



## Estimation of Soil Surface Moisture in Agricultural Lands Using Satellite Images and Remote Sensing Indicators (Case Study: Shushtar County)

Mohammad Abiyat<sup>1</sup>, Mostefa Abiyat<sup>✉2</sup>, Morteza Abiyat<sup>2</sup>

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Email: [m.abiat20@gmail.com](mailto:m.abiat20@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Geography and Rural Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran. Email: [mostefa.abiyat@gmail.com](mailto:mostefa.abiyat@gmail.com)

3. Department of Geography and Rural Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran.

Email: [morteza.abiyat@yahoo.com](mailto:morteza.abiyat@yahoo.com)

---

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Apr. 21, 2022

**Received:** May. 19, 2022

**Accepted:** May. 22, 2022

**Published online:** July. 23, 2022

**Keywords:**

Estimation,  
Soil,  
Moisture,  
Index,  
Shushtar.

Estimation of soil moisture is essential for optimal management of water and soil resources. Landsat images with appropriate spatial and temporal resolution are good tools for these studies. The purpose of this study is to estimate and zoning the soil surface moisture in agricultural lands of Shushtar County in Khuzestan province using remote sensing indicators. To do this, first 25 soil samples of agricultural lands were taken from a depth of 0-15 cm and their moisture was measured. Then, normalized vegetation difference index (NDVI), soil reflection adjustment index (SAVI), surface temperature (LST), normalized moisture difference index (NDMI), normalized agricultural differential index (NDTI) and soil moisture index Infrared short band ( $SM_{SWIR}$ ) were applied to the Landsat 8 Image. In the next step, the values of these indices were transferred to SPSS software for statistical regression and the soil moisture estimation functions were obtained by multivariate linear regression. The results showed; Due to the high coefficient of determination (0.73) and the low root mean square error (1.31) in the simultaneous method (Enter Method), this model was considered suitable for estimating and zoning the surface moisture of agricultural lands in the region. According to the research results, soil surface moisture was directly related to NDVI, SAVI, NDMI, NDTI and  $SM_{SWIR}$  indices and inversely related to LST index. Also, LST index has a better estimate of soil moisture, which indicates a significant effect of this factor on the amount of soil surface moisture.

---

Cite this article: Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2022). Estimation of Soil Surface Moisture in Agricultural Lands Using Satellite Images and Remote Sensing Indicators (Case Study: Shushtar County). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 957-970.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341981.669251>



**برآورد رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور  
(مطالعه موردی: شهرستان شوشتر)**محمد عیبات<sup>۱</sup>، مصطفی عیبات<sup>۲</sup>، مرتضی عیبات<sup>۳</sup>۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: [m.abiat20@gmail.com](mailto:m.abiat20@gmail.com)۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. ایمیل: [mostefa.abiyat@gmail.com](mailto:mostefa.abiyat@gmail.com)۳. گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. ایمیل: [morteza.abiyat@yahoo.com](mailto:morteza.abiyat@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	برآورد رطوبت خاک برای مدیریت بهینه منابع آب و خاک ضروری است. تصاویر لندست با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب، ابزار مناسبی در این مطالعات می‌باشند. هدف این مطالعه، برآورد و پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی شهرستان شوشتر در استان خوزستان با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور می‌باشد. برای این کار، ابتدا ۲۵ نمونه خاک اراضی کشاورزی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری زمین برداشت شده و رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس، شاخص‌های اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص گیاهی با تنظیم انعکاس خاک (SAVI)، دمای سطح زمین (LST)، اختلاف رطوبتی نرمال شده (NDMI)، شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی (NDTI) و شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون‌قرمز (SM <sub>SWIR</sub> ) بر روی تصویر لندست ۸ اعمال شد. در مرحله بعد، مقادیر این شاخص‌ها برای اجرای رگرسیون آماری به نرم‌افزار SPSS منتقل شده و توابع برآورد رطوبت خاک به روش رگرسیون خطی چند متغیره به دست آمد. نتایج نشان داد؛ با توجه به ضریب تبیین بالا (۰/۷۳) و پایین بودن ریشه میانگین مربعات خطا (۱/۳۱) در روش هم‌زمان (Enter Method)، این مدل برای برآورد و پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک اراضی کشاورزی در منطقه مناسب ارزیابی شد. براساس نتایج تحقیق رطوبت سطحی خاک با شاخص‌های SAVI، NDVI، NDMI، NDTI و SM <sub>SWIR</sub> رابطه مستقیم و با شاخص LST رابطه معکوس داشته است. همچنین، شاخص LST، برآورد بهتری از رطوبت خاک داشته که نشان دهنده تأثیر قابل توجه این عامل بر مقادیر رطوبت سطحی خاک می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱	
واژه‌های کلیدی:	
برآورد، خاک، رطوبت، شاخص، شوشتر.	

استناد: عیبات، محمد؛ عیبات، مصطفی؛ و عیبات، مرتضی (۱۴۰۱). برآورد رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: شهرستان شوشتر). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۹۷۰-۹۵۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341981.669251>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

رطوبت خاک یکی از اجزاء مهم مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی است که بخش قابل توجهی از مطالعات مربوط به خشکسالی را نیز به خود اختصاص داده است. این پارامتر، به شدت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متنوع و مقدار آن در هر منطقه نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند (Bagheri et al., 2019). برآورد رطوبت خاک می‌تواند در کنترل بیابان‌زایی، فعالیت‌های کشاورزی، آب‌خیزداری و مدیریت بهینه منابع آب مورد توجه قرار گیرد. از آنجا که کشور ایران با مشکلات زیادی در این زمینه‌ها مواجه است، گسترش مطالعات در زمینه برآورد دقیق رطوبت خاک اهمیت پیدا می‌کند (Mehrabi et al., 2019). امروزه با توجه به پیشرفت‌ها در زمینه سنجش از دور، امکان ارزیابی بسیاری از متغیرها از جمله رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان‌پذیر است. این داده‌ها با داشتن پوشش مکانی و زمانی وسیع، دید جامع و یکنواختی از رطوبت خاک در نواحی مختلف و در زمان‌های گوناگون فراهم می‌آورند. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای مختلف، اطلاعات بسیاری از سطح زمین اخذ می‌گردد که قبلاً به سادگی قابل دسترس نبودند و می‌توان این اطلاعات را در بازه‌های زمانی مشخص به روز نمود. بنابراین، وجود فناوری و مدل‌های قابل اعتمادی برای محاسبه رطوبت خاک سطحی با توزیع مکانی و زمانی گسترده و کم هزینه، ضروری هست. فناوری سنجش از دور با داشتن این ویژگی‌ها و قابلیت‌های خاص در زمینه مختلف از جمله تخمین متغیرهای هیدرولوژیکی، روش مناسبی برای برآورد رطوبت سطحی خاک به شمار می‌رود (Nasrabadi et al., 2020). پژوهش‌های متعددی در زمینه پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک با استفاده از داده‌های دورسنجی انجام شده است. Wang and Qu (2009) با تلفیق داده‌های رطوبت خاک زمینی با شاخص‌های اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)<sup>۱</sup> و دمای سطح زمین (LST)<sup>۲</sup> حاصل از محصولات شاخص گیاهی و دمای سطحی سنجنده مودیس<sup>۳</sup>، روابط رگرسیونی را برای برآورد رطوبت خاک به دست آوردند که نتایج حاصله، همبستگی بالایی را با مشاهدات زمینی نشان داده است. Zhao et al., 2010 در چین از مقایسه نتایج میدانی رطوبت خاک با مقادیر تخمین زده شده و کاربرد تصاویر مودیس، به یک مدل لگاریتمی دست یافتند که قادر است در اراضی با پوشش گیاهی فقیر، رطوبت را به کمک مقادیر LST و NDVI با دقت قابل‌قبولی تخمین بزند. Bai et al. (2020) به تخمین توزیع منطقه‌ای رطوبت سطحی خاک در بالادست حوضه آبخیز رودخانه هیبه<sup>۴</sup> در شمال غربی کشور چین با استفاده از داده‌های سری زمانی NDVI و LST سنجنده مودیس پرداخته‌اند. براساس نتایج به دست آمده، ضریب همبستگی R معادلات رگرسیون بین ۰/۴۷ تا ۰/۹۴ و خطای RMSE<sup>۵</sup> حدود ۰/۰۳ بود که نشان‌دهنده مناسب بودن روش برآورد رطوبت خاک بر مبنای داده‌های NDVI و LST سنجنده مودیس است و می‌توان از آن برای مناطق کوهستانی آلبی با شرایط پیچیده توپوگرافی، خاک و پوشش گیاهی استفاده کرد. همچنین، الگوی کلی توزیع مکانی رطوبت خاک نشان داد که رطوبت خاک در منطقه شرقی بیش‌تر از منطقه غربی بوده و میزان رطوبت خاک در کل منطقه مورد مطالعه ۱۴/۵ درصد می‌باشد. Khanmohammadi et al. (2015) به برآورد رطوبت خاک سطحی شهرستان ورامین در جنوب شرقی تهران با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک، شاخص نرمال شده و تصاویر سنجنده مودیس پرداخته‌اند. نتایج نشان داد؛ بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDVI، NDMI<sup>۶</sup> و LST همبستگی مناسبی (۶۶ درصد) وجود دارد. نتایج صحت‌سنجی مدل برآورد رطوبت خاک نیز نشان داد که این مدل با میانگین خطای کمتر از ۰/۰۱۸، قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی است. Khazaei et al. (2017) با هدف بررسی امکان برآورد رطوبت لایه سطحی خاک شهرستان گنبدکاووس با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مقایسه آن با داده‌های زمینی، از نمایه‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین استفاده کردند. یافته‌های پژوهش نشان داد که همبستگی معنی‌دار ولی ضعیفی بین نمایه‌های گیاهی NDVI، NMDI<sup>۷</sup> و رطوبت خاک وجود دارد (R=۰/۶۲). در حالی که همبستگی منفی و بسیار معنی‌داری (R= -۰/۸۹؛ p ≤ ۰/۰۱) برای نمایه LST و همچنین دمای باندهای گرمایی ۳۱ و ۳۲ سنجنده با رطوبت خاک دیده شد. Koohbanani and Yazdani (2018) به پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی در حومه شهر سمنان با استفاده از تصاویر لندست ۸ پرداخته‌اند. در این تحقیق شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون‌قرمز با ضریب همبستگی ۰/۷۸ و ضریب تبیین مدل رگرسیونی ۰/۶۱، شاخص مناسبی برای پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک در مناطق خشک و بیابانی ارزیابی گردید. به علاوه،

