

GES	Geography and Environmental Studies, 14 (55), 2025 Publisher: Islamic Azad University – Najafabad Branch https://sanad.iau.ir/journal/ges E-ISSN: 2345-5985 Doi: 10.71740/ges.2025.1191826	
-----	--	---

Research Paper

Received: 28 November 2024

Revised: 25 May 2025

Accepted: 19 July 2025

Online Publication: 23 September 2025

Spatial and Temporal Analysis of the Relationship Between Soil Moisture and Spectral Indices Using Satellite Images (Case Study: Firouzabad Watershed)

Behrouz Sobhani¹, Morteza Mamlouki²

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (Corresponding Author)

Email: sobhani@uma.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Abstract

Soil moisture is a fundamental factor influencing hydrological processes, agriculture, and natural resource management. Remote sensing data, coupled with spectral index analysis, provides an effective tool for indirectly estimating this characteristic. This study investigated the relationship between soil moisture and spectral indices in the Firouzabad watershed from 2014 to 2023. FLDAS soil moisture data and Landsat 8 satellite imagery on the Google Earth Engine platform were utilized. Spectral indices including NDVI, EVI, NDWI, SAVI, NDLI, and NDBI were examined to assess vegetation cover, soil moisture, and bare soil areas. Pearson correlation coefficient and R^2 were used to analyze the correlation between spectral indices and soil moisture over 500 sample pixels. Results showed that eastern regions with dense vegetation and higher soil moisture exhibited higher vegetation indices like NDVI, EVI, and SAVI, indicating improved vegetation cover. Conversely, western and central regions displayed lower vegetation and moisture indices due to sparse vegetation and lower soil moisture. NDWI confirmed the presence of shallow surface water in moist areas. NDLI, with the highest correlation coefficient (0.303) and coefficient of determination (0.091), was identified as the best index for predicting soil moisture, while NDBI showed the least correlation. These findings have significant implications for natural resource management and soil moisture monitoring.

Keywords: Correlation, Vegetation cover, Soil moisture, Firouzabad.

Citation: Sobhani, B.; Mamlouki, M. (2025), Spatial and Temporal Analysis of the Relationship Between Soil Moisture and Spectral Indices Using Satellite Images (Case Study: Firouzabad Watershed), *Geography and Environmental Studies*, 14 (55), 60-74. Doi: 10.71740/ges.2025.1191826

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



جغرافیا و مطالعات محیطی

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

شاپا الکترونیکی: 2345-5985

Sanad.iau.ir/journal/ges

Doi: 10.71740/ges.2025.1191826



مقاله پژوهشی

تحلیل مکانی و زمانی ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص های طیفی با استفاده از تصاویر ماهواره ای (مطالعه موردی: حوضه آبخیز فیروزآباد)

بهروز سبحانی، مرتضی مملوکی

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی رابطه میان رطوبت خاک و شاخص های طیفی در حوضه آبخیز فیروزآباد در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ انجام شد. برای این منظور، از داده های رطوبت خاک مجموعه FLDAS و تصاویر ماهواره ای لندست ۸ در محیط پلتفرم گوگل ارث انجین استفاده گردید. شاخص های طیفی مورد بررسی شامل NDVI، EVI، NDWI، SAVI، NDLI و NDBI بودند که برای ارزیابی ویژگی های مختلف مانند پوشش گیاهی، رطوبت خاک و نواحی بایر به کار گرفته شدند. تحلیل همبستگی بین شاخص های طیفی و رطوبت خاک با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و R^2 بر روی ۵۰۰ پیکسل نمونه انجام شد. نتایج نشان داد که مناطق شرقی حوضه با تراکم بالای پوشش گیاهی و رطوبت بیشتر خاک، شاخص های سبزینگی بالاتری مانند NDVI، EVI، SAVI دارند و بهبود پوشش گیاهی را نشان می دهند. در مقابل، مناطق غربی و مرکزی به دلیل پراکندگی پوشش گیاهی و رطوبت کمتر خاک، شاخص های سبزینگی و رطوبتی کمتری را نشان دادند. شاخص NDWI نیز حضور آب های سطحی کم عمق در مناطق مرطوب را تأیید کرد. شاخص NDLI با بالاترین ضریب همبستگی (۰/۳۰۳) و ضریب تعیین (۰/۰۹۱) به عنوان بهترین شاخص برای پیش بینی رطوبت خاک شناخته شد، در حالی که شاخص NDBI کمترین ارتباط را با این پارامتر داشت. این یافته ها کاربردهای مهمی در مدیریت منابع طبیعی و پایش رطوبت خاک ارائه می دهند.

کلمات کلیدی: همبستگی، پوشش گیاهی، رطوبت خاک، فیروزآباد.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

نویسنده مسئول: بهروز سبحانی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. sobhani@uma.ac.ir

نحوه ارجاع به مقاله:

سبحانی، بهروز؛ مملوکی، مرتضی (۱۴۰۴)، تحلیل مکانی و زمانی ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص های طیفی با استفاده از تصاویر ماهواره ای (مطالعه موردی: حوضه آبخیز فیروزآباد)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۴ (۵۵)، ۷۴-۶۰. Doi: 10.71740/ges.2025.1191826

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granded to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



مقدمه

رطوبت خاک به عنوان یکی از عناصر کلیدی در مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقش حیاتی در درک و پیش‌بینی فرآیندهای طبیعی و انسانی دارد. این پارامتر به ویژه در مطالعات مرتبط با خشکسالی و مدیریت منابع آب اهمیت زیادی پیدا می‌کند. با توجه به تغییرات مداوم رطوبت خاک در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، تأثیرات جغرافیایی و اقلیمی بر آن غیرقابل انکار است (شاه مرادی و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۴؛ میری و همکاران، ۱۴۰۲: ۳۴۴). به دلیل چالش‌های موجود در اندازه‌گیری مداوم رطوبت خاک، به ویژه در مناطق دشوار و وسیع، انجام این اندازه‌گیری‌ها به شکل میدانی نه تنها زمان‌بر بلکه پرهزینه نیز می‌باشد. در این راستا، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به عنوان یک راه‌حل کارآمد برای تخمین رطوبت خاک در سطح حوزه‌های آبخیز مطرح شده است (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۲۳). تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند به تسهیل تخمین رطوبت خاک در مناطق دورافتاده کمک کرده و دسترسی به نواحی غیرقابل دسترس را ممکن سازند (صدقت و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۰۲). این تحقیق به دنبال شناسایی و مدل‌سازی ارتباط میان داده‌های ماهواره‌ای و رطوبت خاک است. روش‌های مختلفی برای تخمین رطوبت خاک در مقیاس وسیع از طریق سنجش از دور وجود دارد، که شامل استفاده از ابزارهای سنجش با امواج نوری، حرارتی و میکروویو می‌شود (سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۷: ۳۰۸؛ بیدخانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۷۴). آگاهی از توزیع مکانی و زمانی دمای سطح زمین برای تعیین توازن انرژی زمین و انجام مطالعات هواشناسی و اقلیمی ضروری است. دمای سطح زمین نشان‌دهنده میزان خالص انرژی است که تحت شرایط اقلیمی متوازن شده و به عوامل مختلفی مانند انرژی تابشی، رطوبت و جریان هوای اتمسفر بستگی دارد (Robinson et al., 2008: 361). سنجش از دور با امواج میکروویو تابش الکترومغناطیسی را در محدوده ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به ویژه در طول موج ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. طول موج‌های بزرگتر از ۵ سانتی‌متر به دلیل کمترین تأثیرپذیری از پوشش گیاهی و اتمسفر، قادر به شناسایی عمق بیشتری از خاک و حساسیت بیشتری به رطوبت خاک هستند (Wang and Qu, 2009: 240). تحلیل توزیع مکانی رطوبت خاک، بنیادی برای پژوهش و مدیریت در زمینه کشاورزی و محیط‌زیست است. به دست آوردن اطلاعات مربوط به رطوبت سطحی خاک در مناطق ناهموار به عنوان یک چالش بزرگ شناخته می‌شود. رطوبت خاک به شدت تحت تأثیر زمان و مکان قرار دارد و مقادیر آن در هر ناحیه به طور مداوم تغییر می‌کند. در صورتی که ارتباطی بین داده‌های ماهواره‌ای و رطوبت خاک برقرار شود، تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند به تسهیل تخمین رطوبت خاک در سطح حوضه کمک کنند و دسترسی به مناطق دورافتاده یا غیرقابل دسترس را ممکن سازند (صدقت و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۰۳). به‌طور کلی، روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد: اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیرمستقیم در مزرعه، روش‌های سنجش از دور، و مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک. هر یک از این گروه‌ها با محدودیت‌هایی مواجه هستند که گسترش این اندازه‌گیری‌ها به مقیاس‌های بزرگ را دشوار می‌سازد. برای مقابله با این محدودیت‌ها، ترکیب داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی رطوبت خاک به کار گرفته شده است (Escorihuela and Quintana-Segui, 2016: 101). سنجش از دور بر اساس ارتباط قوی بین خواص دی‌الکتریک آب و خاک عمل می‌کند و به دلیل دیدگاه جامع و یکنواختی که از مناطق مختلف زمین ارائه می‌دهد، امکان تصویربرداری مکرر از نواحی وسیع و دست‌نیافتنی را فراهم می‌آورد. این روش به‌دست آوردن اطلاعات با فواصل زمانی منظم و کاهش اثرات طرح‌های شناسایی میدانی بر محیط‌زیست بسیار مؤثر بوده است (Chen et al., 2013: 4469). تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه شاخص‌های طیفی و ارتباط آن با رطوبت خاک در سراسر جهان انجام شده است. برای مثال، وانگ^۱ (۲۰۰۵)، رابطه بین رطوبت مشاهده شده و NDVI حاصل از تصاویر ماهواره مودیس را در منطقه نیمه خشک کشور آمریکا پرداخت. نتایج

