



## Role of Geomorphometric Indicators in Controlling the Spatio-temporal Pattern of SMAP-Estimated Soil Moisture: A Case Study of the Simineh–Zarrineh Basin, Bukan

Khaled Haji Maleki<sup>\*1✉</sup> | Alireza Vaezi<sup>1</sup> | Fereydoon Sarmadian<sup>2</sup> | Asghar Rahmani<sup>3</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Soil and Water Research institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

Correspond E-mail: [khaled.hajimaleki@yahoo.com](mailto:khaled.hajimaleki@yahoo.com)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 28 Sep. 2024

Revised: 18 Dec. 2024

Accepted: 20 Dec. 2024

Published online: 01 April. 2025

#### Keywords:

Geomorphometry,  
Relative importance,  
Random forest,  
Surface soil moisture,  
SMAP satellite.

### Abstract

Soil moisture in the upper soil layers plays a vital role in water and soil resource management, directly influencing infiltration, runoff, agricultural productivity, and flood regulation. Its spatial variability is controlled by multiple factors, including climate conditions, topography, vegetation, and soil characteristics. Neglecting these variations often leads to significant errors in hydrological and agricultural modeling. This study investigates the relationship between geomorphometric indices as a proxy of topography and topsoil moisture across five sub-basins of the Simineh and Zarrineh rivers in northwest Iran, using both field observations and satellite data. Soil moisture measurements from 287 points (2015–2017) were compared with Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite estimates to produce high-resolution spatial maps. Several geomorphometric indices were derived, including the Topographic Wetness Index (TWI), Topographic Position Index (TPI), Wind Exposure Index (WEI), flow direction (Flow\_D), flow accumulation, and Analytical Hillshading (AH). The Random Forest (RF) model was applied to determine the importance of geomorphometric attributes. Validation results revealed a strong correspondence between SMAP data and field observations, with July showing the highest correlation ( $r = 0.77$ , soil moisture =  $0.18 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) and May the lowest ( $r = 0.50$ ). The RF model achieved robust performance ( $R^2 > 0.7$ , RMSE = 0.04%). Among the indices, WEI and TWI exhibited the greatest importance (>16%), followed by AH (13%), while Flow\_D had the lowest influence (8.9%). These findings confirm the significant role of topographic and hydrological features in controlling soil moisture distribution. The integration of SMAP data with machine learning and geomorphometric indices provides a reliable framework for soil moisture monitoring, offering valuable insights for agricultural management, hydrological modeling, and environmental planning in similar watersheds.

**Cite this article:** Haji Maleki, K., Vaezi, A.R., Sarmadian, F., Rahmani, A. (2025). Role of Geomorphometric Indicators in Controlling the Spatio-temporal Pattern of SMAP-Estimated Soil Moisture: A Case Study of the Simineh–Zarrineh Basin, Bukan. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (1), 75-92. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.402017.1851>



## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** Soil moisture, particularly in the upper layers of soil, is crucial for effective management of water and soil resources. It plays a significant role in the natural water cycle, influencing both surface runoff and infiltration processes. Various factors, including large-scale climate changes (such as variations in precipitation types and distribution, as well as temperature fluctuations), topographic features (like slope direction, percentage, and shape), vegetation cover (including type and density), and the physical (water holding capacity), chemical (organic matter content), and morphological (presence of hardpan) characteristics of the soil, can significantly impact the spatial variability of soil moisture. Neglecting these spatial variations can lead to substantial errors in estimating infiltration rates, surface runoff, crop yields, and flood management strategies. This research was conducted to identify the relationship between geomorphometric indices and surface soil moisture in five sub-basins of the Zarrineh and Simineh Rivers, located in northwest Iran.

**Materials and Methods:** In this study, soil moisture data collected from 287 locations between 2015 and 2017 were utilized to create soil surface moisture maps using data from the Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite, a cross with actual observations. This satellite provides high-resolution data that enhances our ability to monitor soil moisture levels across diverse landscapes. To better understand the factors influencing soil moisture, several geomorphometric indices were calculated. These included the Topographic Wetness Index (TWI), which indicates how wet a particular area is likely to be based on its topography; the Topographic Position Index (TPI), which assesses the relative position of a point on a landscape; and the Wind Exposure Index (WEI), which evaluates the potential impact of wind on soil moisture. Additionally, flow direction (Flow D) and flow accumulation were analyzed, providing insights into how water moves across the landscape. Analytical Hillshading (AH) was also conducted to understand the effects of topography on solar radiation and moisture retention. To explore the relationship between these geomorphometric indices and surface soil moisture, a random forest (RF) model was employed. This machine learning approach is particularly effective for handling complex interactions between variables and can provide insights into the relative importance of each index in predicting soil moisture levels. The surface moisture data from the SMAP satellite was divided into two categories: 80% for calibration and 20% for validation. The optimal number of trees for establishing a non-linear relationship was determined to be 800 trees, with mtry set to 3 environmental variables at each tree branch for modeling. The Relative Importance Index was used to assess the significance and impact of geomorphometric parameters on surface moisture, based on the percentage increase in Mean Squared Error of Prediction (%IncMSE). Validation was conducted using standard statistical measures.

**Results and Discussion:** The validation results of SMAP data at 287 observational points, based on correlation coefficients ( $r$ ) and root mean square difference (RMSD), indicated that July showed the highest correlation with values of 0.77 and a soil moisture level of  $0.18 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , while May had the lowest correlation with values of  $0.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ . The RF modeling results demonstrated the model's effectiveness, achieving a coefficient of determination ( $R^2$ ) greater than 0.7 and a root mean square error (RMSE) of 0.04%. Furthermore, the analysis of the %IncMSE index revealed that the parameters WEI and TWI had the highest importance, both exceeding 16. Following these, the AH parameter ranked third with an importance value of 13%. In contrast, the Flow D parameter exhibited the least impact on the variations in surface soil moisture, with an influence of only 8.9%. These findings underscore the significant relationship between soil moisture data from the SMAP satellite and ground observations, highlighting the model's potential for accurately assessing soil moisture conditions. The study emphasizes the importance of specific topographic and hydrological parameters in influencing soil moisture levels. Such insights can be crucial for agricultural management, environmental monitoring, and understanding hydrological processes in various ecosystems.

**Conclusion:** Overall, there was a strong correlation between soil moisture data obtained from the SMAP satellite and geomorphometric parameters like TWI and WEI in identifying the spatial patterns of surface soil moisture in the Simineh and Zarrineh rivers watersheds. The approach utilized in this study, when combined with the potential of machine learning techniques, demonstrates applicability in other watersheds with similar climatic and topographic conditions.

**Keywords:** *Geomorphometry, relative importance, random forest, surface soil moisture, SMAP satellite*

**Article Type:** Research Article

**Declaration of Conflict of Interest:** The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



## نقش شاخص‌های ژئومورفومتریک در کنترل الگوی زمانی و مکانی رطوبت خاک برآوردی از ماهواره SMAP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سیمینه-زربینه بوکان)

خالد حاجی ملکی<sup>۱\*</sup> | علیرضا واعظی<sup>۱</sup> | فریدون سرمیدیان<sup>۲</sup> | اصغر رحمانی<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.  
رایانامه نویسنده مسئول: [khaled.hajimaleki@yahoo.com](mailto:khaled.hajimaleki@yahoo.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف شناسایی ارتباط شاخص‌های ژئومورفومتریک بر رطوبت خاک سطحی در پنج زیر حوزه آبخیز، زربینه رود و سیمینه رود، واقع در شمال غرب ایران انجام گرفت. داده‌های رطوبت خاک از ۲۸۷ نقطه عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متر مربوط به سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ ماهواره SMAP مورد پردازش قرار گرفتند. شاخص‌های ژئومورفومتری شامل شاخص خیزی توپوگرافی (TWI)، موقعیت توپوگرافی (TPI)، اثر باد، در معرض باد قرارگرفتنی (WEI)، جهت جریان (Flow\_D) و تجمع (Accumulation) جریان، تحلیل سایه اندازی تپه‌ها (AH) تهیه و رابطه آنها با رطوبت خاک سطحی برآوردی از ماهواره SMAP با استفاده از مدل جنگل تصافی بررسی و اهمیت نسبی آنها تعیین گردید. دامنه تغییرپذیری میانگین رطوبت خاک در زیر حوضه‌ها ۰/۰۸ تا ۰/۵  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  می‌باشد. نتایج نشان داد که نواحی با کلاس رطوبتی بالا (۰/۳۵ تا ۰/۵  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) در زیر حوضه میان‌دوآب پراکنش دارد. نتایج اعتبارسنجی ای SMAP در محل ۲۸۷ نقطه مشاهداتی براساس شاخص‌های آماری از قبیل ضریب همبستگی (r) و ریشه میانگین مربعات اختلاف (RMSD) نشان داد که در ماه جولای به ترتیب با مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۱۸  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  و ماه می با ۰/۵ و ۰/۳  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  بیشترین و کمترین میزان تطابق وجود دارد. نتایج مدل‌سازی جنگل تصادفی بیانگر دقت مناسب این مدل غیرخطی با ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیش از ۰/۷۰ با ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۴ درصد می‌باشد. براساس تغییرات شاخص درصد افزایش میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (%IncMSE) پارامترهای WEI و TWI هر کدام با مقادیر بالاتر از ۱۶ بیشترین اهمیت و بعد از این دو پارامتر، شاخص تحلیل سایه اندازی تپه‌ها (AH) یا مقدار ۱۳ درصد واقع شده است. پارامتر Flow\_D با مقدار ۸/۹ درصد کمترین میزان تاثیر را بر تغییرات رطوبت خاک سطحی SMAP دارد. بطور کلی، همبستگی غیر خطی خوبی بین داده‌های رطوبت حاصل از ماهواره SMAP و پارامترهای ژئومورفومتری برای یافتن الگوی تغییرات مکانی رطوبت خاک سطحی در حوزه‌های آبخیز سیمینه و زربینه وجود داشت و رویکرد مورد استفاده در این تحقیق در تلفیق مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی امکان استفاده در سایر حوضه‌های آبخیز کشور با شرایط اقلیمی و توپوگرافی مشابه را دارا می‌باشد.

### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

### کلیدواژه‌ها:

جنگل تصادفی،

رطوبت خاک سطحی،

ژئومورفومتری،

ماهواره SMAP

**استناد:** حاجی ملکی؛ خالد، واعظی؛ علیرضا، سرمیدیان؛ فریدون، رحمانی؛ اصغر (۱۴۰۵). نقش شاخص‌های ژئومورفومتریک در کنترل الگوی زمانی و مکانی رطوبت خاک برآوردی از ماهواره SMAP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سیمینه-زربینه بوکان). *نشریه مرتع و آبخیزداری*، ۷۹ (۱)، ۹۲-۷۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.402017.1851>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

رطوبت خاک، به ویژه در خاک سطحی نقشی بسیار مهم در مدیریت منابع آب و خاک دارد. این عامل، همچنین نقش برجسته‌ای در چرخه آبی طبیعت، به ویژه فرآیندهای رواناب سطحی و نفوذ ایفاء می‌کند (Mekonnen, 2009). تغییرات اقلیمی در سطح وسیع (نوع و پراکنش بارش‌ها، تغییرات دما)، تغییرات توپوگرافی (جهت، درصد و شکل شیب)، پوشش گیاهی (نوع و تراکم) و خصوصیات فیزیکی (ظرفیت نگهداری آب)، شیمیایی (ماده آلی) و مورفولوژی خاک (سخت کفه) می‌تواند بر تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک مؤثر واقع گردند (Moeslund et al., 2013<sup>a</sup>). همچنین رطوبت خاک در هر نقطه به دلیل تغییرات بارندگی، درجه حرارت هوا، پوشش گیاهی و مدیریت خاک طی زمان تغییر می‌کند. داده‌های رطوبت خاک اهمیت قابل توجهی در علوم هیدرولوژی، کشاورزی، اقلیم‌شناسی و هواشناسی، خاک، اکولوژی، زراعت، جنگلداری و مهندسی منابع آب (مکنه، ۲۰۰۹)، تبادل جریان انرژی و آب بین سطح زمین و اتمسفر دارد (Vereecken et al., 2008).

عدم توجه به تغییرات مکانی رطوبت خاک می‌تواند منجر به افزایش خطا در برآورد مقادیر فرآیندهای نفوذ و رواناب سطحی، عملکرد محصول، کنترل سیل گردد (Zaman et al., 2016). روش‌های معمول کمی‌سازی رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی مناسب نیستند (Mekonnen, 2009). روش وزنی در عین سادگی دارای معایبی همچون زمانبر بودن، هزینه زیاد، قابلیت جمع‌آوری محدود داده‌ها و کاربرد در مقیاس‌های کوچک (مزرعه) می‌باشد. پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی، امکان استفاده از روش‌های سنجش از دور در اندازه‌گیری رطوبت خاک را فراهم ساخته است. این روش‌ها شامل روش‌های نوری، مادون قرمز حرارتی و میکروویو فعال و غیرفعال هستند که به طور گسترده در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند (Vereecken et al., 2008). در میان این روش‌ها، ماهواره رطوبت خاک فعال و غیرفعال SMAP که ماموریت آن انجام تحقیقات زیست محیطی است توسط ایالات متحده آمریکا که در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ به فضا پرتاب گردید. از جمله وظایف آن پایش و نقشه‌برداری رطوبت خاک سطحی (۵ سانتی‌متر) با درجه وضوح بالا، دقت و حساسیت در برداشت و اندازه‌گیری، پوشش کره زمین در دوره‌های زمانی کوتاه است (Entekhabi et al., 2010).

مدل‌های متعددی بر مبنای ناهمواری سطح اراضی برای کمی‌سازی و بررسی تغییرات رطوبت خاک ارائه شده‌اند. شاخص‌های ژئومورفومتری مشتق شده از مدل‌های رقومی ارتفاع شامل ویژگی‌های سطح زمین (ویژگی‌های مورفومتری، هیدرولوژیکی، اقلیمی و...) و عوارض موجود در آن (حوزه‌های آبخیز، شبکه‌های جریانی، شکل اراضی ابزاری ساده و مؤثر بر پویایی رطوبت خاک هستند (Zhu et al., 2013; Gruber & Peckham, 2009). کارایی شاخص‌های ژئومورفومتری را در پیش‌بینی پراکنش مکانی رطوبت ۵۰۰ نقطه مشاهداتی خاک سطحی برای حوضه تاراوارا<sup>۲</sup> استرالیا توسط وسترن<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۹) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات مکانی رطوبت خاک متأثر از ویژگی‌های ژئومورفومتری به دلیل نقش این پارامترها در بازپراکنش رطوبت، همگرایی جهت‌های جریان آب و ظرفیت جذب گرما در موقعیت‌های مختلف شیب برای مقیاس حوزه آبخیز می‌باشد. لوکا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۷) ارتباط بین خیزی خاک و خصوصیات توپوگرافی را بررسی و گزارش نمودند که توپوگرافی عامل مؤثری بر پراکنش مکانی رطوبت خاک است. همچنین چاترچی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از داده‌های سنتیل-۱، پوشش اراضی، خصوصیات توپوگرافی از قبیل گرادیان شیب، جهت شیب، شاخص زبری سطح زمین<sup>۶</sup> (TRI)، شاخص خیزی توپوگرافی<sup>۷</sup> (TWI)، شاخص موقعیت توپوگرافی<sup>۸</sup> (TPI) و ویژگی‌های خاک (جرم مخصوص ظاهری، درصد رس، سیلت و ماسه<sup>۹</sup> و میزان ماده آلی خاک)، پراکنش مکانی رطوبت خاک سطحی (۵ سانتی‌متری) در ایالات متحده آمریکا با استفاده از مدل‌های تجربی بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که پارامترهای TRI و TPI به همراه جهت

1. Mekonnen  
2. Turramurra  
3. Western  
4. Luca  
5. Chatterjee

6. Terrain Ruggedness Index  
7. Topographic Wetness Index  
8. Topographic Position Index  
9. Sand

شیب در مدل‌های یادگیری ماشین کیوبیست، رگرسیون چندمتغیرخطی و جنگل تصادفی در پراکنش مکانی رطوبت سطحی خاک دارای بیشترین میزان اهمیت بودند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) به برآورد رطوبت خاک با استفاده از مدل رقومی پستی و بلندی زمین در زیر حوضه شهرک بهزیستی در استان گلستان پرداختند. آنها در این تحقیق از دستگاه انعکاس سنج زمانی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در ۱۸ نقطه و ۶ روز متوالی بعد از بارندگی در اعماق مختلف خاک استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که انحنا افقی، جهت شیب و شاخص خیزی توپوگرافی مهم‌ترین خصوصیات توپوگرافی بودند که با رطوبت خاک بیشترین ارتباط را دارند. لی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی نقش توپوگرافی در تعیین روند تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در شمال چین پرداختند. نتایج ایشان بیانگر وابستگی نسبی بالای تغییرات زمانی-مکانی رطوبت خاک با ارتفاع بود. جوادی و همکاران (۲۰۲۲) تغییرات مکانی رطوبت خاک را در حوضه مرغاب خوزستان با استفاده ویژگی‌های توپوگرافی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع، داده‌های سنجش از دور و رویکرد یادگیری ماشین RF مدل‌سازی نمودند. نتایج این محققین بیانگر تاثیرپذیری رطوبت خاک سطحی از پارامترهای سنجش از دور و در اعماق زیرین (۵ سانتی‌متر به بالا) متاثر از خصوصیات ژئومورفومتری است. بالاترین میزان اهمیت مربوط به شاخص‌های TPI، ارتفاعات استاندارد شده، موقعیت میانی شیب و زیر حوضه اصلاح شده بودند، همچنین بر کارایی بالای مدل RF در پیش‌بینی رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه تاکید نمودند. مطالعات سال‌های اخیر در ایران نیز نشان داده است که مدل RF در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک (کربن آلی، درصد رس، Ca، CaCO<sub>3</sub>، SO<sub>4</sub>، CaSO<sub>4</sub> و پایداری خاکدانه) با استفاده متغیرهای توپوگرافی و سنجش از دور از دقت قابل قبولی برخوردار است (عمادی<sup>۲</sup> و همکاران ۲۰۲۰؛ مولایی نسب<sup>۳</sup> و همکاران ۲۰۲۵؛ ناظری<sup>۴</sup> و همکاران ۲۰۲۴؛ شهابی<sup>۵</sup> و همکاران ۲۰۲۲) و در تعدادی از این مطالعات تاکید بیشتر بر مدل‌سازی ویژگی‌های خاک با استفاده از متغیرهای ژئومورفومتری شده است (رحمانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۰). با این وجود در مطالعات صورت گرفته تا اکنون، بیشتر به تاثیر ویژگی‌های ژئومورفومتری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی یا رطوبت خاک سطحی اندازه‌گیری شده پرداخته شده است و پتانسیل استفاده از داده‌های سنجش از دوری برآورد کننده رطوبت خاک مانند ماهواره SMAP با دوره بازگشت زمانی مناسب و پوشش مکانی گسترده در سطح حوزه‌های آبخیز و همچنین رابطه داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با شاخص‌های ژئومورفومتری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. حوضه سیمینه‌رود و زرينه‌رود به دلیل وسعت زیاد و توپوگرافی نامنظم، از شرایط ویژه‌ای در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه برخوردار است و مطالعه تأثیر شاخص‌های ژئومورفومتریک بر پراکنش مکانی رطوبت خاک برآورد شده توسط داده‌های ماهواره SMAP می‌تواند در بررسی میزان نگهداشت آب در خاک، پیش‌بینی وقوع سیلاب‌ها و برنامه‌ریزی‌های آبیاری در اراضی کشاورزی مفید باشد. از این رو پژوهش حاضر با اهداف الف)- شناسایی ارتباط بین شاخص‌های ژئومورفومتریک و رطوبت خاک حاصل از داده‌های ماهواره SMAP<sup>۶</sup> ب)- تهیه نقشه پراکنش مکانی رطوبت خاک سطحی، ج)- اعتبارسنجی کارایی داده‌های ماهواره SMAP در برآورد رطوبت خاک با استفاده از داده‌های مشاهداتی در حوزه‌های آبخیز زرينه‌رود و سیمینه‌رود شمال غرب ایران انجام گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

