



## Downscaling of Soil Moisture Map Using Sentinel Radar Satellite Images and Distribution Analysis in the West of Iran

Seyed Hossein Mirmosavi<sup>1</sup>, Kohzad Raispour<sup>1</sup>, Muhammad Kamangar<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

### ARTICLE INFO

Article Type: Research article

#### Article history:

Received 3 August 2020

Accepted 26 November 2020

Available online 2 December 2020

#### Keywords:

Soil Moisture, Radar, Autocorrelation, Moran Index, West of Iran.

*Citation:* Mirmosavi, S. H., Raispour, K., Kamangar, M. (2020). Downscaling of Soil Moisture Map Using Sentinel Radar Satellite Images and Distribution Analysis in the West of Iran. *Geography and Sustainability of Environment*, 10 (3), 35-50.

doi: [10.22126/GES.2020.5568.2273](https://doi.org/10.22126/GES.2020.5568.2273)

### ABSTRACT

Soil surface moisture is a key variable to describe drought, water and energy exchanges between the earth and the air. Due to the instability of spatial and temporal conditions, the environmental parameters affecting it are highly variable. The current study aims to downscale and extract the soil moisture distribution map with high resolution and its spatial analysis in the west of Iran. An educational layer was created by using the post-scattering bands of VV and VH polarizations as well as the angle of collision band ( $\theta$ ) extracted from Sentinel 1 radar images and land use extracted from MODIS sensor. Long-term average moisture per pixel of GLDAS data was also used. The micro-scale backup machine vector algorithm and the high volume resolution soil moisture dispersion map were estimated between 0.18 and 0.46 b. Field data collected from 38 sample farms of Kurdistan Agricultural Research Center were used to verify the output map, which was calculated to be  $R^2 = 0.5012$ . The results were obtained for the elliptical direction of three times the standard spatial deviation of the northwest to the southeast, which shows that more than 99% of the moisture distribution is expanded in accordance with the spatial arrangement of the heights in this direction. Statistics of 0.3978 Moran index and P\_Value value of 0.0000 showed spatial autocorrelation of soil moisture. The hot spot map also showed that the soil surface moisture is nuclear in the northwest and southeast directions and more at altitudes above 2000 meters. Hot spot analysis also reveal that the moisture has strongly clustered to the east and inside the country. Using the obtained spatial analysis results, low or high soil moisture areas can be identified in order to identify environmental potentials and improve the decision-making process, allocation and spatial distribution of services.

\*. Corresponding author E-mail address:

hossein.mirmousavi@znu.ac.ir



## ریزمقیاس گردانی نقشه رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل و تحلیل پراکندگی در غرب ایران

سید حسین میرموسوی<sup>۱\*</sup>، کوهزاد رئیس‌پور<sup>۱</sup>، محمد کمانگر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>دریافت ۱۳ مرداد ۱۳۹۹</p> <p>پذیرش ۶ آذر ۱۳۹۹</p> <p>دسترسی آنلاین ۱۲ آذر ۱۳۹۹</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>رطوبت خاک، رادار، خودهمبستگی، شاخص موران، غرب ایران.</p>	<p>رطوبت سطحی خاک، متغیر کلیدی برای توصیف خشک‌سالی، تبادلات آب و انرژی بین زمین و هواکره است که به دلیل ثابت‌نبودن شرایط مکانی و زمانی، پارامترهای محیطی تأثیرگذار بر آن به‌شدت تغییرپذیر و تولید نقشه آن با استفاده از داده‌های زمینی با مسائل زیادی همراه است. هدف از نوشتن پیش رو ریزمقیاس گردانی و استخراج نقشه پراکندگی رطوبت خاک با قدرت تفکیک بالا و تحلیل فضایی آن در غرب ایران است. با استفاده از باندهای پس پراکنش پلاریزاسیون‌های VV و VH و همچنین باندهای زاویه برخورد <math>\theta</math> (مستخرج از تصاویر راداری سنتینل ۱ و کاربری اراضی مستخرج از سنجنده مادیس، یک لایه آموزشی ایجاد شده و میانگین بلندمدت رطوبت هر پیکسل از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین در محدوده مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان ریزمقیاس گردانی شده و نقشه پراکندگی رطوبت حجمی خاک با قدرت تفکیک بالا بین ۰/۱۸ تا ۰/۴۶ برآورد شد. به‌منظور صحت‌سنجی نقشه خروجی از داده‌های میدانی برداشت‌شده ۳۸ مزرعه نمونه مرکز تحقیقات کشاورزی کردستان استفاده شد که <math>R^2 = 0.5012</math> محاسبه شد. نتایج نشان داد بیضوی سه‌برابر انحراف استاندارد مکانی جهت شمال غربی به جنوب شرقی دارد که نشان می‌دهد بیش از ۹۹٪ پراکندگی رطوبت به‌تبعیت از آرایش مکانی ارتفاعات در این راستا گسترش دارد. آماره <math>0.3978</math> شاخص موران و پی‌ولیو مقدار <math>0.0000</math> خودهمبستگی مکانی رطوبت خاک را نشان داد. نقشه لکه‌های داغ نیز نشان داد رطوبت سطحی خاک به‌صورت هسته‌ای در راستای شمال غرب و به جنوب شرق و بیشتر در ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر است. تحلیل لکه‌های داغ نیز نشان داد که رطوبت به‌شدت به‌سمت شرق و داخل کشور الگوی خوشه‌بندی پیدا کرده است. با استفاده نتایج تحلیل مکانی به‌دست‌آمده، می‌توان مناطق کم یا پررطوبت خاک را در راستای شناسایی پتانسیل‌ها محیطی و بهبود فرایند تصمیم‌گیری، تخصیص و توزیع مکانی ارائه خدمات شناسایی کرد.</p>
<p>استناد: میرموسوی، سید حسین؛ رئیس‌پور، کوهزاد؛ کمانگر، محمد (۱۳۹۹). ریزمقیاس گردانی نقشه رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل و تحلیل پراکندگی در غرب ایران. <i>جغرافیا و پایداری محیط</i>، ۱۰ (۳)، ۳۵-۵۰. doi: <a href="https://doi.org/10.22126/GES.2020.5568.2273">10.22126/GES.2020.5568.2273</a></p>	

