



شماره ۱۱۵، تابستان ۱۳۹۶

پژوهش‌های مانی

(پژوهش و سازندگی)

امکان‌سنجی و ارزیابی برآورد رطوبت حجمی نیمرخ خاک با استفاده از داده‌های رادار زیرسطحی در دامنه جنوبی البرز

• هادی اسماعیل‌پور

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

• حسینعلی بهرامی*

(نویسنده مسئول) دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

• فرود شریفی

دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

• مهدی رحمانی‌جوینانی

کارشناس پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: آبان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۳۹۳

* Corresponding Email: bahramih@modares.ac.ir

چکیده

اخیراً رادار نفوذی به زمین (ژئورادار، GPR)، برای شناسایی شرایط زیرسطحی، به ویژه، بررسی‌های ژئوفیزیک اکتشافی و اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی بدون تخریب ساختمان خاک به عنوان روشی سریع و غیرتهاجمی، در مقیاس مزرعه تا زیر حوزه به کار گرفته شده است. این پژوهش با هدف امکان‌سنجی و ارزیابی دقت استفاده از ژئورادار به منظور برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک در مقیاس مزرعه و مقایسه روش رادار زیرسطحی نسبت به دو روش اندازه‌گیری رطوبت حجمی در آزمایشگاه و انعکاس‌سنجی دامنه زمانی انجام گرفته است. به این منظور از یک دستگاه رادار زیرسطحی مجهز به آنتن ۷۰۰ مگاهرتز استفاده گردید. داده‌ها به کمک دستگاه ژئورادار به صورت آفست معمول و در خاک‌هایی که شامل سه نوع بافت لوم، لوم شنی و لوم سیلتی بود، برداشت شد. مقادیر رطوبت حجمی خاک با اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک و جرم ویژه ظاهری خشک در آزمایشگاه به دست آمدند. به منظور محاسبه سرعت علامت‌های رادار و ثابت دی‌الکتریک خاک از روش برازش توابع هذلولی به عوارض آشکار شده در ثبت راداری استفاده شد. سپس با استفاده از یک رابطه ریاضی، مقادیر ثابت دی‌الکتریک به مقادیر رطوبت حجمی خاک مرتبط شدند. با مقایسه نتایج حاصل از روش رادار زیرسطحی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و حداکثر خطا به ترتیب برابر با $3/32$ و $5/8$ درصد محاسبه شدند. با مقایسه نتایج حاصل از روش رادار زیرسطحی و مقادیر حاصل از روش انعکاس‌سنجی دامنه زمانی، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و حداکثر خطا به ترتیب برابر با $2/4$ و 5 درصد به دست آمدند. همچنین، ضریب همبستگی بین مقادیر حاصل از روش رادار زیرسطحی با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برابر با $0/86$ محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، روش رادار زیرسطحی به دلیل سهولت استفاده و فراهم کردن حجم بالایی از وضعیت رطوبت نیمرخ خاک، می‌تواند به عنوان روشی سریع (بدون تخریب ساختمان خاک) و اقتصادی، برای برآورد رطوبت حجمی نیمرخ خاک در مقیاس‌های مزرعه تا زیر حوزه آبخیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انعکاس‌سنجی دامنه زمانی، برازش هذلولی، ثابت دی‌الکتریک، رادار زیرسطحی، رطوبت حجمی خاک

Estimating soil profile volumetric water content using ground penetrating radar in southern slopes of Alborz Mountain

• **Hadi Esmailpour**

MSc, Soil science department, faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

• **Hossein Ali Bahrami**

(Corresponding Author) Assistant Professor, Soil science department, faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (bahramih@modares.ac.ir)

• **Forod sharifi**

Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Organization (AREEO), Tehran, Iran

• **Mehdi Rahmani Jevinani**

MSc, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Organization (AREEO), Tehran, Iran

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) is a rapid and non-destructive technique that has been proposed for measuring soil water content (SWC) at intermediate scales from field scale to sub-watershed. The objectives of this study were: i) to test the capability of GPR technique for predicting profile of SWC at field scale, and ii) evaluate GPR techniques compared with both the laboratory measurements and time domain reflectometry (TDR) method to provide accurate SWC. Consequently, a GPR apparatus (Akulla 9000) equipped with 700 MHz antennas was used as a common-offset to collect the data at three soils texture classes (sandy loam, loam and silty loam). Volumetric soil water content was obtained from laboratory measurements of gravimetric soil moisture and dry bulk density. A hyperbolic curve was fitted to the radar gram to estimate the velocity and dielectric constant of GPR signals. The dielectric constant values were then feed to the experimental function suggested by Topp et al. (1980). Comparing the GPR and laboratory measurement results, the root mean square error (RMSE) and maximum error (ME) were equal to 3.32 and 5.8, respectively. Regarding to the TDR results, as the target values, the RMSE and ME values were equal to 2.4 and 5, respectively. The correlation coefficient between the GPR values and the laboratory measurements were 0.86. In conclusion, GPR method, due to a higher sampling density, could be used as a rapid, cost-effective and non-destructive technique to estimate profile of SWC at scales from fields to sub-watershed.

