



## Spatial modeling of soil moisture using OLS and GWR regression models (Case study: Halilrud Watershed)

Shapour Kohestani<sup>1\*</sup>, Fahimeh Mirchooli<sup>2</sup>, Elham Rafiei Sardooi<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Kerman, Iran

2. Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3. Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Kerman, Iran

\* Corresponding author: [shapourkohestani@gmail.com](mailto:shapourkohestani@gmail.com)

(Received: 26 April 2025

Revised: 17 May 2025

Accepted: 21 May 2025)

### Extended Abstract

**Introduction:** Although numerous studies have investigated the relationships between soil moisture and various environmental and climatic variables, the spatial relationship between soil moisture and these variables has not yet been fully identified. This is primarily because traditional statistical methods present parameter values as averages across the study area, thereby ignoring spatial variations in the relationships between soil moisture and independent variables. To overcome this limitation, it is necessary to use an appropriate spatial analysis approach. In this context, spatial statistical methods such as Ordinary Least Squares (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) can be employed to model spatial relationships between different variables. The Halilrud Basin is a key agricultural region in Kerman Province, Iran, with the local economy heavily dependent on crop production. Soil moisture is a critical factor affecting agricultural drought. Therefore, this study aimed to estimate soil moisture in the Halilrud watershed using field observations and laboratory analyses, and to evaluate its spatial relationship with remotely sensed indices—specifically the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST)—using OLS and GWR models.

**Material and Methods:** Soil moisture measurements were taken in the plains of the Halilrud watershed using a TDR device at a depth of 30 cm across 72 sampling points in May 2019. To prepare NDVI and LST maps, Landsat 8 (OLI) and MODIS (MOD11A1) satellite images from May 2019 were acquired and preprocessed. The NDVI and LST indices were then extracted. To assess the spatial relationship between soil moisture and each independent variable (NDVI, LST) as well as their combination, both GWR and OLS regression models were applied.

**Results and Discussion:** The results showed that the GWR model outperformed the OLS model based on evaluation criteria. The GWR model yielded  $R^2$  values of 0.28 for LST, 0.44 for NDVI, and 0.58 when both variables were combined, indicating improved model performance. Additionally, the GWR model demonstrated higher efficiency across all scenarios due to lower AICc values and higher local and adjusted  $R^2$  values. While the OLS model indicated a general correlation between soil moisture and the independent variables, the GWR model revealed that this relationship varies spatially. In particular, the northern regions of the watershed exhibited a stronger correlation between soil moisture and the independent variables. This spatial variability illustrates the advantage of the GWR model, which accounts for local variations in the relationships, unlike the OLS model that assumes a uniform relationship across the study area.

**Conclusion:** The maps generated in this study can be used to identify areas with significant increases or decreases in soil moisture, which is valuable for decision-making, watershed management, and irrigation planning in the agricultural sector. The methodology and objectives applied here can be extended to other watersheds, offering practical and research value. For future studies, it is recommended to include additional independent variables—such as topographic features and other satellite-derived indices—to identify the most influential factors affecting soil moisture.

**Keywords:** Land surface temperature, Soil moisture, Ordinary Least Squares regression, Geographical Weighted regression.

Citation: Kohestani., Sh., Mirchooli, F & Rafiei Sardooi, E. (2026). Spatial modeling of soil moisture using OLS and GWR regression models (Case study: Halilrud Watershed). *Integrated Watershed Management*, 5(4), 54-67. doi= 10.22034/iwm.2025.2058858.1223

### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





## مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک با استفاده از مدل‌های رگرسیون کلی و رگرسیون وزن دار

### جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هلیل‌رود)

شاپور کوهستانی<sup>۱\*</sup>، فهیمه میرچولی<sup>۲</sup>، الهام رفیعی ساردوئی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران.

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [shapourkohestani@gmail.com](mailto:shapourkohestani@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

#### چکیده مبسوط

**مقدمه:** اگرچه مطالعات متعددی به بررسی روابط بین رطوبت خاک و برخی متغیرهای محیط‌زیستی و اقلیمی پرداخته‌اند، اما هنوز تغییرات مکانی ارتباط رطوبت خاک با بسیاری دیگر از متغیرهای محیطی به‌طور کامل مشخص نمی‌باشد؛ زیرا این روش‌های آماری، مقادیر پارامترها را به‌صورت میانگین در سطح منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد و از تغییرات مکانی رابطه بین رطوبت خاک و متغیرهای مستقل چشم‌پوشی می‌کنند. از این‌رو، به‌کارگیری یک رویکرد مناسب برای رفع این محدودیت، ضروری است. در همین راستا، می‌توان روش‌های آمار مکانی برای مدل‌سازی روابط مکانی بین متغیرهای مختلف استفاده کرد. پرکاربردترین روش‌های آمار مکانی می‌توان به روش حداقل مربعات معمولی (OLS) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) اشاره کرد. حوزه آبخیز هلیل‌رود یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی در استان کرمان و ایران بوده و اقتصاد محلی منطقه به آن بستگی دارد. رطوبت یکی از متغیرهایی است که بر خشکسالی کشاورزی تأثیرگذار می‌باشد؛ بنابراین، این پژوهش با هدف برآورد رطوبت خاک در حوزه آبخیز هلیل‌رود با استفاده از بازدید صحرایی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، ارزیابی ارتباط مکانی آن با شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور از جمله شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص دمای سطح زمین (LST) با استفاده از مدل OLS و GWR انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، از دستگاه TDR در مناطق دشتی حوزه آبخیز هلیل‌رود استفاده شد. سنجش رطوبت خاک در ۷۲ نقطه (عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک) و در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ انجام شد. برای تهیه نقشه شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و دمای سطح زمین (LST)، ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۸ (OLI) و مودیس (MOD11A1) منطقه مورد مطالعه مربوط به اردیبهشت ۱۳۹۸ تهیه شد. سپس پیش‌پردازش‌های لازم برای تصاویر مورد نظر انجام و شاخص‌ها استخراج گردید. برای ارزیابی ارتباط مکانی بین رطوبت خاک و هر یک از متغیرهای مستقل و همچنین ترکیب هر دو متغیر از مدل‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی و مدل رگرسیون حداقل مربعات استفاده شد.

**نتایج و بحث:** نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بر اساس معیارهای ارزیابی، مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی با  $R^2=0/28$  برای متغیر مستقل LST،  $R^2=0/44$  برای متغیر مستقل NDVI و  $R^2=0/58$  برای ترکیب هر دو متغیر، دارای قدرت تبیین و برآورد بهتری نسبت به مدل رگرسیون کلی می‌باشد. همچنین مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی در تمامی حالت‌ها و در نظر گرفتن متغیرهای مختلف، به دلیل داشتن مقادیر کمتر AICc و مقادیر بالاتر  $R^2$  و  $R^2$  Adjusted عملکرد بهتری نسبت به مدل حداقل مربعات معمولی داشته است. اگرچه، نتایج مدل حداقل مربعات معمولی نشان داد که همبستگی بین رطوبت خاک و متغیرهای مستقل وجود دارد اما مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی تأیید کرد که این ارتباط در نقاط مختلف، یکسان نمی‌باشد. به‌طوری‌که مناطق شمالی حوزه دارای ارتباط قوی‌تری بین تمامی متغیرهای مستقل و رطوبت خاک می‌باشند. یکی از دلایل برتری مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی می‌تواند این باشد که در مدل رگرسیون حداقل مربعات، رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در کل منطقه یکسان است؛ اما در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی، روابط بین متغیرها در نقاط مختلف منطقه به‌طور جداگانه مدل‌سازی و بررسی می‌شود.

