

Comparative accuracy assessment of satellite (Sentinel-2, SMAP) and ground-based (TDR, PR2) sensors in soil moisture estimation

Jahangir Porhemmat ¹, Abdolnabi Abdeh Kolahchi ², Sayed Mohammad Tajbakhsh ³, Fatemeh Karimi Zafarabadi ⁴

¹Full Professor, Department of Hydrology, Soil Conservation and Watershed Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Hydrology, Soil Conservation and Watershed Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

³Associate Professor, Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Watershed Management, Birjand University, Birjand, Iran

⁴Expert, Department of Hydrology, Soil Conservation and Watershed Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

The most important aspect of soil moisture is the volume of water stored within the soil. Consequently, understanding the factors that influence soil moisture and its effects is essential for predicting future performance and ultimately enhancing agricultural production and food security. This understanding is also vital for optimizing irrigation management and improving water use efficiency in agricultural fields. Therefore, various devices and equipment have been employed over the past few decades to estimate soil moisture. Their application requires consideration of several factors, including the need for calibration, accuracy of results, repeatability, spatial resolution, usability, and cost. Despite the significance of soil moisture in modeling hydrological, biogeochemical, and related dynamic processes, accurately measuring its temporal and spatial variations on a local or watershed scale presents challenges and high costs due to substantial fluctuations. Conversely, remote sensing data provide opportunities for continuous and cost-effective monitoring of soil moisture estimates with appropriate temporal and spatial distribution, which must be controlled and calibrated with ground-based data. This study investigates and evaluates point-based sensors, including time-domain reflectometry (TDR) and the PR2 neutron probe, alongside sensors that offer suitable temporal and spatial distribution, such as Sentinel 2 and Soil Moisture Active Passive (SMAP), using weighted soil moisture measurement data.

Materials and Methods

In this study, soil moisture measurement as a direct method and TDR, PR2, Sentinel-2, and SMAP satellite images as indirect methods of soil moisture estimation were investigated. To assess and evaluate soil moisture sensors at the watershed scale, a part of the Telo region called Deh Sayid in Lavasanat, Tehran province, with an area of 328 hectares, was selected. Initially, due to the difficulty and high cost of measuring soil moisture by direct methods, data obtained from this method were considered the benchmark for evaluating TDR and PR2 sensors. For this purpose, seven stations were established across this region in different land uses, where soil moisture monitoring was conducted through soil sampling and weight measurements in the SCWMRI laboratory, alongside simultaneous soil moisture measurements using TDR and PR2 sensors. Initially, the simultaneous data from these two sensors were evaluated against direct gravimetric observation values. Additionally, soil moisture was monitored by TDR and PR2 sensors during the passage of the Sentinel-2 and SMAP satellites from October 2020 to April 2022. During this period, TDR was used to evaluate PR2, Sentinel-2, and SMAP using statistical criteria, including correlation coefficient and percent deviation. Furthermore, considering the spatial scale of SMAP, the average of the simultaneous data from the seven stations was used for its evaluation.

Results and Discussion

The comparison between TDR and PR2 measurements against gravimetric data showed strong agreement, with coefficient of determination (R^2) of 0.91 and 0.92, respectively, indicating a strong correlation with absolute moisture values. The percentage deviation was % and 23% for TDR and PR2, respectively. Therefore, TDR measured absolute soil moisture with much higher accuracy than PR2. The correlation coefficient of PR2 data with TDR varied between 0.826 and 0.933 at the monitoring stations, indicating a high correlation between them. To evaluate the moisture index of Sentinel 2 and SMAP images, simultaneous data from TDR were used due to

the high accuracy of the TDR sensor. The results of the correlation analysis of the normalized differential water index (NDWI) obtained from Sentinel 2 images with TDR showed that the range of the coefficient of determination (R^2) between the data of these two sensors was broad. The R^2 values vary from 0.003 at station P7 to 0.814 at station P2. The correlation coefficient at other stations is 0.094, 0.132, 0.587, and 0.723 at stations P3, P4, P6, and P5, respectively. However, at three stations, P7, P5, and P6, the correlation coefficient is significant at the 5% level, but at three stations, P2, P3, and P4, there is no significant correlation between them. The correlation coefficient of simultaneous SMAP data with the average TDR data at seven stations is 0.455, and the slope of their correlation line is 0.833. Therefore, SMAP shows greater accuracy than Sentinel in estimating soil moisture

Conclusion

The result of this research indicated that the correlation between each of the two sensors, TDR and PR2, with the gravimetric method is very high and close to each other, with values of 0.956 and 0.962, respectively. Additionally, their absolute deviation is 6 and 23 percent, respectively. Consequently, TDR provides a more accurate estimate of the absolute value of soil moisture compared to PR2. Therefore, TDR is superior to PR2 as an appropriate estimator in the absence of soil moisture data from the gravimetric method in this region. Other findings from the study reveal that the indices obtained from Sentinel2 at various points yield different estimates of soil moisture; in pasture land with dense vegetation cover, the accuracy is significant, whereas in areas with tree cover, it lacks significant accuracy. Furthermore, the results demonstrated that the accuracy of Sentinel2 moisture indices is low, while SMAP offers higher accuracy for estimating moisture despite its lower spatial scale. Moreover, based on the findings of this study, the estimated absolute amount of soil moisture derived from remotely sensed data does not yet possess the necessary accuracy for practical applications, and further research is required to combine and test with other indices to enhance the accuracy of soil moisture estimates.

Keywords: soil moisture, moisture sensor, Sentinel, TDR, PR2, SMAP

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute and Developer Pardis Company for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Jahangir Porhemmat: Writing original draft preparation, Conceptualization, methodology; **Abdolnabi Abdeh Kolahchi:** Manuscript editing, Software, field work cooperation; **Sayed Mohammad Tajbakhsh:** Formal analysis, manuscript editing, and investigation; **Fatemehe Karimi Zafarabadi:** Software, data Analysis

*Corresponding Author, E-mail: porhemmat@scwmri.ac.ir

Citation: Porhemmat, J., Abdeh Kolahchi, A., Tajbakhsh, S.M., & Karimi Zafarabadi, F. (2025). Comparative accuracy assessment of satellite (Sentinel-2, SMAP) and ground-based (TDR, PR2) sensors in soil moisture estimation. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 309-327.

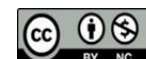
doi: 10.22098/mmws.2025.17736.1619

Received: 30 June 2025, Received in revised form: 26 July 2025, Accepted: 03 August 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 309-327.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی تطبیقی دقت حس گرهای ماهواره‌ای (Sentinel-2، SMAP) و زمینی (TDR، PR2) در برآورد رطوبت خاک

جهانگیر پرهمت^{۱*}، عبدالنبی عبده کلاهچی^۲، سید محمد تاجبخش^۳، فاطمه کریمی ظفرآبادی^۴

^۱استاد، گروه هیدرولوژی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۲استادیار، گروه هیدرولوژی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۳دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و آبخیزداری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۴کارشناس، گروه هیدرولوژی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک هزینه‌بردار، زمان‌بر و به‌سختی قابل انجام است، از طرفی اندازه‌گیری غیرمستقیم با حس گرهای زمینی و یا سنجنده‌های ماهواره‌ای دارای خطا بوده، لذا ارزیابی، واسنجی و صحت‌سنجی آن‌ها ضروری است. بدین‌منظور منطقه تلو در استان تهران انتخاب و تعداد هفت ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک در کاربری‌های مختلف ایجاد شد. روش‌های غیرمستقیم برآورد رطوبت خاک شامل دو حسگر TDR و PR2 و سنجنده‌های سنتینل ۲ و SMAP در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین اندازه‌گیری وزنی به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای و معیارهای آماری ضریب تعیین، درصد انحراف، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد TDR نسبت به PR2 بر اساس چهار معیار آماری منتخب برآورد دقیق‌تری از رطوبت خاک را دارا است. لذا TDR به‌عنوان معیار ارزیابی دقت داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ و SMAP مناسب‌تر است. بررسی رابطه همبستگی بین داده‌های TDR و PR2 با هم‌دیگر در هفت ایستگاه بیانگر همبستگی بالا بین داده‌های این دو در اعماق یکسان است. ضریب تعیین داده‌های این دو، در دامنه ۰/۱۱ تا ۰/۹۰۵ در ایستگاه P3 تا P2 در تغییر است. هم‌چنین کم‌ترین درصد انحراف مطلق آن‌ها از هم ۱/۳ و بیش‌ترین آن ۳۱/۵ درصد به‌دست آمده است که به‌نظر می‌رسد شرایط ویژه‌ای در ایستگاه‌های P5 و P6 از جمله عمق غیریکسان و احتمالاً نوع پوشش بر میزان رطوبت این دو سنجنده تأثیرگذار شده است. بیش‌ترین همبستگی داده‌های سنتینل ۲ با TDR در ایستگاه P2 به میزان ۰/۹۰۵ و کم‌ترین آن در ایستگاه P3، به میزان ۰/۱۱ به‌دست آمده است. از طرفی بر اساس دو معیار RMSE و MAE کم‌ترین مقدار مربوط به ایستگاه P2 و بیش‌ترین مقدار مربوط به ایستگاه P4 است. بنابراین، نوع پوشش بر دقت برآورد سنتینل اثرگذار شده و لذا برآورد رطوبت خاک از داده‌های سنتینل ۲ با تقریب زیادی مواجه است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که رابطه همبستگی داده‌های SMAP با متوسط TDR در هفت ایستگاه دارای ضریب تعیین ۰/۴۵۵، میزان انحراف مطلق ۱۶/۷ درصد و مقادیر RMSE و MAE به‌ترتیب ۷/۹۶ و ۷/۱ است. بنابراین، با وجود قدرت تفکیک زمینی پایین داده‌های SMAP، برآورد دقیق‌تری را نسبت به سنتینل ۲ داشته است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، حسگر رطوبتی، سنتینل، TDR، PR2، SMAP

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: porhemmat@scwmri.ac.ir

استناد: پرهمت، جهانگیر، عبده کلاهچی، عبدالنبی، تاجبخش، سید محمد، و کریمی‌ظفرآبادی، فاطمه (۱۴۰۴). ارزیابی تطبیقی دقت حس گرهای ماهواره‌ای (Sentinel-2، SMAP) و زمینی (TDR، PR2) در برآورد رطوبت خاک، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۳۰۹-۳۲۷.

doi: 10.22098/mmws.2025.17736.1619

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۰۹ تا ۳۲۷.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

