

ارزیابی دقت برخی روش‌های صحرایی اندازه‌گیری رطوبت خاک

سمیرا مصری، شجاع قربانی دشتکی^{۱*}، حسین شیرانی، ابوالقاسم کامکار روحانی و

حمیدرضا متقیان

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

dorsa_mesry@yahoo.com

استاد گروه مهندسی آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

Shoja2002@yahoo.com

استاد گروه مهندسی آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان.

shirani@vru.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

kamkarr@shahroodut.ac.ir

استادیار گروه مهندسی آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

Motaghian.h@yahoo.com

چکیده

آب خاک از عوامل مهم موثر در رشد گیاه است. روش‌های متفاوتی برای تعیین آب خاک وجود دارد. از آنجا که تعیین رطوبت حجمی به روش آزمایشگاهی زمان‌بر بوده و موجب برهم‌خوردگی خاک می‌شود، این پژوهش به منظور ارزیابی برخی روش‌های صحرایی (درجا) اندازه‌گیری رطوبت خاک انجام شد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از روش مقاومت الکتریکی با آرایش الکترودی ونر، روش رادار نفوذی به زمین با آنتن ۷۰۰ مگاهرتز و دو حس‌گر ($sm300$ و $thetaml2$)، در ۷۲ نمونه خاک‌هایی با بافت لوم، لوم‌شنی، لوم‌سیلتی، رسی‌سیلتی، رسی‌لومی و سیلتی‌رسی‌لومی در بخش‌هایی از حوزه آبخیز شهرکرد استفاده شد. نتایج به‌دست آمده ضریب همبستگی بین رطوبت خاک و عکس مقاومت الکتریکی زمین را $0/85$ نشان داد. همچنین، ضریب همبستگی بین مقادیر حاصل از روش رادار زیرسطحی، حس‌گر $sm300$ و $thetaml2$ با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر بود با $0/86$ ، $0/94$ و $0/86$ و شاخص CRM $0/52$ -، $0/75$ - و $1/22$ - بدست آمد. با مقایسه مقاومت ویژه الکتریکی، رطوبت به‌دست آمده از رادار نفوذی به زمین و حس‌گر $sm300$ و $thetaml2$ با رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب $8/41$ ، $5/3$ و $8/6$ و $RRMSE$ به ترتیب 10 ، 31 و 29 و 26 به‌دست آمد. آزمون دانکن بین رطوبت‌ها نشان داد که اختلاف رطوبت به‌دست آمده از حسگرها با رطوبت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در سطح 5 درصد ($p < 0/05$) معنی‌دار بود. بر اساس نتایج، حس‌گر $sm300$ دارای بالاترین میزان همبستگی و رادار نفوذی به زمین دارای کمترین خطا ($RMSE$) در بین سایر روش‌ها بود. با توجه به مقدار $RRMSE$ همه حس‌گرها تخمین مناسبی از رطوبت خاک داشتند. به‌طور کلی، برای تعیین رطوبت حجمی نیم‌رخ خاک در مقیاس‌های مزرعه تا زیرحوضه، روش مقاومت الکتریکی، رادار زیرسطحی و حس‌گر-های رطوبتی به دلیل سهولت استفاده و تعیین دامنه گسترده رطوبت خاک، می‌تواند به‌عنوان روشی اقتصادی و سریع بدون تخریب ساختمان خاک، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: روش مقاومت الکتریکی زمین، رادار زیرسطحی، ثابت دی‌الکتریک، حس‌گر رطوبت

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

*- دریافت: آذر ۱۳۹۸ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۹

مقدمه

شناسایی خاک و حفاظت از سامانه‌های کشت کمک کند (پرنو و همکاران، ۱۳۹۳). هم‌چنین، استفاده از روش *GPR* توانایی نظارت بر اراضی وسیع را با سرعت نسبتاً زیاد و ارزش موثر فراهم می‌کند، بنابراین *GPR* می‌تواند رابط بین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و سنجش از دور باشد (ویهمولر و همکاران، ۲۰۰۷). یک سامانه رادار از یک مولد سیگنال، آنتن فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. فرستنده موجی با فرکانس ۱۰ مگاهرتز تا ۵/۱ گیگاهرتز تولید و به داخل زمین ارسال می‌کند. امواج هنگامی که به یک شیء و یا سطح که دارای خواص الکتریکی متفاوتی است برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در آن قسمت، بخشی از امواج به سطح منعکس می‌شوند (باکر و همکاران، ۲۰۰۷). در *GPR* عامل اصلی انعکاس امواج، تغییر سرعت انتشار به علت اختلاف گذردهی نسبی، هدایت الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی ساختارهای زیرسطحی است. در برداشتها تغییر در خواص الکترومغناطیسی رسوبات است که باعث انعکاس انرژی الکترومغناطیسی می‌شود. تغییر در خواص الکترومغناطیسی عمدتاً در نتیجه تغییرات در محتوای آب خاک رخ می‌دهد که مقدار آب خاک به نوبه خود با اندازه دانه‌ها و تخلخل کنترل می‌شود. امواج رادار به علت ماهیت خاصی که دارند، در هنگام برخورد با سطح آب متوقف شده و در محیط انتشار نمی‌یابد.

به نظر می‌رسد مطالعات زیادی در زمینه برآورد کمی رطوبت خاک با استفاده از *GPR* و مقایسه آن با حس‌گرهای *sm300* و *thetaml2* صورت گرفته باشد. از جمله مطالعات صورت گرفته، می‌توان به ویهمولر و همکاران (۲۰۰۷) اشاره نمود که روش تحلیل موج زمینی *GPR* را برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به کار بردند. این پژوهشگران از آنتن ۴۵۰ مگاهرتزی *GPR* در یک خاک با بافت لوم سیلتی استفاده کردند. در این بررسی، خطای میانگین مربعات ریشه در مقایسه با نمونه‌های حجمی خاک ۰/۱۰۲ بود. پژوهشگران دلیل اصلی شکست روش موج زمینی را میرایی (تضعیف) زیاد پالس *GPR*

رطوبت خاک یکی از عوامل بنیادی محیط-زیست بوده که بر زندگی گیاهی و جانوری و میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر مستقیم می‌گذارد؛ بنابراین آگاهی از مقدار رطوبت خاک و توزیع مکانی و تغییرات زمانی در مطالعات آب‌شناسی، علوم خاک، محیط‌زیست، هواشناسی و در آبیاری و زهکشی به منظور بهبود کارایی مصرف آب از موضوعات مهم است (پن و همکاران، ۲۰۱۲). روش‌های درجا و آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد. هر کدام از روش‌ها دارای معایب و مزایایی است، روش‌های آزمایشگاهی وقت‌گیر و زمان‌بر بوده و نمونه‌برداری موجب تخریب ساختمان خاک و به هم خوردگی خاک می‌شود و فقط مناطق محدودی را پوشش می‌دهد (لونت و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به مطالب طرح شده، اندازه‌گیری دقیق رطوبت با روش آزمایشگاهی در نواحی وسیع میسر نخواهد بود (سرادجانی و حسینی، ۲۰۱۱). در این میان، استفاده از روش‌های درجا علاوه بر اینکه سبب می‌شود خاک دست-نخورده باقی بماند، برای دریافت داده‌های میدانی در مقیاس‌های مزرعه و زیرحوضه نیز مناسب هستند (استیلمن، ۲۰۱۲). از سوی دیگر، سنجش از دور روشی موثر برای اندازه‌گیری مقدار آب خاک در مقیاس وسیع است (سرادجانی و حسینی، ۲۰۱۱). عیب روش‌های سنجش از دور اندازه‌گیری مقدار آب خاک تنها در سطح خاک و نیز ناتوانی در اندازه‌گیری آب خاک در زمانی است که سطح پوشیده از گیاه است (ویهمولر و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین، نیاز به روش‌هایی برای اندازه‌گیری مقدار آب خاک است که اندازه‌گیری‌ها را در مقیاس بینابینی و با قدرت تفکیک زمانی بالاتری فراهم کند.