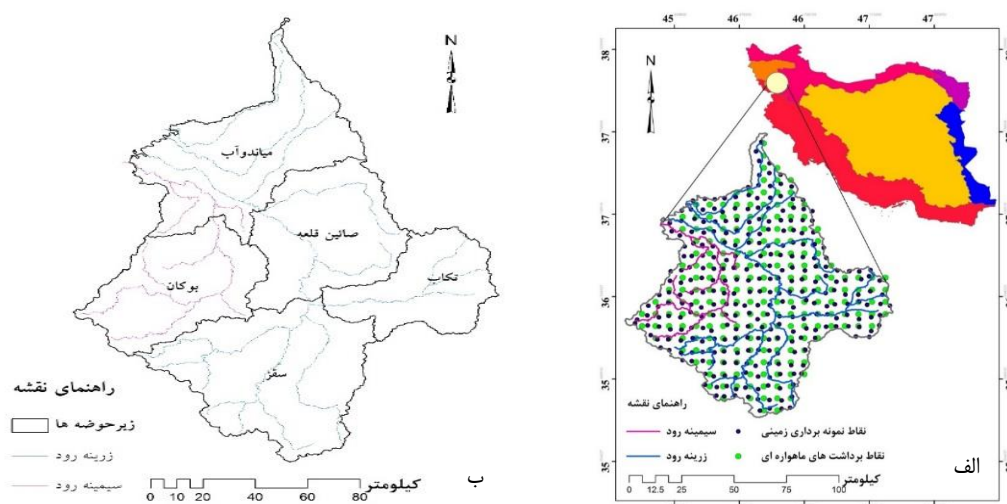
### ۲-۱. منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه حوزه‌های آبخیز زرينه‌رود و سیمینه‌رود با مساحت ۱۷۵۶۳ کیلومترمربع در اراضی شمال غرب ایران و در عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه، ۴۲ دقیقه و ۱۴ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۱ ثانیه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه، ۳۱ دقیقه و ۳۲ ثانیه تا ۴۷ درجه، ۲۲ دقیقه و ۲۱ ثانیه شرقی واقع شده است. این حوضه در محدوده استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان

1. Li  
2. Emadi  
3. Molaeinasab

4. Nazeri  
5. Shahabi  
6. Soil Moisture Active/Passive

می‌باشد که به ترتیب ۵۶،۱۵ و ۲۶ درصد مساحت هر استان را در برمی‌گیرد (Iran Ministry of Energy, 2013). حوزه‌های آبخیز زرینه‌رود و سیمینه‌رود از لحاظ اندازه بزرگ‌ترین حوزه آبخیز، که در جنوب و جنوب شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته است (شکل ۱ الف). محصولات کشاورزی غالب منطقه در دیم‌زارها گندم و جو و در اراضی آبی چغندرقد، یونجه و باغات سیب است. سیمینه‌رود و زرینه‌رود، به عنوان رودخانه‌های دائمی در حوضه مورد مطالعه با میانگین دبی ۹۵ مترمکعب بر ثانیه به عنوان پرآب‌ترین رودخانه‌های کشور شناخته می‌شوند. این دو رودخانه به طور کلی ۵۲ درصد مجموع جریان آبی سالانه دریاچه ارومیه را تامین می‌کنند (Ahmadaali et al., 2018). زرینه‌رود به طول ۲۴۰ کیلومتر و مساحت حوضه ۱۱۶۴۲ کیلومتر مربع و سیمینه‌رود با طول ۲۰۰ کیلومتر و مساحت حوضه ۵۹۲۱ کیلومتر مربع حوضه را در برمی‌گیرند (Ahmadaali et al., 2018). بر روی رودخانه زرینه‌رود سد مخزنی شهید کاظمی بوکان در سال ۱۳۵۰ ساخته شده‌است که به نام سد زرینه‌رود نیز شناخته می‌شود. این سد در استان آذربایجان غربی و در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بوکان قرار گرفته و بند انحرافی نورولو در ۷۰ کیلومتری پایین دست سد مخزنی احداث گردیده است و آب مورد نیاز کشاورزی جلگه میاندوآب و بخشی از دشت‌های بناب و ملکان را تامین می‌کند (Rosenbaum et al., 2018). میانگین دمای سالانه این حوضه ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۳۵۸ میلی‌متر می‌باشد (Wood et al., 1990). این حوضه به دلیل وسعت زیاد، دارا بودن توپوگرافی نامنظم، کاربری‌های مختلف اراضی و سطح پایین اراضی اشغال شده توسط باغات که مؤثر بر دقت داده‌های ماهواره‌ای می‌باشند و همچنین وجود ایستگاه‌های متعدد و کافی هواشناسی و هیدرومتری انتخاب گردید. تغییرات ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه از ۱۲۵۴ تا ۳۳۸۹ می‌باشد. حوضه‌های آبخیز زرینه‌رود و سیمینه‌رود پنج زیر حوضه به نام‌های بوکان، سقز، تکاب، صائین قلعه و میاندوآب را در برمی‌گیرند. شکل ۱ ب موقعیت هر زیر حوضه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف: موقعیت حوزه‌های آبخیز زرینه‌رود و سیمینه‌رود، نقاط برداشت ماهواره‌ای (نقاط سبز رنگ) و نقاط نمونه برداری زمینی (نقاط سیاه رنگ)؛ ب: موقعیت رودخانه‌ها؛ وزیر حوضه‌ها.

## ۲-۲. برآورد رطوبت خاک به وسیله ماهواره SMAP

در این پژوهش داده‌های رطوبت خاک سطحی برآوردی توسط ماهواره SMAP مورد استفاده قرار گرفت. این ماهواره به صورت اختصاصی و صرفاً برای پایش تغییرات رطوبت سطحی خاک توسط سازمان فضایی ناسا در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شد (Entekhabi et al., 2010). ماهواره SMAP در یک مدار خورشید آهنگ و با ارتفاع ۶۸۰ کیلومتر از سطح زمین در حال چرخش به دور کره زمین است و هر روز راس ساعت شش صبح و شش بعد از ظهر از استوا عبور می‌کند که پهنای نوار آن حدود ۱۰۰۰ کیلومتر می‌باشد. همچنین قادر است

که تغییرات رطوبت خاک را تا دو اینچ (صفر تا ۵ سانتی‌متری) از سطح زمین، پایش کند. این ماهواره دارای قدرت تفکیک مکانی حدود ۳ و ۹ کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی سه روزه می‌باشد. به همین منظور داده‌های این ماهواره در آوریل سال ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۷ دریافت و مورد پردازش قرار گرفتند. در کل منطقه حدود ۲۸۷ نقطه مطالعاتی تعیین گردیدند. میزان رطوبت خاک در این نقاط توسط ماهواره برآورد شد و با استفاده از داده‌های زمینی برداشت شده در محل ۲۸۷ نقطه بر اساس دو شاخص میانگین اختلاف (MD) (رابطه ۱) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSD) (رابطه ۲) اعتبارسنجی گردید (جدول ۱). شکل ۱ (الف) نقشه پراکنش نقاط برآوردی رطوبت سطحی خاک توسط ماهواره SMAP در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n Q_s(i) - Q_m(i)}{N} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_s(i) - Q_m(i))^2}{N}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این روابط  $Q_s$  رطوبت خاک ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) برآوردی توسط ماهواره،  $Q_m$  رطوبت خاک ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) مشاهده شده و  $N$  تعداد کل مشاهدات است.

### ۲-۳. به‌کارگیری مدل رقومی ارتفاع

مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از پایگاه داده مکانی سازمان زمین‌شناسی آمریکا دریافت شد (<https://earthexplorer.usgs.gov>). با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه، نیاز به بارگیری چندین ورق از لایه‌ها شد که سپس در محیط نرم افزار Arc GIS 10.5 لایه‌ها موزاییک و یکپارچه شدند. در نهایت پیش پردازش پرکردن گودی‌های کاذب<sup>۱</sup> لازم بر روی مدل رقومی ارتفاعی نهایی صورت گرفت. داده‌های اقلیمی منطقه که شامل ۳۷ ایستگاه باران‌سنجی معمولی بود در یک دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵) از مدیریت منابع آب وزارت نیرو تهیه و دسته بندی شدند.