^۱- Wang

ایشان نشان داد که رابطه خوبی بین این دو پارامتر در منطقه توسعه به دست آورد. وانگ و خو^۱ (۲۰۰۹)، با تلفیق داده‌های رطوبت خاک با شاخص‌های NDVI و LST مستخرج از محصولات شاخص گیاهی و دمای سطحی مودیس، روابط رگرسیونی را برای برآورد رطوبت خاک بدست آوردند که نتایج حاصله همبستگی بالایی را با مشاهدات زمینی نشان داده است. سانچز^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی با استفاده از چهار شاخص NDVI, NDMI, LST و BT رطوبت سطحی خاک در منطقه‌ای از اسپانیا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده ارتباط قابل قبولی بین رطوبت خاک و داده‌های سنجش از دور دارد. آیهو^۳ و همکاران (۲۰۲۲)، با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و استفاده از روش ماشین‌بردار پشتیبان رطوبت خاک در حوضه آبخیز نیل در کشور ایتوبی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب داده‌های سنتینل و شاخص‌های NDVI و متغیرهای ارتفاعی قابلیت برآورد رطوبت خاک را با دقت قابل قبولی دارند. خیا^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی با استفاده از دو روش شاخص دما، پوشش گیاهی و خشکی برای برآورد رطوبت سطحی خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو این روش‌ها به خوبی توانستند رطوبت سطحی خاک را برآورد نمایند. در ایران نیز بیدخانی و مباحثی (۱۳۹۸)، در پژوهشی توسعه یک مدل رگرسیونی شاخص مینا به منظور برآورد رطوبت سطح خاک از تصاویر مودیس استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل تخمین رطوبت برای خاک‌های متوسط بافت در مقایسه با خاک‌های درشت بافت خوانش نسبتاً خوبی با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده را دارد. همچنین مدل بهینه تخمین رطوبت سطح خاک رگرسیون خطی از شاخص‌های LST, VSDI, NDWI, SAVI به دست آمد که با بهبود دقتی به میزان (RMSE= 0/048) همراه بود. باقری و همکاران (۱۳۹۸)، با هدف برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور نوری، حرارتی و راداری در اراضی جنوب تهران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که مدل‌های ارائه شده از ضریب همبستگی مناسب $R^2=72$ و $R=81$ برخوردار بودند. همچنین در میان شاخص‌های موجود در چهار گروه شاخص SAVI و LST بیش‌ترین همبستگی برای برآورد رطوبت خاک را دارا است. صداقت و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از شاخص‌های طیفی رطوبت سطحی خاک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش ANN کارایی بهتری نسبت به روش SVM دارد. در روش ANN میانگین مقادیر ریشه میانگین مربعات، ضریب تعیین و ضریب بهبود نسبی به ترتیب در مرحله آموزش ۰/۳۳، ۵۳۸-، ۰/۷۱ و ۲۱/۲۵ و در مرحله آزمون ۰/۴۱۰، ۲۶۶-، ۰/۶۹ و ۱۶/۰۶ به دست آمدند. شاه‌مرادی و همکاران (۱۴۰۱)، به مدل‌سازی و نقشه‌برداری شوری و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور طیفی و راداری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص NDWI برای برآورد رطوبت با دقت ۰/۸۹ درصد دارای بالاترین میزان دقت در شاخص‌های مورد استفاده است. میری و همکاران (۱۴۰۲)، به منظور ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران پرداختند. نتایج محاسبه شاخص‌های طیفی نشان داد که از نظر مکانی، جنوب شرق منطقه مورد مطالعه از مقدار رطوبت و سبزیگی بالاتری برخوردار بود. همچنین بررسی روند مقادیر رطوبت خاک و مقادیر شاخص‌های طیفی نشان داد که بسیاری از نقاط کشور طی فصل گرم به تبع از شرایط بارشی و دمایی در منطقه نیز از یک طرف به دنبال افزایش دما و تبخیر و از طرف دیگر کاهش بارش کمترین مقادیر رطوبت خاک و در فصل سرد با شروع دوره بارشی و کاهش دما بیش‌ترین مقادیر رطوبت خاک ثبت می‌شود. با توجه به اهمیت رطوبت خاک در فرآیندهای هیدرولوژیکی و اقلیمی، این تحقیق به بررسی و تحلیل ارتباط میان شاخص‌های طیفی و رطوبت خاک می‌پردازد. هدف این مطالعه، شناسایی روش‌های مؤثر برای تخمین رطوبت خاک و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها در زمینه‌های مختلفی از قبیل کشاورزی، مدیریت منابع آب و تغییرات اقلیمی است. با این رویکرد، تلاش می‌شود تا به درک بهتری

1- wang and Xu

2- Sanchez

3- Ayehu

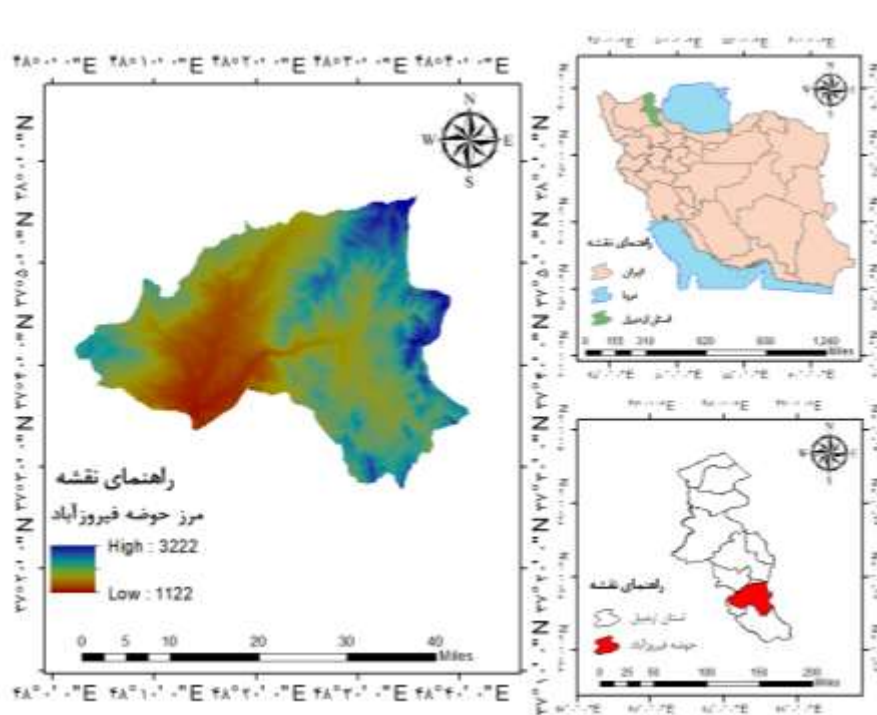
4- Xiao

از رفتار رطوبت خاک و تأثیرات آن بر سیستم‌های اکولوژیکی و انسانی دست یابیم و به این ترتیب، ابزارهای بهتری برای مدیریت پایدار منابع طبیعی توسعه دهیم.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز فیروز آباد در جنوب استان اردبیل واقع شده است که با مساحتی بالغ بر ۱۵۹۹ کیومتر مربع از سطح استان را پوشش داده است. این حوضه با موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. حوضه آبخیز فیروز آباد از شمال به حوضه آبریز قره‌سو و از غرب به حوضه آبریز رودخانه قرقو و از شرق به رشته کوه‌های تالش و از جنوب به حوضه آبریز پایاب رودخانه قزل اوزن محدود می‌شود (عبادی و همکاران، ۱۴۰۳: ۲۶۴). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز فیروز آباد در سطح کشور و استان اردبیل ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز فیروز آباد در سطح کشور و استان اردبیل