روش رادار زیرسطحی (*Ground Penetration Radar, GPR*) روش جدیدی است که در سال‌های اخیر برای اهداف مختلفی از جمله پایش رطوبت خاک و بررسی بافت خاک استفاده شده و به نظر می‌رسد *GPR* می‌تواند تا حد زیادی به کشاورزی در

با تکیه به مطالب ارائه شده، می‌توان رابطه بین مقاومت الکتریکی و مقدار رطوبت را برای هر نوع خاک تعیین و از آن بهره‌برداری نمود. پژوهش‌های مختلفی به منظور برآورد پارامترها و ویژگی‌های مختلف خاک با دستگاه مقاومت الکتریکی صورت گرفته است. پژوهش چیک و همکاران (۲۰۱۵) مقاومت الکتریکی خاک را در مقدار رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف خاک اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش رطوبت خاک میزان مقاومت الکتریکی خاک کاهش می‌یابد. عبیدین و همکاران (۲۰۱۳) محتوای رطوبت و چگالی خاک را با استفاده از مقاومت الکتریکی تعیین نمودند و مشاهده کردند که با کاهش میزان رطوبت و چگالی خاک مقاومت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد. از آنجایی که برآورد میزان رطوبت آب در خاک در رشد گیاه، برآورد خشکسالی، تعیین دوره آبیاری و زه‌کشی حائز اهمیت است و با توجه به اینکه اندازه‌گیری رطوبت به روش آزمایشگاهی زمان‌بر و به صورت نقطه‌ای بوده و برآورد رطوبت در سطح وسیع به این روش امکان‌پذیر نیست، بنابراین، استفاده از ابزارهایی که رطوبت را به صورت درجا و در مدت زمان کوتاهی اندازه‌گیری کند، مورد توجه است. مطالعات سایر پژوهشگران نیز نشان می‌دهد که حس‌گرهای برآورد رطوبت تا حد قابل قبولی می‌تواند رطوبت خاک را اندازه‌گیری کند و هزینه و زمان نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را کاهش دهد، بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی توانایی عملکرد روش ژئوفیزیکی و حس‌گرهای $sm300$ و $thetaml2$ در برآورد مستقیم رطوبت خاک و مقایسه آن با روش آزمایشگاهی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در زیر حوضه مرغملک واقع در حوزه آبخیز شهرکرد، در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. زیرحوضه مرغملک در محدوده جغرافیایی، عرض $30^{\circ} 22' 32''$ و طول $50^{\circ} 22' 30''$ شهرکرد قرار دارد. ارتفاع مرتفع‌ترین نقطه در این زیرحوضه ۲۹۳۶ متر

تشخیص دادند که به بافت خاک (وجود مقادیر بالای سیلت و رس) در مکان آزمایش نسبت داده شده است (ویجواردنا و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای دیگر یک دستگاه GPR سیار با قدرت آنتن ۲۰۰ و ۸۰۰ مگاهرتز در ۲۵ هکتار از زمین‌های کشاورزی با بافت لوم سیلتی برای نقشه‌برداری رطوبت خاک استفاده شد. در این مطالعه دقت روش GPR از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های واقعی رطوبت خاک ارزیابی که مقدار $RMSE$ برابر 0.233 مترمکعب بر مترمکعب به‌دست آمد (مینت و همکاران، ۲۰۱۲).

تئوری و سازوکار عمل حس‌گرها

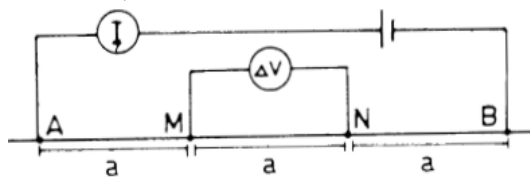
یکی از مزایای روش مقاومت الکتریکی این است که افزون بر داشتن ارتباط قوی با رطوبت خاک، اثر مخربی بر خاک ندارد. در این روش، یک جریان مستقیم و یا جریان متناوب با فرکانس بسیار پایین، با دو یا چند قطب به زمین اعمال‌شده و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه (الکتروُد) که موقعیت مناسبی با قطب‌ها داشته باشند، اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت الکتریکی تابعی از موقعیت و وضعیت قطب‌ها و الکترودها و همچنین ویژگی‌های الکتریکی زمین است. جامع‌ترین تعریف مقاومت الکتریکی عبارت است از مقاومت بین دو وجه یک مکعب از خاک با ابعاد واحد به ازای جریان الکتریکی واحد. مقاومت الکتریکی به‌دست آمده با دستگاه، مقاومت الکتریکی ظاهری است که پس از ضرب در عامل آرایه الکتروُدی (K)، مقاومت الکتریکی ویژه واقعی به‌دست می‌آید.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

که در آن:

K ضریب آرایه یا عامل هندسی آرایش الکتروُدی است که مقدارش بسته به نوع آرایش الکترودها متفاوت بوده و در آرایش الکتروُدی ونر از رابطه $K = a \times 2 \times 3 / 14$ به‌دست می‌آید، a فاصله بین الکترودها، ΔV اختلاف پتانسیل، I جریان الکتریسیته و ρ مقاومت الکتریکی ویژه است.

مقاومت الکتریکی خاک از سطح تا عمق ۲۰ سانتی‌متری الکترودها به فاصله $a=78$ سانتی‌متری از هم قرار گرفتند.