### ۲-۴. تعیین شاخص‌های ژئومورفومتریک

#### ۲-۴-۱. شاخص خیزی توپوگرافی

یکی از شاخص‌های موجود در ژئومورفومتري که برای مطالعه کمی حوزه آبخیز به کار می‌رود، شاخص خیزی توپوگرافی یک حوزه آبخیز است. طبق معادله زیر با استفاده از مدل رقومی ارتفاع این شاخص محاسبه گردید. این شاخص با جریان‌های سطحی موجود در حوزه آبخیز و مساحت حوزه آبخیز ارتباط مستقیم و با شیب حوزه آبخیز نسبت عکس دارد (رابطه ۳).

$$TWI = Ln(As/(\tan(\beta))) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن:  $As$  سطح ویژه حوزه آبخیز بر حسب مساحت تجمعی بالا دست،  $\beta$  درجه شیب. در واقع به کمک شاخص  $TWI$  می‌توان گرایش رطوبت به تجمع در هر نقطه از حوزه آبخیز و تمایل انتقال آن به پایین دست حوزه آبخیز را بررسی کرد. با استفاده از معادله فوق در محیط نرم افزار SAGA شاخص خیزی توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی استخراج گردید. سایر نقشه‌های تأثیر باد ( $WE^2$ )، در معرض باد قرار گرفتنی ( $WEI^3$ ) و  $TPI$  نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و توابع Terrain analysis و زیر بخش Morphometry در محیط نرم

افزار SAGA GIS 7.4 ترسیم گردید.

## ۲-۴-۲. شاخص اثر باد

یک شاخص بدون بعد است که مقادیر کمتر از یک نشان دهنده دوری از باد و بالاتر ۱ بیانگر قرارگیری در معرض باد می باشد (Boehner & Antonic, 2009). محاسبات آن با توجه به جهت باد انجام می گردد که در این تحقیق جهت باد متفاوت می باشد. شاخص در معرض باد، میانگین شاخص اثر باد را برای همه جهات با استفاده از یک گام زاویه ای (۱۵ درجه) محاسبه می کند. مانند شاخص اثر باد، این شاخص نیز بدون بعد است. مقادیر زیر یک نشان دهنده مناطق تحت سایه باد و مقادیر بالای یک نشان دهنده مناطقی است که در معرض باد قرار دارند.

## ۲-۴-۳. شاخص موقعیت توپوگرافی

شاخص موقعیت توپوگرافی بر اساس مقایسه ارتفاع هر سلول مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول های همسایه تعریف می گردد. اختلاف میانگین ارتفاع محلی از مقادیر ارتفاع در مرکز پنجره محلی مورد استفاده، محاسبه می گردد (Weiss, 2009) (رابطه ۴).

$$TPI_i = Z_0 - \frac{\sum_{1-n} Z_n}{n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در معادله بالا  $Z_0$ : ارتفاع نقطه مورد نظر،  $Z_n$ : ارتفاع شبکه داخل پنجره محلی،  $n$ : تعداد کل نقاط همسایگی. مقادیر مثبت TPI نشان دهنده مکان هایی که ارتفاع آن بالاتر از متوسط پنجره محلی است (بالها)، مقادیر منفی نشان دهنده مکان های با ارتفاع پایین تر از متوسط پنجره محلی (دره ها) و مقادیر نزدیک صفر نواحی صاف را نشان می دهند (شیب نزدیک صفر) یا نواحی شیب ثابت (جایی که شیب نقطه به طور معنی دار بزرگ تر از صفر باشد ولی شیب ثابت است. مقادیر مثبت خیلی بالا به قله ها و یال ها مربوط می گردد (Zhu & Lin, 2011).

## ۲-۴-۴. تحلیل سایه اندازی تپه ها

نقشه های تحلیل سایه اندازی تپه ها ( $AH^2$ ) (با آزیموت ۳۱۵ و ارتفاع ۴۵ بر مبنای مدل رقومی ارتفاع) محاسبه گردید.

## ۲-۴-۵. جهت و تجمع جریان

جهت جریان ( $Flow\_D^3$ ) و تجمع جریان ( $Flow\_A^4$ ) با استفاده از الگوریتم D8 و مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم افزار Arc GIS 10.5 تهیه شدند.

## ۲-۵. مدل سازی پارامترهای ژئومورفتری - رطوبت خاک سطحی SMAP

در این پژوهش جهت بررسی رابطه کمی بین پارامترهای ژئومورفتری و رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP از مدل جنگل تصادفی (RF) (بریمن<sup>۵</sup>، ۲۰۰۱) در محیط نرم افزار R.4.5.1 استفاده شد. داده های رطوبت سطحی ماهواره SMAP به دو دسته ۸۰ درصد برای واسنجی و ۲۰ درصد جهت اعتبارسنجی تقسیم گردید. تعداد درخت بهینه جهت ایجاد رابطه غیر خطی ۸۰۰ درخت ( $ntree$ ) با تعداد  $mtry=3$  (تعداد متغیرهای محیطی تصادفی در هر تقسیم شاخه) جهت مدل سازی تعیین گردید. از شاخص اهمیت نسبی جهت تعیین میزان اهمیت و تاثیر گذاری پارامترهای ژئومورفتری بر روی رطوبت سطحی با توجه به شاخص درصد افزایش میانگین مربعات خطای پیش بینی ( $\%InMSE$ ) استفاده شد. اعتبارسنجی با استفاده از روابط (۵، ۶، ۷ و ۸) انجام گردیدند.

1. Valley
2. Analytical Hill shading
3. Flow Direction

4. Flow Accumulation
5. Breiman
6. Relative importance

$$CCC = \frac{2r\partial P_i \partial O_i}{\partial P_i^2 + \partial O_i^2 + (\bar{P} + \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

$O_i$ : مقدار اندازه‌گیری شده  $P_i$ : مقدار پیش‌بینی شده  $\bar{O}_i$ : میانگین اندازه‌گیری شده  $n$ : تعداد مشاهدات

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{O}_i - \bar{P}_i) \quad \text{رابطه ۸}$$

در روابط فوق،  $n$  تعداد کل نمونه‌ها، میانگین مقادیر اندازه‌گیری  $\bar{O}_i$  و پیش‌بینی شده  $\bar{P}_i$  می‌باشند.

### ۳. یافته‌های پژوهش

#### ۳-۱. اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP

نتایج اعتبارسنجی کارایی استفاده از داده‌های ماهواره SMAP در برآورد رطوبت خاک سطحی منطقه مورد مطالعه در ۲۷۸ نقطه مشاهداتی در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس آماره‌های اعتبارسنجی، بالاترین میزان همبستگی و حداقل خطا مربوط به ماه جولای و نوامبر و کمترین آن‌ها در ماه‌های می و دسامبر می‌باشد. در این راستا نتایج مشاهده شده با یافته سایر محققین در مورد کارایی داده‌های SMAP برای برآورد رطوبت خاک در فصول خشک سال مطابقت دارد (Li et al., 2019).

جدول ۱. نتایج اعتبارسنجی داده‌های رطوبت سطحی ماهواره SMAP در ماه‌های مختلف

RMSD	MD	r	زمان
۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۶۲	۳ آوریل
۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۵۶	۸ می
۰/۲۰	۰/۰۹	۰/۷۷	۳ جولای
۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۵۷	۱۳ سپتامبر
۰/۲۷	۰/۰۱	۰/۷۲	۳ نوامبر
۰/۲۸	۰/۰۲	۰/۵۲	۳ دسامبر

#### ۳-۲. نتایج مدل‌سازی ژئومورفومتری-رطوبت خاک سطحی SMAP

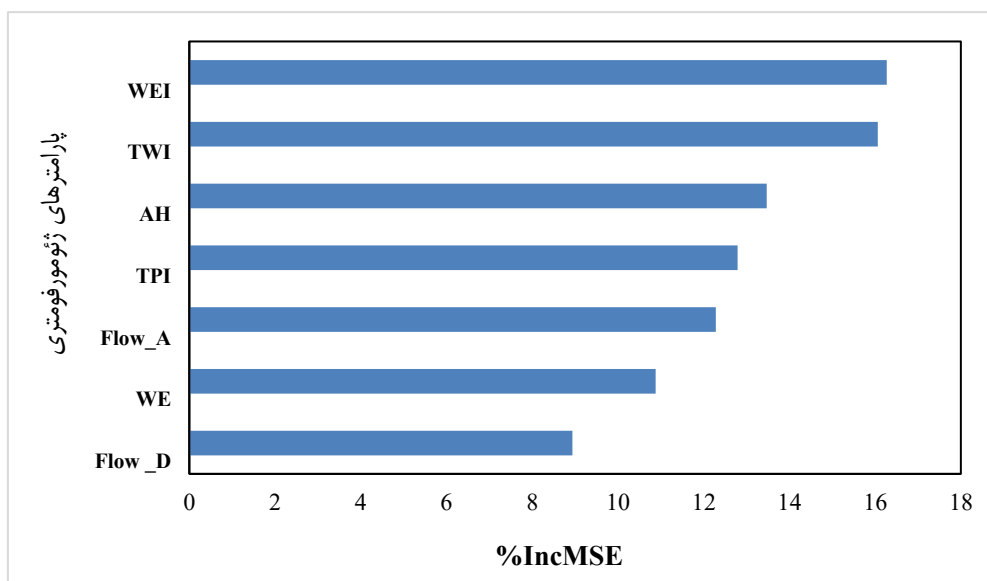
نتایج مدل‌سازی مدل جنگل تصادفی در جدول ۲ ارائه شده است. مدل در مرحله واسنجی یک دقت بسیار عالی با مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۰ و ضریب همبستگی تطابق (CCC) بالای ۰/۹۳ به همراه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی برابر ۰/۰۲ و مقدار اریب (Bias) برابر ۰/۰۱ درصد در مرحله واسنجی که نشان از برازش بسیار خوب مدل مکانی مورد استفاده در پیش‌بینی رطوبت خاک با کمک متغیرهای ژئومورفومتری داشته و در مرحله اعتبارسنجی با داده‌های مستقل با مقدار  $R^2$  برابر ۰/۷۲ و CCC برابر ۰/۹۳ به همراه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی برابر ۰/۰۴ و مقدار اریب (Bias) برابر ۰/۰۱ درصد نشان داد.