## مقدمه

رطوبت خاک متغیر اساسی در چرخه های آب و اقلیم (موربیدلی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) است که نقش مهمی در درک انسان از تعامل جو و سطح زمین دارد (چول جنگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). رطوبت سطحی خاک با وجود سهم اندک آن در چرخه هیدرولوژی (۰/۱۵)، یکی از اجزاء مهم اثرگذار پوسته زمین به شمار می رود؛ زیرا نقش کنترل کننده بین سطح زمین و اتمسفر زمین و نیز گردش آب و انرژی و کربن در طبیعت را ایفا می کند (باباییان و همکاران، ۱۳۹۲)؛ همچنین رطوبت خاک متغیر مهم چرخه هیدرولوژیکی است که با خطرات طبیعی مرتبط است؛ از جمله برای فهم ایجاد سیلاب ها و شاخص های خشک سالی مورد توجه پژوهشگران و همچنین بهره وران عملی مانند کشاورزان یا مؤسسات حفاظت مدنی قرار گرفته است؛ همچنین رطوبت خاک در چرخه جهانی انرژی نقش کلیدی دارد و کنترل کننده فرایند تبدیل انرژی در دسترس به گرمای نهان و گرمای محسوس است (وریکن<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

رطوبت خاک در فصل های بارانی کمابیش دارای مقدار ثابتی است؛ اما طی دوره رشد و با کاهش بارندگی، در مقادیر رطوبت، تفاوت نسبی مشاهده می شود. ایگزو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶) تراکم ریشه را عامل اصلی این تفاوت دانسته اند. رطوبت و دمای خاک نیز با یکدیگر ارتباط داشته و از آب نفوذ یافته باران متأثر است (یوشیوکا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). پایش توزیع مکانی و زمانی رطوبت سطحی یکی از اقدامات اثربخش در مدیریت آب و خاک است (کوهبنانی و یزدانی، ۱۳۹۷) در نتیجه تهیه نقشه های رطوبت خاک با دقت بالا، درک ما را از آب و هوای منطقه بهبود می بخشد (طباطبایی نژاد<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک بسیار متنوع است، در حال حاضر (سال ۱۳۹۹) هیچ شبکه جهانی از داده های زمینی برای نظارت بر رطوبت خاک وجود ندارد. دمای سطحی خاک، میزان بارندگی و دمای هوا از جمله خصوصیات مؤثر و مورد بررسی در روش های برآورد رطوبت خاک هستند. روش های میدانی برآورد رطوبت خاک مانند روش وزنی و انعکاس سنجی حوزه زمانی در سطح محلی دقت بالایی دارند؛ اما برای یک منطقه بزرگ، بسیار پرهزینه و زمان بر هستند.

روش های معمول اندازه گیری رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی مناسب نیستند (مکونن<sup>۷</sup>، ۲۰۰۹). به منظور پایش محدوده های وسیع، کاهش هزینه و وقت سراسری رطوبت خاک، می توان از مدل ها و تصاویر سنجش از دور استفاده کرد. با استفاده از باندهای مختلف تصاویر سنجش از دور و الگوریتم های متنوع می توان میزان رطوبت سطحی و زیر سطحی خاک را همواره در بازه های زمانی متفاوت پایش و اندازه گیری کرد. برآورد رطوبت خاک نیز با استفاده سنجش از دور در محدوده های نوری، مادون قرمز و کهموج فعال و غیر فعال انجام می گیرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (خانمحمدی و همکاران، ۱۳۹۳). برای استخراج رطوبت خاک، از تصاویر ماهواره ای شاخص رطوبت خاک مثلثی با استفاده از باند قرمز و مادون قرمز نزدیک تصاویر لندست همبستگی ۰/۶۷ و ۰/۶۱ با مقادیر واقعی محاسبه شده است (امینی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوهبنانی و یزدانی، ۱۳۹۷)؛ همچنین با اضافه کردن شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی، ضریب تبیین ۰/۷۸ را در مدل رگرسیونی، شاخص مناسبی برای پهنه بندی رطوبت خاک در مناطق خشک و بیابانی معرفی کرده اند. گرچه در حال حاضر سنجنده هایی از جمله

1- Morbidelli  
2- Chul Jung  
3- Vereecken  
4- Xu  
5- Yoshioka  
6- Tabatabaenejad  
7- Mekonnen

ماهواره‌های از جمله SMOS، Fengyun 3B، FY3C، AMSR2 و SMAP برآورد رطوبت خاک در سراسر سطح زمین را انجام می‌دهند؛ اما به‌علت قدرت تفکیک مکانی پایین این سنجنده‌ها، برای مطالعات منطقه‌ای دقت کافی را ندارند. در برابر الگوریتم‌های خطی و غیر خطی مستخرج از باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای، به‌تازگی تکنیک‌های یادگیری پشتیبان ماشین برای بهبود داده‌های رطوبت خاک با رزولوشن پایین ماهواره‌های مختلف معرفی شده است (بایی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹).

ریزمقیاس‌نمایی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس، ماهواره اسمپ، دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی و روش رگرسیون چندمتغیره بررسی کردند که براساس اعتبارسنجی صورت‌گرفته، ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سنجنش‌ازدور رطوبت خاک با این روش فقط برای ارزیابی‌های کلی پژوهشی و نه عملیاتی کاربرد دارد (تو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹). دقت برآورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی بر روی تصاویر سنتینل محاسبه شده است که نتایج بهترین ضریب همبستگی ۰/۶۹ برای تصاویر سنتینل ۱ با روش رگرسیون بردار پشتیبان و کم‌دقت‌ترین ضریب همبستگی ۰/۴۹ با روش شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون به‌دست آمده است (رنجبر و آخوندزاده، ۱۳۹۸). استخراج ناهنجاری‌های رطوبت خاک از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین<sup>۳</sup> با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ ریزمقیاس‌گردانی شد که نتایج آن‌ها همبستگی ۰/۷ را با داده‌های زمینی نشان داد (جنیفیندر<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). مقایسه سری‌های زمانی داده‌های زمینی با خروجی‌های ریزمقیاس‌گردانی‌شده روش آن‌ها، به‌خوبی ناهنجاری‌های منفی و مثبت رطوبت خاک را نشان داد و بیان کرده‌اند که روش ارائه‌شده آن‌ها یکپارچه‌سازی داده‌های رطوبت خاک را برای برنامه‌های کنترل خشک‌سالی یا پیش‌بینی سیل امکان‌پذیر می‌کند.