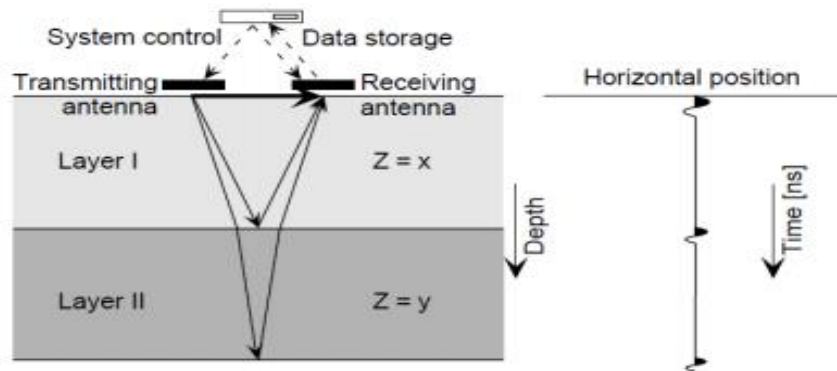
شکل ۱- نحوه قرارگیری الکترودها در آرایش الکترودی ونر

از آنجایی که عوامل مختلفی مانند رطوبت، شوری در مقدار مقاومت الکتریکی خاک اثرگذارند، بنابراین آزمایش در خاکی غیرشور انجام شد. مهم‌ترین عامل اثرگذار بر مقاومت الکتریکی رطوبت خاک است (برادران مطیع و همکاران، ۱۳۸۹). تعیین رطوبت با استفاده از *GPR* مدل *Akula* و آنتن ۷۰۰ مگاهرتزی با تعیین سرعت رفت و برگشت موج در بالای هدلولی انجام شد که بدین منظور لوله‌ای به قطر سه و طول ۲۵ سانتی‌متر در زمین قرار داده شد و از آنجایی که وجود لوله سبب بروز هدلولی در تصاویر رادار می‌شود، میزان رطوبت در بالای لوله (سر هدلولی) با رادار نفوذی به زمین، حس‌گرها و نمونه‌برداری تعیین شد. اصول کار روش *GPR* این است که ابتدا یک آنتن فرستنده، امواج الکترومغناطیسی را به داخل خاک می‌فرستد. این امواج در داخل خاک حرکت کرده و هنگامی که به موادی که خصوصیات الکتریکی متفاوتی با مواد اطرافشان دارند، برخورد می‌کند، منعکس شده و با آنتن گیرنده دریافت می‌شود. سپس با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت ثبت شده با دستگاه و تحلیل این امواج با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه، می‌توان اطلاعات مفید و دقیقی در مورد بافت خاک، رطوبت، همگن و ناهمگن بودن و حفرات موجود، جنس خاک از لحاظ میزان رس به دست آورد.

و پست‌ترین نقطه ۲۴۰۰ متر است. بارش متوسط سالیانه ۴۰۰ میلی‌متر است که بیشتر در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. دمای متوسط سالانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد با میانگین حداقل ۳/۸ و میانگین حداکثر ۳۰/۷ درجه سانتی‌گراد است (متقیان و محمدی، ۱۳۸۹).

به منظور ارزیابی میزان رطوبت خاک با استفاده از روش‌های زودیافت و مقایسه نتیجه با روش آزمایشگاهی، از دستگاه‌های مقاومت الکتریکی و رادار نفوذی به زمین و حس‌گرهای *sm300* و *thetaml2* که مستقیم رطوبت حجمی را اندازه‌گیری می‌کنند، به طور همزمان استفاده شد. برای تعیین رطوبت حجمی خاک، (رطوبت جرمی×جرم مخصوص ظاهری) در دو عمق به روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری و به عنوان روش مرجع در نظر گرفته شده و رطوبت حجمی حس‌گرها و *GPR* ارزیابی شد. رطوبت جرمی و جرم مخصوص ظاهری خاک در ۷۲ نمونه در بافت‌های مختلف لوم، لوم‌شنی، لوم‌سیلتی، رسی‌سیلتی، رسی‌لومی و سیلتی‌رسی‌لومی تعیین شد. در نمونه‌برداری سعی بر این شد که نقاط تا حد ممکن بر روی خاک‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوت قرار گیرد. به طور کلی، در تعیین محل نقاط نمونه‌برداری هم از نظر کارشناس و هم از فرآیند تصادفی استفاده شد. دامنه رطوبت حجمی در نقاط مختلف به روش آزمایشگاهی بین ۱/۲ تا ۲۳/۲ درصد برآورد شد.

به منظور برآورد مقاومت الکتریکی از آرایش ونر استفاده شد (ونر، ۱۹۱۶). در این آرایش، چهار الکترود *A B N M* در روی زمین در طول یک خط راست طوری قرار می‌گیرد که $NB = MN = AM = a$ باشد. به منظور برآورد



شکل ۲ - مسیر انتشار امواج الکترومغناطیسی برای بررسی یک ساختار دو لایه با GPR (ون دام و همکاران، ۲۰۰۳)

پس از برداشت داده‌های GPR در ثبت راداری (تصاویر برداشت‌شده با GPR)، هذلولی‌هایی که ناشی از برخورد امواج GPR با عوارض زیرسطحی (که به صورت طبیعی یا مصنوعی در محیط وجود دارند) و یا تغییر شرایط زیر-سطحی به گونه‌ای که بر روی گذردهی دی الکتریک اثر بگذارد و بازتاب این امواج در بالای این عوارض تشکیل می‌شود. از طریق تعیین عمق و زمان رسیدن موج به هذلولی یا برازش دادن منحنی مناسب بر روی هذلولی، می‌توان سرعت امواج رادار مناسب را به دست آورد (بلو و همکاران، ۲۰۱۱). این سرعت برای امواج GPR از طریق رابطه (۲) قابل تبدیل شدن به ثابت دی الکتریک خاک است.

$$E_{soil} = (C/V)^2 \quad (2)$$

که در آن:

E ثابت دی الکتریک خاک، C سرعت نور در فضای آزاد (خلا) و V سرعت امواج رادار در خاک زیرسطحی است. ثابت دی الکتریک با استفاده از رابطه (۳) (تاپ و زیچاک، ۱۹۷۹)، به رطوبت حجمی خاک تبدیل شد. در این رابطه، رطوبت حجمی خاک بر حسب مترمکعب بر مترمکعب است که می‌توان آن را به درصد حجمی رطوبت خاک تبدیل کرد. این رابطه برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از طریق ثابت دی الکتریک در دستگاهی مانند GPR به کار می‌رود.

$$\theta_v (m^3/m^3) = 4.3 \times 10^{-6} \times \varepsilon^3 - 5.3 \times 10^{-2} \times \varepsilon^2 + 2.92 \times 10^{-2} \times \varepsilon \quad (3)$$

که در آن:

برداشت GPR به دو صورت پروفیل‌زنی و شبکه‌ای است که در پروفیل‌زنی نوع حرکت یا به صورت مستقیم و یا به صورت رفت و برگشتی است. در برداشت شبکه‌ای از پروفیل‌های عمود بر هم به صورت x و y استفاده می‌شود، با این شرط که فاصله پروفیل‌ها باید یکسان باشد. شیوه برداشت دور افت مشترک بوده است. در این شیوه آنتن‌های فرستنده و گیرنده با فاصله یکسان روی زمین در یک پروفیل حرکت داده می‌شوند. این روش پروفیل‌زنی پرکاربردترین شیوه برداشت است. در این روش داده‌ها به سرعت برداشت می‌شوند، چون آنتن‌ها ثابت هستند، جفت شدگی بین آنتن‌ها و زمین پیوسته و مداوم است و بازتاب‌ها با وضوح بیشتری مشاهده می‌شود.