Keywords: Time domain reflectometry, hyperbolic fitting; dielectric constant; ground penetrating radar; soil water content

مقدمه

رطوبت خاک یکی از پارامترهای بنیادی محیط زیست است که بر زندگی گیاهی و جانوری و میکروارگانیسم‌های خاک تأثیر مستقیم می‌گذارد. در تبادلات بین خاک و اتمسفر، رطوبت خاک مهارکننده اصلی این جریان است. به همین دلیل آگاهی از محتوای رطوبتی خاک، و توزیع مکانی و تغییرات

زمانی آن یکی از موضوعات مهمی می‌باشد که در مطالعات آب‌شناسی، علوم خاک، محیط زیست، هوا شناسی و کشاورزی مورد نیاز است (Lunt et al., 2005, Minet et al., 2011, بدایق جمالی و همکاران، 1382). در استفاده از راهبردهای آبیاری و زهکشی، این اطلاعات از بالاترین اهمیت برای بهبود کارایی مصرف آب برخوردار است (Pan et al., 2012). روش‌های معمول

سریعاً و بدون نیاز به تخریب عرصه در نواحی بزرگ توان اندازه‌گیری درجا و با دقت بالای رطوبت حجمی خاک را دارد.

ویروملر و همکاران در سال ۲۰۰۷ روش تحلیل موج زمینی GPR را برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به کار بردند. این محققان از سطح ۴۵۰ مگاهرتزی آنتن GPR در یک خاک با بافت لوم لای استفاده کردند. در این مطالعه خطای میانگین مربعات ریشه در مقایسه با روش‌های TDR و نمونه‌های حجمی خاک به ترتیب ۰/۰۷۶ و ۰/۱۰۲ بود. این محققان دلیل اصلی شکست روش موج‌زمینی را میرایی زیاد علامت های GPR ذکر کردند که به بافت خاک (وجود مقادیر بالای لای و رس) در مکان آزمایش نسبت داده شد. از دلایل دیگر بازتابها سطحی و لایه خشک خاک فوقانی بود که نمی‌توانست به وسیله امواج زمینی شناسایی شود. در مطالعه‌ای که از یک دستگاه Pulse EkkO PRP با آنتن ۲۰۰ مگاهرتزی استفاده شد، نتایج نشان داد که برآوردهای GPR از $v\theta$ در مقایسه با محتوای آب ثقی، θ_g ، اختلافات معنی‌داری نداشتند ($p=0,27$). ضریب همبستگی ۸۷ درصد، میانگین خطای ریشه ۰/۱۸۴ و متوسط خطای بین دو روش ۰/۲ درصد بود (Wijewardana and Galagedara, ۲۰۱۰). یک دستگاه GPR سیار که قدرت آنتن آن از ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاهرتز متغیر بود در ۲۵ هکتار از زمین‌های کشاورزی با بافت لوم لای برای نقشه‌برداری رطوبت خاک در تجزیه مکانی بالا استفاده شد. در این مطالعه دقت روش GPR از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های واقعی رطوبت خاک ارزیابی شد و مقدار RMSE برابر ۰/۲۳۳ مترمکعب بر مترمکعب به دست آمد (Minet et al, ۲۰۱۲).

هدف از این پژوهش بررسی توانایی روش GPR در اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک بود. برای این منظور روش‌های TDR و نمونه‌های حجمی خاک به عنوان روش‌های مرجع برای مقایسه نتایج حاصل از روش GPR استفاده شدند. همچنین دقت اندازه‌گیری روش TDR از طریق مقایسه با روش نمونه‌های حجمی بررسی شد.

مواد و روش‌ها مبانی نظری

GPR یک روش اندازه‌گیری ژئوفیزیکی است که به طور گسترده برای نقشه‌برداری ویژگی‌های زیر سطحی خاک در اعماق کم و در مقیاس‌های کیلومتر تا سانتی‌متر به کار می‌رود. GPR روشی با تفکیک‌پذیری بالا می‌باشد که بر مبنای انتشار امواج الکترومغناطیس با تکرار بالا استوار است. روش GPR ساختارهایی را که وابسته به ویژگی‌های دی‌الکتریک هستند به تصویر می‌کشد. در رسوبها درصد رطوبت در درجه اول سبب تغییر در ویژگی دی‌الکتریک خاک می‌شود. آب به دلیل خاصیت دو قطبی تأثیر زیادی بر روی ویژگی دی‌الکتریک محیط متخلخل دارد و حتی وجود مقدار بسیار کمی آب، بر روی رفتار گردهی دی‌الکتریک یک محیط متخلخل تأثیر می‌گذارد.

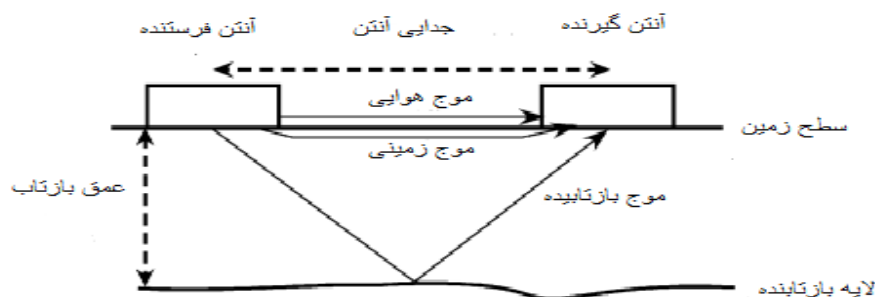
اندازه‌گیری رطوبت در یک مقیاس کوچک شامل روش‌های وزنی و حجمی، روش‌های انعکاس سنجی زمانی و تکراری (TDR and FDR)، رطوبت سنجی نوترون متری و... می‌باشند. با توجه به تغییرات مکانی و زمانی بالای رطوبت خاک، اندازه‌گیری دقیق رطوبت با این روش‌ها در نواحی وسیع میسر نخواهد بود (Saradjain and hosseini, ۲۰۱۱). این روش‌ها باعث تخریب ساختمان خاک می‌شوند و فقط مناطق محدودی را تحت پوشش قرار می‌دهند (Lunt et al, ۲۰۰۵). بعلاوه این روش‌ها جهت دریافت داده‌های میدانی در مقیاس‌های مزرعه و زیر حوزه مناسب نیستند (Steelman and Endres, ۲۰۱۲) و کاربرد آنها برای بدست آوردن محتوای آب خاک در نواحی بزرگ زمان‌بر است. از سوی دیگر سنجش از دور روشی مؤثر برای اندازه‌گیری مقدار آب خاک در مقیاس وسیع می‌باشد (Saradjain and hosseini, ۲۰۱۱). عیب روش‌های سنجش از دور قدرت تفکیک زمانی پایین، اندازه‌گیری محتوای آب خاک در عمق کمی از خاک زیر سطحی و نیز ناتوانی در اندازه‌گیری آب خاک در زمانی است که سطح پوشیده از گیاه است (Weihermuller et al, ۲۰۰۷). بنابراین نیاز به روش‌هایی برای اندازه‌گیری مقدار آب خاک است که اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری را در مقیاس بینایی و با قدرت تفکیک زمانی بالاتری فراهم کنند.