نتایج اهمیت نسبی پارامترهای ژئومورفومتری بر تغییرات رطوبت خاک سطحی برآورد شده توسط ماهواره SMAP بر اساس شاخص IncMSE% در شکل ۳ ارائه شده است. براساس افزایش این شاخص، دو پارامتر WEI و TWI بالاترین میزان اهمیت در تغییرات رطوبت

خاک سطحی داشتند و شاخص‌های WE و پارامتر FLOW\_D کمترین میزان اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی رطوبت خاک سطحی با استفاده مدل جنگل تصادفی

پارامترهای آماری	Bias	RMSE (%)	CCC	R <sup>2</sup>
واسنجی	۰/۰۰۱	۰/۰۲۷	۰/۹۳	۰/۹۱
اعتبارسنجی	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۸۱	۰/۷۲

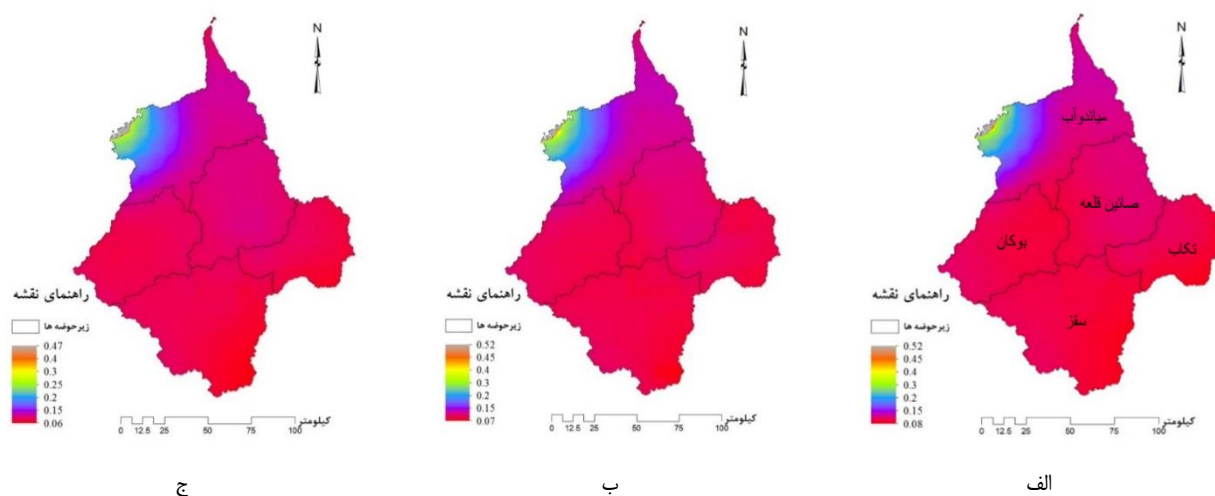


شکل ۳. آنالیز اهمیت نسبی پارامترهای ژئومورفومتری موثر بر رطوبت خاک سطحی SMAP با استفاده از شاخص IncMSE در مدل جنگل تصادفی (RF)

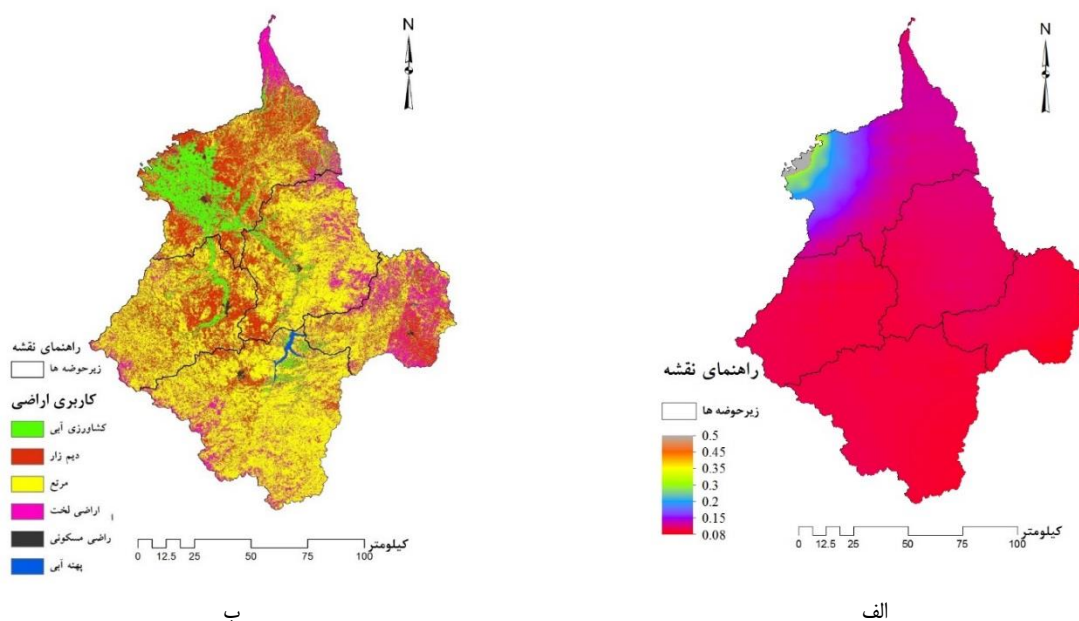
### ۳-۳. پراکنش مکانی رطوبت خاک

تغییرپذیری مکانی محتوای رطوبت خاک در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ در شکل ۴ نشان داده شده است. باتوجه به نقشه‌های پیش‌بینی می‌توان دریافت که بیشترین میزان رطوبت (۰/۲ تا ۰/۳  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) در نواحی خروجی حوضه به سمت دریاچه ارومیه یعنی نواحی شمال و شمال غرب منطقه مطالعاتی می‌توان مشاهده کرد. این نتیجه بیانگر این است که محتوای رطوبت خاک در اراضی پایین‌دست و خروجی حوضه بالاتر از نواحی دیگر هستند.

آنچه که در شکل ۵ الف مشاهده می‌گردد؛ این است که زیر حوضه میاندوآب در طی میانگین سه ساله با محتوای رطوبت (۰/۱۵ تا  $۰/۳ \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) نسبت به زیرحوضه‌های دیگر (۰/۰۵ تا  $۰/۱۵ \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) می‌باشد. همچنین شایان ذکر است که بیشترین سطح کاربری کشاورزی آبی در زیر حوضه میاندوآب واقع شده و چون تمامی جریان‌های حوضه در این زیر حوضه خارج و به دریاچه ارومیه می‌ریزند پس آب مورد نیاز برای آبیاری اراضی فاریاب در دسترس‌تر هستند. زیر حوضه تکاب نیز در اغلب بازه‌های زمانی مورد بررسی دارای میزان کمتری محتوای رطوبت خاک سطحی (۰/۰۵ تا  $۰/۱ \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) است. شکل ۵ الف نشان می‌دهد که کلاس غالب محتوای رطوبت خاک در سطح حوضه مورد مطالعه با میانگین سه ساله بین  $۰/۰۸ \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  تا  $۰/۱۵ \text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  می‌باشد. همواره در بخش‌های جنوبی حوضه مقادیر پایین محتوای رطوبت خاک نمایان است که می‌تواند به دلیل نوع کاربری اراضی (شکل ۵ ب) و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های این منطقه باشد.



شکل ۴. تغییرپذیری مکانی و زمانی رطوبت خاک در مقیاس سالانه (الف: سال ۲۰۱۵، ب: سال ۲۰۱۶، ج: سال ۲۰۱۷) در حوزه‌های آبخیز زربنه‌رود و سیمینه‌رود.



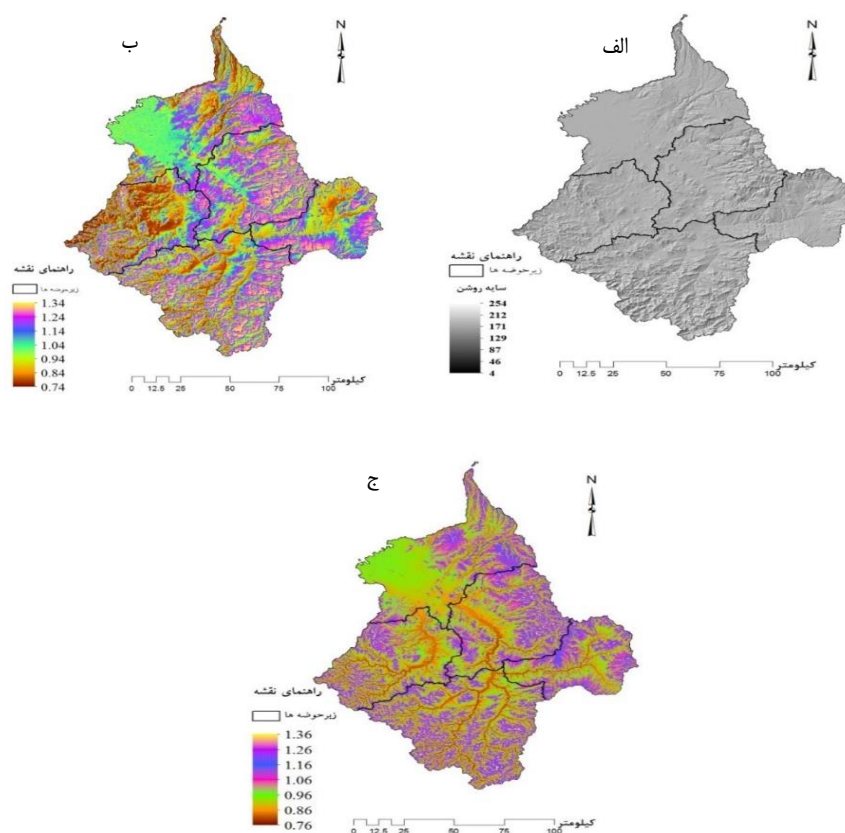
شکل ۵. تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک در کل دوره مورد بررسی (الف)، نقشه کاربری اراضی (ب) در حوزه‌های آبخیز زربنه و سیمینه‌رود.