1. Normalized Difference Vegetation Index  
 2. Land Surface Temperature  
 3. MODIS  
 4. Heihe  
 5. Root Mean Square Error  
 6. Normalized Difference Moisture Index  
 7. Normalized Multi-band Drought Index

یافته‌ها نشان از برتری مدل رگرسیونی هم‌زمان در تهیه نقشه رطوبت خاک سطحی دارد. Hosseini and Farrokhian (2019) به برآورد رطوبت خاک سطحی در منطقه دهدز در استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های نرمال شده رطوبت، پوشش گیاهی نرمال شده و دمای سطح زمین پرداخته‌اند. نتایج نشان داد؛ بین مقادیر رطوبت خاک سطحی با شاخص‌های NDVI، NDMI و LST همبستگی ۷۸ درصدی وجود دارد. Mehrabi *et al.* (2019) به برآورد رطوبت خاک در حاشیه تالاب شادگان با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و سامانه بیلان انرژی سطح پرداخته‌اند. نتایج نشان دهنده توانایی بالای مدل مورد نظر با میزان ضریب تعیین  $0.69$  و مقدار خطای RMSE برابر با  $0.03$ ، در برآورد رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه است. به علاوه، یافته‌ها نشان داد که استفاده ترکیبی از داده‌های سنجنش از دور و مدل بیلان انرژی سطح و مدل تجربی رطوبت خاک، می‌تواند برای مدل‌سازی رطوبت خاک در سطح وسیع مورد استفاده قرار گیرد. Shahmoradi *et al.* (2021) با استفاده از نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی و تصاویر مودیس، شاخص رطوبت سطحی خاک (TVDI) را برای استان آذربایجان غربی استخراج کردند. نتایج به دست آمده از مدل برآورد شاخص رطوبتی سطحی خاک در این پژوهش نشان داد که این مدل قادر به برآورد مقدار رطوبت خاک در پهنه‌های وسیع جغرافیایی با دقت قابل قبول است. شهرستان شوشتر از مناطق مهم تولید محصولات کشاورزی در استان خوزستان به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر به دلیل وقوع خشکسالی و کاهش نزولات جوی، منابع آب زیرزمینی و سطحی در این شهرستان افت شدیدی داشته که بر کشاورزی این منطقه تأثیر می‌گذارد. بنابراین هدف از این مطالعه، برآورد و پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک در شهرستان شوشتر با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های سنجنش از دور می‌باشد.

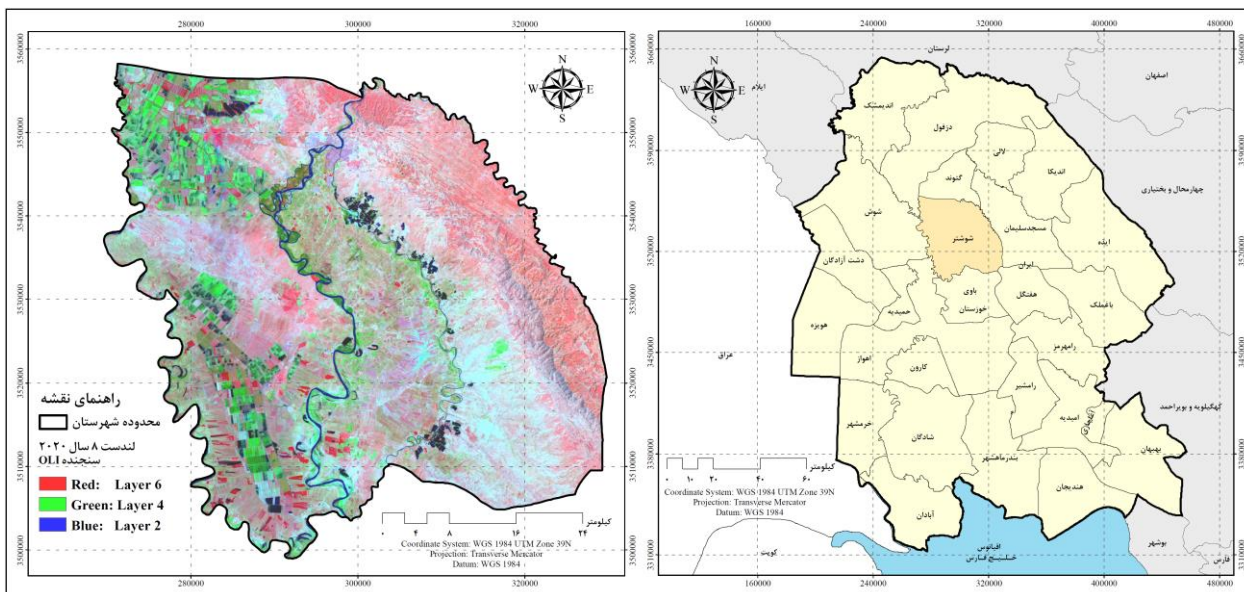
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