رطوبت موجود در خاک و به بیانی دیگر محتوی آب خاک که پرکننده فضای خالی بین ذرات خاک است گرچه نمایانگر درصد کوچکی از آب شیرین قابل دسترس در جهان است، اما یک ذخیره تأثیرگذار آب در چرخه هیدرولوژیکی بوده (Porhemmat et al., 2025a) و دارای اهمیت اساسی در فرآیندهای هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و بیوژئوشیمیایی است. اطلاعات رطوبت خاک در فرآیندهای هیدرولوژیکی به دلیل ارتباط آن با تأخیر و تعرق سطح زمین، رواناب، بارش و نفوذ بسیار مهم است (Vereecken et al., 2008; Seneviratne et al., 2010; Neale et al., 2012; Corradini, 2014; Brocca et al., 2017; Babaeian et al., 2018; Altafi Dadgar et al., 2020; Zhao et al., 2020a; Fang and Shen, 2020) و هیدرولوژی سطحی به وسیله رابطه پیچیده بین بارش و رطوبت خاک کنترل می‌شود (Blank et al., 2023; Mohseni et al., 2023; Liu et al., 2023). بسیاری از کاربردهای محیطی و هیدرولوژیکی نیاز به دانش رطوبت خاک دارند. اطلاعات از محتوی آب خاک برای کارگزاری‌های مختلف که با اقلیم و آب و هوا، پتانسیل رواناب و کنترل سیل، فرسایش خاک و ناپایداری شیب‌ها، مدیریت مخازن، مهندسی ژئوتکنیک و کیفیت آب مرتبط هستند، می‌تواند مفید باشد. لذا آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی و الگوی توزیع محتوی رطوبت آب خاک در سطح حوضه می‌تواند در شناخت فرآیند بارش-رواناب، مدیریت آب سبز، مدیریت آب مصرفی آبیاری در مزارع و نیز تخمین و برآورد نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب در رودخانه‌ها کمک فراوانی نماید. اطلاعات مربوط به توزیع مکانی محتوای آب خاک در بسیاری از رشته‌ها و کاربردها از جمله علوم خاک و جو، هیدرولوژی و مهندسی کشاورزی کلیدی است. بنابراین، در دهه‌های گذشته روش‌ها و راهبردهای تجربی متعددی برای تعیین تغییرات و توزیع مکانی رطوبت خاک و پایش تغییرات زمانی آن ارائه شده است (Lück et al., 2022). پایش دقیق رطوبت خاک برای بهینه‌سازی مدیریت آب آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب در مزارع کشاورزی ضروری است (Teshome et al., 2024). لذا روش‌های مختلفی برای تخمین محتوی رطوبت آب خاک مورد استفاده قرار گرفته است.

در واقع مهم‌ترین جنبه رطوبت خاک، عمق ذخیره‌سازی آب در خاک است (Tian et al., 2019). بنابراین، درک عوامل و پیامدهای رطوبت سطحی خاک برای پیش‌بینی عملکرد آینده و در نهایت بهبود تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی (Tian et al., 2021) و نیز برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب در مزارع کشاورزی ضروری است (Teshome et al., 2024; Porhemmat et al., 2025a). بدین

منظور در چند دهه گذشته برای تخمین رطوبت خاک دستگاه‌ها و تجهیزات مختلفی به کار گرفته شده است. لذا در به کارگیری این دستگاه‌ها و تجهیزات ضروری است که عوامل مختلفی از جمله نیاز به واسنجی، دقت نتایج، تکرارپذیری، وضوح مکانی، قابلیت استفاده و هزینه را در نظر گرفت. روش‌ها و رویکردهای صحیح برای پایش دقیق رطوبت خاک ضروری هستند، زیرا میزان رطوبت خاک تأثیر قابل توجهی بر رشد گیاه دارد. برنامه آبیاری مناسب برای به حداکثر رساندن رشد گیاه، به مدیریت رطوبت خاک، کاهش تلفات و حفظ سطح ایده‌آل آب خاک کمک می‌کند. علاوه بر این، استقرار موفق و مداوم برنامه‌های آبیاری دقیق به ارزیابی‌های عینی از میزان رطوبت خاک بستگی دارد (Rasheed et al., 2022). رطوبت خاک نقش پایه‌ای در منابع آبی مورد نیاز رشد و نمو پوشش گیاهی بوده و از این رو توزیع زمانی- مکانی آن برای مدیریت آبیاری و تولید محصولات کشاورزی ضروری است (Zhao et al., 2020a).

با وجود اهمیت رطوبت خاک در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، بیوژئوشیمیایی و فرآیندهای دینامیکی مرتبط، اندازه‌گیری دقیق تغییرات زمانی و مکانی آن در مقیاس منطقه‌ای یا جهانی به دلیل نوسانات زیاد دشوار و پرهزینه است. در مقابل، سنجش از دور فرصت‌های بی‌نظیری را برای پایش مداوم و مقرون به صرفه اندازه‌گیری‌های آب در خاک با دقت مکانی و زمانی بالا فراهم می‌کند (Chen et al., 2021a). با واسنجی داده‌های حاصل از کاوشگرهای رطوبت خاک با داده‌های سنجش از دور، می‌توان از مدل‌های تجربی و فیزیکی مختلف برای پیش‌بینی میزان رطوبت خاک در مقیاس فضایی بزرگ با دقت زمانی و مکانی بالا استفاده کرد (Huang and Hartemink, 2020; Zhao et al., 2021). با این حال، اندازه‌گیری‌های دقیق مکانی و زمانی در کشورهای در حال توسعه، کم است و برآوردهای رطوبت خاک حاصل از روش‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده سنجش از دور، اغلب بدون تأیید کافی استفاده می‌شوند که منجر به نتایج نامشخص می‌شود (Everson et al., 2017). از طرفی اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت درجا تنها در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی انجام می‌شود که از توزیع مکانی مناسب برخوردار نیستند (Zhang et al., 2015). روش‌های کمی متعددی برای بررسی پویایی و توزیع رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف پیشنهاد و استفاده شده است (Vereecken et al., 2014). این روش‌ها در دو دسته کلی برای تعیین رطوبت خاک قرار می‌گیرند که شامل روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم است. وزن سنجی دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در روش مستقیم است. در روش غیرمستقیم، بازتاب‌سنجی دامنه زمانی (TDR) و بازتاب‌سنجی دامنه فرکانسی (FDR) دقیق‌ترین روش‌ها هستند (Chen et

مورد استفاده قرار گرفته است (Schmugge et al., 1980). در این روش نمونه خاک با حجم مشخص و در دمای ۱۰۸ درجه سانتی‌گراد و در طول ۲۴ ساعت در آن قرار داده شده تا خشک شود. مقدار محتوی آب خاک از تفریق وزن خشک و وزن اولیه نمونه خاک محاسبه می‌شود. این روش از نظر اقتصادی، سهولت انجام و دقت، مناسب ارزیابی شده اما نقاط ضعفی شامل نیاز به نیروی کارگر، صرف وقت، تخریب نمودن زمین و سختی اجرا در زمین‌های سنگی را دارا است و در خاک‌های ناهمگن شرایط پیچیده‌ای خواهد داشت (Schmugge et al., 1980; Stafford, 1988).

روش کاوشگر نوترون شامل یک میله یا کاوشگر و یک محاسبه‌گر الکترونی است. نوترون‌های با انرژی و سرعت بالا توسط منبع رادیواکتیو به داخل خاک رها می‌شوند. سرعت نوترون در برخورد با اتم‌های هیدروژن موجود در مولکول آب درون خاک کاهش می‌یابد (Chanasyk and Naeth, 1996). کاوشگر نوترون روش دقیق و غیرمخرب است ولی تجهیزات مورد نیاز آن پرهزینه بوده و نیازمند واسنجی برای انواع خاک است و لذا استفاده از این روش دارای محدودیت‌هایی است، به‌علاوه داده‌های رطوبت خاک به‌صورت نقطه‌ای در اختیار قرار می‌گیرد.

در روش بازتاب سنجی حوزه زمانی (TDR)، سرعت انتشار یک پالس انرژی الکترومغناطیس در درون خاک تعیین می‌شود. برای تعیین سرعت، پالس‌های الکتریکی کوتاه به‌وسیله کاوشگرهای فلزی به داخل خاک فرستاده می‌شود. از زمان مسیر رفت و برگشت پالس ارسال شده سرعت محاسبه می‌شود (Wörsching et al., 2006). سرعت پالس در کاوشگر اندازه‌گیری و با رطوبت خاک انطباق داده می‌شود، که سرعت پایین‌تر نشانه خاک مرطوب‌تر است. این روش توسط پژوهشگران زیادی مورد استفاده قرار گرفته است (Amente et al., 2000). این روش غیرمخرب و نسبتاً به نیروی کار کم‌تری نیازمند است. تجهیزات مورد نیاز این روش، قابلیت جابه‌جایی داشته و به‌آسانی قابل نصب و قرائت است. دقت این روش در قرائت‌هایی که در زمان کوتاه صورت می‌گیرد قابل اطمینان است و در هر مرحله اندازه‌گیری واسنجی خاصی نیاز ندارد. دامنه خطای این روش حدود ± 1 درصد بوده و قابلیت اندازه‌گیری پیوسته را در دامنه تقریباً کامل محتوی آب خاک دارا است (Chandler et al., 2004). اثرات طول کاوشگر، حساسیت به خلا در محل تماس کاوشگر و خاک باعث ایجاد خطا در این روش می‌شود (Sakaki et al., 1998) و نیز محدودیت کاربرد در خاک‌های شور دارد (Ferrara and Flore, 2003). روش FDR مشابه روش TDR

(al., 2021b). با این حال، نمایش فضایی آن‌ها پایین است. فناوری‌های نوظهور مانند سنجش نوترون‌های کیهانی (CRNS) و سیستم موقعیت‌یابی جهانی ۲ (GPS) تا حدودی این مشکل را حل می‌کنند (Tian et al., 2016; Jakobi et al., 2018). استفاده از ابزارهای تخمین رطوبت خاک مزایای خاصی از جمله قابل حمل بودن، سهولت نصب، کارکرد، نگهداری، بلوغ نسبی و قابلیت اندازه‌گیری مستقیم در عمق‌های مختلف با وضوح زمانی بالا دارا است (Rahimzadeh Bajgiran et al., 2013). با این حال، این روش‌ها زمان‌بر، پرهزینه و پیچیده هستند و برخی از آن‌ها مانند نمونه‌برداری وزن‌سنجی ممکن است باعث تخریب خاک نیز باشد. همچنین، در استفاده از سنجدها دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به فناوری حسگر وابسته بوده که خود تابع حساسیت دستگاه به ویژگی‌های خاک مانند بافت، دما، چگالی ظاهری و شوری خاک است (Mittelbach et al., 2012; Balabadi, et al., 2018).

اندازه‌گیری محتوی آب خاک با یک مبنای پایدار و جامع از نظر توزیع مکانی کاری دشوار است (Bindlish et al., 2006). برای بالابردن دقت محاسبات، درجه اطمینان در تصمیم‌گیری‌ها، درک بهتر جریان آب در خاک و تعیین محتوی آب خاک، روش‌های بدون تخریبی که بتواند به‌طور مستقیم محتوی آب خاک را اندازه‌گیری نماید و نتایج با دقت و وضوح بالا ارائه دهد، در دسترس نیست (IAEA, 2008)، و یا این روش‌ها که محتوی آب خاک را درجا با توزیع مکانی مناسب اندازه‌گیری نمایند هزینه‌بر بوده و به وقت زیادی نیازمند هستند (Hu and Si, 2013). پژوهش‌های زیادی در مورد روش‌های مختلف اندازه‌گیری محتوی آب خاک صورت گرفته است. مرور متون علمی مرتبط نشان می‌دهد روش‌هایی که بر روی زمین انجام می‌شوند، روش‌هایی هستند که در آن‌ها تجهیزات اندازه‌گیری در تماس مستقیم با ذرات خاک است. چنین تجهیزاتی قابلیت واسنجی‌شدن داشته و امکان اندازه‌گیری در طول پروفیل خاک تا عمق مورد نظر را به‌کاربر می‌دهند، اما مقادیر ارائه شده به‌صورت نقطه‌ای بوده و تفسیر مکانی و توزیع محتوی آب خاک را با مشکل مواجه می‌سازند (Western et al., 2002). از جمله روش‌هایی که در روی زمین و توسط پژوهشگران مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است، می‌توان روش وزنی، کاوشگر نوترون (Neutron Probe)، بازتاب سنجی حوزه زمانی (TDR)، بازتاب‌سنجی دامنه فرکانس (Frequency Domain Reflectometry) یا FDR، اشعه گاما و رادار نفوذ زمینی (GPR) را نام برد. روش وزنی (استفاده از آون) به‌طور گسترده‌ای برای تعیین مقدار رطوبت خاک

² Global Positioning System

¹ Cosmic Ray Neutron Sensor

است با این تفاوت که محاسبات براساس تغییرات فرکانس یک سیگنال به سبب خواص دی الکتریک خاک تعیین می شود.