دستگاه GPR در واقع زمان رسیدن امواج را اندازه‌گیری می‌کند. برای تعیین عمق دقیق رویدادها، باید مقاطع زمانی به عمقی تبدیل شود که برای این کار باید اطلاعات دقیقی نسبت به سرعت امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی در اختیار باشد. در این پژوهش اندازه‌گیری رطوبت به وسیله GPR با روش دورافت مشترک انجام شد. در دستگاه‌هایی که به روش دورافت مشترک اطلاعات جمع‌آوری می‌کند، آنتن‌های فرستنده و گیرنده برای محافظت بیشتر در داخل یک جعبه قرار دارد و اندازه‌گیری سرعت امواج از طریق تعیین عمق قرارگیری لوله و تقسیم عمق به زمان یا با استفاده از برازش منحنی هذلولی صورت می‌گیرد. به این ترتیب که

شد. ثابت دی‌الکتریک به‌دست آمده از طریق رابطه (۳) به رطوبت حجمی خاک تبدیل شد.

به منظور مقایسه کمی بین روش‌های مختلف برآورد رطوبت، آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا نسبی ($RRMSE$)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب مجموع باقی‌مانده ($Coefficient of Residual Mass$)، بررسی شد و مقدار ضریب همبستگی (R^2) بین متغیرها به‌دست آمد (روابط ۴، ۵ و ۶ و ۷). کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا صفر است، در حالی که CRM می‌تواند مقادیر منفی نیز داشته باشد. شاخص CRM بیش برآورد یا کم برآوردی از داده‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر منفی CRM نشان می‌دهد که برآوردهای یک مدل در مقایسه با مقادیر مشاهداتی بیشتر اندازه‌گیری شده، در حالی که مقادیر مثبت CRM نشان می‌دهد که مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی مقادیر کمتری نیز اندازه‌گیری کرده است. در معادلات زیر N تعداد نمونه‌ها، m میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، θ_p مقادیر اندازه‌گیری شده (رطوبت آزمایشگاهی) و θ_m مقادیر برآورد شده (رطوبت حس‌گرها) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_m)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_m - \theta_p)^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_m - \theta_p)^2} \quad (5)$$

$$RRMSE = RMSE/m \times 100 \quad (6)$$

$$CRM = \frac{\sum_{j=1}^n \theta_p - \theta_m}{n} \quad (7)$$

برای مقایسه میانگین رطوبت‌های به‌دست آمده از حس‌گرها با رطوبت به‌دست آمده در آزمایشگاه از آزمون دانکن و نرم‌افزار SAS استفاده شد.

θ_v رطوبت حجمی و ϵ ثابت دی‌الکتریک است.

برای تفسیر نیم‌رخ‌های برداشت‌شده GPR که به شکل تصویر بوده و اصطلاحاً ثبت راداری نامیده می‌شود، از نرم‌افزار $GPR Soft PRO$ نسخه ۱,۷,۲۳ استفاده شد. پردازش‌های مورد نیاز که شامل تصحیح ایستا، دی‌واو و تابع بهره بود، بر روی داده‌ها اعمال شد تا تصاویر خام به شکل تصاویر پردازش شده و قابل تفسیر در بیاید. تصحیحات انجام‌شده در این پژوهش که با هدف از بین بردن خطاهای حین برداشت انجام شد، به‌ترتیب عبارت‌اند از:

تصحیح صفر زمانی: از این پردازش به‌منظور قرارگیری نقطه شروع ردها (تریس) در سطح زمین و قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی خود استفاده شد. هنگام تفسیر داده‌های GPR معمولاً سطح زمین به عنوان نقطه صفر در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای همین سطح، عمق یا ضخامت لایه‌ها با نسبت دادن سرعت مناسب به لایه‌ها مشخص می‌شود. به‌همین دلیل، به منظور قرارگیری نقطه شروع در سطح زمین و قرارگیری بازتاب‌ها در مکان خود از تصحیح صفر زمانی (تصحیح استاتیک) استفاده می‌شود (پرنو، ۱۳۹۳).

پردازش Dewow: در این پردازش سیگنال‌های با فرکانس خیلی کم که ناشی از جریانات القایی ایجاد شده در زمین هستند، با استفاده از فیلترهای بالاگذر از رویدادها حذف شد.

پردازش بهره‌ها (Gain): سیگنال‌های رادار در اثر انتشار در ساختارهای زیرسطحی تضعیف می‌شوند، بنابراین تشخیص رویدادهایی که در اعماق زیاد قرار دارند، کار مشکلی خواهد بود (آنان، ۲۰۰۱). بهره‌ها رویدادهای عمیق را که در اثر تضعیف سیگنال به درستی قابل تشخیص نیست، ترمیم می‌کند (کاسیدی، ۲۰۰۹).

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از GPR نیاز به اندازه‌گیری سرعت امواج رادار و نهایتاً ثابت دی‌الکتریک است. سرعت امواج GPR با استفاده از مکان قرارگیری لوله و زمان برخورد موج به لوله اندازه‌گیری

نتایج و بحث

مشاهده می شود درصد شن بالاترین ضریب تغییرات را در بین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. ویژگی ها در شش بافت سطحی برآورد شد که بافت غالب سیلتی-کلی لوم بوده است. نتایج به دست آمده از دستگاه مقاومت الکتریکی در جدول (۲) آمده است.

خصوصیات بررسی شده خاک شامل اسیدیته، شوری، رطوبت اشباع، آهک، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، درصد رس، درصد شن، پایداری خاکدانه خشک، پایداری خاکدانه مرطوب است (جدول ۱). همانطور که

جدول ۱- برخی ویژگی های اندازه گیری شده در منطقه مورد مطالعه

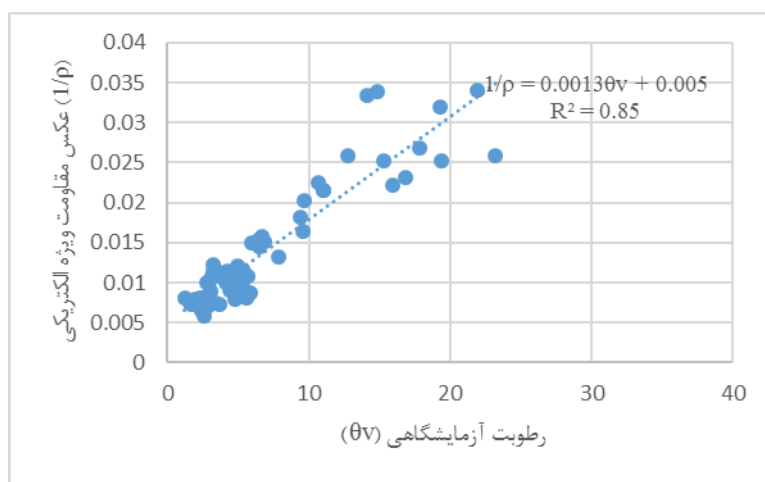
چولگی	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	پارامترها
-۰/۸۱۳۶۵	۲/۲	-۰/۱۶	۷/۵۵	۷/۹	۷	اسیدیته
۰/۷۹۶۶۸۸	۴۲/۷	-۰/۳۰	-۰/۷۰	۱/۶۹	-۰/۲۷	شوری (dS/m)
-۰/۲۱۸۱۸	۱۵/۵	-۰/۰۶۳	-۰/۴۰	-۰/۵۱	-۰/۲۵	رطوبت اشباع (kg/kg)
۱/۸۱۷۶۸۹	۳۷/۲	۱۰/۶۱	۲۸/۵۲	۷۶/۵	۱۴/۵	آهک (%)
-۰/۴۱۲۷۶	۳۵/۹	-۰/۵۴	۱/۵۰	۲/۴۱	-۰/۱	ماده آلی (%)
-۰/۸۸۲۴۸	۱۰/۸	-۰/۱۳	۱/۱۹	۱/۵۹	-۰/۹۶	چگالی ظاهری (gr/cm ³)
۰/۳۱۶۸۹۴	۱۹/۴	۵/۸۷	۳۰/۲۵	۴۴	۱۸	رس (%)
۱/۳۰۰۸۵۹	۴۶/۳	۸/۲۵	۱۷/۸۱	۴۷	۴	شن (%)
۰/۱۱۰۳۱۳	۲۲/۸	-۰/۲۲۷	-۰/۹۹	۱/۵۱	-۰/۵۶	پایداری خاکدانه خشک (mm)
۰/۵۰۸۵۵۸	۳۹/۰	-۰/۱۵۰	-۰/۳۸	۰/۸	-۰/۱۲	پایداری خاکدانه مرطوب (mm)

