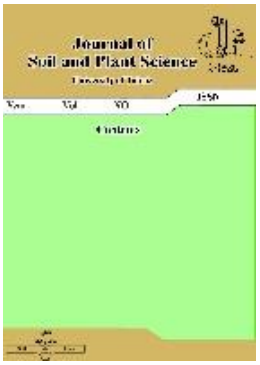
J Soil Plant Sci, 2026, 36(1): 43-60.

https://doi.org/10.22034/sps.2026.71015.1030

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir



Research Article

Possibility of Measuring the Water Content of Saline Coarse-Textured Soils Using the Time Domain Reflectometery (TDR) Method with a Coated Contact Censor

Davood Niknezhad[1]

[1]- Corresponding Author, Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of East Azarbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran. E-mail: niknezhad2005@yahoo.com

Received: December 31, 2025	**Revised:** February 21, 2026
Accepted: April 22, 2026	**Published:** April 23, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

Accurate and continuous monitoring of soil water content is critical for sustainable agricultural practices, as soil moisture plays a crucial role in biological processes such as seed germination, plant growth, and nutrient uptake. Among the various methods available for soil moisture measurement, the Time Domain Reflectometry (TDR) technique has gained widespread acceptance due to its speed, non-destructive nature, and the high accuracy in determining volumetric water content based on the soil's dielectric constant. While TDR performs reliably in normal soils, particularly those with medium textures, its accuracy is severely compromised under anomalous soil conditions, including high bulk density, extreme temperatures, high organic matter content, and notably, high salinity. Salinity poses a particular challenge because the presence of highly concentrated dissolved ions significantly increase the electrical conductivity of the soil solution. This high electrical conductivity leads to excessive signal attenuation and scattering of the electromagnetic pulse emitted by the TDR device. Consequently, the measured dielectric constant is overestimated, resulting in inaccurate or impossible determination of the actual soil moisture content. Previous research has indicated that standard TDR sensors with conventional burial probes fail to measure soil moisture when the electrical conductivity of the saturation extract exceeds approximately 15 dS/m, especially in fine-textured soils. The main purpose of this research was to design, manufacture, and calibrate a new coated contact sensor for the TDR device that overcomes the technical limitations imposed by high soil salinity and allows the TDR device to measure the moisture content of coarse-textured saline soils with high accuracy based on the regression models obtained.

Material and Methods

For this purpose, coarse-textured soil (sandy loam) was prepared from the lands around Khajeh district, 20 kilometers east of Tabriz metropolis, Iran. For the aforementioned soil, an experimental salinity model was first prepared, which calculated the amount of salt for the desired electrical conductivity. Based on the salinity model, soils with electrical conductivity of 20, 35, and 50 dS/m were prepared and, after being poured into cylindrical containers, were brought to the bulk density of 1.57 g/cm^3. Then, through trial and error, the type and amount of coating installed on the sensor waveguide rods for the aforementioned soils at the specific humidity of 30% was determined. The behavior of the coated waveguide rods for other soil moistures (air-dry to saturated) was unknown. For this purpose, soils with the aforementioned electrical conductivity were also prepared and poured into drained cubic containers and compacted until reaching the bulk density of 1.57 g/cm^3. After the samples were saturated, the coated waveguide rods were installed vertically in the soil and the soil moisture measurement inside the containers was started by gravimetric and TDR methods. It took 130 days for the soil moisture to reach air-dry state, during which 29 measurements

were made in three replicates. The data obtained after averaging the replicates were plotted in a graph and the most appropriate regression equations were presented. These equations were able to calculate the actual moisture content of saline and very saline soils with high accuracy by using the TDR method.

Results
The implementation of the specialized polymer coating on the TDR sensor rods successfully resolved the fundamental problem of signal failure in highly saline soils (up to 50 dS/m). The coated sensor reacted proportionally to changes in soil moisture content, much like a conventional sensor operates in non-saline soil. This outcome represents a significant achievement, enabling TDR measurements in soil conditions previously considered intractable. However, a systematic error was observed, particularly as the soil moisture content decreased from the saturation point towards air-dry conditions. Although the coating reduced the electrical interference, a noticeable difference persisted between the TDR-measured values and the true volumetric moisture content. This difference necessitated the development of specific calibration models for each salinity level to ensure high-accuracy estimation of the true soil moisture. Statistical analysis, utilizing indicators such as the Root Mean Square Error (RMSE), Relative Error (RE), *p*-value, and the coefficient of determination (r^2), were performed to evaluate the efficiency of various regression models. The optimal regression equations derived from the calibration data varied depending on the level of salinity: 1-For EC_e = 20 dS/m: A linear regression model provided the most accurate fit. 2-For EC_e = 35 dS/m: A quadratic (second-degree polynomial) regression model was required. 3-For EC_e = 50 dS/m: A cubic (third-degree polynomial) regression model demonstrated the best performance. These findings indicated that the non-linear relationship between the TDR reading and the actual moisture content was more complex (requiring higher-degree polynomials) as the soil salinity increased. Applying these specific calibration equations allows researchers and farm managers to calculate the actual soil moisture content with high precision, overcoming the inaccuracies associated with direct, uncalibrated TDR readings in saline environments.

Conclusion
This research enables the measurement of moisture in coarse-textured saline soils, even at very high salinity levels (over 50 dS/m), using contact sensors coated with polymeric materials using the time-domain reflectometry (TDR) method. The newly developed sensor, calibrated with empirical regression equations (linear, quadratic, and cubic), enables the measurement of soil moisture content in saline soils.

Keywords: Calibration, Electrical conductivity, Moisture sensor, Polymer coating, Salinity.

Data Availability Statement
Data is available on reasonable request from the author.

Acknowledgements
The author is thankful to the Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of East Azarbaijan for financial supports.

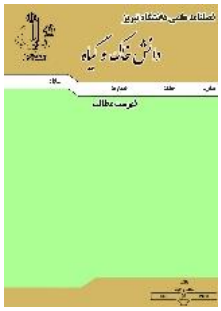
Ethical considerations
The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Niknezhad, D. (2026). Possibility of measuring the water content of saline coarse-textured soils using the time domain reflectometery (TDR) method with a coated contact sensor. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(1), 43–60.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.71015.1030

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS JOURNALS



نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۶، شماره ۱

صفحه‌های ۴۳ تا ۶۰، بهار ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22034/sps.2026.71015.1030

E-ISSN: 3092-6106
https://sps.tabrizu.ac.ir

مقاله پژوهشی

امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های درشت‌بافت شور به روش انعکاس‌سنج تأخیر زمانی (TDR) با حسگر تماسی پوشش‌دار

داود نیک‌نژاد[۱]

۱- نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. رایانامه: niknezhad2005@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰	**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲	**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

چکیده

اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR یکی از روش‌های غیرمستقیم است که در آن ثابت دی‌الکتریک خاک به رطوبت حجمی تبدیل می‌شود. روشی که سریع و بی‌خطر بوده و در خاک‌های عادی نتایج قابل‌قبولی دارد، اما برای خاک‌های شور قادر به اندازه‌گیری رطوبت خاک نیست. هدف این پژوهش ساخت حسگرهای تماسی است که دستگاه TDR را به اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های درشت‌بافت شور قادر می‌سازد. با ساخت این حسگرها می‌توان رطوبت خاک‌های شور را با دستگاه TDR اندازه‌گیری نمود و در صورت مشاهده خطا می‌توان با ارائه مدل‌های واسنجی به رطوبت واقعی خاک دست یافت. خاک با بافت لوم شنی از اراضی اطراف بخش خواجه در ۲۰ کیلومتری شرق شهر تبریز تهیه گردید و با افزودن نمک به آن، خاک‌هایی با قابلیت هدایت الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر با جرم مخصوص ۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب آماده شد. سپس از طریق آزمون و خطا، نوع و مقدار پوشش نصب شده بر روی میله‌های حسگر برای خاک‌های مذکور در یک رطوبت مشخص (۳۰ درصد) تعیین شد. این پوشش برای یکی از میله‌ها یک لایه رنگ کوره با یک لایه روکش حرارتی و برای میله دیگر ۲/۵ لایه روکش حرارتی به‌دست آمد. میله‌های پوشش‌دار برای سایر رطوبت‌های خاک (اشباع تا هواخشک) نیز رفتارسنجی شدند و با توجه به شاخص‌های آماری RMSE، RE، *p*-value و r^2 مناسب‌ترین معادلات رگرسیونی ارائه گردیدند که برای خاک‌های با قابلیت هدایت الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب خطی، درجه دو و درجه سه بودند که بر اساس آن‌ها می‌توان رطوبت خاک شور را با دقت بالا محاسبه نمود.