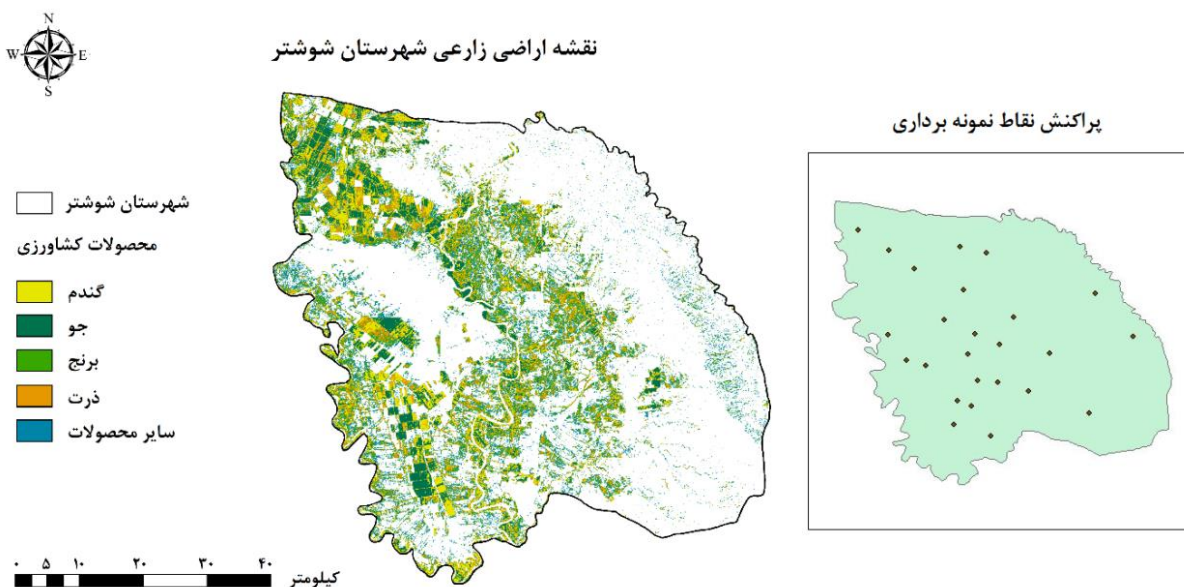
این مطالعه در سال ۱۴۰۰ و در محدوده شهرستان شوشتر در استان خوزستان در جنوب غربی ایران به انجام رسیده است. شهرستان شوشتر با وسعت  $340645/2$  هکتار در شمال خوزستان قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی این شهرستان حد فاصل  $48$  درجه و  $33$  دقیقه تا  $49$  درجه و  $12$  دقیقه طول شرقی و  $31$  درجه و  $36$  دقیقه تا  $32$  درجه و  $26$  دقیقه عرض شمالی است. متوسط بارندگی سالانه  $322$  میلی‌متر است که حداکثر نزولات جوی در ماه‌های دی و بهمن ماه بوده است (Mombeni and Asgari, 2018). این شهرستان با جمعیت  $192028$  نفر (سرشماری سال ۱۳۹۵)، در ارتفاع  $110$  متری از سطح دریا قرار دارد و با توجه به فاصله نسبتاً زیاد آن از خلیج فارس، با بهره‌مندی از رطوبت کمتر، دارای آب و هوای گرم و نیمه مرطوب است (Merdasi *et al.*, 2018). حداکثر درجه حرارت مطلق برابر  $52$  درجه و حداقل آن برابر  $-6$  درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه گزارش شده است (Torkizadeh and Eslami, 2020). از نظر زمین‌شناسی، سازندهای این محدوده مربوط به گروه فارس، متشکل از ماسه‌سنگ، مارن، آهک و رسوبات تبخیری در دوره نئوژن می‌باشند. سازندهای بختیاری و آغاچاری به عنوان سنگ‌بستر محدوده مورد مطالعه قرار می‌گیرند (Dahrazma *et al.*, 2014).

### روش پژوهش

برای برآورد و پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک از شاخص‌های اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص گیاهی با تنظیم انعکاس خاک (SAVI)، دمای سطح زمین (LST)، اختلاف رطوبتی نرمال شده (NDMI)، شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی (NDTI) و شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون‌قرمز (SM<sub>SWIR</sub>) استفاده شد. لازم به ذکر است که این شاخص‌ها براساس مطالعات انجام شده توسط سایر محققین و ارتباط شاخص‌های گیاهی و بیوفیزیکی با رطوبت سطح خاک انتخاب شده است. در این پژوهش، برای آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، از روش آماری کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) استفاده شد که پیش‌فرض انتخاب نمونه‌های کمتر از  $30$  را مبنای نرمال بودن داده‌ها در نظر می‌گیرد (Pourtaheri, 2016). بنابراین، تعداد  $25$  نمونه خاک سطحی اراضی کشاورزی با وزن حدود  $500$  گرم هم‌زمان زمان با فصل رشد محصولات گندم و جو از عمق  $15-0$  سانتی‌متری سطح زمین به طور تصادفی برداشت شده و مقادیر رطوبت آن‌ها به روش وزنی و از طریق خشک کردن نمونه‌ها با درجه حرارت  $105$  درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نقشه محصولات کشاورزی منطقه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (ترکیب رنگی کاذب ۲-۴-۶ تصویر لندست ۸ مربوط به تاریخ ۱۲ فوریه ۲۰۲۰)

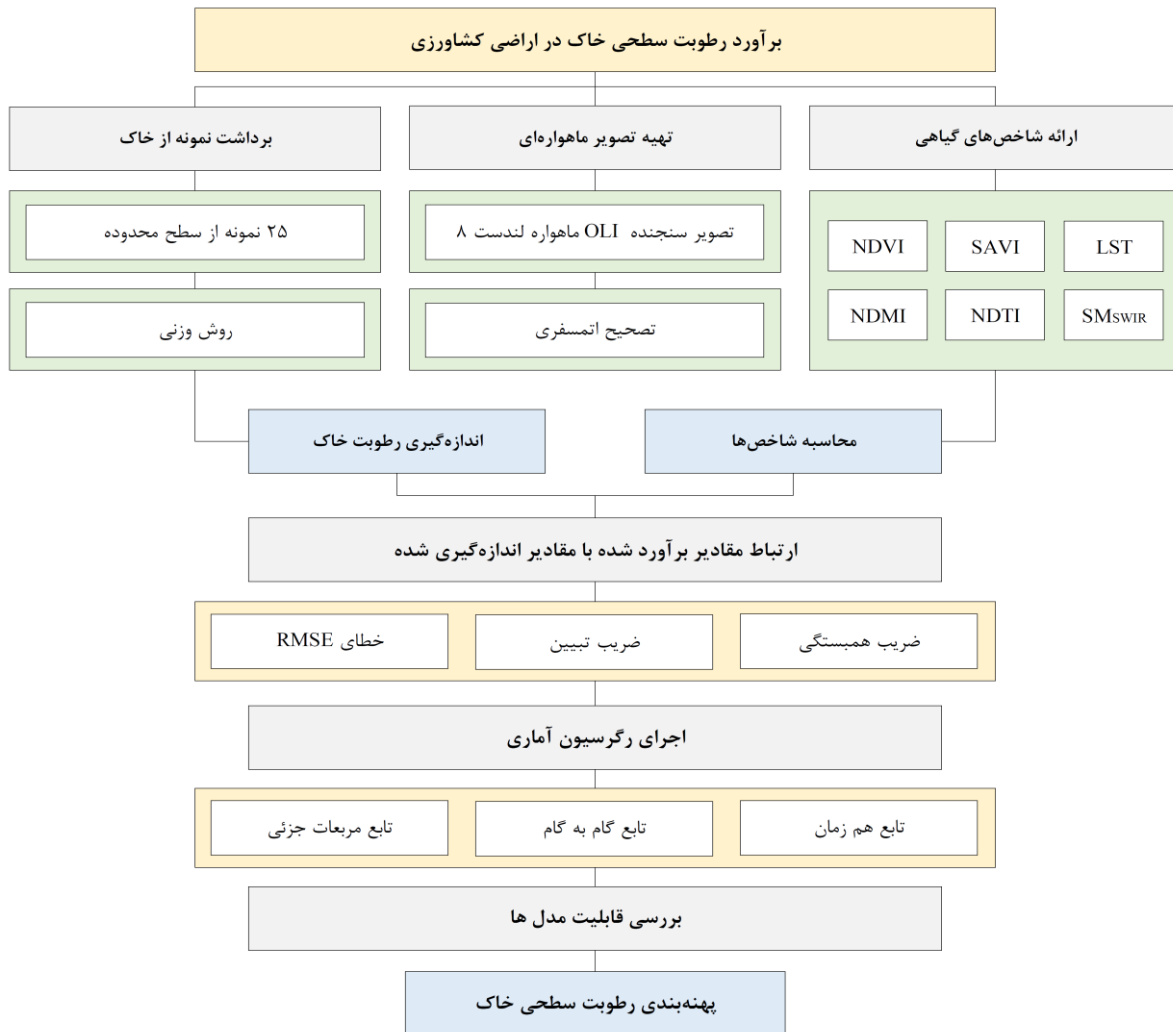


شکل ۲. نقشه اراضی کشاورزی و پراکنش نقاط نمونه برداری از خاک در منطقه مورد مطالعه

تصاویر لندست، به دلیل قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب و دسترسی رایگان به آرشیو کامل، مورد توجه پژوهشگران واقع شده است (Koohbanani and Yazdani, 2018). در این پژوهش، تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به تاریخ ۱۲ فوریه ۲۰۲۰، از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)) استخراج گردید. رطوبت سطحی خاک به شدت تحت تأثیر تبخیر و تعرق روزانه باد و جریانات هوایی تغییر می کند (Ghulam et al., 2007). لذا، زمان گذر ماهواره و تصویر انتخاب شده با زمان نمونه گیری انطباق داده شد. با توجه به اینکه هیچ نوع خطای رادیومتریک در تصویر منطقه مورد مطالعه دیده نشد، هیچ گونه تصحیح رادیومتریک روی تصویر ماهواره ای اخذ شده انجام نگرفت. تصحیحات اتمسفری بر روی تصویر ماهواره ای با روش FLAASH در نرم افزار ENVI انجام شد. الگوریتم تصحیح اتمسفری FLAASH با فرض حضور پیکسل های تیره<sup>۱</sup> که قادر است به عنوان پیکسل مرجع با بازتاب سطحی مشخص در نظر گرفته شود، انجام می شود. در این روش مقدار غبار، مه و ذرات معلق در جو برآورد و بازبایی می شوند (Pordel et al., 2019). پس از محاسبه مقادیر بازتابش باندهای طیفی، شاخص های به کار رفته در این پژوهش با کمک نرم افزارهای ENVI و GIS به دست آمدند