اشعه گاما یک روش رادیواکتیو بوده که قادر به تعیین محتوی آب خاک در لایه سطحی خاک (۱ تا ۲ سانتی متری از سطح زمین) است. انتقال اشعه گاما تغییرات چگالی مرطوب خاک را اندازه گیری کرده که مقدار محتوی آب خاک را به طور مستقیم ارائه می دهد. این روش غیرمخرب و عدم اثرپذیری شرایط رطوبت در خاک بر نتایج را داراست (Goit et al., 1978). هزینه زیاد و مشکلات کاربر در مطالعات صحرایی از نقاط ضعف این روش است (Pires et al., 2005).

روش رادار نفوذ زمینی (GPR) بر مبنای انتقال و انعکاس یک موج الکترومغناطیس در خاک استوار شده است (Chanzy et al., 1996). آنتن انتقال دهنده سیستم رادار، موج های رادیویی به صورت نورافکن انتشار می دهد (Reynolds et al., 2011). دریافت کننده دستگاه، تغییرات خواص الکتریکی زیر سطح زمین را براساس نحوه انعکاس سیگنال نمایان می سازد. این روش غیرمخرب و سریع است و دارای وضوح بسیار بالا است که قابلیت پوشش سطح عظیمی از زمین (بیش از ۲۵۰۰۰ متر مربع) در روز را دارد (Huisman et al., 2001). شیب های تند و سنگی استفاده این روش را به خاطر اندازه بزرگ آنتن ها محدود می سازد.

رطوبت خاک را می توان با اندازه گیری درجا، سنجش از دور یا مدل سازی هیدرولوژیکی تخمین زد. ولی برای کاربرد در مقیاس گسترده پهنای، روش های درجا به دلیل فقدان شبکه در گستره وسیع سرزمین، قابل کاربرد نیست. ولی در مقیاس پهنای، حسگرهای مایکروویو به دلیل حساسیت به رطوبت خاک از طریق تأثیر رطوبت بر ثابت دی الکتریک و در نتیجه باز انتشار از خاک موفق بوده اند زیرا به رطوبت خاک از طریق تأثیرات رطوبت بر ثابت دی الکتریک و در نتیجه انتشار خاک حساس هستند (Houser et al., 1998; Njoku et al., 2003; Puma et al., 2005). داده های سنجش از دور حسگرهای مایکروویو به عنوان یک جایگزین برای تخمین سریع خواص خاک قابل استفاده هستند (Mattikalli et al., 1998). این روش برای مقیاس های بزرگی که نیاز به پوشش کامل است، مناسب ارزیابی شده اما هزینه بالا و پیچیدگی ارتباط داده ها با خواص خاک، مشکلات تخمین رطوبت در مناطق با پوشش گیاهی غنی، از نقاط ضعف این روش است. از جمله عدم قطعیت ها در رابطه بین درجه حرارت، درخشندگی سطحی و رطوبت خاک دقت این روش را با محدودیت مواجه نموده است (Wang and Qu, 2009). روش مستقیم وزنی روشی استاندارد، قابل اعتماد و مقرون به صرفه است، اما زمان بر و باعث تخریب زمین است، روش های غیرمستقیم گران بوده و برای اندازه گیری دقیق در مقیاس فضایی نیاز به

واسنجی در شرایط مختلف دارند، اما نتایج خوبی را در مقیاس زمانی ارائه می دهند. سنجش از دور و روش های GPR، اگرچه معمولاً با خطاهای جوی و همپوشانی داده ها همراه هستند، اما منطقه وسیع تری را پوشش می دهند (Rasheed et al., 2022). روش های غیرمستقیم اندازه گیری رطوبت خاک (SWC) به دلیل عملی بودن و ماهیت غیرمخرب آن ها، به طور گسترده ای در مطالعات میدانی مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ها، از جمله پراکندگی نوترون، بازتاب سنجی دامنه زمانی (TDR)، بازتاب سنجی دامنه فرکانسی (FDR) و اندازه گیری های دی الکتریک، به پژوهشگران اجازه می دهد تا با اندازه گیری خواص فیزیکی که با رطوبت خاک تغییر می کند، رطوبت تخمین زده شود. تجهیزات TDR با اندازه گیری زمان انتقال امواج الکترومغناطیسی در خاک و بازتاب آن که متأثر از ثابت دی الکتریک آب است، رطوبت خاک را اندازه گیری می کند. این روش معمولاً با دقت نزدیک به روش وزنی رطوبت خاک (SWC) است، اما ممکن است در خاک های شور یا با مواد آلی بالا نیاز به واسنجی ویژه نوع خاک داشته باشد. روش FDR نیز با اندازه گیری تغییرات فرکانس در پاسخ به خواص دی الکتریک، برای دقت بالا در انواع مختلف خاک شناخته شده است، ولی دامنه اندازه گیری کوچک تری دارد و ممکن است تحت تأثیر دما، چگالی و بافت خاک قرار گیرد. پراکندگی نوترون این روش از کاوشگرهای نوترونی استفاده می کند که عمدتاً اتم های هیدروژن را در آب تشخیص می دهند. تجهیزات FDR با واسنجی ویژه برای انواع خاک، اندازه گیری های دقیقی با دقت نزدیک به روش وزنی و نیز در رطوبت حجمی خاک را دارا است. با این حال، این روش نیاز به واسنجی دقیق و کار با تشعشعات دارد که می تواند پرهزینه و زمان بر باشد. در روش های مقاومت الکتریکی و گرما-محور از مقاومت خاک در برابر جریان الکتریسیته استفاده می شود که با تغییر میزان آب تغییر می کند. با وجود اینکه این روش ها مفید هستند، ولی نیاز به تماس خوب با خاک دارند و به شوری خاک و چگالی حجمی حساس هستند. روش های پراکنش حرارتی خواص حرارتی را که تحت تأثیر رطوبت خاک قرار دارد، اندازه گیری می کنند و اطلاعاتی از پتانسیل آب خاک ارائه می دهند، اما همچنان نیاز به واسنجی ویژه خاک دارند (IAEA, 2008; Sharma et al., 2021). پژوهش های مقایسه ای، اگرچه دقیق و اقتصادی هستند، اما از نظر جغرافیایی محدود هستند. تکنیک های اندازه گیری مستقیم مانند روش وزن سنجی، زمان بر و مخرب هستند. در مقابل، روش های غیرمستقیم گران تر هستند و اندازه گیری با توزیع مکانی انجام نمی دهند، اما داده های دقیقی را در مقیاس زمانی تولید می کنند. در حالی که روش های رادار نفوذی زمین و سنجش از دور برای اندازه گیری رطوبت خاک در مناطق

al., 2003; Jiménez-Martínez et al., 2009; Dafny and Šimůnek, 2016; Altafi Dadgar et al., 2020) کاوشگر نوترون (Lebon et al., 2003; Kisekka et al., 2015; Domínguez-Niño et al., 2020) روش سنسجش از دور (Neale et al., 2012) و روش GPR توسط (Serbin and Or, 2004) صورت گرفته است. همچنین، داده‌های ماهواره‌ای SMAP، GLDAS، ESA CCI SM و سنتینل ۲ نیز توسط پژوهشگران مختلفی برای تخمین رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Abdeh Kolahchi et al., 2023; Miri et al., 2024).

واسنجی روش‌های مختلف برای اغلب سنسجده‌های رطوبت خاک که دقت اندازه‌گیری لازم است مورد نیاز است (Western and Seyfried, 2005). با این حال مطالعاتی که روش‌های مختلف را با هدف مقایسه نتایج اندازه‌گیری محتوی آب خاک را به‌طور جامع در بر داشته باشد، بسیار محدود بوده و تنها نتایج و داده‌های مطالعات به‌صورت مقالات مروری مورد بحث واقع شده است. بنابراین هدف این پژوهش بررسی و ارزیابی روش‌های TDR، کاوشگر نوترونی PR2، داده‌های سنسجش از دور سنتینل ۲ و SMAP با مقایسه با اندازه‌گیری درجا با روش وزنی در منطقه پایلوت تلو واقع در استان تهران، ایران است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از منطقه تلو به نام دهسید در لواسانات استان تهران است که دارای مساحت ۳۲۸ هکتار و در محدوده ۸/۳' ۳۷' ۵۱" تا ۱۷' ۳۹' ۵۱" طول شرقی و ۶' ۴۷' ۳۵" تا ۱۵' ۴۸' ۳۵" عرض شمالی قرار دارد. از نظر تقسیمات استانی این محدوده در استان تهران و در شهرستان‌های تهران و شمیرانات واقع شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه را نشان می‌دهد. این محدوده در حدفاصل ارتفاعی ۱۶۱۳ تا ۱۹۷۱ متری از سطح دریا واقع بوده و دارای متوسط بارش سالانه حدود ۴۳۸ میلی‌متر است. همچنین، اسفند با متوسط ۶۶ میلی‌متر و آذرماه با ۶۰ میلی‌متر بارش در سال بیش‌ترین بارندگی ماهانه دارا هستند و تیر ماه با ۲ میلی‌متر کمینه بارش ماهانه را دریافت می‌نماید (Porhemmat et al., 2025b). بررسی داده‌های بارندگی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از بارش‌ها در ماه‌های فصل زمستان و پس از آن پاییز و سپس بهار اتفاق می‌افتد. در این میان فصل تابستان از کم‌ترین میزان بارندگی متوسط سالانه برخوردار است. این موضوع تأییدی بر رژیم بارندگی حاکم بر کشور است که در طی آن، بیش‌ترین ریزش‌های جوی در فصول سرد سال و منطبق بر فصل خواب گیاهان است (Porhemmat et al., 2025b).