**نتیجه‌گیری:** با استفاده از نقشه‌های حاصل از این مطالعه می‌توان نقاط در معرض کاهش یا افزایش رطوبت خاک را در منطقه شناسایی کرد و برای بهبود فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت حوزه آبخیز و پیش‌بینی نیازهای آبیاری در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار داد. به‌کارگیری روش و هدف مطالعه حاضر در سایر حوزه‌های آبخیز می‌تواند از نظر کاربردی و پژوهشی، اهمیت زیادی داشته باشد. به‌علاوه، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به‌منظور یافتن مهم‌ترین متغیر، برخی دیگر از متغیرهای مستقل از جمله خصوصیات توپوگرافی و نیز دیگر شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** دمای سطح زمین، رطوبت خاک، رگرسیون حداقل مربعات معمولی، رگرسیون وزنی جغرافیایی.

**استناد:** کوهستانی، ش؛ میرچولی، ف و رفیعی ساردوئی، الف. (۱۴۰۴). مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک با استفاده از مدل‌های رگرسیون کلی

و رگرسیون وزن دار جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هلیل‌رود). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۴)، ۵۴-۶۷.

#### حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.



## مقدمه

رطوبت خاک<sup>۱</sup> یکی از متغیرهای مهمی است که بر ابعاد مختلفی از جمله کشاورزی، هیدرولوژیکی، خاک‌شناسی و محیط‌زیستی تأثیرگذار می‌باشد (Fatholouloumi et al., 2020). از بُعد فیزیکی، رطوبت خاک بر خصوصیات هیدرولیکی خاک مؤثر بوده و به نوبه خود اثرات قابل توجهی بر نفوذ، رواناب سطحی و فرآیندهای فرسایش خاک دارد. از دیدگاه زیست‌زمین‌شناسی، رطوبت خاک، فعالیت میکروبی را کنترل می‌کند که خود بر فرآیندهایی نظیر تنفس، جریان CO<sub>2</sub>، معدنی شدن و سایر تبادلات شیمیایی اثرگذار می‌باشد (Zucco et al., 2014). محققان نشان داده‌اند که بازخورد قوی بین خاک و آب و هوای منطقه وجود دارد. در نتیجه تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با دقت بالا درک ما را از آب و هوای منطقه بهبود می‌بخشد (Tabatabaenejad et al., 2019). بطور کلی، رطوبت خاک تحت تاثیر عوامل متعددی از جمله کاربری اراضی، خصوصیات توپوگرافی، پوشش گیاهی، دمای خاک، بارش، دمای هوا و رطوبت نسبی می‌باشد (Felegari et al., 2022; Gemitzi et al., 2024). این خصوصیات در مکان بسیار متنوع‌اند و تغییرات مکانی رطوبت خاک در سطح وسیع به این عوامل وابسته است. اگرچه اخیراً تصاویر سنجنش از دور برآوردهای مناسبی از رطوبت خاک در سطح وسیع انجام داده‌اند اما در حال حاضر هیچ شبکه جهانی منظمی برای پایش رطوبت خاک وجود ندارد. روش‌های میدانی برآورد رطوبت خاک در سطح محلی دقت بالایی دارند اما برای یک منطقه وسیع، بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی مناسب نیستند (Mekonnen, 2009). از مدل‌های مکانی و تصاویر سنجنش از دور می‌توان برای کاهش هزینه‌ها و کاهش زمان‌های بررسی استفاده کرد. برآوردهای رطوبت خاک از اطلاعات مستخرج از تصاویر سنجنش از دور به دلیل

پوشش وسیع می‌تواند شرایط رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک را در بازه‌های زمانی مختلف به صورت بهینه پایش کند (Ahmadi et al., 2022). همچنین با استفاده از متغیرها و مدل‌های مکانی می‌توان رطوبت خاک را برآورد کرد. شناخت و مدل‌سازی متغیرهای دخیل در رطوبت خاک می‌تواند گام اساسی جهت پیش‌بینی‌ها باشد.

در این راستا، پژوهش‌های مختلفی به بررسی توزیع و مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک و بررسی عوامل مؤثر بر آن پرداخته‌اند (Xu et al., 2021; Rash et al., 2024). Niu و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک در چین به این نتیجه رسیدند که کاربری اراضی مهم‌ترین عامل مؤثر بر آن است که از طریق تبخیر و تعرق، سرعت نفوذ و رواناب تأثیر می‌گذارد. تحقیق Yoshioka و همکاران (۲۰۱۷) در ژاپن نیز نشان داد که رطوبت و دمای خاک با یکدیگر ارتباط داشته و رطوبت خاک متأثر از آب نفوذ یافته باران است. دمای سطحی خاک، میزان بارندگی و دمای هوا از جمله خصوصیات مؤثر و مورد بررسی در روش‌های برآورد رطوبت خاک هستند.

Malekinejad و همکاران (۲۰۲۴) در دشت جیرفت به ارزیابی توزیع مکانی و برآورد رطوبت سطحی خاک براساس شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین به دست آمده از تصاویر مودیس، پرداختند. آن‌ها از مدل حداقل مربعات معمولی<sup>۲</sup> (OLS) برای برآورد رطوبت خاک استفاده کردند. نتایج رگرسیون حاکی از ضریب تبیین  $R^2=0/78$  بود که نشان می‌دهد که شاخص‌های تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI<sup>۳</sup>) و دمای سطح زمین (LST<sup>۴</sup>) دارای ارتباط خوب و معنی‌داری با رطوبت خاک سطحی می‌باشند. اگرچه این مطالعات به بررسی روابط بین رطوبت خاک و برخی متغیرهای محیط‌زیستی و اقلیمی پرداخته‌اند؛