روش تحقیق

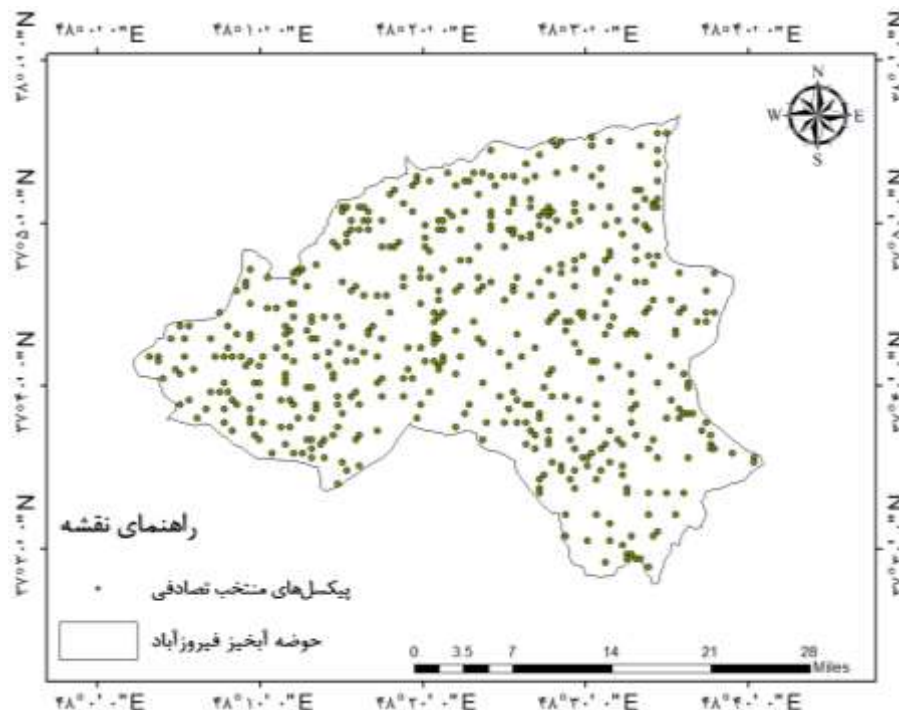
در این پژوهش، ارتباط بین رطوبت خاک حوضه آبخیز فیروز آباد و شاخص‌های طیفی در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ بررسی شد. برای تحلیل تغییرات رطوبت خاک، از مجموعه داده‌های FLDAS (شبکه سیستم‌های هشدار اولیه قحطی) در بستر پلتفرم گوگل ارث انجین (GEE) استفاده شد. مجموعه داده FLDAS که برای ارزیابی امنیت غذایی طراحی شده است، اطلاعاتی از جمله رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، دمای خاک، و بارش را شامل می‌شود. در این مطالعه، از نسخه مدل سطحی ۳.۶.۱ FLDAS که از بارش ساعتی CHIRPS-6 استفاده می‌کند، بهره گرفته شد. داده‌های مربوط به رطوبت خاک از میانگین باندهای SoilMoi00_10cm_tavg (رطوبت خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متر) و SoilMoi10_40cm_tavg (رطوبت خاک از عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر) استخراج شدند. برای بررسی تأثیر شاخص‌های طیفی بر میزان رطوبت خاک، از داده‌های تصاویر ماهواره لندست ۸ در گوگل ارث انجین استفاده گردید. داده‌های Tier 1 این ماهواره که دارای دقت بالای زمین مرجع (L1TP)، رادیومتری دقیق و

خطای کمتر از ۱۲ متر هستند، برای این تحلیل به کار رفتند. شاخص‌های طیفی مورد استفاده شامل NDBI برای شناسایی مناطق شهری، NDLI برای تحلیل تبخیر و تعرق و تنش آبی، NDVI برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی، SAVI برای اصلاح اثر خاک در شاخص پوشش گیاهی، EVI برای کاهش اثرات اتمسفر و خاک، و NDWI برای شناسایی رطوبت خاک و منابع آبی بودند. جدول ۱ اطلاعات مربوط به باندهای ماهواره لندست ۸ که در محاسبه شاخص‌ها استفاده شدند را ارائه می‌دهد.

جدول (۱): باندهای لندست ۸ مورد استفاده در شاخص‌های طیفی

نام باند	توضیحات	وضوح (متر)	طول موج (میکرومتر)
B2	Blue	۳۰	۰/۴۵ تا ۰/۵۱
B3	Green	۳۰	۰/۵۳ تا ۰/۵۹
B4	Red	۳۰	۰/۶۴ تا ۰/۶۷
B5	Near infrared	۳۰	۰/۸۵ تا ۰/۸۸
B6	Shortwave infrared 1	۳۰	۱/۵۷ تا ۱/۶۵
B7	Shortwave infrared 2	۳۰	۲/۱۱ تا ۲/۲۹

در نهایت، برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های طیفی و رطوبت خاک حوضه، از ضریب همبستگی پیرسون و R^2 استفاده شد. برای این منظور، ۵۰۰ پیکسل به صورت تصادفی از نقشه رطوبت خاک در نرم‌افزار ArcGIS انتخاب شدند. در شکل ۲، موقعیت هر کدام از پیکسل‌های منتخب نمایش داده شده است.



شکل (۲): پیکسل‌های منتخب جهت تحلیل همبستگی رطوبت خاک با شاخص‌های طیفی

شاخص‌های طیفی

شاخص NDVI: یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی رشد پوشش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که از طریق فناوری سنجش از دور محاسبه می‌شود. شاخص NDVI که برای ارزیابی انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین و شناسایی انواع پوشش‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقادیر بین -۱ تا +۱ را شامل می‌شود. این شاخص بر پایه تفاوت انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک و باند مرئی قرمز محاسبه می‌گردد. پوشش گیاهی سالم به دلیل فعالیت‌های فتوسنتزی، انعکاس بیشتری در باند IR نسبت به باند R دارد، که منجر به تولید مقادیر مثبت NDVI می‌شود. در مقابل، نواحی فاقد پوشش گیاهی مانند مناطق شهری، زمین‌های بایر، ابرها و منابع آبی معمولاً مقادیر NDVI نزدیک به صفر یا منفی را نشان می‌دهند. شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده برای تحلیل داده‌های طیفی زمینی به کار رفته و نتایج نشان می‌دهد که این شاخص همبستگی بالایی با زیست‌توده سطح زمین دارد و به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید (آرمین و همکاران، ۱۳۹۹: ۴۵).