واژه‌های کلیدی: انعکاس‌سنجی، پوشش پلیمری، حسگر رطوبتی، خاک شور ، واسنجی

استناد به این مقاله: نیک‌نژاد، د. (۱۴۰۵). امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های درشت‌بافت شور به روش انعکاس‌سنج تأخیر زمانی (TDR) با حسگر تماسی پوشش‌دار. *نشریه دانش خاک و گیاه*، ۳۶(۱)، ۶۰-۴۳.
https://doi.org/10.22034/sps.2026.71015.1030

مقدمه

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک بوده که نقش مهمی در فرایندهای بیولوژیک مانند جوانه زدن بذر، رشد گیاه و تغذیه آن دارد. نفوذ آب در خاک و تبخیر – تعرق، رطوبت خاک را از نظر زمانی و مکانی تغییر می‌دهد. بنابراین، پایش پیوسته وضعیت رطوبتی خاک ضروری است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک وجود دارد که به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. تعیین مقدار رطوبت خاک به روش وزنی که یک روش مستقیم است معیاری است که روش‌های غیرمستقیم معمولاً بر اساس آن واسنجی می‌شوند. علت استفاده از برخی روش‌های غیرمستقیم به جای روش وزنی، سریع بودن، کم‌هزینه بودن و دست‌نخوردگی خاک است (Hunduma & Kebede, 2020). به کمک روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک از جمله روش انعکاس‌سنجی تأخیر زمانی (TDR)، انعکاس‌سنجی تأخیر فرکانسی (FDR) و مقاومت‌سنجی که رطوبت خاک را بر اساس برخی از شاخص‌های الکتریکی خاک از جمله ثابت دی‌الکتریک، فرکانس و مقاومت الکتریکی تعیین می‌نمایند، می‌توان مقدار رطوبت و شوری خاک را به‌طور خودکار اندازه‌گیری کرد و به دستگاه یا مراکز مور نظر ارسال نمود تا بر اساس موارد ارسالی مدیریت لازم در مورد زمان آبیاری، تغذیه گیاه و غیره انجام شود (Pandey *et al.*, 2018).

روش‌هایی مانند تتاپروب، FDR و TDR که روش‌های نسبتاً جدیدی در اندازه‌گیری رطوبت خاک هستند، روش‌های سریع و بی‌خطر بوده و مقدار رطوبت حجمی خاک را بدون دست‌خوردگی خاک بر اساس ویژگی‌های استثنایی آب از جمله ثابت دی‌الکتریک آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن با دقت قابل‌قبولی تعیین می‌نمایند. روش TDR در خاک‌های عادی و دارای شرایط نرمال به‌ویژه بافت‌های متوسط نتایج نسبتاً دقیق و قابل‌قبولی ارائه می‌دهد اما در خاک‌های با شرایط نامتعارف از جمله با شوری زیاد (Niknejad *et al.*, 2022)، تراکم زیاد، خیلی ریزبافت و دارای ماده آلی زیاد (Jacobsen & Schjonning, 1993) و دمای زیاد (Schanz *et al.*, 2011) نتایج به دست آمده با مقدار واقعی متفاوت بوده و با خطا همراه است. به همین دلیل معادلات و مدل‌های زیادی در این خصوص توسط پژوهشگران ارائه شده است که این مدل‌ها تابعی از یک یا چند عامل (از جمله درصد ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری خاک، دمای خاک و تخلخل) است (Dobson *et al.*, 1985; Jacobsen & Schjonning, 1993; Schanz *et al.*, 2011). Abdullah et al. (2020) در مورد اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های ریزبافت و در حالت مرطوب، دقت دستگاه TDR در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک کاهش می‌یابد. Niknejad et al. (2017) دریافتند که در خاک‌های ریزبافت با شوری زیاد روش TDR با حسگر دفنی معمولی قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک نبود و لذا نمی‌توان در این مورد معادله یا مدل واسنجی مشخصی ارائه نمود.

از طرف دیگر خاک‌های شور کشور که وسعت زیادی دارند، روز به روز بر وسعت آن‌ها افزوده می‌شود. زمین‌های کشاورزی نیز که دارای شوری شدید خاک هستند، چندین کیلومترمربع مساحت دارند (Saadat *et al.*, 2023). بنابراین، برای مدیریت خاک‌های شور و برنامه‌ریزی‌های لازم مرتبط با وضعیت رطوبتی خاک، نیاز به اندازه‌گیری و پایش رطوبتی خاک است. به همین دلیل اصلاح حسگر تماسی معمولی و امکان‌پذیر ساختن اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور به روش TDR امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

۱- Frequency Domain Reflectometry

استفاده از روش TDR اولین بار به‌وسیله Topp et al. (1980) انجام شد. آنان از ضریب دی‌الکتریک برای تعیین غیرمستقیم رطوبت خاک استفاده کردند و برای این کار از یک معادله تجربی درجه سه برای ارتباط بین ضریب دی‌الکتریک و میزان رطوبت حجمی خاک بهره بردند. مدل دیگر که پایه فیزیکی دارد بر اساس ترکیبی از ثابت دی‌الکتریک سه فاز تشکیل دهنده توده خاک استوار است. این مدل با عنوان مدل ترکیبی[1]شناخته شده و به‌وسیله Dobson et al. (1985) و Roth et al. (1990) ارائه شده است.

برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که شوری زیاد خاک باعث پراکنده شدن سیگنال منعکس شده در خاک گردیده و درنتیجه باعث افزایش زمان برگشت امواج و خطا در اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی خاک به‌وسیله دستگاه TDR می‌شود. این شوری زیاد (به‌دلیل زیاد بودن ثابت دی‌الکتریک نمک مرطوب نسبت به نمک خشک) ضریب دی‌الکتریک خاک را افزایش می‌دهد و منجر به تخمین زیادتر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده می‌شود (Rhoades *et al.*,1989; White *et al.* 1994; Hook & Livingston, 1995; Wyseure *et al.*, 1997; Sun *et al.*, 2000; Namdar Khojasteh *et al.*, 2011).

قطبی بودن مولکول‌های آب عامل اصلی ضریب دی‌الکتریک بزرگ (۸۰) این ماده است و هر عاملی که باعث تغییر در میزان قطبی شدن آب باشد، باعث تغییر در ضریب دی‌الکتریک آب نیز می‌شود. کاهش قطبیت و گشتاور در یک میدان مغناطیسی باعث کاهش ضریب دی‌الکتریک آب می‌شود. برای آب پیوندی که به‌طور مستقیم به سطح ذرات خاک چسبیده است، ضریب دی‌الکتریک خیلی کم (۳/۲) تعیین شده است (Or & Wraith, 1999). آب پیوندی[2]مانع از قطبی شدن مولکول‌های آب به‌وسیله جذب الکترواستاتیک زیاد روی بارهای منفی در سطح ذرات خاک می‌شود (Shang, 1994) که این عامل باعث برگشت سریع‌تر موج و کوتاه‌تر شدن زمان عبور امواج یا زمان تأخیر می‌شود. بنابراین، وجود آب پیوندی منجر به تخمین کمتر مقدار رطوبت خاک می‌شود. در خاک‌های شنی و لومی سطح ویژه و نیروهای نگه‌دارنده آب پیوندی خیلی کم می‌باشند ولی در خاک‌های رسی با سطح ویژه زیاد، جذب شدن مولکول‌های آب بیشتر و قوی‌تر شده و اثر آب پیوندی در این نوع خاک‌ها قابل توجه می‌شود (Jacobsen & Schjonning, 1993).

