

Estimating soil moisture using vegetation cover indices and soil surface temperature in agricultural and saline fields of Qazvin plain

Mohadesesadat Fakhar¹, Bijan Nazari^{2*}

¹, Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

² Associate Professor of the Department of Irrigation and Development Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran & Faculty member of Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Extended Abstract

Introduction

Soil moisture is a crucial parameter for defining and detecting agricultural drought. The estimation of soil moisture is valuable for the early identification of water scarcity conditions and the monitoring of evolving drought events. These factors significantly affect crop yield uncertainty, food security, agricultural insurance, policy-making, and crop planning. The increase in the extent and level of soil salinity is due to various natural and human factors, such as inadequate irrigation practices, excessive use of fertilizers, and land use changes. In addition, the impacts of climate change on soil salinity are a significant concern, as climatic patterns play a critical role in increasing salt content around the rhizosphere. This issue is particularly notable in areas experiencing groundwater level decline and deteriorating groundwater quality. Therefore, monitoring soil salinity levels is essential for effective soil management and sustainable agriculture. Several field measurement methods are available for estimating soil moisture, offering a wide range of techniques. Point-scale measurements are the most accurate method for measuring Soil Moisture Content (SMC) and can be fully automated. However, the installation and maintenance of these instruments can be time-consuming and expensive. The advantage of utilizing remote sensing data is the ability to create a large archive of high-resolution data.

Materials and Methods

The study area is located in part of Qazvin Province, approximately 150 kilometers northwest of Tehran. The Qazvin Plain, covering about 450,000 hectares, has a maximum elevation of 2,971 meters and a minimum elevation of 1,100 meters above sea level. It is one of the plains within the Salt Lake basin and is considered the largest plain in the basin, although it has the lowest cultivated area among the study area. Climatically, the study area is classified as cold and semi-arid, with an average annual precipitation of approximately 310 millimeters. The study area includes parts of the salt-affected lands of the Qazvin Plain and upstream agricultural lands near the drainage boundary of the salt flat, intended to prevent the advancement of salinized land into agricultural areas. This research utilized Landsat 8 and sentinel-2 satellite imagery from February 2023 to estimate soil moisture. The processing and calculations were performed using the Google Earth Engine platform. Various vegetation indices and the Land Surface Temperature (LST) index were analyzed to assess their correlation with soil moisture. Ground data was collected using the HH2 Moisture Meter device for 23 soil moisture samples.

Results and Discussion

The results indicated a stronger correlation between vegetation indices derived from the sentinel-2 sensor compared to the Landsat-8 sensor. Notably, indices such as NDVI, SAVI, and NDTI exhibited a high correlation with soil moisture content, with NDTI showing the highest correlation of 0.84. Based on the indices with the highest correlation, a regression model was developed to estimate soil moisture content. The findings revealed that the regression model utilizing Land Surface Temperature (LST) and NDTI indices from the Landsat-8 sensor achieved the highest level of accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of 0.81 and a bias of 0.27.

Conclusion

This study investigated the applicability of Landsat-8 and sentinel-2 satellite imagery as remote sensing data for estimating and monitoring soil moisture and soil salinity in agricultural and saline areas of the Qazvin plain. The results demonstrated strong correlations between all computed indices from these images and soil moisture, particularly with the SAVI and NDVI indices displaying the strongest correlations. Furthermore, regression models were developed employing the NDTI and LST indices to accurately estimate soil moisture in the study

area. Continuous utilization of remote sensing data has the potential to provide precise and ongoing monitoring of soil moisture, furnishing valuable information for farmers and water resource managers to optimize irrigation timing and effectively manage water resources. The utilization of such data can also contribute to significant advancements in water resource management and agriculture within the study region. The results of this research showed that the use of remote sensing data can be an effective tool for estimating soil moisture and assessing soil salinity in agricultural and salt-affected areas of the Qazvin Plain. Furthermore, the findings indicated that continuous use of remote sensing data at short time intervals can serve as a valuable tool for precise and ongoing monitoring of soil moisture. Considering that soil moisture is one of the most critical factors in achieving food security and agricultural productivity, remote sensing data can be effectively used as a tool for soil management and sustainable agriculture.

Keywords: Google Earth Engine, monitoring, soil moisture model, soil salinity, vegetation cover index.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We are grateful for the cooperation and assistance of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University to provide laboratory equipment for the collection of samples from agricultural lands.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data availability statement

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

Authors' contribution

Mohadesesadat Fakhar: Writing-original draft preparation, Software, Manuscript editing; **Bijan Nazari:** Resources, Visualization, Supervision.

*Corresponding Author, E-mail: binazari@ut.ac.ir

Citation: Fakhar, M.S., & Nazari, B. (2024). Estimating soil moisture using vegetation cover indices and soil surface temperature in agricultural and saline fields of Qazvin plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 182-198.

DOI: 10.22098/mmws.2024.14569.1416

Received: 01 February 2024., Received in revised form: 26 February 2024, Accepted: 27 March 2024,
Published online: 22 June 2025



Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 182-198

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)



برآورد رطوبت خاک با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک در اراضی کشاورزی و شوره زار دشت قزوین

محدثه السادات فخار^۱، بیژن نظری^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
^۲ دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

بررسی رطوبت خاک در مناطق خشک و شور با استفاده از سنجش از دور در بهبود مدیریت منابع آب و کشاورزی این مناطق مفید است. در این پژوهش به بررسی رطوبت خاک در اراضی کشاورزی و شوره زار دشت قزوین بر اساس اطلاعات دو سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ پرداخته شد. به همین منظور، در ابتدا ۲۳ نمونه خاک از اراضی مختلف در منطقه دشت قزوین در دی ۱۴۰۱ جمع آوری شدند. سپس بر اساس شاخص های پوشش گیاهی و شاخص دمای سطح زمین میزان رطوبت خاک بررسی شد. به منظور بررسی پارامترهای اندازه گیری شده در اراضی و شاخص های برآورد شده توسط هر سنجنده همبستگی هر یک از شاخص ها و مقادیر رطوبت خاک مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی میان شاخص های پوشش گیاهی در سنجنده سنتینل-۲ بالاتر از سنجنده لندست-۸ است؛ به طوری که شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده SAVI و شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی NDTI با میزان رطوبت خاک از همبستگی بالایی برخوردار بود و شاخص NDTI با میزان همبستگی ۰/۸۴، بالاترین میزان همبستگی را با رطوبت خاک نشان داد. در ادامه، بر اساس شاخص هایی که کمترین میزان همبستگی را داشتند به تهیه مدل رگرسیونی رطوبت خاک پرداخته شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیونی حاصل از شاخص دمای سطح زمین LST و NDTI سنجنده لندست-۸ با مقدار ضریب تعیین ۰/۸۱ و درصد سوگیری ۰/۲۷ کمترین دقت را داشته است. لذا استفاده از مدل های رطوبت خاک بر اساس سنجش از دور می تواند جایگزین مناسب و مقرون به صرفه ای در بررسی رطوبت خاک در اراضی مختلف باشد.

واژه های کلیدی: پایش، شاخص پوشش گیاهی، شوری خاک، مدل رطوبت خاک، گوگل ارث انجین

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: binazari@ut.ac.ir

استناد: فخار، محدثه السادات، و نظری، بیژن (۱۴۰۴). برآورد رطوبت خاک با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک در اراضی کشاورزی و شوره زار دشت قزوین، *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۱۸۲-۱۹۸.
DOI: 10.22098/mmws.2024.14569.1416

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۸۲ تا ۱۹۸
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی
© نویسندگان

۱- مقدمه

شوری خاک یک خطر بزرگ محیط زیستی است که بر بهره‌وری کشاورزی و امنیت غذایی در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد (FAO, 2023). شوری بر ترکیب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، در دسترس بودن مواد مغذی و رشد گیاه تأثیر منفی می‌گذارد و می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصول و افزایش بیابان‌زایی شود (Zaman et al., 2018). افزایش میزان و سطح شوری ناشی از عوامل مختلف طبیعی و انسانی، مانند شیوه‌های آبیاری ناکافی، استفاده بیش از حد از کود و تغییرات کاربری اراضی است (Daba and Qureshi, 2021). علاوه بر این، اثرات تغییر اقلیم بر شوری خاک یک نگرانی قابل توجه است، به‌طوری‌که الگوهای اقلیمی نقش اساسی در افزایش محتوای نمک در اطراف ریزوسفر ایفا می‌کند (Kaya et al., 2022). این امر به‌ویژه در مناطق دارای افت سطح آب و کیفیت آب زیرزمینی قابل توجه است (Shrivastava and Kumar, 2015). بنابراین، پایش سطوح شوری خاک برای مدیریت موثر خاک و کشاورزی پایدار ضروری است (Okur and Örcen, 2020).