روش رادار زیرسطحی (GPR) روش جدیدی است که در سال‌های اخیر برای اهداف مختلفی از جمله پیش رطوبت خاک استفاده شده است. استفاده از روش GPR توانایی نظارت بر اراضی وسیع را با سرعت نسبتاً زیاد و ارزش مؤثر فراهم می‌کند، بنابراین می‌تواند رابط بین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و سنجش از دور باشد (Weihermuller et al, ۲۰۰۷). تا کنون با استفاده از GPR مطالعه‌ای در زمینه پیش رطوبت خاک در ایران صورت نگرفته است، اما در مقیاس جهانی مطالعات مختلفی با کاربردهای متفاوت در دو دهه اخیر انجام گرفته است و در آن امکان سنجی اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از روش GPR آزمایش شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات هایسمن و همکاران (۲۰۰۱) اشاره کرد. این محققان مقدار حجمی رطوبت خاک (VWC) را از روش انعکاس و انکسار زاویه‌ای عریض^۲ (از روش‌های برداشت داده با استفاده از روش GPR) محاسبه کردند و مقدار RMSE آن را در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی خاک در به‌کارگیری آنتن‌های ۲۲۵ و ۴۵۰ مگاهرتزی بترتیب برابر ۰/۲۸۱ و ۰/۳۰۸ به دست آوردند. لانت و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۵ آنتن ۱۰۰ مگاهرتزی GPR را روی سه قطعه زمین مسطح که مساحتشان ۱۸۰-۸۰ متر مربع بود به کار بردند. بازتاب‌ها GPR با یک لایه نازک رسی با نفوذپذیری کم در عمق ۱/۳-۰/۸ متری زیر سطح زمین در ارتباط بود. نتایج این مطالعات نشان داد که روش برداشت معمول بازتاب‌ها GPR می‌تواند برای برآورد متوسط رطوبت حجمی در بالای بازتاب‌ها رخ داده با خطای RMS برابر ۰/۱۸ استفاده شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌های معمول مانند روش نوترون متر، TDR و... دارای دقت بیشتری می‌باشد و انعکاس‌های GPR

1-Ground Penetrating Radar
2-Wide-Angle Reflection and Refraction (WARR).

همگن زمان رسیدن موج زمینی مستقیم باید به طور خطی با افزایش فاصله آنتن‌ها افزایش یابد. در روش های WARR و CMP رویکرد اندازه‌گیری در هر ایستگاه در هر خط برداشت تکرار می‌شود. یک برداشت FO از ثابت نگه داشتن فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده و حرکت دادن آنها در طول خط برداشت انجام می‌شود (Galagedara et al., 2005). برخی از امواج الکترومغناطیس از یک آنتن فرستنده به گیرنده از طریق هوا منتقل شده و به عنوان موج هوایی شناخته می‌شود. بخشی از انرژی منتشر شده که به عنوان موج زمین شناخته می‌شود از طریق خاک در طول زمین - هوا به آنتن گیرنده انتشار می‌یابد و بخشی از انرژی منتشر شده هم منعکس شده و به واسطه اختلافات زیرسطحی در گذردهی دی‌الکتریک به آنتن گیرنده برگشت داده می‌شود (شکل ۱)، (Lunt et al., 2005).

گذردهی دی‌الکتریک معمولاً با افزایش درصد رطوبت زیرسطحی زمین تا ناحیه اشباع افزایش می‌یابد، چون گذردهی دی‌الکتریک تا حد زیاد با درصد رطوبت زیرسطحی خاک مهار می‌شود (Segar and Nashait, 2011). اولین گام در اندازه‌گیری رطوبت خاک به وسیله GPR تعیین سرعت امواج رادار می‌باشد. معمولاً سه روش مختلف بررسی شامل (۱) - بازتاب و شکست زاویه‌ای عریض (WARR)، (۲) - نقطه مرکزی متداول (CMP) و (۳) - حاشیه ثابت (FO) جهت تعیین سرعت موج مستقیم به کار می‌رود. روش WARR از طریق ثابت نگه داشتن آنتن گیرنده و حرکت دادن آنتن فرستنده و دور کردن آن از آنتن گیرنده صورت می‌گیرد. روش CMP نیز از طریق حرکت دادن هر دو آنتن گیرنده و فرستنده و دور کردن آنها از همدیگر با حداقل فاصله اولیه بین آنها صورت می‌گیرد. در یک خاک



