

## Validation of SMAP Satellite-Based Soil Moisture in Different Land Uses of Simineh-Zarrineh (Bokan) Basin

KHALED HAJI MALEKI<sup>1\*</sup>, ALIREZA VAEZI<sup>1</sup>, FERAYDOON SARMADIAN<sup>2</sup>, WADE T. CROW<sup>3</sup>, LUCA BROCCA<sup>4</sup>

1. Department of Soil Sciences Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Hydrology and Remote Sensing Laboratory, USDA, Maryland, USA.

4. Director of Research, Hydrology Group of the Research Institute for Geo-Hydrological Protection, Perugia, Italy.

(Received: Nov. 30, 2019- Revised: Jan. 21, 2020- Accepted: Jan. 25, 2020)

### ABSTRACT

Soil moisture is a key variable in determinant terrestrial systems for water and energy exchanges between the earth's surface and the atmosphere. In this study, the soil moisture data of SMAP satellite at different times and land uses were validated through four indices of correlation coefficient, root mean square error, unbiased root mean square error, and mean difference in 2017. For this purpose, Simineh-Zarneh basin located in the south and southeast of Urmia Lake, which is the largest sub-basin of the Urmia Lake basin, was investigated. The total study area is about 1762500 hectares. The spatial and temporal resolution of the SMAP satellite is 9 square kilometers and three days. Therefore, 287 ground points on a grid were selected for sampling in the study area. The results showed that the SMAP satellite data with ground observation data on December 3 and April 3 had a maximum RMSD value of 0.25 to 0.35 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. The results revealed that the soil moisture data of SMAP satellite with RMSD values between 0.18 to 0.33 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> and ubRMSE between 0.17 to 0.33 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> show better performances correspond to ground data. The highest correlations and the lowest RMSD value were observed in July 3<sup>rd</sup> and September 13<sup>th</sup>, respectively. The lowest RMSD and the highest correlation for dryland was observed on April 3<sup>rd</sup>. In July 3<sup>rd</sup> the highest correlation was observed in all land uses, and among them the highest correlation was observed in dryland.

**Keywords:** RMSE, Urmia Lake, Radiometer, Soil Moisture, Dryland.

## اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زربنه (بوکان)

خالد حاجی ملکی<sup>۱\*</sup>، علی‌رضا واعظی<sup>۱</sup>، فریدون سرمیدیان<sup>۲</sup>، وید کراو<sup>۳</sup>، لوکا بروکا<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳. آزمایشگاه سنجش از دور و هیدرولوژی، وزارت کشاورزی آمریکا، مریلند، ایالات متحده آمریکا.
۴. مدیر تحقیقات، موسسه تحقیقات هیدرولوژی، مرکز ملی مطالعات ایتالیا، پروچیا، ایتالیا.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۵)

### چکیده

رطوبت خاک به عنوان یک متغیر کلیدی در سیستم‌های زمینی عاملی تعیین‌کننده در تبادلات آب و انرژی بین سطح زمین و اتمسفر است. در این تحقیق اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP در زمان‌ها و کاربری‌های مختلف با چهار شاخص ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطا ناریب و میانگین اختلاف در سال ۲۰۱۷ بررسی شد. به این منظور، حوضه سیمینه-زربنه به عنوان بزرگترین زیر حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. مساحت کل منطقه مطالعاتی حدود ۱۷۶۲۵۰۰ هکتار بود. با علم به قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی داده‌های ماهواره SMAP به ترتیب ۹ کیلومتر مربع و سه روزه از منطقه مطالعاتی، ۲۸۷ نقطه برداشت زمینی بر اساس یک شبکه منظم صورت گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های ماهواره SMAP با داده‌های مشاهده‌ای زمینی در زمان‌های ۳ دسامبر و ۳ آوریل دارای حداکثر مقدار RMSD بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  بود. نتایج آشکار ساخت که داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با مقدار RMSD بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۳  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  و ubRMSE بین ۰/۱۷ تا ۰/۳۳  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  کارایی بهتری را در تطابق با داده‌های زمینی نشان می‌دهند. در بین بازه‌های مورد مطالعه، ۳ جولای بیشترین همبستگی و ۱۳ سپتامبر کمترین مقدار RMSD را داشتند. در ۳ آوریل که پوشش گیاهی به مرور در حال رشد است، کمترین میزان RMSD و بیشترین مقدار همبستگی مربوط به کاربری کشاورزی دیم بود. در ۳ جولای بیشترین همبستگی در تمام کاربری‌ها قابل مشاهده بوده و در بین آن‌ها کاربری دیم‌زار دارای بیشترین همبستگی بود.

واژه‌های کلیدی: RMSE، دریاچه ارومیه، رادیومتر، رطوبت خاک، دیم‌زار.

### مقدمه

رطوبت خاک، به ویژه رطوبت خاک سطحی نقشی بسیار مهم در مدیریت منابع خاک و آب دارد. این عامل، همچنین نقش برجسته‌ای در چرخه آبی طبیعت، به ویژه در توزیع باران بین رواناب سطحی و نفوذ، ایفاء می‌کند (Mekonnen, 2009). نقش ویژگی‌های خاک در تخمین رطوبت خاک (Zhu et al., 2013) و اهمیت رطوبت خاک در توصیف و درک فرآیندهای اراضی باتلاقی (Vereecken et al., 2014) و همچنین فرآیندهای اتمسفری

(Seneviratne et al., 2010) بارز است. بسیاری از ویژگی‌های خاک مانند پایداری<sup>۱</sup>، خمیرایی<sup>۲</sup>، مقاومت<sup>۳</sup>، تراکم‌پذیری<sup>۴</sup>، نفوذپذیری<sup>۵</sup> و قابلیت ترد<sup>۶</sup> بستگی به مقدار آب موجود در خاک دارد. رطوبت خاک بر مقدار هوای خاک و تبادل گازها نیز مؤثر است. فعالیت موجودات زنده و واکنش‌های شیمیایی خاک نیز تابعی از مقدار رطوبت آن است. داده‌های رطوبت خاک اهمیت شایانی در کاربردهای گوناگون همچون هیدرولوژی، کشاورزی (Baghdadi et al., 2011)، اقلیم‌شناسی و هواشناسی، علوم خاک، اکولوژی زراعت، جنگلداری، مهندسی منابع آب

\* نویسنده مسئول: Khaled.hajimaleki@yahoo.com

1. Consistency
2. Plasticity
3. Strength
4. Compactibility
5. Penetrability
6. Trafficability

نشان داد که داده‌های حاصل از سنجنده‌های غیرفعال سنجش از دور با RMSE برابر ۱/۸۳ درصد و ضریب همبستگی ۹۶ درصد، از لحاظ دقت ما بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده زمینی و پیش‌بینی‌شده قرار می‌گیرند. در گروه سنجنده‌های فعال، روش تجربی اسکرومتر<sup>۲</sup> با RMSE برابر ۱/۸۱ تا ۲/۳۲ درصد و ضریب همبستگی ۹۵ تا ۹۷ درصد بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده گزارش شد. در گروه روش‌های مبتنی بر سنجنده‌های غیرفعال، مدل‌های شبکه عصبی با RMSE برابر ۰/۹۳ درصد رطوبت نسبی و ضریب همبستگی ۱۰۰٪ بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده بهترین عملکرد را نشان دادند. *et al.* Albergel (2013) به پیش چند دهه تغییرات رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تجزیه و تحلیل مجدد آن با تغییرات سطح در کل کره زمین پرداختند و چنین گزارش نمودند که نتایج مدل‌های شبیه‌سازی‌کننده عوارض سطح زمین، پویایی تغییرات رطوبتی را به صورت رضایت بخش ثبت نموده‌اند. همچنین بیان کردند که نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نشان داد که همبستگی مجموعه داده‌های رطوبت سطحی برگرفته‌شده از داده‌های ماهواره با داده‌های زمینی در طول دوره مطالعاتی نسبتاً ثابت می‌باشند و به ترتیب همبستگی بالا در مناطق نیمه خشک و همبستگی پایین در مناطق استوایی و عرض‌های جغرافیایی بالا ملاحظه شد. Escorihuela and Quintana-Seguí (2016) به مقایسه نتایج سه مجموعه داده سنجش از دوری ASCAT، AMSR-E و SMOS و مجموعه داده‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک در یک مقیاس محلی و منطقه‌ای اقدام کردند و بیان داشتند که نتایج آن‌ها به شدت متأثر از نرمال‌سازی داده‌های مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد. بنابراین اثرات آن‌ها باید به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مقایسه نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین همه داده‌های رطوبت خاک با LSM<sup>۳</sup> در سری‌های زمانی شبیه‌سازی‌شده در مناطق صاف آبیاری‌نشده که در فاصله زیادی نسبت به دریا واقع شده‌اند، وجود دارد. Das *et al.* (2018) در پژوهشی به بررسی داده‌های حاصل از پروژه SMAP با قدرت تفکیک مکانی ۳ و ۹ کیلومتر با چندین الگوریتم جایگزین و داده‌های برداشت‌شده از هسته سایت‌های اعتبارسنجی<sup>۴</sup> (CVS) و کالیبراسیون زمینی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم‌های جایگزین نسبت به CVS نتایج آماری مناسب‌تری را ارائه کرده‌اند. مقدار کلی شاخص ناریب اختلاف ریشه مربعات<sup>۵</sup> برای داده‌های SMAP حدود