با بررسی پژوهش‌های گذشته می‌توان دریافت که رطوبت خاک به عوامل متعددی از جمله خصوصیات اقلیمی و خصوصیات اراضی و پراکندگی و آرایش ارتفاعات بستگی دارد که این خصوصیات در مکان بسیار متفاوت‌اند. با وجود اهمیت تغییرات رطوبت خاک در مکان و ارتباط آن با سایر متغیرها، در مطالعات انجام‌شده، بیشتر به بررسی تک‌بعدی رطوبت خاک و به‌ویژه تغییرات زمانی آن پرداخته شده است. سنجنده‌های جدید از جمله ماهواره‌های سری سنتینل افزون بر برداشت سطح زمین در بازه‌های زمانی کمتر، استفاده از خصوصیات سنجنش‌ازدور غیر فعال (راداری) به‌دلیل خصوصیات امواج ماکروویو و امکان نفوذ به سطح زمین، برداشت عمق تا ۱۰۰ سانتی‌متر را فراهم کرده‌اند. به‌دلیل رایگان‌بودن و قدرت تفکیک مکانی بالای این سنجنده، استفاده از باندهای مختلف این تصاویر می‌تواند بسیار کارا باشد و از آنجاکه متغیرهای مکانی اقلیمی و محیطی نقش مؤثری در تغییرات مکانی رطوبت خاک دارند، ضرورت تحلیل مکانی آشکار می‌شود. هدف از پژوهش حاضر استخراج رطوبت سطحی خاک با قدرت تفکیک مکانی بالا از راه ریزمقیاس‌گردانی لایه رطوبت خاک سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین و تصاویر راداری سنتینل ۱ به‌عنوان روش کاربردی در مطالعات محیطی و تحلیل مکانی پراکندگی رطوبت در غرب ایران در بازه زمانی مورد مطالعه است.

### معرفی منطقه مورد بررسی

محدوده مورد مطالعه شامل استان‌های کردستان، کرمانشاه، ایلام، همدان و لرستان بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶"

1- Bai

2- Tu

3- Global Land Data Assimilation System (GLDAS)

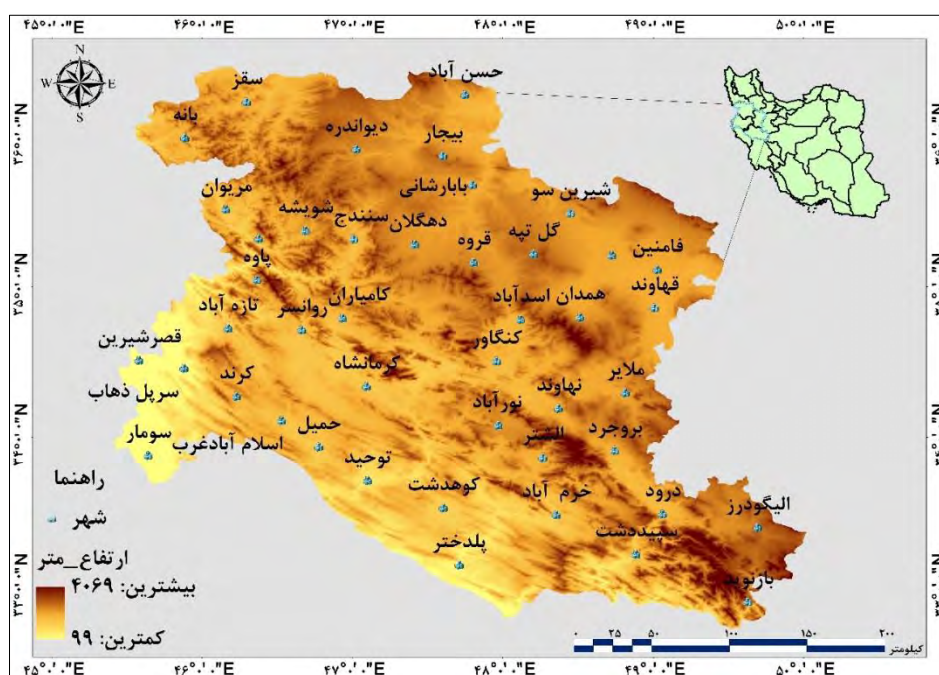
4- Greifeneder

۵۱° ۳۱' تا ۴۵° ۴۹' شمالی تا ۴۵° ۲۷' ۱۸" تا ۵۰° ۴' ۲۶" شرقی با وسعت ۴۶۶/۱۲۱ کیلومتر مربع است (شکل ۱). براساس پهنه‌بندی آب‌وهوایی ایران در سیستم کوپن که توسط گنجی (۱۳۸۲) صورت گرفته است، بخش اعظم زاگرس در شمال کردستان، همدان، کرمانشاه و لرستان دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است و در نواحی مرتفع زاگرس نیز آب‌وهوای سرد و خشک مشاهده می‌شود. بخش‌های دیگر منطقه از جمله بخش‌های جنوب غربی کرمانشاه و ایلام آب‌وهوای نیمه‌خشک دارد (ابریفام، ۱۳۸۹: ۲۰). براساس تقسیم‌بندی علیجانی (۱۳۸۱: ۱۷۳) نیز غرب ایران به‌طور کلی دارای آب‌وهوای کوهستانی و پای‌کوهی است. وضعیت حرارتی ناحیه در تابستان همگن‌تر از زمستان است. این محدوده در دوره سرد سال، به‌علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه، بارندگی زیادی دارد؛ اما دوره گرم سال نفوذ پرفشار آזור باعث کاهش بارندگی می‌شود (مجرد و معصوم‌پور، ۱۳۹۲).