Tokova et al. (2019) تأثیر مصرف کود نیتروژن در خاک را بر دقت اندازه‌گیری رطوبت به روش TDR بررسی و گزارش کردند که افزودن کود نیتروژن به خاک باعث افزایش غلظت نمک در خاک شده و دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک در این روش کاهش می‌یابد. بنابراین، لازم است که در اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک مورد نظر به روش TDR عمل واسنجی انجام شود. تحقیقات انجام شده به‌وسیله Jamali et al. (2023) نشان می‌دهد که افزایش ماده اصلاح‌کننده زایتونیک باعث افزایش دقت در اندازه‌گیری رطوبت به روش TDR در خاک‌های ریزبافت می‌شود.

Eskandari et al. (2003) با اندازه‌گیری شوری چهار خاک با شوری‌های مختلف به روش TDR و مقایسه نتایج حاصله با روش متداول هدایت‌سنج الکتریکی نشان دادند که اندازه‌گیری در خاک‌هایی با قابلیت هدایت الکتریکی بیش از پنج دسی‌زیمنس بر متر به روش TDR به‌دلیل افت زیاد موج بازگشتی، باعث خطا در ارزیابی ضریب دی‌الکتریک شده و به دنبال آن درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده خاک با خطا مواجه

[1]Mixing model
[2]Bound water

می‌شود. Xiao et al. (2018) در مورد اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های بسیار شور پژوهش‌هایی انجام دادند. آنان توانستند با روکش‌دار نمودن یکی از میله‌های حسگر دفنی با مواد پلاستیکی، رطوبت خاک‌های شور را به روش TDR اندازه‌گیری نمایند. پژوهش‌های Niknejad et al. (2017) نشان داد که برای خاک‌های ریزبافت در مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر، اندازه‌گیری مقدار رطوبت به روش TDR به‌ترتیب در رطوبت‌های بیشتر از ۳۸ و ۳۱ درصد حجمی با استفاده از حسگر دفنی مدل 6005L که میله‌های آن بدون پوشش پلیمری است، ممکن نیست و برای خاک‌های درشت‌بافت و متوسط‌بافت در شوری ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب در رطوبت‌های بیشتر از ۱۱ و ۳۷ درصد حجمی نمی‌توان مقدار رطوبت خاک را به روش مذکور تعیین نمود.

با توجه به موارد فوق چنین استنباط می‌شود که اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به روش TDR با استفاده از حسگرهای دفنی و تماسی معمولی که دارای میله‌های بدون پوشش بوده است، در خاک‌های شور دارای محدودیت است و به‌دلیل ایجاد اختلال در دستگاه، امکان اندازه‌گیری مقدار دقیق رطوبت در خاک‌های شور و خیلی شور میسّر نیست. بررسی‌های انجام شده در ایران نشان می‌دهد که اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور به روش TDR با حسگرهای تماسی پوشش‌دار بررسی نشده و به همین دلیل واسنجی این روش نیز با حسگر پوشش‌دار مورد پژوهش قرار نگرفته است و حتی در منابع خارجی نیز موردی در این مورد یافت نشد. بنابراین، پژوهش در این مورد لازم و ضروری است و در صورت محقق شدن می‌توان مقدار رطوبت خاک‌های شور را با دقت مناسب اندازه‌گیری کرد و برنامه‌ریزی‌های لازم را در موارد مرتبط با رطوبت خاک انجام داد. بنابراین، هدف از این پژوهش ساخت و واسنجی حسگر رطوبتی تماسی و امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور درشت‌بافت به روش TDR است تا بتوان بر اساس آن برنامه‌ریزی‌های لازم را در این مورد انجام داد.

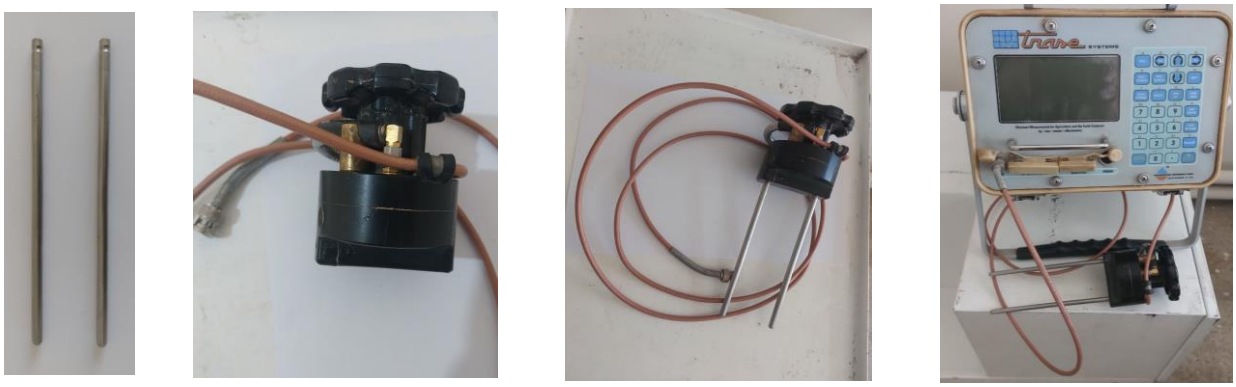
مواد و روش‌ها

معرفی دستگاه TDR و حسگر رطوبتی

دستگاه TDR که به آن بازتاب زمانی امواج گفته می‌شود از نوع Trase مدل 6050X1 ساخت شرکت Soil Moisture است. اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک با این دستگاه بر پایه ارسال امواج الکترومغناطیس در طول میله حسگر و دریافت امواج برگشتی استوار است. با توجه به منحنی‌های تبدیل که بر اساس نوع حسگر در ساختار نرم‌افزار داخلی دستگاه به‌وسیله شرکت سازنده قرار داده شده است، ثابت دی‌الکتریک به مقدار رطوبت حجمی خاک تبدیل می‌شود و یا بر اساس مدل‌های مختلفی که به‌وسیله پژوهشگران ارائه شده‌اند، می‌توان ثابت دی‌الکتریک قرائت شده با دستگاه TDR را به مقدار رطوبت حجمی خاک تبدیل نمود. در صورتی که رطوبت حجمی (رطوبت وزنی تبدیل شده به حجمی) با رطوبت به‌دست آمده از معادلات یا منحنی‌های موجود متفاوت بود، می‌توان با قرائت تعدادی ثابت دی‌الکتریک و رطوبت‌های حجمی متناظر با آن‌ها در دامنه رطوبتی خاک (هواخشک تا اشباع) منحنی یا معادله واسنجی را استخراج نمود (TRASE System Manual, 1996).

دستگاه TDR دارای حسگر دفنی سه شاخه به طول میله‌های ۲۰ سانتی‌متر و حسگرهای تماسی دو شاخه با طول میله‌های ۱۵، ۳۰، ٤٥، ٦٠ و ۷۰ سانتی‌متر است. این دستگاه دارای سه پنجره زمانی اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ٤٠ نانوثانیه است که پنجره ۱۰ نانوثانیه برای حسگرهای با طول میله‌های ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر از طرف کارخانه سازنده پیشنهاد شده و برای حسگرهای با طول میله‌های بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر بهتر است از پنجره زمانی بزرگ‌تر استفاده شود (TRASE System Manual, 1996).

حسگر رطوبتی مورد استفاده در این پژوهش از نوع تماسی بوده که دارای دو میله موج‌بر است. این میله‌ها به‌وسیله یک رابط یا کلاهک و کابل هم‌محور با دستگاه TDR ارتباط الکتریکی برقرار می‌کند. قطر میله‌های موج‌بر شش میلی‌متر و طول مؤثر آن‌ها که در داخل خاک قرار می‌گیرد، ۱۵ سانتی‌متر است. یکی از میله‌ها به‌عنوان فرستنده امواج و دیگری به‌عنوان گیرنده امواج عمل می‌نماید. آلیاژ این حسگر بر اساس مهندسی معکوس به‌وسیله پژوهشگران پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری از روی نمونه خارجی شناسایی شده که نام تجاری آن فولاد با کد ۳۰۵ است (Kamali & Mehdian, 2009; Roghani *et al.*, 2011). شکل ۱ دستگاه TDR را به‌همراه جزئیات حسگر تماسی نشان می‌دهد.