(Mekonnen, 2009)، تبادل جریان انرژی و آب بین سطح زمین و اتمسفر (Wang *et al.*, 2009) دارد.

امروزه بررسی تغییرپذیری رطوبت خاک توسط ماهواره‌ها به راحتی امکان پذیر است. ماهواره رطوبت خاک فعال و غیرفعال<sup>۱</sup> (SMAP)، ماهواره تحقیقات زیست‌محیطی ایالات متحده آمریکا است. این ماهواره در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ با راکت دلتا ۲ از پایگاه هوایی وندنبرگ کالیفرنیا به فضا پرتاب و در ارتفاع ۶۷۰ کیلومتری از سطح زمین در یک مدار خورشید آهنگ با پهنای نوارهای ۱۰۰۰ کیلومتر در حال داده برداری می‌باشد (Entekhabi *et al.*, 2010). هدف اصلی SMAP پایش و نقشه برداری جهانی رطوبت خاک با درجه وضوح بسیار بالا، دقت و حساسیت در برداشت و اندازه‌گیری، پوشش کره زمین در دوره‌های زمانی کوتاه است (Entekhabi *et al.*, 2010). از دیگر ماموریت‌های SMAP اندازه‌گیری رطوبت خاک سطح زمین و ذوب یخ‌های کل کره زمین با دوره بازگشت تقریباً ۲ تا ۳ روز می‌باشد و همچنین رطوبت سطحی خاک را بر اساس مدل‌های هیدرولوژیکی که قادر به برآورد رطوبت خاک در منطقه ریشه هستند، اندازه‌گیری می‌کند. ابزارهای دیده بانی SMAP شامل فضاییما و تجهیزاتی است که توسط راکت دلتا ۲ در مدار قطبی خورشیدآهنگ قرار داده شده است. سامانه اندازه‌گیری SMAP شامل رادیومتر (غیرفعال) و رادار دهانه ترکیبی (فعال) است که در بازه باند L (۱/۲ تا ۱/۴۱ گیگاهرتز) فعالیت می‌کنند. سنجنده‌های فعال و غیرفعال این ماهواره قادر به سنجش رطوبت ۵ سانتی‌متر سطحی خاک با استفاده از پوشش گیاهی برای برآورد میزان رطوبت خاک هستند (Entekhabi *et al.*, 2010). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی عملکرد و صحت داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک سطحی صورت گرفته است اما پژوهش‌هایی راجع به بررسی اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌های اختصاصی پایش رطوبت خاک در مناطق خشک و نیمه خشک انجام نشده است. ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای به خصوص رطوبت سطحی خاک باتوجه به نقش کلیدی آن در چرخه آب در راستای استفاده در کاربردهای گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه به بررسی چندین مطالعه مهم پرداخته خواهد شد.

Ahmed *et al.* (2011) به ارزیابی روش‌های مختلف

سنجش از دور در پیش‌بینی رطوبت خاک پرداختند و پژوهش‌های زیادی را در زمینه افزایش اطلاعات در مورد ارتباط رطوبت خاک با پوشش خاک و گیاه بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها

4. Core validation site

5. The overall unbiased root-mean-square-difference

1. Soil moisture active passive

2. Backscatter empirical model

3. Land surface model

درجه، ۲۷ دقیقه و ۳۸/۶ ثانیه تا ۴۷ درجه، ۲۱ دقیقه و ۵۶/۳ ثانیه طولی شرقی و ۳۵ درجه، ۴۰ دقیقه و ۸/۳ ثانیه تا ۳۷ درجه، ۴۴ دقیقه و ۱۳/۱ ثانیه عرض شمالی می‌باشد (شکل ۱-الف). تغییرات ارتفاع در منطقه مورد مطالعه بین ۱۲۶۰ تا ۳۳۸۰ متر در نوسان است (شکل ۲-ب). رودخانه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود (شکل ۱-ب) با پتانسیل آبدهی حدود ۳ میلیارد متر مکعب در سال، از جمله رودخانه‌های پر آب کشور محسوب می‌شوند که به همراه پتانسیل‌های طبیعی و اجتماعی متعدد، موجب توسعه فعالیت‌های کشاورزی در دشت‌های آبخور حوضه خود شده‌اند.

حوضه آبخیز زرينه‌رود با گستره‌ای بالغ بر ۱۳۸۴۰ کیلومترمربع در شمال غربی ایران واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری این زیر حوضه در محدوده استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان و زنجان قرار گرفته ولی بیشترین سهم این زیر حوضه متعلق به استان آذربایجان غربی می‌باشد (شکل ۱-ب). رودخانه زرينه‌رود از مهمترین رودخانه‌های این حوضه است که از گوشه جنوب شرقی به دریاچه ارومیه می‌ریزد. طول رودخانه ۲۴۰ کیلومتر است و میانگین آبدهی این رودخانه در مقیاس ماهانه ۱۳۹/۵ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود (شکل ۱-ب) (Safari et al., 2014). رودخانه سيمينه‌رود (شکل ۱-ب) یکی دیگر از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که در جنوب آذربایجان غربی و در غرب این حوضه جریان دارد. طول این رودخانه حدود ۲۰۰ کیلومتر و مساحت حوضه آبخیز آن ۳۷۸۵ کیلومتر مربع می‌باشد (Zaman et al., 2016). همچنین حوضه آبخیز سيمينه-زرينه شامل پنج زیر حوضه به نام‌های بوکان، سقز، تکاب، صائین‌قلعه و میان‌دوآب می‌باشد. شکل (۱-ب) موقعیت هر زیر حوضه را نشان می‌دهد.

#### نمونه برداری خاک

مساحت کل منطقه مطالعاتی حدود ۱۷۶۲۵۰۰ هکتار (۱۷۶۲۵ کیلومترمربع) است. قدرت تفکیک‌های مکانی و زمانی داده‌های ماهواره SMAP، به ترتیب ۹ کیلومتر مربع و سه روز است. لذا باتوجه به این موضوع از منطقه مطالعاتی ۲۸۷ نقطه برداشت زمینی بر اساس یک شبکه منظم (۹ کیلومتر در ۹ کیلومتر)، که از هر شبکه نقطه‌ای که معرف شرایط آن (از نظر توپوگرافی و کاربری زمین) بود، تعیین شد (شکل ۱-الف). نمونه‌برداری در هر پیکسل از عمق ۵ سانتی‌متری سطح خاک (مطابق با عمق برداشت داده ماهواره SMAP) توسط استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در سه تکرار صورت گرفت. به منظور افزایش دقت و بررسی پراکنش مکانی نقاط در کاربری‌های مختلف در ابعاد شبکه، کاربری مشخص هر نقطه پس از

می‌باشد. نتایج بررسی داده‌های با قدرت تفکیک مکانی ۳ کیلومتر مقدار  $0.053 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  را برای شاخص ناریب اختلاف ریشه مربعات نشان دادند. Santi et al. (2018) در تحقیق خود به پایش میزان رطوبت خاک بر اساس ادغام داده‌های میکروویو برگرفته شده از SMAP و AMSR2 پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که خطای رادار-رادایومتر ماهواره SMAP با میانگین ضریب همبستگی بیش از ۰/۷۵ و میانگین ریشه مربعات خطای برابر  $0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  در دو مدار صعودی و نزولی نزدیک بود.