محدوده مورد مطالعه بیشتر تحت تأثیر سامانه مرطوب مدیترانه‌ای و اقیانوس اطلس و سامانه‌های سودانی قرار دارد که با عبور این جریان‌ها از روی محدوده و برخورد با ارتفاعات زاگرس، مقدار زیادی از رطوبت خود را به‌صورت باران و برف ازدست داده و عامل عمده ریزش‌های جوی کشور را نیز تشکیل می‌دهند.

### مواد و روش‌ها

سال آبی ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ با ورود سامانه‌های بارشی متعددی به ایران همراه بود. این سامانه‌ها که به‌طور عمده بر بستر تقویت امواج رزبای و پایین‌افتادن موج ورتکس قطبی شکل گرفتند؛ به‌طور ناهنجاری در محدوده غربی خاورمیانه با ایجاد بلاکینگ اتمسفری توده‌های مرطوب و گرم دریای سرخ و ادغام آن با توده‌های مرطوب و سرد مدیترانه‌ای درست بر روی ارتفاعات غرب ایران واقع و باعث بارش‌های بیش‌ازحد شمال شدند. درمیان متغیرهای اقلیمی، باران به‌عنوان مهم‌ترین متغیر اقلیمی مؤثر بر رطوبت خاک است (فالون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)؛ از این رو سال آبی مورد نظر، به‌منزله دوره آماری و غرب ایران (شکل ۱) برای مطالعه انتخاب شد.



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه در ایران

شرط اصلی برای ریزمقیاس گردانی و بازیابی رطوبت خاک، استخراج رابطه بین شدت بازگشت باند C رادار ( $\sigma^0$ ) و رطوبت خاک بزرگ‌مقیاس است (اولبی و باتلیوالا<sup>۱</sup>، ۱۹۷۸). در نوشتار پیش رو، به‌منظور استخراج و ریزمقیاس گردانی لایه رطوبت حجمی و تبیین بهتر توزیع پراکندگی رطوبت، ابتدا لایه رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین استخراج شد. این سامانه محصولات داده‌های مشاهده‌ای و زمینی و ماهواره‌ای را با استفاده از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی سطح زمین و روش‌های ادغام پیشرفته داده، تولید می‌کند. پوشش جهانی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا به‌همراه سیستم مدل‌سازی ترکیبی داده‌های سنجش‌ازدوری و مشاهدات زمینی، ویژگی منحصر‌به‌فرد این مدل است (لیو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). این مدل را دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (ناسا) مرکز فضایی پروازهای گودارد، سازمان ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی و مرکز بین‌المللی پیش‌بینی محیط‌زیست به‌طور مشترک، به‌منظور تولید محصولات مختلف توسعه داده‌اند (رادل<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).

با توجه به طول دوره آماری مناسب و نیز به‌روزرسانی این داده‌ها می‌توان با اطمینان از این داده‌ها در کنار داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای مطالعات مختلف اقلیم‌شناسی، آب‌شناسی و محیطی در مناطق مختلف کشور استفاده کرد (میری و همکاران، ۱۳۹۶). نسخه ۲/۱ سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین در تاریخ ۱ ژانویه ۲۰۰۰ شبیه‌سازی شده و از تاریخ ۱ مارس ۲۰۰۱ به‌بعد با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در دسترس عموم قرار گرفته است<sup>۴</sup>.

باندهای موجود در تصاویر راداری حساسیت زیادی به رطوبت حجمی سطح خاک دارند (قمیسی و بنیدیکسون<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴) در نتیجه می‌توان از آن‌ها در شناسایی رطوبت خاک استفاده کرد. در مرحله بعد، میانه تصاویر راداری سنتینل ۱ در بازه زمانی به‌منظور استفاده از باندهای مورد نظر استخراج شد. مأموریت سنتینل ۱ مجموعه کوپرنیکوس<sup>۶</sup> شامل دو ماهواره IS. یک ای. و IS. یک بی.<sup>۸</sup> با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نسبت به هم و مجهز به سیستم کهموج فعال در باند سی<sup>۹</sup> است که در سال ۲۰۱۴ برای پایش سطح زمین از سوی اتحادیه اروپا بیان شده است. به‌علت استفاده سیستم فعال کهموج با روزه مصنوعی<sup>۱۰</sup> حساسیت آن نسبت به شرایط بد جوی و حتی ابرها کم است و قادر به گرفتن تصاویر مستقل از خورشید به عنوان منبع نور است. این سنجنده قابلیت اخذ تصویر به صورت قطبش‌های دوگانه HH, HV, VH را دارد. قدرت تفکیک مکانی پنج تا بیست متر، بازه زمانی برداشت شش‌روزه و پوششی در عرض ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتر، از دیگر خصوصیات این سنجنده است.

از مهم‌ترین اهداف این ماهواره می‌توان پایش مناطق یخ‌بسته دریاها و محیط‌زیست شمالگان و مراقبت از محیط‌های دریایی، پایش مخاطرات سطح زمین، نقشه‌برداری از سطح زمین، جنگل، خاک و آب، پشتیبانی امدادرسانی در مواقع بحران و مخاطرات طبیعی را بیان کرد. دو پارامتر دیگر نیز یعنی پوشش سطح و پوشش گیاهی که در ریزمقیاس گردانی تأثیرگذار، از تصاویر کاربری اراضی سنجنده مادیس استخراج شدند. با ترکیب

1- Ulaby &amp; Batlivala

2- Liu

3- Rodell

4- <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS>

5- Ghamisi &amp; Benediktsson

6- Copernicus Sentinel-1

7- S1A

8- S1B

9- C-Band

10- Synthetic Aperture Radar (SAR)

لایه‌های پیش‌گفته یک لایه آموزشی به‌دست آمد. در نتیجه می‌توان برای رطوبت خاک رابطه غیر خطی‌ای با پارامترهای ذکر شده ایجاد کرد (جنیفیندر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) و با روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> لایه ریزمقیاس‌گردانی شده از لایه با قدرت تفکیک بالا استخراج شد.