شکل ۱- به‌ترتیب از چپ به راست: میله‌های موج‌بر حسگر رطوبتی، کلاهک رابط، میله‌های موج‌بر همراه با کلاهک و سیم رابط و دستگاه TDR.

تهیه نمونه خاک

در این پژوهش از خاک درشت‌بافت استفاده شد که از اراضی اطراف بخش خواجه در فاصله ۲۰ کیلومتری کلان‌شهر تبریز از توابع استان آذربایجان‌شرقی تهیه گردید. جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. اندازه گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های استاندارد انجام شد
(Sparks, 1996; Dane & Topp, 2002).

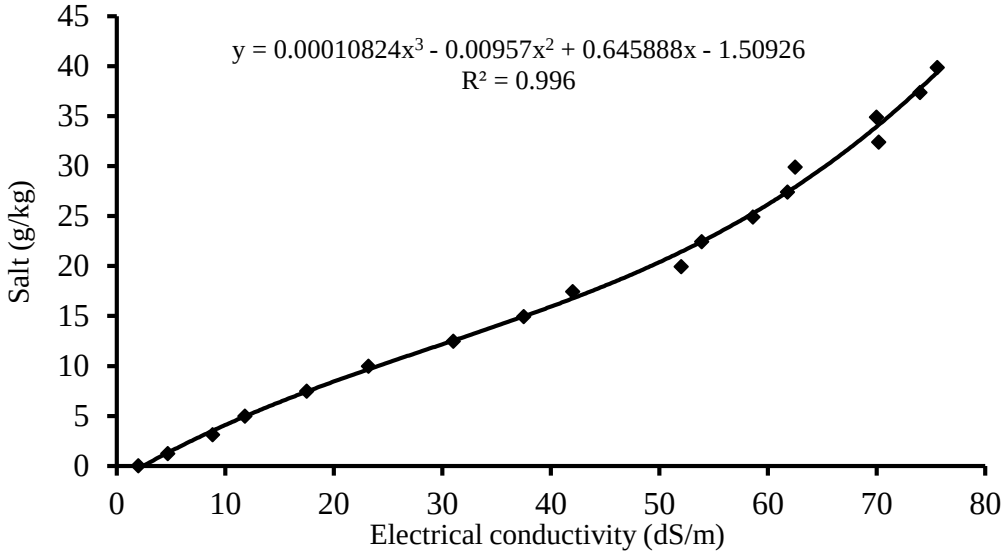
جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.

محل	مختصات محل (UTM)		عمق	EC	pH	OC	ρ_b	ρ_s	FC	PWP	Sand	Silt	Clay	بافت
	Y	X	cm	(dS/m)		(%)	(g/cm^3)	(g/cm^3)	(٪وزنی)	(٪وزنی)	(%)	(%)	(%)	
Khajeh	4212905	630009	0 - 30	0.66	8.0	0.25	1.57	2.66	15.09	4.55	77	12	11	Loam sandy

چگونگی ایجاد شوری مشخص در خاک

از آنجایی‌که در شرایط طبیعی و برای خاک‌های مختلف ترکیب املاح موجود در خاک‌ها متفاوت است، برای کاهش خطا و استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای شرایط صحرایی بهتر است تا حد امکان شرایط آزمایشگاهی خاک را از نظر شوری و درجه تراکم به حالت طبیعی نزدیک‌تر ساخت. با توجه به نتایج پژوهش علی‌اصغرزاد (2000) درصد وزنی نمک‌های غالب در خاک‌های دشت تبریز مشخص شده است. این نمک‌ها عبارت بودند از منیزیم سولفات (۱٤/۹۱ درصد وزنی)، سدیم سولفات (۳۰/٦۲ درصد وزنی)، سدیم کلرید (۲۷/۷۰ درصد وزنی) و کلسیم کلرید (۲٦/۷۷ درصد وزنی). در این پژوهش نیز از همین درصدهای وزنی استفاده شد.

برای ایجاد شوری‌های مختلف ابتدا خاک مورد نظر از الک شماره ۵ عبور داده شد و به حالت هواخشک رسانده شد. سپس مقدار مشخصی از وزن خاک (۱٦۰٦ g =خاک خشک + نمک) با در نظر گرفتن رطوبت هواخشک (۰/۵ درصد) و جرم مخصوص ظاهری (۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در حجمی معادل ۱۰۲۳ سانتی‌متر مکعب جای داده شد. اضافه کردن نمک به خاک به این صورت بود که نمک به شکل محلول درآمده و بعد به خاک اضافه شد و آنقدر به هم زده شد تا نمونه تقریباً یکنواخت به‌دست آید. سپس خاک شور در داخل ظرف استوانه‌ای (به قطر ۱۲/٤ و عمق ۱٤ سانتی‌متر) ریخته شد و با تراکم طبیعی (۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) به عمق ۸/۵ سانتی‌متر متراکم گردید. کف ظرف دارای فیلتر شنی و تعدادی حفره بود. بعد از اشباع شدن خاک آن را بر روی زمین پخش کرده تا خشک شود و بعد از عبور دادن از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) عصاره اشباع آن تهیه و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) آن اندازه‌گیری شد. این عمل برای مقادیر مختلف نمک ۱۸ مورد تکرار شد و به‌ازای مقادیر نمک، ۱۸ مورد قابلیت هدایت الکتریکی متناظر به‌دست آمد. سپس داده‌ها مطابق شکل ۲ در برنامه اکسل به نمودار تبدیل و بهترین معادله رگرسیونی بر داده‌ها بزازش داده شد که تابعی از قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک بود. با وارد کردن مقدار قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (برحسب دسی‌زیمنس بر متر) در آن می‌توان مقدار نمک بر حسب گرم (نمک) در کیلوگرم (نمک+خاک خشک) را محاسبه نمود.



شکل ۲- منحنی هدایت الکتریکی به‌ازای مقادیر مختلف نمک برای خاک درشت‌بافت.

در این پژوهش برای خاک مورد نظر سه سطح شوری در سه تکرار انتخاب شد که قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع آن‌ها برابر ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. مقادیر نمک به‌دست آمده و درصدهای آن‌ها در خاک برای شوری‌های مذکور به ازای یک کیلوگرم از خاک (یک کیلوگرم= خاک خشک + نمک) مطابق جدول ۲ است. حال بر اساس داده‌های این جدول، به ازای هر مقدار جرم خاک (خاک خشک + نمک) می‌توان برای قابلیت هدایت الکتریکی مورد نظر، جرم نمک را از طریق یک نسبت ساده محاسبه نمود.

جدول ۲- محاسبه جرم و درصد نمک و خاک خشک مدل برای مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع مختلف در خاک درشت‌بافت.

	قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)					
	20		35		50	
	وزن (گرم)	درصد	وزن (گرم)	درصد	وزن (گرم)	درصد
نمک	8.5	0.85	14	1.4	20.4	2.04
خاک خشک	992.5	99.15	986.0	98.6	979.6	97.96
جمع (نمک + خاک خشک)	1000	100	1000	100	1000	100

انواع پوشش برای روکش‌دار کردن حسگر رطوبتی

حسگر تماسی معمولی که برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط متعارف به روش TDR مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای خاک‌های با شوری زیاد دستگاه TDR قادر به اندازه‌گیری رطوبت نیست. برای رفع این مشکل حسگر تماسی پوشش‌دار پیش‌بینی شده است که یکی یا هر دو میله آن با مواد پلیمری یا مواد عایق پوشش داده می‌شود، اما با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، رطوبت اندازه‌گیری شده با این حسگر به‌وسیله دستگاه TDR، دیگر با پیام خطا مواجه نمی‌شود. برای روکش‌دار کردن میله‌های حسگر، مواد مختلفی از جمله شرینگ، رنگ کوره، تفلون، گرانیت و لعاب مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳).