تاکنون در زمینه بررسی اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک، مطالعاتی به صورت پراکنده به وسیله باندهای خاصی از تصاویر ماهواره‌ای صورت پذیرفته اما از داده‌های ماهواره‌هایی که به صورت اختصاصی به پایش رطوبت خاک می‌پردازند، استفاده نشده است. لذا پژوهش حاضر در تلاش است که داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP در حوضه آبخیز سيمينه-زرينه واقع در منطقه نیمه‌خشک در شمال غربی ایران در شش بازه زمانی سال ۲۰۱۷ و در چهار کاربری غالب حوضه مورد بررسی قرار دهد.

## مواد و روش‌ها

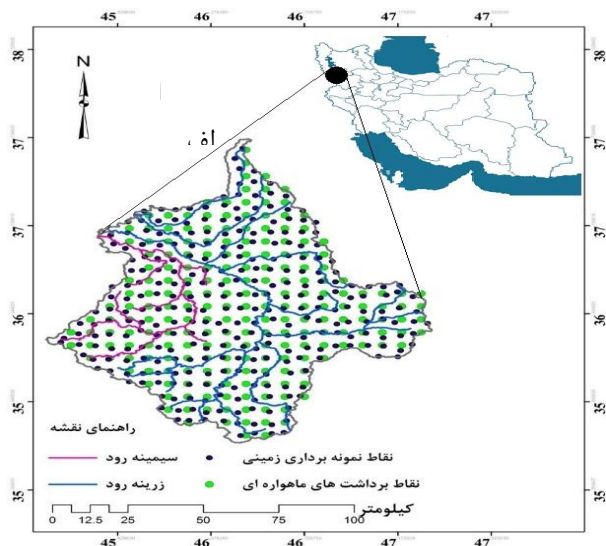
### منطقه مورد مطالعه

طبق تقسیم‌بندی‌های هیدرولوژیک دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو، حوضه اصلی آبریز دریاچه ارومیه شامل یک حوضه آبریز فرعی با همین نام می‌شود. حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران قرار گرفته و به‌وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. این حوضه آبریز که کلیه رودخانه‌های واقع در آن به سمت دریاچه ارومیه جریان دارند، در تقسیم‌بندی‌های دفتر مطالعات پایه منابع آب، بخش مستقلی از حوضه آبریز مرکزی می‌باشد. این حوضه ۳ درصد از مساحت کل حوضه‌های آبریز درجه یک کشور را در بر می‌گیرد. با توجه به اینکه حوضه‌های آبریز زرينه‌رود و سيمينه‌رود سهمی حدود ۵۰ درصدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را دارا می‌باشند، در سال‌های اخیر و با گسترش و توسعه بهره‌برداری از این منابع، کارکرد تأمین حقابه دریاچه ارومیه را از دست داده و جزء کانون‌های بروز بحران در دریاچه قلمداد شده‌اند (دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران). لذا مطالعه و بررسی وضعیت هیدرولوژیک این حوضه‌ها بسیار حیاتی و مهم است.

حوضه سيمينه-زرينه در جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه واقع شده و از نظر وسعت بزرگترین زیر حوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. مختصات جغرافیایی آن از ۴۵

میانگین بارندگی سالانه و میانگین دمای سالانه هر زیر حوضه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱) زیر حوضه‌های سقز با ۲۶/۳۱ درصد و تکاب با ۱۳/۰۵ درصد مساحت از کل منطقه به ترتیب بیشترین و کمترین تعداد نقاط نمونه‌برداری را به خود اختصاص داده‌اند. سرچشمه اصلی زربینه رود در زیر حوضه سقز و تکاب می‌باشد که در زیر حوضه‌های صائین قلعه و میاندوآب جاری و به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شود. رودخانه سیمینه رود نیز در زیر حوضه بوکان سرچشمه می‌گیرد و در زیر حوضه میاندوآب جاری و به دریاچه ارومیه می‌ریزد.

نمونه‌برداری به عنوان نقاط کنترل زمینی<sup>۱</sup> برای تهیه نقشه کاربری اراضی یادداشت an. همچنین نمونه‌ها بعد از برداشت توسط مغزه نمونه‌گیر<sup>۲</sup> برای تعیین درصد رطوبت حجمی به آزمایشگاه منتقل شدند. این اقدام برای هر پیکسل شبکه در سه تکرار و در ۶ بازه زمانی مختلف که منطبق بر برنامه گذر ماهواره از منطقه مورد مطالعه بودند، شامل ۳ آوریل، ۸ می، ۳ جولای، ۱۳ سپتامبر، ۳ نوامبر و ۳ دسامبر سال ۲۰۱۷ انجام گرفت. به عبارت دیگر در مجموع در کل منطقه مورد مطالعه ۱۷۲۲ نمونه خاک برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به آزمایشگاه منتقل شدند. جدول (۱) تعداد نقاط نمونه‌برداری، درصد مساحت تحت پوشش،



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز سیمینه-زربینه (الف) و موقعیت مکانی زیر حوضه‌ها (ب)

جدول ۱- درصد مساحت و تعداد نقاط نمونه‌برداری در هر یک از زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه

زیر حوضه	درصد مساحت	تعداد نقاط نمونه‌برداری	میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین دمای سالانه (°C)
بوکان	۱۷/۳۵	۵۴	۳۸۴/۵	۱۲/۸
سقز	۲۶/۳۱	۷۳	۳۵۴/۳	۱۰/۹
تکاب	۱۳/۰۵	۳۵	۳۳۲/۴	۱۱/۳
صائین قلعه	۱۹/۲۷	۵۱	۳۲۵/۰۱	۱۲/۶
میاندوآب	۲۴/۰۲	۶۶	۳۲۶/۸	۱۳/۲

از طبقه‌بندی نظارت‌شده، نقشه کاربری اراضی حوضه با ترکیب باندهای مختلف ایجاد و پس از اعمال عملیات فیلتر نقشه نهایی تهیه شد. حوضه سیمینه-زربینه دارای کاربری‌های مختلفی می‌باشد که در این پژوهش کاربری‌های غالب آن شامل مرتع، دیم‌زار، کشاورزی آبی و اراضی بایر استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است.

تهیه نقشه کاربری زمین با استفاده از ماهواره Land sat 8 و نقشه طبقات ارتفاعی

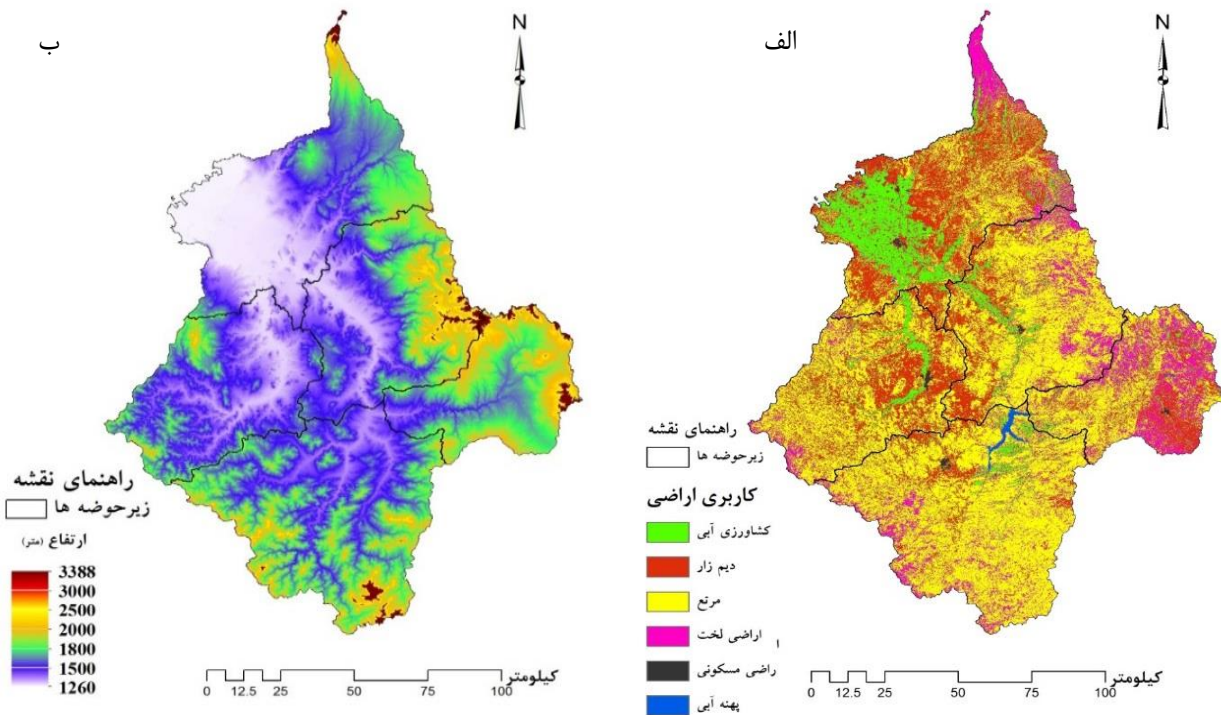
برای استخراج کاربری‌های اراضی، تعداد ۱۱ تصویر از حوضه آبخیز سیمینه-زربینه مربوط به سال ۲۰۱۷ ماهواره لندست ۸ پس از دانلود، موزاییک شد. در ادامه عملیات تصحیح و پردازش بر روی تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از ۲۷۹ نقطه کنترل زمینی در محیط نرم‌افزار ERDAS Imagine انجام شد. در نهایت با استفاده

