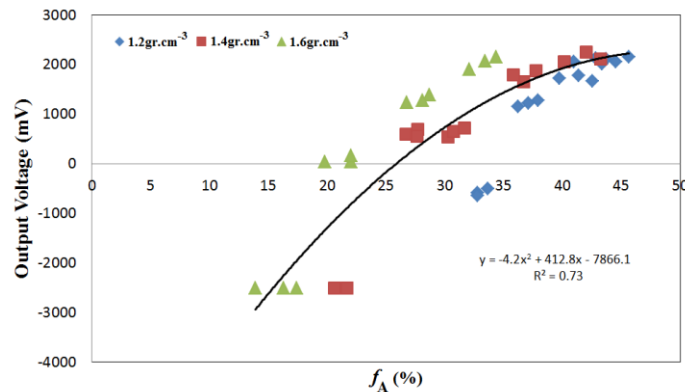
+ ns بدون معنی، * معنی دار در سطح ۵ درصد، ** معنی دار در سطح ۱ درصد، *** معنی دار در سطح ۰/۱ درصد



شکل ۶. نمودار ولتاژ خروجی بر حسب رطوبت حجمی برای حسگر خازنی.



شکل ۷. نمودار ولتاژ خروجی بر حسب درصد اشباع.



شکل ۸. نمودار ولتاژ خروجی بر حسب درصد کسر حجمی هوا.

تحلیل آماری داده‌های حسگر خازنی

نتایج تحلیل آماری داده‌های حاصل از ارزیابی استاتیکی حسگر خازنی حاکی از وجود تفاوت معنی دار بین سطوح مختلف رطوبت وزنی و چگالی ظاهری خاک و همچنین معنی دار بودن اثر متقابل بین فاکتورهای رطوبت وزنی و چگالی

ظاهری در سطح معنی داری ۰/۱ درصد است. با استناد به نتایج این تحلیل، تفاوت بین تکرارها در هیچ یک از سطوح فاکتورهای مذکور معنی دار نیست (جدول ۳). مقادیر $R^2=0/93$ و $CV=17/83$ به دست آمده برای طرح، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد بالا به نتایج این تحلیل آماری هستند.

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای رطوبت وزنی و چگالی ظاهری بر خروجی حسگر

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مجموع مربعات	مقدار F	Pr > F
رطوبت وزنی	۴	۲۳۱۴۷۸۵۲/۰۷	۲۸۰۹/۴۶	< ۰/۰۰۰۱
چگالی ظاهری	۲	۹۴۴۸۸۷۸/۵۹	۱۱۴۶/۸۱	< ۰/۰۰۰۱
رطوبت وزنی × چگالی ظاهری	۸	۲۱۳۷۲۴۰/۵۶	۲۵۹/۴۰	< ۰/۰۰۰۱
تکرار	۲	۹۹۷/۸۱	۰/۱۲	۰/۸۸۶۴
خطا	۲۸	۸۲۳۹/۲۰		
کل	۴۴	۲۹۲۹۷۱۹/۰۲		

همچنین، مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۴) نشان می‌دهد که در رطوبت وزنی پایین خاک، خروجی حسگر به تغییرات چگالی ظاهری خاک حساس نیست. حال آنکه با افزایش رطوبت وزنی خاک، در یک رطوبت وزنی مشخص خروجی حسگر با افزایش چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد. به‌طوریکه با افزایش رطوبت وزنی و چگالی ظاهری، تفاوت بین

مقادیر خروجی حسگر خازنی بیشتر می‌شود. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که اثر افزایش چگالی ظاهری بر افزایش اختلاف بین تیمارها بیشتر است که دلیل آن تأثیرپذیری حسگر خازنی از رطوبت حجمی است. چرا که مقدار ثابت دی‌الکتریک ظاهری خاک با افزایش رطوبت حجمی افزایش می‌یابد که باعث افزایش ظرفیت خازنی حسگر می‌شود.

جدول ۴. اثر متقابل رطوبت وزنی و چگالی ظاهری بر خروجی حسگر (میلی‌ولت)

رطوبت وزنی نسبی					چگالی ظاهری (g.cm ⁻³)
۱/۰ PL	۰/۸ PL	۰/۶ PL	۰/۴ PL	۰/۲ PL	
-۵۷۵ ^f	۱۲۱۹ ^c	۱۷۲۶ ^b	۲۰۷۸ ^a	۲۱۴۸ ^a	۱/۲
-۲۵۰۶ ^g	۶۱۳ ^d	۶۴۳ ^d	۱۷۷۳ ^b	۲۱۰۹ ^a	۱/۴
-۲۵۰۶ ^g	-۲۵۰۶ ^g	۸۱ ^e	۱۳۰۶ ^c	۲۰۱۰ ^a	۱/۶

تیمارهای با حروف یکسان فاقد تفاوت معنی دار هستند.