سنجش از دور برای پایش مناظر با مقیاس بزرگ در انواع کاربری‌ها و پوشش‌های زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Corwin, 2021). داده‌های سنجش از دور اطلاعات ارزشمندی را در مورد پارامترهای مختلف محیطی، از جمله پوشش گیاهی، ترکیب خاک، و میزان رطوبت، که به محتوای نمک مرتبط هستند، ارائه می‌دهد (Metternicht and Zinck, 2003). تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌های مربوط به شوری و رطوبت خاک (SMC)^۱، به محققان و متخصصان امکان می‌دهد نقشه‌ها و مدل‌های مکانی دقیقی از توزیع شوری و رطوبت خاک را تولید کنند. این نقشه‌ها و مدل‌ها می‌توانند به مدیران اطلاعات مفیدی درباره وضعیت آبی خاک را ارائه دهند و در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و توسعه راهبردهای مؤثر برای کاهش خطرات خشکسالی و شوری خاک به کار گرفته شوند (Singh, 2022). در طول چند دهه گذشته، سنجش از دور دستخوش پیشرفت‌های قابل توجهی شده است و امکان جمع‌آوری داده‌های با وضوح بالا در مقیاس‌های مختلف را فراهم کرده است (Taghadosi et al., 2019). با پیشرفت پژوهش‌ها، ابزارهای مختلفی همچون ماهواره، فناوری پردازش تصویر و باندهای طیفی مختلف به‌وجود آمده است (Kasim et al., 2020). از جمله این ابزار، حسگرهای تصویربرداری چندطیفی می‌باشد که اطلاعات را در طول موج‌های مختلف می‌گیرد و نتایج دقیق‌تر با وضوح مکانی بالاتر ارائه می‌دهد (Azabdaftari and Sunar, 2016).

رطوبت خاک جزء مهمی از چرخه هیدرولوژیکی است که رواناب، تولید پوشش گیاهی و تبخیر-تعرق را تنظیم می‌کند (Kim et al., 2016). رطوبت خاک یک شاخص اصلی خاک برای تعریف و شناسایی خشکسالی است (Keesstra et al., 2016). تخمین رطوبت خاک برای شناسایی شرایط کمبود آب در مراحل اولیه و رویدادهای خشکسالی در حال تحول برای عدم قطعیت عملکرد محصول و شرایط امنیت غذایی، بیمه کشاورزی، سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی محصول به ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد (Keesstra et al., 2018). در شرایط خشک‌سالی، کمبود آب منابع آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این موضوع می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، کاهش درآمد کشاورزان و افزایش بیکاری شود. این مسائل اقتصادی و اجتماعی ناشی از خشک‌سالی می‌تواند تنش‌های اجتماعی را افزایش داده و در نتیجه به درگیری‌های اجتماعی و سیاسی در کشورهای درحال توسعه منجر شود (Kelley et al., 2015). بنابراین، مدل‌سازی و پایش رطوبت خاک مورد توجه فزاینده‌ای است. پایش تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک یک پیش نیاز برای کاهش و انطباق با تغییرات اقلیمی برای پایداری سیستم‌های زراعی و همچنین برای توسعه کشاورزی دقیق و امنیت غذایی است (Drusch, 2007; Zareie et al., 2016). رطوبت سطحی خاک به‌طور کلی به محتوای آب ۵ تا ۱۵ سانتی متر بالای لایه خاک گفته می‌شود (Wang and Qu, 2009). گرچه آب در این لایه نازک خاک، بخش کوچکی از ذخایر آب جهانی را تشکیل می‌دهد، اما شامل فرآیندهای اساسی هیدرولوژیکی، بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی، کشاورزی و کره خاکی شد. دریافت اطلاعات دقیق در مورد تغییرات مکانی و زمانی رطوبت سطحی خاک برای تدوین سیاست و مدیریت آب زمینی بسیار مهم است (Keetch and Byram, 1968). برآورد رطوبت خاک در سطح مزرعه را می‌توان با طیف وسیعی از روش‌ها تخمین زد (Vereecken et al., 2014). در روش‌های اندازه‌گیری، روش نقطه‌ای دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک است (Zhang et al., 2014). اما نصب و نگهداری آن‌ها بسیار زمان‌بر و با هزینه زیاد همراه خواهد بود (Benninga et al., 2018).

از مزایای استفاده از داده‌های سنجش از دور نسبت به سایر روش‌های غیرمستقیم می‌توان به این مورد اشاره نمود که امکان تهیه آرشو بزرگی از داده‌ها را با وضوح بالا فراهم می‌کند (Scott et al., 2003). سنجنده‌های مختلف امکان برآورد رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی مختلف دارند. پژوهش‌های مختلفی هم به همین منظور انجام گرفته است؛ به‌طوری‌که در پژوهشی با استفاده از شاخص اصلاح شده اختلاف آب نرمال شده

¹ Soil Moisture Content

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری در بخشی از استان قزوین و در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد (شکل ۱). دشت قزوین با مساحتی حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد (Mohammadi et al., 2011). حداکثر ارتفاع این منطقه ۲۹۷۱ متر و حداقل آن ۱۱۰۰ متر از سطح دریا است. دشت قزوین یکی از دشت‌های حوضه آبریز دریاچه نمک و بزرگ‌ترین دشت آن محسوب شده و کم‌ترین سطح زیر کشت انواع محصولات را در میان دشت‌های این حوضه آبریز دارد. از نظر آب و هوایی، منطقه مورد مطالعه در اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار دارد. متوسط بارش سالیانه در این منطقه تقریباً ۳۱۰ میلی‌متر است (Hedayati and Kakavand, 2012). محدوده مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از شوره‌زار دشت قزوین و اراضی کشاورزی بالادست محدوده زهکش حائل شوره‌زار به‌منظور جلوگیری از پیشروی شوره‌زار به اراضی بالادست است.

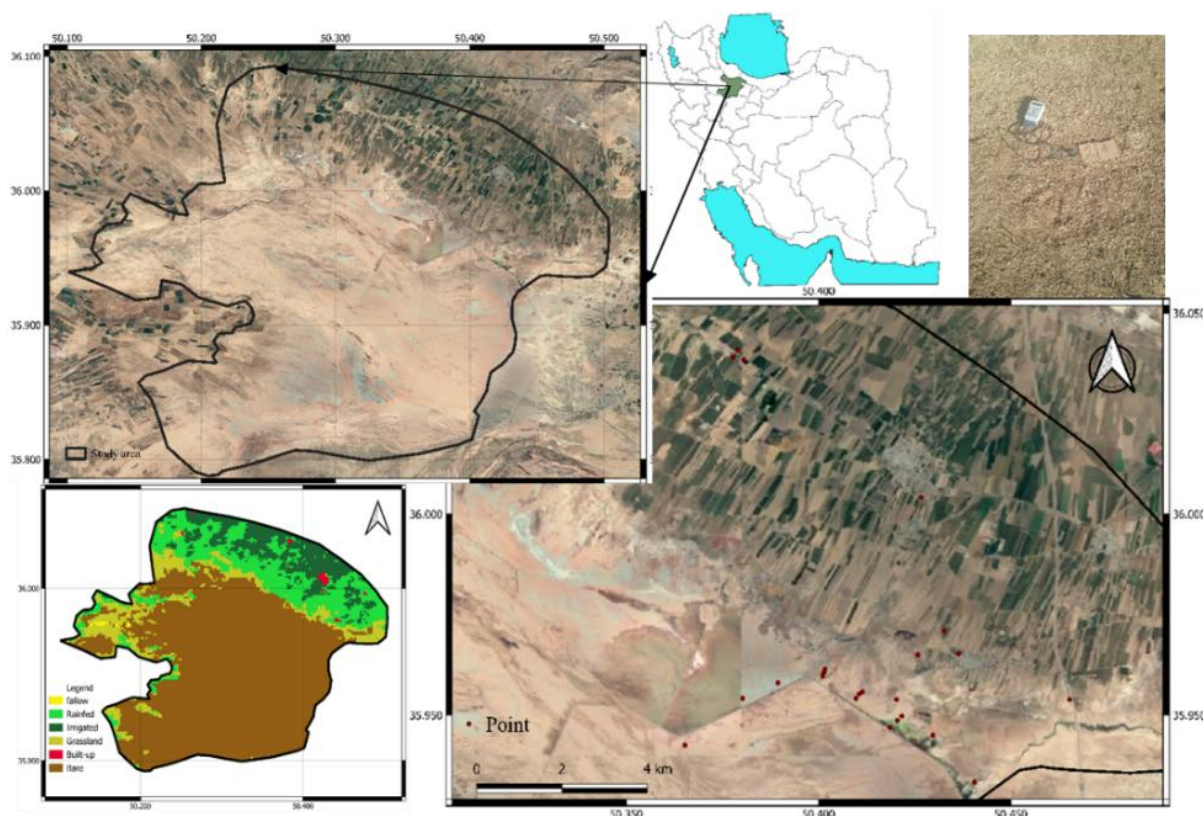
(MNDWI)^۱ عملکرد مدل رابطه تجربی مبتنی بر مثلث برای برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از دمای سطح زمین (LST)، شاخص گیاهی NDVI و البیدو سطحی را بهبود می‌بخشد، اما همچنان با تغییرات روزانه بالا و عدم قطعیت مواجه است (Zhao et al., 2017). همچنین، Li et al. (2011) با استفاده از دو سنجنده فعال و غیرفعال و اندازه‌گیری دمای روشنایی (BT)^۲ به اندازه‌گیری رطوبت خاک در کشور چین پرداختند. آن‌ها نشان دادند که امواج ماکروویو قابلیت بالایی در برآورد رطوبت خاک دارد.