روش ماشین بردار پشتیبان طبقه‌بندی‌کننده دودویی غیر پارامتریکی است که پیکسل‌ها در تصویر با هر نمونه آموزشی مقایسه شده و به کلاس‌های پوشش زمین براساس الگوریتم‌های معین تخصیص داده می‌شوند. مبنای کاری دسته‌بندی‌کننده ماشین بردار پشتیبان، دسته‌بندی خطی داده‌ها است و می‌کوشد تا با جستجوی مستقیم برای یافتن مرزهای مناسب (فراصفحه‌های جداکننده<sup>۳</sup>)، بین کلاس‌های مختلف آن‌ها را از هم جدا کند. راستای فراصفحه‌ها جایی است که بیشترین فاصله (جدایی) بین دو کلاس وجود دارد. در واقع در تقسیم خطی داده‌ها سعی بر آن است خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. مشخص است که در میان نمونه‌های آموزشی، همواره زیرمجموعه‌ای وجود دارد که بتواند بهترین مرز تصمیم‌گیری را تعریف کند (فودی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۶).

برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری دو کلاس کاملاً جدا از هم، از روش حاشیه بهینه استفاده می‌شود. در این روش، مرز خطی بین دو کلاس به گونه‌ای محاسبه می‌شود که: (۱) تمام نمونه‌های کلاس ۱+ در یک طرف مرز و تمام نمونه‌های کلاس ۱- در طرف دیگر مرز واقع شوند. (۲) مرز تصمیم‌گیری به گونه‌ای باشد که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی هر دو کلاس از یکدیگر در راستای عمود بر مرز تصمیم‌گیری تا جایی که ممکن است حداکثر شود (تاریوونگا<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸). پس از اجرای روش طبقه‌بندی لازم است مدل به دست آمده اعتبارسنجی شود؛ که به منظور ارزیابی کارایی این مدل، از شاخص‌های  $R^2$  و RMSE استفاده شد. RMSE ریشه متوسط مجذور خطاها، توصیف‌کننده متوسط خطاها است (رابطه ۱)؛ اما چون پیش از میانگین‌گیری خطا را به توان می‌رساند، در نتیجه خطاها را وزن‌دهی می‌کند و خطاهای بزرگ وزن بیشتری می‌گیرند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

RMSE: مقادیری از صفر تا بی‌نهایت را دریافت می‌کنند و هرچه مقدار آن‌ها کمتر باشد، بهتر است. یکی دیگر از معیارها  $R^2$  است (رابطه ۲).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum Q_i^2 - \frac{\sum \hat{Q}_i^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$R^2$ : هرچه به یک نزدیک‌تر باشد مناسب‌تر است (آداموسکی و چان<sup>۶</sup>، ۲۰۱۱). در نوشتار پیش رو، ریزمقیاس‌گردانی رطوبت خاک براساس کار پاسولی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۵) و جنیفیندر و همکاران (۲۰۱۶) و در ایجاد یک لایه آموزشی براساس روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و با تابع‌های موجود در سامانه گوگل‌ارث

- 1- Greifender
- 2- Support vector machines (SVM)
- 3- Separating Hyperplane
- 4- Foody
- 5- Taruvinga
- 6- Adamowski & Chan
- 7- Pasolli

اینجین<sup>۱</sup> طبق نمودار جریان زیر (شکل ۲) اجرا شد. جهت صحت‌سنجی خروجی از داده‌های میدانی برداشت شده از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان که با استفاده از حس‌گرهایی که در عمق ۵، ۲۰، ۴۰ و ۱۰ سانتی متری نصب کرده و هر سی دقیقه اطلاعات را از ۳۸ مزرعه نمونه ارسال می‌کنند اخذ کرده و میانگین داده‌ها به‌عنوان نمونه زمینی برای ارزیابی این روش به‌کار گرفته شد.

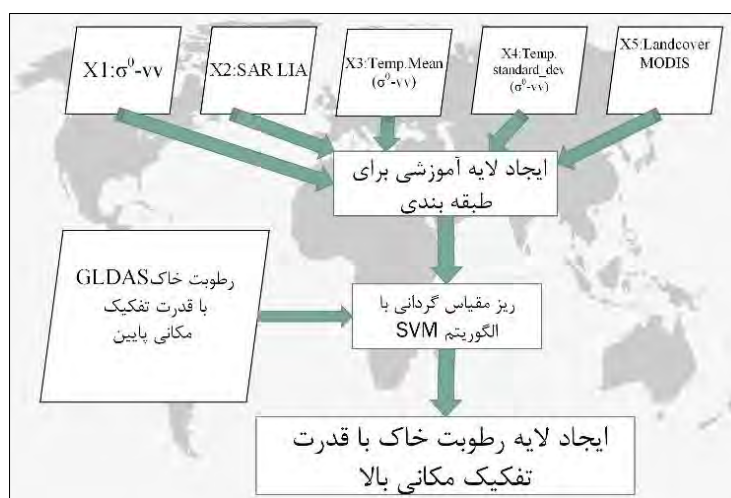
به‌منظور استفاده از کارهای دیگران با استفاده از این لینک<sup>۲</sup> الگوریتم برای کاربران ثبت‌نام‌شده در سامانه گوگل‌ارث اینجین آورده شده است. با استفاده از تحلیل فضایی در قالب علم زمین‌آمار می‌توان ساختارهای فضایی را شناسایی و برنامه‌ریزی‌های مکانی را انجام داد. فرایند تحلیل فضایی، توصیف چگونگی و استدلال چرایی پراکندگی‌ها را شامل می‌شود (علیجانی، ۱۳۹۴). نتیجه این فرایند، تولید دانش علمی مستند و درنهایت تبیین پراکندگی است (هاوری<sup>۳</sup>، ۱۹۶۷). اندازه‌گیری توزیع مکانی داده‌ها این امکان را می‌دهد که تغییرات توزیع فضایی در راستای مؤلفه‌های مکان؛ یعنی طول، عرض و ارتفاع بررسی و مقایسه شود. برای محاسبه شاخص‌های مکانی گرانی‌گاه (مرکز میانگین، بیضوی انحراف استاندارد) از روش‌های مختصات طولی ( $X_c$ ) عرضی ( $Y_c$ ) آن‌ها براساس رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده شد:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i x_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n T_i y_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{رابطه ۴}$$

در اینجا  $X_i$  و  $Y_i$ : مختصات عارضه  $i$  و  $\{\bar{X}, \bar{Y}\}$ : به‌ترتیب میانگین مرکزی عوارض و  $n$ : برابر با تعداد کل عوارض در لایه مورد تحلیل است.