۲-الف)، بخش اعظم منطقه را کاربری مرتع در بر می‌گیرد. در حوضه مورد مطالعه، بعد از مرتع، اراضی دیم بیشترین فراوانی را دارند. جدول (۲) تعداد نقاط مشاهداتی رطوبت خاک را در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اراضی مرتعی بیشترین وسعت حوضه را در بر می‌گیرند، بنابراین حداکثر تعداد نقاط مشاهداتی نیز در این کاربری قرار گرفته است. نقاط مشاهداتی واقع در پهنه‌های آبی و اراضی مسکونی مورد بررسی قرار نگرفت. با توجه به شکل (۲-ب)، تغییرات ارتفاع در منطقه مورد مطالعه دارای دامنه وسیعی است؛ به طوری که مرتفع‌ترین نقاط در نواحی شرقی و جنوبی قرار دارد و پست‌ترین نقاط در بخش‌های شمال غربی و نواحی مرکزی می‌باشند. جهت جریان رودخانه‌ها نیز در این حوضه از جنوب به شمال می‌باشد.

جدول ۲- درصد مساحت کاربری‌ها و تعداد نقاط نمونه‌برداری در کاربری‌های مختلف

کاربری اراضی	درصد مساحت	تعداد نقاط مشاهداتی رطوبت خاک
پهنه‌های آبی	۲/۶۵	۰
مرتع	۳۵/۶۵	۱۰۲
کشاورزی آبی	۱۰/۴۳	۴۱
اراضی بایر	۱۹/۵۶	۵۶
دیم‌زار	۲۸/۲۲	۸۰
اراضی مسکونی	۳/۵۱	۰

با توجه به نقشه کاربری اراضی حوضه مورد مطالعه (شکل



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی و پراکنش کاربری‌های مختلف در زیر حوضه‌ها (الف) و تغییرات ارتفاع (مدل رقومی ارتفاعی) (ب) در حوضه سیمینه-زربینه

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

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

$$ubRMSE = \sqrt{(RMSD)^2 - (MD)^2} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_s(i) - \mu_s)(\theta_m(i) - \mu_m)}{(N-1)\sigma_s\sigma_m} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در این روابط  $Q_s$  رطوبت خاک ( $cm^3.cm^{-3}$ ) برآوردی توسط ماهواره،  $Q_m$  رطوبت خاک مشاهده‌شده ( $cm^3.cm^{-3}$ ) و  $N$  تعداد

#### آماره‌های ارزیابی صحت داده‌های ماهواره SMAP

در این تحقیق برای تعیین صحت و تطابق داده‌های ماهواره با مشاهدات زمینی به کمک چهار شاخص ضریب همبستگی<sup>۱</sup> ( $r$ )، ریشه میانگین مربعات اختلاف<sup>۲</sup> ( $RMSD$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ناریب<sup>۳</sup> ( $ubRMSE$ ) و میانگین اختلاف<sup>۴</sup> ( $MD$ ) استفاده شده است. بیان ریاضی این آماره‌ها در زیر ارائه شده است.

۱. Unbiased root mean square error

۲. Mean difference

۱. Correlation coefficient

۲. Root mean square difference

کمترین مقادیر انحراف معیار را در ماه‌های سپتامبر و اکتبر می‌توان مشاهده کرد.

شکل (۳) ضریب تبیین بین رطوبت خاک برآوردشده توسط ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی را در ۶ زمان مختلف سال ۲۰۱۷ در حوضه سیمینه-زربینه نشان می‌دهد. بیشترین میزان ضریب تبیین مربوط به ۳ جولای و ۳ نوامبر است که دلیل این موضوع می‌تواند محتوای پایین رطوبت خاک در ۳ جولای و پوشش بسیار ضعیف گیاهی در ۳ نوامبر باشد.

این نتایج با یافته‌های Wang *et al.* (2018) که به بررسی تغییرپذیری محتوای رطوبت خاک در لس پلاتیو چین پرداخته بودند، مطابقت دارند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که هرچه محتوای رطوبت خاک منطقه مورد مطالعه کمتر باشد، داده‌های برآوردشده توسط ماهواره در این مناطق با داده‌های مشاهده‌شده تطبیق پذیری بیشتری دارند.

کل نمونه‌ها می‌باشد. مقدار اریب به وسیله محاسبه  $ubRMSE$  از بین می‌رود (Entekhabi *et al.*, 2010). همچنین  $b_s$  و  $b_m$  به ترتیب انحراف معیار رطوبت خاک برآوردی توسط ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی می‌باشد و  $\mu_s$  میانگین رطوبت خاک برآوردشده توسط ماهواره SMAP در طی دوره مورد بررسی و  $\mu_m$  میانگین رطوبت خاک ( $cm^3.cm^{-3}$ ) مشاهداتی است.

## نتایج و بحث

### همبستگی داده‌های ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی در زمان‌های مختلف

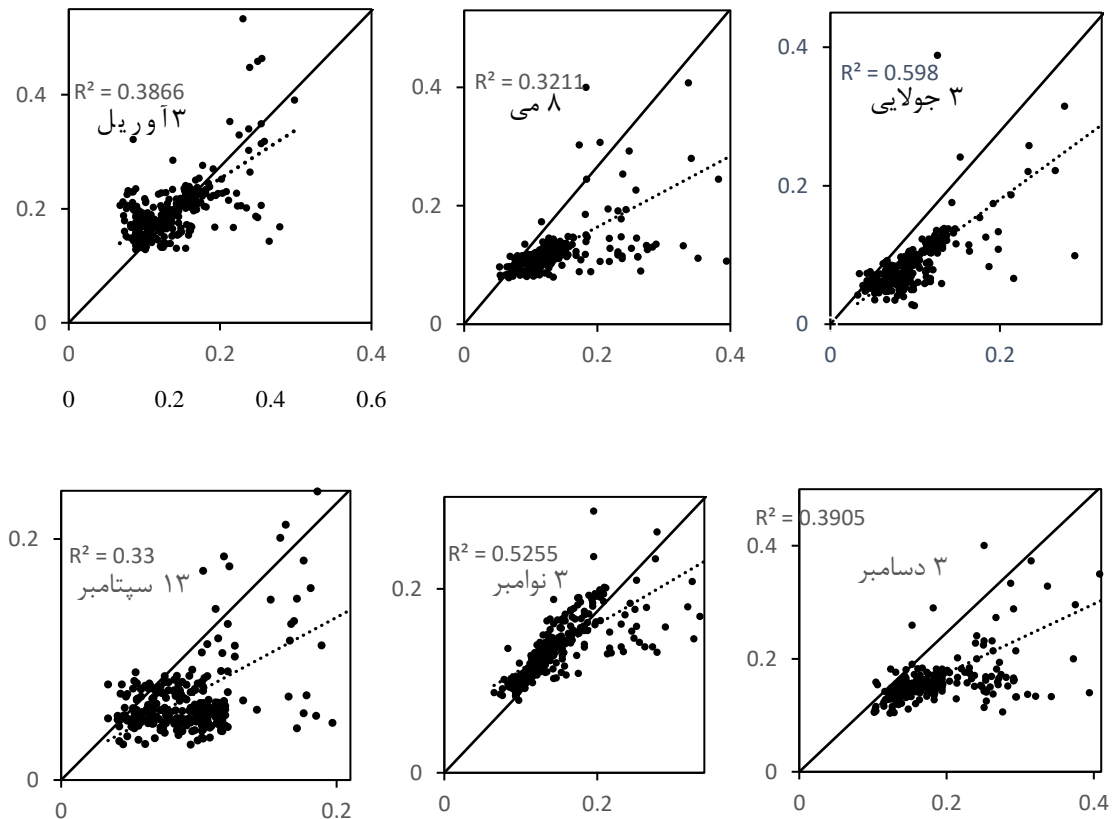
جدول (۳) خلاصه‌ای از پارامترهای آماری داده‌های رطوبت خاک برآوردی را توسط ماهواره SMAP نشان می‌دهد. کمترین مقادیر رطوبت خاک را در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست و همچنین