که در ادامه، روش شناسی هریک از شاخص‌ها ارائه می‌شود. شکل ۳، مدل مفهومی تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مدل مفهومی پژوهش

### شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده (NDVI)

این شاخص گیاهی از معروف‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های گیاهی شناخته شده تا به امروز است. این شاخص برای اولین بار توسط روس (۱۹۷۳) ارائه شد. فرمول محاسبه این شاخص عبارت است از (Rouse *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن، RED باند قرمز، NIR مادون قرمز نزدیک است که در ماهواره لندست ۸ باندهای شماره ۴ و ۵ می‌باشند. این اندیس همان‌طور که از نام آن پیداست مقادیر نرمال دارد، یعنی دارای قدر مطلق کوچک‌تر یا مساوی یک می‌باشد. از این‌رو، بررسی آن توسط نمودارها و هیستوگرام‌ها به راحتی امکان‌پذیر است. مقدار اندیس گیاهی NDVI برای مناطق تنک بین ۰/۰۵ تا ۰/۱، برای مناطق گیاهی معمولی بین ۰/۱ تا ۰/۶ و برای مناطق گیاهی بسیار متراکم و غنی بین ۰/۶ تا ۰/۷ است. مقدار آن برای آب، برف و یخ منفی است. برای خاک‌ها دارای مقادیر کمتر از ۰/۰۵ و برای ابرها معمولاً برابر صفر است (Hosseini and Farrokhan, 2019).

### شاخص گیاهی با تنظیم انعکاس خاک (SAVI)

از اهداف این شاخص به حداقل رساندن اثرات خاک پی‌زمینه بر روی سیگنال‌های پوشش گیاهی به وسیله ترکیب کردن فاکتور تنظیم‌کننده خاک (L) با مخرج رابطه NDVI می‌باشد. شاخص پوشش گیاهی با تنظیم انعکاس خاک SAVI، یک شاخص گیاهی عالی برای مناطقی با پوشش کم می‌باشد (Nateghi *et al.*, 2017). رابطه این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود (Pettorelli *et al.*, 2005):

$$SAVI = \frac{NIR-R}{(NIR+R+L)(1+L)} \quad \text{رابطه ۲}$$

L: فاکتور تعدیل کننده اثر خاک که معمولاً با سعی و خطا محاسبه می‌شود. اگر L صفر باشد SAVI همانند NDVI می‌باشد. برای مقادیر متوسط پوشش گیاهی L در حدود ۰/۵ می‌باشد. فاکتور (L+۱) تضمین می‌کند که حدود SAVI همانند NDVI بین -۱ تا ۱ باشد.

#### دمای سطح زمین (LST)

محاسبه دمای سطح زمین در تصاویر ماهواره‌ای مختلف، متفاوت می‌باشد. در تصاویر لندست ۸ باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ برای برآورد دمای سطح زمین قابل استفاده هستند. برای این کار نخست DN تصاویر به تابندگی تبدیل (رابطه ۳)، سپس رادیانس به دمای روشنایی تبدیل می‌شود (رابطه ۴).

$$LY = ML \times Qcal + AL \quad \text{رابطه ۳}$$

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، LY تابش طیفی ( $W/m^2/\mu m$ )، ML و AL ضرایب تبدیل مقدار پیکسل به بازتابش‌اند که به ازای هر باند مقادیر متفاوتی دارند. Qcal عدد رقومی باند مربوطه است. T دمای سطح زمین،  $K_1$  و  $K_2$  ثابت حرارتی برای هر باند هستند که به ترتیب واحد آن‌ها  $W/m^2/\mu m$  و درجه کلونین ( $^{\circ}K$ ) است. در سنجنده حرارتی لندست ۸ برای باند ۱۰ مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب برابر با  $774/89$  و  $1321/08$  است و برای باند ۱۱ مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب برابر  $480/89$  و  $1201/14$  است.  $\lambda$  طول موج مرکزی هر باند (میکرومتر) می‌باشد. پارامترهای به کار رفته در رابطه ۳ و ۴ در فایل فراداده تصاویر لندست ۸ وجود دارد. دمای به دست آمده برحسب درجه کلونین می‌باشد، بنابراین برای تبدیل به درجه سانتی‌گراد از ۲۷۳ کم می‌شود. بدین ترتیب دمای سطح زمین (در بالای جو یعنی سنجنده) محاسبه می‌شود (Hosseini and Farrokhan, 2019).

#### شاخص رطوبتی نرمال شده (NDMI)

NDMI یا شاخص اختلاف رطوبتی نرمال شده، از داده‌های باندهای مادون قرمز نزدیک ( $P_{NIR}$ ) و مادون قرمز میانی ( $P_{NIR}$ ) با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Khanmohammadi et al., 2015).

$$NDMI = \frac{P_{NIR} - P_{MIR}}{P_{NIR} + P_{MIR}} \quad \text{رابطه ۵}$$

باندهای مرتبط با طول موج مادون قرمز نزدیک و میانی در ماهواره لندست ۸ به ترتیب در بردارنده باندهای ۵ و ۶ نیز می‌باشند (Van de Griend and Engman, 1985).

#### شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی (NDTI)

شاخص تفاضلی نرمال شده کشاورزی، به عنوان معرف مناسب برای تفکیک باقیمانده محصولات کشاورزی از خاک لخت معرفی شده است (Zhang et al., 2015; Gao et al., 2013). از سوی دیگر، Li et al. (2016) این شاخص را برای شرایط رطوبت سطحی خاک مناسب می‌دانند. Lobell and Asner, (2002) ثابت کردند تا زمانی که رطوبت حجمی خاک تا سطح پایین‌تر از ۵۰٪ باقی بماند، باندهای مادون قرمز کوتاه بهتر از باندهای مادون قرمز نزدیک مرئی می‌توانند رطوبت خاک را نشان دهند؛ لذا، از نگاه این محققان، می‌توان نتیجه گرفت در مناطق خشک و بیابانی باندهای مادون قرمز کوتاه لندست، اطلاعات بهتری در خصوص رطوبت خاک سطحی ارائه می‌دهند. رابطه ۶ برای این شاخص معرفی شده است.

$$NDTI = \frac{P_6 - P_7}{P_6 + P_7} \quad \text{رابطه ۶}$$

$P_6$  و  $P_7$  به ترتیب مقادیر بازتابش باندهای ۶ و ۷ ماهواره لندست ۸ بوده و این دو باند از نوع باند کوتاه مادون قرمز است (Koozbanani and Yazdani, 2018).

#### شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون قرمز ( $SM_{SWIR}$ )

شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون قرمز، یکی دیگر از شاخص‌های مورد مطالعه در این پژوهش است. ماهواره لندست سری ۸، دارای دو باند کوتاه مادون قرمز است. از رابطه ۷، به منظور محاسبه شاخص رطوبت خاک باند کوتاه مادون قرمز استفاده شد:

رابطه ۷)

$$SM_{SWIR} = \frac{P_6}{P_7}$$

این شاخص، از کسر ساده مقادیر انعکاس طیفی دو باند ۶ و ۷ تشکیل می‌شود. در مقادیر مختلف رطوبت خاک، دو افت مهم جذب طیف الکترومغناطیسی در محدوده ۱/۴ تا ۱/۶ و ۱/۹ تا ۲/۱ میکرومتر در الگوی رفتار طیفی خاک مشاهده می‌شود (Fabre et al., 2015). این دو محدوده طیفی، به ترتیب با باندهای ۶ و ۷ لندست ۸ تطابق دارد؛ بنابراین به صورت نظری می‌توان انتظار داشت با کسر ساده این دو باند، رطوبت خاک آشکارسازی شود. پیش از هر چیز برای اندازه‌گیری هریک از شاخص‌های ذکر شده می‌بایست مقادیر خام باندهای طیفی به مقادیر بازتابش یا انعکاسی تبدیل شوند. بازتابندگی سطح به صورت نسبت شار طیفی بازتاب یافته به شار طیفی فرودی تعریف می‌شود (Koohbanani and Yazdani, 2018).