جدول ۲- مشخصات داده های اندازه گیری شده در نقاط مختلف خاک

ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	کمیت های اندازه گیری شده
۷۹/۱	۵/۲۴	۶/۶۲	۲۳/۲	۱/۲	رطوبت حجمی خاک (درصد)
۳۸/۹	۷/۲۰	۱۸/۵۱	۳۴/۸۹	۶	مقاومت الکتریکی ظاهری (اهم)
۳۸/۹	۳۵/۲۸	۹۰/۶۹	۱۷۰/۹۰	۲۹/۳۹	مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی (اهم×متر)

برآورد شده (RMSE) و مقدار نسبی آن (RRMSE) بین دو روش آزمایشگاهی و دستگاه مقاومت الکتریکی، به ترتیب برابر ۸/۴۱ و ۱۰/۵ محاسبه شد. عوامل متعددی بر جریان الکتریسیته در خاک و میزان مقاومت الکتریکی خاک اثرگذار است که از جمله آن ها می توان به رطوبت، شوری و فشردگی و تراکم خاک اشاره نمود که در بین تمامی موارد ارائه شده رطوبت بیشترین نقش را در افزایش جریان الکتریسیته و کاهش مقاومت الکتریکی دارد (برادران مطیع و همکاران، ۱۳۸۹).

بررسی مقاومت الکتریکی با میزان رطوبت مرتبط با آن در مناطق مختلف نشان داد که با افزایش میزان رطوبت، جریان الکتریسیته افزایش و میزان مقاومت الکتریکی ظاهری و مقاومت ویژه الکتریکی (مقاومت الکتریکی حقیقی) کاهش می یابد؛ بنابراین، میزان رطوبت خاک را می توان برابر $\frac{1}{\rho}$ در نظر گرفت. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، ضریب رگرسیون بین رطوبت حجمی به روش آزمایشگاهی با عکس مقاومت ویژه الکتریکی ۰/۸۵ محاسبه شد. هم چنین، میزان خطای



شکل ۳- رابطه بین رطوبت حجمی خاک (درصد) با عکس مقاومت ویژه الکتریکی (آمپر)

رابطه به‌دست آمده رابطه کلی بوده و تفکیکی در خاک-های مرطوب و خشک صورت نگرفته است، همچنین بررسی انجام شده صحرایی بوده و جابه‌جایی الکترودها به‌ویژه در خاک‌های مرطوب سبب هوازدگی خاک شده و فشردگی خاک کاهش یافته و باعث بالا رفتن مقاومت الکتریکی خاک می‌شود، به‌همین دلیل زمانی که خاک مرطوب‌تر شده پراکندگی داده و میزان ضریب همبستگی رطوبت و مقاومت الکتریکی خاک کاهش یافته است. مقاومت الکتریکی خاک در مناطق مختلف علاوه بر رطوبت وابسته به تخلخل، بافت (درصد رس، شن و سیلت) و املاح موجود در خاک است.

میکوت و همکاران (۲۰۰۳) گزارش نمودند مقاومت الکتریکی خاک تابعی از بافت و ساختمان، فشردگی و به‌ویژه درصد رطوبت آن است. خاک‌ها محیط متخلخلی هستند، متشکل از ذرات جامد، عایق و مایع الکترولیتی که می‌تواند از طریق جابه‌جایی یون‌های آزاد یا جذب‌شده بر روی این ذرات، جریان الکتریکی را منتقل کند (بندریتر و اسکات، ۱۹۹۹). مقاومت ویژه خاک به خصوصیات خاک از جمله جنس زمینی که خاک از آن تشکیل شده (بافت)، میزان رطوبت موجود در خلل و فرج خاک وابسته است؛ بنابراین، می‌توان با استفاده از مقاومت ویژه پارامترهای نامبرده را تعیین نمود (کلاگری، ۱۳۷۵).

در جدول (۳) شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای مقایسه کمی بین روش‌های اندازه‌گیری رادار نفوذی

پژوهش‌های متعددی به منظور برآورد ویژگی-های خاک از قبیل رطوبت، شوری، تراکم خاک با استفاده از مقاومت الکتریکی انجام شده است. بررسی‌های یان و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد مقاومت ویژه الکتریکی تابع ساختمان خاک، آب منفذی، رطوبت و درجه اشباع بوده و با افزایش میزان رطوبت، مقاومت ویژه الکتریکی خاک کاهش می‌یابد. داوودی و گوهری (۱۳۸۳) نیز گزارش نمودند که فن مقاومت سنجی الکتریکی، به عنوان یک آزمون غیرمخرب، برای تعیین درصد رطوبت نمونه‌های خاکی بدون برهم خوردگی خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهشگران با بررسی خاک‌های ماسه‌ای سیلتی نشان دادند که با افزایش رطوبت خاک، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد و رابطه بین رطوبت و مقاومت در خاک‌های خشک با ضریب تبیین ۰/۹۹ و مرطوب با ضریب تبیین ۰/۸۸ تقریباً خطی بوده است. این پژوهشگران همچنین با بررسی سایرین نشان دادند که بسته به تغییرات محیطی و عوامل تأثیرگذار بر مقاومت الکتریکی ضریب همبستگی به‌دست آمده بین رطوبت و مقاومت الکتریکی در خاک‌های مختلف با درصد رس و تخلخل و رطوبت‌های متفاوت ۰/۷۴، ۰/۹۱، ۰/۶۲ و ۰/۹۸ است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش و مقایسه آن با نتایج سایرین مقدار ضریب همبستگی بین رطوبت و مقاومت الکتریکی خاک مناسب است؛ زیرا

CRM در شرایطی که از حس گر *Theta ML2* برای اندازه‌گیری رطوبت استفاده شده، نسبت به سایر روش‌ها افزایش داشته که به‌طور کلی نشان می‌دهد استفاده از *GPR* و حس گر *SM300* برآورد بهتری از اندازه‌گیری رطوبت خاک داشته است.