جدول ۳- خلاصه‌ای از پارامترهای آماری داده‌های رطوبت خاک در مقیاس ماهانه، حوضه آبخیز سیمینه-زربینه

ردیف	ماه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	حداقل	حداکثر	چولگی	کشیدگی
۱	ژانویه ۲۰۱۷	۰/۱۵۹	۰/۰۷۵	۰/۰۰۵	۰/۰۸۹	۰/۴۶	۲/۲۸	۵/۳۳
۲	فوریه ۲۰۱۷	۰/۱۷۱	۰/۰۷۷	۰/۰۰۶	۰/۱۱	۰/۵۱۹	۲/۳۷	۶/۳۱
۳	مارس ۲۰۱۷	۰/۱۶۸	۰/۰۴۹۹	۰/۰۰۲	۰/۱۲۴	۰/۶۰۵	۵/۳۷	۳۵/۶۴
۴	آوریل ۲۰۱۷	۰/۱۶۹	۰/۰۵۵	۰/۰۰۳	۰/۱۱۸	۰/۶۰۷	۴/۷۶	۲۸/۲۲
۵	می ۲۰۱۷	۰/۱۱۱	۰/۰۶۴	۰/۰۰۴	۰/۰۸	۰/۶۱	۴/۷۶	۲۶/۳۸
۶	ژوئن ۲۰۱۷	۰/۰۷۱	۰/۰۵۹	۰/۰۰۳	۰/۰۲۷	۰/۵۴	۴/۳۶	۲۳/۲۸
۷	جولای ۲۰۱۷	۰/۰۷۸	۰/۰۴۹	۰/۰۰۲	۰/۰۳۵	۰/۴۶۲	۴/۲۵	۲۲/۲۹
۸	آگوست ۲۰۱۷	۰/۰۷۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۳۳	۳/۵۳	۱۵/۰۲
۹	سپتامبر ۲۰۱۷	۰/۰۷۹	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۳	۳/۱۹	۱۳/۶۴
۱۰	اکتبر ۲۰۱۷	۰/۱۶۷	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱	۰/۱۳	۰/۴۵	۴/۶۸	۳۰/۲۷
۱۱	نوامبر ۲۰۱۷	۰/۱۲۷	۰/۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۸۱	۰/۵۵۳	۴/۷۷	۲۸/۷
۱۲	دسامبر ۲۰۱۷	۰/۱۱۷	۰/۰۴۹	۰/۰۰۲	۰/۰۸۲	۰/۵۰۹	۴/۶	۲۵/۳۷

است که این عوامل می‌توانند تا حد زیادی جز منابع خطا باشند (Al-Yaari *et al.*, 2014). باتوجه به جدول (۴)، ضریب همبستگی داده‌های ماهواره SMAP با داده‌های مشاهده‌ای زمینی در ۳ جولای و ۳ نوامبر بالا و به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۲، در ۳ آوریل برابر با ۰/۶۲ و در ۸ می، ۱۳ سپتامبر و ۳ دسامبر نیز پایین و به ترتیب معادل ۰/۵۶، ۰/۵۷ و ۰/۵۲ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در ۳ جولای، ۷۷ درصد تغییرات رطوبت مشاهده‌ای توسط رطوبت برآوردی ماهواره SMAP پیش‌بینی می‌شود.

ضمن این‌که در زمان ۳ دسامبر وجود پوشش برف در سطح خاک می‌تواند در دقت برداشت داده توسط ماهواره خلل ایجاد کرده و دقت آن را به شدت کاهش دهد. نوسانات زیاد در مقدار بارش و به تبع آن تغییرات مکرر در مقدار محتوای رطوبت خاک می‌تواند در برداشت‌های ماهواره با فواصل زمانی مشخص، ایجاد خطا کند (Entekhabi *et al.*, 2010). تأثیر این عوامل تا حدی در زمان‌های ۸ می و ۱۳ سپتامبر کاملاً مشهود است؛ به طوری که در این ماه‌ها هم بارش‌های پراکنده به وقع می‌پیوندند و هم اینکه میزان پوشش گیاهی در سطح به ترتیب رو به افزایش و کاهش



شکل ۳- همبستگی بین داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی در ۶ دوره زمانی مختلف (سال ۲۰۱۷) در حوضه سیمینه-زربنه بوکان (نقطه چین خط ۱:۱ و خط ساده خط برازش داده‌شده)

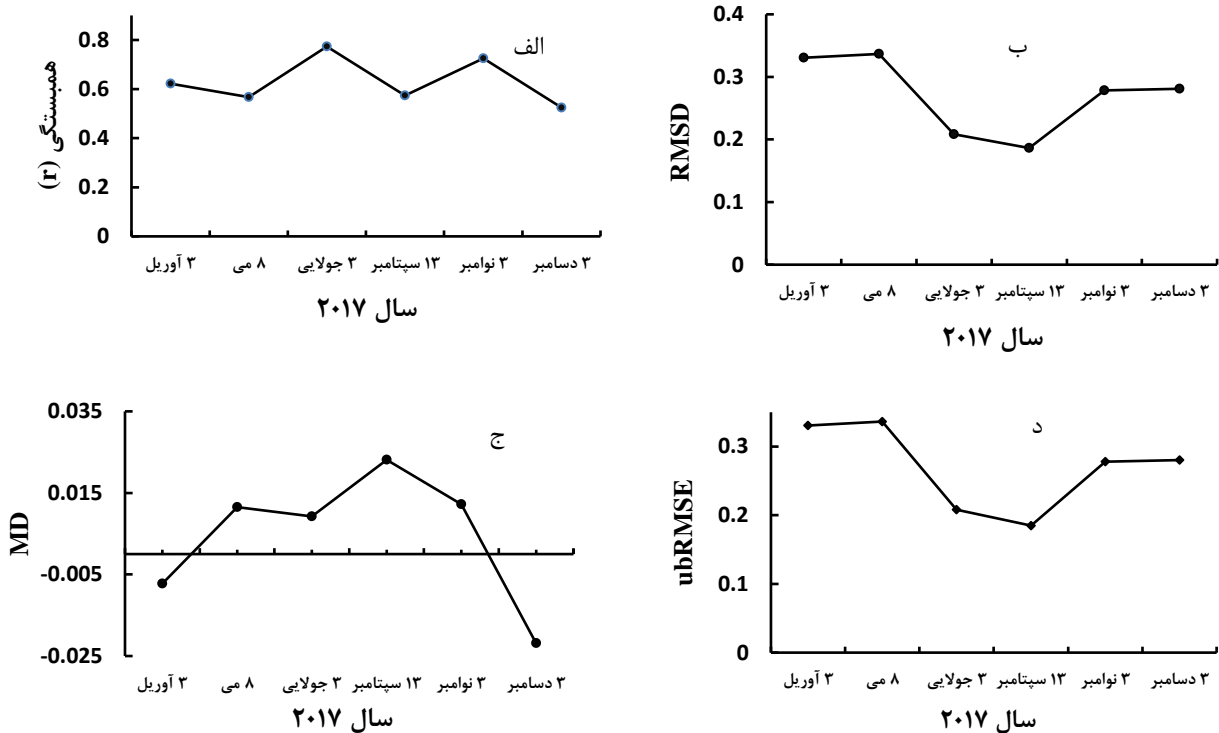
از شاخص  $RMSD$  را نشان می‌دهد (شکل ۴-د) که در زمان‌های ۳ جولای و ۳ سپتامبر در کمترین مقدار بین ۰/۱۸ تا  $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  می‌باشد و نشانگر برآورد بهتر ماهواره در این زمان‌ها می‌باشد. این یافته با نتایج Zhang *et al.* (2017) مطابقت کامل دارد. آن‌ها نیز با توجه به اقلیم منطقه در ماه‌های با پوشش گیاهی کمتر و محتوای رطوبت پایین‌تر میزان شاخص-های  $RMSD$  و  $ubRMSE$  کمتری را برآورد کردند.