شرینک‌های حرارتی مورد استفاده در این پژوهش تک لایه و دارای رنگ‌های آبی و سیاه بوده که از پلی‌الفین[1] ویژه پیوند متقابل[2] شده تولید می‌شوند. ماده تشکیل دهنده آن پلی‌الفین انعطاف‌پذیر، بدون هالوژن، ضد شعله، خود خاموش شونده و پیوند متقابل شده است. دمای کاری ٤٥- تا ۱۲۵+ درجه سلسیوس بوده و دمای مورد نیاز برای جمع شوندگی حداقل و حداکثر به‌ترتیب برابر ۷۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس با ضریب جمع‌شوندگی ۱ به ۲ است یعنی پس از گرمادهی مناسب، قطر روکش حرارتی به نصف قطر اولیه کاهش می‌یابد (Ajakesh Company).

برای رنگ کوره از رنگ استاتیک یا الکترواستاتیک استفاده شد که از پلی‌استر (رزین)، سخت‌کننده، رنگ‌دانه، پرکننده و سایر افزودنی‌ها تشکیل شده است. برای اعمال رنگ بر سطح فلزات از خاصیت میدان مغناطیسی استفاده شده و رنگ با تفنگ مخصوص بر سطح فلز پاشیده می‌شود. به این صورت که رنگ پودری با

[1] Polyolefin
[2] Cross link

بار مثبت و فلز با بار منفی مانند آهن‌ربا به یکدیگر جذب شده و پودر جذب شده به سطح فلز در کوره به اندازه ۲۰۰ درجه سلسیوس حرارت دیده تا پودر به مایع تبدیل شود و بعد از ۱۰ تا ۲۰ دقیقه فرایند پخت، ساختار مولکولی پودر به یک پوشش پلاستیکی مقاوم و در عین حال الاستیک تبدیل شود (Sabouri Azad, 2021).

شکل ۳- مواد مختلف مورد استفاده برای پوشش میله‌های حسگر تماسی دستگاه TDR (از راست به چپ به‌ترتیب میله‌های بدون پوشش، پوشش رنگ کوره، پوشش تفلون، پوشش گرانیت، پوشش لعاب و پوشش شرینک آبی و سیاه رنگ).

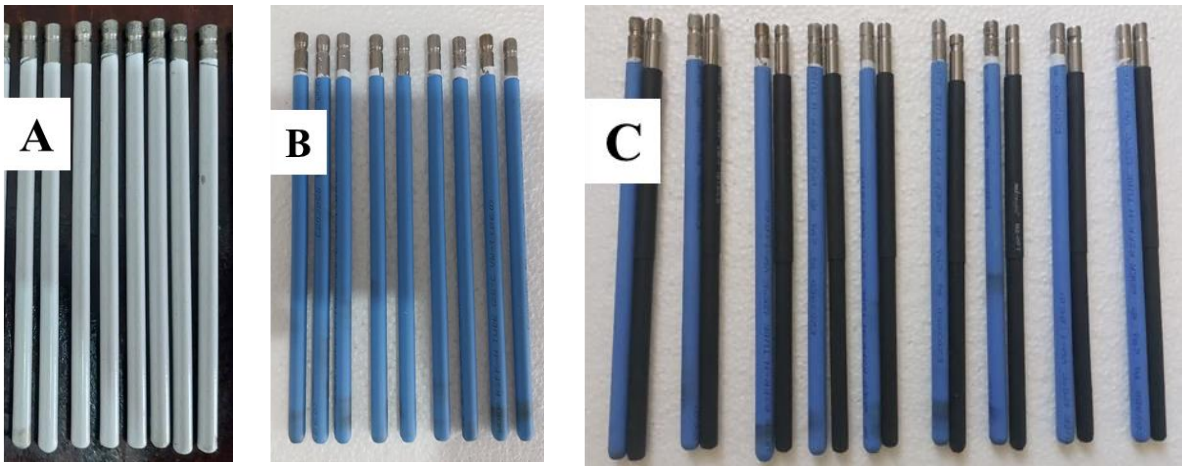
ساخت حسگر رطوبتی پوشش‌دار

برای این کار، از ظروف پلاستیکی استوانه‌ای به عمق ۳۰ و قطر ۲۱ سانتی‌متر استفاده شد که قسمت تحتانی آن‌ها دارای زهکش و فیلتر شنی بودند. با توجه به طول مؤثر میله حسگر (۱۵ سانتی‌متر)، ۱۷ سانتی‌متر از عمق ظروف با خاک‌های شور پر شد و به حدی متراکم شد که جرم مخصوص ظاهری خاک داخل استوانه به تراکم طبیعی در مزرعه (۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برسد. با توجه به عمق (۱۷ سانتی‌متر)، قطر (۲۱ سانتی‌متر) و جرم مخصوص ظاهری خاک (۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) وزن خاک خشک شور داخل ظرف ۹۲۴۰ گرم به دست می‌آید. بدین ترتیب سه عدد ظرف استوانه‌ای محتوای خاک با شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر آماده و خاک داخل آن‌ها از پایین اشباع شدند. از آنجایی‌که وزن خاک خشک شور ظرف‌ها قبلاً مشخص بود (۹۲۴۰ گرم) اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک داخل ظرف‌ها در هر لحظه با وزن کردن ظرف حاوی خاک امکان‌پذیر بود بدین صورت که بعد از وزن کردن ظرف حاوی خاک و کسر نمودن وزن متعلقات (وزن ظرف و فیلتر شنی) وزن خاک مرطوب به‌دست می‌آمد که با کم کردن وزن خاک خشک از آن وزن آب خاک محاسبه می‌شد. از تقسیم وزن آب به وزن خاک خشک رطوبت وزنی خاک به‌دست می‌آید.

از آنجایی‌که روش TDR رطوبت حجمی خاک را اندازه‌گیری می‌نماید رطوبت وزنی با ضرب کردن در جرم مخصوص ظاهری به رطوبت حجمی تبدیل می‌شود تا بتوان آن را با رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR مقایسه نمود. نمونه خاک‌های آماده شده برای تعیین نوع و مقدار پوشش میله‌های حسگر مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که ابتدا رطوبت حجمی خاک به روش مذکور اندازه‌گیری شده سپس میله‌های حسگر با یک لایه روکش حرارتی در خاک نصب می‌شد، چنانکه رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR با رطوبت حجمی

برابر یا نزدیک به هم می‌شدند این نوع پوشش انتخاب می‌شد در غیر این صورت نوع پوشش و یا تعداد لایه‌ها تغییر می‌کرد و اندازه‌گیری رطوبت به روش TDR و حجمی مجدداً انجام می‌شد تا نتایج هر دو روش مساوی یا نزدی به هم باشند. با توجه به تعداد تکرار و آزمون و خطاهای زیاد، پوشش روکش حرارتی (به قطرهای ٦ و ٧ میلی‌متر) و رنگ پودری منجر به نتیجه شدند و دیگر پوشش‌ها از جمله تفلون، گرانیت و لعاب کنار گذاشته شدند.

دستگاه TDR با حسگر تماسی رطوبتی بدون پوشش قادر به اندازه‌گیری مقدار رطوبت در خاک‌های شور نبود. به همین دلیل، یکی از میله‌ها با روکش حرارتی و میله دیگر با ترکیبی از رنگ کوره و روکش حرارتی پوشش داده شدند و با نصب آن در خاک درشت‌بافت با شوری‌های متفاوت، امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک به روش TDR فراهم شد. شکل ٤ میله‌های رنگ‌آمیزی شده با رنگ سفید کوره‌ای را نشان می‌دهد که با یک لایه کامل از شرینک آبی‌رنگ پوشش داده‌شده است. برای میله دیگر، به مقدار ۲/۵ لایه شرینک مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه سه سطح شوری در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت و برای هر سطح شوری ۳ تکرار در نظر گرفته شد، در نتیجه ۹ جفت حسگر رطوبتی پوشش‌دار برای یک رطوبت حجمی مشخص (مثلاً رطوبت ۳۵ درصد حجمی برای خاک با قابلیت هدایت الکتریکی ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) ساخته شدند؛ اما رفتار این حسگرها برای رطوبت‌های دیگر خاک (مانند ۱۵، ۳۰ و ۵۰ درصد حجمی) نامعلوم بود و بایستی برای سایر مقادیر رطوبت خاک نیز رفتارسنجی می‌شد تا در صورت تغییر رطوبت از مقدار واقعی، این تغییر در معادله واسنجی لحاظ شود. شکل ۵ چگونگی توزین ظرف خاک و قرائت رطوبت از طریق حسگر رطوبتی به روش TDR را در سه سطح شوری نشان می‌دهد.