### ۴-۳. تأثیر شاخص سایه‌اندازی تپه‌ها (سایه روشن) بر پراکنش مکانی رطوبت خاک

توپوگرافی عامل مؤثر بر تغییرپذیری مکانی و زمانی رطوبت خاک می‌باشد (Li et al., 2022). حوزه‌های آبخیز زربنه‌رود و سیمینه‌رود دارای توپوگرافی شدید می‌باشند (احمد علی و همکاران، ۲۰۱۸) که همین عامل تفسیر و الگویابی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک به عنوان یک متغیر پویا را با مشکل مواجهه می‌کند. سایه‌ای که تپه‌ها و نواحی مرتفع در زمان تابش خورشید بر قسمت‌های دیگر اراضی احاطه می‌کنند بر فراهمی محتوای رطوبت خاک موثر است و تحلیل سایه‌اندازی تپه‌ها (AH) به عنوان یکی از ویژگی‌های مورفومتریک اراضی در

#### 1. Analytical Hillshading

این زمینه حائز اهمیت است. هنگل و رویتر<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) بیان داشتند که نقشه سایه روشن با فرض چگونگی قرارگیری ناهمواری‌ها در معرض تابش نور خورشید ایجاد می‌گردد. با قرار دادن ناهمواری‌ها در معرض تابش نور خورشید و در نظر گرفتن عواملی مثل جهت تابش، زاویه تابش و بلندای آفتاب مناطقی که در سایه یا در معرض تابش نور قرار می‌گیرند را به صورت سه بعدی در این نقشه می‌توان دید. در این نقشه ناهمواری‌هایی که در برابر تابش مستقیم قرار می‌گیرند روشن‌تر و ارتفاعات پشت به آفتاب تاریک‌تر است. در شکل ۶ (الف) مناطقی که رنگ تیره دارند، مکان‌های واقع در سایه هستند که با توجه به الگوی پراکنش جهت‌های شیب در آن‌ها می‌توان انتظار وجود رطوبت بیشتری را داشت. همچنین مناطقی که با رنگ روشن‌تر دیده می‌شوند، اراضی هستند که در برابر تابش مستقیم نور خورشید قرار دارند و جهت غالب شیب در این اراضی جنوبی می‌باشد. می‌توان در این مناطق انتظار رطوبت خاک کمتر و پوشش اراضی ضعیف‌تر را داشت.



شکل ۶. نقشه سایه روشن (الف)، تأثیر باد (ب) و در معرض باد قرار گرفتنی (ج) در حوزه‌های آبخیز زربنه‌رود و سیمینه‌رود.

### ۳-۵. تأثیر شاخص‌های اثر و جهت باد بر پراکنش مکانی رطوبت خاک

شکل ۶-ب، اثر باد بر روی زیرحوضه‌های مختلف را با توجه به توپوگرافی و سایر ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین به نمایش می‌گذارد. در این نقشه هرچه میزان ارزش عددی تأثیر باد در منطقه‌ای بالا باشد اثر باد بر این مناطق زیاد است و با در نظر گرفتن این که هرچه مناطقی بیشتر در معرض باد باشند، میزان رطوبت خاک آن‌ها در طول زمان رو به کاهش می‌باشد (Brocca et al., 2010). بنابراین می‌توان گفت که اراضی دارای ارزش عددی بالا (۱/۲۴ تا ۱/۳۴) در طول زمان‌های مختلف مقادیر کمتری از میزان رطوبت خاک را

نسبت به اراضی دارای ارزش عددی پایین (۰/۷۴ تا ۰/۹۴) خواهند داشت. دامنه تغییرپذیری این شاخص بین ۰/۷۴ تا ۱/۳۴ می‌باشد. به طور کلی زیر حوضه میان‌دوآب از لحاظ این شاخص ارزش عددی بالاتری نسبت به زیر حوضه سقز دارد. زیرحوضه‌های تکاب و صائین قلعه نسبت به سایر زیرحوضه‌ها ارزش عددی بالاتری دارند و انتظار وجود مقادیر رطوبت پایین در آن‌ها خارج از انتظار نیست. اما زیر حوضه بوکان در وضعیت متوسطی از لحاظ این شاخص قرار دارد.

شکل ۶-ج، پتانسیل در معرض باد قرار گرفتن حوزه‌های آبخیز زرينه‌رود و سيمينه‌رود را نشان می‌دهد. در این شکل مکان آبراهه‌ها که از لحاظ توپوگرافی در هر طرف محصور شده‌اند، کمترین توان در معرض باد قرار گرفتن را دارند. همچنین قله‌ها و نواحی مرتفع و دشت‌های غیر محصور بیشترین پتانسیل در معرض باد قرار گرفتن را دارند.

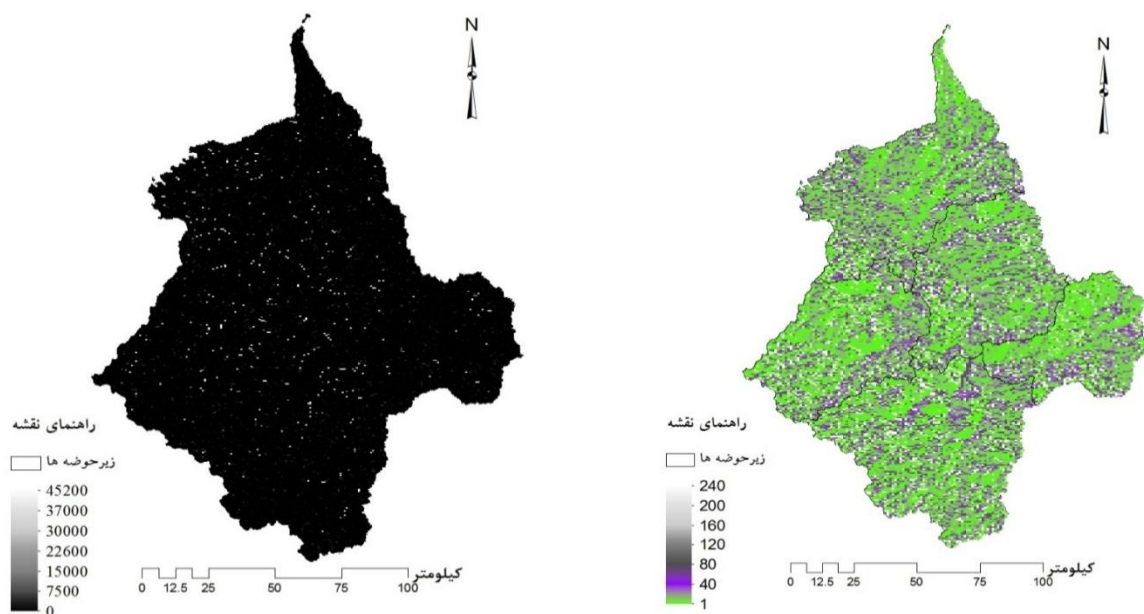
### ۳-۶. تاثیر جهت و تجمع جریان بر پراکنش مکانی رطوبت خاک

جریان هیدرولوژیکی در حوضه مورد مطالعه از سمت جنوب به شمال غرب می‌باشد که در نهایت تمام جریان حوضه به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. شکل ۷ الف، جهت جریان در بخش‌های مختلف زیر حوضه‌ها را نمایش می‌دهد. سلول‌هایی از نقشه که دارای ارزش عددی بیشتری هستند نشانگر این است که سایر سلول‌های اطراف با ارزش عددی کمتر جریان رواناب را به داخل این سلول هدایت می‌کنند. به عبارت دیگر سلول‌های با ارزش عددی پایین نمایانگر این هستند که در فرآیند تولید رواناب دخالت دارند اما قابلیت نگهداشت آن را به خاطر ویژگی‌های توپوگرافی ندارند و آن را به سلول‌های با ارزش عددی بالاتر هدایت می‌کنند. هرچه در منطقه‌ای تعداد این سلول‌های با ارزش عددی پایین بیشتر باشد به تبع آن خاک‌های واقع در این محدوده دارای محتوای رطوبت پایین‌تری هستند (Zaman et al., 2016). شکل ۷ ب، نقشه تجمع جریان را به نمایش می‌گذارد. همچنین در این نقشه نیز هر سلول آن دارای ارزش عددی است که نشان دهنده تجمع جریان در سلول‌های با ارزش عددی بالا می‌باشند. در این نقشه سلول‌های با ارزش عددی بالا اغلب در مسیر آبراهه‌ها قرار دارند. در شکل ۷ ب با مقایسه تعداد پیکسل‌های با ارزش عددی بالاتر با تعداد سایر پیکسل‌ها می‌توان دریافت که در حوضه نقاط تجمع جریان زیادی وجود ندارد و این عامل به توپوگرافی نامنظم حوضه وابسته می‌باشد. زیر حوضه تکاب در بین سایر زیر حوضه‌ها کمترین تعداد پیکسل‌های با ارزش عددی بالا را دارد این عامل می‌تواند بیانگر این باشد که زیر حوضه تکاب هنوز به تکامل آبراهه‌ای نرسیده و ممکن است در صورت رخداد بارش‌های سنگین در این زیر حوضه منجر به جاری شدن سیل‌های ویرانگر گردد. بنابراین زیر حوضه تکاب به خاطر ویژگی توپوگرافی شدید آن مستعد نگهداری رطوبت نبوده و اغلب خاک‌های آن محتوای رطوبت پایینی دارند.