به طور کلی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با مقدار  $RMSD$  بین ۰/۱۸ تا  $0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  و  $ubRMSE$  بین ۰/۱۷ تا  $0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  کارایی بالایی را در تطابق با داده‌های زمینی نشان می‌دهند (جدول ۳). در بین بازه زمانی مورد مطالعه، ۳ جولای بیشترین همبستگی و ۱۳ سپتامبر کمترین مقدار  $RMSD$  را داشته‌اند. با توجه به مطالعات Wang, Brocca *et al.*, (2010) و Zhang *et al.*, (2019) و *et al.*, (2018) آمده از این مطالعه بیانگر این است که داده‌های رطوبت خاک برآوردی توسط ماهواره SMAP برای انواع کاربردهای مختلف کشاورزی و زیست محیطی در این حوضه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند.

#### اعتبارسنجی داده‌های SMAP با مشاهدات زمینی در بازه‌های زمانی مختلف

داده‌های ماهواره SMAP در ماه‌هایی که میزان رطوبت خاک رو به کاهش می‌باشد (جدول ۳) مانند ماه‌های ژوئن و جولای، دارای همبستگی بیشتری با داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده هستند. در همین ماه‌ها میزان  $RMSD$  در کمترین مقدار قرار دارد (شکل ۴-الف). این نتیجه با یافته‌های Zhang *et al.* (2019) که به اعتبارسنجی داده‌های ماهواره SMAP و AMSR2 با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی در کشور ایالات متحده پرداختند، مطابق دارد. آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که در فصول خشک، دقت داده‌های ماهواره‌ای بالاتر از فصول دیگر است. در زمان‌های ۳ دسامبر و ۳ آوریل، میزان  $RMSD$  دارای حداکثر مقدار بین ۰/۲۵ تا  $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  می‌باشد که بیانگر کمترین مقدار تطابق داده‌های ماهواره با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی نسبت به دیگر ماه‌ها می‌باشد (شکل ۴-ب). مقادیر پایین و نزدیک به صفر شاخص MD نشان‌دهنده دقت بیشتر ماهواره در برآورد رطوبت خاک می‌باشد که در ۸ می و ۳ جولای در کمترین مقدار خود قرار دارد (شکل ۴-ج). شاخص  $ubRMSE$  مقدار اریب حذف‌شده





شکل ۴- نتایج ارزیابی شاخص‌های آماری برای داده‌های ماهواره SMAP در طی سال ۲۰۱۷ در حوضه سیمینه-زرنه

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی دقت ماهواره SMAP در برآورد رطوبت سطحی خاک در زمان‌های مختلف

زمان	r	MD	RMSD	ubRMSE
۳ آوریل	۰/۶۲	-۰/۰۰۷	۰/۳۳	۰/۳۳
۸ می	۰/۵۶	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۳۲
۳ جولای	۰/۷۷	۰/۰۰۹	۰/۲	۰/۲
۱۳ سپتامبر	۰/۵۷	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۷
۳ نوامبر	۰/۷۲	۰/۰۱	۰/۲۷	۰/۲۷
۳ دسامبر	۰/۵۲	-۰/۰۲	۰/۲۸	۰/۲۷

شمال غرب ایران می‌باشد. بخش زیادی از اراضی زیر حوضه تکاب در بخش شرقی حوضه شامل اراضی بایر می‌باشد. قابل ذکر است که این زیر حوضه دارای توپوگرافی نامنظم می‌باشد که امکان رویش گیاه در بخش زیادی از این اراضی به دلیل ویژگی‌های خاک و توپوگرافی محدود است و همچنین به دلیل وجود معادن زیاد در این زیر حوضه مشاهده اراضی بایر با این وسعت در این زیر حوضه خارج از انتظار نیست. همچنین اغلب رودخانه‌های حوضه برای خروج و تخلیه در دریاچه اومیه به سمت زیر حوضه میاندوآب در جریان هستند و منابع آب بیشتری در این زیر حوضه در دسترس هستند. به عبارت دیگر وجود کاربری کشاورزی آبی با وسعت زیاد در این زیر حوضه منطقی به نظر می‌رسد. شکل (۲-الف) بیشترین وسعت کاربری کشاورزی آبی را برای زیر حوضه میاندوآب نشان می‌دهد. زیر حوضه‌های واقع در نواحی جنوبی (سقز) و شمال شرقی (صائین قلعه) منطقه دارای بیشترین وسعت

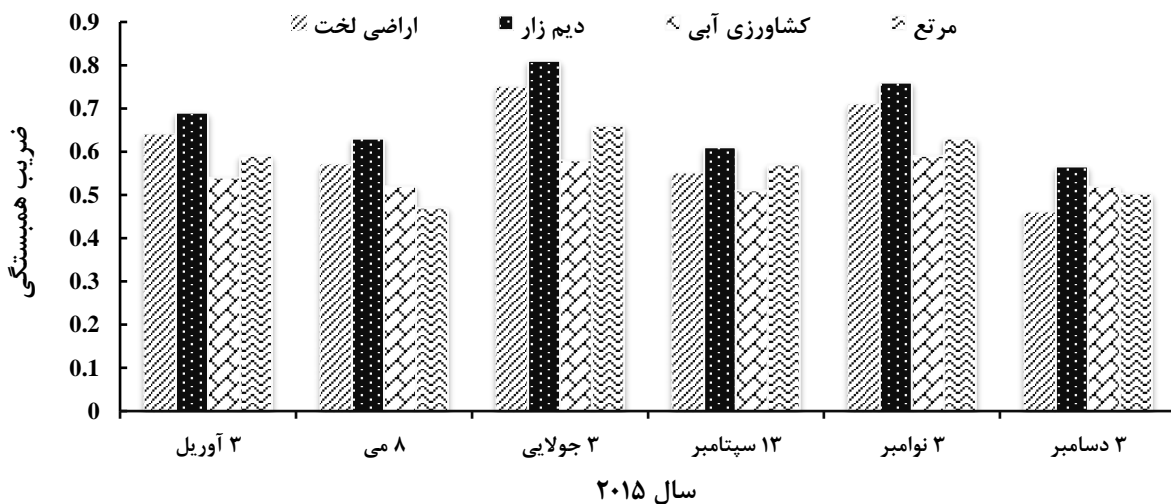
#### اعتبارسنجی داده‌های ماهواره SMAP در بازه‌های زمانی و کاربری‌های مختلف زمین

اراضی پست و کم ارتفاع اغلب در بخش‌های شمال غربی حوضه و زیر حوضه میاندوآب منتهی به دریاچه ارومیه دیده می‌شوند. بیشتر مناطق مرتفع در نواحی جنوبی و جنوب شرقی حوضه در زیر حوضه تکاب، سقز و صائین قلعه واقع شده اند. کشاورزی آبی در بین کاربری‌های گوناگون وسعت زیادی ندارد و اغلب این نوع کاربری اراضی در زیر حوضه میاندوآب واقع در نواحی شمال غربی حوضه می‌باشند. پهنه‌های آبی واقع در حوضه سیمینه-زرنه شامل سد شهید کاظمی بوکان و رودخانه‌های جاری در حوضه می‌باشند که حدود ۲/۶۵ درصد از مساحت کل منطقه را در بر گرفته‌اند. بیشترین وسعت اراضی دیم در زیر حوضه بوکان قرار دارد و این زیر حوضه یکی از بزرگترین تولید کنندگان گندم در

کاربری مرتع می‌باشند.