### بررسی روابط همبستگی و معادلات رگرسیونی

پس از محاسبه و استخراج شاخص‌های مورد نظر از روی تصویر ماهواره‌ای، برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، به بررسی رابطه همبستگی هر شاخص با داده‌های میدانی واقعی پرداخته شد. در گام بعدی، با استفاده از معادلات رگرسیون خطی، اقدام به تهیه مدل رطوبت خاک سطحی با استفاده از شاخص‌های مورد مطالعه شد. پس از مطالعه منابع و تحقیقات صورت گرفته در زمینه برآورد و پهنه‌بندی رطوبت خاک، روش رگرسیون چند متغیره<sup>۱</sup>، به عنوان مناسب‌ترین روش جهت پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک تشخیص داده شد. روش رگرسیون چند متغیره، امکان تحلیل هم‌زمان اثر تعدادی متغیر مستقل بر یک متغیر وابسته را فراهم می‌نماید (Eshaghi et al., 2010). جهت انجام مدل رگرسیون چند متغیره و ورود متغیرها در مدل، از برنامه SPSS و سه روش هم‌زمان، گام‌به‌گام و حداقل مربعات جزئی استفاده گردید.

#### روش هم‌زمان<sup>۲</sup>

در این روش، کلیه متغیرهای جمع‌آوری شده، بدون هیچ‌گونه تقدم و تأخری به طور هم‌زمان وارد مدل شده و مدل محاسبه می‌گردد (Mesgari et al., 2020).

#### روش گام‌به‌گام<sup>۳</sup>

این نوع روش از جمله روش‌های مرسوم به منظور انتخاب زیرمجموعه‌ای از متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر یک متغیر تابع می‌باشد (Johnson and Wichern, 1996).

#### روش حداقل مربعات جزئی<sup>۴</sup>

در این روش، مؤلفه‌های جدید متعددی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، ایجاد شده سپس از این مؤلفه‌ها برای ساختن معادله رگرسیونی استفاده می‌شود (Bagheri et al., 2017).

در نهایت، با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی (r)، ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، به ارزیابی قابلیت مدل‌های رگرسیونی در برآورد و تهیه نقشه پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی پرداخته شد. هرچه ضریب تعیین به عدد یک نزدیک شود، عملکرد مدل خوب ارزیابی می‌گردد (Jafari and Dinpasho, 2017).

## یافته‌ها

### سنجش آماری نتایج

برای ارزیابی و مقایسه دقت هریک از شاخص‌ها، از معیارهای ضریب همبستگی پیرسون (r)، ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و ریشه میانگین مربعات خطا یا RMSE (رابطه ۱۰) استفاده شده و در نهایت، معادله همبستگی هریک از شاخص‌ها با مقادیر واقعی محاسبه شد.

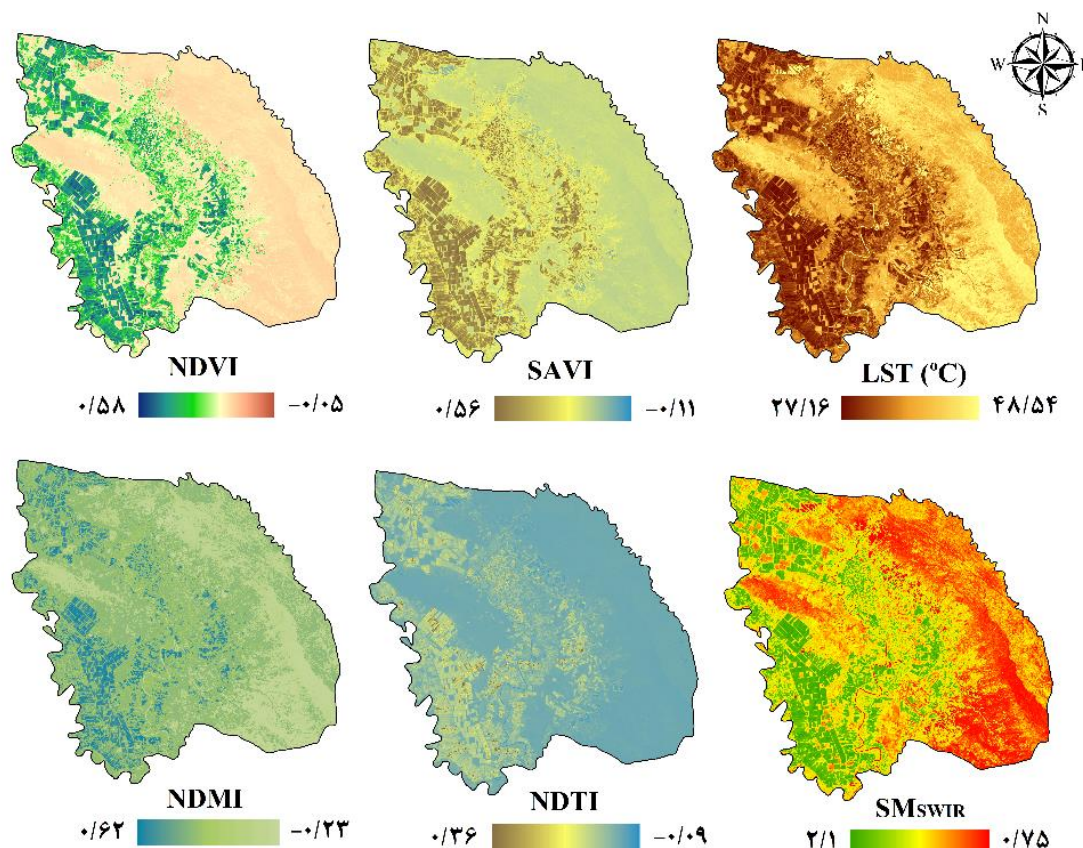
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_m)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه ۱۰، X<sub>p</sub> بیانگر مقادیر برآورد شده به وسیله مدل و X<sub>m</sub> بیانگر مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقدار RMSE همواره مثبت

1. Multivariate Regression
2. Enter Method
3. Stepwise Method
4. Partial Least Squares Regression (PLS)



یا صفر است و با نزدیکی آن به صفر، دقت مدل برای برآورد مقدار رطوبت خاک افزایش می‌یابد (Khanmohammadi *et al.*, 2015). پس از انجام تصحیحات لازم بر روی تصویر ماهواره لندست ۸ منطقه مورد مطالعه، شاخص‌های SAVI، NDVI، NDMI، NDTI و  $SM_{SWIR}$  اعمال شد (شکل ۴).



شکل ۴. شاخص‌های اندازه‌گیری شده از تصویر ماهواره لندست ۸

توزیع نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov)، با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی شد. نتایج این آزمون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمون نرمال بودن شاخص‌های به کار رفته در مدل برآورد رطوبت خاک

		NDVI	SAVI	LST	NDMI	NDTI	$SM_{SWIR}$	M
	N	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
Normal Parameters*	Mean	۰/۳۴	۰/۳۱	۲۳۳/۲۹	-۰/۱۲	۰/۲۴	-۰/۳۹	۰/۳۵
	Std. Deviation	۰/۰۹	۰/۰۸	۵/۲۱	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۸
Most Differences	Extreme Absolute	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۱۸۶	۰/۱۰۷	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۸۳
	Positive	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۲
	Negative	-۰/۱۰	-۰/۱۵	-۰/۲۹	-۰/۱۲	-۰/۱۲	-۰/۱۷	-۰/۰۹
Kolmogorov-Smirnov Z		۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۹۳	۰/۶۶	۰/۵۸	۰/۵	۰/۴۵
Asymp. Sig. (2-tailed)		۰/۸۶	۰/۷۳	۰/۴۲	۰/۷۱۵	۰/۸۵	۰/۶۴	۰/۸۸

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان‌دهنده نرمال بودن داده‌هاست. در مرحله بعد، برای بررسی ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک و شاخص‌های مورد بررسی، آزمون همبستگی پیرسون انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲. همبستگی بین مقادیر رطوبت خاک، NDVI، SAVI، LST، NDMI، NDTI و SM<sub>SWIR</sub>**

	رطوبت خاک	SM <sub>SWIR</sub>	NDTI	NDMI	LST	SAVI	NDVI
NDVI	۰/۲۰۲	۰/۴۶۹	۰/۴۹۸	۰/۵۳۹*	۰/۳۵۵	۰/۴۵۱	۱
SAVI	۰/۲۰۸	۰/۴۷۲	۰/۳۱۷	۰/۵۶۷*	۰/۳۰۳	۱	
LST	-۰/۶۷۳*	۰/۴۴۶	۰/۲۱۸	-۰/۰۲۳	۱		
NDMI	۰/۵۱۲*	۰/۳۲۴	۰/۲۱۵	۱			
NDTI	۰/۴۹۵*	۰/۲۴۸	۱				
SM <sub>SWIR</sub>	۰/۳۳۳*	۱					
رطوبت خاک	۱						

نشان دهنده همبستگی معنی دار در سطح ۵ درصد است.