شکل۴- حسگرهای رطوبتی تماسی رنگ‌آمیزی شده با رنگ سفید کوره‌ای (A)، حسگرهای رطوبتی تماسی رنگ‌آمیزی شده با رنگ سفید کوره‌ای با یک لایه پوشش شرینک آبی رنگ (B) حسگر رطوبتی با ۲/۵ لایه پوشش شرینک مشکی همراه با حسگرهای با پوشش رنگ کوره و شرینک (C).

EC_e= 20 dS/m EC_e= 35 dS/m EC_e= 50 dS/m

شکل ۵ - تعیین نوع و مقدارپوشش حسگر رطوبتی از طریق آزمون و خطا به روش TDR در خاک درشت‌بافت با مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر.

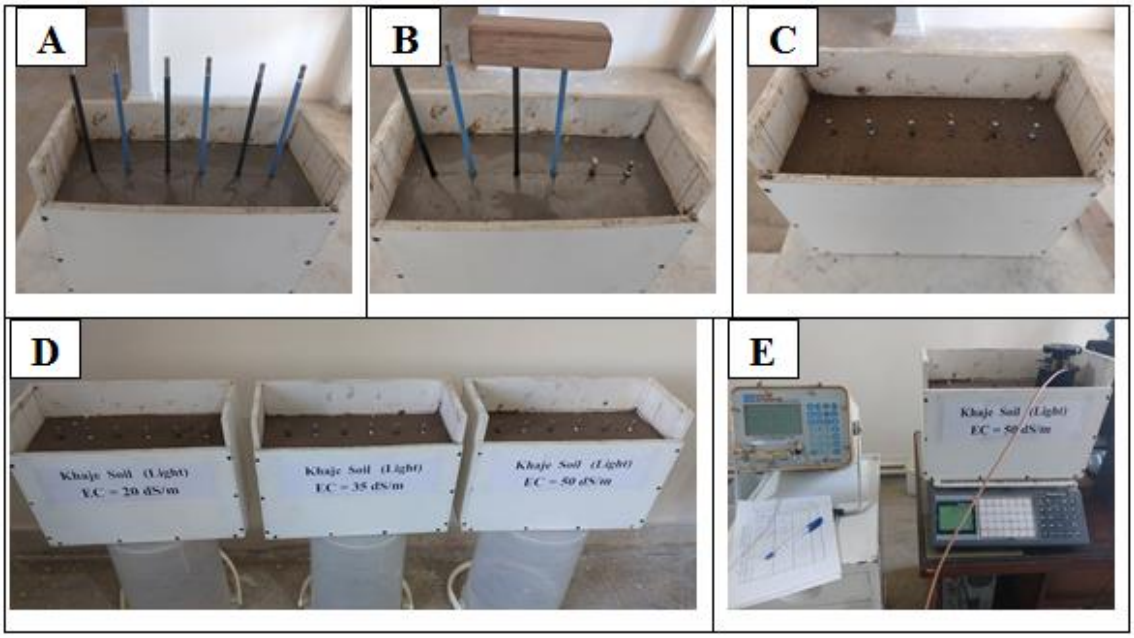
واسنجی حسگرهای رطوبتی پوشش‌دار

از آنجایی که اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور با حسگرهای بدون پوشش به روش TDR امکان‌پذیر نبود، با پوشش‌دار کردن میله‌های موج‌بر این مشکل مرتفع گردید. اما نوع و مقدار پوشش انتخاب شده برای یک رطوبت مشخص (رطوبت زیاد) بود و برای رطوبت‌های دیگر نتیجه نامعلوم بود. برای این منظور رطوبت خاک درشت بافت لوم شنی با سطوح شوری ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر و جرم مخصوص طبیعی در دامنه رطوبتی اشباع تا هوا خشک و بازه زمانی ۱۳۰ روز ۲۹ بار به روش‌های حجمی (وزنی تبدیل شده به حجمی) و TDR اندازه‌گیری شدند وتغییرات رطوبت در هر دو زوش نسبت به زمان مورد بررسی قرار گرفتند که در صورت مشاهده تفاوت با رطوبت وزنی، حسگرهای ساخته شده واسنجی شوند و معادلات رگرسیونی مناسب استخراج گردد تا بر اساس آن‌ها بتوان به مقدار رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور با دقت بالا دست یافت. با توجه به اینکه برای هر یک از خاک‌های شور سه تکرار وجود داشت از داده‌های تکرار متوسط‌گیری شد و نسبت به داده‌های رطوبت حجمی متناظر با داده‌های روش TDR در محورهای مختصات پیاده گردید. سپس معادلات رگرسیونی خطی، درجه دو و درجه سه بر روی نقاط برازش داده شد و با شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا[۱](RMSE)، خطای نسبی[۲](RE)، احتمال معنادار بودن (*p*-value) و ضریب تبیین[۳](r^2) نسبت به مقادیر واقعی (رطوبت وزنی) ارزیابی شدند.

برای این کار، از جعبه‌هایی از جنس عایق (PVC)[۴]استفاده شد که به‌ترتیب دارای طول، عرض و عمق ۳۵، ۱۴ و ۲۵ سانتی‌متر بودند. با توجه به این که قرار بود در هر ظرف ۳ جفت حسگر رطوبتی نصب شود و برای هر سطح شوری یک ظرف در نظر گرفته شود، سه عدد جعبه با ابعاد مذکور ساخته شد و بعد از ایجاد زهکش و قرار دادن فیلتر شنی در قسمت تحتانی، خاک درشت‌بافت با شوری‌های مذکور به عمق ۱۷ سانتی‌متر در داخل ظروف ریخته و در حد جرم مخصوص ظاهری طبیعی متراکم گردیده و پس از اشباع شدن، حسگرهای رطوبتی به‌طور عمودی به‌وسیله یک شابلون چوبی با فشار دادن در خاک نصب شدند (شکل ٦). برای تهیه مدل واسنجی

[1]Root mean square error
[2]Relative error
[3]Coefficient of determination
[4]Polyvinyl chloride

نیاز به رطوبت واقعی خاک بود که دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت واقعی خاک، روش وزنی است. برای این کار، پس از این‌که رطوبت حجمی خاک به روش TDR اندازه‌گیری شد برای مقایسه با رطوبت واقعی و تهیه مدل واسنجی مناسب، به‌طور هم‌زمان رطوبت وزنی خاک نیز اندازه‌گیری شد (شکل ۵).



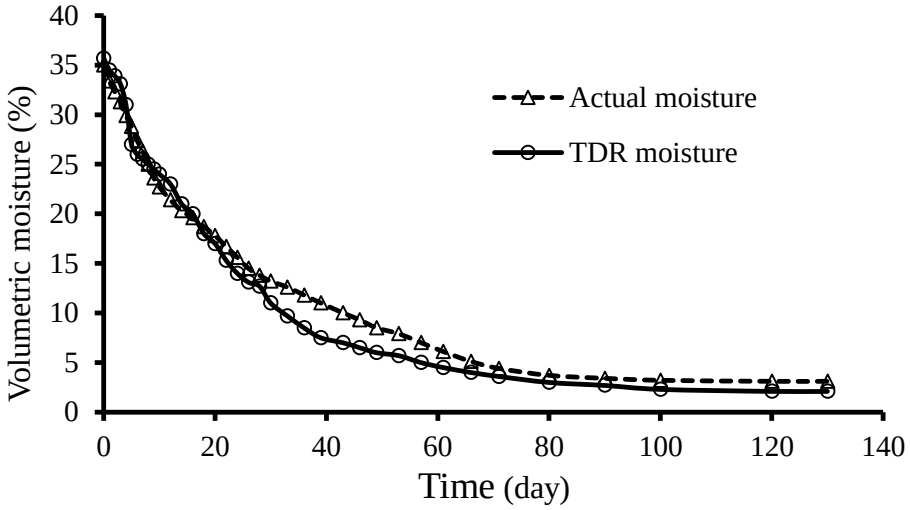
شکل ۶- حسگرهای رطوبتی که به‌طور عمودی بر روی خاک قرار گرفته‌اند (A)، نصب حسگرها در داخل خاک با فشار دادن به‌وسیله شابلون چوبی (B)، حسگرهای تماسی نصب شده در داخل خاک (C) جعبه‌های حاوی خاک با شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر به همراه حسگرهای رطوبتی نصب شده (D) و اندازه‌گیری هم‌زمان رطوبت به روش وزنی و روش TDR (E).

