Monitoring Spatiotemporal Changes in Surface Soil Moisture in Guilan Province Using SMAP Data and Assessing Its Relationship with Precipitation and NDMI

Abstract

Despite the importance of surface soil moisture for monitoring moisture conditions, water resource and agricultural management, regional information on the spatiotemporal variability of soil moisture and its relationships with precipitation and vegetation moisture conditions in Guilan Province remains limited. Therefore, this study aimed to investigate the temporal and spatial patterns of surface soil moisture in Guilan Province and to assess its relationships with annual precipitation and the Normalized Difference Moisture Index (NDMI). SMAP L4 soil moisture data for the period 2015–2020 were extracted and processed using the Google Earth Engine (GEE) platform. In addition, NDMI data were derived from satellite imagery, while annual precipitation data were obtained from meteorological stations across the province and compared with variations in soil moisture. The results revealed a distinct seasonal pattern in soil moisture, with mean values reaching approximately 25–30% during the wet months and declining to below 10% during the dry months. A relative decline in the peaks of seasonal soil moisture was also observed from 2018 onward. Overall, soil moisture values during the study period ranged from 4.9% to 27.9%. Comparison of the annual variations in soil moisture and NDMI indicated that changes in NDMI and soil moisture were consistent in some years, although this pattern was not observed throughout the entire study period. Linear regression analysis between annual mean soil moisture and precipitation revealed a strong positive relationship, with an R^2 of 0.86. Overall, the findings demonstrate that SMAP data provide useful information for monitoring seasonal and interannual variations in soil moisture across Guilan Province, while NDMI can serve as a complementary indicator for assessing vegetation moisture conditions. The integrated use of soil moisture, precipitation, and remote-sensing indices can support drought monitoring, soil and water resource management, and regional agricultural and irrigation planning.

Keywords: Google Earth Engine, Seasonal Moisture Variations, Remote Sensing, Vegetation Moisture, Water Resources Management.

ویرایش نشده

Abstract

Objective: Surface soil moisture is a key component of the hydrological cycle and plays a vital role in land–atmosphere water and energy exchange, vegetation growth, water resources management, and agricultural planning. This study aimed to investigate the spatiotemporal variability of surface soil moisture in Guilan Province using Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite data and to evaluate its relationships with annual precipitation and the Normalized Difference Moisture Index (NDMI).

Methods: SMAP L4 surface soil moisture data (0–5 cm) covering the period from 2015 to 2020 were extracted and processed using the Google Earth Engine (GEE) platform. The boundary of Guilan Province was defined using a geographic shapefile, and JavaScript-based scripts were used to calculate monthly and annual mean soil moisture. Annual NDMI values were derived from satellite imagery, while precipitation data were obtained from meteorological stations across the study area. Linear regression analysis was performed to evaluate the relationship between annual precipitation and SMAP-derived soil moisture, and annual NDMI trends were compared with soil moisture dynamics.

Findings: The results revealed a distinct seasonal pattern in surface soil moisture, with the highest values occurring during autumn and winter and the lowest values during spring and summer. Mean soil moisture reached approximately 25–30% during the wet months (October–March) and declined to less than 10% during the dry months (May–September). Overall soil moisture values ranged from 4.9% to 27.9% during the study period, with the highest and lowest values recorded in 2016 and 2017, respectively. A relative decline in seasonal peak soil moisture was observed from 2018 onward. Linear regression analysis demonstrated a strong positive relationship between annual precipitation and surface soil moisture ($R^2 = 0.86$), indicating a strong association between interannual precipitation variability and soil moisture conditions. Comparison of annual trends showed that NDMI and soil moisture followed broadly similar patterns in some years, although this correspondence was not consistent throughout the study period, suggesting that NDMI is also influenced by climatic conditions, vegetation characteristics, soil properties, and differences in the spatial resolution of the datasets.

Conclusion: The results demonstrate that SMAP data provide a useful source for monitoring the spatiotemporal dynamics of surface soil moisture at the regional scale. NDMI can serve as a complementary indicator for assessing vegetation moisture conditions, although its relationship with surface soil moisture is not consistent across all years. The integrated use of SMAP, NDMI, and meteorological observations can support drought monitoring, water and soil resources management, agricultural planning, and climate adaptation strategies in Guilan Province. Future studies should validate SMAP products using in situ soil moisture measurements and integrate higher-spatial-resolution remote sensing data to improve local-scale soil moisture assessment.

نسخه اولیه

پایش تغییرات زمانی–مکانی رطوبت خاک سطحی در استان گیلان با استفاده از داده‌های SMAP و بررسی ارتباط آن با بارش و NDMI

چکیده

با وجود اهمیت رطوبت خاک سطحی در پایش شرایط رطوبتی و مدیریت منابع آب و کشاورزی، اطلاعات منطقه‌ای درباره تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک و ارتباط آن با بارش و وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی در استان گیلان محدود است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی الگوهای زمانی و مکانی رطوبت خاک سطحی در استان گیلان و ارزیابی ارتباط آن با بارش سالانه و شاخص رطوبتی پوشش گیاهی (NDMI) انجام شد. در این پژوهش، داده‌های رطوبت خاک محصول SMAP L4 طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ در بستر گوگل ارث انجین (GEE) استخراج و پردازش شد. همچنین، داده‌های NDMI از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های بارش سالانه از ایستگاه‌های هواشناسی استان استخراج و با تغییرات رطوبت خاک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که رطوبت خاک دارای الگوی فصلی مشخصی است؛ به‌طوری‌که میانگین رطوبت خاک در ماه‌های مرطوب سال به حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد رسیده، درحالی‌که در ماه‌های خشک به کمتر از ۱۰ درصد کاهش یافته است. همچنین، از سال ۲۰۱۸ به بعد کاهش نسبی در قله‌های رطوبت فصلی مشاهده شد. مقدار رطوبت خاک در دوره مطالعه در محدوده ۴/۹ تا ۲۷/۹ درصد قرار داشت. مقایسه روند تغییرات سالانه رطوبت خاک و شاخص NDMI نشان داد که تغییرات NDMI و رطوبت خاک در برخی سال‌ها هم‌راستا بودند، اما این الگو در تمامی سال‌ها برقرار نبود. تحلیل رگرسیون خطی بین میانگین سالانه رطوبت خاک و بارش نشان‌دهنده رابطه مثبت و قوی با $R^2 = 0.86$ بود. در مجموع، نتایج نشان داد که داده‌های SMAP قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات فصلی و بین‌سالی رطوبت خاک در استان گیلان دارند و NDMI می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مکمل برای ارزیابی وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی مورد استفاده قرارگیرد. استفاده هم‌زمان از داده‌های رطوبت خاک، بارش و شاخص‌های سنجش‌ازدور می‌تواند در پایش خشکسالی، مدیریت منابع آب و خاک و برنامه‌ریزی آبیاری و کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای کاربرد داشته باشد.