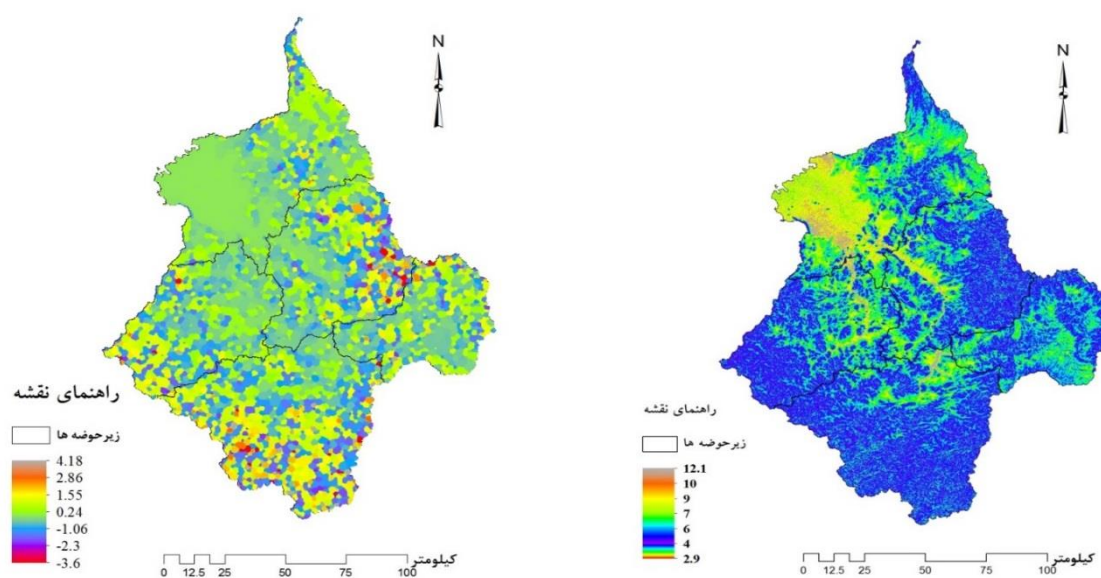
### ۳-۷. شاخص خیزی توپوگرافی (TWI) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)

شکل ۸ الف نقشه TWI را نشان می‌دهد. دامنه شاخص TWI بین ۲/۹۰ تا ۱۲/۱ است. هرچه میزان این شاخص بیشتر باشد، پتانسیل تجمع رطوبت در آن ناحیه بیشتر و به تبع خاک‌های آن ناحیه نسبت به نواحی دیگر رطوبت بیشتری خواهد داشت (Gruber & Peckham, 2009). نواحی به رنگ سبز و زرد محدوده عبور رودخانه‌های حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (شکل ۸ الف) همچنین نواحی به رنگ سبز دارای میزان رطوبت بیشتر نسبت به نواحی به رنگ آبی هستند.

زیر حوضه میان‌دوآب واقع در شمال غرب حوضه نسبت به سایر زیر حوضه‌ها مقادیر نزدیک به صفر بیشتری از شاخص TPI دارد (شکل ۸ ب) و همچنین همین اراضی دارای بالاترین مقادیر شاخص TWI می‌باشند. این موضوع در بررسی‌های تغییرپذیری رطوبت خاک می‌تواند مبین محتوای رطوبت بالاتر در اراضی این زیر حوضه باشد و نشان دهنده تأثیرگذاری شاخص‌های عوارض سطح زمین در الگوی روند تغییرات رطوبت خاک می‌باشد. شایان ذکر است که نواحی به رنگ آبی دارای توپوگرافی شدید و ارتفاع بالاتری از سطح دریا هستند که همین عامل بر محتوای رطوبت این نواحی اثر منفی داشته است بنابراین محتوای رطوبت این نواحی به مرور در حال کاهش می‌باشد.



شکل ۷. نقشه جهت جریان (الف) و نقشه تجمع جریان (ب) در حوزه‌های آبخیز زربنه‌رود و سیمینه‌رود



شکل ۸. نقشه شاخص خیسی توپوگرافی (الف) و نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی (ب) حوزه‌های آبخیز زربنه‌رود و سیمینه‌رود

شاخص موقعیت توپوگرافی (شکل ۸ ب)، ارتفاع هر سلول از مدل رقومی ارتفاعی را با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی می‌کند سپس ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کسر می‌گردد. در نهایت برای هر سلول یک ارزش عددی منفی و مثبت محاسبه می‌گردد (Beven & Kirkby, 1979). در شکل ۸ ب مناطق به رنگ سبز که دارای مقادیر نزدیک به صفر هستند، اغلب مناطق مسطح را در بر می‌گیرند که باتوجه به نقشه شاخص خیزی توپوگرافی (شکل ۸ الف) این مناطق دارای ارزش عددی متوسطی هستند که مستعد میزان رطوبت بیشتری نسبت به سایر نقاط می‌باشند.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

رطوبت خاک به‌عنوان یک متغیر پویا در زمان و مکان در این پژوهش به آن پرداخته شده است. در این پژوهش برای اینکه تأثیر شاخص‌های ژئومورفومتری بر تغییرات رطوبت خاک بهتر شناسایی گردند، گام‌های زمانی بررسی تغییرات مکانی رطوبت خاک بلندتر در نظر گرفته شد (سالانه و چند ساله) تا الگوهای بهتر و واضح‌تری در تغییرپذیری رطوبت خاک در مقیاس بزرگ‌تر دیده شود. این پژوهش با هدف بررسی اثرگذاری عوارض سطح زمین بر تغییرپذیری رطوبت خاک انجام گرفت که نتایج آن نشان دهنده این است که بدون توجه به ساختار عوارض سطح زمین تحلیل تغییرات رطوبت خاک برآورد شده توسط سنجنده ماهواره‌ها، دشوار خواهد بود. شاخص‌های WEI، WEI، TPI و TWI که از مدل رقومی ارتفاعی مشتق شده‌اند، نقش شکل، طول و جهت عوارض سطح زمین را بر تغییرات محتوای رطوبت خاک برجسته می‌نمایند. این شاخص‌ها در اراضی با توپوگرافی نامنظم با کمک شاخص‌های جهت و تجمع جریان در تحلیل تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک در نواحی نزدیک آبراهه‌ها و دریاچه‌ها نقشی مهم را ایفا می‌کنند (Beaudette et al., 2013). رابطه بین رطوبت خاک و ویژگی‌های ژئومورفومتری دارای تغییرات فصلی مشخصی است، به طوری که شاخص‌های توپوگرافی مختلف در دوره‌های بهار، تابستان و پاییز بر اساس تغییر در محتوای رطوبت خاک اثربخشی متفاوتی از خود نشان می‌دهند (Song et al., 2013). چاترچی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۰) شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص زبری سطح زمین و TWI موثرترین متغیرهای ژئومورفومتری بر پویایی و پراکنش رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعاتی خود معرفی نمودند تجمع نواحی مرطوب اغلب در قسمت‌های کم ارتفاع و پست با میزان شاخص TWI بالا و نواحی خشک با محتوای رطوبت کمتر در اراضی مرتفع و شیبدار با میزان شاخص TWI پایین واقع شده‌اند که این یافته با نتیجه رادولا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. آنها دریافتند که شاخص خیزی توپوگرافی بهتر می‌تواند تغییر پذیری رطوبت خاک را نسبت به شاخص‌های زیستی حضور/عدم حضور گونه‌های گیاهی (EIV<sup>۳</sup>) نشان دهد و مقدار TWI در اراضی شیبدار اغلب کمتر از اراضی مسطح می‌باشد. مکان آبراهه‌ها که از لحاظ توپوگرافی در هر طرف محصور شده‌اند، کمترین توان در معرض باد قرار گرفتن را دارند. همچنین قله کوه‌ها و نواحی مرتفع و دشت‌های غیر محصور بیشترین پتانسیل در معرض باد قرار گرفتن را دارند (بوهنر و آنتونیک<sup>۴</sup>، ۲۰۰۹). شاخص در معرض باد قرار گرفتن بر روی محتوای رطوبت خاک و فراهمی آن در طی دوره رشد تأثیرگذار می‌باشد؛ به سبب آن در مناطق با ارزش عددی بالا شاخص WEI، محتوای رطوبت خاک روبه کاهش می‌باشد مگر اینکه این کاهش از طریق بارش‌های جوی و یا خصوصیات ذاتی خاک که از تبخیر جلوگیری می‌نماید جبران گردد (Mousavi et al., 2021). زیر حوضه میاندوآب نسبت به سایر زیر حوضه‌ها مقادیر نزدیک به صفر بیشتری از شاخص TPI دارد و همچنین همین اراضی دارای مقادیر بالاتری از شاخص TWI می‌باشند. این زیر حوضه دارای مقادیر متوسط (۰/۸۶ تا ۰/۹۶) WEI است. زیر حوضه سقر و صائین قلعه نسبت به وسعت‌شان بیشترین اراضی در معرض باد را دارند. با تکیه بر این نتایج می‌توان گفت که هرچه اراضی بیشتر در معرض وزش باد باشند محتوای رطوبت آنها نیز به مرور کاهش می‌یابد. این نتیجه با نتایج لی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد آن‌ها گزارش نمودند