برای به‌دست‌آوردن الگوی مکانی رطوبت خاک و اینکه آیا رطوبت خوشه‌ای است یا نه، روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به قانون جغرافیایی اصل نزدیکی - همانندی آزمون خودهمبستگی فضایی رویدادها و پدیده‌های آب‌وهوایی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی دربر داشته باشد (عساکره و سیفی‌پور، ۱۳۹۱)؛ برای مثال، رابطه فضایی معنی‌دار بیانگر ارتباط همسایگی معنی‌دار بین نواحی مجاور است. شناسایی این روابط می‌تواند در تشخیص مرزهای آب‌وهوایی و نیز تعیین اثر عوامل مکانی بر رفتار پدیده‌ها مهم باشد.



شکل ۲. مراحل استخراج لایه رطوبت ریزمقیاس گردانی شده

1- Google Earthengine

2- <https://code.earthengine.google.com/7d1b2fa43d046dcfe61dc53d45681396>

3- Harve



بررسی الگوی پراکندگی خوشه‌ای بودن مکانی رویدادها، در برابر «فرض مقابل» یعنی تصادفی بودن است (هانینگ<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴). نمایه مورن از شاخص‌های برآورد تجمع مکانی پدیده‌ها است که با استفاده از رابطه ۵ قابل برآورد است (دای<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۰).

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه،  $n$ : تعداد پدیده‌ها،  $x_i$ : اندازه مشاهده شده روی مکان پدیده  $i$  ام،  $\bar{x}$ : میانگین  $x_i$  هاست،  $w_{ij}$ : اندازه وزن متعلق به  $i$  و  $j$  است و  $z_j$  براساس مجاورت برآورد شده و نشان‌دهنده میزان وابستگی فضایی است. مجموع وزن‌ها در ماتریس وزن‌های  $\{w_{ij}\}$  گویای اندازه مجموعه روابط فضایی مفروض بین نواحی است (هانینگ، ۲۰۰۴) که به روش‌های مختلفی قابل محاسبه‌اند.

یکی از راه‌ها، به کارگیری وزن‌هایی با ارزش صفر و یک (دودویی) است. در این حالت، اگر نواحی  $i$  و  $j$  هم‌مرز باشند،  $w_{ij} = 0$  خواهد بود. آماره مورن کلی مانند ضریب خودهمبستگی بین  $+1$  و  $-1$  بوده تفسیر مشابهی دارد. مقادیر نزدیک به  $+1$  گویای الگوی مکانی قوی است. مقادیر نزدیک به  $-1$  گواهی بر خودهمبستگی مکانی منفی بوده، گویای این است که مقادیر بارزش بالا، نزدیک مقادیر بارزش کم هستند (وضعیت نادر) و درنهایت، مقدار نزدیک صفر، عدم الگوی مکانی (تصادفی مکانی) را گواهی می‌دهد؛ بنابراین، اگر مقادیر آماره برای دونقطه مجاور مثبت یا منفی باشد، به معنی این است که مقادیر دو نقطه پیش‌گفته بالاتر از میانگین باشد، همبستگی مکانی منفی است (گیل<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷)؛ سپس نمره  $Z$ ، در یک سطح اطمینان دلخواه ارزیابی می‌شود. برای مثال در سطح اطمینان ۹۵٪ اگر قدر مطلق نمره  $Z$  مشاهده شده ( $Z_i$ )، بزرگ‌تر از نمره  $Z$  بحرانی ( $\pm 1/96$ ) باشد؛ فرض صفر در سطح اطمینان مذکور رد شده و معنی‌داری روابط قابل استنباط خواهد بود (عساکره و شادمان، ۱۳۹۴). برای شناسایی بزرگی مقادیر الگوهای فضایی، آماره  $G_i^*$  استار ( $G^*$ ) استفاده می‌شود که از مجموع ارزش‌های موزون مکانی پدیده‌ها در فاصله مشخص  $(d)$  از یاخته  $i$  ام نسبت به مجموع ارزش‌های تمامی مکان پدیده‌ها محاسبه می‌شود. امتیاز محاسبه شده نشان می‌دهد که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و کم خوشه‌بندی شده‌اند (فیشر و منفرد<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶). این شاخص با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

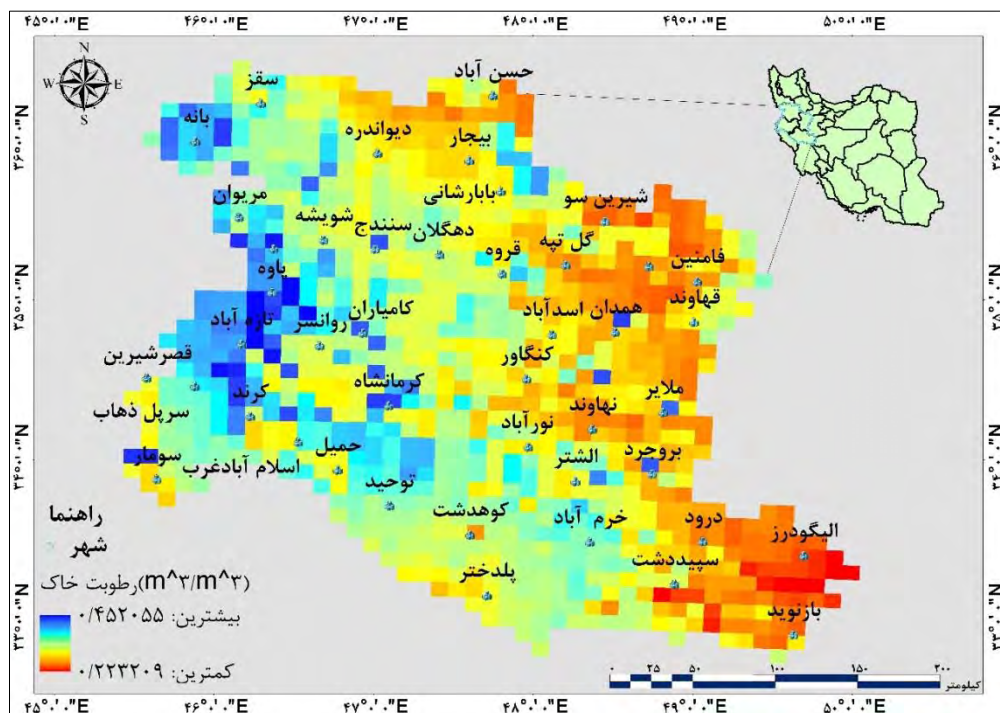
$$Z_i(d) = \frac{G_i(d) - E(G_i^*(d))}{\sqrt{\text{var}(G_i^*(d))}} = \frac{\sum_j w_{ij}(d) x_{j-w_i \bar{x}}}{s \sqrt{\frac{w_i^*(n-w_i^*)}{n-1}}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در رابطه بالا داریم:  $w_i^* = \sum_{j=1}^N w_{ij}(d)$  و  $S^2 = \sum_{j=1}^N \frac{x_j^2}{n - \bar{x}^2}$