جدول ۳- معیارهای آماری محاسبه‌شده بین روش *GPR* و حس گر با روش حجمی

معیار	CRM	RRMSE	RMSE	R ²	روش مقایسه شده
	-۰/۷۵	۲۹/۳	۵/۳	۰/۹۴	حس گر <i>SM300</i>
	-۱/۲۲	۲۶/۰۵	۸/۶	۰/۸۶	حس گر <i>Theta ML2</i>
	-۰/۵۲	۳۱/۴۶	۴/۰	۰/۸۶	<i>GPR</i>

بافت لوم‌سیلتی که دارای ۸۰ درصد سیلت، ۱۴ درصد رس و ۴ درصد شن بود (ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۳/۳۳) مقدار بیشتری را نشان داد؛ اما در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از آزمایش هیوسمن و همکاران (۲۰۰۱) در خاک‌هایی با مقدار زیاد رس و سیلت مقدار کمتری را نشان داد و اثبات می‌کند روش *GPR* در خاک‌هایی با بافت لوم، لوم‌سیلتی و لوم شنی می‌تواند روش مناسبی برای برآورد رطوبت حجمی خاک باشد.

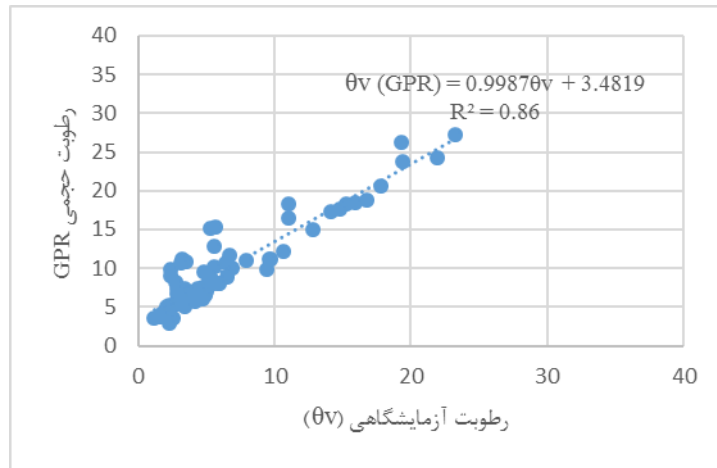
با توجه به مقدار *RRMSE* که تخمین بهتری از خطا را نشان می‌دهد، هر سه روش *SM300* و *Theta ML2* و *GPR* برای برآورد رطوبت خاک تخمین مناسب داشتند. هنگل و هانجستیک (۲۰۰۶) گزارش کردند که اگر *RRMSE* بین ۰ تا ۴۰ باشد، تخمین خوب و مدل‌سازی قوی بوده، اگر بین ۴۰ تا ۷۰ باشد، متوسط و در صورتی که بالای ۷۰ باشد، مدل‌سازی ضعیف است. در این پژوهش، *RRMSE* به‌دست آمده از روش‌های *SM300*، *Thataml2* و *GPR* به‌ترتیب ۲۹/۳، ۲۶/۰۵ و ۳۱/۴۶ محاسبه شد که نشان‌دهنده تخمین مناسب این روش‌ها برای برآورد رطوبت خاک است.

شکل‌های (۴) تا (۷) رابطه بین رطوبت‌های حاصل از حس گرها و *GPR* را در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی نشان می‌دهد.

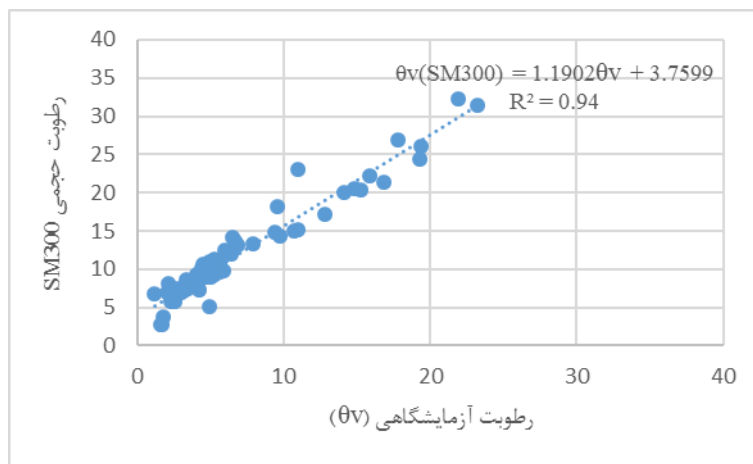
به زمین با حس گرها و مقایسه با روش نمونه‌های حجمی آمده است. در این بررسی، روش نمونه‌های حجمی، به‌عنوان مبنا برای هر سه روش حس گر *SM300* و *Theta ML2* و *GPR* استفاده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار هر دو معیار *RMSE* و

مقادیر منفی *CRM* نشان می‌دهد که استفاده از حس گرهای *SM300* و *Theta ML2* و *GPR* رطوبت را بیش برآورد می‌کند. هرچند *CRM* برای روش حس گر *Theta ML2* (-۱/۲۲) بیشتر از حس گر *SM300* و *GPR* است. در این میان، مقدار *CRM* به‌دست آمده از روش *GPR* کمتر از دو روش دیگر بوده است.

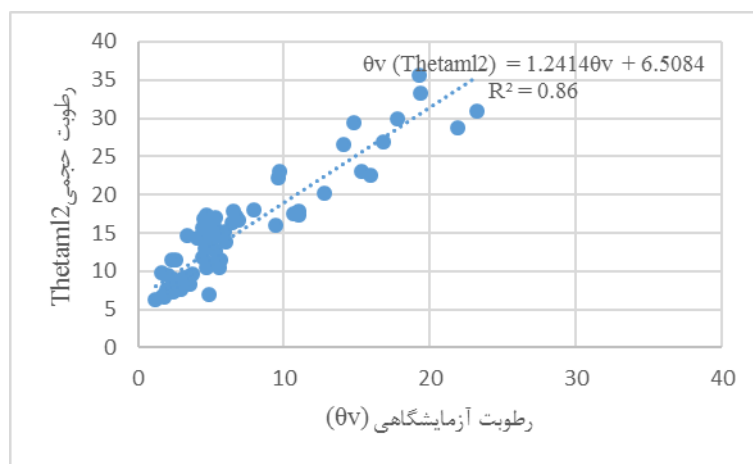
مقدار *RMSE* به‌دست آمده برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک نشان داد که *GPR* خطای کمتری داشته است، به این معنی که زمانی که از *GPR* برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌شود، میزان رطوبت نزدیکی بیشتری با میزان رطوبت به‌دست آمده از روش آزمایشگاهی دارد. حس گر *Theta ML2* نیز بیشترین میزان خطا و کمترین میزان ضریب همبستگی را در اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان داد. ویرمولر و همکاران (۲۰۰۷)، *RMSE* بالاتر از هفت را به‌عنوان شکست روش *GPR* در اندازه‌گیری رطوبت خاک گزارش کردند. با توجه به آزمایش‌های بافت خاک حاصل از هر ۷۲ نمونه خاک در بافت‌های به‌دست آمده، این مقدار از *RMSE* برای اندازه‌گیری رطوبت در این خاک‌ها می‌تواند قابل قبول باشد. پژوهش‌های مختلفی در زمینه تخمین مناسب رطوبت با استفاده از *GPR* در خاک‌های متوسط تا درشت انجام شده است، *RMSE* به‌دست آمده در این پژوهش نسبت به آزمایش مینت و همکاران (۲۰۱۲) در خاک با