کلمات کلیدی: تغییرات فصلی رطوبت، رطوبت پوشش گیاهی، سنجش‌ازدور، گوگل ارث انجین، مدیریت منابع آب

مقدمه

پویایی آب در سطح زمین تحت تأثیر برهم‌کنش پیچیده میان بارش، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق و شرایط توپوگرافی قرار دارد (Montzka et al., 2016). در این میان، رطوبت خاک یکی از مؤلفه‌های کلیدی سامانه خاک–گیاه است که تغییرات آن می‌تواند وضعیت دسترسی آب و پاسخ اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی به نوسانات اقلیمی را منعکس کند (نیک داد و همکاران، ۱۴۰۲، کرمی و همکاران، ۱۳۹۹). ازاین‌رو، شناخت الگوهای زمانی و مکانی رطوبت خاک برای پایش خشکسالی، مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و ارزیابی پاسخ اکوسیستم‌ها به تغییرات اقلیمی اهمیت دارد. با این حال، تغییرات رطوبت خاک در مقیاس منطقه‌ای تحت تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی، ویژگی‌های سطح زمین و فرآیندهای هیدرولوژیکی قرار دارد و پایش دقیق آن به داده‌هایی با پوشش زمانی و مکانی مناسب نیازمند است (Entekhabi et al., 2010; Abbaszadeh et al., 2019). در میان عوامل مؤثر بر تغییرات رطوبت خاک، بارش یکی از مهم‌ترین ورودی‌های آب به سامانه خاک–گیاه محسوب می‌شود. تغییر در مقدار، شدت و توزیع زمانی بارش می‌تواند مستقیماً بر میزان آب ورودی به خاک و در نتیجه بر وضعیت رطوبتی سطح زمین اثر بگذارد. بااین‌حال، رابطه میان بارش و رطوبت خاک در مناطق مختلف یکسان نیست و شدت این ارتباط می‌تواند تحت تأثیر اقلیم، پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و فرآیندهای تبخیر و تعرق تغییر کند (حاجی ملکی و همکاران، ۱۳۹۹). مطالعات مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور نشان داده‌اند که در بسیاری از مناطق، تغییرات بارش و رطوبت خاک دارای رابطه مثبت هستند، اما این ارتباط در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و اقلیم مرطوب می‌تواند ضعیف‌تر و پیچیده‌تر باشد (Sehler et al., 2019). همچنین، مطالعات جدیدتر نشان

ویرایشناری نشاه

داده‌اند که ارتباط زمانی و مکانی میان بارش و رطوبت خاک به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین وابسته است و نمی‌توان آن را به‌صورت یک رابطه ثابت در همه مناطق در نظر گرفت (Zan et al., 2024). ازاین‌رو، بررسی هم‌زمان رطوبت خاک و بارش می‌تواند به درک بهتر پویایی رطوبت خاک و تفسیر نقش نوسانات بارندگی در تغییرات بین‌سالی آن کمک کند. در کنار بارش، وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی نیز می‌تواند اطلاعات مکملی درباره پویایی آب در سامانه خاک-گیاه فراهم کند. شاخص نرمال‌شده اختلاف رطوبت[1](NDMI) با استفاده از بازتاب باندهای نزدیک‌مادون‌قرمز (NIR) و مادون‌قرمز کوتاه‌موج (SWIR) محاسبه می‌شود و عمدتاً نسبت به تغییرات محتوای آب پوشش گیاهی حساس است (Gao, 1996; USGS, 2024). اگرچه NDMI اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک محسوب نمی‌شود، تغییرات آن می‌تواند از طریق وضعیت آب قابل دسترس برای پوشش گیاهی با تغییرات رطوبت خاک ارتباط داشته باشد. بر همین اساس، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که شاخص‌های رطوبتی مبتنی بر NIR و SWIR، در کنار داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک مانند SMAP، می‌توانند برای پایش تغییرات رطوبتی و شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار گیرند (Xu et al., 2025; Costa-Saura et al., 2021). همچنین، رابطه میان NDMI و رطوبت خاک در مناطق مرطوب نیز گزارش شده است، هرچند شدت این رابطه به نوع پوشش گیاهی و شرایط زمانی و مکانی وابسته است (Monteiro et al., 2024).

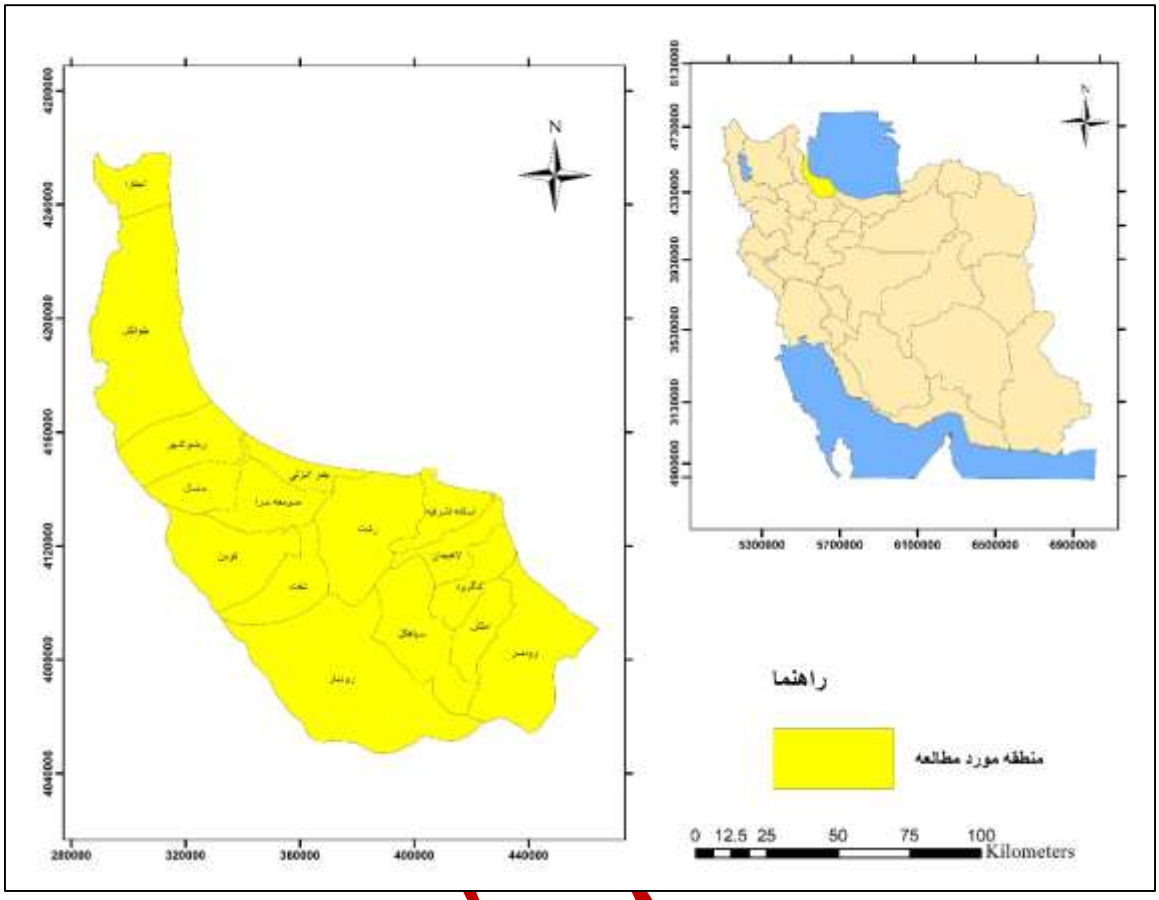
اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک در محل، اگرچه برای مطالعات محلی و اعتبارسنجی محصولات ماهواره‌ای ضروری است، به دلیل هزینه، نیاز به نمونه‌برداری مستمر و محدودیت تعداد نقاط اندازه‌گیری، معمولاً نمی‌تواند تغییرات پیوسته این متغیر را در مقیاس‌های منطقه‌ای و گسترده پوشش دهد. در مقابل، سنجش‌ازدور مایکروویو امکان پایش گسترده و تکرارشونده رطوبت خاک سطحی را فراهم کرده و به یکی از رویکردهای مهم برای پایش این متغیر تبدیل شده است. در این میان، مأموریت[2]SMAP که در سال ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شد، یکی از مهم‌ترین منابع داده برای پایش رطوبت خاک در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است. این مأموریت با بهره‌گیری از مشاهدات مایکروویو باند L امکان برآورد رطوبت خاک سطحی را در مقیاس وسیع فراهم می‌کند (Entekhabi et al., 2010; Das et al., 2018). محصول SMAP Level 4 با ادغام مشاهدات ماهواره‌ای و مدل‌سازی سطح زمین، برآوردهای سه‌ساعته و جهانی رطوبت خاک سطحی در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متر و رطوبت ناحیه ریشه را با تفکیک مکانی حدود ۹ کیلومتر ارائه می‌کند. ارزیابی‌های انجام‌شده با استفاده از مشاهدات زمینی نشان داده‌اند که محصول SM_L4 به معیار دقت تعیین‌شده برای رطوبت خاک سطحی دست می‌یابد و از قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات رطوبتی در مقیاس منطقه‌ای برخوردار است (Reichle et al., 2023). همچنین، ارزیابی نسخه‌های مختلف محصول SMAP نشان داده است که عملکرد آن در شرایط محیطی مختلف می‌تواند تحت تأثیر پوشش گیاهی، ویژگی‌های سطح زمین و شرایط رطوبتی قرار گیرد؛ ازاین‌رو، بررسی عملکرد و الگوی تغییرات SMAP در مناطق با ویژگی‌های اقلیمی و پوشش سطحی متفاوت همچنان اهمیت دارد. پژوهش‌های جدید نیز بر کاربرد گسترده داده‌های سنجش‌ازدور رطوبت خاک در کشاورزی، هیدرولوژی و پایش خشکسالی و در عین حال، بر ضرورت توجه به محدودیت تفکیک مکانی محصولات ماهواره‌ای تأکید کرده‌اند (Zhong et al., 2024; Li et al., 2024). مطالعات متعددی قابلیت و محدودیت داده‌های SMAP را در شرایط مختلف اقلیمی و کاربری اراضی بررسی کرده‌اند. برای نمونه، حاجی‌ملکی و همکاران (۱۳۹۹)، در حوضه آبخیز سیمینه–زرینه در شمال‌غرب ایران، داده‌های رطوبت خاک SMAP را با اندازه‌گیری‌های زمینی مقایسه کردند و نشان دادند که عملکرد محصول ماهواره‌ای در کاربری‌های مختلف یکسان نیست و ارزیابی محلی داده‌ها برای استفاده در مقیاس منطقه‌ای اهمیت دارد. این یافته با نتایج مطالعات بین‌المللی نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهند دقت محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای به شرایط پوشش گیاهی و ویژگی‌های سطح زمین وابسته است (Reichle et al., 2017). در سطح ملی نیز استفاده از داده‌های SMAP برای بررسی الگوهای زمانی و مکانی رطوبت خاک، ظرفیت قابل توجهی برای تحلیل تغییرات رطوبتی در اقلیم‌های متفاوت ایران نشان داده است. مثلا در مطالعه‌ای با عنوان بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAP L4، الگوهای فصلی و منطقه‌ای رطوبت