3. Normalized difference vegetation index  
4. Land surface temperature

1. Soil Moisture  
2. Ordinary Least Squares (OLS)

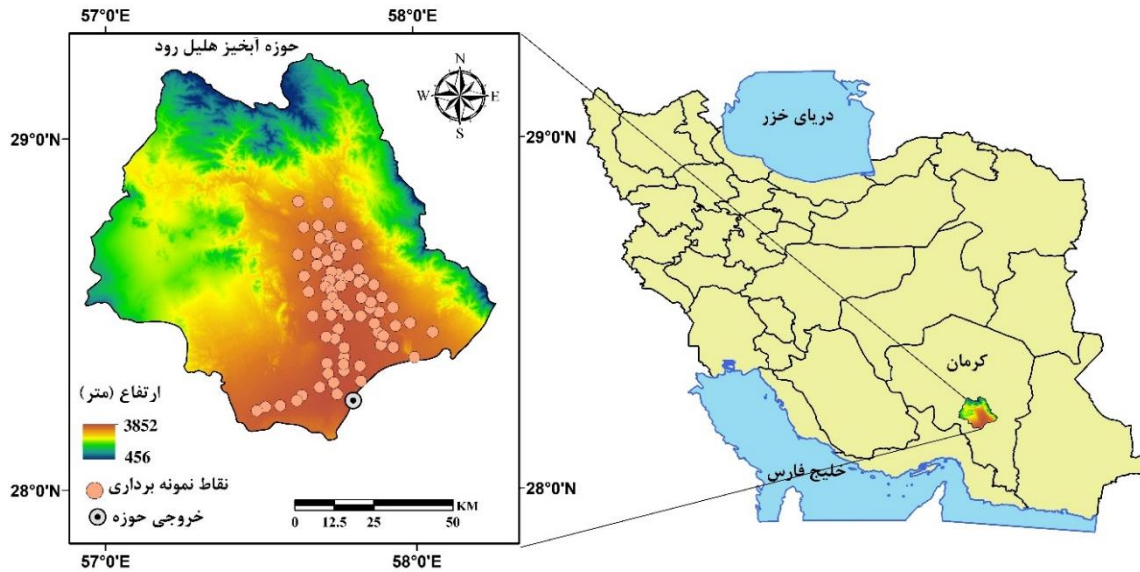
حوزه آبخیز هلیل‌رود یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی در استان کرمان و ایران بوده و اقتصاد محلی منطقه به آن بستگی دارد. رطوبت یکی از متغیرهایی است که بر خشکسالی کشاورزی تأثیرگذار می‌باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف برآورد رطوبت خاک در حوزه آبخیز هلیل‌رود با استفاده از بازدید صحرایی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، ارزیابی ارتباط مکانی آن با شاخص‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور از جمله شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و شاخص دمای سطح زمین با استفاده از مدل OLS و GWR انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، حوزه آبخیز هلیل‌رود که در جنوب‌شرقی ایران در استان کرمان قرار دارد به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد (شکل ۱). این حوضه با مساحت ۹۲۰۴/۱۳ کیلومترمربع، از شاخه‌های حوزه آبخیز جازموریان است و آب سطحی را برای فعالیت‌های کشاورزی و تالاب جازموریان فراهم می‌کند. ارتفاع این منطقه از ۴۵۶ متر تا ۳۸۵۲ متر بالاتر از سطح دریا است. قسمت‌های بالایی و میانی حوضه شامل مناطق کوهستانی و قسمت‌های پایین‌دست مسطح و هموار می‌باشند. متوسط بارندگی سالانه منطقه از ۱۵۵/۱ تا ۴۲۵/۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه منطقه از ۱۶/۷ تا ۲۵/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک است. پوشش گیاهی منطقه شامل اراضی باغی، اراضی زراعی و مرتع می‌باشد. این حوضه یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی در ایران است و اقتصاد محلی منطقه به آن بستگی دارد (Rafiei-Sardooie et al., 2022).

اما هنوز تغییرات مکانی ارتباط رطوبت خاک با متغیرهای موثر بر آن به‌طور کامل مشخص نمی‌باشد. زیرا اکثر این مطالعات، از روش‌های آمار کلاسیک و نیز الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی و تجزیه و تحلیل روابط متغیرهای موردنظر استفاده کرده‌اند. این در صورتی است که این روش‌های آماری، مقادیر پارامترها را به‌صورت میانگین در سطح منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد و از تغییرات مکانی رابطه بین رطوبت خاک و متغیرهای مستقل چشم‌پوشی می‌کند. از این‌رو، به‌کارگیری یک رویکرد مناسب برای رفع این محدودیت، ضروری است. در همین‌راستا، می‌توان روش‌های آمار مکانی برای مدل‌سازی روابط مکانی بین متغیرهای مختلف استفاده کرد (Zhao et al., 2018). از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های آمار مکانی می‌توان به مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی<sup>۱</sup> (GWR) اشاره کرد که امکان ارزیابی و تجزیه و تحلیل تغییرات ناهمگنی روابط مکانی بین متغیرهای مستقل و وابسته را فراهم کرده و تغییرات مکانی رابطه بین رطوبت خاک و متغیرهای مستقل را در نظر می‌گیرد (Mirchooli et al., 2020a). این مدل از مکان و محیط، مجاورت، فاصله، جهت‌گیری و روابط مکانی به‌طور مستقیم در محاسبات خود استفاده می‌کند. با مرور مطالعات گذشته مشخص می‌شود که روش GWR در مطالعات رطوبت خاک کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است. اگرچه از این روش در سایر موضوعات محیط‌زیستی از جمله کربن آلی خاک (Mirchooli et al., 2020a)، دمای سطح زمین (al., 2020a) و فرسایش خاک (Wen, 2020) استفاده شده است. اما استفاده از این مدل، در ارزیابی تغییرات ارتباط مکانی رطوبت خاک با متغیرهای محیط‌زیستی و سنجش‌ازدوری کم‌تر موردتوجه قرار گرفته است.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوزه آبخیز هلیلرود در استان کرمان و ایران  
Figure 1- Location of Halilrud watershed in Kerman Province, Iran

شد. قبل از کارگذاری حس‌گرهای رطوبت‌سنج در داخل خاک، به‌منظور واسنجی دستگاه، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال یافت. این دستگاه امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک را به‌صورت حجمی (سانتی‌متر مکعب آب در سانتی‌متر مکعب خاک) فراهم می‌کند (Rezaei, 2009). شکل (۲) نمونه‌برداری خاک و انجام مراحل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

#### برداشت داده‌های رطوبت خاک

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، از دستگاه TDR<sup>۱</sup> (انعکاس‌سنج زمانی) مدل IDRG SMS-T2 در مناطق دشتی حوزه آبخیز هلیلرود استفاده شد. سنجش رطوبت خاک در ۷۲ نقطه حوزه آبخیز هلیلرود، عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک و در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ انجام



شکل ۲- تصاویری از نمونه‌برداری خاک و انجام مراحل آزمایشگاهی  
Figure 2- Images of soil sampling and laboratory procedures

که در آن  $Y_i$  متغیر وابسته،  $b_0$  عرض از مبدأ،  $b_k$  ضرایب برآورد شده برای متغیرهای مستقل  $X_k$ ،  $n$  تعداد متغیرهای مستقل و  $\varepsilon$  جزء خطا می‌باشد. براساس این رابطه، متغیر پاسخ، رطوبت خاک است که ممکن است به  $n$  متغیر مستقل دیگر وابسته باشد. رگرسیون وزن دار جغرافیایی: همان‌طور که قبلاً گفته شد، روش‌های رگرسیون کلاسیک، برای متغیرهای وابسته و مستقل، میانگینی از داده‌ها را ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر، برای کل داده‌ها، یک خط رگرسیونی کلی را برازش می‌دهد. در مقابل، مدل رگرسیون وزن دار جغرافیایی برای محاسبه نایستایی مکانی در روابط داده‌ها مطرح شده است. نایستایی مکانی بیان‌گر وضعیتی است که در مناطق مختلف، رابطه متفاوتی بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار می‌باشد. روش GWR همان روش OLS است با این تفاوت که مشاهدات براساس موقعیت قرارگیری نسبت به موقعیت مرجع، وزن‌دهی می‌شوند. به عبارت دیگر، این نوع رگرسیون به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (de Almeida Salles *et al.*, 2018):