برآورد رطوبت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور در اراضی کشاورزی شوشتر نشان داد رطوبت سطحی خاک با شاخص‌های NDVI، SAVI، NDMI، SMSWIR رابطه مستقیم و با شاخص LST رابطه معکوس داشته است. همچنین شاخص LST برآورد بهتری از رطوبت خاک داشته که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این عامل بر مقادیر رطوبت سطحی خاک است (Abiyat et al., 2022). در پژوهشی دیگر (Bagheri and Bagheri, 2019) به‌منظور برآورد رطوبت خاک در اراضی جنوب تهران از ۱۲۸ نقطه و سنجنده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ نمونه‌برداری زمینی انجام دادند. نتایج نشان داد این سنجنده‌ها می‌توانند نقش مؤثری در برآورد رطوبت سطحی خاک داشته باشند. در پژوهشی (Asghari et al., 2022) به بررسی رطوبت سطحی خاک با استفاده از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۱ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از روش TOTRAM برای سنجنده لندست و از روش SVR برای بررسی نوع توزیع و میزان همبستگی آماری بین داده‌ها با استفاده از داده‌های سنتینل-۱ استفاده کردند. خروجی‌های به دست آمده وابستگی وضعیت رطوبت خاک به شرایط و خوشه‌ای بودن توزیع رطوبت را نشان داد. به عبارت دیگر، رطوبت خاک در مناطق نزدیک به یکدیگر به‌طور معمول مشابه است و این مناطق می‌توانند به‌عنوان خوشه‌های رطوبت خاک شناخته شوند.

هدف از این پژوهش برآورد رطوبت خاک بر اساس سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ در محدوده شوره‌زار دشت قزوین و نقاطی از اراضی کشاورزی محدوده بالادست شوره‌زار به‌منظور پایش رطوبت خاک و اثر رطوبت خاک و شوری در اراضی کشاورزی و مناطق بدون پوشش گیاهی متراکم با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور است. در این پژوهش همبستگی میان شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف و پارامترهای محیطی با استفاده از دو سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ و همبستگی بین شاخص‌های مطرح شده و رطوبت خاک بررسی خواهد شد.

¹ Modified Normalized Difference Water Index

² Brightness temperature



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری شده و نقشه کاربری اراضی ۲۰۲۲

Figure 1- Study area, sampled points and land use 2022 map

در مرحله پیش پردازش داده ها، عملیاتی مانند تصحیح هندسی، واسنجی رادیومتری، حذف سنگ های سایه، حذف اشیاء ناخواسته و یا تصحیح تأثیر اتمسفر انجام شد. این عملیات سهم مهمی در بهبود کیفیت و دقت داده ها دارند. برای تبدیل مقادیر خاکستری تصاویر به مقادیر رادیانس، از معادله های واسنجی استفاده شد که بر اساس خصوصیات هر سنجنده و تنظیمات آن تعیین شدند. این تبدیل ها معمولاً در قالب توابع خطی یا غیرخطی انجام می شوند. همچنین در مرحله پردازش داده ها، از روش های مختلفی مانند تصفیه داده، ترکیب باندها، تصویرسازی و استخراج ویژگی ها استفاده شد.

۲-۲- داده های ماهواره ای

ماهواره سنتینل-۲ شامل دو ماهواره دوقلو به نام های Sentinel-2A و Sentinel-2B بوده و در جهت مخالف هم در مدار حرکت می کنند و هر یک از آن دو می تواند در طول پنج روز یک پوشش کامل از سطح زمین تهیه کند. سنجنده تصویربرداری نصب شده بر سنتینل-۲، MSI نام دارد که تصاویر منحصربه فردی را ارائه می دهد (Marco et al., 2019). تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ به دلیل قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و دسترسی رایگان به آرشیو کامل، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش از تصاویر سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ که مربوط به فوریه ۲۰۲۳ است استفاده شد. داده های ماهواره سنتینل-۲ حاوی حجم زیادی از داده ها با توان تفکیک مکانی بالا (حداکثر ۱۰ متر)، طیفی (۱۳ باند) است. در این مطالعه از ده باند طیفی استفاده شده است (جدول ۱).

سنجنده لندست-۸ دارای دو حسگر است. حسگر عملیاتی زمین (OLI) و حسگر مادون قرمز حرارتی (TIRS). باندهای طیفی سنسور OLI و باندهای حرارتی سنسور TIRS اطلاعات تصویر برای ۹ باند موج کوتاه و دو باند موج حرارتی را با قدرت تفکیک مکانی حداکثر ۳۰ متر جمع آوری می کند.^۱

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

جدول ۱- مشخصات طیفی سنجنده‌های سنتینل-۲ و لندست-۸

Table 1- Spectral Specifications of Sentinel-2 and Landsat-8 Sensors

	Spatial resolution (m)	Wavelength (nano meter)	Satellite band			Spatial resolution (m)	Wavelength (nano meter)	Satellite band	
Landsat 8	30	443	Coastal/Aerosol	B1	Sentinel-2	10/20	490	Blue (B)	B2
	30	483	Blue (B)	B2		10/20	560	Green (G)	B3
	30	560	Green (G)	B3		10/20	665	Red (R)	B4
	30	660	Red (R)	B4		20	705	Red edge (RE ₁)	B5
	30	865	Near-infrared (NIR)	B5		20	740	Red edge (RE ₂)	B6
	30	1650	SWIR 1	B6		20	783	Red edge (RE ₃)	B7
	30	2220	SWIR 2	B7		10	842	Near infrared (NIR)	B8
	15	640	Panchromatic	B8		20	865	Narrow near-infrared (NIRN)	B8a
	30	1375	Cirrus	B9		20	1610	Short wave infrared (SWIR1)	B11
						20	2190	Short wave infrared (SWIR2)	B12

خاک باند کوتاه مادون قرمز SM_{SWIR} استفاده شد. شاخص NDVI بر اساس تفاوت در بازتاب نور در باندهای قرمز و نزدیک مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی تصاویر سنجنده‌ها محاسبه شد. این شاخص به‌عنوان یک نشانگر شادابی و سلامت گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند مستقیماً با تغییرات رطوبت خاک در ارتباط باشد. شاخص SAVI با توجه به نور پراکنده توسط گیاهان و خاک، تصحیحی برای NDVI است که به‌طور خاص برای مناطقی با خاک‌های عمیق و تجمع زیاد پوشش گیاهی مفید است. این شاخص نقشی مهم در تخمین رطوبت خاک در مناطقی با تنوع بالای پوشش گیاهی دارد. شاخص NDMI بر اساس تفاوت در بازتاب نور در باندهای مادون قرمز و نزدیک مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی محاسبه شد. این شاخص به صورت خاص برای تخمین رطوبت خاک در سطحی که مستقیماً مرتبط با آب است، استفاده شد. شاخص NDTI بر اساس تفاوت در بازتاب نور در باندهای مادون قرمز و قرمز طیف الکترومغناطیسی محاسبه شد. این شاخص می‌تواند در بررسی تغییرات رطوبت خاک پس از عملیات کاشت مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از باندهای موج کوتاه و نزدیک مادون قرمز در بازتاب نور برای محاسبه رطوبت خاک اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد. شاخص SM_{SWIR} بر پایه این اطلاعات طراحی شده است و قادر است تغییرات رطوبت خاک را تخمین بزند.

به‌منظور اندازه‌گیری دما در سطح زمین، شاخص دمای سطح زمین (LST) می‌تواند به‌عنوان یک شاخص فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات دما می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات رطوبت خاک باشد؛ زیرا رطوبت خاک می‌تواند تأثیر مستقیمی بر دمای سطح زمین داشته باشد. در محدوده مورد مطالعه بخش

۲-۳- مراحل و روند اجرایی پژوهش

روند تغییرات رطوبت سطحی خاک به شدت بر میزان تبخیر و تعرق، باد و جریانات هوایی وابسته است. تمامی مراحل محاسبات و پردازش تصاویر در محیط گوگل ارث انجین (GEE)^۱ انجام گرفت. بستر GEE یک پلتفرم متن‌باز است که به دلیل قدرت سریع محاسباتی و کتابخانه‌ای گسترده از مجموعه داده‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفته شد. سپس با استفاده از روابط ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف، هریک از این شاخص‌های گیاهی مطرح شده در جدول ۲ بررسی و برآورد شد و ارتباط آن‌ها با رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این که نمونه‌برداری‌های صورت گرفته در این پژوهش در ماه فوریه سال ۲۰۲۳ انجام شده است، در این پژوهش سعی شد از تصاویری استفاده شود که از حداقل پوشش ابر برخوردار باشند. بنابراین بر اساس شرط تعریف‌شده تصاویر استفاده‌شده کم‌تر از ۱۵ درصد از پوشش ابر برخوردار بودند.

۴-۲- داده‌های زمینی

دشت قزوین به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن در ایران می‌تواند با مدیریت راهبردی و بررسی و مهار شوری و رطوبت در بهبود و توسعه کشاورزی و جلوگیری از گسترش اراضی شور، کمک شایانی کند (Fakhar and Kaviani, 2022). به‌منظور برآورد رطوبت سطحی خاک از شاخص‌هایی همچون شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده NDVI، شاخص گیاهی با تنظیم انعکاس خاک SAVI، اختلاف رطوبتی نرمال شده NDMI، شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی NDTI و شاخص رطوبت

¹ Google earth engine

عمق ۰ تا ۵ سانتی متری برداشت شد. موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده و همچنین روند برداشت نمونه‌برداری از سطح زمین در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۵- معرفی شاخص‌ها

جدول ۲ به معرفی شاخص‌های سنجش رطوبت مورد استفاده شده در این پژوهش پرداخته است. این جدول به‌طور معمول شامل اطلاعاتی مانند نام شاخص، فرمول محاسبه، باندهای مورد استفاده و کاربردهای مختلف شاخص‌ها در مطالعات رطوبتی و آبیاری است.