شکل ۱- نحوه‌ی ارسال امواج از آنتن فرستنده به گیرنده

سرعت برای امواج GPR از طریق رابطه ۱ قابل تبدیل شدن به ثابت دی الکترونیک خاک می‌باشد.

$$\epsilon_{soil} = \left(\frac{C}{V}\right)^2 \quad (1)$$

در این رابطه ثابت دی الکترونیک خاک، C سرعت نور در فضای آزاد (خلاً) و V سرعت امواج رادار در خاک زیرسطحی می‌باشد. این ثابت دی‌الکترونیک می‌تواند به وسیله‌ی رابطه ۲ که توسط تاپ و همکاران در سال ۱۹۸۰، ارائه شده است، به رطوبت حجمی خاک تبدیل شود. در این رابطه رطوبت حجمی خاک بر حسب متر مکعب بر متر مکعب می‌باشد که می‌توان آن را به درصد حجمی رطوبت خاک تبدیل کرد. این رابطه برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از طریق ثابت دی‌الکترونیک در دستگاه‌هایی مانند GPR و TDR به کار می‌رود.

$$\theta_v \left(\frac{m^3}{m^3}\right) = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_m^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_m^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_m - 5.3 \times 10^{-2}$$

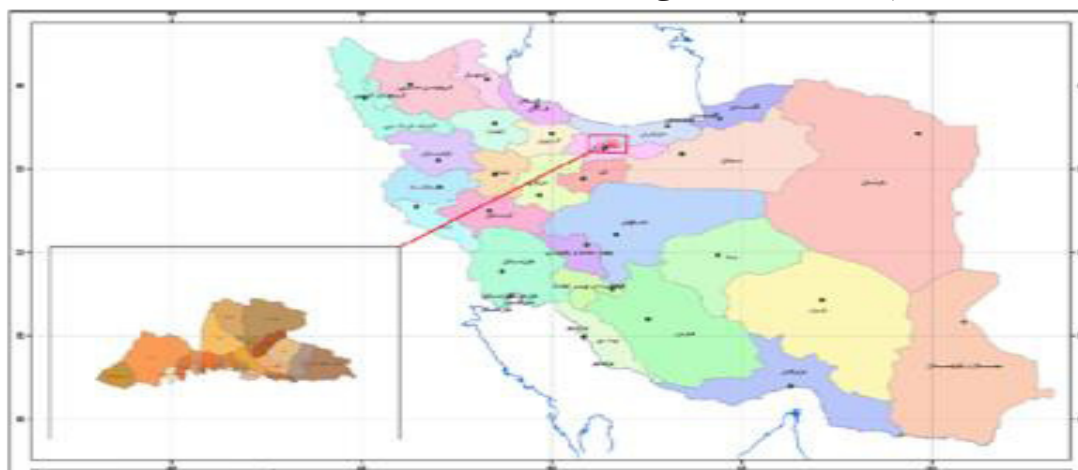
اخیراً محققان از روش خاصی در دستگاه‌های GPR برای تعیین سرعت امواج استفاده می‌کنند که به صورت محافظت شده (Shielded) کاربرد دارد. در این نوع دستگاه‌ها آنتن‌های فرستنده و گیرنده برای محافظت بیشتر در داخل یک Box (جعبه) قرار دارد و اندازه‌گیری سرعت امواج از طریق برازش منحنی هذلولی صورت می‌گیرد. به این ترتیب که پس از برداشت داده‌های GPR در ثبت راداری^۴ (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 زیرسطحی به گونه‌ای که بر روی گذردهی دی‌الکترونیک اثر بگذارد و بازتاب این امواج در بالای این عوارض تشکیل می‌شود. از طریق برازش دادن منحنی مناسب بر روی این هذلولی‌ها و انتخاب بهترین منحنی برازش شده، می‌توان مناسب‌ترین سرعت امواج رادار را به دست آورد (Bello and kamarudin, 2011). این

- 1-Common Mid Point
- 2- Fixed Offset
- 3- Hyperbolic Fitting
- 4-Radargram

آن کم و در مواردی، مجموعه ای از قطعات سنگریزه در نیمرخ خاک وجود دارد که می تواند باعث انعکاس امواج GPR در خاک-های زیرسطحی و تشکیل هذلولی در ثبت راداری ها شود. منطقه دارای پوشش های پراکنده ای از گیاهان مرتعی می باشد. عمق خاک در کل منطقه از خاک های کم عمق تا عمیق متغیر می باشد.

منطقه ی مورد مطالعه

این پژوهش در یک منطقه به وسعت ۲ هکتار از دامنه های جنوبی رشته کوه های البرز با مختصات تقریبی ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۷ دقیقه شرقی که در شمال غرب تهران واقع گردیده، انجام شد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. خاک منطقه عمدتاً جزء خاک های لیتوسل (انتی سول و اینسپتی سول) می باشد که تحول نیم رخی در



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه ی مورد مطالعه

وزنی و TDR در هر روز چند پروفیل برداشت شد تا امکان اندازه گیری های وزنی و TDR همزمان با اندازه گیری های GPR وجود داشته باشد. در این پژوهش تعداد ۳۰ نیمرخ با استفاده از دستگاه GPR برداشت شد. برای برداشت داده به وسیله GPR از روش برداشت معمول^۱ استفاده شد. در این روش برداشت دستگاه GPR در امتداد خط برداشت حرکت داده می شود و خاک زیرسطحی به وسیله دستگاه اسکن می شود که حاصل آن تصاویری می باشد که در محیط نرم افزاری قابل پردازش و تفسیر می باشند.