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad \text{رابطه ۱:}$$

شاخص SAVI: شاخص SAVI یک ابزار مفید برای مطالعه گیاهان است که در سال ۱۹۸۸ توسط دانشمندی به نام Huete معرفی شد. این شاخص به ما کمک می‌کند تا مقدار گیاهان را در یک منطقه، حتی در خاک‌های روشن یا تیره، بهتر تشخیص دهیم. SAVI با کاهش تأثیر رنگ خاک، به ما تصویر دقیق‌تری از پوشش گیاهی می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که SAVI برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی، مانند رشد گیاهان یا کاهش آن‌ها، بسیار مناسب است. این شاخص به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این فرمول، پارامتر L به عنوان یک عامل تصحیح عمل می‌کند که تأثیر خاک بر شاخص پوشش گیاهی را تعدیل می‌کند. این پارامتر می‌تواند مقادیر بین صفر تا یک را به خود بگیرد؛ مقادیر نزدیک به صفر برای مناطق با پوشش گیاهی انبوه و مقادیر نزدیک به یک برای مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم مناسب هستند. برای مناطق با پوشش گیاهی متوسط، مقدار ۰/۵ برای L معمولاً پیشنهاد می‌شود. عبارت (L+1) در مخرج کسر، باعث می‌شود که دامنه تغییرات شاخص SAVI بین -۱ تا +۱ محدود شود. در واقع، هنگامی که L برابر با صفر باشد، شاخص SAVI دقیقاً با شاخص NDVI یکسان خواهد شد (Gilbert et al., 2002: 304). شاخص EVI: شاخص EVI، به عنوان یک ابزار قدرتمند در سنجش از دور، به منظور بهبود دقت ارزیابی پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته است. این شاخص با کاهش حساسیت به تغییرات خاک زمینه و اثرات جو، امکان تشخیص دقیق‌تر پوشش گیاهی کم‌تراکم را فراهم می‌کند. اخیراً گروهی از محققان، شاخص پوشش گیاهی EVI را برای استفاده در داده‌های MODIS طبق معادله (۳) پیشنهاد کرده‌اند (فرخزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۵۹).

$$EVI = \left(\frac{P_{NIR}^* - P_{RED}^*}{P_{NIR}^* + C_1 P_{RED}^* - C_2 P_{BLUE}^* + 1} \right) 1 + L \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در آن شاخص پوشش گیاهی بازسازی‌شده، R_NIR بازتاب در ناحیه مادون قرمز نزدیک، R_RED بازتاب در ناحیه قرمز، R_BLUE باند آبی و مقادیر ضرایب L، C_1 و C_2 به ترتیب -۱، -۶ و -۷/۵ می‌باشند. این شاخص در بازه -۱ تا +۱ قرار دارد. از مزایای این شاخص این است که از اثرات اتمسفر و پخش آیروسل می‌کاهد، در واقع EVI یک NDVI تغییر یافته است که در آن فاکتور تنظیم خاک (L) و دو ضریب C_1 و C_2 لحاظ می‌گردد.

شاخص NDWI: شاخص تفاوت نرمال شده آب برای اولین بار توسط مک فیتز در سال ۱۹۹۶ به منظور شناسایی و استخراج آب‌های سطحی در محیط‌های تالابی و اندازه‌گیری ابعاد آب‌های سطحی پیشنهاد گردید. برای محاسبه این شاخص در سنجنده‌های TM و OLI از رابطه (۴) استفاده می‌شود (فیض‌الله پور، ۱۴۰۲).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad \text{رابطه ۴:}$$

بر این اساس پهنه‌های آبی با مقادیر مثبت و پوشش گیاهی و خاک در این شاخص با مقادیر منفی ارائه می‌شوند. شاخص NDBI: شاخص NDBI یکی از ابزارهای مهم در سنجش از دور است که به‌طور خاص برای شناسایی و تحلیل مناطق شهری و توسعه‌های ساختمانی طراحی شده است. این شاخص به کمک داده‌های نوری به دست آمده از سنجش‌های ماهواره‌ای، به تفکیک مناطق ساخته شده از سایر نوع پوشش‌های زمین کمک می‌کند. این شاخص با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید (Imran et al., 2021: 671).

$$\text{NDBI} = \left(\frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \right) \quad \text{رابطه ۵:}$$

در این رابطه NIR، نمایانگر تابش نوری در ناحیه نزدیک به مادون قرمز است. و SWIR نمایانگر تابش نوری در ناحیه مادون قرمز کوتاه است.

مقادیر NDBI معمولاً بین -۱ تا +۱ تغییر می‌کنند. مقادیر نزدیک به +۱ نشان‌دهنده مناطق ساخته شده و توسعه یافته هستند، در حالی که مقادیر نزدیک به ۰ یا منفی نشان‌دهنده مناطق غیرساخته شده یا طبیعی هستند.

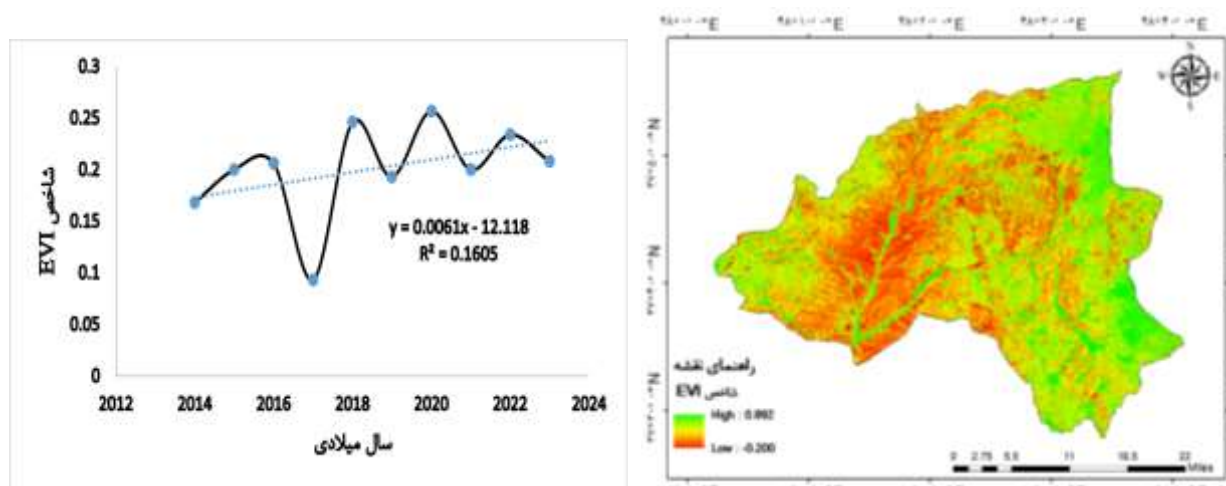
شاخص NDLI: این شاخص یکی از ابزارهای سنجش از دور است که برای ارزیابی وضعیت و سلامت برگ‌های گیاهی طراحی شده است. این شاخص به‌طور خاص برای تفکیک و تحلیل ویژگی‌های برگ‌ها و پوشش گیاهی در مناطق مختلف استفاده می‌شود و به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود (Liu and Zhang., 2023: 111).

$$\text{NDBI} = \left(\frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \right) \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این رابطه NIR نمایانگر تابش نوری در ناحیه نزدیک به مادون قرمز است و RED نمایانگر تابش نوری در ناحیه قرمز است.

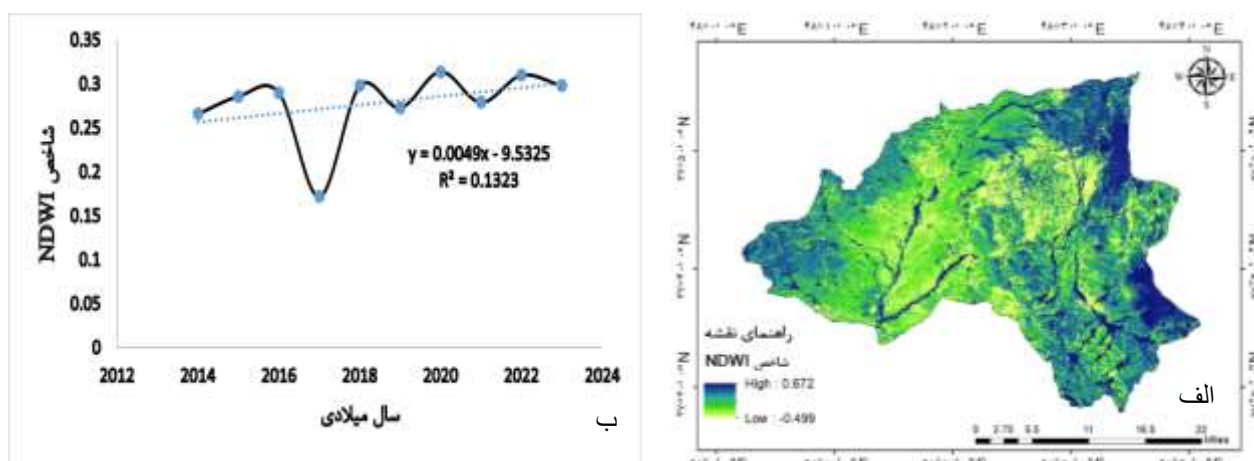
یافته‌های تحقیق

وضعیت پهنه‌بندی شاخص EVI برای حوضه آبخیز فیروزآباد در طی دوره ۲۰۱۴-۲۰۲۳ در شکل (۳، الف) نمایش داده شده است و مشخص می‌نماید بیش‌ترین تراکم و سبزی‌نگی پوشش گیاهی در نوار شرقی حوضه مذکور با مقدار ۰/۸۹ بوده است اما در نیمه غربی حوضه مورد مطالعه پوشش گیاهی اغلب به صورت پراکنده دیده می‌شود و در نواحی مرکزی که فقدان پوشش گیاهی به چشم می‌خورد مقدار این شاخص به کم‌ترین میزان خود به ۰/۲۰- می‌رسد. روند میانگین شاخص یادشده در شکل ب، برای دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد نوسان آن در محدوده دامنه ۰/۱ تا ۰/۲۵ متغیر بوده و نیل صعودی به سمت ارقام بالاتر داشته و این شرایط بیانگر وضعیت رو به بهبود تراکم پوشش گیاهی داشته است. افت محسوس این شاخص در سال ۲۰۱۷ مشهود بوده ولی در ادامه به روند صعودی خود دامنه داده است.