قابل توجهی از نمونه‌برداری‌های انجام شده، مناطق بالادست شوره‌زار دشت قزوین را شامل شد که پوشش گیاهی پراکنده داشتند و بخش‌هایی از نمونه برداری، اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با تراکم پوشش گیاهی مناسب را شامل شد. لازم به ذکر است با توجه به عدم وجود باند حرارتی در سنجنده سنتینل-۲، در سنجنده لندست-۸ علاوه بر شاخص‌های مذکور به بررسی شاخص دمای سطح زمین (LST) نیز پرداخته شد. در این پژوهش به تعداد ۲۳ نمونه رطوبت خاک از سطح با استفاده از دستگاه HH2 Moisture Meter اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برداشت شده هر یک به میزان یک کیلومتر از یکدیگر فاصله داشتند. همچنین رطوبت خاک در نمونه‌های برداشت شده از

جدول ۲- شاخص‌های استفاده شده در پیش‌بینی و آماده‌سازی شوری خاک

Table 2- Indicators used in forecasting and preparation of soil salinity

Index	Formula	Value	Reference
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	(-1,1)	(Rouse Jr et al., 1973)
Soil-Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + L)}$	(-1,1)	(Pettolelli et al., 2005)
Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = \frac{(NIR - SWIR 1)}{(NIR + SWIR 1)}$	(-1,1)	(Van de Griend and Engman, 1985)
Normalized Difference Tillage Index (NDTI)	$NDTI = \frac{(SWIR 1 - SWIR 2)}{(SWIR 1 + SWIR 2)}$	(-1,1)	(Lobell and Asner, 2002)
Soil Moisture shortwave infrared (SM _{SWIR})* Land surface temperature (LST)*	$SM_{SWIR} = (SWIR1 / RED)^a$ $LY = ML \times Qcal + AL,$ $T = \frac{(K2)}{\ln(\frac{K1}{L\lambda} + 1)}$	(0,1)	(Fabre et al., 2015) (Chavez Jr, 1989)

* a: (0.5-1.5)

* که در آن، LY تابش طیفی (وات بر مترمربع بر میکرومتر) ML و AL ضرایب تبدیل مقدار پیکسل به بازتابش اند که به ازای هر باند مقادیر متفاوتی دارند Qcal. عدد رقومی باند مربوطه است. T دمای سطح زمین، K1 و K2 ثابت حرارتی برای هر باند هستند که به ترتیب واحد آن‌ها وات بر متر مربع بر میکرومتر و درجه کلون (°K) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

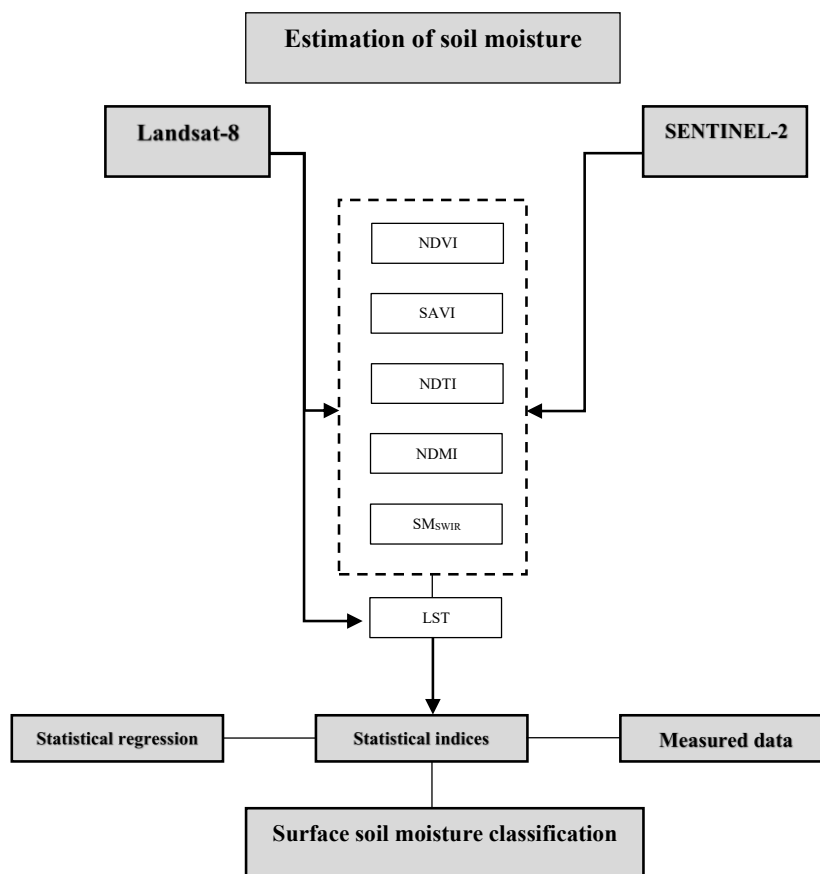
O_i، رطوبت خاک اندازه‌گیری شده، P_i به مقدار پیش‌بینی شده

مدل در محل نمونه‌گیری اشاره دارد و $\bar{P}$ میانگین مقادیر مربوطه است. ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته را نشان می‌دهد مقادیر R² نزدیک به عدد یک نشان می‌دهد که مدل به خوبی واریانس مشاهدات را توضیح می‌دهد. همچنین مقادیر RMSE و PBIAS نزدیک به صفر، نشان از پیش‌بینی دقیق مدل است. در شکل دو به روند کلی اجرا شده در این پژوهش پرداخته شده است.

۲-۶- بررسی روابط همبستگی و معادلات رگرسیونی

پس از استخراج شاخص‌های مورد نظر از روی تصاویر ماهواره‌ای و بررسی نرمال بودن داده‌های حاصل، به‌منظور ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نتایج به بررسی رابطه همبستگی هر شاخص با داده‌های میدانی پرداخته شد. سپس با استفاده از معادلات رگرسیون خطی اقدام به تهیه مدل رطوبت خاک سطحی با استفاده از شاخص‌های مورد مطالعه شد. به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی از ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش مدل استفاده شد و ۳۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی و ارزیابی استفاده شد. در این مطالعه از تعدادی شاخص‌های آماری میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R²) ریشه نرمال شده و درصد سوگیری (PBIAS) استفاده شده است که در رابطه‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده‌اند.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (1)$$



شکل ۲- نمای کلی از روند اجرایی پژوهش

Figure 2- General overview of the research execution process

نشان می‌دهد که داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از هر دو سنجندهٔ سنتینل-۲ و لندست-۸ نرمال بوده‌اند. به‌منظور بررسی ارتباط میان مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های مورد بررسی از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. که نتایج حاصل از آن در شکل ۳ ارائه شده است

۳- نتایج و بحث

پس از محاسبه شاخص‌های مطرح شده به‌منظور بررسی توزیع نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. بنابراین در جدول ۳ به بررسی نرمال بودن داده‌ها پرداخته شد. بررسی خروجی‌های حاصل از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

جدول ۳- نتایج آزمون نرمال بودن شاخص‌های به کار رفته در مدل برآورد رطوبت خاک

Table 3- Results of normality test for the used indices in soil moisture estimation model

Satellite	-	Index	NDVI	SAVI	NDTI	NDMI	SM _{swir}	LST	Soil moisture
Landsat 8	Normal Parameter	N	23	23	23	23	23	23	23
		Mean	0.21	0.18	0.07	0.09	0.41	293.56	14.45
		Std. Deviation	0.05	0.12	0.10	0.05	0.12	1.79	4.29
	Most Differences	Extreme Absolute	0.36	0.34	0.47	0.21	0.49	0.16	0.10
		Positive	0.34	0.34	0.47	0.25	0.35	0.14	0.10
		Negative	-0.26	-0.30	0.32	-0.13	-0.49	-0.16	-0.06
	-	Kolmogorov-Smirnov Z	0.64	0.54	0.47	0.45	0.49	0.76	0.51
Sentinel 2	-	Asymp. Sig. (2-tailed)	0.76	0.82	0.34	0.61	0.66	0.54	0.41
	Normal Parameter	Index	NDVI	SAVI	NDTI	NDMI	SM _{swir}	-	Temperature
		N	23	23	23	23	23	-	23
		Mean	0.26	0.24	0.1	0.12	0.43	-	12.8
		Std. Deviation	0.10	0.12	0.06	0.1	0.04	-	3.13
	Most Differences	Extreme Absolute	0.41	0.52	0.59	0.42	0.74	-	0.26
		Positive	0.37	0.36	0.19	0.08	0.17	-	0.18
		Negative	-0.26	-0.25	-0.08	-0.10	-0.12	-	-0.09

	-	Kolmogorov-Smirnov Z	0.81	0.77	0.52	0.46	0.71	-	0.49
	-	Asymp. Sig. (2-tailed)	0.71	0.83	0.65	0.59	0.67	-	0.48