نتایج و بحث

رابطه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده خاک به روش حجمی و TDR

با توجه به شکل ۷، ملاحظه می‌شود که در خاک لوم شنی با شوری ۳۵ dS/m در ابتدای آزمایش در محدوده رطوبتی ۲۰ تا ۳۵ درصد حجمی تقریباً برابر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش TDR است اما بعد از آن بین آن‌ها فاصله می‌افتد و مقادیر به‌دست آمده از روش حجمی و TDR با هم تفاوت دارند. برای از بین بردن این تفاوت‌ها، حسگر پوشش‌دار در خاک با سطوح شوری مختلف نسبت به رطوبت حجمی واسنجی شد و برای هر یک از تیمارها معادلات رگرسیون چندجمله‌ای استخراج گردید که با توجه به شاخص‌های آماری، مناسب‌ترین معادله برای هر تیمار انتخاب شد. این معادلات برای خاک با شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب خطی، درجه دو و درجه سه بودند؛ زیرا که مطابق جدول ۳ مقادیر مربوط به شاخص‌های RMSE، RE، *p*-value دارای کمترین مقدار و r^2 دارای بیشترین مقدار برای معادلات مذکور بودند. شکل ۸ روابط بین رطوبت حجمی و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR را برای خاک با شوری‌های مذکور را نشان می‌دهد که با قرار

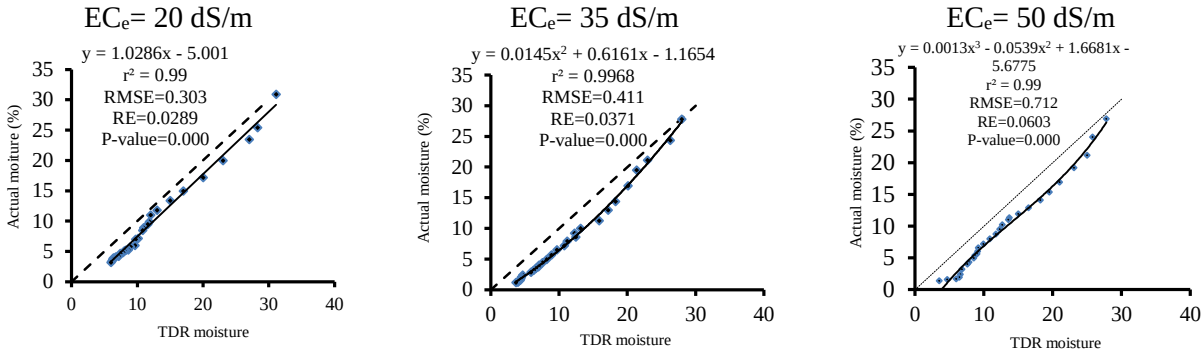
دادن رطوبت اندازه‌گیری شده از روش TDR در این روابط می‌توان به رطوبت حجمی خاک با دقت بالایی دست یافت. در صورتی که مقادیر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به روش TDR با مقادیر رطوبت حجمی (رطوبت وزنی که با ضرب آن در جرم مخصوص ظاهری خاک تبدیل به رطوبت حجمی شده) یکسان باشند نمودارهای مربوط به شکل ۸ عملاً به‌صورت یک خط با شیب ۱:۱ خواهند بود اما در عمل این اتفاق نمی‌افتد و به همین دلیل عمل واسنجی انجام شده است.



شکل ۷- تغییرات رطوبت حجمی و اندازه‌گیری شده به روش TDR نسبت به زمان در خاک درشت‌بافت با هدایت الکتریکی ۳۵ دسی‌زیمنس بر متر.

جدول ۳- شاخص‌های آماری معادلات رگرسیون برای خاک درشت‌بافت با هدایت الکتریکی متفاوت.

	EC_e =20 dS/m			EC_e =35 dS/m			EC_e =50 dS/m		
نوع معادله	خطی	درجه دو	درجه سه	خطی	درجه دو	درجه سه	خطی	درجه دو	درجه سه
RMSE	0.303	0.7171	2.2520	0.786	0.411	4.1527	0.788	0.764	0.712
RE	0.0289	0.0564	0.1779	0.0698	0.0371	0.3574	0.678	0.669	0.0603
P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
r^2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99



شکل ۸- رابطه تجربی بین مقادیر رطوبت واقعی و اندازه‌گیری شده خاک به روش TDR در شوری‌های ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر.

بر اساس نمودارها و روابط مربوط به شکل ۸ امکان اندازه‌گیری رطوبت حجمی به روش TDR برای خاک درشت‌بافت شور و خیلی شور وجود دارد که علت آن پوشش دادن میله‌های موج‌بر حسگر تماسی با مواد پلیمری است. در صورتی که این عمل با حسگر تماسی بدون پوشش میله‌های موج‌بر امکان‌پذیر نبود و اندازه‌گیری رطوبت با محدودیت همراه بود. تحقیق انجام شده به‌وسیله نیک‌نژاد و همکاران (Niknejad *et al.*, 2017) این موضوع را تأیید کرد که در آن اندازه‌گیری رطوبت خاک شور به روش TDR با حسگر دفنی بدون پوشش با محدودیت همراه بود. در راستای این محدودیت تحقیق دیگری به‌وسیله آنان انجام شد (Niknejad *et al.*, 2022) که در آن پوشش دادن میله وسطی حسگر دفنی با مواد پلیمری، اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های درشت‌بافت شور و خیلی شور (حتی با شوری ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) را به روش TDR امکان‌پذیر ساخت. بنابراین، با توجه به پژوهش‌های انجام شده و پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که پوشش دادن میله‌های حسگر رطوبتی (دفنی و تماسی) با مواد عایق پلیمری به‌دلیل پایین بودن ضریب ثابت دی‌الکتریک (٤-٢)، دستگاه TDR را قادر می‌سازد تا بتواند رطوبت خاک درشت‌بافت شور و خیلی شور را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از معادلات رگرسیونی ارائه شده، اصلاح نموده و به مقدار رطوبت واقعی (رطوبت حجمی به‌دست آمده از رطوبت وزنی) نزدیک‌تر ساخت. در صورتی‌که اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور با حسگر رطوبتی تماسی بدون پوشش به روش TDR امکان‌پذیر نبود و دستگاه TDR به جای درصد رطوبت حرف E (Error) را نشان می‌داد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مناسب‌ترین مواد برای پوشش حسگر تماسی یا میله‌های موج‌بر دستگاه TDR و قادر ساختن آن به اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور استفاده از رنگ کوره و روکش حرارتی بود که هر دوی آن‌ها از مواد پلیمری بودند. از مزایای این پوشش‌ها می‌توان به پایین بودن ثابت دی‌الکتریک، مقاوم بودن در مقابل گرما و عوامل شیمیایی و ارزان بودن آن‌ها اشاره نمود. در مورد پوشش لایه اول یکی از میله‌ها که در این پژوهش رنگ کوره انتخاب شد، گزینه‌های دیگری مانند پوشش تفلون، گرانیت و لعاب نیز مورد آزمون قرار گرفتند اما منجر به نتیجه نشدند. نوع و مقدار پوشش برای میله‌های موج‌بر که به روش

آزمون و خطا به‌دست آمد برای یکی از میله‌های موج‌بر دارای یک لایه رنگ کوره با یک لایه کامل (۱۵ سانتی‌متر) روکش حرارتی و برای میله موج‌بر دیگر ۲/۵ لایه روکش حرارتی مورداستفاده قرار گرفت. میله‌های موج‌بر پوشش‌دار شده برای خاک درشت‌بافت با تراکم طبیعی و قابلیت هدایت الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر برای رطوبت‌های مختلف (اشباع تا هواخشک) واسنجی شدند و با توجه به شاخص‌های آماری RMSE، RE، P-value و r^2 مناسب‌ترین معادلات رگرسیونی ارائه گردیدند. این معادلات برای خاک درشت‌بافت با هدایت الکتریکی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب خطی، درجه دو و درجه سه به‌دست آمد که با وارد کردن رطوبت به‌دست آمده از روش TDR در آن‌ها می‌توان رطوبت حجمی خاک را با دقت بالا محاسبه نمود.