[1] Normalized Difference Moisture Index
[2] Soil Moisture Active Passive

خاک در سراسر کشور استخراج شد که اهمیت این داده‌ها را در مدیریت منابع آب در اقلیم‌های متنوع ایران تأیید کرد. علاوه بر این، پژوهش‌هایی نیز در راستای بهبود کیفیت و وضوح مکانی داده‌های SMAP انجام شده است. به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای در حوضه آبخیز فیروزآباد اردبیل، با استفاده از روش ترکیب داده‌های راداری و تابش‌سنجی، دقت مکانی داده‌های SMAP به‌طور قابل توجهی افزایش یافت که می‌تواند در مطالعات محلی با دقت بالا، به‌ویژه در مناطق ناهمگن، بسیار مؤثر واقع شود (کرمی و همکاران، ۱۳۹۹). در مجموع، یافته‌های همه این مطالعات نشان می‌دهند که داده‌های SMAP ابزاری توانمند برای پایش رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی هستند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در پایش ماهواره‌ای رطوبت خاک، هنوز بررسی رفتار زمانی–مکانی این متغیر در مناطق مرطوب و دارای پوشش گیاهی و فعالیت‌های کشاورزی گسترده، به‌ویژه در مقیاس استانی، اهمیت دارد. استان گیلان از این نظر منطقه‌ای قابل توجه است؛ زیرا از یک سو تحت تأثیر رژیم بارش خزری و تغییرات فصلی شدید در شرایط رطوبتی قرار دارد و از سوی دیگر، پوشش گیاهی متراکم و گستره قابل توجه اراضی کشاورزی می‌تواند بر رفتار رطوبت خاک و پاسخ محصولات سنجش‌ازدور اثرگذار باشد. همچنین، مطالعات مبتنی بر داده‌های SMAP در ایران عمدتاً بر اعتبارسنجی محصول، بررسی الگوهای ملی یا مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که بررسی هم‌زمان تغییرات زمانی–مکانی رطوبت خاک سطحی در استان گیلان و ارتباط آن با بارش و وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی الگوهای زمانی و مکانی رطوبت خاک سطحی استان گیلان با استفاده از داده‌های SMAP L4 طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی عوامل مرتبط با تغییرات رطوبت خاک، رابطه آن با بارش سالانه و تغییرات NDMI ارزیابی گردید. استفاده از گوگل ارث انجین نیز امکان استخراج و پردازش حجم گسترده داده‌های ماهواره‌ای و بررسی منسجم تغییرات زمانی رطوبت خاک را در محدوده استان فراهم کرد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به شناخت بهتر پویایی رطوبت خاک در یک منطقه مرطوب و کشاورزی، بهبود پایش شرایط رطوبتی و پشتیبانی از مدیریت منابع آب، پایش خشکسالی و برنامه‌ریزی کشاورزی در استان گیلان کمک کند.

ویراستاری نشده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان گیلان در شمال ایران و محدوده منطقه مورد مطالعه

روش کار

در این پژوهش به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی استان گیلان، از داده‌های ماهواره‌ای مأموریت SMAP استفاده شد. محصول مورد استفاده، داده‌های سطح چهارم (SMAP L4) بود که با وضوح مکانی تقریباً ۹ کیلومتر و دقت زمانی روزانه، اطلاعات مرتبط با رطوبت خاک در لایه سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) را ارائه می‌دهد. انتخاب لایه ۰ تا ۵ سانتی‌متر با توجه به هدف پژوهش و ماهیت رطوبت خاک سطحی انجام شد؛ زیرا این لایه بیشترین تماس را با شرایط جوی و سطح زمین داشته و رطوبت آن به‌طور مستقیم‌تر تحت تأثیر عواملی مانند بارش، تبخیر و تعرق و وضعیت پوشش گیاهی قرار می‌گیرد. در نتیجه، تغییرات رطوبت در این لایه می‌تواند پاسخ سریع‌تری به تغییرات کوتاه‌مدت شرایط هیدرو-اقلیمی نشان دهد و برای بررسی پویایی زمانی–مکانی رطوبت خاک سطحی مناسب باشد (Chen et al., 2017). همچنین، از آنجا که محصول SMAP L4 مستقیماً رطوبت خاک را برای لایه ۰ تا ۵ سانتی‌متر ارائه می‌کند، استفاده از این لایه امکان تحلیل مستقیم و سازگار با ساختار محصول را فراهم می‌سازد (Reichle et al., 2019). این داده‌ها از جمله منابع معتبر جهانی برای مطالعات هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی به‌شمار می‌روند و با بهره‌گیری از مدل‌های عددی و داده‌های مشاهداتی سطح زمین، برآوردهای نسبتاً دقیق و همگنی از رطوبت خاک فراهم می‌کنند (Entekhabi et al., 2010; Reichle et al., 2019).