همان گونه که مشاهده می شود، بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص LST، همبستگی منفی معنی دار در سطح ۵٪ و بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص های NDVI، NDMI، NDTI و SM<sub>SWIR</sub>، همبستگی مثبت معنی دار در سطح ۵٪ و همچنین بین مقادیر NDVI، NDMI، SAVI و همبستگی مثبت معنی دار در سطح ۵٪ وجود دارد. بنابراین نتایج به دست آمده نشان دهنده همبستگی بین مقادیر رطوبت خاک با شاخص های مورد نظر در این پژوهش است. پس از محاسبه شاخص ها و آزمون آن ها، به منظور برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از شاخص های NDVI، SAVI، LST، NDMI، NDTI و SM<sub>SWIR</sub>، به کمک نرم افزار SPSS رابطه رگرسیونی بین مقادیر رطوبت سطحی خاک و شاخص های ذکر شده، برقرار شد (جدول ۳).

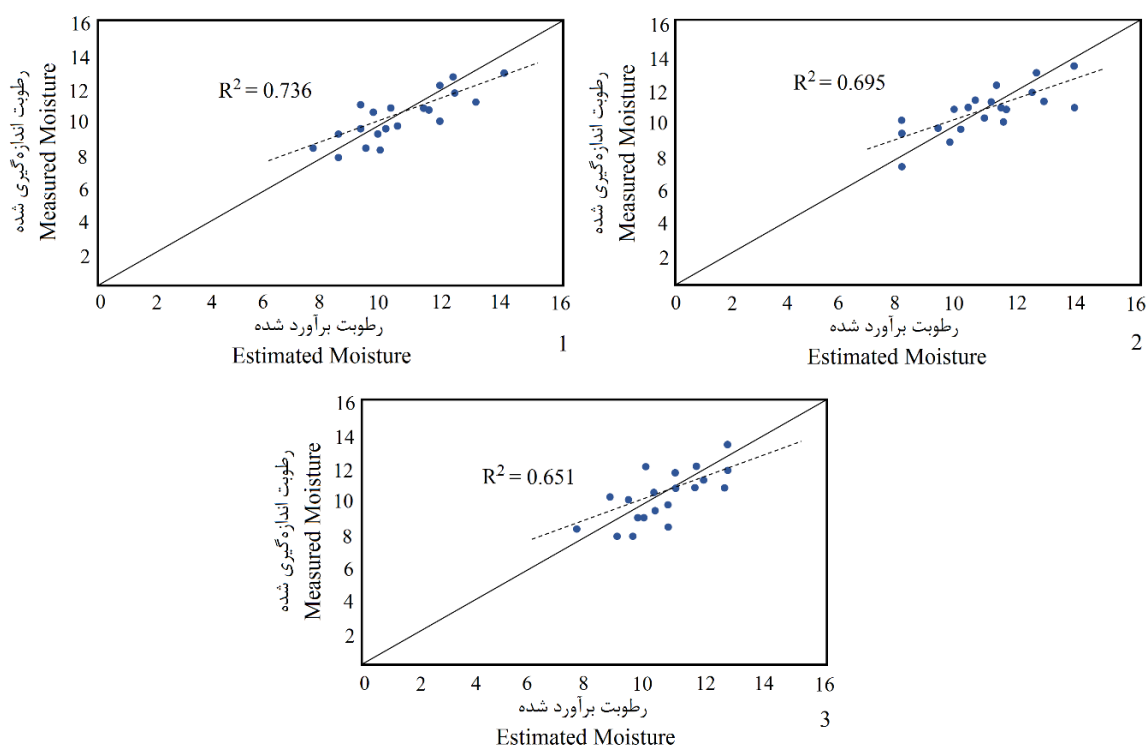
**جدول ۳. مقایسه نتایج شاخص های مورد استفاده در پژوهش با داده های میدانی**

شاخص	رابطه همبستگی	r	R <sup>2</sup>	t	RMSE	P
NDVI	$y = 56/14x + 18$	۰/۸۳	۰/۷۰	۲/۶۵	۴/۴۳	≤۰/۰۵
SAVI	$y = 49/22x - 0/98$	۰/۸۲	۰/۶۸	۱/۴۴	۶/۲۸	≤۰/۰۵
LST	$y = -73/22x + 54$	-۰/۸۵	۰/۷۳	-۴/۲۷	۳/۵۲	≤۰/۰۵
NDMI	$y = 52/68x + 0/14$	۰/۸۳	۰/۶۹	۲/۵۴	۵/۱۷	≤۰/۰۵
NDTI	$y = 57/22x - 0/31$	۰/۸۰	۰/۶۵	۰/۲۳	۵/۸۱	≤۰/۰۵
SM <sub>SWIR</sub>	$y = 58/66x + 26$	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۸۶	۷/۵۵	≤۰/۰۵

براساس این جدول، مقادیر ضریب تبیین برای روابط رگرسیونی، بالای ۰/۶۵ بود که نشان دهنده برآورد مناسب رطوبت خاک به وسیله مدل می باشد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است شاخص دمای سطح زمین با ضریب همبستگی ۰/۸۵- در سطح معنی داری ۵٪ با اختلاف اندکی نسبت به شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده (NDVI) و شاخص رطوبتی نرمال شده (NDMI) قرار دارد. ضریب تبیین مدل رگرسیونی این شاخص ۰/۷۳ و ریشه میانگین مربعات خطای نتایج حاصله از مدل رگرسیونی و داده های واقعی ۳/۵۲ برآورد شد. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل رگرسیونی حاصل از شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده (NDVI) و شاخص رطوبتی نرمال شده (NDMI) با داده های میدانی نیز به ترتیب ۴/۴۳ و ۵/۱۷ محاسبه شد. به منظور ایجاد مدل های خطی اندازه گیری رطوبت سطحی خاک با استفاده از شاخص های سنجش از دور، از روش رگرسیون خطی چند متغیره (شکل ۵) شامل روش های هم زمان (Enter Method)، گام به گام (Stepwise Method) و حداقل مربعات جزئی (PLS) برای برازش داده ها بهره گرفته شد (جدول ۴). با استفاده از آزمون نرمال بودن به روش کولموگروف-اسمیرنوف، هر سه مدل در سطح معناداری بالاتر از ۵٪ واقع شده اند. که نشان از توزیع نرمال داده هاست.