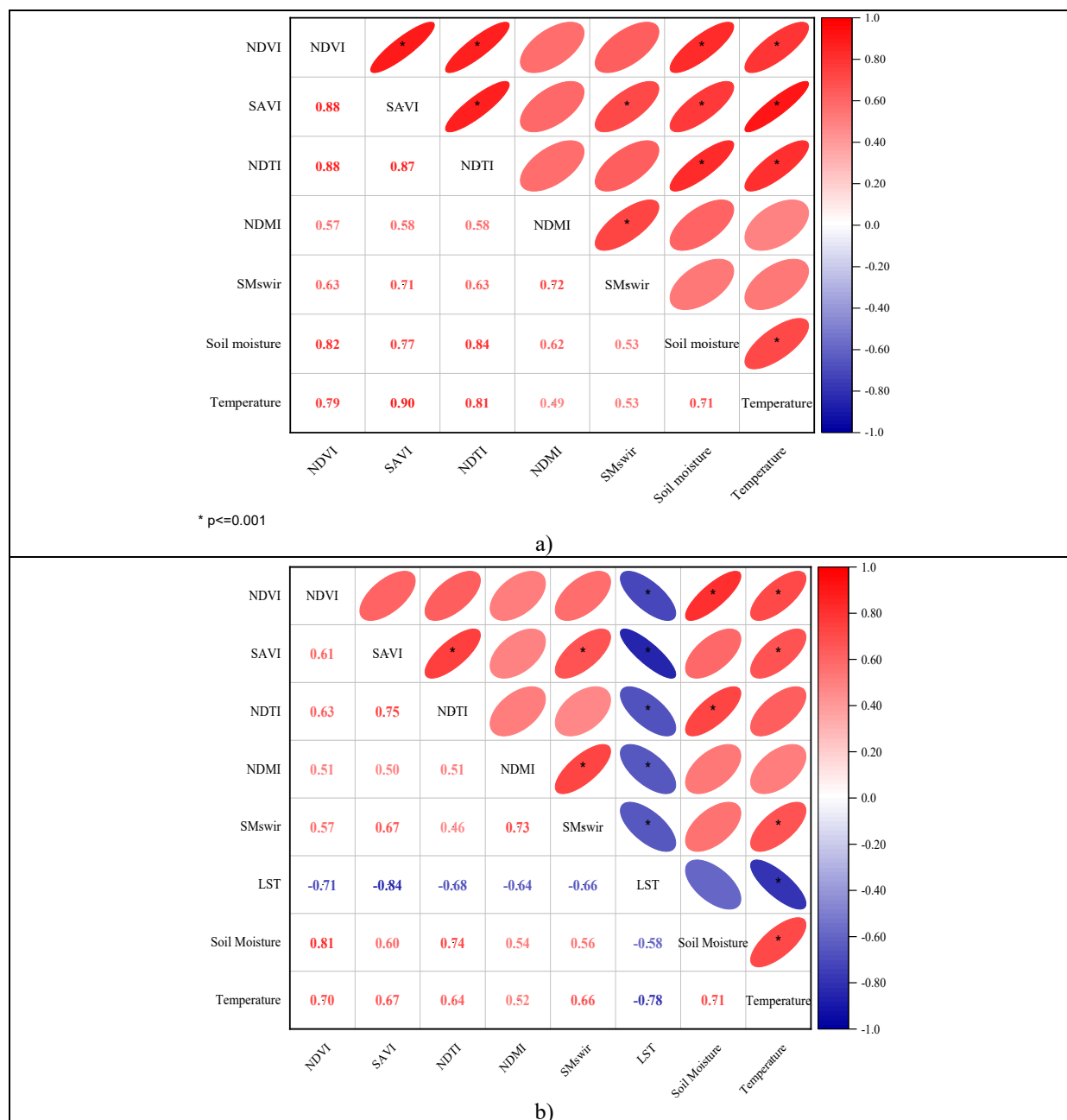
به منظور بررسی میان پارامترهای اندازه گیری شده در اراضی و شاخص های برآورد شده توسط هر سنجنده همبستگی میان هر یک از شاخص ها و مقادیر رطوبت خاک با یکدیگر بررسی شد. نتایج حاصل از بررسی های صورت گرفته توسط سنجنده لندست-۸ نشان می دهد که شاخص NDVI کمترین میزان همبستگی را با مقدار عددی ۰/۸۱ با مقادیر اندازه گیری شده رطوبت دارد. رطوبت خاک و شاخص NDVI به طور مستقیم بر رشد و تولید بیولوژیکی گیاه مرتبط هستند. با افزایش رطوبت خاک، گیاه بهتر می تواند از آب و مواد مغذی استفاده کند و رشد کمتری داشته باشد؛ زیرا این عامل باعث افزایش میزان سبزیگی و شاخص NDVI می شود. همچنین بررسی شاخص NDVI نشان می دهد که این شاخص با میزان رطوبت خاک، دما و دمای سطح زمین با مقدار $p < 0.001$ همبستگی معناداری دارد. بعد از شاخص NDVI، شاخص NDTI کمترین میزان همبستگی را با مقادیر رطوبت خاک داشته به طوری که میزان همبستگی این شاخص در سنجنده لندست-۸ با میزان رطوبت خاک اندازه گیری شده برابر با ۰/۷۴ است. در ادامه به بررسی ارتباط دمای سطح زمین و ارتباط این شاخص با میزان رطوبت پرداخته شد.

دمای سطح زمین (LST) یکی از پارامترهای مهم در بررسی رطوبت خاک محسوب می شود و به عنوان یک شاخص مفید برای پیش بینی رطوبت خاک و تحلیل تغییرات آن در طول زمان می شود. دمای سطح زمین می تواند تأثیر بسیار زیادی بر رطوبت خاک داشته باشد؛ زیرا با افزایش دما، تبخیر-تعرق کمتری از سطح زمین اتفاق می افتد و در نتیجه رطوبت خاک کاهش می یابد با کاهش رطوبت خاک گیاهان نمی توانند به میزان کافی آب را از خاک جذب کنند؛ در نتیجه رشد و توسعه آن ها کاهش می یابد. به همین منظور بررسی میزان همبستگی میان دمای سطح زمین و شاخص های پوشش گیاهی نشان داد که تمامی شاخص های بررسی شده از جمله شاخص SAVI، NDVI، NDTI، و SM_{SWIR} از همبستگی بالایی برخوردار هستند و شاخص های SAVI و NDVI به ترتیب با مقدار ۰/۸۴- و ۰/۷۱- کمترین میزان همبستگی منفی را دارا بودند. یکی از علل همبستگی منفی بین شاخص SAVI و LST تأثیر حرارت بر سلامت گیاهی است؛ زیرا با افزایش دمای سطح زمین گیاهان در معرض تأثیرات حرارتی قرار می گیرند که می تواند باعث کاهش رشد و سلامت گیاهی شود. در نتیجه پوشش گیاهی در منطقه کاهش می یابد و موجب کاهش مقدار شاخص SAVI می شود (Jagadish et al., 2021). همچنین با

افزایش دمای سطح زمین تبخیر آب از سطح خاک و گیاهان نیز افزایش پیدا می کند و این مسأله می تواند باعث کاهش NDVI و در نتیجه میزان پوشش گیاهی شود. از دیگر عوامل مؤثر در میزان همبستگی منفی در بین شاخص های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین می توان به تغییرات فنولوژیکی گیاه اشاره کرد زیرا با افزایش دما تبدلات گازی گیاهان کاهش می یابد که باعث کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاهان، کاهش رشد و سلامت گیاهی می شود (Ruiz-Vera et al., 2015). علاوه بر بررسی شاخص های گیاهی با استفاده سنجنده لندست-۸ به بررسی همبستگی شاخص های گیاهی حاصل از سنجنده سنتینل-۲ پرداخته شد. بررسی همبستگی های حاصله نشان داد همبستگی میان شاخص های پوشش گیاهی در سنجنده سنتینل-۲ کم تر از سنجنده لندست-۸ است؛ به طوری که شاخص های NDVI، SAVI و NDTI با میزان رطوبت خاک از همبستگی بالایی برخوردار هستند و شاخص NDTI با میزان همبستگی ۰/۸۴، بالاترین میزان همبستگی را با رطوبت خاک دارد. دلیل کم تر بودن همبستگی شاخص NDTI با رطوبت خاک در سنتینل-۲ در مقایسه با همبستگی NDVI و رطوبت خاک احتمالاً به دلیل داشتن باند مرئی در محدوده این شاخص است. باند مرئی در شاخص NDTI نشان دهنده بازتاب نور خورشید توسط سطح زمین است و تحت تأثیر رطوبت خاک تغییر می کند. با افزایش رطوبت خاک، جذب آب توسط خاک افزایش می یابد که باعث افزایش بازتاب نور خورشید و افزایش مقدار شاخص NDTI شد. از طرفی، با کاهش رطوبت خاک، جذب آب توسط خاک کاهش می یابد و بازتاب نور خورشید نیز کاهش یافت که باعث کاهش مقدار شاخص NDTI شد. این در حالی است که شاخص NDVI فقط به اندازه کافی حساس به تغییرات رطوبت خاک نیست و تأثیر آن برای این شاخص کم تر است. بررسی میزان همبستگی در شاخص های مختلف پوشش گیاهی در سنجنده های لندست-۸ و سنتینل-۲ نشان داد که میزان همبستگی در تصاویر سنتینل-۲ کم تر از لندست-۸ است. دلیل کم تر بودن همبستگی شاخص های پوشش گیاهی با رطوبت خاک در سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ می تواند به دلیل وضوح بالاتر تصاویر سنتینل-۲ باشد. سنتینل-۲ دارای ۱۳ باند است که در نواحی مختلف از طیف الکترومغناطیسی قرار دارند، در حالی که لندست-۸ فقط دارای ۱۱ باند است. باندهای سنتینل-۲ شامل باندهای با وضوح بالا در محدوده آبی و مادون قرمز، که در تفکیک پوشش گیاهی و رطوبت خاک مؤثرتر هستند، می شوند. همچنین در سنتینل-۲، برخلاف لندست-۸، باندهای

باشند و باعث افزایش همبستگی شاخص‌های پوشش گیاهی با رطوبت خاک شوند.