فرایند استخراج داده‌ها با استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین[1](GEE) انجام گرفت. این پلتفرم با قابلیت پردازش ابری و دسترسی به مجموعه گسترده‌ای از داده‌های ماهواره‌ای، امکان استخراج، پردازش و تحلیل داده‌ها را بدون نیاز به ذخیره‌سازی محلی فراهم می‌کند. برای این منظور، محدوده‌ی جغرافیایی استان گیلان به‌صورت یک شیپ‌فایل[2]برداری به محیط GEE وارد شد (شکل ۱). سپس با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت[3] کدهای مورد نیاز برای فراخوانی، فیلتر و استخراج داده‌های SMAP در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نوشته شد. بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به‌صورت هدفمند به‌عنوان دوره مطالعه انتخاب شد تا تغییرات زمانی–مکانی رطوبت خاک و ارتباط آن با بارش و NDMI در یک بازه زمانی پیوسته و مشترک مورد بررسی قرار گیرد. در این مرحله، میانگین‌های زمانی و مکانی رطوبت خاک برای هر پیکسل در لایه سطحی محاسبه شد. پس از استخراج داده‌ها، به‌منظور تحلیل روندهای زمانی، میانگین‌های ماهانه و سالانه رطوبت خاک محاسبه و به‌صورت نمودارهای سری زمانی ترسیم شد. در نهایت، به‌منظور ارزیابی تغییرات رطوبت خاک سطحی، ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک استخراج‌شده از داده‌های SMAP، بارش سالانه و شاخص NDMI بررسی شد. داده‌های بارش سالانه از اداره‌کل هواشناسی استان گیلان تهیه و شاخص NDMI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 استخراج گردید. سپس، رابطه بین رطوبت خاک و بارش با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی و روند تغییرات سالانه رطوبت خاک و NDMI به‌صورت مقایسه‌ای ارزیابی شد.

نتایج و بحث

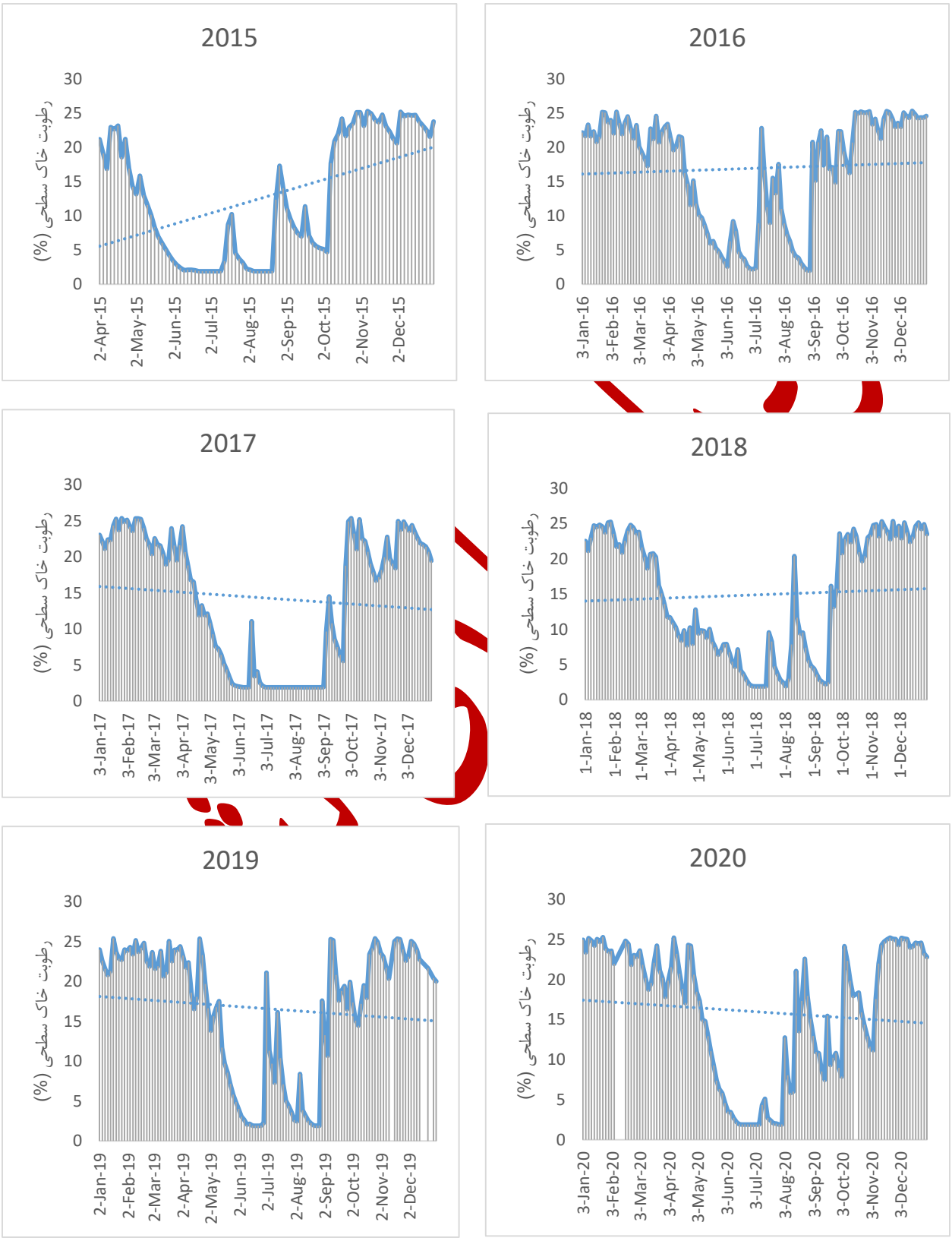
تغییرات زمانی رطوبت خاک سطحی (۲۰۲۰–۲۰۱۵)