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} \quad (3)$$

که در آن  $(\mu_i, v_i)$  نشان‌دهنده مختصات نقاط،  $\beta_0(\mu_i, v_i)$  عرض از مبدأ برای موقعیت مکانی  $i$ ،  $\beta_k(\mu_i, v_i)$  پارامترهای محلی برآورد شده برای متغیر مستقل  $X_{ik}$  در موقعیت مکانی  $i$  می‌باشد. برای تخمین پارامترها در هر نقطه در مدل GWR، داده‌ها و مشاهدات نزدیک به آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، مشاهدات نزدیک‌تر دارای تأثیر بیشتری در مقایسه با مشاهدات دورتر برای برآورد محلی پارامترها می‌باشد. پارامترها در این مدل با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:

$$\hat{\beta}(\mu, v) = (X^T W(\mu, v) X)^{-1} X^T W(\mu, v) y, \quad (4)$$

که در آن،  $\hat{\beta}(\mu_i, v_i)$  نشان‌دهنده برآورد خطا از  $\beta$ ،  $w(\mu, v)$  همان ماتریس وزن‌دهی مشاهدات می‌باشد (Gao & Li., 2011). در این مطالعه، برای بررسی عملکرد مدل‌های OLS و GWR از Adjusted، AICc

### تهیه نقشه شاخص‌های مؤثر بر رطوبت خاک

شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI): برای تهیه این شاخص، ابتدا تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ منطقه مربوط به اردیبهشت ۱۳۹۸ از آرشیو داده‌های ماهواره لندست OLI تهیه شد. سپس پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات رادیومتری و اتمسفری برای تصویر موردنظر انجام شد. سپس با استفاده از رابطه (۱) شاخص گیاهی محاسبه شد (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED}} \quad (1)$$

که در آن  $P_{RED}$  باند قرمز و  $P_{NIR}$  باند مادون قرمز نزدیک است.

شاخص دمای سطح زمین (LST):

در این مطالعه جهت تهیه نقشه دمای سطح زمین از محصول MODIS MOD11A1 مربوط به اردیبهشت ۱۳۹۸ با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر استفاده گردید. شکل ۳ توزیع مکانی شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) در حوزه آبخیز هلیل‌رود را نشان می‌دهد.

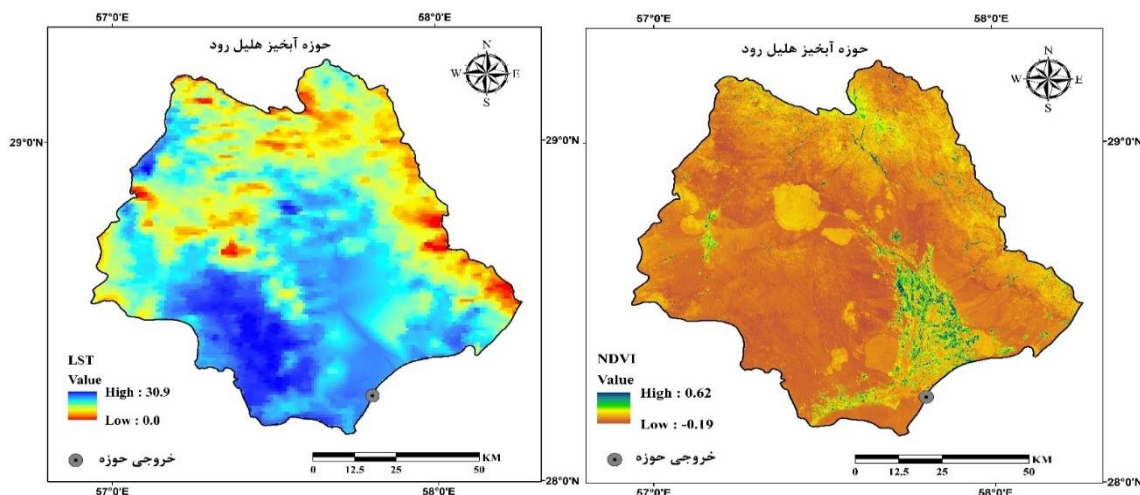
### ارتباط مکانی رطوبت خاک و شاخص‌های محیط‌زیستی

رگرسیون حداقل مربعات معمولی: این نوع رگرسیون، نوعی رگرسیون خطی است که برای پیش‌بینی کلی یا مدل‌سازی متغیر وابسته (در این مطالعه رطوبت خاک) با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل می‌باشد. فرض اصلی در این نوع رگرسیونی، ثابت در نظر گرفتن روابط و ضرایب رگرسیون در کل منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به عبارت دیگر، نوع رابطه متغیرها با ارائه یک مدل رگرسیونی برای کل منطقه مشخص می‌شود. رابطه رگرسیونی در این مدل به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود (Fotheringham *et al.*, 2002):

$$R_i = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k x_k + \varepsilon_k \quad (2)$$

مناسب بودن برازش مدل را نشان می‌دهد که ارزش آن از صفر تا یک متغیر می‌باشد. Adjusted  $R^2$  نیز همان  $R^2$  نرمال شده است که مدل واقعی‌تری را از برازش‌ها نشان می‌دهد. مقادیر این معیار معمولاً کم‌تر از  $R^2$  می‌باشد.

$R^2$  و  $R^2$  استفاده شد. AICc همان معیار اطلاعاتی تصحیح شده<sup>۱</sup> است که عملکرد مدل‌ها را نشان می‌دهد و برای مقایسه مدل‌های رگرسیونی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع، مقادیر کم‌تر این معیار، نشان‌دهنده برازش مناسب داده‌های مشاهداتی و عملکرد بهتر مدل می‌باشد (Gao & Li., 2011).



شکل ۳- توزیع مکانی شاخص NDVI و LST در حوزه آبخیز هلیل‌رود

Figure 3- Spatial distribution of NDVI and LST in the Halilrud watershed

مربعات معمولی (OLS) رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته در کل منطقه یکسان است. اما در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) روابط بین متغیرها در نقاط مختلف منطقه به‌طور جداگانه مدل‌سازی و بررسی می‌شود.

از میان حالت‌های مورد بررسی، حالت سوم یعنی ارتباط بین رطوبت خاک و ترکیب هر دو متغیر NDVI و LST دارای بیش‌ترین مقدار  $R^2$  و بالاترین دقت می‌باشد. به عبارت دیگر، در این حالت، در مدل GWR، ۵۳ درصد و در مدل OLS، ۲۸ درصد از تغییرات واریانس توضیح داده می‌شود. در این حالت، شاخص تورم واریانس (VIF) کم‌تر از ۷/۵ بوده که نشان‌دهنده عدم وجود هم‌خطی بین NDVI و LST می‌باشد. به علاوه، آماره Jarque-Bera برای تمام حالت‌های مورد بررسی، معنی‌دار نشده است که بیان‌گر عدم توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها می‌باشد. توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها

## نتایج و بحث

### عملکرد مدل‌های OLS و GWR

مقادیر معیارهای ارزیابی برای مدل‌های OLS و GWR و متغیرهای NDVI، LST در قالب حالت ۱ و ۲ و ترکیب هر دو این متغیرها در حالت مدل ۳ در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین شکل (۴) نمودار پراکندگی رطوبت خاک پیش‌بینی شده توسط مدل‌های OLS و GWR را نشان می‌دهد. جدول (۱) نشان می‌دهد که مدل‌های GWR در تمامی حالت‌ها و در نظر گرفتن متغیرهای مختلف، به دلیل داشتن مقادیر کم‌تر AICc و مقادیر بالاتر  $R^2$  و Adjusted  $R^2$  عملکرد بهتری نسبت به مدل OLS داشته است. مقایسه این معیارها و عملکرد بهتر مدل GWR توسط پژوهش‌گران دیگر نیز تأیید شده است (Zhao et al., 2018; Li et al., 2022). یکی از دلایل برتری مدل GWR می‌تواند این باشد که در مدل رگرسیون حداقل