**جدول ۴. مقایسه نتایج شاخص های مورد استفاده در پژوهش با داده های میدانی**

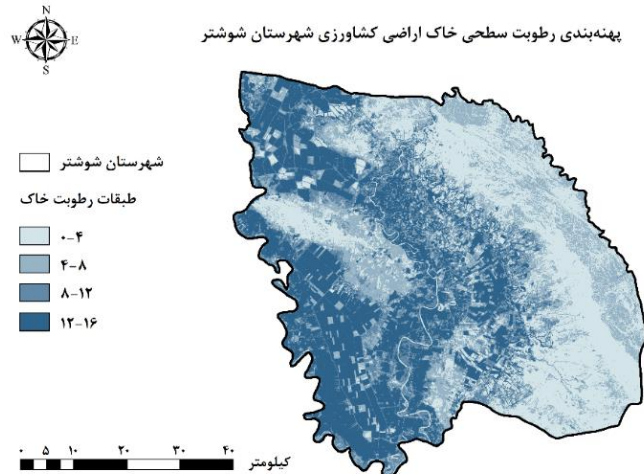
مدل	تابع	رابطه رگرسیونی	r	R <sup>2</sup>	RMSE	P
۱	هم زمان (Enter)	$0/83LST + 193/64SAVI + 59NDVI + 138/25 + 88/23$ $SM_{SWIR} + 0/62NDTI + 49/36NDMI +$	۰/۸۵	۰/۷۳	۱/۳۱	≤۰/۰۵
۲	گام به گام (Stepwise)	$0/107LST + 126/12SAVI + 198NDVI + 94/13 + 71/72$ $SM_{SWIR} + 1/33NDTI + 15/82NDMI +$	۰/۸۳	۰/۶۹	۳/۶۶	≤۰/۰۵
۳	حداقل مربعات جزئی (PLS)	$5/141LST + 133/12SAVI + 26/71NDVI + 97/63 + 112/07$ $SM_{SWIR} + 2/09NDTI + 78/16NDMI +$	۰/۸۰	۰/۶۵	۳/۹۴	≤۰/۰۵



شکل ۵. مقایسه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده  
 ۱: تابع هم زمان (Enter)، ۲: تابع گام به گام (Stepwise)، ۳: تابع حداقل مربعات جزئی (PLS)

بررسی اوزان شاخص‌های مورد بررسی در روابط رگرسیونی به دست آمده نشان می‌دهد که در هر تابع بیش‌ترین وزن مربوط به دمای سطح زمین بوده است؛ به طوری که مقادیر این شاخص در توابع هم زمان، گام به گام و حداقل مربعات جزئی به ترتیب ۱۹۳/۶۴-، ۱۲۶/۱۲- و ۱۳۳/۱۲- بوده است که نشان‌دهنده تأثیر منفی دمای سطح زمین بر رطوبت سطحی خاک است، به طوری که با افزایش دما میزان تبخیر و تعرق بالا رفته و رطوبت سطحی خاک کاهش پیدا می‌کند، لذا بر فعالیت‌های زیستی و متابولیکی گیاهان اثرگذار خواهد بود که به تبع آن تولید محصولات زراعی نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. در همین راستا، Van de Griend and Engman. (1985) به این نتیجه رسید که تغییرات رطوبت خاک، تأثیرات زیادی بر ویژگی‌های حرارتی خاک دارد. به عبارت دیگر، تغییرات روزانه دما، همبستگی بالایی با مقدار رطوبت خاک دارد.

شاخص‌های گیاهی برای واکنش به آب محافظه‌کارانه عمل می‌کنند؛ به این مفهوم که پس از تنش آبی، رسانایی پوشش گیاهی به بخار آب کاهش می‌یابد و این رخداد بر بازتابندگی پرتوهای برخوردی اثر می‌گذارد، که پیامد آن افزایش مصرف انرژی در پاره‌های گرمای محسوس و انباشت در برگ خواهد بود، از این‌رو دمای سطح با تنش آبی تغییر خواهد کرد (Goetz, 2010). به دلیل پاسخ تأخیری پوشش گیاهی به تغییرات رطوبت خاک، نمایه‌های گیاهی مانند NDVI و NMDI واکنش تأخیرداری نسبت به رطوبت خاک دارند و در بیش‌تر زمان‌ها داده‌های رطوبت خاک و دیگر مشخصه‌های آب و هواشناسی همبستگی نیرومندی با این نسبت نمایه‌ها در یک دوره کوتاه زمانی ندارند (Wang et al., 2007). مطالعه (Adegoke and Carleton, 2002) به بررسی رابطه مستقیم بین نمایه NDVI و رطوبت خاک می‌پردازد و وجود تأخیر در تأثیر مقدار رطوبت بر نمایه گیاهی NDVI را تأیید کرده است. با توجه به ضریب تبیین بالا (۰/۷۳) و پایین بودن میزان ریشه میانگین مربعات خطا (۱/۳۱) در روش هم‌زمان (Enter Method)، می‌توان مدل ۱ را به عنوان روشی مناسب برای برآورد و پهنه‌بندی رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه ارزیابی نمود (شکل ۶).



شکل ۶. پهنه‌بندی رطوبت خاک برآورد شده براساس تابع هم زمان (Enter)

در این شکل ملاحظه می‌شود که رطوبت سطحی خاک در بخش‌های غربی و اطراف رودخانه‌ها که عمدتاً پوشیده از مزارع کشاورزی هستند، نسبت به مناطق شرقی و زمین‌های بایر بیشتر است. همچنین نوسانات رطوبت سطحی خاک در اراضی کشاورزی نسبت به مناطق دیم و بایر حاکی از تأثیر آبیاری محصولات زراعی بر دمای سطح زمین و در نتیجه تغییر در شاخص‌های پوشش گیاهی دارد. در نواحی با پوشش گیاهی متراکم، نزولات آسمانی قدرت نفوذ بیشتری داشته و به دلیل وجود لاشبرگ، قدرت نگهداری آب در خاک بیشتر است و نسبت مواد آلی خاک به مواد معدنی، نقش بسزایی در جذب انرژی خورشید دارد؛ به طوری که با افزایش کربن آلی خاک، رنگ آن تیره‌تر شده و جذب انرژی خورشید افزایش پیدا می‌کند. درحالی که جذب انرژی خورشید در مناطق خشک و بایر شرقی به دلیل روشن بودن خاک و وجود املاح کاهش می‌یابد، ضمن آن که در مناطق با خاک مرطوب‌تر، تراکم پوشش گیاهی بر بازتاب خاک و در نتیجه دمای سطح زمین تأثیر می‌گذارد. براساس نتایج این پژوهش، رطوبت برآورد شده توسط مدل آماری پیشنهادی تا حد قابل قبولی نزدیک به مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) می‌باشند.

## نتیجه‌گیری

رطوبت خاک سطحی، متغیری مهم در چرخه آبی طبیعت است که نقش مهمی در تعادل جهانی آب و انرژی به واسطه تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژیک، اکولوژیک و هواشناسی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دور قابلیت بالایی جهت برآورد و پهنه‌بندی رطوبت سطحی خاک در محدوده‌های وسیع جغرافیایی با اقلیم گرم و خشک دارد. در این مطالعه، برای شناخت بهتر ارتباط بین رطوبت سطحی خاک و نمایه‌های ماهواره‌ای از تصاویر لندست ۸ با دقت مکانی و زمانی بالا استفاده شد. همچنین، از شاخص‌های دمایی و گیاهی مختلفی برای اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک اراضی کشاورزی استفاده گردید. با توجه به پوشش پراکنده و کم تراکم در برخی از نقاط و به منظور کاهش یا حذف اثر تیرگی خاک، از شاخص SAVI استفاده شد که نتایج قابل قبولی در افزایش دقت مدل‌های رگرسیونی به دست آمده داشت. نتایج به دست آمده از مدل برآورد رطوبت سطحی خاک در این پژوهش نشان داد که این مدل قادر به برآورد مقدار رطوبت خاک در پهنه‌های وسیع جغرافیایی با دقت قابل قبول است. مقادیر ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا در این مدل به ترتیب  $0/73$  و  $1/31$  به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل به دست آمده در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. در این راستا، *Khanmohammadi et al. (2015)* در پژوهش خود مقدار ضریب تبیین  $0/65$  را به دست آوردند و همچنین بیان نمودند که این شاخص‌ها قادر به پیش‌بینی رطوبت خاک سطحی هستند. *Lin et al. (2008)* با تلفیق داده‌های رطوبت خاک زمینی با شاخص‌های NDVI و LST حاصل از محصولات شاخص گیاهی و دمای سطحی سنجنده MODIS، روابط رگرسیونی را برای برآورد رطوبت خاک به دست آوردند که نتایج حاصله همبستگی بالایی با مشاهدات زمینی نشان داد. نتایج پژوهش *Hosseini and Farrokhian. (2019)* عملکرد خوب تابع انتقالی برآورد رطوبت خاک را نشان داد و بیان نمودند که نقشه رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط این مدل قادر است تغییرات رطوبت خاک را در منطقه مطالعاتی در دامنه داده‌ها و فصل مورد مطالعه به خوبی پیش‌بینی کند. براساس نتایج تحقیق، رطوبت سطحی خاک با شاخص‌های NDVI، SAVI، NDMI، NDTI،  $SM_{SWIR}$  و رابطه مستقیم و با شاخص LST رابطه معکوس داشته و