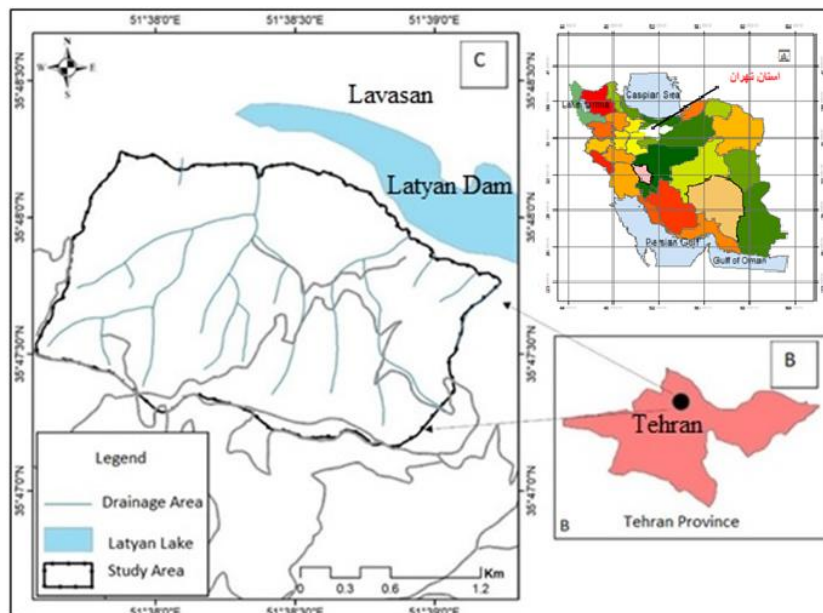
وسیع‌تر کاربرد دارند، اما با خطاهای ناشی از همپوشانی داده‌ها و عوامل جوی همراه هستند. عواملی مانند توپوگرافی، نوع خاک، پوشش گیاهی، تغییرات آب و هوایی، سطح آب زیرزمینی و عمق خاک عمدتاً بر اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک تأثیرگذار هستند. تکنیک‌های مختلفی برای شرایط عملی مختلف به‌کار گرفته شده است، اگرچه مقایسه بین آن‌ها در انتشارات به ندرت در دسترس است. هر روش مجموعه‌ای منحصر به فرد از مزایا و معایب بالقوه را ارائه می‌دهد. تکنیک‌های سنسجش از دور نیاز به پایش رطوبت خاک در مقیاس بزرگ و با دقت مکانی-زمانی بالا را برطرف کرده‌اند. رویکردهای یادگیری ماشین/عمیق با استفاده از قابلیت‌های خودآموزی در مناطقی با داده‌های کم، اندازه‌گیری و پیش‌بینی رطوبت خاک را تسهیل می‌کنند (Rasheed et al., 2022).

مطالعات چند سال اخیر در مورد روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک بر بهبود دقت در شرایط مختلف میدانی، انواع خاک و تأثیرات آب و هوا متمرکز شده‌اند. این مطالعات اغلب از حس گرهای پیشرفته و یادگیری ماشین برای کاهش خطا استفاده می‌کنند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های جدیدتر حس گرهای رطوبت خاک خازنی و مقاومتی، مانند SM150 و PR2، با واسنجی مناسب، دقت بالایی در اندازه‌گیری SWC دارند. به‌عنوان مثال، این حس گرها در آزمایش‌های مختلف در اعماق خاک در باغ‌های میوه، خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE) زیر سه درصد داشته‌اند و در هر دو محیط آزمایشگاهی و میدانی عملکرد قابل اعتمادی از خود نشان داده‌اند. با این حال، مطالعات تأکید می‌کنند که واسنجی خاص خاک به‌دلیل تغییرات در بافت خاک و چگالی حجمی ضروری است (Marković et al., 2024; Sharma et al., 2021). بررسی روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک اعلام داشتند که مناسب بودن حس گرهای رطوبت خاک می‌تواند با استفاده از معیارهای اهداف مختلف، متفاوت باشد. استفاده از یک حسگر در تعیین رطوبت خاک به تنهایی نمی‌تواند مناسب بودن آن را تعیین کند، و ترجیحاً باید خطاهای مرتبط با حسگر از طریق روش‌های دقیق ارزیابی شود. در حال حاضر نبود اطلاع از خطای حس گرها در گزارش‌های رطوبت خاک، به دقت برآوردهای آب منطقه ریشه، تبخیر و تعرق و نیاز آبیاری منتقل می‌شود (Sharma et al., 2021).

بررسی متون علمی نشان می‌دهد که مطالعات براساس نوع اهداف تعریف شده یکی از روش‌ها را برای تعیین خواص خاک استفاده نموده‌اند. برای مثال برای بررسی‌های آزمایشگاهی از FDR (Altafi Dadgar, et al, 2018; Porhemmat et al, 2018) بررسی‌های صحرایی با روش TDR (Hammecker et

ساختمان و افق‌های مشخصه تحت الارضی با بافت متوسط و سنگین است (Porhemmat et al., 2025b).

مطالعات خاک‌شناسی بر اساس نمونه برداری در ۳۰ نقطه از محدوده و تجزیه آن‌ها در آزمایشگاه حاکی از آن است که بخش عمده خاک‌های محدوده مطالعاتی دارای تکامل پروفیلی، دانه‌بندی و



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در استان تهران (A نقشه ایران، B استان تهران و C محدوده مطالعاتی)

Figure 1. Location of the study area in Tehran, Iran province (A is the country map, B is Tehran province, and C is the study area)

سنجنده قرائت رطوبت است که به‌طور همزمان قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک را در اعماق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متری را دارا است. دستگاه PR2 از یک صفحه نمایش قرائت رطوبت و یک کاوشگر متشکل از سنجنده‌های رطوبت تشکیل شده است (شکل ۳). برای اندازه‌گیری رطوبت خاک با این دستگاه، نیاز است تا یکسری لوله‌های ورودی مخصوص در خاک جای‌گذاری شوند. بدین منظور ابتدا با اوگر مخصوص، حفره‌ای به عمق ۱۰۰ سانتی متر در نقطه مورد نظر حفر شده و سپس لوله ورودی در حفره قرار داده می‌شود.

شکل ۴ مراحل آماده‌سازی نقاط پایش رطوبت را برای استفاده از دستگاه PR2 نشان می‌دهد. پس از حفر نقاط پایش و تجهیز آن، از مهرماه سال ۱۳۹۸ الی فروردین ۱۴۰۱ به مدت ۱۸ ماه داده‌های رطوبت خاک در نقاط پایش، اندازه‌گیری و ثبت شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه مذکور بدون ثبت خودکار (Data logger) انجام شد، لذا در ماه‌هایی از سال که بارش برف در منطقه وجود داشته و قابل تردد نبوده است برداشت به‌صورت دوره‌ای زمانی منظم انجام نشده است. به‌طور کلی پایش رطوبت با مقیاس زمانی حداقل یک هفته و حداکثر سه هفته یک‌بار انجام شد. همچنین تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و SMAP طی این دوره اخذ و در اوقات

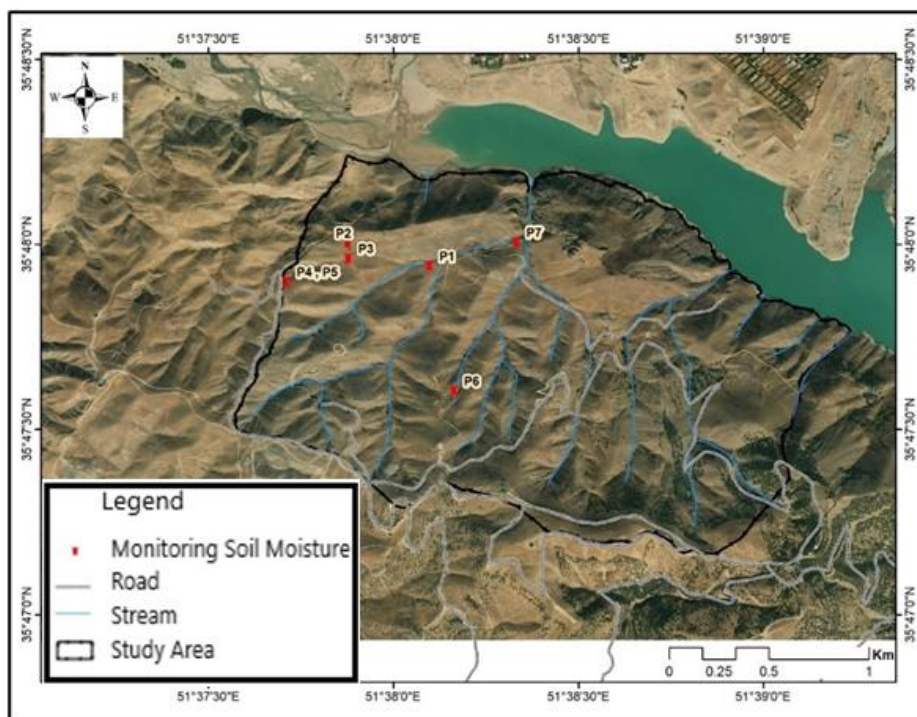
پایش رطوبت

رطوبت خاک با روش وزنی به‌عنوان روش مستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک و با سنجنده‌های TDR و PR2 به‌عنوان سنجنده نقطه‌ای و سنجنده‌های سنتینل ۲ و SMAP به‌عنوان سنجنده گستره مکانی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. روش وزنی به‌دلیل دقیق بودن به‌عنوان معیار مشاهده‌ای برای ارزیابی سنجنده‌های TDR و PR2 استفاده شد و سپس از دو سنجنده TDR و PR2 آن یکی که تطابق بیشتری با روش مستقیم وزنی داشته است برای ارزیابی سایر سنجنده‌ها استفاده شد. بدین منظور داده‌های هم‌زمان رطوبت خاک روش وزنی در ۶ اندازه‌گیری برای بررسی و سنجنده‌های TDR و PR2 استفاده شد. به‌منظور پایش رطوبت خاک با دو سنجنده TDR و PR2، تعداد ۷ ایستگاه که دارای عمق خاک مناسب (بیش از یک متر) بود انتخاب شد. موقعیت این ایستگاه‌ها که برخی در شیب دامنه‌ها و برخی در مناطق مسطح هستند، طوری انتخاب شده است که مقدار رطوبت در اراضی با سه نوع پوشش اصلی منطقه شامل پوشش مرتعی، پوشش درختی و سطوح عاری از پوشش گیاهی را پایش نمایند. شکل ۲ موقعیت این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در هر کدام از ایستگاه‌های انتخابی برای پایش رطوبت خاک، از دستگاه پروفایل کاوشگر ۱ مدل PR2 استفاده شد. این دستگاه دارای ۵

بر اساس داده‌های آماری مشاهده‌ای مقدار رطوبت خاک با PR2 معادل ۱۵/۱۴ میلی‌متر و با TDR معادل ۱۵/۵ میلی‌متر به دست آمده است، که حاکی از نزدیک بودن ارقام قرائت شده از دو روش است.

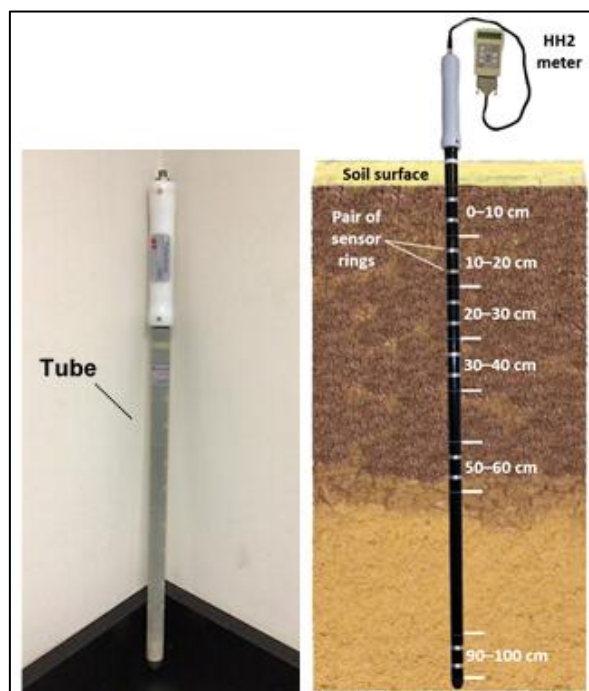
هم‌زمان طی مدت یاد شده برای پایش رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفتند.