1. Corrected Akaike's Information Criterion

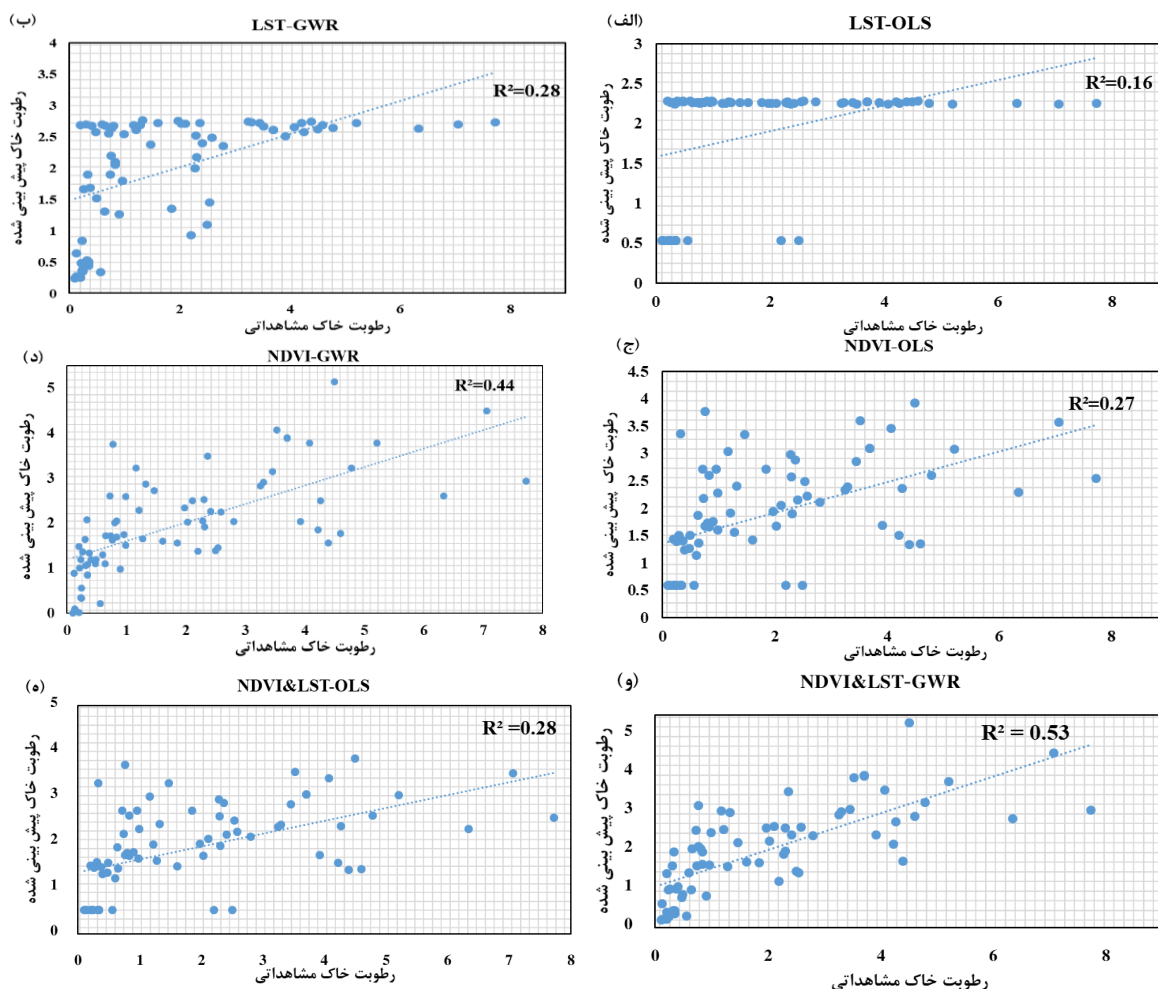
استفاده از شاخص‌های گیاهی مانند NDVI به‌تنهایی رابطه قوی با رطوبت سطحی نداشت که می‌تواند به دلیل پاسخ تاخیری پوشش گیاهی به تغییرات رژیم رطوبتی خاک باشد (Wang *et al.*, 2001). با توجه به نتایج، در این مطالعه، با دخالت شاخص دمای سطح زمین و ترکیب آن با شاخص پوشش گیاهی، رطوبت خاک توسط مدل‌ها دقیق‌تر پیش‌بینی گردید.

نشان‌دهنده خطای مدل و نیز مفقود بودن متغیرهای مهم مستقل، می‌باشد (Shrestha & Luo, 2017). شماری از پژوهش‌گران استفاده ترکیبی از اطلاعات ماهواره‌ای دمای سطح زمین (LST) و شاخصهای گیاهی را در برآورد رطوبت خاک پیشنهاد کردند و باور دارند که ترکیب این داده‌ها می‌تواند اطلاعات بهتری از تنش‌های گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین فراهم آورد (Cibula *et al.*, 1992). بر طبق نتایج

جدول ۱- نتایج مدل‌های OLS و GWR با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف

Table 1- Results of OLS and GWR models considering different variables

Adjusted R <sup>2</sup>		R <sup>2</sup>		AIC		متغیر مستقل	حالت
GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS		
0.21	0.14	0.28	0.16	284.9	288.7	LST	1
0.37	0.26	0.44	0.27	269.1	277.4	NDVI	2
0.42	0.26	0.53	0.28	268.3	279.5	LST-NDVI	3



شکل ۴- نمودار پراکندگی رطوبت خاک پیش‌بینی شده توسط مدل‌های OLS و GWR  
Figure 4- Scatter plot of predicted soil moisture using OLS and GWR models.

## مقایسه خودهمبستگی مکانی باقی‌مانده‌ها در مدل‌های OLS و GWR

خودهمبستگی در واقع یک داده بوم‌شناختی است که نشان‌دهنده عدم وجود استقلال بین مشاهدات مورد بررسی می‌باشد. برای مقایسه توانایی دو مدل OLS و GWR با مسئله خودهمبستگی، از Moran's I استفاده شد. نتایج حاصل از شاخص Moran's I بر روی باقی‌مانده‌های مدل‌های OLS و GWR در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، خودهمبستگی مکانی در تمامی

حالت‌ها برای مدل OLS در مقایسه با مدل GWR بیش‌تر می‌باشد. به طوری که مقادیر شاخص Moran's I برای مدل OLS، ۰/۱۴، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ بوده و برای مدل GWR از ۰/۰۱ تا ۰/۱۶ می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده آن است که مدل GWR با کاهش دادن خودهمبستگی مکانی باقی‌مانده‌ها، اعتبار روابط بین متغیرهای مورد بررسی را بهبود می‌بخشد؛ بنابراین چنانچه در مدل‌های OLS مشکل خودهمبستگی مکانی وجود داشت، کاربرد مدل GWR برای رفع آن، مؤثر خواهد بود.