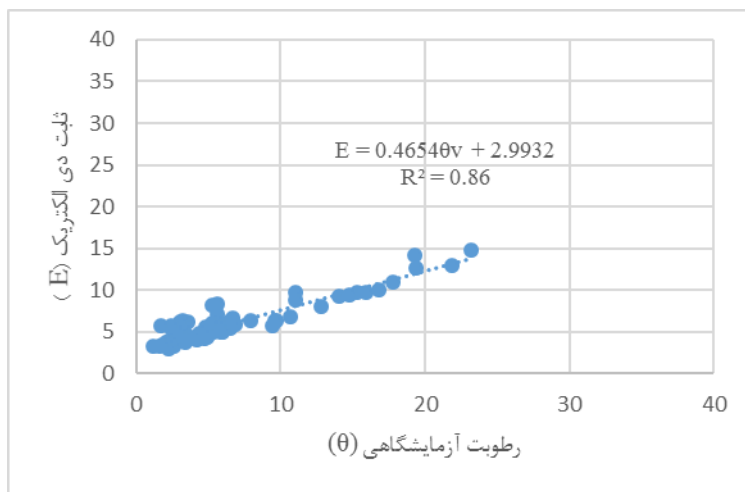
شکل ۴- رابطه بین رطوبت حجمی GPR با رطوبت حجمی آزمایشگاهی (%)



شکل ۵- رابطه بین رطوبت حجمی حس گر SM300 با رطوبت حجمی آزمایشگاهی (%)



شکل ۶- رابطه بین رطوبت حجمی حس گر Thetam12 با رطوبت حجمی آزمایشگاهی (%)



شکل ۷- رابطه بین درصد رطوبت حجمی آزمایشگاهی با ثابت دی الکتریک GPR

با دقت معقولی برآورد می‌کند. علت بالاتر بودن $RMSE$ و کاهش $RRMSE$ در دو حس‌گر $SM300$ و $Theta ML2$ نسبت به GPR بالاتر بودن میانگین داده‌ها و در واقع اختلاف CRM و بیش برآوردی بیشتر دو حس‌گر $SM300$ و $Theta ML2$ نسبت به GPR بوده است. هم-چنین از آنجایی که استفاده از GPR در خاک‌هایی با بافت‌های سبک نسبت به خاک‌هایی رسی و بافت سنگین موفق‌تر است و این پژوهش نیز در خاک‌ها با بافت و شرایط مختلف صورت گرفته، بنابراین $RRMSE$ در GPR نسبت به سایر روش‌ها اندکی بالاتر بوده است؛ اما به طور کلی $RRMSE$ نشان داد که GPR توانسته است رطوبت خاک را با دقت مناسبی تخمین زند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش GPR و حس‌گرها می‌تواند با خطایی قابل قبول، دامنه گسترده‌ای از رطوبت خاک را در مدت زمان کوتاهی تعیین کند؛ بنابراین استفاده از روش‌های درجا برای اندازه-گیری رطوبت پیشنهاد می‌شود. به منظور کاربرد بیشتر حس‌گرها همانند رادار نفوذی به زمین در پایش رطوبت خاک در کشور نیز می‌توان، از سایر روش‌های تعیین سرعت امواج رادار، مانند روش نقطه میانی مشترک در اندازه‌گیری سرعت امواج و در نهایت رطوبت خاک استفاده شود و نتایج به‌دست آمده با روش دور افت

مقایسه رطوبت به‌دست آمده از حس‌گرها با رطوبت آزمایشگاهی نشان داد که رطوبت حس‌گرها نسبت به رطوبت آزمایشگاهی در سطح پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند. مقایسه ضریب همبستگی رطوبت به‌دست آمده با حس‌گرهای $SM300$ و $Theta ML2$ با GPR نشان داد که حس‌گر $SM300$ با $r^2 = 0.94$ بیشترین ضریب همبستگی را با رطوبت حجمی به‌دست آمده از روش آزمایشگاهی داشته و پس از آن همبستگی GPR و حس‌گر $Theta ML2$ با رطوبت حجمی آزمایشگاهی 0.86 است. با مقایسه کمی روش GPR در مقابل حس‌گرهای $SM300$ و $Theta ML2$ می‌توان دریافت که GPR نسبت به دو حس‌گر دارای CRM مثبت (کم برآوردی) بوده است. با توجه به مقادیر $RMSE$ به‌دست آمده از رطوبت GPR در مقایسه با رطوبت حس‌گر $SM300$ کمتر بوده و نشان می‌دهد GPR در برآورد رطوبت نزدیکی بیشتری با حس‌گر $SM300$ دارد. به طور کلی با توجه به اینکه اندازه‌گیری رطوبت حجمی آزمایشگاهی به علت دیر انتقال یافتن نمونه‌ها به آزمایشگاه و ریختن خاک از سیلندر در هنگام نمونه‌برداری برای تخمین جرم مخصوص ظاهری، همواره با خطا همراه است بنابراین تفاوت رطوبت آزمایشگاهی با رطوبت حس‌گرها معقول و خطای حس‌گرها قابل پذیرش می‌باشد. با در نظر گرفتن $RRMSE$ که تخمین ملموس‌تری از خطا است، هر سه روش رطوبت خاک را

دور افت مشترک از نظر زمانی در مدت زمان کمتری انجام می‌شود و از نظر هزینه هم با توجه به سریعتر بودن برداشت هزینه کمتری دارد. قابل ذکر است که برای هر دو روش با توجه به پیچیدگی دستگاه‌ها و نحوه طراحی جهت برداشت داده با کیفیت عالی باید اپراتور دستگاه و شخص پردازش‌گر از توانایی و شناخت بالایی نسبت به دستگاه و نرم‌افزارهای پردازش داده برخوردار باشند.