رطوبت خاک با حسگرهای PR2 و TDR طی ۱۸ ماه اندازه‌گیری شد. جدول ۱ پارامترهای آماری رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با این دو حسگر را برای مقایسه نشان می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت نقاط پایش رطوبت

Figure 2. Location of soil moisture monitoring



شکل ۳- نمایی از دستگاه PR2 و اجزای آن

Figure 3. Detail of the PR2 device and its components



شکل ۴- مراحل نصب تجهیزات اندازه گیری رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه

Figure 4. Steps of installing soil moisture measurement equipment in the study area

$$NDWI = \frac{(Band_3 - Band_8)}{(Band_3 + Band_8)} \quad (1)$$

۳-۲- شاخص های رطوبتی تصاویر SMAP

ماهواره SMAP برای نقشه برداری و پایش رطوبت خاک در سطح زمین استفاده می شود. این ماهواره با استفاده از سنجش از دور، اطلاعات مربوط به رطوبت خاک را جمع آوری می کند و این اطلاعات برای پیش بینی هواشناسی، مدیریت منابع آب و درک بهتر چرخه های آب و انرژی در سیستم زمین استفاده می شود. دوره زمانی تکرار این ماهواره برای اندازه گیری رطوبت سطحی خاک با پوشش دو تا سه روزه است. ماهواره SMAP مجهز به دو ابزار اصلی است که یکی رادار با طول موج L-band برای اندازه گیری فعال رطوبت خاک، و دیگری رادیومتر با طول موج L-band برای اندازه گیری غیرفعال رطوبت خاک است. این دو ابزار با هم کار می کنند تا اطلاعات دقیقی از رطوبت خاک در عمق سطحی (حدود ۵ سانتی متر) به دست آورند (<https://smap.jpl.nasa.gov>).

۴-۲- معیارهای آماری مورد استفاده

به منظور ارزیابی داده های حس گرها و سنجنده های مختلف بر اساس داده های مشاهده ای رطوبت خاک از چهار معیار شامل درصد انحراف، ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) و میانگین مطلق خطا^۳ (MAE) استفاده شد. ضریب تعیین از رابطه^۳ ۳ به دست می آید. در رابطه^۳ y متغیر و x مقدار رطوبت مشاهده ای است.

جدول ۱- پارامترهای آماری رطوبت خاک اندازه گیری شده با دو روش PR2 و TDR

Table 1. Statistical parameters of the observed soil moisture by PR2 and TDR (%)

Statistical parameter	PR2	TDR
Mean	15.14	15.50
Standard error	2.13	2.03
Median	11.98	16.12
Standard deviation	8.26	7.85
Sample variance	68.28	61.55
kurtosis	0.53	-1.35
Skewness	0.88	0.12
Range	29.70	24.54
Minimum	4.96	3.33
Maximum	34.66	27.88
Total	227.07	232.45
Number	15.00	15.00
Confidence level (95.0%)	4.58	4.34

۲-۲- شاخص تفاضل نرمال شده (NDWI)

این شاخص توسط (McFeeters, 1996) به منظور آشکارسازی آب در تصاویر ماهواره ای ارائه شد. شاخص NDWI به منظور آشکارسازی آب از تصاویر ماهواره ای سیتینیل-۲ از باندهای مادون قرمز نزدیک (باند ۸) و سبز (باند ۳) استفاده می کند. با توجه به اینکه آب در طول موج سبز دارای انعکاس بیش تری نسبت به طول موج مادون قرمز است، استفاده از این ترکیب باندی برای محاسبه شاخص NDWI سبب کم کردن اثر پدیده های غیرآبی هم چون خاک و پوشش گیاهی می شود. مقادیر مثبت نشان دهنده آب و مقادیر منفی نشان دهنده پدیده های غیرآبی هم چون خاک و پوشش گیاهی است (McFeeters, 1996).

³ Mean Absolute Error

¹ Normalized Difference Water Index

² Root Mean Square Error

به ترتیب شکل های ۵ و ۶). جدول ۲ شاخص های آماری بین رطوبت خاک TDR و PR2 با مقادیر مشاهده ای وزنی را نشان می دهد. همان طور که در جدول ۲ و شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود میزان همبستگی داده های TDR و مشاهده ای با ضریب تعیین (R^2) معادل ۰/۹۱ است و با PR2 معادل ۰/۹۲ است که اگرچه خیلی به هم نزدیک هستند، ولی همبستگی داده های PR2 با داده های مشاهده ای کمی بالاتر از همبستگی TDR با داده های مشاهده ای است. هم چنین RMSE و MAE بین داده های وزنی با TDR به ترتیب ۴/۴ و ۳/۸ و با PR2 به ترتیب ۵/۶ و ۴/۶ به دست آمده است. با وجود نزدیک بودن ضریب تعیین داده های دو روش با مقادیر مشاهده ای ولی میزان انحراف TDR با حدود ۶ درصد به طور چشم گیری از داده های PR2 با ۲۳ درصد انحراف اختلاف کمتری را نشان می دهد. به علاوه بر اساس هر دو معیار RMSE و MAE، سنجنده TDR برآورد دقیق تری از رطوبت خاک را داشته است. بنابراین، در غیاب اندازه گیری وزنی دقت داده های TDR به عنوان جایگزین برای شرایط اندازه گیری تک عمقی بر PR2 ترجیح داده می شود.

$$R^2 = \frac{(\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N})^2}{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N})(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N})} \quad (3)$$

هم چنین RMSE از رابطه زیر به دست می آید.

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y_i - x_i)^2}{n}} \quad (4)$$

به علاوه MAE از رابطه ۵ به دست می آید.

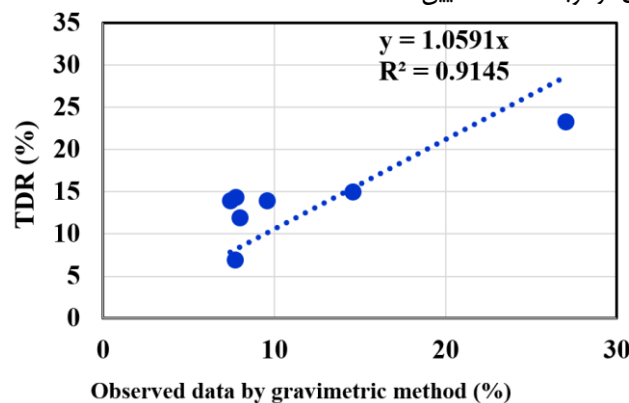
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - x| \quad (5)$$

قابل ذکر است که در روابط ۳ تا ۵ مقدار رطوبت خاک توسط حسگر یا سنجنده ای است که مورد ارزیابی قرار می گیرد و x داده مشاهده ای معیار و n تعداد داده است.

۳- نتایج و بحث

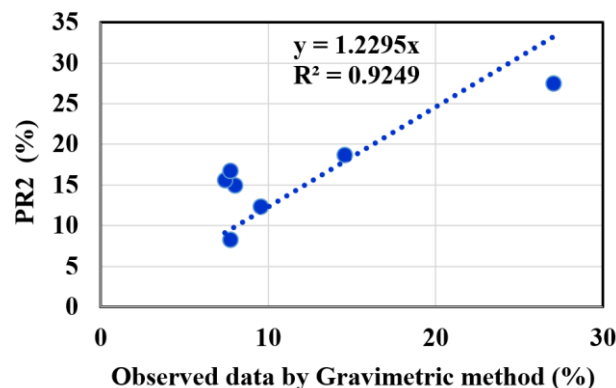
۳-۱- بررسی و مقایسه روابط رطوبت خاک حاصل از TDR و PR2 با داده های مشاهده ای

به منظور تعیین دقت داده های اندازه گیری شده با TDR و PR2 رابطه همبستگی آن ها به طور جداگانه با داده های مشاهده ای حاصل از روش وزنی اندازه گیری رطوبت خاک تعیین شد



شکل ۵- رابطه همبستگی داده های سنجنده TDR با داده های مشاهده ای اندازه گیری شده به روش وزنی

Figure 5. Correlation between TDR sensor data and observed data by the weighted method



شکل ۶- نمودار رابطه همبستگی داده های سنجنده PR2 با داده های مشاهده ای اندازه گیری شده به روش وزنی

Figure 6. Correlation between PR2 sensor data and observed data by the weighted method

که امکان اندازه گیری همزمان رطوبت خاک را در اعماق مختلف در یک پروفیل خاک فراهم می نماید.

جدول ۲- شاخص های آماری بین رطوبت خاک TDR و PR2
مقادیر مشاهده ای وزنی

Table 2. Statistical relation between PR2 and TDR with observed data					
Sensor	Regression Equation (y is PR2 and x is TDR)	R ²	RMSE	MAE	S _{eq}
TDR	y = 1.059x	0.91	4.4	3.8	0.014
PR2	y = 1.23x	0.92	5.6	4.6	0.010

جدول ۳- رابطه همبستگی و معیارهای آماری بین PR2 با TDR
Table 3. Regression relation and statistical criteria between PR2 and TDR

Station	Regression Equation (y is PR2 and x is TDR)	R ²	RMSE	MAE	S _{eq}
P1	y = 1.2775x	0.8966	10	7.1	0.016
P2	y = 0.9874x	0.8777	5.1	3.7	0.002
P3	y = 0.7804x	0.826	6.3	5.1	0.005
P4	y = 1.1952x	0.8931	9.4	6.9	0.001
P5	y = 0.6852x	0.8305	6.5	4	0.001
P6	y = 1.304x	0.8919	10	6.8	0.0002
P7	y = 1.1601x	0.9327	5.5	4.4	0.001

نتایج تحلیل همبستگی NDMI با TDR در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که جدول ۴ نشان می دهد دامنه ضریب تعیین بین داده های این دو سنجنده خیلی زیاد است. مقادیر R² از ۰/۱۱ در ایستگاه P3 تا ۰/۹۰۵ در ایستگاه P2 در تغییر است. مقادیر ضریب تعیین در سایر ایستگاه ها که در حداصل این دو قرار گرفته اند به ترتیب ۰/۱۵۹، ۰/۵۶۸، ۰/۵۸۲، ۰/۸۳۳ و به ترتیب در ایستگاه های P7، P6، P5 و P4 است. با این وجود در چهار ایستگاه P2، P4، P5 و P6 ضریب تعیین در سطح ۵ درصد معنادار، ولی در دو ایستگاه P3 و P7 همبستگی معناداری بین آنها وجود ندارد. لازم به یادآوری است که P2، P3 و P6 با پوشش مرتعی، P4 و P5 با پوشش درختی و P7 در اراضی بدون پوشش است. بنابراین بیشترین دامنه اختلاف در اراضی مرتعی مشاهده شده است که ضریب تعیین در دامنه ۰/۱۱ تا ۰/۹۰۵ واقع شده است. اراضی بدون پوشش نیز فاقد همبستگی معنی دار است. ضمناً معیارهای RMSE و MAE نیز با نتایج ضریب تعیین هماهنگی است. بنابراین ممکن است چنین ناهماهنگی به دلیل ناهمگنی توزیع مکانی رطوبت بوده که داده های نقطه ای با گستره سلولی با هم دیگر اختلاف دارند.