جمع آوری داده ها

در این تحقیق از یک روش GPR مدل Akula ۹۰۰۰ با سطح آنتن ۷۰۰ مگاهرتزی استفاده شد و به منظور ارزیابی دقت دستگاه GPR در اندازه گیری رطوبت خاک روش نمونه های حجمی و TDR به عنوان روش های مرجع برای مقایسه داده های روش GPR استفاده شدند. جمع آوری داده ها بعد از بارندگی رخ داده در اواسط اردیبهشت سال ۱۳۹۲ انجام شد. به دلیل لزوم همزمانی برداشت های GPR با اندازه گیری های



شکل ۳- برداشت داده با استفاده از دستگاه GPR

1-Common Offset

امواج GPR در محیط نرم‌افزار GPRSoft و در فهرست تحلیل سرعت آن از طریق برازش هذلولی اندازه‌گیری شد. سرعت و ثابت دی‌الکتریک بسته به بهترین منحنی برازش شده بر روی هذلولی‌های تشکیل شده در ثبت راداری‌ها بدست آمد. ثابت دی‌الکتریک به دست آمده از طریق رابطه تاپ و همکاران (۱۹۸۰) به رطوبت حجمی خاک تبدیل شد.

محاسبات آماری

به منظور مقایسه کمی بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت شاخص‌های آماری حداکثر خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب مجموع باقی‌مانده (CRM) بررسی شدند و مقدار ضریب همبستگی (R) بین متغیرها به دست آمد. براساس منابع (جاهد و همکاران، ۱۳۹۰)، کمترین مقادیر ME و RMSE، صفر است، در حالی که CRM می‌تواند مقادیر منفی نیز داشته باشد. مقادیر بالای ME بیانگر بدترین پیش‌بینی یک مدل و یا یک مقایسه در مقابل مقدار مشاهداتی می‌باشد. در حالی که هر چه RMSE بالاتر باشد نشان می‌دهد که داده پیش‌بینی شده در مقایسه با داده‌های مرجع چه اندازه بیش برآورد یا کم برآورد بوده‌اند (جاهد و همکاران، ۱۳۹۰). شاخص CRM پیش‌بینی دست‌بالا یا دست‌پایین از داده‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر منفی CRM نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های یک مدل در مقایسه با مقادیر مشاهداتی بیشتر اندازه‌گیری شده‌اند، در حالی که مقادیر مثبت CRM نشان می‌دهد که مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی مقادیر کمتری را اندازه‌گیری کرده است (Homaei et al., ۲۰۰۲).

نتایج

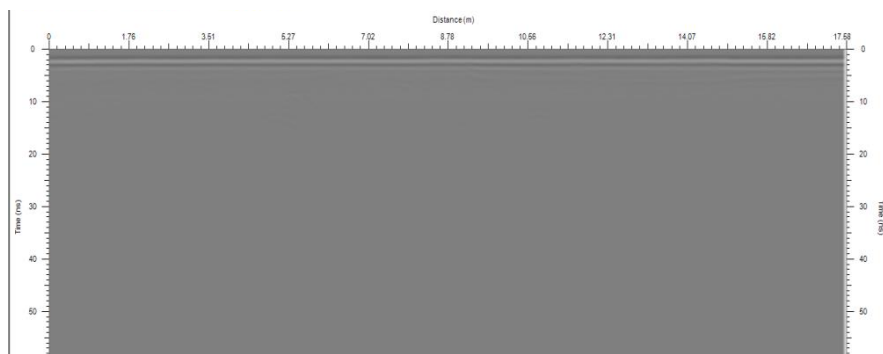
در اشکال زیر نمونه‌ای از یک ثبت راداری خام در محیط نرم‌افزار (شکل ۴)، همان ثبت راداری پس از پردازش همراه با هذلولی‌های تشکیل شده در آن (شکل ۵) و منحنی‌های برازش داده شده روی هذلولی‌ها در این ثبت راداری (شکل ۶) نشان داده شده است.

همچنین، با استفاده از هریک از روش‌های حجمی و TDR منطبق براندازه‌گیری‌های GPR نمونه‌های خاک به منظور تعیین رطوبت حجمی برداشت شد و مقدار حجمی رطوبت از طریق هر دو روش به دست آمد. برای این منظور در امتداد هریک از نیم‌رخ‌های برداشتی با GPR چاله‌ای به عمق ۷۰-۵۰ سانتی‌متر حفر شد و برای برداشت داده‌های TDR از یک دستگاه TDR با حسگرهایی به طول ۱۵ سانتی‌متر استفاده شد. این حسگرها به صورت افقی در خاک فرو برده شدند و سپس قرائت‌های مربوط به رطوبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک ثبت شدند. به منظور تعیین رطوبت خاک در آزمایشگاه از یک مته نمونه‌برداری با استوانه‌های به حجم ۱۷۶ سانتی‌متر مکعب استفاده گردید و همزمان با اندازه‌گیری‌های TDR نمونه‌های خاک برداشت شد و برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی به روش آون خشک و اندازه‌گیری بافت خاک به آزمایشگاه منتقل شدند. رطوبت وزنی هریک از نمونه‌ها تعیین و سپس به رطوبت حجمی خاک تبدیل شدند. عمق نمونه‌برداری در روش‌های حجمی و TDR، ۷۰-۵۰ سانتی‌متر بود. دلیل انتخاب این عمق، هذلولی‌های تشکیل شده در تصاویر برداشت‌شده با استفاده از دستگاه GPR بود. زیرا هذلولی‌های آشکارشده در این تصاویر که امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک را می‌دهد در این عمق بودند.