1. Chatterjee

2. Radula

3. Ellenberg's indicator values (EIV)

4. Boehner Antonic

5. Li

که نواحی مرطوب اغلب در قسمت‌های کم ارتفاع و پست و نواحی خشک با محتوای رطوبت کمتر در اراضی مرتفع و شیبدار واقع شده است و این شاخص‌ها به خوبی نواحی مرطوب و خشک را در طی تغییرات مکانی رطوبت خاک شناسایی می‌کنند. بر این اساس عوارض سطح زمین بر دامنه نوسان محتوای رطوبت خاک موثر هستند. گواراو وارگس<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) به این نتیجه رسیدند که ترکیب روش‌های ژئومورفومتری و برآوردهای رطوبت خاک ماهواره‌ای برای افزایش وضوح مکانی و صحت رطوبت خاک استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مفید می‌باشد. همچنین نتایج پژوهش حاضر با جوادی و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر اهمیت نسبی پارمترهای توپوگرافی در مدل‌سازی رطوبت خاک در اعماق سطحی و پایین تر مطابقت دارد و کارایی بالای مدل جنگل تصادفی در این مطالعات تاکید می‌گردد. با توجه به یافته‌های این پژوهش درک و تحلیل پویایی رطوبت خاک بدون لحاظ نمودن ویژگی‌های ژئومورفومتری-هیدرولوژی، به‌ویژه شاخص‌های خبسی توپوگرافی، موقعیت توپوگرافی، در معرض قرارگیری باد به همراه جهت و تجمع جریان ناکامل خواهد بود بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیران منابع طبیعی و سیاستگذاران در پیش‌بینی خشکسالی‌های مبتنی بر رطوبت خاک، بهینه‌سازی اقدامات حفاظتی خاک و آبخیزداری در سطح حوضه و کنترل فرسایش و مدل‌سازی هیدرولوژیکی (پیش‌بینی رواناب و سیل) با توجه به غالبیت کاربری مرتع و کشاورزی دیم مفید باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، این شاخص‌ها در کنار داده‌های اقلیمی و خصوصیات فیزیکی خاک در مدل‌های یادگیری ماشین و سنجش‌ازدور تلفیق شوند تا پیش‌بینی رطوبت خاک با دقت و وضوح بالاتر برای مدیریت سازگار با تغییر اقلیم و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی فراهم گردد.

## References

- Ahmadaali, J., Barani, G. A., Qaderi, K., & Hessari, B. (2018). Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia Lake Basin, Iran. *Water*, 10(2), 160.
- Beaudette, D. E., Dahlgren, R. A., & O'Geen, A. T. (2013). Terrain-shape indices for modeling soil moisture dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1696-1710.
- Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol. Sci. J.* 24 (1), 43-69.
- Boehner, J., & Antonic, O. (2009): Land-surface parameters specific to topo-climatology. In: Hengl, T., Reuter, H. [Eds.]: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, Volume 33, p.195-226, Elsevier.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32. <https://10.1023/A:1010933404324>.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., & Hasenauer, S. (2010). ASCAT soil wetness index validation through in situ and modeled soil moisture data in central Italy. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2745-2755.
- Chatterjee, S., Huang, J., & Hartemink, A. E. (2020). Establishing an Empirical Model for Surface Soil Moisture Retrieval at the US Climate Reference Network Using Sentinel-1 Backscatter and Ancillary Data. *Remote Sensing*, 12(8), 1242.
- Emadi, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Cherati, A., Danesh, M., Mosavi, A., & Scholten, T. (2020). Predicting and mapping of soil organic carbon using machine learning algorithms in Northern Iran. *Remote Sensing*, 12(14), 2234.
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., ... & Van Zyl, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in soil science*, 33, 171-194.
- Guevara, M., & Vargas, R. (2019). Downscaling satellite soil moisture using geomorphometry and machine learning. *PloS one*, 14(9), e0219639.
- Hengl, T., & Reuter, H. I. (Eds.). (2008). *Geomorphometry: concepts, software, applications* (Vol. 33). Newnes.
- Iran Ministry of Energy. (2013). Deputy of Water and Waste Water, Macro Planning Bureau. The Comprehensive Water Management in the Aras, Sefidrood, between Sefidrood and Haraz, Atrac and Urmia Basins Agricultural Water Use. Study in Urmia Lake Basin; Report Number: 2385070-4420-19464; Iran Ministry of Energy: Tehran, Iran.

- Javadi, P., Asadi, H., & Vazifehdoust, M. (2022). Prediction of spatial variations of soil moisture using random forest method and environmental features derived from satellite images in Marghab Basin of Khuzestan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2859-2874.
- Li, B., & Rodell, M. (2013). Spatial variability and its scale dependency of observed and modeled soil moisture over different climate regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1177-1188.
- 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.
- Li, X., Shao, M. A., Zhao, C., Liu, T., Jia, X., & Ma, C. (2019). Regional spatial variability of root-zone soil moisture in arid regions and the driving factors—a case study of Xinjiang, China. *Canadian Journal of Soil Science*, 99(3), 277-291.
- Luca, C., Si, B. C., & Farrell, R. E. (2007). Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. *Canadian journal of soil science*, 87(3), 291-300.
- Moeslund, J. E., Arge, L., Bøcher, P. K., Dalgaard, T., Ejrnæs, R., Odgaard, M. V., & Svenning, J. C. (2013). Topographically controlled soil moisture drives plant diversity patterns within grasslands. *Biodiversity and conservation*, 22(10), 2151-2166.
- Moeslund, J. E., Arge, L., Bøcher, P. K., Dalgaard, T., Odgaard, M. V., Nygaard, B., & Svenning, J. C. (2013). Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region. *Ecosphere*, 4(7), 1-26.
- Molaeinasab, M., Moradpour, M., & Karimi, P. (2025). Predicting soil chemical characteristics in the arid region of central Iran using remote sensing and machine-learning models. *Scientific Reports*, 15, 4562. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-04554-8>
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Omid, M. & Bogaert, P. (2021). Modeling the Vertical Soil Calcium Carbonate Equivalent Variation by Machine Learning Algorithms in Qazvin Plain. *Water and Soil*, 35(5), 719-734. doi: 10.22067/jsw.2021.71748.1076.
- Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Rahmani, A., & Khamoshi, S. E. (2019). Digital soil mapping with regression tree classification approaches by RS and geomorphometry covariate in the Qazvin Plain, Iran. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 773-777.
- Nazeri, P., Ayoubi, S., Khademi, H., Afshar, F. A., & Mousavi, R. (2024). Machine learning-based soil aggregation assessment under four scenarios in northwestern Iran. *International Agrophysics*, 38(3), 293-310.
- Raduła, M. W., Szymura, T. H., & Szymura, M. (2018). Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological indicators*, 85, 172-179.
- Rahmani, A., Sarmadian, F., Mousavi, S. R. & Khamoshi, S. E. (2020). Application of Geomorphometric attributes in digital soil mapping by using of machine learning and fuzzy logic approaches. *Journal of Range and Watershed Managment*, 73(1), 105-124. doi: 10.22059/jrwm.2020.288580.1418
- Rosenbaum, U., Bogen, H. R., Herbst, M., Huisman, J. A., Peterson, T. J., Weuthen, A., ... & Vereecken, H. (2012). Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale. *Water resources research*, 48(10).
- Shahabi, A., Nabiollahi, K., Davari, M., Zeraatpisheh, M., Heung, B., Scholten, T., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2022). Spatial prediction of soil properties through hybridized random forest model and combination of reflectance spectroscopy and environmental covariates. *Geocarto International*, 37(27), 18172-18195.
- Song, T. B., Kim, S. H., Lee, Y. H., & Jung, S. W. (2013). Spatio-temporal regression analysis between soil moisture measurements and terrain attributes at hillslope scale. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 15(3).
- Urmia Lake Restoration National Committee. Necessity of Lake Urmia Resuscitation, Causes of Drought and Threats; Report No: ULRP-6-4-3-Rep 1; Urmia Lake Restoration National Committee: Tehran, Iran, 2015.
- Vereecken, H. Huisman, J.A. Bogen, H. Vanderborgh, J. Vrugt, J.A. and Hopmans, J.W. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44(4).
- Weiss, A.D. (2000): Topographic Position and Landforms Analysis. Poster [http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc\\_18x22.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf).
- Western, A. W., Grayson, R. B., Blöschl, G., Willgoose, G. R., & McMahon, T. A. (1999). Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water resources research*, 35(3), 797-810.
- Wood, W., Reynolds, J., Cunningham, G., Huenneke, L., Jarrell, W., Virginia, R., & Whitford, W. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 24, 1043-1048.

Zaman, M. R., Morid, S. & Delavar, M. (2016). Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the iminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems*, 147, 98-110.

Zhu, Q., & Lin, H. (2011). Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales. *Geoderma*, 163(1-2), 45-54.

Zhu, Q., Liao, K., Xu, Y., Yang, G., Wu, S., & Zhou, S. (2013). Monitoring and prediction of soil moisture spatial-temporal variations from a hydrogeological perspective: a review. *Soil Research*, 50(8), 625-637.