۲-۳- بررسی و مقایسه داده های PR2 و سنتینل ۲ با TDR همان طور که در روش تحقیق بیان شد، به منظور تعیین دقت داده های سنتینل ۲ و SMAP در برآورد رطوبت خاک پس از واسنجی داده های TDR و PR2 یکی از این دو که از دقت بیش تری برخوردار است برای ارزیابی این دو استفاده می شود. با توجه به دقت بیش تر TDR در ارزیابی با داده های اندازه گیری شده وزنی TDR به عنوان معیار بررسی هر سه سنجنده PR2، سنتینل ۲ و SMAP انتخاب شد. بنابراین از داده های TDR و PR2 که در یک بازه زمانی مشخص در ایستگاه های هفت گانه اندازه گیری شده است استفاده شد. همچنین، همزمان با این داده ها، تصاویر سنتینل ۲ و SMAP نیز تهیه شد.

جدول ۳ روابط همبستگی داده های PR2 با TDR را به همراه نتایج معیارهای آماری R²، RMSE و MAE نشان می دهد. بر اساس جدول ۳ ضریب تعیین بین حداقل ۰/۸۲۶ در ایستگاه P3 تا ۰/۹۳۳ در ایستگاه P7 در تغییر است. همچنین R² در سایر ایستگاه ها به ترتیب ۰/۸۳۱، ۰/۸۷۸، ۰/۸۹۲، ۰/۸۹۳ و ۰/۸۹۷ در ایستگاه های P5، P2، P6، P4 و P1 است. چنین درجه همبستگی و دقت برآورد PR2 بر اساس TDR را نیز معیارهای آماری RMSE و MAE تأیید می کنند. بنا براین همبستگی بسیار نزدیکی بین مقادیر داده های PR2 با TDR در همه ایستگاه ها وجود دارد. شایان ذکر است که هر دو سنجنده با داده های اندازه گیری مشاهده ای وزنی نیز دارای همبستگی بالا و نزدیک به هم بودند. به علاوه، جدول ۳ نیز ضریب زاویه خط همبستگی با عرض از مبدأ صفر را برای رابطه همبستگی در شش ایستگاه منتخب نیز نشان می دهد. تفاضل قدر مطلق این پارامتر از عدد یک، بیانگر انحراف برآورد کننده از شاخص است. همان طور که ملاحظه می شود قدر مطلق انحراف از یک، برای ضریب خط همبستگی بین ۰/۰۱ (اختلاف ۱ درصد از یک) تا ۰/۳۱ (اختلاف ۳۱ درصد از یک) به ترتیب در ایستگاه P2 و ایستگاه P5 در تغییر است. در سایر ایستگاه ها این مقدار شامل ۰/۱۶، ۰/۱۹، ۰/۲۸ و ۰/۳ به ترتیب در ایستگاه های P7، P4، P1 و P6 است.

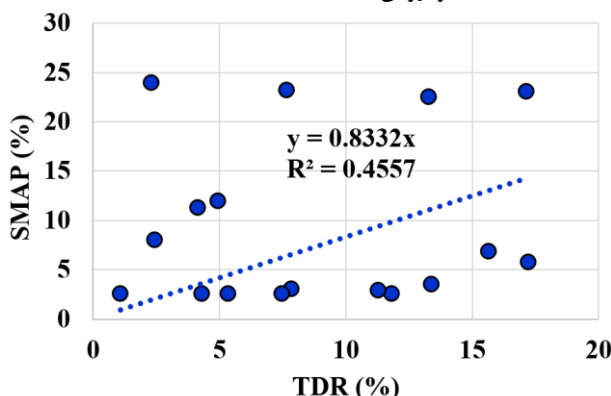
رابطه همبستگی در همه ایستگاه ها در سطح ۵ درصد معنی دار بوده و لذا اختلاف انحراف مطلق از خط همبستگی ۱ به ۱ و یا انحراف از ۱ ضریب تعیین در ایستگاه های مختلف می تواند ناشی تغییرات جزئی در بافت خاک در حداصل نصب سنجنده ها باشد. شایان ذکر است که همبستگی داده های هر دو سنجنده با داده های مشاهده ای حاصل از اندازه گیری وزنی رطوبت با دقت بالا و نیز نزدیک به هم بوده اند. لذا هر کدام از این دو سنجنده با توجه به شرایط محیطی برای برآورد رطوبت خاک به صورت نقطه ای مناسب هستند. همچنین مزیت PR2 بر TDR این است

شرایط یاد شده برای کل محدوده مورد مطالعه برابر ($R^2=0/455$) است. همچنین، میزان میانگین ضریب زاویه خط همبستگی داده‌های SMAP نسبت به داده‌های به‌دست آمده از TDR در کل منطقه مورد مطالعه $0/833$ به‌دست آمده است. به‌علاوه RMSE و MAE به‌ترتیب $7/96$ و $7/1$ به‌دست آمده است. بنابراین، میانگین رطوبت منطقه توسط این ماهواره با دقت بیش‌تری نسبت به سنتینل ۲ برآورد شده است. این نتایج با پژوهش Abdeh Kolahchi et al. (2023) هم‌خوانی نسبی دارد. همچنین با پژوهش Chen et al. (2018) که نشان می‌دهد حالت فعال SMAP در مقایسه با حالت‌های غیرفعال، ضریب همبستگی بالاتری با اندازه‌گیری‌های زمینی دارد نیز هماهنگ است. همچنین، نتایج این پژوهش با نتایج Saboori Noghabi et al. (2022) مطابقت داشته ولی با نتایج پژوهش Haji Maleki et al. (2020) که مقدار RMSE بالا و دقت SMAP را پایین نشان می‌دهد هماهنگ نیست.

جدول ۴- رابطه همبستگی NDMI با درصد مطلق رطوبت خاک

TDR					
Table 4. Regression relation between NDMI and TDR					
Station	Correlation relation	R ²	RM	MA	Sig
P2	$y = -0.0174x$	0.9046	6.7	6.3	0.63
P3	$y = -0.003x$	0.1104	9.96	9.14	0.46
P4	$y = -0.003x$	0.8327	21.7	20.3	0.495
P5	$y = -0.0056x$	0.5816	9.8	9.1	0.127
P6	$y = -0.0062x$	0.5677	11.7	10.2	0.088
P7	$y = -0.0009x$	0.1591	14.5	12.7	0.89

منطقه طرح به‌دلیل کوچک بودن مقیاس داده‌های SMAP قابل انطباق با ایستگاه‌های زمینی TDR نبوده و کل منطقه در یک سلول این تصاویر واقع شده است. با این وصف داده‌های هم‌زمان شاخص رطوبت تصاویر SMAP با میانگین داده‌های رطوبت حاصل از TDR در هفت ایستگاه مقایسه و بررسی شده است. شکل ۷ همبستگی و میزان انحراف داده‌های شاخص رطوبت به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای SMAP را نسبت به میانگین داده‌های واقعی رطوبت از TDR در این هفت ایستگاه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود ضریب تعیین بین داده‌های رطوبت خاک محاسبه شده با دو روش با



شکل ۷- رابطه همبستگی شاخص رطوبت SMAP با داده‌های TDR در کل محدوده مورد مطالعه

Figure 7. Correlation between the soil moisture index in SMAP and with TDR across the study area

عمق ۵ سانتی‌متری خاک نفوذ نموده و اندازه‌گیری مستقیم‌تری از خواص دی‌الکتریک خاک که تابع میزان رطوبت آن است ارائه می‌دهند. رادار از پوشش ابر عبور نموده و به رطوبت زیر سطحی خاک حساس است. عامل مهم دیگر تفاوت سنتینل ۲ با SMAP در وضوح مکانی و زمانی این دو است. سنتینل ۲ دارای وضوح مکانی بالا و حدود ۱۰ متر بوده و ویژگی‌های سطحی دقیق و ناهمگنی را ثبت نموده، درحالی‌که SMAP دارای وضوح کم‌تری است و میانگین رطوبت خاک را در مناطق بزرگ‌تر محاسبه می‌کند در نتیجه تغییرات موضعی را هموار می‌کند. از نظر وضوح زمانی داده‌های سنتینل ۲ هر ۶ روز یک بار اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که SMAP هر ۲ تا ۳ روز یک بار اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. از نظر عمق نفوذ حسگرهای نوری عمدتاً به لایه سطحی و پوشش گیاهی حساس هستند و لذا قرائت آن‌ها به شدت تحت

تفاوت در مقادیر رطوبت خاک به‌دست‌آمده از حس گرهای نوری غیرفعال مانند سنتینل ۲ که از شاخص‌هایی مانند NDMI استفاده می‌نماید با حس گرهای راداری فعال مانند SMAP عمدتاً از چندین عامل کلیدی شامل اصول اندازه‌گیری، وضوح مکانی، وضوح زمانی، عمق نفوذ و پردازش داده‌ها و واسنجی‌ها ناشی می‌شود. سنسورهای نوری تابش الکترومغناطیسی منعکس‌شده را در باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه تشخیص و لذا شاخص NDMI به‌طور خاص میزان رطوبت در پوشش گیاهی و خاک سطحی را بر اساس تفاوت در بازتاب برجسته می‌کند. بنابراین، به‌طور غیرمستقیم به رابطه بین میزان آب پوشش گیاهی و رطوبت خاک وابسته است. در مقابل سنسورهای راداری SMAP از حسگر مایکروویو فعال استفاده و سیگنال‌هایی را منتشر می‌کنند که تا درجات مختلفی از سطح تا

تأثیر شرایط سطحی و پوشش گیاهی است. درحالی که حسگرهای راداری بسته به فرکانس خود به چند سانتی متر بالایی خاک نفوذ کرده و اندازه گیری مستقیم تری از محتوای آب خاک در زیر لایه سطحی ارائه دهند. دقت هر دو سنجنده تحت تأثیر مراحل پردازش و واسنجی هستند. این تفاوت ها باعث می شود تا اندازه گیری های حاصل از حسگرهای نوری و راداری مقادیر متفاوتی را برای رطوبت خاک ارائه دهند، و لذا هر کدام از این دو بسته به کاربرد و زمینه خاص، نقاط قوت و محدودیت های خاص خود را دارد. مطالعات و پژوهش های متعددی وجود دارد که دال بر این است که حسگرهای میکروویو فعال مانند SMAP در مقایسه با روش های نوری غیرفعال یا سایر روش های سنجش از دور، همبستگی بهتری با اندازه گیری های رطوبت خاک در محل دارند. نتایج پژوهش Chen et Al. (2018) نشان می دهد که حالت فعال SMAP در مقایسه با حالت های غیرفعال، ضرایب همبستگی بالاتری با اندازه گیری های زمینی دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف بررسی دقت روش های غیرمستقیم تعیین رطوبت خاک، منطقه تلو در شرق کلان شهر تهران انتخاب و تعداد هفت ایستگاه در کاربری های مختلف در این حوضه انتخاب شد. ایستگاه های P1، P2، P3 و P6 در اراضی با پوشش مرتعی متراکم، ایستگاه P4 و P5 در اراضی با پوشش درختی و ایستگاه P7 در اراضی بدون پوشش گیاهی دایر شد. چهار روش غیرمستقیم تعیین رطوبت خاک شامل دو حسگر TDR و PR2، تصاویر ماهواره ای سنجنده های سنتینل ۲ و SMAP در این منطقه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. هم چنین رطوبت خاک اندازه گیری شده به روش وزنی به عنوان داده مشاهده ای و معیارهای آماری ضریب تعیین، درصد انحراف از داده های مشاهده ای، RMSE و MAE برای ارزیابی استفاده شد.