مقادیر منفی ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ )، نیز این موضوع را نشان داده است. همچنین، شاخص LST، برآورد بهتری از رطوبت خاک داشته که نشان‌دهنده اثر قابل توجه این عامل بر مقادیر رطوبت سطحی خاک می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند جهت مدیریت منابع آب و خاک، شناسایی و کنترل فرسایش خاک به ویژه فرسایش بادی و تعیین نواحی مستعد برای کشت گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Adegoke, J.O., and Carleton, and A.M. (2002). Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. *Journal of Hydrometeorology*, 3(4), 395–405.
- Bagheri, H., Kashani-Nejad, M., Alami, M., Ziaifar, A. (2017). The Application of PLS Regression to Study the Relationships Between Sensory and Texture Characteristics. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 13(4), 540-552. (In Farsi)
- Bagheri, K., Bagheri, M., Hosein-Zadeh, A.A. (2019). Estimation of Soil Moisture Using Optical, Thermal and Radar Remote Sensing (Case Study: South of Tehran). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(47), 63-74. (In Farsi)
- Bai, X., Zhang, L., He, C., and Zhu, Y. (2020). Estimating Regional Soil Moisture Distribution Based on NDVI and Land Surface Temperature Time Series Data in the Upstream of the Heihe River Watershed, Northwest China. *Journal of Remote Sensing*, 12(15), 2414.
- Dahrazma, B., Hafezi Moghaddas, N., Hasanvand, M., and Karami, R. (2014). Investigation on the Geochemistry of Formations of Gotvand-Olya Dam Reservoir and its Influence on the Quality of Water in Reservoir. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 7(1–2), 29–40. (In Farsi)
- Eshaghi, A., Motamedvaziri, B., Feiznia, S. (2010). Landslides Hazard Zonation Using Logistic Regression Method (Case Study: Safaroud Watershed). *Geographical Journal of Territory*, 6(24), 67-77. (In Farsi)
- Fabre, S., Briottet, X., and Lesaignoux, A. (2015). Estimation of Soil Moisture Content from the Spectral Reflectance of Bare Soils in the 0.4–2.5  $\mu\text{m}$  Domain. *Journal of Sensors*, 15(2), 3262–3281.
- Fatemeh Pordel, F., Ebrahim, A., Azizi, Z. (2019). The Effect of Atmospheric Correction Methods on the Relationship Between Vegetation Indices and Canopy Cover (Case Study: Marjan Rangelands of Borujen). *Journal of Geospatial Information Technology*, 7(2), 133-153. (In Farsi)
- Gao, Z., Xu, X., Wang, J., Yang, H., Huang, W., and Feng, H. (2013). A Method of Estimating Soil Moisture Based on the Linear Decomposition of Mixture Pixels. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*, 3–4(58), 606–613.
- Ghulam, A., Qin, Q., and Zhan, Z. (2007). Designing of the Perpendicular Drought Index. *Journal of Environmental Geology*, 52(6), 1045–1052.
- Goetz, S. (2010). Multi-Sensor Analysis of NDVI, Surface Temperature and Biophysical Variables at a Mixed Grassland Site. *Journal of Remote Sensing*, 18(1), 71–94.
- Hosseini, F., and Farrokhian, A. (2019). Pedotransfer Function (PTF) for Estimation Soil Moisture Using NDVI, Land Surface Temperature (LST) and Normalized Moisture (NDMI) Indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 239–254. (In Farsi)
- Jafari, M., Dinpasho, Y. (2017). Evaluation of Multiple Ridge Regression Model to Estimation of Pan Evaporation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 83-97. (In Farsi)
- Johnson, R.A., Wichern, D.W. (1996). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall. New Delhi, India.
- Khanmohammadi, F., Homaei, M., and Noroozi, A.A. (2015). Soil Moisture Estimating with NDVI and Land Surface Temperature and Normalized Moisture Index Using MODIS Images. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 4(2), 37–45. (In Farsi)
- Khazaei, S., Sarjaz, M.R., Valizadeh, E., and Ghorbani, K. (2017). Estimation of Surface Soil Moisture from Satellite Images Using Vegetation and Thermal Indices. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(2), 151–162. (In Farsi)
- Koohbanani, H., and Yazdani, M. (2018). Mapping the Moisture of Surface Soil Using Landsat 8 Imagery, Case Study: Suburb of Semnan City Geography and Environmental Sustainability, 8(3), 65–77. (In Farsi)
- Li, B., Ti, C., Zhao, Y., and Yan, X. (2016). Estimating Soil Moisture with Landsat Data and Its Application in Extracting the Spatial Distribution of Winter Flooded Paddies. *Journal of Remote Sensing*, 8(1), 38.





- Lin, M.L., Cao, Y., Juan, C.H., Chen, C.W., Hsueh, I.C., Wang, Q.B., and Lee, Y.T. (2008). Monitoring Drought Dynamics in the Ejn Oasis Using drought Indices from Modis Data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4(1), 834–837.
- Lobell, D., and Asner, G. (2002). Moisture Effects on Soil Reflectance. *Soil Science Society*, 66(3), 722–727.
- Mehrabi, M., Hamzeh, S., Alavipanah, S. K., Kiavarz, M., & Ziaee, R. (2019). Estimating Soil Moisture Using Remotely Sensed Data and Surface Energy Balance System. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(3), 759–770. (In Farsi)
- Merdasi, G., Yazdanpanah, M., Forouzani, M., and Baradaran, M. (2018). Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) in Analysis of Agricultural Systems: A Case Study of Shushtar County of Iran. *Journal of Village and Development*, 21(1), 1–23. (In Farsi)
- Mesgari, E., Tavousi, T., Mahmoudi, P. (2020). Modelling Topo-Climatology and Zoning Frost Statistical Indices in Kurdistan Province. *Journal of Geography and Planning*, 24(72), 357-383. (In Farsi)
- Mombeni, M., and Asgari, H. (2018). Monitoring, Assessment and Prediction of Spatial Changes of Land Use/Cover Using Markov Chain Model, Case Study: Shushtar, Khuzestan. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data*, 27(105), 35–47.
- Nasrabadi, M.A., Mokhtari, M.H., and Hakimzadeh, M.A., and Shahmoradi, S. (2020). Estimation of the Soil Moisture Using Thermal Inertia and MODIS Satellite Data Imagery: A Case Study of Mortazieh Area. *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 8(1), 55–80. (In Farsi)
- Nateghi, S., Nohegar, A., Ehsani, A.H., and Bazrafshan, O. (2017). Evaluating the Vegetation Changes upon Vegetation Index by Using Remote Sensing. *Range and Desert Research*, 24(4), 778–790. (In Farsi)
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., and Stenseth, N.C. (2005). Using the Satellite-Derived NDVI to Assess Ecological Responses to Environmental Change. *Journal of Trends in Ecology and Evolution*, 20(9), 503–510.
- Pourtaheri, M. (2016). *Applied Statistical Analysis in Geographical Sciences*. Ghoomes Publishing, Tehran. (In Farsi)
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Washington, DC: NASA, 309–317.
- Sánchez-Ruiz, S., Piles, M., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-Llossera, M., and Camps, A. (2014). Combining SMOS with Visible and Near/Shortwave/Thermal Infrared Satellite Data for High Resolution Soil Moisture Estimates. *Journal of Hydrology*, 516, 273–283.
- Shahmoradi, S., Malamiri, H. R. G., and Amini, M. (2021). Extraction of Soil Moisture Index (TVDI) Using a Scatter Diagram Temperature/Vegetation and MODIS Images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(1), 38–62. (In Farsi)
- Torkizadeh, S., and Eslami, H. (2020). An Investigation on Proper Location of Urban Waste Landfill, Case Study: Shooshtar. *Journal of Water Engineering*, 7(4), 267–280. (In Farsi)
- Van de Griend, A.A., and Engman, E.T. (1985). Partial Area Hydrology and Remote Sensing. *Journal of Hydrology*, 81(3–4), 211–251.
- Wang, L., and Qu, J.J. (2009). Satellite Remote Sensing Applications for Surface Soil Moisture Monitoring: A Review. *Frontiers of Earth Science*, 3(2), 237–247.
- Wang, L., Qu, J.J., Wang, L., and Qu, J.J. (2007). NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation Moisture with Satellite Remote Sensing. *Journal of Geophysical Research Letters*, 34(20), L20405.
- Zhang, J., Zhou, Z., Yao, F., Yang, L., and Hao, C. (2015). Validating the Modified Perpendicular Drought Index in the North China Region Using in Situ Soil Moisture Measurement. *Journal of Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3), 542–546.
- Zhao, S., Yang, Y., Qiu, G., Qin, Q., Yao, Y., Xiong, Y., and Li, C. (2010). Remote Detection of Bare Soil Moisture Using a Surface Temperature Based Soil Evaporation Transfer Coefficient. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(5), 351–358.