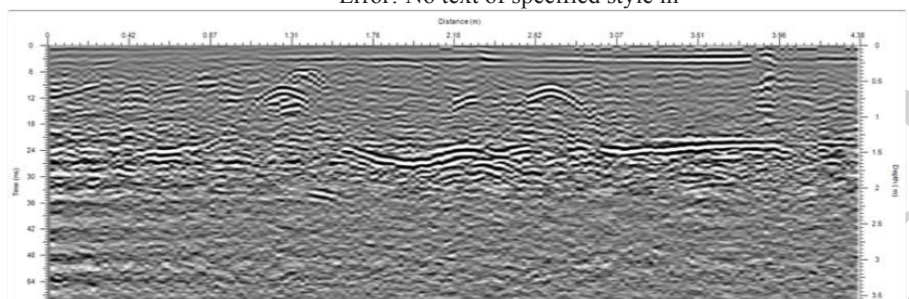
تفسیر داده‌های GPR

برای تفسیر نیم‌رخ‌های برداشت شده GPR که به شکل تصویر می‌باشند و اصطلاحاً ثبت راداری نامیده می‌شوند از نرم‌افزار GPRSoft PRO نسخه ۱.۷.۲۳ استفاده شد. این نرم‌افزار دارای قفل سخت‌افزاری بوده و در هر زمان فقط یک نفر قادر به پردازش داده با آن می‌باشد. پردازش‌های مورد نیاز که شامل تصحیح ایستا^۱، حذف پس‌زمینه^۲، دی‌واو^۳ و تابع بهره^۴ و بود، بر روی داده‌ها اعمال شد تا تصاویر خام به شکل تصاویر پردازش شده و قابل تفسیر در بیاید. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از GPR نیاز به اندازه‌گیری سرعت امواج رادار و نهایتاً ثابت دی‌الکتریک می‌باشد. این سرعت

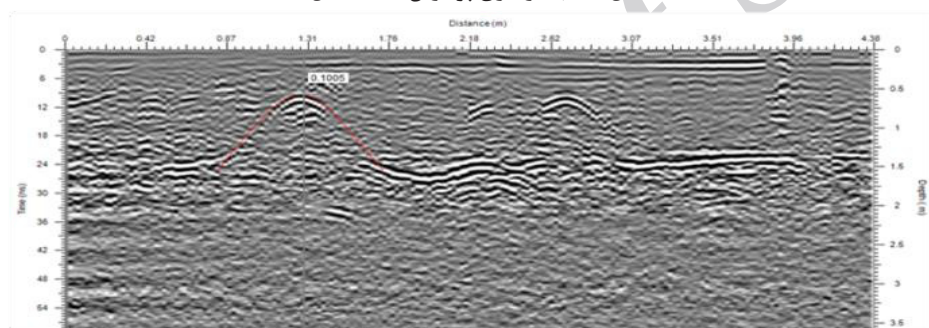
- 1-Static correction.
- 2- Background Removal.
- 3-Dewow
- 4-Gain function



Error! No text of specified style in



شکل ۵- تثبیت راداری پردازش شده، شکل ۴



شکل ۶- منحنی فیت شده بر روی هذلولی (hyperbolic fitting)

این بافت بودند. در جدول ۱ شاخص های آماری محاسبه شده برای مقایسه کمی بین روش های اندازه گیری GPR و TDR در مقایسه با روش نمونه های حجمی آمده اند.

نتایج حاصل از بافت خاک نشان دادند که خاک منطقه شامل سه نوع بافت لوم، لوم شنی و لوم لای می باشد. با وجود این بیشتر بافت های بدست آمده خاکی با بافت لوم شنی بودند که از ۳۰ نمونه گرفته شده، ۱۵ نمونه دارای

جدول ۱- شاخص های آماری محاسبه شده برای مقایسه کمی روش های GPR و TDR در مقایسه با روش حجمی

شاخص های آماری (برحسب درصد حجمی رطوبت)			روش های مورد مقایسه
RMSE	ME	CRM	
۲/۰۶	۴/۹	-۰/۰۵۳	TDR در مقایسه با روش نمونه های حجمی
۳/۳۲	۵/۸	-۰/۱۶	GPR در مقایسه با روش نمونه های حجمی

نشان می دهد روش TDR در مقایسه با روش GPR پیش بینی های بهتری از اندازه گیری رطوبت خاک داشته است. با این وجود با توجه به اختلاف کم این روش نسبت به روش TDR می توان نتایج حاصل از آن را امیدوارکننده توصیف کرد. مقادیر منفی CRM نشان می دهد که هر دو روش TDR

در این مقایسه روش نمونه های حجمی به عنوان مبنا برای هر دو روش TDR و GPR استفاده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار هر سه شاخص RMSE، ME و CRM زمانی که از روش GPR برای اندازه گیری رطوبت استفاده شده، افزایش پیدا کرده است که به طور کلی

روش GPR در مقابل روش‌های وزنی و TDR را به عنوان روش‌های مبنا نشان می‌دهد.