شکل (۳): الف) نقشه شاخص EVI، ب) روند میانگین شاخص EVI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

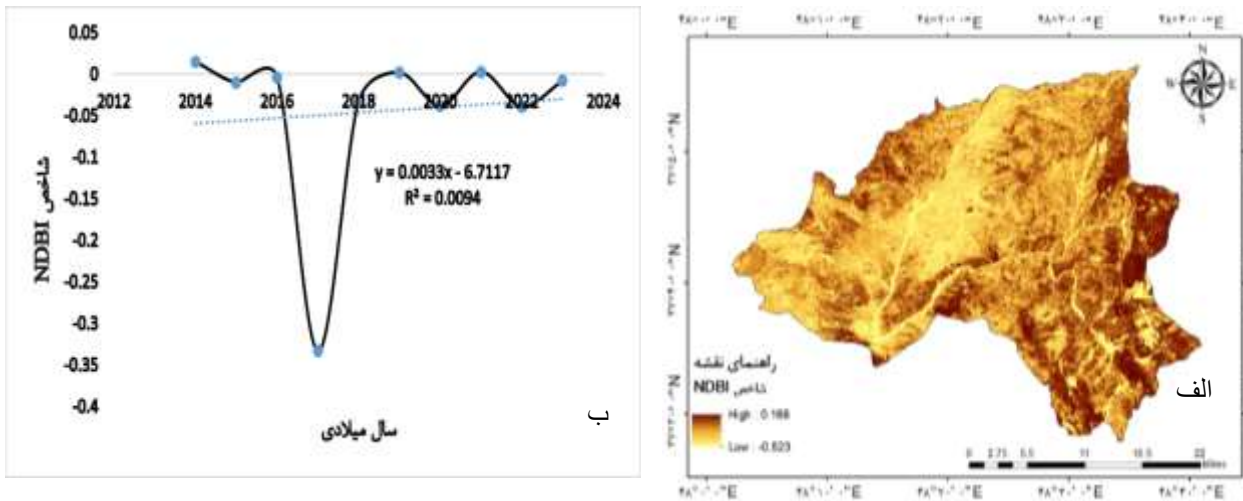
با دقت در نقشه شاخص NDWI در شکل (۴، الف) در می‌یابیم در مناطقی که پوشش گیاهی تجمع داشته با پهنه‌های آبی کم‌عمق نیز همراه بوده و این عامل نشان می‌دهد در خاک‌های حاصلخیز و نمناک رشد پوشش گیاهی نیز شدت یافته است. در این شکل نیز در مناطق شرقی حوضه بیشینه شاخص یادشده به مقدار ۰/۶۷ رسیده و به خوبی عوارض آبی از سایر پوشش‌های زمینی تفکیک شده است. در شکل ب، روند میانگین نوسان این شاخص به تصویر کشیده شده است و مشخص می‌کند در سال ۲۰۱۷ پهنه‌های آبی کاهش محسوسی داشته و از مقدار ۰/۱۵ در این سال به مقدار بیش از ۰/۳ در سال ۲۰۲۰ به بعد افزایش یافته است این شیب صعودی ملایم هر چند که معنی‌داری خاصی را نشان نمی‌دهد.



شکل (۴): الف) نقشه شاخص NDWI، ب) روند میانگین شاخص NDWI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

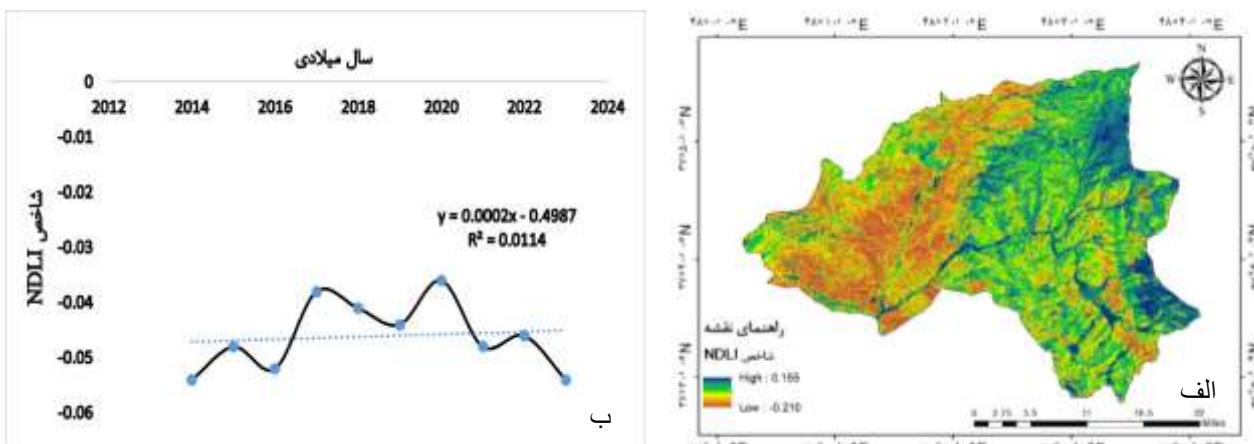
بر اساس شاخص NDBI، وضعیت منطقه مورد مطالعه از لحاظ نواحی بایر و پوشش گیاهی در شکل ۵، بررسی شده است و به طور میانگین در طول سال‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود در نیمه شرقی حوضه آبخیز فیروزآباد مقدار شاخص NDBI نزدیک به صفر بوده است (۰/۱۶)؛ و به نوعی می‌توان گفت گستردگی مکانی مناطق بایر و نواحی پوشش گیاهی یکسان بوده است اما به سمت مرکز حوضه و بخصوص در دره‌هایی که تجمع گیاهان به وفور دیده می‌شود مقدار شاخص NDBI نیز در کم‌ترین حد خود به میزان ۰/۵۲- بوده است. روند این شاخص در شکل ب، حاکی از این است که بین محدوده مقادیر صفر تا ۰/۰۵- نوسان

داشته است و افت شدید آن در سال ۲۰۱۷ و برگشت به حالت عادی در ادامه، شیب افزایش مناطق بایر را خیلی کم صعودی نشان داده است هر چند که بدون روند معناداری می باشد.