جدول ۲- مقایسه Moran's I باقی‌مانده‌ها در مدل OLS و GWR

Table 2- Comparison of Moran's I residuals in OLS and GWR models

حالت	متغیر مستقل	Moran's I	
		OLS	GWR
1	LST	0.20	0.09
2	NDVI	0.14	0.02
3	LST-NDVI	0.14	0.01

## تغییرات مکانی روابط بین رطوبت خاک با متغیرهای مورد بررسی

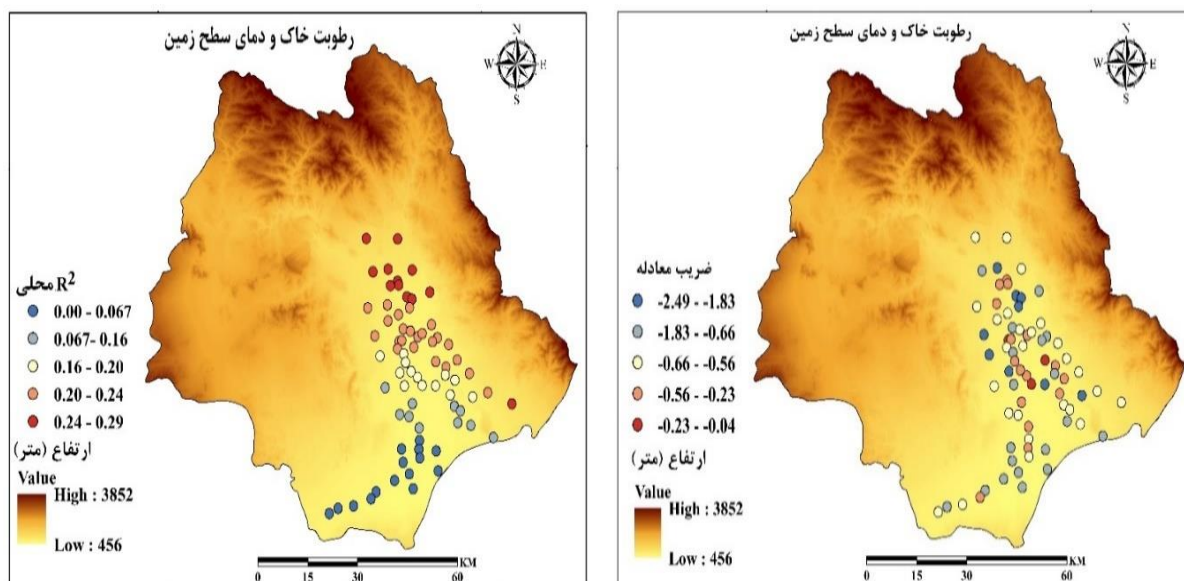
نقشه‌های مربوط به فاکتورهای  $R^2$  محلی و نیز ضریب  $\beta$  مربوط به حالت‌های ۱، ۲ و ۳ که حاصل از اجرای مدل GWR می‌باشند، راه مناسبی برای شناسایی تغییرات ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین می‌باشد. مدل‌های GWR معادله‌های رگرسیونی محلی را همراه با پارامترهای آن، ارائه می‌دهد. مقدار باقی‌مانده که در واقع تفاضل ارزش‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس شکل ۵،  $R^2$  محلی مربوط به ارتباط بین LST و رطوبت خاک از ۰ تا ۰/۲۹ متغیر می‌باشد که بهترین مدل برازش داده شده با داده‌های مشاهداتی در مناطق شمالی حوزه با  $R^2$  محلی بین ۰/۲۴ تا ۰/۲۹ واقع هستند. در مقابل، ضعیف‌ترین مدل مربوط به نقاط جنوبی حوضه با  $R^2$  محلی ۰ تا ۰/۰۷ می‌باشد. ارتباط رطوبت خاک و LST توسط محققان دیگر از جمله Fathololoumi و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأیید شده است. ایشان دلیل این

ارتباط را کاهش بازتاب در مادون قرمز نزدیک موج مرئی با افزایش رطوبت خاک، مطرح کرده است. همچنین در پژوهشی دیگر دلیل این ارتباط را تأثیر رطوبت خاک بر ضریب گسیل‌مندی مطرح کرده‌اند (Harti *et al.*, 2016). به‌طور کلی، رطوبت خاک با LST در تمامی نقاط مطالعاتی، همبستگی منفی دارد. به‌علاوه، ضرایب رگرسیونی در موقعیت‌های مکانی مختلف، متفاوت می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که رطوبت خاک در موقعیت‌های مکانی متفاوت، متغیر می‌باشد. همچنین، این نقشه مؤید تغییرات متغیر مستقل مورد بررسی (LST) در نقاط مختلف رطوبتی می‌باشد. در همین راستا، Wang و همکاران (۲۰۱۸) نتایج مشابهی را در بررسی کربن آلی خاک به‌دست آوردند.  $R^2$  محلی برای ارتباط مکانی NDVI و رطوبت خاک بین ۰/۰۱ تا ۰/۷۳ متغیر می‌باشد. مقادیر بالای این فاکتور نشان‌دهنده مناسب بودن رابطه رگرسیون محلی برازش داده شده با مشاهدات می‌باشد. ارتباط بین NDVI و رطوبت خاک نیز توسط محققان دیگر (Zhang *et al.*, 2018) مورد تأیید قرار گرفته

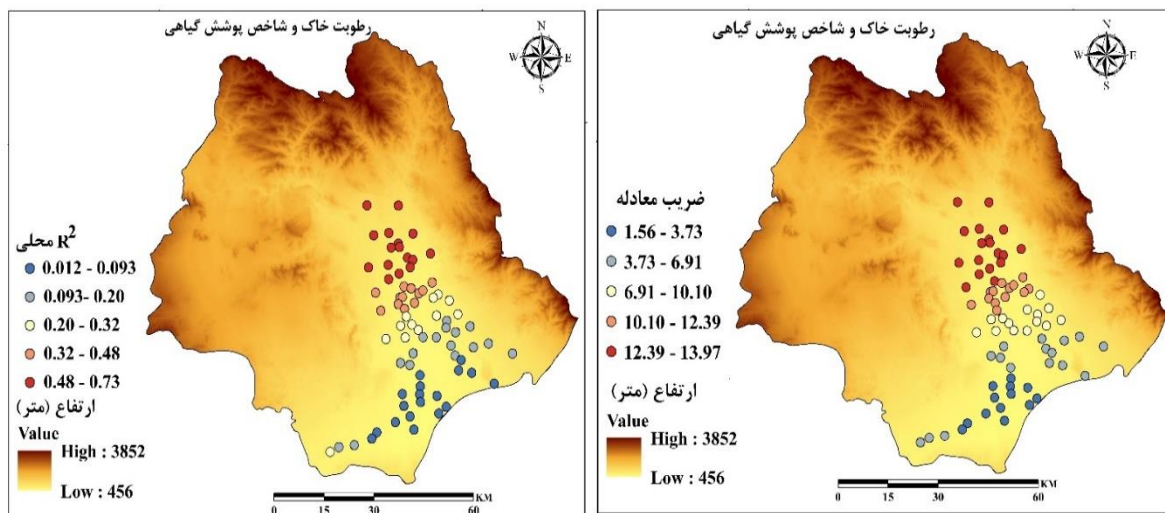
این مناطق، تغییرات مکانی رطوبت خاک نسبت به دو حالت قبل بیش‌تر بوده و از ۰/۵۶ تا ۰/۷۸ متغیر می‌باشد. بنابراین تمامی نتایج مربوط به توزیع مکانی  $R^2$  محلی، فرضیه تغییرات مکانی ارتباط بین متغیرهای NDVI، LST و ترکیب این دو متغیر با رطوبت خاک را تأیید می‌کنند.