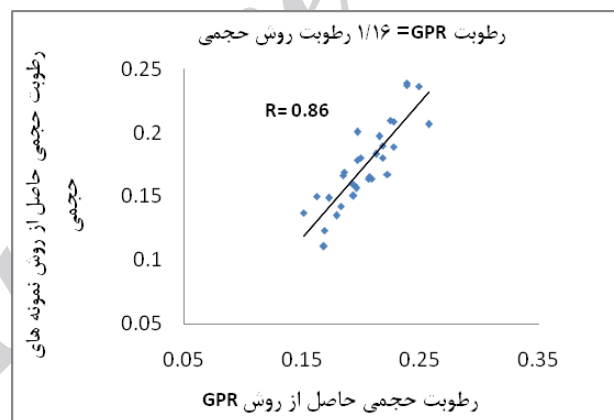
و مقدار رطوبت را نسبت به روش وزنی بیشتر (بیش برآورد) نشان داده‌اند. هر چند این مقدار (-/۱۶) برای روش GPR بیشتر از روش TDR (-/۰۵۳) است. جدول ۲ شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای مقایسه کمی

جدول ۲- شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای مقایسه کمی روش GPR در مقایسه با روش‌های حجمی و TDR

شاخص‌های آماری (بر حسب درصد حجمی رطوبت)			روش‌های مورد مقایسه
RMSE	ME	CRM	
۳/۳۲	۵/۸	-۰/۱۶	GPR در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی
۲/۴	۵	-۰/۱	GPR در مقایسه با روش TDR

دی‌الکتریک برآورد می‌کنند. ویرمولر و همکاران (۲۰۰۷)، RMSE بالاتر از ۷ را به عنوان شکست روش GPR در اندازه‌گیری رطوبت خاک گزارش کردند. با توجه به آزمایش‌های بافت خاک حاصل از هر ۳۰ نمونه خاک که نشان دهنده وجود خاک با بافت لوم شنی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد، این مقادیر از RMSE برای اندازه‌گیری رطوبت در این خاک‌ها می‌تواند قابل قبول باشد. مقادیر منفی شاخص CRM برای هر دو اندازه‌گیری نشان می‌دهد که روش GPR مقدار رطوبت را بیشتر (برآورد بالاتر) از هر دو روش‌های حجمی و TDR منعکس کرده است. شکل (۷) رابطه بین رطوبت‌های حاصل از روش GPR را در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی نشان می‌دهد.

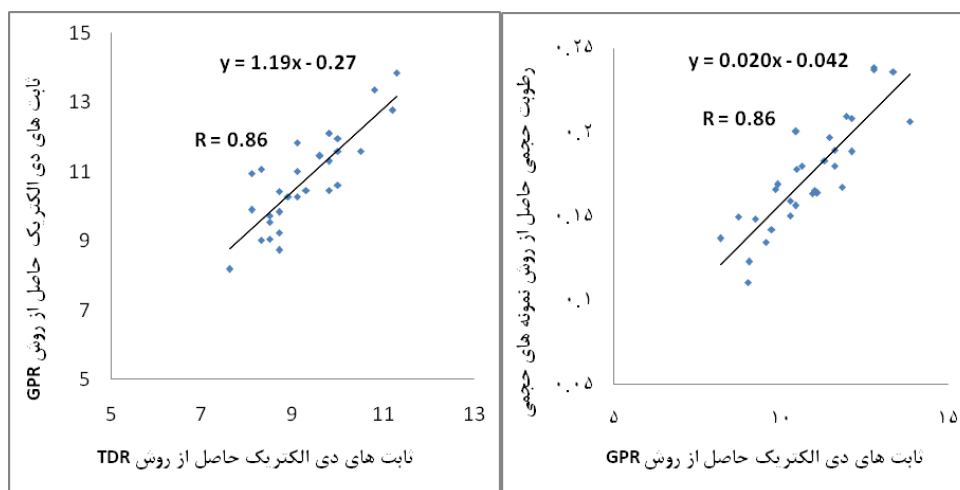
مقدار RMSE به دست‌آمده برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به وسیله GPR در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی برابر ۳/۳۲ می‌باشد این مقدار از RMSE در مقایسه با RMSE به دست‌آمده از مقایسه بین روش‌های GPR و TDR که برابر ۲/۴ بود مقدار بالاتری را نشان داده است. به این معنی که در زمانی که از دو روش نمونه‌های حجمی و TDR به عنوان مبنا برای مقایسه رطوبت‌های حجمی به دست‌آمده از روش GPR استفاده شد، اختلاف کمتری بین دو روش TDR و GPR نسبت به دو روش GPR و GPR حجمی وجود داشته است. مقایسه شاخص‌های ME نیز بیانگر همین مطلب است. این امر می‌تواند به دلیل ماهیت یکسان دو روش GPR و TDR در اندازه‌گیری رطوبت خاک باشد زیرا هر دو روش رطوبت را بر اساس ثابت



شکل ۷- رابطه‌ی بین رطوبت‌های حجمی محاسبه‌شده با روش GPR در مقایسه با روش نمونه‌های حجمی

دو رابطه برابر برابر ۰/۸۶ می‌باشد. این ضریب نشان می‌دهد که افزایش رطوبت خاک در روش حجمی با افزایش ثابت دی‌الکتریک روش GPR همراه بوده است.

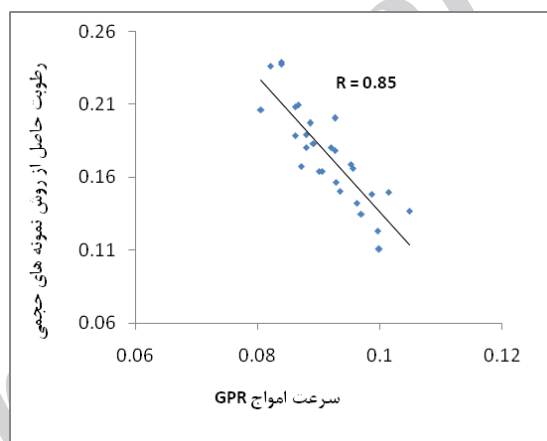
در شکل ۸ رابطه بین ثابت‌های دی‌الکتریک محاسبه‌شده با دو روش GPR و TDR نشان داده شده است. همچنین رابطه بین ثابت‌های دی‌الکتریک حاصل از روش GPR و رطوبت‌های حجمی به دست‌آمده با روش نمونه‌های حجمی نشان داده شده است. ضرایب همبستگی در هر



شکل ۸- رابطه‌ی بین ثابت‌های دی‌الکتریک GPR، با ثابت‌های دی‌الکتریک TDR و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش حجمی

افزایش مقدار رطوبت خاک مقدار سرعت امواج GPR در خاک زیر سطحی کاهش می‌یابد و ضریب همبستگی این رابطه ۰/۸۵ می‌باشد.