بررسی تغییرات زمانی رطوبت سطحی خاک استان گیلان طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های ماهواره SMAP نشان‌دهنده نوسانات فصلی مشخص و روند سالانه قابل‌توجهی در این شاخص است (شکل ۲). در تمامی سال‌های مورد مطالعه، الگوی فصلی رطوبت خاک به صورت افزایش مقادیر در فصول پاییز و زمستان و کاهش چشمگیر در فصول بهار و تابستان مشاهده شد. به‌طوری که میانگین رطوبت خاک در ماه‌های مرطوب (اکتبر تا مارس) به حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد رسیده و در ماه‌های خشک (مه تا سپتامبر) به مقادیر کمتر از ۱۰ درصد کاهش یافته است. مقایسه میانگین‌های سالانه نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، مقادیر رطوبت خاک در دوره‌های مرطوب نسبتاً بالاتر بوده؛ اما از سال ۲۰۱۸ به بعد، کاهش نسبی در قله‌های رطوبت فصلی مشاهده می‌شود (شکل ۲). این تغییرات می‌تواند بیانگر کاهش تدریجی رطوبت خاک، به‌ویژه در بخش پایانی دوره مطالعه باشد که احتمالاً ناشی از کاهش بارندگی سالانه و افزایش دما در منطقه است. به طور کلی، روند تغییرات طی پنج سال مورد بررسی حاکی از کاهش نسبی میانگین سالانه رطوبت خاک سطحی است، هرچند نوسانات فصلی همچنان به طور مشخص حفظ شده‌اند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و خاک در استان گیلان باید هر دو بعد فصلی و روندهای میان‌مدت را مد نظر قرار دهند. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج مطالعات انجام‌شده در مقیاس ملی و منطقه‌ای نیز همخوانی دارد. اسعدی اسکویی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از محصول SMAP L4 طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ نشان دادند که استان گیلان با میانگین رطوبت خاک ۰/۲۹۴ مترمکعب بر مترمکعب، بالاترین میانگین سالانه رطوبت خاک را در میان استان‌های ایران داراست. این مقدار با مقادیر بالاتر رطوبت مشاهده‌شده در ماه‌های مرطوب در پژوهش حاضر سازگار است و جایگاه گیلان را به‌عنوان یکی از مرطوب‌ترین مناطق کشور از نظر رطوبت خاک تأیید می‌کند. همچنین، بیشترین و کمترین میانگین هفت‌ساله رطوبت خاک در مطالعه مذکور به‌ترتیب در ماه فوریه (۱۹/۲٪) و اوت (۷/۹٪) گزارش شده است که با الگوی فصلی مشاهده‌شده در پژوهش حاضر، یعنی افزایش رطوبت در پاییز و زمستان و کاهش آن در بهار و تابستان، مطابقت دارد. در مقیاس وسیع‌تر، Darand & Tashan (۲۰۲۶) با استفاده از داده‌های ERA5-Land طی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۴، روند کاهشی رطوبت خاک در ایران را گزارش کردند. همچنین، کاشانی و صفوی (۲۰۲۵)

[1] Google Earth Engine
[2] Shapefile
[3] JavaScript

با استفاده از داده‌های GLDAS کاهش رطوبت خاک و سطح آب زیرزمینی در ایران را نشان داده و کاهش بارندگی را از عوامل مؤثر بر این تغییرات معرفی کردند. در همین راستا، مشاهده کاهش نسبی قله‌های رطوبت خاک از سال ۲۰۱۸ به بعد در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که حتی در استان مرطوبی مانند گیلان نیز ممکن است تغییرات رطوبت خاک با روندهای کاهشی گزارش‌شده در مقیاس ملی ارتباط داشته باشد. با این حال، به دلیل تفاوت در دوره‌های زمانی و محصولات مورد استفاده در مطالعات مختلف، این هم‌راستایی باید با احتیاط تفسیر شود. بر این اساس، یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌دهنده کاهش نسبی رطوبت خاک سطحی در بخش پایانی دوره ۲۰۱۵–۲۰۲۰، در کنار حفظ یک الگوی فصلی مشخص در استان گیلان است.

ویراستاری نشده



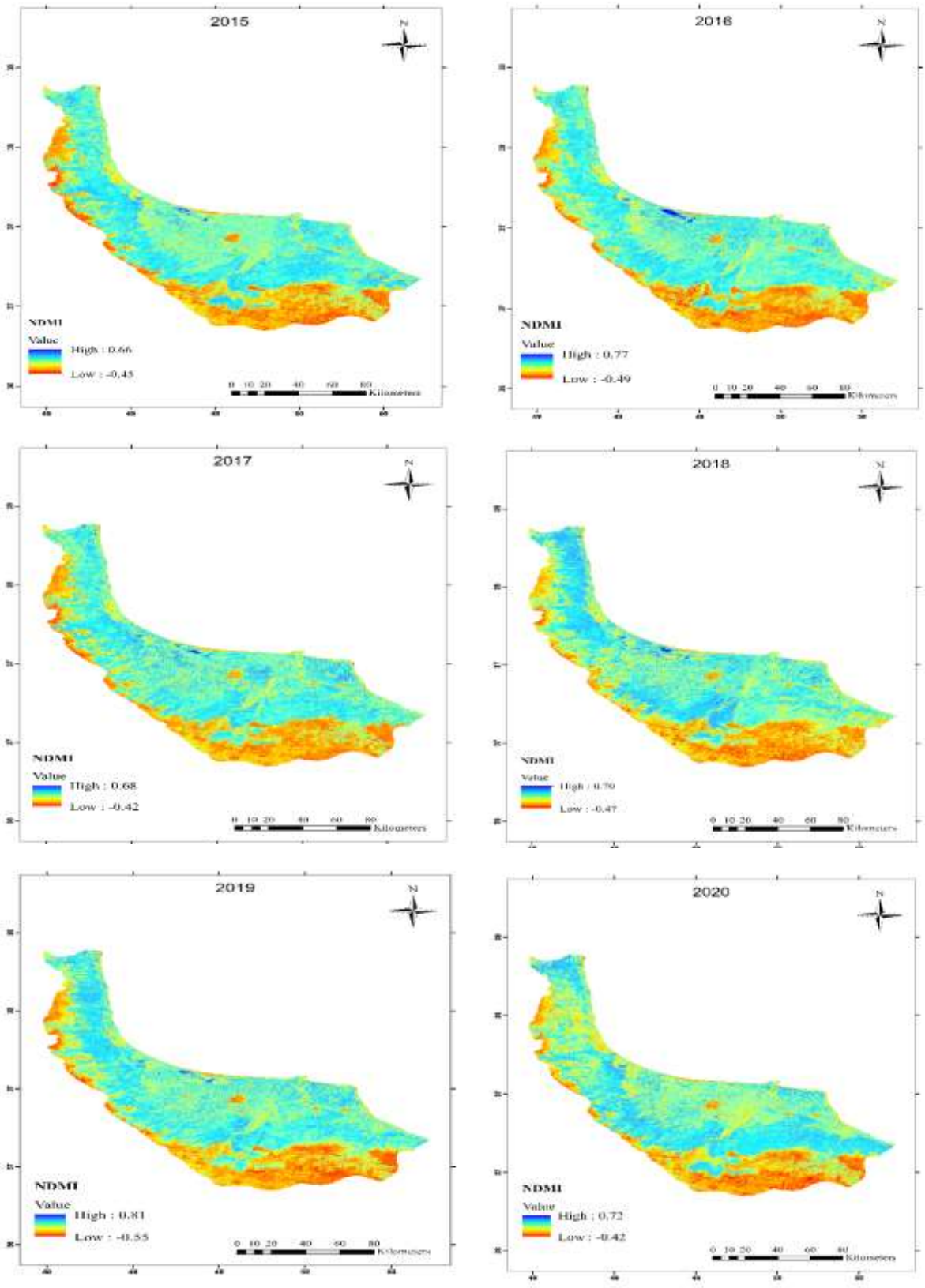
شکل ۲. مقدار رطوبت خاک سطحی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده SMAP