مشترک مقایسه شود. انتخاب روش اندازه‌گیری رطوبت با GPR به امکانات موجود بستگی دارد، به علت کم‌یاب بودن دستگاه‌هایی که به روش نقطه میانی مشترک برداشت داده انجام می‌دهند، در این پژوهش از روش دور افت مشترک و دستگاه GPR مخصوص به این روش استفاده شد. به طور کلی در بین روش‌های اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از GPR روش نقطه میانی مشترک نسبت به روش

فهرست منابع

۱. برادران مطیع، ج.، آق‌خانی، م.ح.، عباسپورفرد، م.ح. و لکزیان، ا. ۱۳۸۹. ساخت و ارزیابی سامانه تهیه نقشه هدایت الکتریکی خاک مزرعه در حین حرکت. نشریه ماشین‌های کشاورزی. جلد ۱. ۲۵-۳۳.
۲. پرنو، س. ۱۳۹۳. پردازش و مدل‌سازی و تفسیر داده‌های GPR به منظور تعیین عمق، ضخامت و محدوده جانبی یخچال‌ها در منطقه علم کوه مازندران. دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۳. داوودی، م. ه. و گوهری، ا. ۱۳۸۳. معرفی روش مقاومت‌سنجی الکتریکی جهت آزمایش غیرمخرب اندازه‌گیری درجه اشباع نمونه‌های خاک. مجله پژوهش و سازندگی. شماره ۶۵. ۲۵-۳۳.
۴. کلاگری ع. ا. ۱۳۷۵. اصول اکتشافات ژئوفیزیکی؛ چاپ اول؛ تهران: مؤلف.
۵. متقیان، ح. ع. و محمدی، ج. ۱۳۸۹. مقایسه برخی از شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف اراضی در حوضه مرغملک، شهرکرد (استان چهارمحال و بختیاری). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵(۱): ۱۱۵-۱۲۴.
6. Abidin, M.H.Z., Saad R., Ahmad F., Wijeyesekera D. Ch. and Yahya A.SH. 2013. Soil moisture content and density prediction using laboratory resistivity experiment. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(6):731-735.
7. Annan A. P. 2001. *Ground penetrating radar workshop Notes, 197pp: sensors and software, Mississauga, Ontario, Canada.*
8. Baker, G., Jordan, T. and Pardy, J. 2007. *An introduction to ground penetrating radar (GPR). The Geological Society of America, special paper 432, pp. 181.*
9. Benderitter, Y. and Schott, J.J. 1999. *Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil: The relationship with rainfall, Eur. Journal of Environmental and Engineering Geophysics., 4: 37-49.*
10. Cassidy, N.J., and Jol, H. M. 2009. *Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. In Ground penetrating radar: theory and applications, International Journal of Geosciences Elsevier, Amsterdam: 141-176.*
11. Chik, Z., Murad O.F. and Rahmad M. 2015. *Dependency of dry density of soil on water content in the measurement of electrical resistivity of soil. Journal of Engineering Research and Technology, 2(2):141-145.*
12. Hengle, T. and Husnjak, S. 2006. *Evaluation adequacy and usability of soil maps in Croatia. Soil Science Society of America Journal, 70:920-929.*
13. Huisman, J.A., Sperl, C., Buoten, W. and Verstraten, J.M. 2001. *Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domin reflectometry and ground-penetrating radar. Journal of Hydrology 254 (1-2): 48-58.*

14. Lunt, I.A., Hubbard, S.S. and Rubin, Y. 2005. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, 307: 254–269.
15. Michot, D.Y. Benderitter, A. Dorigny, B. Nicoullaud, D. King and Tabbagh, A. 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5). Doi: 10.1029/2002wr001581.
16. Minet, J., Bogaert, P. Vanclooster, M., and Lambot, S. 2012. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping. *Journal of Hydrology*, 424-425: 112-123.
17. Pan, X., Zhang, J., Huang, P. and Roth, K. 2012. Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9: 8027–8062.
18. Saradjian, M.R. and Hosseini, M. 2011. Soil moisture estimation by using multi polarization SAR image. *Advances in Space Research*, 48:278–286.
19. Steelman, C.M. and Endres, A.L. 2012. Assessing vertical soil moisture dynamics using multi-frequency GPR common-midpoint soundings. *Journal of Hydrology*, 436–437:51–66.
20. Topp, G.C. and Zebchuk W. 1979. The determination of soil–water desorption curves for soil cores. *Can. Journal of Soil Science*. 59:19–26.
21. Van Dam, R. L., Van Den Berg, E. H., Schaap, M. G., Broekema, L. H. and Schlager, W. 2003. Radar reflections from sedimentary structures in the vadose zone. *Geological Society, London, Special Publications*, 211(1), 257-273.
22. Weihermuller, L., Huisman, J.A., Lambot, S., Herbst, M. and Vereecken, H. 2007. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques. *Journal of Hydrology*, 340: 205– 216.
23. Wenner, F. A. 1916. Method of measuring earth resistivity; scientific paper, Report No. 258; National Bureau of Standards; Gaithersburg, MD, USA, 12:469-482.
24. Wijewardana, Y.G.N.S. and Galagedara, L.W. 2010. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 391: 24–33.
25. Yan, M., Miao, L. and Cui, Y. 2012. Electrical resistivity features of compacted clay. *Expansive Soils. Marine Georesources and Geotechnology*, 30:167-179.

Evaluating the Accuracy of Some Field Methods for Measurement of Soil Moisture

S. Mesri, SH. Ghorbanidashtaki¹*, H. Shirani, A. Kamkarrohani,

and H.R. Motaghian

PhD student, Soil and Water Engineering Department, Shahrekord University.

dorsa_mesry@yahoo.com

Professor, Soil and Water Engineering Department, Shahrekord University.

Shoja2002@yahoo.com

Professor, Soil and Water Engineering Department, Rafsanjan Vali-e-Asr University.

shirani@vru.ac.ir

Associate Professor, Department of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics Shahrood University.

kamkarr@shahroodut.ac.ir

Assistant Professor, Soil and Water Engineering Department, University.

Motaghian.h@yahoo.com

Abstract

Soil water is an important factor in the growth of the plant. There are different methods for soil moisture estimation. It is time-consuming to obtain volumetric soil moisture in a laboratory. This study was performed to evaluate estimate of soil moisture by different in situ methods including the electrical resistance of Werner electrode arrangement and ground penetration radar (GPR) from 700 MHz antenna, and two humidity sensors, namely, thetam12 and sm300. These were used in 72 soil samples with different textures (loam, sandy clay loam and silty loam, silty clay, silty clay loam, clay loam) in parts of Shahrekord Watershed. The results showed that the coefficient of correlation between soil moisture and electrical resistance was 0.85. Also, the correlation coefficient between the values obtained from subsurface radar method, sm300 sensor and thetam12 with the results obtained from laboratory measurements were 0.86, 0.94, 0.86, with CRM index values of -0.52, -0.75 and -1.22. By comparing the results of electrical resistivity, moisture from the GPR and the sm300 and thetam12 sensors with volumetric moisture, the Root Mean Squared Error (RMSE) values were 8.41, 4, 5.3 and 8.6; and RRMSE were 10, 31, 29, and 26, respectively. Duncan test of moisture content showed that the difference between the sensors and the laboratory moisture content was significant at 5% level ($p < 0.05$). According to the value of RRMSE All sensors had a good estimate of soil moisture. In conclusion, electrical resistivity and GPR method, due to higher sampling density, could be used as a rapid, cost effective, and non-destructive technique to estimate profile of soil water content at scales of field to sub-watershed.

Keywords: *Ground electrical resistance, Ground penetration radar, Dielectric constant, Moisture sensor*

¹ - Corresponding author: Soil and Water Engineering Department, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

* - Received: November 2019 and Accepted: June 2020