در مناطق خشک انتظار می‌رود که رابطه‌ای منفی بین NDVI و LST وجود داشته باشد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش دمای سطح زمین برای مناطق با پوشش گیاهی کم و NDVI پایین باشد (Hou et al., 2015). این امر منجر به یک فضای مثلثی می‌شود که برای استخراج وضعیت رطوبت سطحی خاک مورد بررسی قرار گرفته است (Gao, 2007). با افزایش دما تبخیر و تعرق بالا رفته و رطوبت خاک کاهش می‌یابد. بنابراین بر فعالیت‌های زیستی و متابولیکی گیاه اثرگذار خواهد بود که به تبع آن تولید محصول و تراکم پوشش گیاهی نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Van de Griend & Engman, 1985). از این رو ضرایب معادله برای شاخص LST منفی و برای شاخص NDVI مثبت به دست آمد.

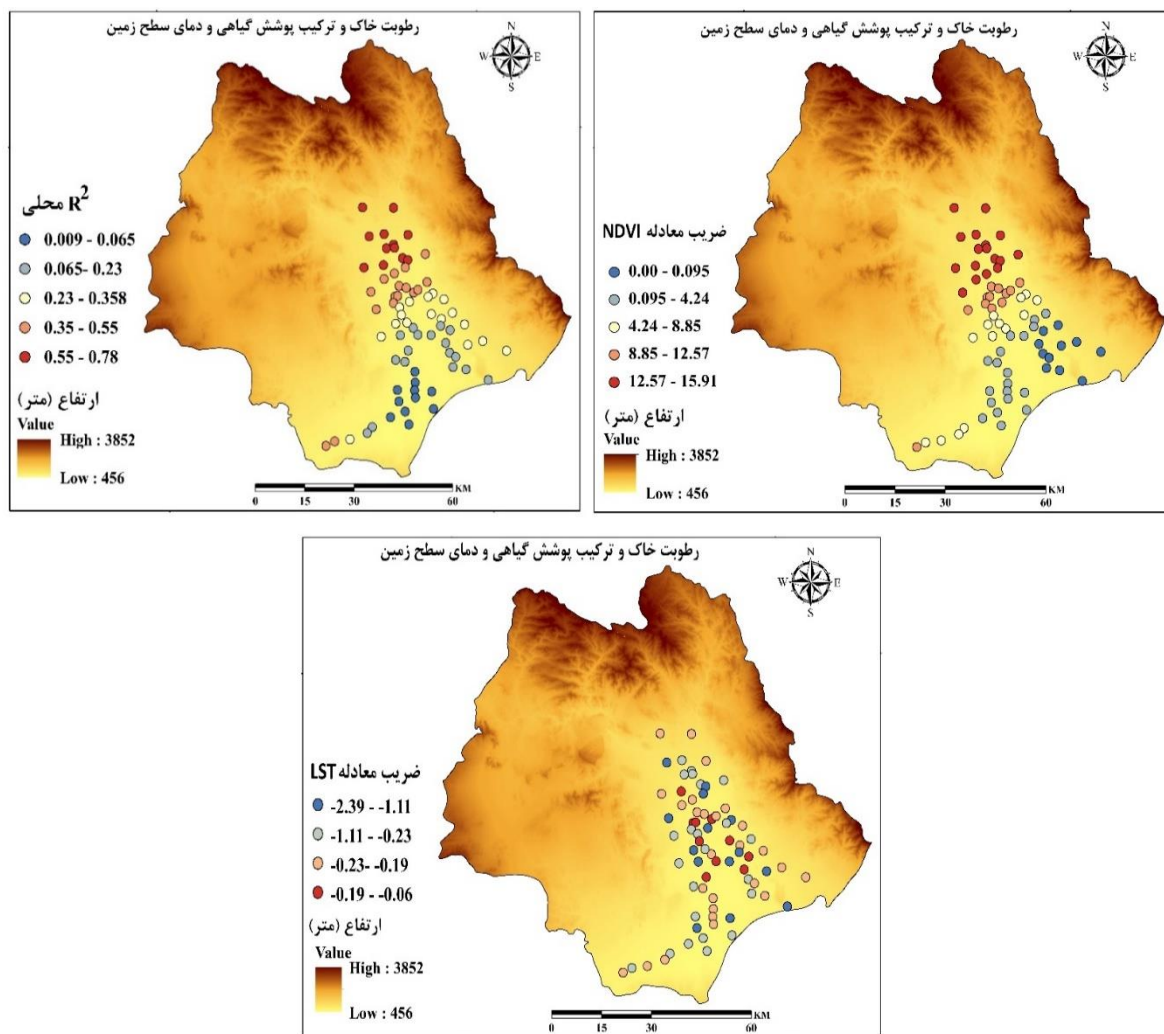
است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نقاط واقع در مناطق شمالی حوزه دارای ارتباط مکانی بالاتری با NDVI می‌باشند که این ارتباط از شمال به جنوب حوضه، به تدریج کاهش می‌یابد. اکثر نقاطی که دارای ارتباط مکانی بالایی بین رطوبت خاک و NDVI هستند، در مراتع واقع شده‌اند. در مقابل، نقاط با همبستگی کم‌تر (نقاط جنوبی حوضه) در اراضی کشاورزی قرار دارند. به علاوه، ضریب معادله‌های رگرسیونی در تمامی نقاط مورد بررسی، مثبت می‌باشد که نشان‌دهنده ارتباط مثبت شاخص پوشش گیاهی با رطوبت خاک می‌شود. این نتیجه با یافته‌های سایر پژوهش‌گران (Zhao et al., 2018) مبنی بر تأثیر مثبت پوشش گیاهی بر رطوبت خاک هم‌راستا می‌باشد. همچنین، اگرچه این ارتباط مثبت، بین رطوبت خاک و LST در شکل ۵ نیز مشاهده شد؛ اما دامنه تغییرات ضریب رگرسیونی در مورد NDVI بسیار بیش‌تر (۱/۵۶ تا ۱۳/۹۷) می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که رطوبت خاک به شاخص NDVI حساس‌تر است. در همین راستا، Hou و همکاران (۲۰۱۵) نتایج مشابهی را در ارزیابی ارتباط NDVI و دما به دست آوردند. در شکل ۷، همانند دو حالت قبل، مناطق شمالی حوضه دارای  $R^2$  محلی بالاتری می‌باشند. با این تفاوت که در



شکل ۵-  $R^2$  محلی و ضریب معادله حاصل از مدل GWR برای ارتباط مکانی رطوبت خاک و دمای سطح زمین  
 Figure 5- Local  $R^2$  and equation coefficient obtained from the GWR model for the spatial relationship between soil moisture and LST



شکل ۶-  $R^2$  محلی و ضریب معادله حاصل از مدل GWR برای ارتباط مکانی رطوبت خاک و پوشش گیاهی  
 Figure 6- Local  $R^2$  and equation coefficient obtained from the GWR model for the spatial relationship between soil moisture and NDVI



شکل ۷-  $R^2$  محلی و ضریب معادله حاصل از مدل GWR برای ارتباط مکانی رطوبت خاک و ترکیب دمای سطح زمین و پوشش گیاهی

Figure 7- Local  $R^2$  and equation coefficient obtained from the GWR model for the spatial relationship between soil moisture and the combination of LST and NDVI

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که تمامی مدل‌های GWR عملکرد بهتری از نظر  $R^2$ ، AICc و Adjusted  $R^2$  نسبت به مدل OLS متناظر خود دارند. اگرچه، مدل OLS نشان داد که همبستگی بین رطوبت خاک و متغیرهای مستقل وجود دارد اما مدل GWR تأیید کرد که این ارتباط در نقاط مختلف، یکسان نمی‌باشد. به طوری که مناطق شمالی حوضه دارای ارتباط قوی‌تری بین تمامی متغیرهای مستقل و رطوبت خاک می‌باشند.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از نقشه‌های حاصل از این مطالعه می‌توان نقاط در معرض

کاهش یا افزایش رطوبت خاک را در منطقه شناسایی کرد و برای بهبود فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت حوزه آبخیز و پیش‌بینی نیازهای آبیاری در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار داد. به کارگیری روش و هدف مطالعه حاضر در سایر حوزه‌های آبخیز از نظر کاربردی و پژوهشی، اهمیت زیادی دارد. به علاوه، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به منظور یافتن مهم‌ترین متغیر، برخی دیگر از متغیرهای مستقل از جمله خصوصیات توپوگرافی و نیز دیگر شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که از روش‌های جدیدتر مانند روش رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی (MGWR) در مطالعات آینده استفاده گردد.