در شکل ۹ رابطه بین سرعت امواج GPR و رطوبت های اندازه گیری شده به روش نمونه های حجمی نشان داده شده است. این رابطه عکس رابطه بین ثابت دی‌الکتریک با رطوبت حجمی خاک است و نشان می‌دهد که با



شکل ۹- رابطه‌ی بین سرعت امواج GPR و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش حجمی

TDR در اندازه‌گیری رطوبت خاک باشد. با توجه به RMSE به دست آمده از مقایسه بین داده‌های GPR با روش وزنی (۳/۳۲) می‌توان نتیجه گرفت که روش GPR در این مطالعه با خطایی قابل قبول در مقایسه با روش وزنی توانسته است رطوبت را در خاک هایی با بافت متوسط تا درشت برآورد کند. این مقدار از خطا در مقایسه با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های (۲۰۱۲) Minet et al در خاک با بافت لوم سیلتی که دارای ۸۰ درصد سیلت، ۱۴ درصد رس و ۴ درصد شن بود (ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۲/۳۳) مقدار بیشتری را نشان داد. اما در مقایسه با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های Huisman et al (۲۰۰۷) در خاک‌های با مقدار زیاد رس و لای و

بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل و مقایسه شاخص‌های آماری تحلیل، می‌توان گفت که روش TDR می‌تواند با خطای قابل قبولی در مقایسه با روش حجمی برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک استفاده شود و به دلیل بالا بودن سرعت اندازه‌گیری روش مؤثر و مفیدی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های روش برازش هندلوی و مقایسه آن با دو روش حجمی و TDR نشان داد که اختلاف بین دو روش GPR و نمونه‌های حجمی بالاتر از اختلاف بین روش‌های GPR و TDR می‌باشد. این اختلاف کمتر می‌تواند به دلیل ماهیت یکسان دو روش GPR

different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology* 254 (1-2), 48-58.

Jahed, R., Jalal Kamali, N., and Babazadeh, H., 2011. Verification of performance of atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM) in simulating of temperature data in kerman region. *Journal of Water Resources Engineering*, No.2 (in Persian).

Lunt, I.A., Hubbard, S.S., and Rubin, Y. 2005. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology* 307 (2005) 254-269.

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.

Pan, X., Zhang, J., Huang, P., and Roth, K. 2012. Estimating field-scale soil water dynamics at a heterogeneous site using multi-channel GPR. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 8027-8062.

Saradjian, M.R., and Hosseini, M. 2011. Soil moisture estimation by using multipolarization SAR image. *Advances in Space Research* 48 (2011) 278-286.

Seger, M.A., and Nashait, A.F. 2011. Detection of water-table by using ground Penetration radar (GPR). *Eng. & Tech. Journal*, Vol.29, No.3.

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.

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

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.

در محدوده فرکانسی ۱/۶-۰/۸ گیگاهرتز که برابر ۵/۱ بود مقدار کمتری را نشان داد و اثبات می‌کند روش GPR در خاک‌های با بافت لوم شنی می‌تواند روش مناسبی برای برآورد رطوبت حجمی خاک باشد. روش GPR روشی غیرمخرب است که توانایی نظارت بر حجم‌های زیاد خاک را با ارزش موثر فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای اندازه‌گیری رطوبت به کار برده شود. با وجود این پیشنهاد می‌شود به منظور کاربرد بیشتر رادار زیرسطحی در پایش رطوبت خاک در کشور از سایر روش‌های تعیین سرعت امواج رادار، مانند روش نقطه مرکزی متداول و روش انعکاس وانکسار زاویه‌ای در اندازه‌گیری سرعت امواج و در نهایت رطوبت خاک استفاده شود و نیز آزمایشاتی برای امکان‌سنجی کاربرد این روش‌ها در خاک‌های ریز بافت انجام گیرد. انجام این تحقیق نویدبخش کاربرد بیشتر روش‌های اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از روش‌های رادار زیرسطحی در آینده می‌باشد.

منابع

Bello, Idi Md. Y., and Kamarudin, N., 2011. Ground water estimation and water table detection with ground penetrating radar. *Asia Journal of Earth Sciences* 4(3): 193-202.

Bodaghjamali, J., Ahmadian, J., Javanmard, S., Golmakani, T., and Malakizadeh, S., 2002. The necessity of monitoring the state of soil moisture in increasing the productivity of agricultural water. Eleventh Conference of Iran's National Irrigation and Drainage Committee. No. 25, 375-390 (in Persian).

Galagedara, L.W., Parkin, G.w., Redman, J.D., von Bertoldi, P., Endres, and A.L. 2005. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of Hydrology* 301 (2005) 182-197.

Homaee, M., Dirksen, C., and Feddes, R., 2002. Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57(2): 89-109.

Huisman, J.A., Sperl, C., Buoten, W., and Verstraten, J.M. 2001. Soil water content measurements at