ارتباط رطوبت خاک استخراج‌شده از SMAP با شاخص NDMI

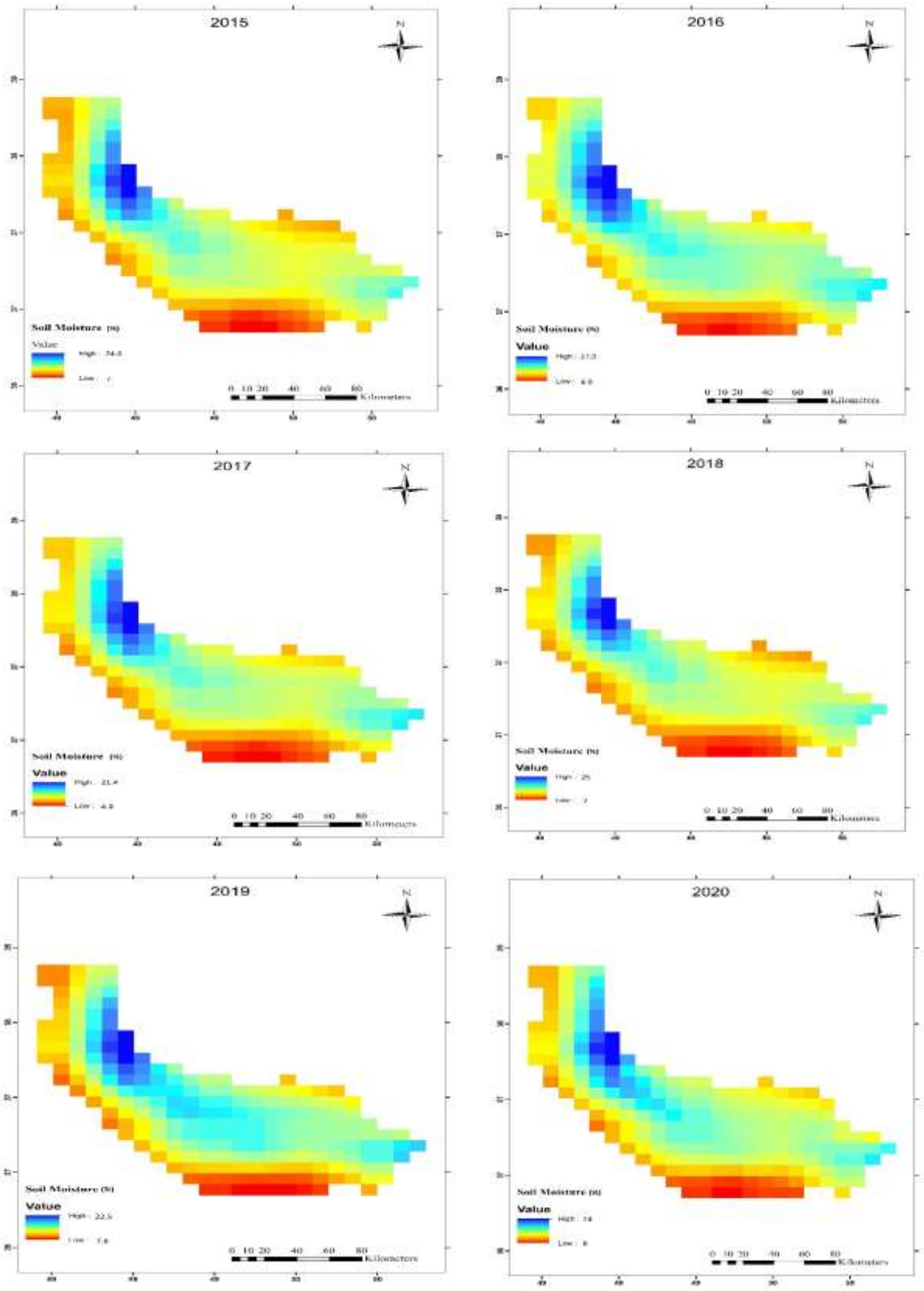
به‌منظور بررسی ارتباط بین رطوبت خاک سطحی و شاخص رطوبتی پوشش گیاهی(NDMI)، تغییرات سالانه این دو متغیر طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۳ و ۴). نتایج نشان داد که دامنه تغییرات NDMI در منطقه مورد مطالعه از ۰/۵۵- تا ۰/۸۱ متغیر بوده است؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار NDMI در سال ۲۰۱۹ (۰/۸۱) و کمترین مقدار آن نیز در همین سال (۰/۵۵-) مشاهده شد که بیانگر بیشترین دامنه تغییرات رطوبتی پوشش گیاهی در این دوره است. همچنین، مقادیر رطوبت خاک استخراج‌شده از داده‌های SMAP در بازه ۴/۹ تا۲۷/۹ درصد قرار داشت؛ به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار رطوبت خاک در سال ۲۰۱۶ (۲۷/۹٪) و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۷ (۴/۹٪) ثبت شد.

مقایسه روند تغییرات این دو متغیر نشان داد که در سال‌هایی که حداکثر مقادیر NDMI نسبتاً زیاد بوده است (مانند سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با مقادیر به‌ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۱ و ۰/۷۲)، مقادیر رطوبت خاک نیز در سطح نسبتاً بالایی قرار داشته و حداکثر رطوبت خاک به‌ترتیب ۲۷/۹، ۲۳/۵و ۲۴ درصد گزارش شده است. از سوی دیگر، در سال ۲۰۱۷ که حداکثر NDMI به ۰/۶۸ کاهش یافته بود، کمترین مقدار رطوبت خاک (۴/۹٪) نیز مشاهده شد. این همزمانی نسبی بیانگر آن است که افزایش رطوبت خاک سطحی، شرایط مناسب‌تری را برای افزایش محتوای آب پوشش گیاهی فراهم کرده و در نتیجه موجب افزایش مقادیر NDMI می‌شود. با وجود هم‌راستایی نسبی تغییرات رطوبت خاک و NDMI در برخی از سال‌های مورد بررسی، روند تغییرات این دو متغیر در تمامی سال‌ها یکسان نبود. برای نمونه، در سال ۲۰۱۹ بیشترین مقدار NDMI (۰/۸۱) مشاهده شد، در حالی که بیشترین مقدار رطوبت خاک در سال ۲۰۱۶ (۲۷/۹٪) ثبت شد. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییرات NDMI تنها تحت تأثیر رطوبت خاک سطحی قرار ندارد و مجموعه‌ای از عوامل محیطی می‌توانند بر پاسخ طیفی پوشش گیاهی اثرگذار باشند. از جمله این عوامل می‌توان به مقدار و توزیع زمانی بارش، دمای هوا، نوع و تراکم پوشش گیاهی، ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت نگهداشت آب آن اشاره کرد. افزون بر این، تفاوت در تفکیک مکانی داده‌های SMAP و تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای محاسبه NDMI نیز می‌تواند در تفاوت الگوهای مشاهده‌شده نقش داشته باشد (Yang & Wang, 2023; Entekhabi et al., 2010; Gao et al., 1996). بنابراین، اگرچه NDMI می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی تغییرات نسبی وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد، تغییرات آن لزوماً رابطه‌ای مستقیم و خطی با رطوبت خاک سطحی ندارد و تفسیر آن باید با در نظر گرفتن سایر عوامل محیطی انجام شود.