## References

- Ahmadi, M., Kamangar, M., Molanazar, G., & Madani, B. (2022). Evaluation of OLS regression models and GWR regression for modeling Spatial Soil Moisture, Case Study: Fars Province. *Journal of Environmental Studies*, 48(3), 403-418. <https://doi.org/10.22059/jes.2022.344444.1008329> (In Persian)
- Cibula, W.G., Zetka, E.F., & Rickman., D.L. (1992). Response of thematic mapper bands to plant water stress. *Inter. J. Rem. Sens.* 13(10), 1869-1880. <https://doi.org/10.1080/01431169208904236>
- Eghtedarnezhad, M., Malekinezhad, H., & Rafiei Sardooi, E. (2024). Soil moisture estimation based on MODIS NDVI and LST productions in areas with no data. *Environmental Erosion Research Journal*, 14 (2), 141-160. <https://doi.org/10.61186/jeer.14.2.9> (In Persian)
- Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., & Ghorbani, A. (2020). Modeling the Influence of Biophysical Properties and Surface Topography on the Spatial Distribution of Soil Moisture in the Summer: A Case Study of Balikhli-Chay Watershed. *Journal of Ecohydrology*, 7(3), 563-581. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.299783.1307> (In Persian)
- Felegari, S., Sharifi, A., Moravej, K., Golchin, A., & Tariq, A. (2022). Investigation of the relationship between NDVI index, soil moisture, and precipitation data using satellite images. *Sustainable Agriculture Systems and Technologies*, 314-325. <https://doi.org/10.1002/9781119808565.ch15>
- Gao, J., & Li, S. (2011). Detecting spatially non-stationery and scale-dependent relationships between urban landscape fragmentation and related factors using Geographically Weighted Regression. *Applied Geography*, 31, 292-302. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.06.03>
- Gemitzi, A., Kofidou, M., Falalakis, G., Fang, B., & Lakshmi, V. (2024). Estimating high-resolution soil moisture by combining data from a sparse network of soil moisture sensors and remotely sensed MODIS LST information. *Hydrology Research*, 55(9), 905-920. <https://doi.org/10.2166/nh.2024.043>
- Harti, A. El, Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J., Hassouna, M., Mostafa, E., & El, A. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 50, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.008>

- Hou, W., Gao, J., Wu, S., & Dai, E. (2015). Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China. *Remote Sensing*, 7, 11105–11124. <https://doi.org/10.3390/rs70911105>
- Li, F., Wu, J., Xu, F., Yang, Y., & Du, Q. (2022). Determination of the spatial correlation characteristics for selected groundwater pollutants using the geographically weighted regression model: A case study in Weinan, Northwest China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 29(2), 471-493. <https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2124400>
- Li, L., Wu, D., Wang, T., & Wang, Y. (2022). Effect of topography on spatiotemporal patterns of soil moisture in a mountainous region of Northwest China. *Geoderma Regional*, 28, e00456. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00456>
- Mirchooli, F., Kiani-harchegani, M., & Khaledi, A. (2020). Spatial distribution dependency of soil organic carbon content to important environmental variables. *Ecological Indicators*, 116, 106473. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106473>
- Mirchooli, F., Sadeghi, S.H., & Darvishan, A.K. (2020). Analyzing spatial variations of relationships between Land Surface Temperature and some remotely sensed indices in different land uses. *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, 19, 100359. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100359>
- Niu, C.Y., Musa, A., & Liu, Y. (2015). Analysis of soil moisture condition under different land uses in the arid region of Horqin sandy land, northern China. *Solid Earth*, 6, 1157–1167. <https://doi.org/10.5194/se-6-1157-2015, 2015>
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Shooshtari, S. J., & Parteli, E. J. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling*, 467, 109934. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109934>
- Rash, A. J. H., Khodakarami, L., Muhedin, D. A., Hamakareem, M. I., & Ali, H. F. H. (2024). Spatial modeling of geotechnical soil parameters: Integrating ground-based data, RS technique, spatial statistics and GWR model. *Journal of Engineering Research*, 12(1), 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.026>
- Rezaei, A. (2009). Soil moisture measurement error by TDR in Zanjan's flood spreading station. *Watershed Engineering and Management*, 1(2), 128-139. <http://doi.org/20.1001.1.22519300.1388.1.2.7.9> (In Persian)
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. E75-10354). Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.
- Shrestha, A., & Luo, W. (2017). Analysis of Groundwater Nitrate Contamination in the Central Valley: Comparison of the Geodetector Method, Principal Component Analysis and Geographically Weighted Regression. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(10), 297. <https://doi.org/10.3390/ijgi6100297>
- Srivastava, A., Saco, P., Rodriguez, J., Kumari, N., Chun, K., & Yetemen, O. (2021). The Role of Landscape Morphology on Soil Moisture Variability in Semi-arid, The role of landscape morphology on soil moisture variability in semi-arid ecosystems. *Hydrological Processes*, 35(1), 1-50. <https://doi.org/10.1002/hyp.13990>
- Van de Griend, A. A., & Engman, E. T. (1985). Partial area hydrology and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 81(3-4), 211-251. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90033-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90033-2)
- Wang, J., Price, K. P., & Rich, P. M. (2001). Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3827-3844. <https://doi.org/10.1080/01431160010007033>
- Wang, S., Zhuang, Q., Jia, S., Jin, X., & Wang, Q. (2018). Spatial variations of soil organic carbon stocks in a coastal hilly area of China. *Geoderma*, 314, 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.052>
- Wen, X. (2020). Temporal and spatial relationships between soil erosion and

- ecological restoration in semi-arid regions: a case study in northern Shaanxi, China. *Geoscience and Remote Sensing*, 57, 572–590. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1751406>
- Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S.I., Waldner, P., & Stähli, M. (2020). Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides*, 17, 1881–1896. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01400-y>
- Xu, G., Huang, M., Li, P., Li, Z., & Wang, Y. (2021). Effects of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture within profiles. *Environmental Earth Sciences*, 80(4), 128. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09464-2>
- Yoshioka, M., S., Ishizawa, T. and Sakai, N. (2015). Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.01.009>
- Zhang, H., Chang, J., Zhang, L., Wang, Y., Li, Y., & Wang, X. (2018). NDVI dynamic changes and their relationship with meteorological factors and soil moisture. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7759-x>
- Zhao, C., Jensen, J., Weng, Q., & Weaver, R. (2018). A Geographically Weighted Regression Analysis of the Underlying Factors Related to the Surface Urban Heat Island Phenomenon. *Remote Sensing*, 10, 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs10091428>
- Zucco, G., Brocca, L., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2014). Influence of land use on soil moisture spatial – temporal variability and monitoring. *Journal of hydrology*, 516, 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.043>