نشان داد خروجی حسگر خازنی با افزایش رطوبت حجمی به صورت یک معادله درجه دوم ($R^2=0/91$) کاهش می‌یابد. تحلیل آماری داده‌های حاصل از ارزیابی نشان داد رطوبت وزنی و چگالی ظاهری و اثر متقابل آن‌ها بر خروجی حسگر خازنی در سطح ۰/۱ درصد معنی دار هستند. همچنین، مقایسه دوبه‌دو تیمارها نشان داد که با افزایش رطوبت وزنی خاک، در یک رطوبت وزنی مشخص خروجی حسگر با افزایش چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد. به طوریکه با افزایش رطوبت وزنی و چگالی ظاهری، تفاوت بین مقادیر خروجی حسگر خازنی بیشتر می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که حسگر خازنی ساخته شده ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت در محدوده صفر تا حد اشباع خاک است که می‌تواند تغییر در محتوای رطوبت خاک را تا فاصله ۱/۴ برابر اندازه خود تشخیص دهد. این حسگر می‌تواند در ترکیب با فرسنج افقی چندنوک، به وسیله‌ای برای اندازه‌گیری همزمان مقاومت و رطوبت خاک در چند عمق به طور مستقل مبدل شده و امکان اندازه‌گیری همزمان رطوبت و مقاومت خاک در چند عمق مختلف را به منظور تهیه نقشه‌های تغییرپذیری آن‌ها فراهم کند.

REFERENCES

- 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: 71–91.
- Adamchuk, V. I., Hemmat, A., Mouazen, A. M. (2008). Soil compaction sensor systems – current developments. *ASABE Meeting Presentations*. 300(8): 1–10.
- Chukwu, E., Bowers, Jr. (2005). Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. *Transactions of ASAE*. 48: 885–894.
- Campbell, G. S., Anderson, R. Y. (1998). Evaluation of simple transmission line oscillators for soil moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*. 20: 31–44.
- Dean, T. J., Bell, J. P., Baty, A. J. B. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*. 93: 67–78.
- Gaskin, G. J., Miller, J. D. (1996). Measurement of Soil Water Content Using a Simplified Impedance Measuring Technique. *Journal of Agriculture Engineering Research*. 63: 153–60.
- Hemmat, A., Rahnama, T., Vahabi, Z. (2014). A horizontal multiple-tip penetrometer for on-the-go soil mechanical resistance and acoustic failure mode detection. *Soil and Tillage Research*. 138: 17–25.
- Huan, Zh., Wang, H., Li, Ch., Wan, C. (2017). The soil moisture sensor based on soil dielectric property. *Personal and Ubiquitous Computing*. 21: 67–74.
- Hummel, J. W., Ahmad, I. S., Newman, S. C., Sudduth, K. A., Drummond, S. T. (2004). simultaneous soil moisture and cone index measurement. *Transactions of ASABE*. 47(3): 607–618.
- Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P., Dautrebande, S. (1986). A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*. 88: 319–28.
- Naderi-Boldaji, M., Sharifi, A., Jamshidi, B., Younesi-alamouti, M., Minaee, S. (2011). A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Sensors and Actuators A: Physical*. 171: 131–37.
- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Dolatsha, N., Keller, T. (2012). Improvement and field testing of a combined horizontal penetrometer for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*. 123: 1–10.
- Noborio, K., Kubo, T. (2017). Evaluation a dual-frequency-phase-shift soil moisture and electrical conductivity sensor. *Paddy and Water Environment*. 15: 573–579.
- Rahnama, T. (2012). Design, development and evaluation of a combined acoustic-force sensor for on-the-go measuring soil mechanical resistance. M. Sc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan (In Farsi).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اقدام به طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و ارزیابی استاتیکی یک حسگر خازنی اندازه‌گیر رطوبت خاک قابل نصب روی پراب اندازه‌گیر مقاومت مکانیکی خاک و قابل استفاده در یک فرسنج افقی چندنوک می‌شد. کلیه مراحل طراحی در نرم‌افزار Catia به گونه‌ای انجام شد که ساخت حسگر با دستگاه تراش اتوماتیک قابل انجام باشد. همچنین، شکل و اندازه آن محدوده‌ای از خاک اطراف حسگر خازنی که در میدان الکتریکی حسگر قرار گرفته و حسگر می‌تواند تغییر در رطوبت آن را تشخیص دهد با هدف اطمینان از عدم تداخل میدان‌های الکتریکی دو حسگر متوالی در نرم‌افزار المان محدود Comsol شبیه‌سازی شد که نشان داد میدان الکتریکی حسگر خازنی به صورت یک استوانه با قطر میانگین ۵۷/۷ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر است. در نتیجه، حسگر خازنی قابل استفاده در ترکیب با پراب‌های فرسنج افقی چندنوک است. به منظور مطالعه رفتار حسگر خازنی در رطوبت حجمی‌های مختلف، یک طرح آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی دارای دو فاکتور رطوبت‌وزنی و چگالی‌ظاهری، ترتیب داده شد که

- Roth, C. H., Schulin, R., Fluher, H., Attinger, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*. 26: 2267-2273
- Singh, G., Das, B. M., Chong, M. K. (1997). Measurement of moisture content with a penetrometer. *Geotechnical Testing Journal*. 22 (3): 317-323.
- Sun, Y., Lammers, P. S., Damerow, L. (2003). A Dual Sensor for Simultaneous Investigation of Soil Cone Index and Moisture Content. *Agrartechnische Forschung* 9(1): 12-16.
- Sun, Y., Ma, D., Lammers, P. S., Schmittmann, O., Rose, M. (2006). On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil and Tillage Research*. 86: 209-17.
- Vafaeiyan, M. (1995) *Methods of Soil Testings* (2th ed). Isfahan (In Farsi).