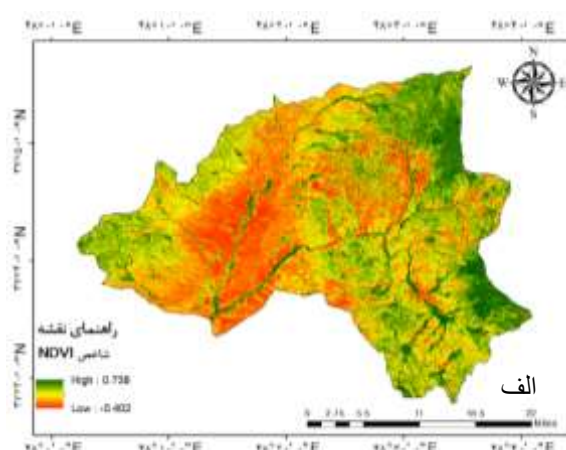
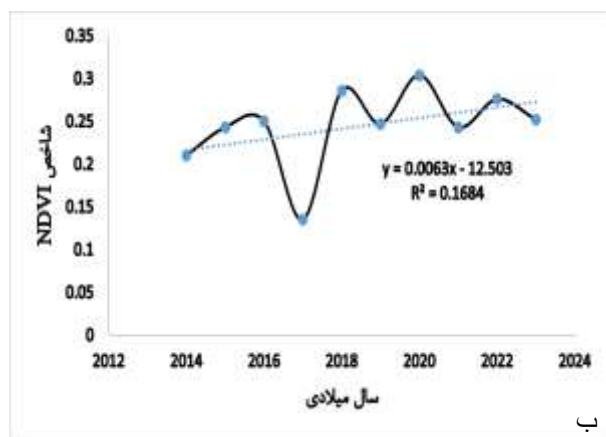
شکل (۵): الف) نقشه شاخص NDBI، ب) روند میانگین شاخص NDBI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

برای بررسی میزان تبخیر تعرق در گیاهان و شناسایی مناطق تحت تنش آبی و غرقابی از شاخص NDLI بهره برده شد که نقشه پهنه‌بندی آن برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ در شکل (۶، الف) نمایش داده شده است. مقادیر مثبت این شاخص با بیشینه ۰/۱۵ در نواحی شرقی حوضه نشان‌دهنده سطح بالای آب موجود در خاک و گیاهان بوده و خاک این نواحی از مقدار رطوبت بیش‌تری برخوردار بوده و اما در نیمه غربی حوضه مقدار این شاخص بسیار پایین بوده و به مقدار ۰/۲۱- رسیده است و این نشان می‌دهد مناطق بیش‌تر تحت تنش خشکی قرار گرفته و عاری از گیاهان بوده است. روند میانگین این شاخص در دوره آماری یادشده نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ از ۰/۰۵۵- تا ۰/۰۳۵- میل صعودی ملایمی داشته و در ادامه حرکت ریزشی ضعیفی را دوباره در پیش گرفته است. با توجه به مقدار دامنه نوسان این شاخص که اغلب منفی بوده می‌توان گفت وضعیت تبخیر تعرق از گیاهان در حوضه مورد مطالعه ضعیف بوده و در حالت کلی نمی‌توان روند خاصی را برای آن متصور شد.



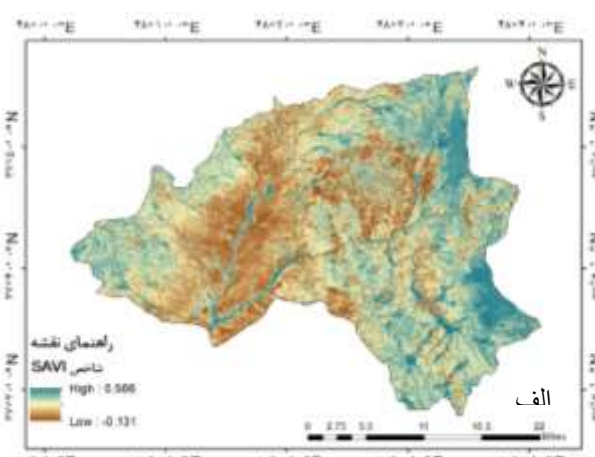
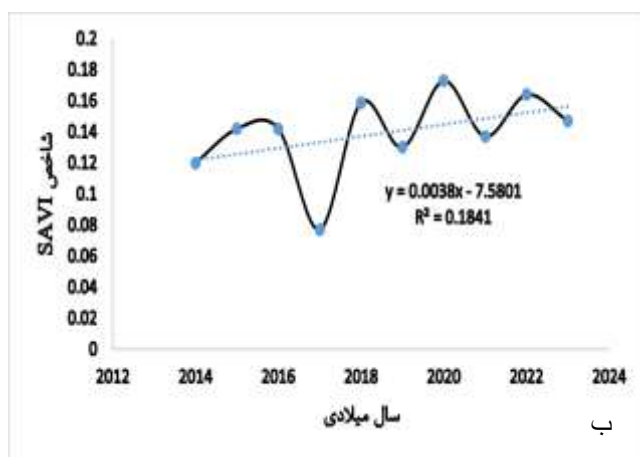
شکل (۶): الف) نقشه شاخص NDLI، ب) روند میانگین شاخص NDLI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

شکل (۷، الف) نمایی از وضعیت تجمع پوشش گیاهی در حوضه آبخیز فیروزآباد را در دوره سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نقشه استنباط می‌شود تجمع پوشش گیاهی در نیمه شرقی حوضه مورد مطالعه بیش‌تر از نواحی مرکزی بوده و بیشینه آن در نوار شرقی به مقدار ۰/۷۳ رسیده است و حاکی از سبزی‌نگی فراوان گیاهان در این مناطق بوده است این وضعیت با نسبت ضعیفی در نوار غربی هم مشاهده می‌شود اما در قسمت‌های مرکزی حوضه به غیر از نواحی دره اکثر مناطق از فقدان پوشش گیاهی رنج برده و مقدار آن به ۰/۴۰- رسیده است. در شکل ب، مشاهده می‌شود در سال‌های اخیر بخصوص از سال ۲۰۱۷ به بعد وضعیت تجمع پوشش گیاهی رو به صعود بوده و بین دامنه ۰/۱ تا ۰/۳ در نوسان بوده است اما شیب کند این حرکت رو به بالا به معنی عدم معناداری این روند می‌باشد.



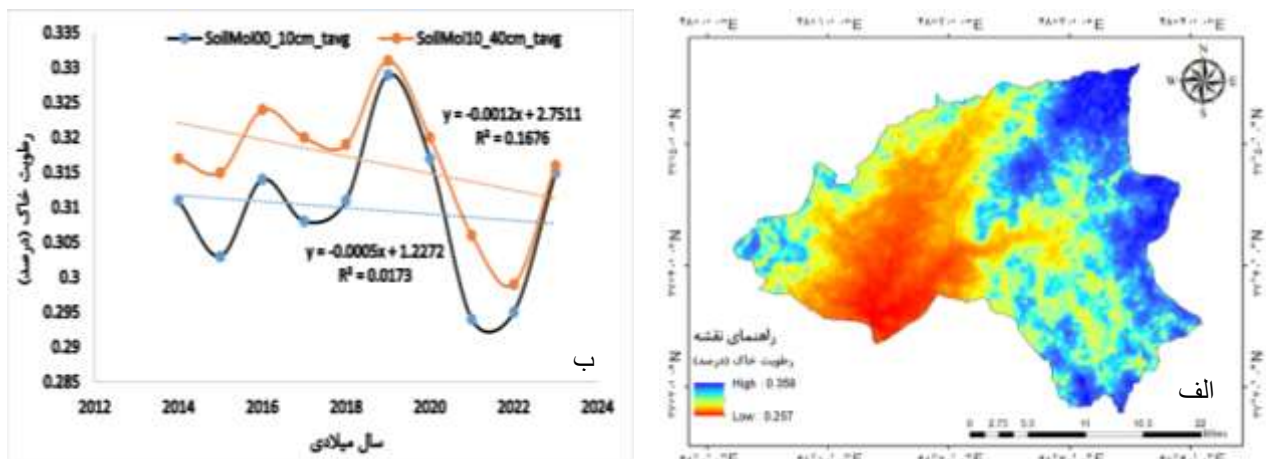
شکل (۷): الف) نقشه شاخص NDVI، ب) روند میانگین شاخص NDVI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

بر اساس شکل (۸، الف)، وضعیت پوشش گیاهی با کاهش اثرات بازتاب خاک (SAVI) برای سال‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است. نتایج پهنه‌بندی این شاخص نشان می‌دهد اکثراً در نوار شرقی حوضه مورد مطالعه درختان و گیاهان که سطح سبز بالایی دارند به وفور مشاهده شده و مقدار این شاخص در این نواحی به بیش‌ترین حد خود (۰/۵۶) رسیده است. اما به سمت نواحی مرکزی حوضه از مقدار این شاخص کاسته شده و مقدار آن به ۰/۱۳- رسیده که حاکی از مناطق با خاک آشکار و خشک و بیابانی بوده است. روند این شاخص نیز همانند شاخص NDVI عمل نموده و نوسان آن بین مقادیر ۰/۰۸ تا ۰/۱۸ بوده و شیب صعودی ضعیف آن بیان‌گر شرایط رو به بهبود تراکم پوشش گیاهی در منطقه بوده است ولی این روند صرفاً یک نوسان اقلیمی بوده و معناداری خاصی را نمی‌توان برای آن متصور شد.