مرتبط با خاک و رطوبت با حساسیت کمتری در محدوده مادون قرمز نزدیک قرار دارند. این موضوع باعث شد که تصاویر سنتینل-۲ برای تفکیک پوشش گیاهی و رطوبت خاک دقیق‌تر



شکل ۳- همبستگی بین مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های برآورد شده در سنجنده‌های سنتینل-۲ (a) و لندست-۸ (b)

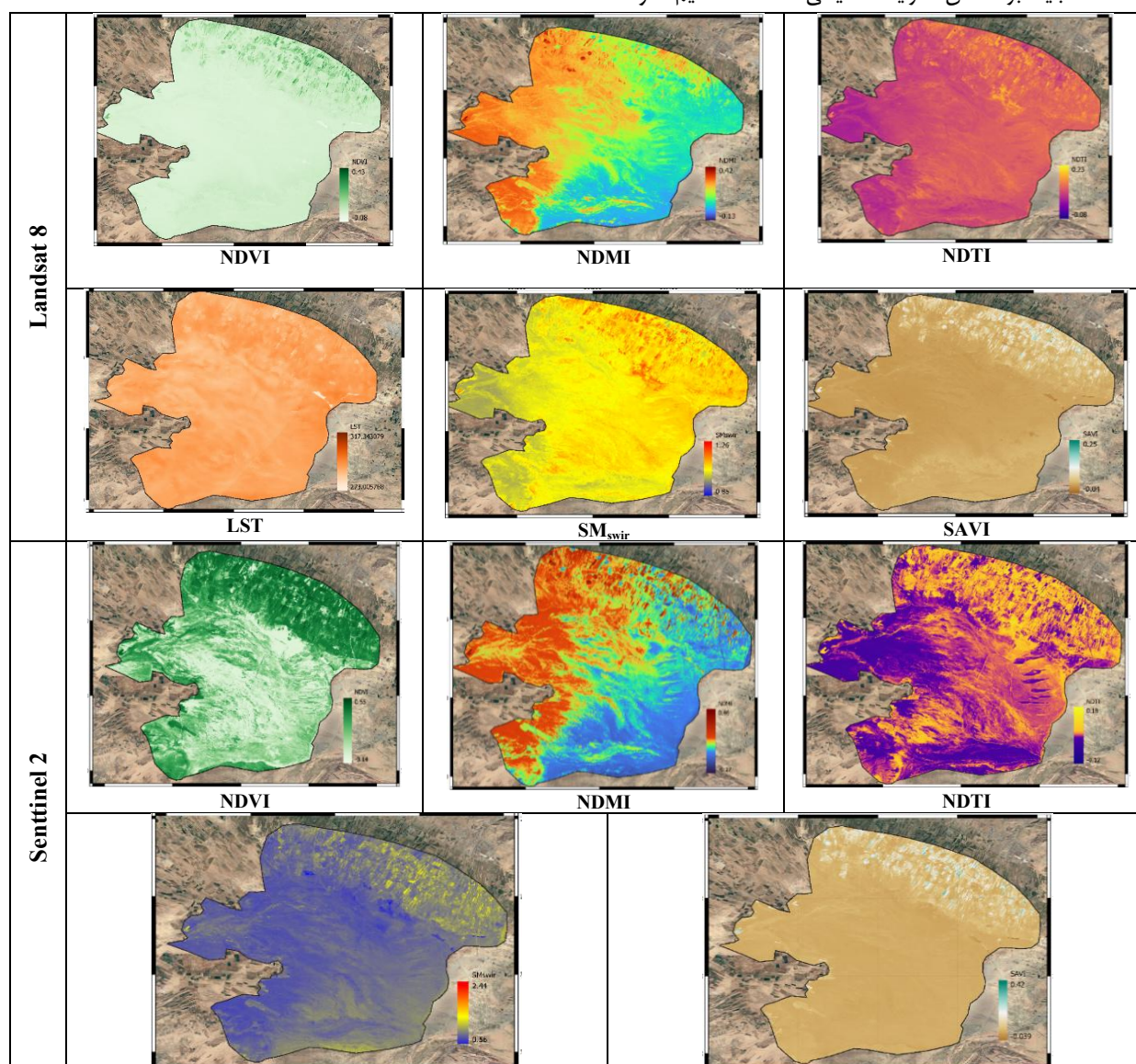
Figure 3- Correlation between soil moisture values and estimated indices in Sentinel-2 (a) and Landsat-8 (b) sensors

و رطوبت در سنتینل-۲ در محدوده مادون قرمز نزدیک قرار دارند که این امر باعث افزایش دقت در تخمین رطوبت خاک می‌شود. بررسی مقایسه تغییرات مکانی شاخص‌ها نشان داد که سنجنده سنتینل-۲ به دلیل قدرت تفکیک مکانی کم‌تر توانسته است با دقت کم‌تری تغییرات را نشان دهد. بررسی تغییرات

در شکل ۴ به بررسی نقشه پراکندگی شاخص‌های برآورد شده توسط سنجنده‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ پرداخته شد. در سنجنده سنتینل-۲، به دلیل وجود باندهای با وضوح بالا در محدوده آبی و مادون قرمز، تفکیک پوشش گیاهی و رطوبت خاک با دقت کم‌تری انجام شد. به علاوه باندهای مرتبط با خاک

به طوری که، در مناطق با پوشش گیاهی کم و خاک کم تر، مقدار L باید کم تر باشد تا تفاوت در بازتاب نور در باند نزدیک مادون قرمز و آبی کم تر شود. در لندست-۸، به دلیل پراکندگی کم تر در تصاویر و وجود نویز، تعیین مقدار بهینه برای L ممکن است دشوار باشد که باعث کاهش دقت در تخمین پوشش گیاهی با SAVI شد. بررسی تغییرات شاخص SM_{SWIR} در هر دو ستجده نشان داد در لندست-۸، باندهای مرتبط با مادون قرمز در محدوده موج کوتاه، شامل باندهای ۶ و ۷ هستند. در سنتینل-۲، علاوه بر باندهای مرتبط با مادون قرمز در محدوده موج کوتاه (باند ۸ و ۱۲)، باند ۱۱ نیز در این محدوده قرار دارد که برای تخمین رطوبت خاک کاربرد دارد. همچنین، در سنتینل-۲، باندهای مرتبط با مادون قرمز در محدوده موج کوتاه، با حساسیت کمتری نسبت به لندست-۸ قرار دارند، که باعث افزایش دقت در تخمین رطوبت خاک می شوند.

مکانی شاخص NDVI نشان داد که این شاخص در سنتینل-۲ از مقادیر بالاتری برخوردار است. زیرا بخش وسیعی از اراضی کشاورزی در نواحی بالای شوره زار و زهکش حائل دارای پوشش گیاهی با تراکم به نسبت مناسب هستند که سنتینل-۲ توانسته است این تغییرات را دقت بالایی نشان دهد. در حالی که در لندست-۸ تنها بخش محدودی از اراضی بالادست شوره زار را به عنوان مناطق با تراکم پوشش گیاهی به نسبت مناسب شناسایی کرده است. علاوه بر این در بررسی تغییرات و پراکندگی شاخص SAVI نیز ملاحظه شد که این شاخص در لندست-۸ برآورد کمتری داشته است علت این امر می تواند ناشی از حساسیت کم تر باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک باشد؛ بنابراین ممکن است از جمله دلایل کم برآوردی لندست-۸ باشد. همچنین علاوه بر مورد مطرح شده، در SAVI، پارامتر L (به عنوان ثابت زمین) برای تعیین شدت نور مادون قرمز استفاده شد که باید بر اساس شرایط محیطی مختلف تنظیم شود.



	SM _{SWIR}	SAVI

شکل ۴- نقشه پراکندگی شاخص‌های برآورد شده توسط سنتینل-۲ و لندست-۸

Figure 4- Scatterplot of estimated indices by Sentinel-2 and Landsat-8

در صورتی که از داده‌های سنجنده لندست-۸ برای برآورد رطوبت استفاده شود، رابطه (۳) با ضریب همبستگی ۰/۸۱ از دقت قابل قبولی برخوردار است. مقادیر میانگین جذر مربعات خطا نشان می‌دهد که دقت مدل سه به مراتب کمتر از سایر مدل‌ها بود.