اقليمی بر روی تغییرات محتوای رطوبت خاک مؤثر است. در زمان‌های ۳ جولای و ۳ نوامبر، ضریب همبستگی اراضی بایر بعد از کاربری دیم‌زار بیشترین مقدار می‌باشد. هرچند انتظار بر این بود که کاربری اراضی بایر دارای ضرایب به نسبت بالاتری در مقایسه با سایر کاربری‌ها باشد اما اینکه ضریب همبستگی این کاربری کمتر از اراضی دیم شد؛ ممکن است به ویژگی‌های ذاتی این اراضی که بر خصوصیات بازتاب طیفی اثرگذار است، ارتباط داشته باشد. این کاربری به لحاظ دخالت انسان و تأثیر آن بر تغییرات محتوای رطوبت خاک در کمترین حالت قرار دارد.

در این بخش از پژوهش برای ارزیابی دقت ماهواره SMAP در برآورد رطوبت خاک در زمان‌های مختلف در کاربری‌های گوناگون نیز از آماره‌های MD، RMSD، ubRMSE و  $r$  استفاده شد. شکل (۵) ضرایب همبستگی را در دوره‌های زمانی مختلف در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل می‌توان دریافت که در تمام دوره‌های زمانی، کاربری دیم‌زار دارای بیشترین میزان ضریب همبستگی در بین سایر کاربری‌ها بوده است. این مطلب بیانگر آن است که تغییرات محتوای رطوبت خاک در این کاربری از الگوی ثابتی تبعیت می‌کند و تنها عوامل



شکل ۵- ضریب همبستگی بین داده‌های ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی در کاربری‌ها و زمان‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرینه

انحراف معیار مربوط به کاربری اراضی دیم می‌باشد که حداقل مقدار آن در ماه‌های ۸ می و ۳ جولای می‌باشد.

شکل (۶) آماره‌های اعتبارسنجی داده‌های ماهواره SMAP با مشاهدات زمینی را در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد. در ۳ آوریل که پوشش گیاهی باگذر زمان رو به رشد است کمترین میزان RMSD و بیشترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به کاربری کشاورزی دیم می‌باشد. این یافته‌ها با نتایج Zhang et al. (2017) و Das et al. (2018) مطابقت دارد. Das et al. (2018) به اعتبارسنجی داده‌های ماهواره SMAP در هسته سایت‌های اعتبارسنجی پرداختند و گزارش کردند که در اراضی با پوشش گیاهی کمتر همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و مشاهده‌ای بیشتر است. در ۳ جولای بیشترین مقدار ضریب همبستگی در تمام کاربری‌ها قابل مشاهده است و در بین آن‌ها کاربری دیم‌زار دارای بیشترین مقدار همبستگی می‌باشد. در ۳ دسامبر که پوشش گیاهی در سطح اراضی حداقل مقدار می‌باشد بیشترین مقدار RMSD در کاربری مرتع مشاهده شد. مقدار ضریب همبستگی در تمام کاربری‌های اراضی به هم بسیار نزدیک

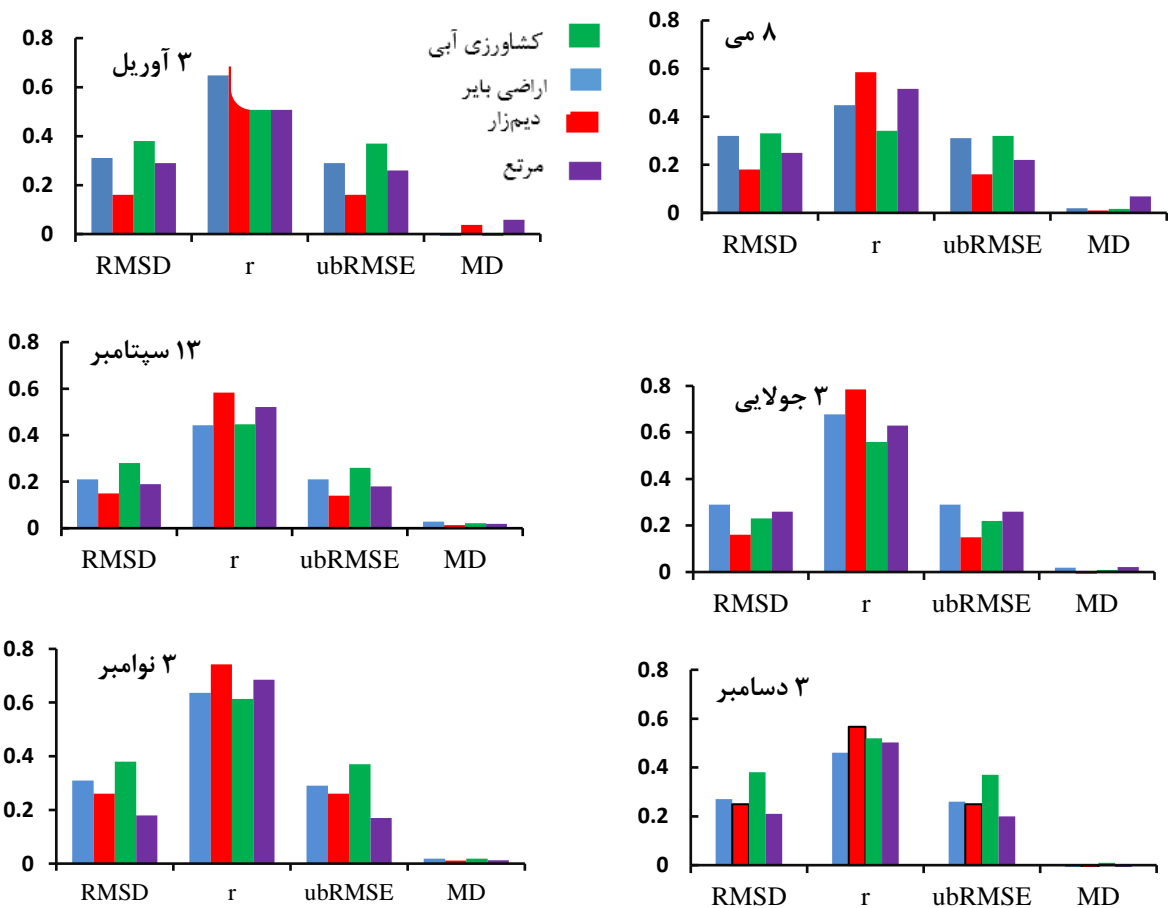
در زمان ۳ دسامبر، تغییرات ضرایب همبستگی در کاربری‌های مختلف تقریباً کم است (جدول ۵). این امر می‌تواند به خاطر وجود پوشش برف در سطح اراضی باشد که کاربری‌های مختلف، انعکاس یکسانی را نشان داده‌اند (Brocca et al., 2010) اما در بیشتر زمان‌های مورد مطالعه، کاربری کشاورزی آبی دارای کمترین میزان ضریب همبستگی می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند تغییرات نامنظم رطوبت خاک در این اراضی باشد زیرا با کم شدن محتوای رطوبت در این اراضی، آبیاری صورت می‌گیرد که می‌تواند سبب تغییرات در انعکاس سطحی این کاربری شود (Wang et al., 2018).

جدول (۵) میانگین انحراف معیار رطوبت خاک را در کاربری‌های مختلف در طی دوره زمانی سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. باتوجه به این جدول، بیشترین میزان انحراف معیار مربوط به کشاورزی آبی می‌باشد که بیشترین مقادیر آن در ۳ جولای و ۱۳ سپتامبر می‌باشد. دلیل این عامل می‌تواند نوسان محتوای رطوبت خاک در اثر آبیاری و عدم پیروی تغییرات آن از متغیرهای اقلیمی باشد (Dorigo et al., 2012). همچنین کمترین مقادیر

هستند. در همین زمان مقدار MD در تمام کاربری‌ها به صفر خیلی نزدیک می‌باشد.