به دلیل محدودیت های اندازه گیری زمینی به روش وزنی برای ارزیابی داده های سنجش از دور ابتدا هر دو حسگر TDR و PR2 بر اساس روش وزنی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج پژوهش نشان داد که بر اساس معیارهای آماری ضریب تعیین، درصد انحراف مطلق، RMSE و MAE حسگر TDR نسبت به PR2 از دقت بالاتری برخوردار است. به نظر می رسد که علت برآورد دقیق تر TDR بدین خاطر باشد که هم اندازه گیری وزنی و هم TDR هر دو به صورت نقطه ای رطوبت را اندازه گیری می نمایند درحالی که PR2 در یک بازه ۱۰ سانتی متری مقدار میانگین رطوبت بازه را تعیین می کند. با این وصف TDR برای اندازه گیری نقطه ای از PR2 دقیق تر بود و برای چنین شرایطی توصیه می شود که از TDR استفاده شود. بر این اساس برای

ارزیابی رطوبت خاک از تصاویر ماهواره ای سنجنده های سنتینل ۲ و SMAP حسگر TDR انتخاب شد.

بررسی رابطه همبستگی نقطه ای بین داده های TDR و PR2 با همدیگر در هفت ایستگاه بیانگر همبستگی بالا بین داده های این دو در اعماق یکسان است. بر اساس ضریب تعیین بیش ترین همبستگی بین داده های TDR و PR2 در ایستگاه P7 با کاربری اراضی بدون پوشش بوده و کم ترین آن در ایستگاه P3 با کاربری پوشش مرتعی به دست آمده است. در مجموع بر اساس چهار معیار آماری خطای PR2 بر اساس TDR به عنوان معیار با ضریب همبستگی بیش تر از ۰/۹۰ و میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات PR2 با خطای کم تر از ۱۰ درصد رطوبت خاک را برآورد می نماید. با این وصف برای شرایطی که اندازه گیری وزنی و نیز TDR پاسخگو نیست مثل اندازه گیری های هم زمان عمقی PR2 توصیه می شود. در ارزیابی داده های سنجنده سنتینل ۲ توسط TDR نتایج نشان داد که بیش ترین همبستگی داده های سنتینل ۲ با TDR در ایستگاه P2 و کم ترین آن در ایستگاه P3 که هر دو با کاربری مرتع هستند با اختلاف زیاد روی داده است. هم چنین بیش تر میزان MAE و RMSE در ایستگاه P4 با پوشش درختی به دست آمده است. بنابراین، بر اساس نتایج این داده ها، برآورد رطوبت خاک از داده های سنتینل ۲ در برخی ایستگاه ها با تقریب زیادی مواجه بوده و نیاز به بررسی و پژوهش بیش تری دارد. ارزیابی داده های SMAP بر اساس TDR نشان می دهد که همبستگی داده های SMAP با TDR به طور متوسط، در هفت ایستگاه با ضریب تعیین ۰/۴۶ و میزان انحراف مطلق ۱۶/۷ درصد و مقادیر RMSE و MAE کوچک تر از ۸ به دست آمده است. بنابراین، با وجود قدرت تفکیک زمینی پایین داده های SMAP، در بیش تر ایستگاه ها برآورد دقیق تری از رطوبت خاک را نسبت به سنتینل ۲ داشته است. با این وصف می توان نتیجه گیری کرد که داده های ماهواره ای علیرغم توزیع زمانی و مکانی مناسب هنوز دقت لازم را برای تأمین نیازهای کاربردی بخصوص مدیریت مصرف آب به عنوان جایگزین داده های وزنی و یا حسگرهای زمینی کسب ننموده و نیاز به پژوهش های بیش تری برای افزایش دقت آن ها مورد نیاز است.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و نیز شرکت توسعه گری پردیس به خاطر حمایت های مادی و معنوی این پژوهش سپاسگزاری به عمل می آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

جهانگیر پرهت: نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم‌سازی، روش تحقیق؛ عبدالنبی عبده کلاهچی: ویرایش و بازبینی مقاله، نرم‌افزاری، همکاری در اندازه‌گیری‌های صحرایی؛ سید محمد تاجبخش: کنترل تحلیل‌های آماری، ویرایش و بازبینی مقاله؛ فاطمه کریمی‌ظفرآبادی: نرم‌افزاری، محاسبات و تحلیل آماری

منابع

بالابادی، حامد، افراسیاب، پیمان، دلبری، معصومه، و قائدی، سعید (۱۳۹۶). تأثیر بافت خاک و شوری و نسبت جذب سدیم آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌وسیله‌ی دستگاه تاپروپ. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰ (۴)، ۱۷-۳۰. doi: 10.22055/jise.2017.13337

پرهت، جهانگیر، عبده کلاهچی، عبدالنبی، تاجبخش، سید محمد، و کریمی‌ظفرآبادی، فاطمه (۱۴۰۳). بررسی دقت روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری محتوی آب خاک از استفاده از داده‌های

Society of America Journal, 64, 1931-1939. doi: 10.2136/sssaj2000.6461931x

Babaeian, E., Sadeghi, M., Franz, T.E., Jones, S. & Tuller, M. (2018). Mapping soil moisture with the Optical Trapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. *Remote Sensing Environment*, 211, 425-440. doi:10.1016/j.rse.2018.04.029

Balabadi, H., Afrasiab, P., Delbari, M., & Ghaedi, S. (2018). Effect of soil texture, irrigation water salinity, and sodium adsorption ratio on the soil moisture measurements accuracy by Theta Probe device. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 40(4), 17-30. doi: 10.22055/jise.2017.13337 [In Persian]

Bindlish, R., Jackson, T.J., Gasiewski, A.J., Klein, M., & Njoku, E.G. (2006). Soil moisture mapping and AMSRE validation using the PSR in SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, 103, 127-139. doi: 10.1016/j.rse.2005.02.003

Blank, D., Eicker, A., Jensen, L., & Güntner, A. (2023). A global analysis of water storage variations from remotely sensed soil moisture and daily satellite gravimetry.

مشاهده‌ای صحرایی. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، شماره ثبت 67056 مورخ ۱۴۰۳/۱۲/۲۶، ۵۶ صفحه.

حاجی ملکی، خالد، واعظی، علیرضا، سرمیدیان، فریدون، کراو، وید، و بروکا، لوکا (۱۳۹۹). اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زربنه (بوکان). *مجله تحقیقات آب و خاک*، ۵۱(۵)، ۱۳۱۷-۱۳۲۹. doi: 10.22059/ijswr.2020.291430.668371

صبوری نوقابی، مسعود، رجبی، محمد مهدی، و اسعدی اسکویی، ابراهیم (۱۴۰۰). اعتبارسنجی و ریزمقیاس سازی داده های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش SMBDA با استفاده از محصولات رادار Sentinel1 و داده‌های زمینی در منطقه صالح آباد ایلام. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۴)، ۱۴۴-۱۶۰. doi: 20.1001.1.17352347.1400.17.4.9.6

عبده کلاهچی، عبدالنبی، میری، مرتضی، زند، مهران، و پرهت، جهانگیر (۱۴۰۲). مقایسه ارزیابی محصولات رطوبت خاک SM، CC، ESA، GLDAS، GLDAS و SMAP با اندازه‌گیری‌های میدانی (مطالعه موردی: استان لرستان). *محیط زیست و مهندسی آب*، ۴۹(۴)، ۵۴۸-۵۶۲. doi: 10.22034/ewe.2023.367471.1819

میری، مرتضی، نوروزی، علی‌اکبر، عبده کلاهچی، عبدالنبی، و پرهت، جهانگیر (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران. *پژوهش‌های خاک*، ۷۳(۴)، ۷۴۷-۷۵۴. doi: 10.22092/ijsr.2024.364072.730

References

- Abdeh Kolahchi, A., Miri, M., Zand, M., & Porhemmat, J. (2023). Comparative Evaluation of GLDAS, ESA CCI SM and SMAP Soil Moisture with in situ Measurements (Case Study: Lorestan Province). *Environment and Water Engineering*, 9(4), 548-562. doi:10.22034/EWE.2023.367471.1819 [In Persian]
- Altafi Dadgar, M., Nakhaei, M., Porhemmat, J., Biswas, A., & Rostami, M. (2018). Transient potential groundwater recharge under surface irrigation in semiarid environment: An experimental and numerical study. *Hydrological Processes*, 32, 3771-3783. doi: 10.1002/hyp.13287
- Altafi Dadgar, M., Nakhaei, M., Porhemmat, J., Eliasi, B., & Biswas, A. (2020). Potential groundwater recharge from deep drainage of irrigation water. *Science of The Total Environment*, 716, 137105. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137105
- Amente, G., Baker, J.M., & Reece, C.F. (2000). Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils. *Soil Science*

- Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 2413–2435. doi:10.5194/hess-2022-398
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. *Water*, 9 (2), 140. doi: 10.3390/w9020140
- Chandler, D.G., Seyfried, M., Murdock, M., & McNamara, J.P. (2004). Field calibration of water content reflectometers. *Soil Science Society of American Journal*, 68(5), 1501-1507. doi: 10.2136/sssaj2004.1501
- Chanasyk, D.S., & Naeth, M.A. (1996). Field measurement of soil moisture using neutron probes. *Canadian Journal of Soil Science*, 76, 317-323. doi:10.4141/cjss96-038
- Chanzy, A., Tarussov, A., Bonn, F., & Judge, A. (1996). Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1318-1326. doi:10.13031/2013.13822
- Chen, F., Crow W.T., Bindlish R., Colliander A., Burgin M.S., Asanuma J., & Aida K., (2018). Global-scale evaluation of SMAP, SMOS and ASCAT soil moisture products using triple collocation. *Remote Sensing of Environment*, 214, 1-13. doi: 10.1016/j.rse.2018.05.008
- Chen, X., Quan, Q., Zhang, K., & Wei, J. (2021a). Spatiotemporal characteristics and attribution of dfry/wet conditions in the Weihe River Basin within a typical monsoon transition zone of east Asia over the recent 547 years. *Environmental Modelling and Software*, 143, 105116. doi: 10.1016/j.envsoft.2021.105116
- Chen, Y., Feng, X., & Fu, B. (2021b). An improved global remote-sensing-based surface soil moisture (RSSSM) dataset covering 2003–2018. *Earth System Science Data*, 13, 1–31. doi: 10.5194/essd-13-1-2021
- Corradini, C. (2014). Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. *Journal of Hydrology*, 516, 1-5. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.051
- Dafny, E., & Šimůnek, J., (2016). Infiltration in layered loessial deposits: Revised numerical simulations and recharge assessment. *Journal of Hydrology*, 538, 339-354. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.029
- Domínguez-Niño, J.M., Arbat, G., Raji-Hoffman, I., Kisekka, I., Girona, J., & Casadesús, J. (2020). Parameterization of soil hydraulic parameters for HYDRUS-3D simulation of soil water dynamics in a drip-irrigated orchard. *Water*, 12, 1858. doi: 10.3390/w12071858
- Everson, C.S., Mengistu, M.G., & Vather, T. (2017). The validation of the variables (evaporation and soil water) in hydrometeorological models: Phase II, Application of cosmic ray probes for soil water measurement. Water Research Commission, WRC Report No. 2323/1/17, ISBN: 978-1-4312-0900-2, 77 pages.
- Fang, K., & Shen, C. (2020). Near-real-time forecast of satellite-based soil moisture using long short-term memory with an adaptive data integration kernel. *J. Hydrometeorology*, 21 (3), 399-413. doi:10.1175/jhm-d-19-0169.1
- Ferrara, G., & Flore, J.A. (2003). Comparison between different methods for measuring transpiration in potted Apple trees. *Biologia Plantarum*, 46, 41-47. doi:10.1023/a:1022301931508
- Goit, J.B., Groenevelt, P.H., Kay, B.D., & Loch, J.G.P. (1978). The applicability of dual gamma scanning to freezing soils and the problem of stratification. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 858-863. doi: 10.2136/sssaj1978.03615995004200060003x
- Haji, maleki, K., Vaezi, A., Sarmadian, F., Crow, W., & brocca, L. (2020). Validation of SMAP Satellite-Based Soil Moisture in Different Land Uses of Simineh-Zarrineh (Bokan) Basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5), 1317-1329. doi: 10.22059/ijswr.2020.291430.668371 [In Persian]
- Hammecker, C., Antonino, A.C.D., Maeght, J.L., & Boivin, P. (2003). Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: evidence of air entrapment. *European Journal of Soil Science*, 54, 491-503. doi:10.1046/j.1365-2389.2003.00482.x
- Houser, P.R., Shuttleworth, J., Famiglietti, J.S., Gupta, H.V., Syed, K.H. & Goodrich, D.C. (1998). Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resour Research*, 34(12), 3405–3420. doi:10.1029/1998wr900001
- Hu, W., & Si, B.C. (2013). Soil water content evaluation considering time-invariant spatial pattern and space-variant temporal change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 12829–12860. doi:10.5194/hessd-10-12829-2013
- Huang, J., & Hartemink, A.E. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils, *Earth-Science Reviews*, 208, 103295. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103295
- Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., & Verstraten, J.M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of