ویرایش نشده



شکل ۳. توزیع مکانی شاخص NDMI در استان گیلان طی سال‌های ۲۰۱۵–۲۰۲۰

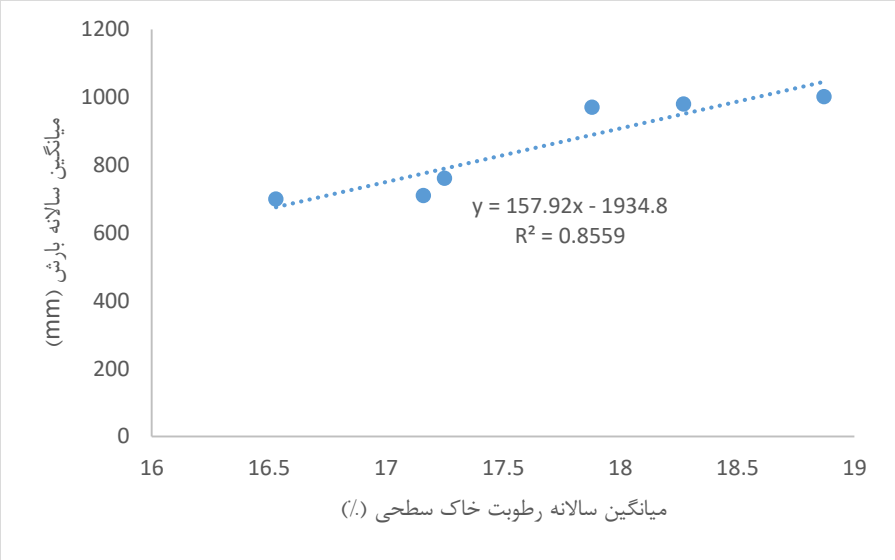


شکل ۴. توزیع مکانی رطوبت خاک سطحی در استان گیلان طی سال‌های ۲۰۱۵–۲۰۲۰ با استفاده از سنجنده SMAP

ارتباط مقدار رطوبت خاک استخراج شده از SMAP با بارش واقعی

به‌منظور ارزیابی ارتباط بین رطوبت خاک سطحی استخراج‌شده از محصول SMAP L4 و بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان گیلان، میانگین سالانه رطوبت خاک سطحی (٪) و میانگین سالانه بارش (mm) طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۵). در این تحلیل، میانگین سالانه رطوبت خاک سطحی به‌عنوان متغیر مستقل و میانگین سالانه بارش به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و رابطه بین دو متغیر با استفاده از رگرسیون خطی ساده بررسی گردید. مقدار ضریب تعیین (R^2) و معادله خط برازش‌شده در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بین میانگین سالانه رطوبت خاک سطحی و بارش، رابطه خطی مثبت و نسبتاً قوی وجود دارد و مقدار ضریب تعیین برابر با ۰/۸۶ به‌دست آمد. این مقدار نشان می‌دهد که در دوره مورد بررسی، تغییرات بارش سالانه با تغییرات میانگین سالانه رطوبت خاک سطحی همراه بوده و بخش قابل‌توجهی از تغییرات رطوبت خاک در چارچوب رابطه خطی مشاهده‌شده با تغییرات بارش قابل توضیح است. این یافته نشان‌دهنده نقش مهم بارش در تغییرپذیری شرایط رطوبتی خاک سطحی در استان گیلان است. بااین‌حال، از آنجا که رابطه مورد بررسی بر اساس تنها شش مقدار سالانه و با استفاده از رگرسیون خطی ساده انجام شده است، این نتیجه به‌تنهایی بیانگر رابطه علّی مستقیم بین بارش و رطوبت خاک نیست. افزون بر بارش، عواملی همچون دمای هوا، تبخیر و تعرق، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک، پوشش گیاهی و شرایط توپوگرافی نیز می‌توانند در تغییرات رطوبت خاک سطحی نقش داشته باشند. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. Zhu et al (2023) در فلات تبت نشان دادند که بارش یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات رطوبت خاک است. Wu et al (2021) نیز نشان دادند که تغییرات دما و الگوی بارش می‌توانند بر وضعیت رطوبتی خاک و فراوانی شرایط خشک اثرگذار باشند. در استان گیلان، که تحت تأثیر رژیم بارندگی خزری قرار دارد، ارتباط مثبت مشاهده‌شده میان بارش و رطوبت خاک نشان می‌دهد که تغییرات بارش می‌تواند نقش مهمی در تغییرات بین‌سالی رطوبت خاک سطحی داشته باشد. با این حال، برای تعیین سهم مستقل بارش و سایر عوامل اقلیمی در تغییرات رطوبت خاک، بررسی هم‌زمان متغیرهایی مانند دما، تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی ضروری است. از سوی دیگر، Yang and Wang (۲۰۲۳) با بررسی داده‌های SMAP طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ و مقایسه آن با داده‌های زمینی، قابلیت قابل قبول محصولات SMAP را برای پایش رطوبت خاک در مقیاس جهانی گزارش کردند. همچنین، حاجی ملکی و همکاران (۱۳۹۹) و اسعدی و همکاران (۱۴۰۱) بر قابلیت استفاده از داده‌های SMAP در بستر Google Earth Engine برای دسترسی و پردازش سریع داده‌های رطوبت خاک تأکید کرده‌اند. در مجموع، رابطه مثبت و نسبتاً قوی مشاهده‌شده در پژوهش حاضر بین رطوبت خاک سطحی و بارش، همراه با نتایج مطالعات پیشین، نشان می‌دهد که داده‌های SMAP می‌توانند برای پایش تغییرات رطوبت خاک در مقیاس منطقه‌ای استان گیلان مفید باشند. با این حال، تفسیر تغییرات رطوبت خاک باید با در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل اقلیمی و محیطی انجام شود.

ویرایش نشده



شکل ۵. همبستگی بین بارش استان گیلان و تغییرات رطوبت خاک سطحی

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک سطحی استان گیلان طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با استفاده از داده‌های SMAP و ارتباط آن با بارش و شاخص رطوبتی پوشش گیاهی (NDMI) بررسی شد. نتایج نشان داد که رطوبت خاک سطحی از یک الگوی فصلی مشخص پیروی می‌کند؛ به‌طوری‌که مقادیر آن در دوره‌های مرطوب سال، به‌ویژه پاییز و زمستان، افزایش یافته و در بهار و تابستان کاهش می‌یابد. همچنین، مقایسه تغییرات بین سال‌های مورد مطالعه نشان داد که با وجود حفظ الگوی فصلی، از سال ۲۰۱۸ به بعد کاهش نسبی در قله‌های رطوبت خاک مشاهده شد. بنابراین، نتایج این پژوهش بیش از آنکه بیانگر یک روند بلندمدت قطعی باشد، نشان‌دهنده تغییرات بین‌سالی و کاهش نسبی رطوبت خاک در بخش پایانی دوره مورد بررسی است. تحلیل رابطه بین میانگین سالانه رطوبت خاک و بارش نیز وجود یک رابطه مثبت و نسبتاً قوی بین این دو متغیر را نشان داد ($R^2 = 0.86$). این نتیجه بیانگر همراهی تغییرات بین‌سالی رطوبت خاک با تغییرات بارش در دوره مورد مطالعه و نقش مهم شرایط بارشی در تغییرات رطوبت خاک سطحی استان گیلان است. با این حال، با توجه به تأثیر سایر عوامل محیطی، از جمله دما، تبخیر و تعرق، ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی، این رابطه به‌تنهایی بیانگر یک ارتباط علّی مستقیم نیست. مقایسه رطوبت خاک با NDMI نیز نشان داد که در برخی سال‌ها افزایش مقادیر NDMI با مقادیر بالاتر رطوبت خاک همراه بوده است؛ با این حال، این هم‌راستایی در تمامی سال‌ها مشاهده نشد. به‌ویژه، بیشترین مقدار NDMI در سال ۲۰۱۹ ثبت شد، در حالی که بیشترین مقدار رطوبت خاک مربوط به سال ۲۰۱۶ بود. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییرات وضعیت رطوبتی پوشش گیاهی، علاوه بر رطوبت خاک، تحت تأثیر عوامل دیگری نیز قرار دارد و NDMI را نمی‌توان جایگزینی مستقیم برای رطوبت خاک در نظر گرفت. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های SMAP از توانایی مناسبی برای پایش تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در مقیاس منطقه‌ای برخوردار بوده و در ترکیب با شاخص‌های سنجش از دور نظیر NDMI و داده‌های هواشناسی، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع آب و خاک، پایش خشکسالی، برنامه‌ریزی کشاورزی و مدیریت پایدار اراضی فراهم کنند. با این حال، به منظور افزایش دقت برآوردها در مقیاس محلی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های زمینی رطوبت خاک برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی محصولات SMAP استفاده شده و همزمان داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و تحلیل‌های مبتنی بر مقادیر متناظر پیکسلی به‌کار گرفته شوند تا ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص‌های سنجش از دور با دقت بیشتری ارزیابی شود.