جدول ۵- میانگین ضریب همبستگی و انحراف معیار داده‌های ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی در کاربری‌های مختلف

آماره	کاربری اراضی	۳ آوریل	۸ می	۳ جولای	۱۳ سپتامبر	۳ نوامبر	۳ دسامبر
ضریب همبستگی (r)	اراضی بایر	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۷۱	۰/۶۷
	دیم‌زار	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۸۱	۰/۶۱	۰/۷۶	۰/۶۱
	کشاورزی آبی	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۵۱
	مرتع	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۶۶	۰/۵۷	۰/۶۳	۰/۵۹
انحراف معیار (SD)	اراضی بایر	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۱۹
	دیم‌زار	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۶
	کشاورزی آبی	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۳
	مرتع	۰/۱۹	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۷



شکل ۶- نتایج اعتبارسنجی داده‌های ماهواره SMAP با داده‌های زمینی رطوبت خاک در کاربری‌های مختلف حوضه سیمینه-زربنه

در کاربری‌های مختلف و تغییرات زمانی آن منجر به نتایج متفاوت در مکان و زمان‌های مختلف شده است. نتایج ضعیف ارزیابی در برخی کاربری‌ها و زمان‌های مختلف می‌تواند به دلیل عوامل پیچیده مؤثر بر انعکاس امواج از سطح اراضی باشد (Wu et al., 2016). دلیل بعدی این امر این است که رطوبت خاک سطحی متغیری به شدت پویا در زمان و مکان می‌باشد و این متغیر به شدت از متغیرهای اقلیمی تأثیر می‌پذیرد و رفتار تغییرات رطوبت

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تطابق بین داده‌های ماهواره SMAP و مشاهدات زمینی در زمان ۳ جولای و در کاربری دیم‌زار با مقادیر RMSD، MD و unRMSE به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۰/۱۸، و ۰/۱ می‌باشد. تنوع پوشش گیاهی، خاک و خصوصیات اقلیمی پارامترهای مؤثر بر تغییرپذیری رطوبت خاک در حوضه مورد مطالعه بوده و همین عوامل نقش اساسی در نتایج ارزیابی ایفا می‌کنند. به علاوه تغییرپذیری مکانی پوشش گیاهی

در زمان ۳ آوریل و ضریب همبستگی پایین ۰/۵۶، ۰/۵۷ و ۰/۵۲ در زمان‌های ۸ می، ۱۳ سپتامبر و ۳ دسامبر نسبت به سایر زمان‌ها بود. در زمان‌های ۳ دسامبر و ۳ آوریل میزان RMSD دارای حداکثر مقدار بین ۰/۲۵ تا  $0.35 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  بود که میزان تطابق داده‌های ماهواره با داده‌های اندازه‌گیری زمینی نسبت به ماه‌های دیگر دارای کمترین مقدار می‌باشد. شاخص ubRMSE در زمان‌های ۳ جولای و ۳ سپتامبر در کمترین مقدار بین ۰/۱۸ تا  $0.21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  قرار داشت. به طور کلی نتایج نشان داد که داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با مقدار RMSD بین ۰/۱۸ تا  $0.33 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  و ubRMSE بین ۰/۱۷ تا  $0.33 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  کارایی بهتری را در تطابق با داده‌های زمینی نشان می‌دهند. در بین بازه‌زمانی مورد مطالعه، ۳ جولای بیشترین همبستگی و ۱۳ سپتامبر کمترین مقدار RMSD را داشته‌اند. در ۳ آوریل که پوشش گیاهی رو به رشد بود، کمترین میزان RMSD و بیشترین مقدار همبستگی مربوط به کاربری کشاورزی دیم مشاهده شد. در ۳ جولای بیشترین مقدار همبستگی در تمام کاربری‌ها قابل مشاهده بوده و در بین آن‌ها کاربری دیم‌زار دارای بیشترین مقدار همبستگی بود. در ۳ دسامبر که پوشش گیاهی در سطح اراضی حداقل مقدار را داشت، بیشترین مقدار RMSD مربوط به کاربری مرتع بود. در مجموع پیشنهاد می‌شود که با توجه به عملکرد مناسب داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP، این داده‌ها در مطالعات هیدرولوژی و برای پیش‌بینی رواناب در اراضی مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

در سطح خاک کاملاً متفاوت با تغییرات آن در اعماق می‌باشد. نوسان رطوبت عمقی خاک کمتر تحت فرایندهای اتمسفریک قرار می‌گیرد. ضمن اینکه در طی فرایند اعتبارسنجی ممکن است غیر همسانی پیکسل‌های داده‌های ماهواره با مشاهدات زمینی ایجاد خطا کند (Miralles *et al.*, 2010). پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی به نقش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و تأثیر آن بر پراکنش رطوبت خاک و همچنین عوامل توپوگرافی و شاخص‌های مشتق شده از آن‌ها و تأثیرشان بر تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های ۲۸۷ نقطه نمونه‌برداری به عنوان کنترل زمینی در ۶ زمان مختلف، ارزیابی جامعی از داده‌های SMAP در حوضه سیمینه-زربینه (بوکان) صورت گرفت. برای تطابق داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات زمینی از طریق چهار شاخص ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات اختلاف (RMSD)، ریشه میانگین مربعات خطا نارایب (ubRMSE) و میانگین اختلاف (MD) استفاده شد. کمترین مقادیر رطوبت خاک در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست و کمترین مقادیر انحراف معیار در ماه‌های سپتامبر و اکتبر مشاهده شد. نتایج نشان داد که داده‌های ماهواره SMAP با داده‌های مشاهده‌ای زمینی دارای ضریب همبستگی (r) بالا و برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۲، به ترتیب در زمان‌های ۳ جولای و ۳ نوامبر و ضریب همبستگی (r) متوسط برابر با ۰/۶۲

### REFERENCES

- Ahmed, A., Zhang, Y., & Nichols, S. (2011). Review and evaluation of remote sensing methods for soil-moisture estimation. *SPIE reviews*, 2(1), 028001.
- Albergel, C., Dorigo, W., Balsamo, G., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L., and Wagner, W. (2013). Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface reanalyses. *Remote Sensing of Environment*, 138, 77-89.
- Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y., De Rosnay, P., De Jeu, R., ... & Richaume, P. (2014). Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. *Remote Sensing of Environment*, 149, 181-195.
- Baghdadi, N., Aubert, M., & Zribi, M. (2011). Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3), 512-516.
- 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.
- Das, N. N., Entekhabi, D., Dunbar, R. S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., & Cosh, M. H. (2018). The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 211, 204-217.
- Dorigo, W., de Jeu, R., Chung, D., Parinussa, R., Liu, Y., Wagner, W., & Fernández-Prieto, D. (2012). Evaluating global trends (1988–2010) in harmonized multi-satellite surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 39(18).
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., ... & Kimball, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- Escorihuela, M. J., & Quintana-Seguí, P. (2016). Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes. *Remote sensing of environment*, 180, 99-114.
- Mekonnen, D. F. (2009). Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara

- catchment. *Ethiopia Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia*.
- Miralles, D. G., Crow, W. T., & Cosh, M. H. (2010). Estimating spatial sampling errors in coarse-scale soil moisture estimates derived from point-scale observations. *Journal of Hydrometeorology*, 11(6), 1423-1429.
- Safari, N., Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2014). Nash bargaining and leader-follower models in water allocation: Application to the Zarrinehrud River basin, Iran. *Applied Mathematical Modelling*, 38(7-8), 1959-1968.
- Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., Brocca, L., Ciabatta, L., & Entekhabi, D. (2018). Integration of microwave data from SMAP and AMSR2 for soil moisture monitoring in Italy. *Remote Sensing of Environment*, 212, 21-30.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., and Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth. Rev.*, 99, 125-161.
- Wang, L., & Qu, J. J. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(2), 237-247.
- Wang, X., Wang, B., Xu, X., Liu, T., Duan, Y., & Zhao, Y. (2018). Spatial and temporal variations in surface soil moisture and vegetation cover in the Loess Plateau from 2000 to 2015. *Ecological indicators*, 95, 320-330.
- Zaman, M. R., Morid, S., & Delavar, M. (2016). Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems*, 147, 98-110.
- Zhang, J., Zhou, L., Ma, R., Jia, Y., Yang, F., Zhou, H., & Cao, X. (2019). Influence of soil moisture content and soil and water conservation measures on time to runoff initiation under different rainfall intensities. *CATENA*, 182, 104172.
- 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.