time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 245, 48-58. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00336-5

IAEA. (2008). Field estimation of soil water content a practical guide to methods, instrumentation and sensor technology, training course. International Atomic Energy Agency, Vienna, 131Pages.

Jakobi, J., Huisman, J.A., Vereecken, H., Diekkrüger, B., & Bogaen H.R. (2018). Cosmic Ray Neutron Sensing for Simultaneous Soil Water Content and Biomass Quantification in Drought. *Water Resources Research*, 10(54), 7383-7402. doi: 10.1029/2018WR022692

Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., & Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, 367, 138-149. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.01.002

Kisekka, I., Migliaccio, K., Muñoz-Carpena, R., Schaffer, B., & Khare, Y. (2015). Modelling soil water dynamics considering measurement uncertainty. *Hydrological Processes*, 29, 692-711. doi:10.1002/hyp.10173

Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., & Schultz, H. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30, 699-710. doi:10.1071/FP02222

Liu, Y., Yang, Y., & Song J. (2023). Variations in Global Soil Moisture During the Past Decades: Climate or Human Causes? *Water Resources Research*, 59, e2023WR034915. doi: 10.1029/2023WR034915

Lück, E., Guillemoteau, J., Tronicke, J., Rummel, U., & Hierold, W. (2022). From point to field scale - indirect monitoring of soil moisture variations at the DWD test site in Falkenberg. *Geoderma*, 427(10), 116134. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.116134

Marković, O.M., Kočar, M.M., Barać, Z., Turalija, A., Atulgan, A., Jug, D., & Ravlić N. (2024). Field Performance Evaluation of Low-Cost Soil Moisture Sensors in Irrigated. *Agriculture*, 14(8), 1239. doi: 10.3390/agriculture14081239

Mattikalli, N.M., Engman, E.T., Ahuja, L.R., & Jackson, T.J. (1998). Microwave remote sensing of soil moisture for estimation of profile soil property. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1751-1767. doi: 10.1080/014311698215234

McFeeters, S.K., 1996. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features.

International Journal of Remote Sensing, 17, 1425-1432. doi: 10.1080/01431169608948714

Miri, M., Noroozi, A.A., Abdeh Kolahchi, A., & Porhemmat, J. (2024). Performance Evaluation of Satellite Images and Spectral Indices in Estimating Soil Moisture in Telo Region, Tehran Province. *Journal of Soil Research (IJSR)*, 37(4), 343-354. doi: 10.22092/ijsr.2024.364072.730 [In Persian]

Mittelbach, H., Lehner, I., & Seneviratne, S.I. (2012). Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 430-431, 39-49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.041

Mohseni, F., Jamali, S., Ghorbanian, A., & Mokhtarzade, M. (2023). Global soil moisture trend analysis using microwave remote sensing data and an automated polynomial-based algorithm. *Global and Planetary Change*, 231, 104310. doi: 10.1016/j.gloplacha.2023.104310

Neale, C.M.U., Geli, H.M.E., Kustas, W.P., Alfieri, J.G., Gowda, P.H., Evett, S.R., Prueger, J.H., Hipps, L.E., Dulaney, W.P., Chávez, J.L., French, A.N., & Howell, T. A. (2012). Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. *Advances in Water Resources*, 50, 152-161. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.10.008

Njoku, E.G., Jackson, T.J., Lakshmi, V., Chan, T.K., & Nghiem, S.V. (2003). Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 41(2), 215-229. doi:10.1109/TGRS.2002.808243

Pires, L.F., Bacchi, O.O.S., & Reichardt, K. (2005). Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. *Soil and Tillage Research*, 82, 89-97. doi: 10.1016/j.still.2004.06.003

Porhemmat, J., Nakhaei, M., Altafi Dadgar, M., & Biswas, A. (2018). Investigating the effects of irrigation methods on potential groundwater recharge: A case study of semiarid regions in Iran. *Journal of Hydrology*, 565, 455-466. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.08.036

Porhemmat, J., Tajbakhsh, S.M., Altafi Dadgar, M., & Abdeh Kolahchi, A. (2025a). LongTerm Modeling of Soil Moisture Dynamic in Response to Land-Use/ Cover Changes: A Case Study in the Telo Watershed of Tehran, Iran. *ECOPERSIA*, 13(2), 199-219. doi: 10.22034/ECOPERSIA.13.2.199

Porhemmat, J., Abdeh Kolahchi, A., Tajbakhsh, S.M., Altafi Dadgar, M., & Karimi ZafarAbadi, F. (2025b). Investigating accuracy of indirect soil water content estimating by using field observation data. Final report of research project, Soil Conservation and

Watershed Management Research Institute, 56 pages. [In Persian]

Puma, M.J., Celia, M.A., Rodriguez-Iturbe, I., & Guswa, A.J. (2005). Functional relationship to describe temporal statistics of soil moisture averaged over different depths. *Advances in Water Resources*, 28, 553-566. doi: 10.1016/j.advwatres.2004.08.015

Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A.A., Champagne, C., & Omasa, K. (2013). Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*, 2013, 83, 94-103. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.06.004

Rasheed, M.W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Usman Khan, M., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R.R., Aziz, M., & Sultan, M. (2022). Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(18), 11538. doi: 10.3390/su141811538

Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to applied and environmental geophysics. 2nd Edition, John Wiley & Sons: 797Pages.

Saboori, Noghabi, M., Rajabi, M.M., & Oskouei, E.A. (2022). Validation and Downscaling of SMAP Satellite Soil Moisture Data by the SMBDA Method Using Sentinel 1 Radar Products and Ground Data in SalehAbad Region of Ilam. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 17(4), 144-160. doi: 20.1001.1.17352347.1400.17.4.9.6 [In Persian]

Sakaki, T., Sugihara, K., Adachi, T., Nishida, K., & Lin, W. (1998). Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock. *Water Resources Research*, 34, 2623-2631. doi: 10.1029/98WR02038

Schmugge, T.J., Jackson, T.J., & McKim, H.L. (1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16, 961-979. doi: 10.1029/WR016i006p00961

Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A.J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth Science Reviews*, 99, 125-161. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004

Serbin, G., & Or. D. (2004). Ground-penetrating radar measurement of soil water content dynamics using a suspended horn antenna. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1695-1705. doi: 10.1109/TGRS.2004.831693

Sharma, K., Irmak, S., & Kukal, M. (2021). Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making. *Agricultural Water Management*, 243(7), 106454. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106454

Stafford, J.V. (1988). Remote, non-contact and in-situ measurement of soil moisture content: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 41(3), 151-172. doi: 10.1016/0021-8634(88)90175-8

Teshome, F.T., Bayabil, H.B., Schaffer, B., Ampatzidis, Y., & Hoogenboom, G. (2024). Improving soil moisture prediction with deep learning and machine learning models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 226, 109414. doi: 10.1016/j.compag.2024.109414

Tian, Z., Li, Z., Liu, G., Li, B., & Ren, T. (2016). Soil water content determination with cosmic-ray neutron sensor: Correcting aboveground hydrogen effects with thermal/fast neutron ratio. *Journal of Hydrology*, 540, 923-933. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.07.004

Tian, H., Huang, N., Niu, Z., Qin, Y., Pei, J., & Wang, J. (2019). Mapping winter crops in China with multi-source satellite imagery and phenology-based algorithm. *Remote Sensing*, 11(17), 820. doi: 10.3390/rs11070820

Tian, H., Wang, Y., Chen, T., Zhang, L., & Qin, Y. (2021) Early-season mapping of winter crops using sentinel-2 optical imagery. *Remote Sensing*, 13(19), 3822. doi: 10.3390/rs13193822

Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J.A., & Hopmans, J.W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. *Water Resources Research*, 44(4), 1-21. doi: 10.1002/2014WR016852

Vereecken, H., Huisman, J.A., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Bogaen, H., Weihermüller, L., Herbst, M., Martinez, G. & Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516, 76-96. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.061

Wang, L., & Qu, J. (2009) Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 3, 237-247. doi: 10.1007/s11707-009-0023-7

Western, A.W., Grayson, R.B., & Blöschl, G. (2002). Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30, 149-180. doi: 10.1146/annurev.earth.30.091201.140434

- Western, A.W., & Seyfried, M.S. (2005). A calibration and temperature correction procedure for the water-content reflectometer, *Hydrological Processes*, 19, 3785–3793. doi: 10.1002/hyp.6069
- Wörsching, H., Becker, R., Schlaeger, S., Bieberstein A., & Kudella, P. (2006). Spatial-TDR moisture measurement in a large scale levee model made of loamy soil material. 3rd International Symposium on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications, September 17-20, 2006, TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 1425-1432. doi: 10.1080/01431160600589179
- Zhao, T., Shi, J., Lv, L., Xu, H., Chen, D., Cui, Q., Jackson, T.J., Yan, G., Jia, L., Chen, L., Zhao, K., Zheng, X., Zhao, L., Zheng, C., Ji, D., Xiong, C., Wang, T., Li, R., Pan, J., Wen, J. et al. (2020a). Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111680. doi: 10.1016/j.rse.2020.111680
- Zhao, T., Shi, J., Entekhabi, D., Jackson, T.J., Hu, L., Peng, Z., Yao, P., Li, S., & Kang, C.S. (2021). Retrievals of soil moisture and vegetation optical depth using a multi-channel collaborative algorithm. *Remote Sensing Environment*, 2021, 257, 112321. doi: 10.1016/j.rse.2021.112321
- Zhang, J., Zhou, Z., Yao, F., Yang, L., & Hao, C. (2015). Validating the modified perpendicular drought index in the north China region using in situ soil moisture measurement. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3), 542–546. doi: 10.1109/LGRS.2014.2349957