در شکل ۵ نیز نمودار پراکندگی مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده با استفاده از چهار مدل برازش شده و مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به اینکه در مدل رگرسیونی ۱ تنها بر اساس شاخص SAVI، رطوبت را پیش‌بینی نموده است، ممکن است برخی از عوامل موثر بر رطوبت خاک را نادیده گرفته باشد. از طرف دیگر مدل رگرسیونی ۳ با استفاده از دو شاخص NDTI و LST به‌طور همزمان از عوامل موثر بر رطوبت خاک استفاده می‌کند؛ بنابراین می‌تواند دقت کمتری را در بررسی رطوبت خاک با استفاده از تصاویر لندست-۸ داشته باشد. در پژوهشی مشخص شد که استفاده از شاخص NDTI و LST در تجزیه و تحلیل رطوبت خاک زمانی که با عوامل دیگر ترکیب می‌شود دقیق‌تر نشان داده شده است (Sánchez et al., 2015). به‌طور مشابه، Wang et al., (2020) نشان داد که ترکیب داده‌های SAR با داده‌های نوری چند منبعی، از جمله شاخص NDTI و LST، می‌تواند دقت بازیابی رطوبت خاک را بهبود بخشد.

مدل‌های رطوبت خاک

جدول ۴ نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه بین میانگین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شاخص‌های پوشش گیاهی که کمترین میزان همبستگی را با داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده داشتند، را نشان می‌دهد. مدل شماره یک در جدول ۴ مدل پیش‌بینی شده برای منطقه را نشان می‌دهد که صرفاً بر اساس شاخص SAVI با شوری خاک است. به‌طور کلی شاخص‌های آماری بررسی شده نشان می‌دهد که مدل شماره یک با میزان همبستگی ۰/۷۱ و میانگین جذر مربعات خطا ۵/۴۲ نسبت به مدل شماره دو و سه با درصد همبستگی کمتری همراه است اما دقت مناسب و قابل قبولی را به نسبت ارائه داده است. بررسی شاخص PBIAS به‌عنوان یکی از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مقدار میانگین تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهدات واقعی چقدر است. در این جدول آماری، مقدار PBIAS در رابطه اول، ۰/۳۳ و در مدل‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۹ است، که نشان می‌دهد مدل‌ها توانسته‌اند مقادیر پیش‌بینی را با دقت قابل قبولی ارائه دهند. در بین چهار رابطه ارائه شده، رابطه سوم کمترین میزان PBIAS را دارد. بررسی ریشه نرمال شده میانگین مربع خطا (NRMSE) نشان می‌دهد که در صورتی که برای بررسی و برآورد میزان رطوبت از هر چهار رابطه استفاده شود، دقت قابل قبولی از رطوبت محاسبه شده به دست خواهد آمد. به‌طور کلی

جدول ۴- نتایج مدل رگرسیونی حاصل از دو سنجنده

Table 4- Results of regression model derived from two sensors

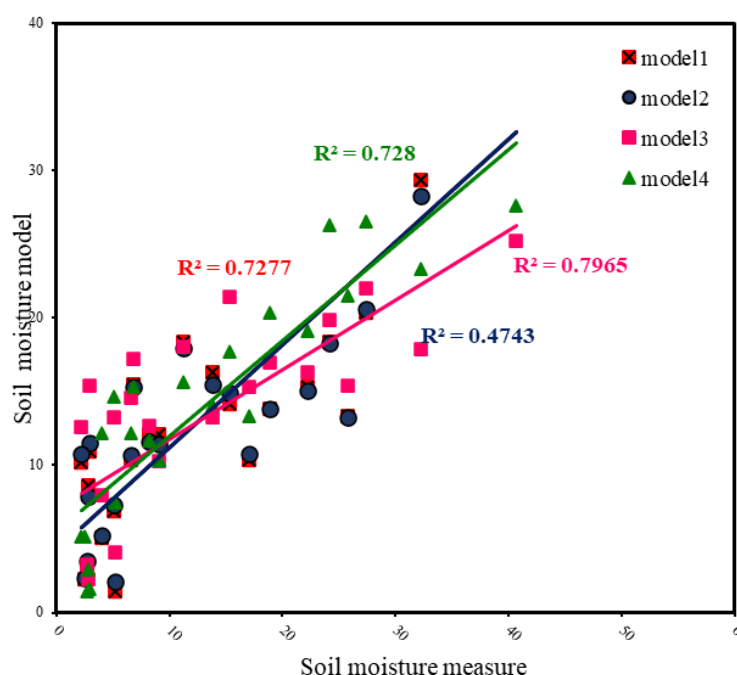
	No.	Model	R ²	R	RMSE	NRMSE	PBIAS
Landsat 8	1	Soil Moisture=44.91-114.7SAVI-121.3SAVI ²	71.78	0.81	5.42	0.35	0.33
	2	Soil Moisture = 46.42 - 14.1NDTI - 142.7SAVI	71.72	0.82	5.44	0.36	0.35
	3	Soil Moisture = 25.26 - 29.2LST - 79.9NDTI	81.26	0.92	2.27	0.19	0.27
Sentinel 2	4	Soil Moisture = 27.64 - 60SAVI - 2.6NDTI	72.69	0.86	5.58	0.29	0.29

(et al., 2021). در سنجنده سنتینل-۲ باند حرارتی به‌منظور محاسبه دمای سطح وجود ندارد با توجه به این که بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه در محدوده مناطق شور با پوشش گیاهی

همچنین سنجنده سنتینل-۲ نیز در برآورد رطوبت خاک از دقت مناسبی برخوردار است. دقت سنجنده سنتینل-۲ در تخمین رطوبت خاک به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Liu

پراکنده قرار دارد، لذا دمای سطح زمین به دلیل کمبود آب و شوری خاک افزایش می یابد و به عنوان یک عامل مهم در کاهش رطوبت خاک اثر می گذارد، در واقع دمای سطح زمین می تواند به عنوان یک شاخص مهم برای بررسی رطوبت خاک در مناطق خشک و شور محسوب شود؛ زیرا با افزایش دمای سطح زمین، تبخیر و تعرق از سطح خاک و گیاه افزایش می یابد و از میزان رطوبت خاک کاسته می شود، از طرفی با کاهش رطوبت خاک و افزایش

دما، شوری خاک نیز افزایش می یابد که این عامل می تواند تأثیرات منفی بر رشد و عملکرد گیاه داشته باشد. لذا به همین منظور مدل رگرسیونی ۳ در این منطقه مطالعاتی با ضریب تبیین ۰/۸۱ نسبت به مدل رگرسیونی ۴ که بر اساس سنجنده سنتینل-۲ تهیه شده است با ضریب تبیین ۰/۷۲ از دقت بالاتری برخوردار است.



شکل ۵- نمودار پراکندگی مقادیر رطوبت خاک حاصل از مدل و رطوبت خاک اندازه گیری شده

Figure 5- Scatterplot of Modeled Soil Moisture Values and Measured Soil Moisture

۳- نتیجه گیری

رطوبت خاک سطحی با تأثیر بر فرایندهای هیدرولوژیک، اکولوژیک و هواشناسی، نقش بسیار مهمی در تعادل جهانی آب و انرژی ایفا می کند. استفاده از تصاویر ماهواره ای و شاخص های سنجش از دور به عنوان ابزارهای قابل اعتماد و دقیق، امکان برآورد و پهنه بندی رطوبت خاک سطحی در مناطق گرم و خشک را فراهم می کند. در این پژوهش، برای شناخت ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص های مرتبط با آن، از دو سنجنده لندست-۸ و سنتینل-۲ برای برآورد شاخص ها استفاده شده است. همبستگی میان دمای سطح زمین و شاخص های پوشش گیاهی نشان داد که تمامی شاخص های بررسی شده از جمله شاخص SAVI، NDVI، NDTI، NDMI و SM_{SWIR} از همبستگی بالایی برخوردار هستند و شاخص های SAVI و NDVI در لندست-۸ به ترتیب با مقدار ۰/۸۴- و ۰/۷۱- کمترین میزان همبستگی منفی را داشتند که یکی از علل

همبستگی منفی بین شاخص SAVI و LST تأثیر حرارت بر سلامت گیاهی است. در ادامه، علاوه بر بررسی همبستگی شاخص ها، مدل های رگرسیونی برای پیش بینی رطوبت خاک نیز تهیه شد. مدل رگرسیونی، با استفاده همزمان از دو شاخص LST و NDTI به عنوان عوامل موثر بر رطوبت خاک، تهیه شده است. این مدل می تواند با استفاده از تصاویر لندست-۸، دقت کمتری در بررسی رطوبت خاک ارائه دهد. بنابراین، این مدل رگرسیونی با دقت بالا در منطقه مورد معرفی قرار گرفت.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از داده های سنجش از دور به عنوان یک ابزار مؤثر در تخمین رطوبت خاک و برآورد شوری خاک در مناطق کشاورزی و شوره زار دشت قزوین می تواند مفید واقع شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از داده های سنجش از دور به صورت مداوم و در بازه های زمانی کوتاه، به عنوان یک ابزار برای پیش

ابیات، محمد، ابیات، مصطفی و ابیات، مرتضی (۱۴۰۱). برآورد رطوبت سطحی خاک در مناطق کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های حسگری از دور (مطالعه موردی: شهرستان شوشتر). *تحقیقات خاک و آب/ایران*، ۵۳ (۵)، ۹۷۰-۹۵۷
doi:10.22059/IJSWR.2022.341981.669251

اصغری سراسکانرود، صیاد، اسفندیاری درآباد، فریبا، ملانوری، الهام و صفری، شیوا (۱۴۰۱). بررسی رطوبت سطحی خاک در شهر اردبیل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat 8 و Sentinel 1. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۱ (۴)، ۸۹-۱۰۳.
doi:10.30495/WSRCJ.2022.20006

باقری، کیوان و باقری، میلاد (۱۳۹۸). برآورد رطوبت خاک با استفاده از حسگری اپتیکال، ترمال و راداری (مطالعه موردی: جنوب تهران). *علوم و مهندسی مدیریت حوضه آبی/ایران*، ۱۳ (۴۷)، ۶۳-۷۴
doi:10.1001.1.20089554.1398.13.47.8.6

فخار، محدثه‌السادات و کاویانی، عباس (۱۴۰۱). ارزیابی محصول WaPOR فائو و الگوریتم PYSEBAL در تخمین مقدار نیاز آبی دشت قزوین بر اساس هوش مصنوعی. *تحقیقات آب و خاک/ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۳۷۲-۱۳۵۹
doi:10.22059/ijswr.2022.341474.669242

محمدی، مسعود، محمدی قلعه‌نی، مهدی و ابراهیمی، کیومرث (۱۳۸۰). تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین. *پژوهش آب/ایران*، ۱۵ (۱)، ۴۱-۵۱.