ویراستاری نشده

منابع

اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ گودرزی، لیل و هللی، جلیل. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAP L4 ، مجله نیوار، ۴۶(۱۱۶-۱۱۷)، ۱۴-۲۷.

حاجی ملکی، خ.، واعظی، ع.، سرمدیان، ف.، کراو، و. و بروکا، ل.،۱۳۹۹، اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرینه (بوکان)، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۵): ۱۳۲۹-۱۳۱۷.

نیک‌داد، پردیس، محمدی قلعه‌نی، مهدی، مقدسی، مهنوش (۱۴۰۲). ارزیابی رطوبت خاک سطحی پایگاه‌های جهانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در اقلیم‌های مختلف ایران. پژوهشهای حفاظت آب و خاک، ۳۰(۳)، ۱۴۶-۱۲۷.

کرمی، ایوب، مرادی، حمیدرضا و موسیوند، علی جعفر . (۱۳۹۹). بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره ای SMAP با روش تلفیق رادار- تابش‌سنج در آبخیز فیروزآباد اردبیل .پژوهش های آبخیزداری.. ۳۳(۴).۱۷-۲۹.

Abbaszadeh, P., Moradkhani, H., & Zhan, X. (2019). Downscaling SMAP radiometer soil moisture over the CONUS using an ensemble learning method. Water Resources Research, 55(1), 324-344.

Asadi Oskouei, E., Godarzy, L. & Helali, J. (2022). Introducing the SMAP L4 Products and Investigating the Spatio-Temporal Variability of Soil Moisture in Iran. Nivar, 46(116-117), 14–27. https://doi.org/10.30467/nivar.2022.315991.1206. in persian

Burgin, M. S., Colliander, A., Njoku, E. G., Chan, S. K., Cabot, F., Kerr, Y. H., ... & Yueh, S. H. (2017). A comparative study of the SMAP passive soil moisture product with existing satellite-based soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *55*(5), 2959-2971.

Colliander, A., Reichle, R. H., Crow, W. T., Cosh, M. H., Chen, F., Chan, S., ... & Yueh, S. H. (2021). Validation of soil moisture data products from the NASA SMAP mission. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, *15*, 364-392.

Costa-Saura, J. M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L. A., Pardo-Pascual, J. E., & Soriano-Sancho, J. L. (2021). Empirical models for spatio-temporal live fuel moisture content estimation in mixed mediterranean vegetation areas using sentinel-2 indices and meteorological data. Remote Sensing, 13(18), 3726.

Darand, M., & Tashan, R. (2026). Long-term Spatiotemporal Analysis of variation in soil moisture over Iran. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 106727.

Das, N. N., Entekhabi, D., Dunbar, R. S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., ... & Njoku, E. G. (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.

Entekhabi D, Njoku EG, O'Neill PE, Kellogg KH, Crow WT, Edelstein WN, et al. 2010. The soil moisture active passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE. 98(5):704–716.

Eswar, R., Das, N. N., Poulsen, C., Behrangi, A., Swigart, J., Svoboda, M., ... & Entin, J. (2018). SMAP soil moisture change as an indicator of drought conditions. *Remote Sensing*, *10*(5), 788.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, *58*(3), 257-266.

Haji maleki, K., Vaezi, A., Sarmadian, F., Crow, W. & brocca, L. (2020). Validation of SMAP Satellite-Based Soil Moisture in Different Land Uses of Simineh-Zarrineh (Bokan) Basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(5), 1317–1329. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.291430.668371. in persian

He, L., Chen, J. M., Liu, J., Bélair, S., & Luo, X. (2017). Assessment of SMAP soil moisture for global simulation of gross primary production. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122(7), 1549-1563.

Karami, A., Moradi, H. R. and Mousivand, A. J. (2020). Improving Spatial Resolution of SMAP Surface Soil Moisture through the Synergy of Radar-Microwave Observations at the Firoozabad Watershed, Ardabil. *Watershed Management Research*, *33*(4), 17-29. doi: 10.22092/wmej.2020.127911.1265. in persian

Kashani, A., & Safavi, H. R. (2025). Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning. *Scientific Reports*, *15*(1), 14671.

Monteiro, A. T., Arenas-Castro, S., Punalekar, S. M., Cunha, M., Mendes, I., Giamberini, M., ... & Lucas, R. (2024). Remote sensing of vegetation and soil moisture content in Atlantic humid mountains with Sentinel-1 and 2 satellite sensor data. Ecological Indicators, 163, 112123.

Montzka C, Jagdhuber T, Horn R, Bogena HR, Hajnsek I, Reigber A, Vereecken H, 2016. Investigation of SMAP fusion algorithms with airborne active and passive l-band microwave remote sensing. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 54(4): 3878–3889.

Nikdad, P., Mohammadi Ghaleni, M. and Moghaddasi, M. (2023). Evaluation of surface soil moisture of global products using measured data in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, *30*(3), 127-146. doi: 10.22069/jwsc.2024.21470.3659. in persian

Reichle, R. H., De Lannoy, G. J., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Conaty, A., ... & Zeng, Y. (2017). Assessment of the SMAP level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. Journal of hydrometeorology, 18(10), 2621-2645.

Reichle, R. H., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Bechtold, M., Crow, W. T., De Lannoy, G., ... & Koster, R. D. (2023). Soil Moisture Active Passive (SMAP) project assessment report for version 7 of the L4_SM data product.

Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J., Kimball, J. S., ... & Walker, J. P. (2019). Version 4 of the SMAP level-4 soil moisture algorithm and data product. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(10), 3106-3130.

Sehler, R., Li, J., Reager, J. T., & Ye, H. (2019). Investigating relationship between soil moisture and precipitation globally using remote sensing observations. Journal of Contemporary Water Research & Education, 168(1), 106-118.

Wu, Z., Qiu, J., Crow, W. T., Wang, D., Wang, Z., & Zhang, X. (2021). Investigating the efficacy of the SMAP downscaled soil moisture product for drought monitoring based on information theory. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *15*, 1604-1616.

Yang, H., & Wang, Q. (2023). Reconstruction of a spatially seamless, daily SMAP (SSD_SMAP) surface soil moisture dataset from 2015 to 2021. *Journal of Hydrology*, *621*, 129579.

Zan, B., Wang, H., Wei, J., & Song, Y. (2024). Temporal and spatial soil moisture–precipitation coupling relationships over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129(11), e2023JD040621.

Zhong, Y., Hong, S., Wei, Z., Walker, J. P., Wang, Y., & Huang, C. (2024). Spatial downscaling of SMAP soil moisture estimation using multiscale geographically weighted regression during SMAPVEX16. Journal of Hydrology, 637, 131348.

Zhu, C., Li, S., Hagan, D. F. T., Wei, X., Feng, D., Lu, J., ... & Wang, G. (2023). Long-Term Characteristics of Surface Soil Moisture over the Tibetan Plateau and Its Response to Climate Change. *Remote Sensing*, *15*(18), 4414.