شکل (۸): الف) نقشه شاخص SAVI، ب) روند میانگین شاخص SAVI در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

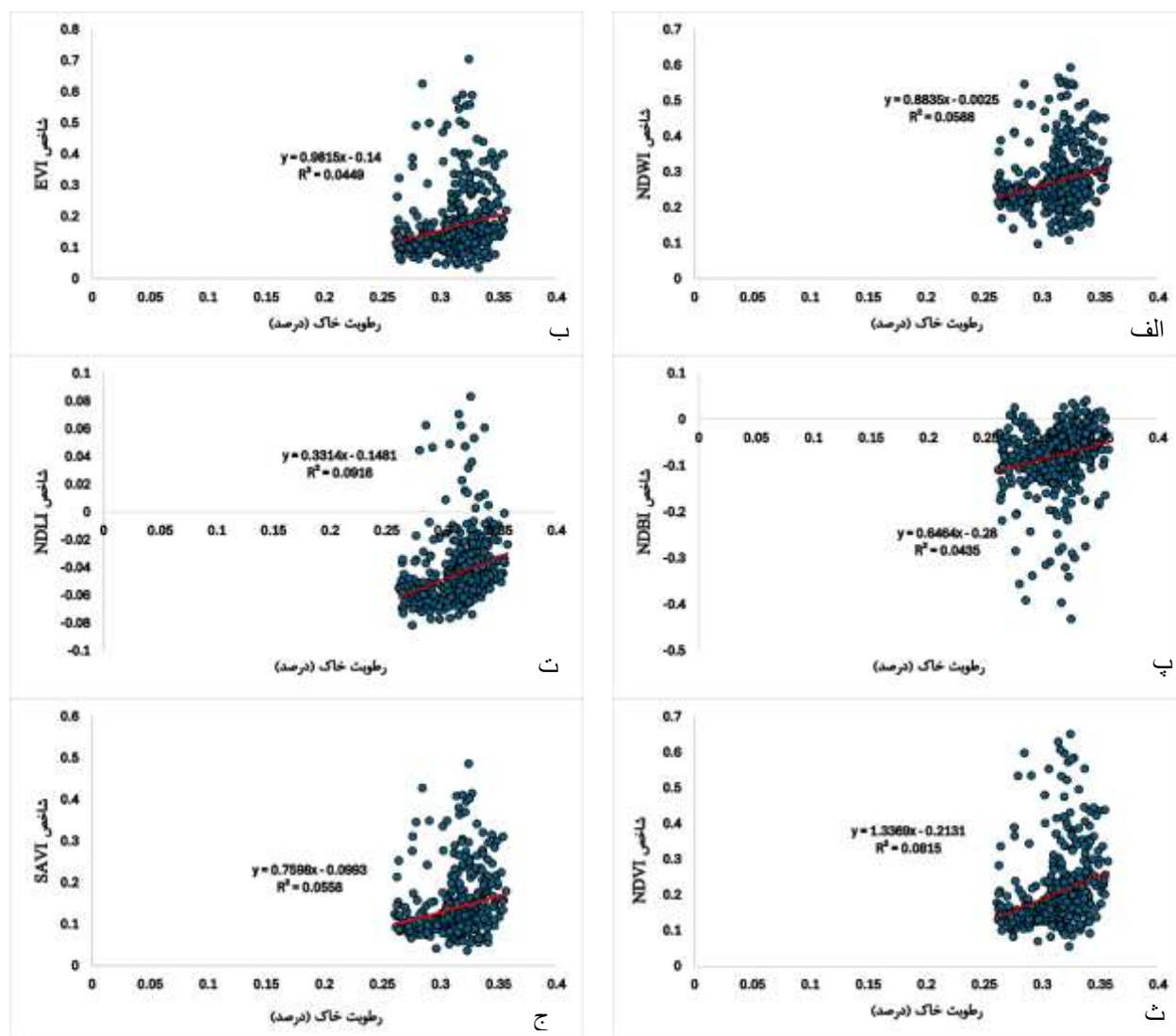
نقشه پهنه‌بندی رطوبت خاک بر حسب درصد از سطح زمین تا عمق ۴۰ سانتی متری در شکل (۹، الف) برای حوضه آبخیز فیروزآباد در طی دوره مورد مطالعه ترسیم گشته است. کاملاً مشخص است که نیمه غربی حوضه مذکور نسبت به نیمه شرقی ۱۰ درصد رطوبت خاک کم‌تری داشته و به سمت جنوب غرب حوضه وضعیت خشکی غالب شده و نمناکی خاک به میزان ۲۵٪ رسیده است این در حالی است که به سمت شرق و شمال شرق حوضه وضعیت بهبود یافته و مشاهده می‌شود در این نواحی در یک متر مکعب از خاک حدود ۳۵٪ آن را رطوبت اشغال نموده و شرایط برای رشد گیاهان و درختان مناسب بوده است. در شکل ب، روند رطوبت خاک تا عمق ۱۰ سانتی متری و از ۱۰ تا ۴۰ سانتی متری نیز نشان داده شده است. هر دو باند روند مشابهی داشته و فقط در دوره‌های خاصی یک درصد از هم اختلاف داشته‌اند. در حالت کلی روند رطوبت خاک در طول دوره مورد مطالعه نوسان شدیدی از سال ۲۰۱۹ به بعد داشته و شیب نزولی ملایمی را تجربه کرده است؛ با این که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ بر میزان رطوبت خاک افزوده شده ولی در ادامه با افت محسوسی که در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ داشته است زنگ خطر برای حادث شدن اقلیم خشک بر منطقه نشان داده است.



شکل (۹): الف) نقشه رطوبت خاک، ب) روند میانگین رطوبت خاک در طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۲۳

در این مطالعه، شکل ۱۰ ضریب تعیین (R^2) و جدول ۲ میزان همبستگی بین رطوبت خاک (متغیر وابسته) و شاخص‌های طیفی مختلف (متغیرهای مستقل) را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که بین رطوبت خاک و تمام شاخص‌های طیفی رابطه‌ای مستقیم و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. از بین شاخص‌ها، NDLI بالاترین ارتباط را با رطوبت خاک نشان می‌دهد؛ ضریب همبستگی آن ۰/۳۰۳ و ضریب تعیین ۰/۰۹۱ است، به این معنا که ۹/۱ درصد از تغییرات رطوبت خاک را توضیح می‌دهد. این شاخص به دلیل حساسیت زیاد به محتوای آب گیاهان، بهترین شاخص برای پیش‌بینی رطوبت خاک در این تحقیق است. NDVI که با سبزی‌نگی و سلامت گیاهان مرتبط است، با ضریب همبستگی ۰/۲۸۵ و ضریب تعیین ۰/۰۸۱، ۸/۱ درصد از واریانس رطوبت خاک را تبیین می‌کند و ارتباط قوی‌تری نسبت به شاخص‌های دیگر دارد. SAVI نیز با ضریب همبستگی ۰/۲۳۶ و ضریب تعیین ۰/۰۸۱، مشابه NDVI عمل می‌کند و ارتباطی متوسط با رطوبت خاک نشان می‌دهد. هرچند، تأکید بیشتر SAVI بر شرایط خاک باعث می‌شود حساسیت آن به رطوبت خاک کمی کمتر از NDVI باشد. NDWI که به رطوبت گیاه و آب‌های سطحی حساس است، دارای ضریب همبستگی ۰/۲۴۲ و ضریب تعیین ۰/۰۵۸ است، و ۵/۸ درصد از تغییرات رطوبت خاک را توضیح می‌دهد، که بیانگر رابطه متوسط این شاخص با رطوبت خاک است. EVI با ضریب همبستگی ۰/۲۱۲ و ضریب تعیین ۰/۰۴۴ تنها ۴/۴ درصد از واریانس رطوبت خاک را تبیین می‌کند که نسبت به سایر شاخص‌ها کمتر است؛ اگرچه این شاخص نیز همبستگی

مثبتی با رطوبت خاک دارد، اما به دلیل تمرکز بر تراکم گیاهان، ارتباط ضعیف‌تری نسبت به NDVI و NDLI دارد. در نهایت، NDBI که برای شناسایی نواحی ساخته شده و مناطق شهری طراحی شده است، کمترین ارتباط را با رطوبت خاک دارد. ضریب همبستگی آن ۰/۲۰۹ و ضریب تعیین ۰/۰۴۳ است که تنها ۴/۳ درصد از واریانس رطوبت خاک را توضیح می‌دهد، که به دلیل تمرکز این شاخص بر نواحی شهری منطقی به نظر می‌رسد و نشانگر ارتباط اندک آن با رطوبت خاک در مناطق پوشش گیاهی است.