هدایتی، اکرم و کاکاوند، رضا. (۱۳۹۰). زون‌بندی اقلیمی استان قزوین. *نیوار*، ۳۶ (۷۷-۷۶)، ۵۹-۶۶

دقیق و مداوم رطوبت خاک، بسیار مفید است. با توجه به این که رطوبت خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در تحقق امنیت غذایی و تولید محصولات کشاورزی مؤثر است، استفاده از داده‌های سنجنش از دور می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در مدیریت خاک و کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت ریاست دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به‌منظور در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی در راستای برداشت نمونه از اراضی کشاورزی تشکر و قدردانی می‌شود.

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

محدثه‌السادات فخار: ایده اولیه، مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **بیژن نظری:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

منابع

- Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2022). Estimation of soil surface moisture in agricultural lands using satellite images and remote sensing indicators (Case study: Shushtar County). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(5), 957-970 [In Persian]. doi:10.22059/IJSWR.2022.341981.669251
- Asghari S. S., Esfandayari Darabad, F., Mollanouri, E., & Safary, S. (2022). Investigation of soil surface moisture in Ardabil city using Landsat 8 and Sentile 1 satellite data. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 11(4), 89-103 [In Persian]. doi:10.30495/WSRCJ.2022.20006
- Azabdaftari, A., & Sunar, F. (2016). Soil salinity mapping using multitemporal Landsat data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 3-9. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B7-3-2016
- Bagheri, K., & Bagheri, M., 2019. Estimation of soil moisture using optical, thermal and radar Remote Sensing) Case Study: South of Tehran. Iran. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(47), 63-74. [In Persian]. doi:10.1001.1.20089554.1398.13.47.8.6
- Benninga, H.-J. F., Carranza, C. D. U., Pezij, M., van Santen, P., van der Ploeg, M. J., Augustijn, D. C. M., & van der Velde, R. (2018). The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands. *Earth System Science Data*, 10(1), 61-79. doi:10.5194/essd-10-61-2018
- Chavez Jr, P. S. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1285-1294
- Corwin, D. L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. doi:10.1111/ejss.13010
- Daba, A. W., & Qureshi, A. S. (2021). Review of

- soil salinity and sodicity challenges to crop production in the lowland irrigated areas of Ethiopia and its management strategies. *Land*, 10(12), 1377. doi:10.3390/land10121377
- Drusch, M. (2007). Initializing numerical weather prediction models with satellite-derived surface soil moisture: Data assimilation experiments with ECMWF's Integrated Forecast System and the TMI soil moisture data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D3). doi:10.1029/2006JD007478
- Fabre, S., Briottet, X., & Lesaignoux, A. (2015). Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5 μm domain. *Sensors*, 15(2), 3262–3281. doi:10.3390/s150203262
- Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2022). Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating the amount of water consumed. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(6), 1359-1372 [In Persian]. doi:10.22059/IJSWR.2022.341474.669242
- Hedayati, A., & Kakavand, R., 2012. Climatic zoning of Qazvin Province. *Nivar*, 36(77-76), 59–66 [In Persian].
- Jagadish, S. V, Way, D. A., & Sharkey, T. D. (2021). Scaling plant responses to high temperature from cell to ecosystem. *Plant, Cell and Environment*, 44(BNL-221830-2021-JAAM). doi:10.1111/pce.14082
- Kasim, N., Maihemuti, B., Sawut, R., Abliz, A., Dong, C., & Abdumutallip, M. (2020). Quantitative estimation of soil salinization in an arid region of the Keriya Oasis based on multidimensional modeling. *Water*, 12(3), 880. doi:10.3390/w12030880
- Kaya, F., Schillaci, C., Keshavarzi, A., & Başayığit, L. (2022). Predictive mapping of electrical conductivity and assessment of soil salinity in a Western Türkiye Alluvial Plain. *Land*, 11(12), 2148. doi:10.3390/land11122148
- Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittoneil, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J., Pachepsky, Y., & Van Der Putten, W. H. (2016). Forum paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGS). *Soil Discussions*, 2016, 1–28. doi:10.5194/soil-2-111-2016
- Keesstra, S., Mol, G., De Leeuw, J., Okx, J., Molenaar, C., De Cleen, M., & Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, 7(4), 133. doi:10.3390/land7040133
- Keetch, J. J., & Byram, G. M. (1968). *A drought index for forest fire control* (Vol. 38). US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment
- Kelley, C. P., Mohtadi, S., Cane, M. A., Seager, R., & Kushnir, Y. (2015). Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3241–3246. doi:10.1073/pnas.1421533112
- Kim, S., Liu, Y., Johnson, F., & Sharma, A. (2016). A temporal correlation based approach for spatial disaggregation of remotely sensed soil moisture. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016, H51H-1606.
- Li, Q., Zhong, R., Huang, J., & Gong, H. (2011). Comparison of two retrieval methods with combined passive and active microwave remote sensing observations for soil moisture. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3–4), 1181–1193. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.052
- Liu, Y., Qian, J., & Yue, H. (2021). Comprehensive evaluation of Sentinel-2 red edge and shortwave-infrared bands to estimate soil moisture. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 7448–7465. doi:10.1109/JSTARS.2021.3098513
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2002). Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 722–727. doi:10.2136/sssaj2002.7220
- Marco, E. S., Herrmann, D., Schwab, K., Schweitzer, K., Almengor, R., Berndt, F., Sommer, C., & Probeck, M. (2019). Improvement of existing and development of future Copernicus land monitoring products—the ECOLASS project. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 201–208. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-201-2019
- Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 1–20. doi:10.1016/S0034-4257(02)00188-8
- Mohammadi, M., Mohammadi Ghaleney, M., & Ebrahimi, K. (2011). Spatial and temporal variations of groundwater quality of Qazvin plain. *Journal of Iranian Water Research*, 5(1), 41-51 [In Persian].
- Okur, B., & Örcen, N. (2020). Soil salinization and climate change. In *Climate change and soil interactions* (pp. 331–350). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-818032-7.00012-6
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(9), 503–510. doi:10.1016/j.tree.2005.05.011

- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Paper a 20. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC On*, 351, 309.
- Ruiz-Vera, U. M., Siebers, M. H., Drag, D. W., Ort, D. R., & Bernacchi, C. J. (2015). Canopy warming caused photosynthetic acclimation and reduced seed yield in maize grown at ambient and elevated [CO₂]. *Global Change Biology*, 21(11), 4237–4249. doi:10.1111/gcb.13013
- Sánchez, N., Alonso-Arroyo, A., Martínez-Fernández, J., Piles, M., González-Zamora, Á., Camps, A., & Vall-Lloera, M. (2015). On the synergy of airborne GNSS-R and Landsat 8 for soil moisture estimation. *Remote Sensing*, 7(8), 9954–9974. doi:10.3390/rs70809954
- Scott, C. A., Bastiaanssen, W. G. M., & Ahmad, M.-D. (2003). Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 326–335. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(326)
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131. doi:10.1016/j.sjbs.2014.12.001
- Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38(1), 39–67. doi:10.1111/sum.12772
- Taghadosi, M. M., Hasanlou, M., & Eftekhari, K. (2019). Soil salinity mapping using dual-polarized SAR Sentinel-1 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 40(1), 237–252. doi:10.1080/01431161.2018.1512767
- Van de Griend, A. A., & Engman, E. T. (1985). Partial area hydrology and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 81(3–4), 211–251.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Bogen, 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. 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
- Wang, Q., Li, J., Jin, T., Chang, X., Zhu, Y., Li, Y., Sun, J., & Li, D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. *Remote Sensing*, 12(17), 2708. doi:10.3390/rs12172708
- Zaman, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2018). *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer Nature. doi:10.1007/978-3-319-96190-3
- Zareie, A., Amin, M. S. R., & Amador-Jiménez, L. E. (2016). Thornthwaite moisture index modeling to estimate the implication of climate change on pavement deterioration. *Journal of Transportation Engineering*, 142(4), 4016007. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B7-3-2016
- Zhang, D., Tang, R., Zhao, W., Tang, B., Wu, H., Shao, K., & Li, Z.-L. (2014). Surface soil water content estimation from thermal remote sensing based on the temporal variation of land surface temperature. *Remote Sensing*, 6(4), 3170–3187. doi:10.3390/rs6043170
- Zhao, W., Li, A., & Zhao, T. (2017). Potential of estimating surface soil moisture with the triangle-based empirical relationship model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11), 6494–6504. doi:10.1109/TGRS.2017.2728815