بنابراین، با توجه به توضیحات مذکور امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور (حتی بیش از ۵۰ dS/m) با استفاده از حسگر تماسی پوشش‌دار به‌وسیله دستگاه TDR برای اولین بار در ایران فراهم شد و حسگر رطوبتی ساخته شده مانند حسگرهای معمولی متناسب با تغییر رطوبت خاک در اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش TDR واکنش نشان داد. در صورتی که بر اساس پژوهش‌های انجام شده اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک‌های شور و خیلی شور با استفاده از حسگر تماسی بدون پوشش امکان‌پذیر نبوده و حتی در شوری‌های پایین، دستگاه TDR دچار اختلال شده و یا مقدار رطوبت خاک را کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌داد.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

Abdullah, N. H. H., Kuan, N.W., Ibrahim, A., Ismail, B.N., Majid, M.R.A., Ramli, R. & Mansor, N.S. (2020). Determination of soil water content using Time Domain Reflectometer (TDR) for clayey soil. *AIP Conference Proceedings*, https://doi.org/10.1063/1.5062642

Ajakesh Company n.d. Single-layer thermal coating for general use[Online]. http://woer.ir. [verified 14 November 2025]. (In Persian)

Alissgharzad, N. (2000). *Study of distribution and population density of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of Tabriz plain and determination of their effects on improving onion and barley tolerance to salinity stress*. Ph.D. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran. (In Persian with English Abstract)

Dane, J.H. & G.C. Topp. (2002). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. *Physical Methods*. ASA-CSSA-SSSA Publisher, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4

Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M.T. & El-Rayes, M.A. (1985). Microwave dielectric behaviour of wet soil, Part II: Dielectric mixing models. *Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.1985.289498

Eskandari, Z. & Bahmanpour, M. (2003). Determination of electrical conductivity of water and soil using TDR. *Proceedings of the Third Aquifer Recharge Conference*, Urmia, pp. 2–14. (In Persian)

Hook, W. R. & Livingston, N.J. (1995). Propagating velocity errors in Time Domain Reflectometry measurement of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 92–96.

Hunduma, S. & Kebede, G. (2020). Indirect methods of measuring soil moisture content using different sensors. *African Journal of Basic & Applied Sciences*, 12(3), 37–55. https://doi.org/10.5829/idosi.ajbas.2020.37.55

Jacobsen, O.J. & Schjonning, P. (1993). A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*, 5, 147-157.

Jamali, S., Rahimi Aghcheshmeh, F. & Amiri, M.J. (2023). Effect of soil texture and Zeitonik conditioner on the accuracy of soil moisture measurement using time domain reflectometry. *Journal of Water Management in Agriculture*, 10(2), 73–84. (In Persian with English Abstract) https://wmaj.iaid.ir/article_181592.html?lang=en

Kamali, K. & Mehdian, M. (2009). Study of constructing buried sensors of TDR device and evaluating their performance in soil moisture estimation. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 1(2), 111–119. (In Persian with English Abstract)

Keshavarz, M., Nazemi, E.M., Sadreddini, S.A., Nishabouri, M.R., Naseri, A. & Fakhri-Fard, A. (2013) Effect of soil texture on accuracy of time domain reflectometry method in estimating soil moisture. *Scientific-Research Quarterly of Irrigation and Water Engineering*, Year 3, No. 11. (In Persian)

Namdar Khojasteh, D., Sharafa, M., Eskandari, Z. & Fazeli Sangani, M. (2011). Effect of clay content and soil salinity on volumetric moisture measured by time domain reflectometry, *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 25(2), 103–112. (In Persian with English Abstract) https://doi.org/10.22092/ijsr.2011.126475

Niknejad, D., Pirvan, H.P., Kamali, K., Hosseinpour, M., Majnooni Haris, A., Naseri, A. & Talebi, S. (2022). *Design and calibration of coated sensors for TDR device to measure soil moisture in saline soils*. Final Report, Soil and Watershed Conservation Research Institute, Report No. 63064. (In Persian)

Niknejad, D., Roghani, M., Kalantari Oskuei, A., Kamali, K., Khani, M. & Mirmohammadi, H. (2017). *Calibration of domestic buried sensors for TDR device model TRASE-1X6050 under different soil textures and salinities*. Final Report, Soil and Watershed Conservation Research Institute, Report No. 52585. (In Persian)

Or, D. & Wraith, J.M. (1999). Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Resources Research*, 35(2), 371–833. https://doi.org/10.1029/1998WR900008

Pandey, G., Robert, J. & Ratnesh, K. (2018). *Agricultural Cyber-Physical System: In-Situ Soil Moisture and Salinity Estimation by Dielectric Mixing*. IEEE, Volume 6. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862634

Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. & Alves, W.J. (1989). Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 433–439. https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020020x

Roghani, M., Emamjomeh, S.R. & Kamali, K. (2011). Feasibility study of constructing buried sensors of TDR device and performance evaluation in soil moisture measurement. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 17(5), 53–62. (In Persian with English Abstract)

Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H. & Attinger, W. (1990). Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources*, 26(10), 2267– 2273. https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267

Saadat, S., Rezaei, H., Esmaeilnejad, L., Mirkhani, R. & Bagheri, Y. R. (1402). *Salinity map of agricultural soils of Iran*. Publications of Soil and Water Research Institute of Iran. Available online at: http://www.swri.ir.org (In Persian)

Sabouri Azad, A.R. (2021). Production and application of electrostatic powder coatings based on nanotechnology, Available at: https://indnano.ir/wp-content/uploads. (In Persian)

Schanz, T., Baille, W. & Tuan, L.N. (2011). Effects of temperature on measurements of soil water content with time domain reflectometry. *Geotechnical Testing Journal*, 34(1), 1–8. https://doi.org/10.1520/GTJ103152

Shang, J.Q. (1994). Quantitative determination of potential distribution in Stern-Gouy double layer Model. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 624-636. https://doi.org/10.1139/t94-075

Sparks R.L. (1996). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3

Sun, Z.J., Young, G.D., McFarlane, R. & Chambers, B.M. (2000). The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 13–22. https://doi.org/10.4141/S98-089

TE. (2016). Technology of shrinkable products [Online]. Available at: http://woer.ir. [verified 14 November 2025]. (In Persian)

Tokova, L., Igaz, D., & Aydin, E. (2019). Measurement of volumetric water content by gravimetric and time domain reflectometry methods at field experiment with biochar and N fertilizer. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 22(2), 61–64. https://doi.org/10.2478/ahr-2019-0011

Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582. https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574

TRASE SYSTEM. (1996). *Manual for Soil Moisture Measurement*. Version 2000 Software. [Online]. http://www.soilmoisture.com [verified 14 November 2025].

White, I., Knight, J.H., Zegelin, S.J. & Topp, G.C. (1994). Comments on 'Consideration on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content by W.R. Whalley'. *European Journal of Soil Science*, 45, 503–508. *https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00536.x*

Wyseure, G.C.L., Mojid, M.A. & Malik, M.A. (1997). Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. *European Journal of Soil Science*, 48, 347–354. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00555.x

Xiao, T., Jingwei, W., Jiesheng, H., Mousong, W. & Wenzhi, Z. (2018). Design of a new TDR probe to measure water content and electrical conductivity in highly saline soils. *Journal of Soils & Sediments*, 18, 1087–1099. https://doi.org/10.1007/s11368-017-1838-6

.