شکل (۱۰): ضریب تعیین R^2 ، بین رطوبت خاک و شاخص‌های طیفی

جدول (۲): همبستگی (R)، میان رطوبت خاک و شاخص‌های طیفی

شاخص‌ها	SAVI	NDVI	NDLI	NDBI	NDWI	EVI
رطوبت خاک	۰/۲۳۶**	۰/۲۸۵**	۰/۳۰۳**	۰/۲۰۹**	۰/۲۴۲**	۰/۲۱۲**

** همبستگی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ درصد

نتیجه گیری

در این پژوهش، وضعیت برخی از شاخص های طیفی و ارتباط آن با تغییرات رطوبت خاک در حوضه آبخیز فیروزآباد طی سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نیمه شرقی حوضه، به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و رطوبت بیشتر خاک، شاخص های سبزینگی مانند EVI و NDVI مقادیر بالاتری داشته و روند افزایشی و بهبود پوشش گیاهی را نشان می دهند. این منطقه با خاک مرطوب و حاصلخیز شرایط مناسبی برای رشد گیاهان دارد، در حالی که در بخش های غربی و مرکزی حوضه، پوشش گیاهی پراکنده و رطوبت خاک پایین تر است که نشانه کمبود سبزینگی و تمرکز خاک های خشک و بایر است. شاخص NDWI نشان داد که مناطق با پوشش گیاهی متراکم به دلیل حضور رطوبت کافی، عموماً دارای آب های سطحی کم عمق نیز هستند، که تأثیر مثبتی بر سلامت و رشد گیاهان در این نواحی داشته است. با این حال، کاهش محسوس این شاخص و شاخص های رطوبتی دیگر در سال ۲۰۱۷ به خشکسالی منطقه اشاره دارد، هرچند از سال ۲۰۲۰ به بعد روند بهبودی مشاهده شده است. تحلیل شاخص NDBI نشان می دهد که بخش های مرکزی و غربی منطقه بیشتر بایر هستند و پوشش گیاهی در این نواحی کمتر است، در حالی که نواحی شرقی همچنان بیشترین تراکم و سبزینگی را حفظ کرده اند. نتایج شاخص NDLI نیز نشان داد که میزان رطوبت و سطوح کم عمق آبی در شرق حوضه بیشتر است، اگرچه به طور کلی روند آن در طول دوره مورد مطالعه معنادار نبوده و نوسانات بیشتری را تجربه کرده است. در بررسی همبستگی بین شاخص های طیفی و رطوبت خاک، نتایج نشان داد که شاخص NDLI با ضریب همبستگی ۰/۳۰۳ در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی داری و ضریب تعیین ۰/۰۹۱ بیشترین ارتباط را با رطوبت خاک داشته و ۹/۱ درصد از تغییرات رطوبت خاک را توضیح می دهد. این شاخص به دلیل حساسیت بالا به محتوای آب گیاهان، به عنوان بهترین شاخص برای پیش بینی رطوبت خاک شناسایی شده است. در مقابل، شاخص NDBI که برای شناسایی نواحی بایر و مناطق ساخته شده طراحی شده است، کمترین ارتباط را با رطوبت خاک داشته و با ضریب همبستگی ۰/۲۰۹ درصد و ضریب تعیین ۰/۰۴۳ تنها ۴/۳ درصد از واریانس رطوبت خاک را تبیین می کند.

منابع

- آرمین، محسن و دیگران (۱۳۹۹). اولویت بندی مناطق حساس به فرسایش خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای، مطالعه موردی بخشی از شهرستان بهمنی، کهگیلویه و بویر احمد. پژوهش های فرسایش محیطی. ۱۰ (۲)، ۴۱-۵۸.
- بابازاده، حسین و دیگران (۱۳۹۱). تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی (مطالعه موردی: استان خراسان). تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱۹ (۱)، ۱۳۲-۱۲۰.
- باقری، کیوان و دیگران (۱۳۹۸). برآورد رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور نوریف حرارتی و راداری (مطالعه موردی اراضی جنوب تهران). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۳ (۴۷)، ۶۳-۷۴.
- غلامی بیدخانی، نبی اله؛ مباشری، محمدرضا (۱۳۹۸). توسعه یک مدل رگرسیونی شاخص مینا به منظور برآورد رطوبت سطح خاک از تصاویر MODIS با در نظر گرفتن اثرات بافت خاک. علوم و فنون نقشه برداری. ۹ (۱)، ۱۸۷-۱۷۳.
- سلیمانی، محمدرضا و دیگران (۱۳۸۷). تأثیر کم آبیاری بر عملکرد علوفه دو توده بومی گیاه شورزیست کوشیا در شرایط آبیاری با آب شور. آب و خاک. ۲۶ (۲۲)، ۳۰۷-۳۱۷.
- شاه مرادی، صلاح؛ غفاریان المیری، حمیدرضا؛ شریفی پیچون، محمد (۱۴۰۱). مدل سازی و نقشه برداری شوری و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور طیفی و راداری. تحقیقات کاربردی خاک. ۱۰ (۳)، ۶۵-۴۳.
- صدقت، آزاده و دیگران (۱۴۰۰). استفاده از شاخص های طیفی در برآورد رطوبت سطحی خاک بر اساس الگوریتم یادگیری ماشین. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲ (۱۲)، ۳۰۱۸-۳۰۰۱.

۸. عبادی، الهامه و دیگران (۱۴۰۳). بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تکنیک شی گرا و پیکسل پایه (مطالعه موردی: حوضه فیروزآباد خلخال). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۲۸ (۸۷)، ۲۶۱-۲۷۵.
۹. فرخ‌زاده، بهنوش؛ منصوری، شهرزاد؛ سپهری، عادل (۱۳۹۹). تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI، مراتع دشتی استان گلستان. *نشریه هواشناسی کشاورزی*. ۵ (۲)، ۵۶-۶۵.
۱۰. فیض‌الله‌پور، مهدی (۱۴۰۲). تشخیص تغییرات پهنه آبی تالاب میقان با بهره‌گیری از شاخص‌های طیفی MNDWI، NDWI، AWEI و مدل‌های نظارت شده SVM در بازه زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۱. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. ۱۴ (۵۴)، ۱۱۹-۱۰۴.
۱۱. میری، مرتضی و دیگران (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در برآورد رطوبت خاک منطقه تلو در استان تهران. *پژوهش‌های خاک*. ۳۷ (۴)، ۳۴۳-۳۵۴.

12. Ayehu, G. & et al (2022). Soil moisture monitoring using remote sensing data and a stepwise-cluster prediction model: The case of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*. 11 (2), 125.
13. Chen, Y. et al (2013). Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118, 4466-4475.
14. Escorihuela, M. J. & Quintana-Seguí, P. (2016). Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes. *Remote sensing of environment*. 180, 99-114.
15. Gilabert, M. A. et al (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 82, 303-310.
16. Imran, H.M.; Hossain, A. & Islam, A.K.M.S. (2021). Impact of land cover changes on land surface temperature and human thermal comfort in Dhaka city of Bangladesh. *Earth Syst Environ*. 5, 667-693.
17. Liu, J. & Zhang, H. (2023). Application of NDLI in environmental monitoring. *Journal of Environmental Management*. 300, 113-120.
18. Robinson, D.A. et al (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories. *Vadose Zone Journal*. 7 (1), 358-389.
19. Sanchez R. et al (2022). Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*. 522, 723-783.
20. Wang, L. & Qu, J. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring. *Earth Science*. 3, 237-247.
21. Wang, X. (2005). *Relation Between Ground-Based Soil Moisture and Satellite Image-Based NDVI*. Earth and Environmental Science Department, University of Texas at San Antonio.
22. Xia, L. et al (2023). A comparison of two methods for estimating surface soil moisture based on the triangle model using optical/thermal infrared remote sensing over the source area of the Yellow River. *International Journal of Remote Sensing*. 40 (5-6), 2120-2137.