**نتایج**

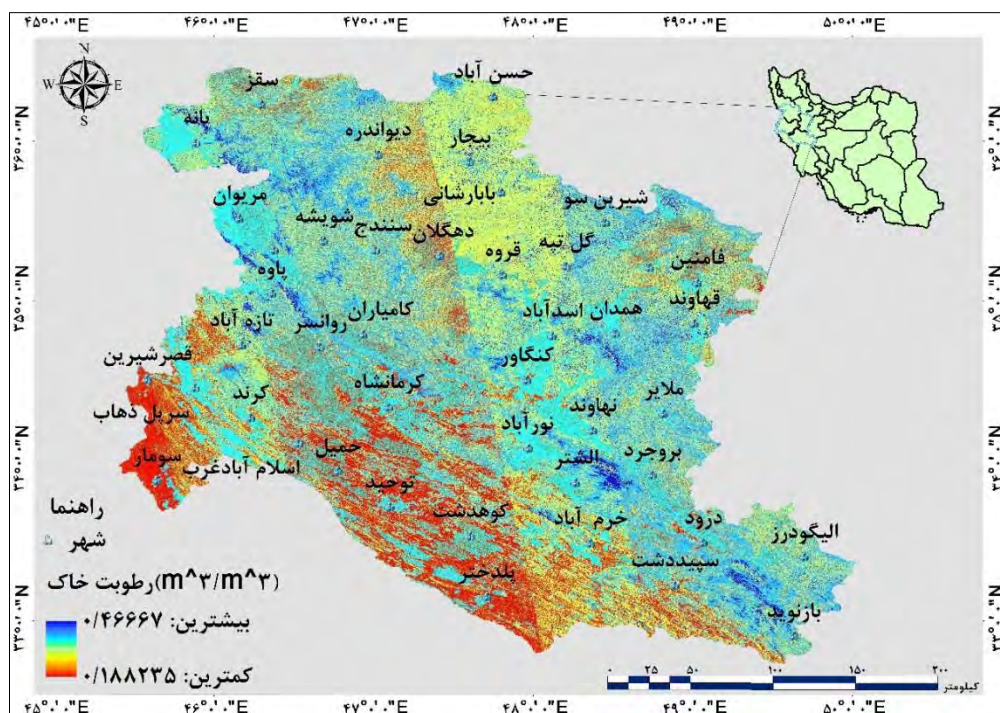
نقشه رطوبت خاک سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین برای محدوده مورد مطالعه بین ۰/۲۲ تا ۰/۴۵ مترمکعب بر مترمکعب که واحدی عمومی برای نشان دادن رطوبت خاک است را نشان داد. اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار رطوبت در محدوده مورد مطالعه تقریباً دوبرابر است (شکل ۳) که بیشترین مقدار مربوط به غرب و کمترین مقدار جنوب شرق محدوده مورد مطالعه؛ یعنی به طرف مرکز کشور رطوبت خاک کمتر می‌شود.

1- Haining  
2- Dai  
3- Gail  
4- Fischer and Manfred

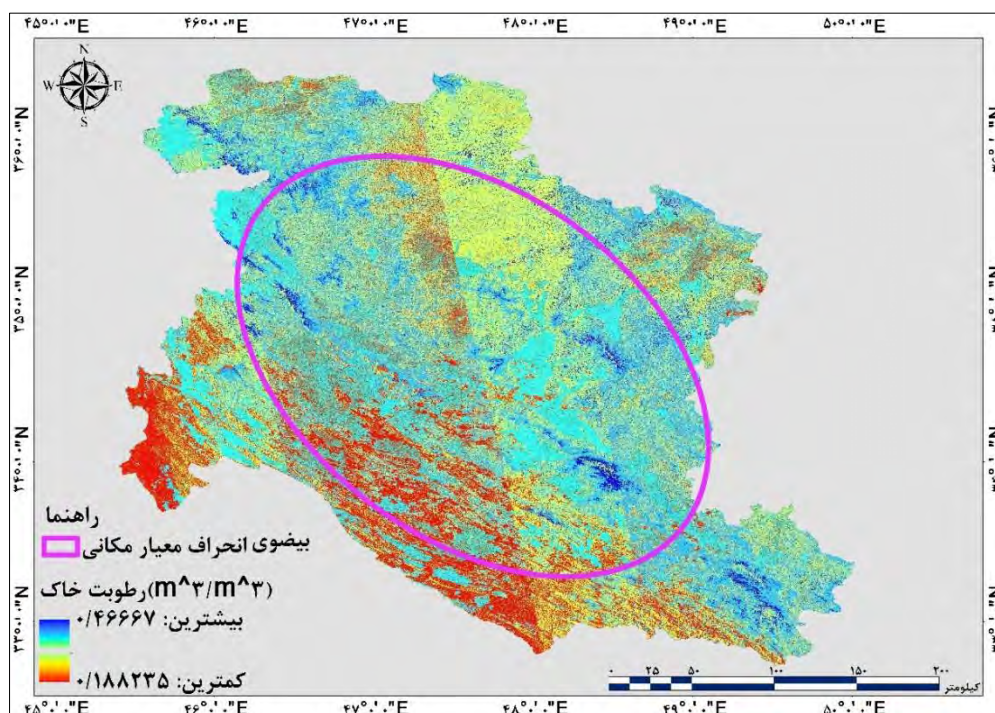


شکل ۳. پراکندگی رطوبت خاک شبیه‌سازی شده سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین

پس از اجرای الگوریتم پیاده سازی شده در سامانه گوگل ارث انجین لایه رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی بالا (شکل ۴) بین ۰/۲۲ تا ۰/۴۵ مترمکعب بر مترمکعب به دست آمد که هم کمترین پیکسل نقشه ای عدد پایین ترین و هم بزرگ ترین پیکسل، مقدار بیشترین را به خود اختصاص دادند که نشان دهنده این واقعیت است که نقشه‌های رطوبت در سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین میانگین گیری از چندین پیکسل در محدوده‌های مطالعاتی را ارائه می‌دهند و برای کارهای در مقیاس مزرعه نمی‌تواند به کار گرفته شود.



شکل ۴. پراکندگی رطوبت خاک ریزمقیاس گردانی شده



شکل ۵. بیضوی انحراف معیار رطوبت خاک غرب کشور

با مقایسه پیکسل‌های لایه قدرت تفکیک بالا با داده‌های واقعی جذر مربع خطا و ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۱۶۴۱ و ۰/۵۰۱۲ به دست آمد. انحراف معیار مکانی، فاصله مکانی حجم رطوبت هر پیکسل نسبت به مرکز جرمی رطوبت (شکل ۵) راستای شمال غرب به جنوب شرق را نشان داد. مقدار شاخص ۰/۳۹۷۸۳ موران مکانی با پی ویلیو<sup>۱</sup> ۰/۰۰۰ محاسبه شد (جدول ۱). با در نظر گرفتن مقادیر هر پیکسل و شاخص‌های جدول ۱ نشان داده شد که پراکندگی رطوبت در غرب کشور، الگوی خوشه‌ای دارد. آماره جی‌گی‌تس<sup>۲</sup> محاسبه شده (شکل ۶) نشان داد که لکه‌های داغ<sup>۳</sup> (خوشه‌بندی رطوبت شدید) در همان راستای بیضوی مکانی؛ یعنی شمال غرب به جنوب شرق قرار گرفته و لکه‌های سرد (خوشه‌بندی رطوبت کم) بیشتر در جنوب غرب محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۶ محدوده‌های قرمز رنگ به معنای تمرکز بیشتر رطوبت در آن مکان است. تقاطع خوشه‌بندی شدید با لایه ارتفاع (جدول ۲) نشان می‌دهد که خوشه‌بندی‌های شدید بیشتر در ارتفاع ۲۰۰۰ متر به بالا قرار گرفته است و خوشه‌بندی کمی در ارتفاعات پایین محدوده مورد مطالعه وجود دارد. تقاطع نقاط داغ با لایه خاک (جدول ۳) نیز نشان داد بیشترین درصد نقاط داغ در خاک‌های با رده ورتی سول که به دلیل درصد زیاد رس نگهداشت آب در آن‌ها زیاد است قرار دارد.

جدول ۱. خلاصه آماره کلی موران محاسبه شده

شاخص موران	شاخص مورد انتظار	واریانس	Z-score	P-value
۰/۳۹۷۸۳	--/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۳	۱۲۴/۸۲	۰/۰۰۰

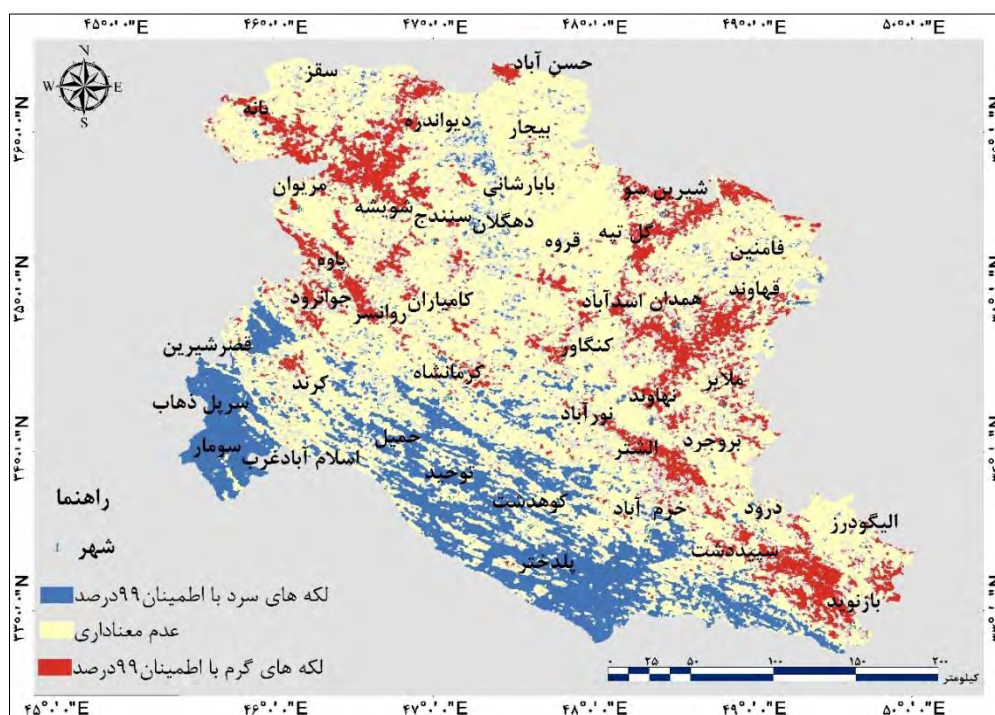
جدول ۲. توزیع آماری نقاط داغ (خوشه‌های رطوبت بالا) با توجه به عامل ارتفاع

طبقه ارتفاعی	۱۱۱۵-۹۹ متر	۱۶۷۹-۱۱۱۵ متر	۲۱۴۴-۱۶۷۹ متر	۲۱۴۴-۴۰۶۹ متر
مساحت	۱۳۸۱۰۰۶۲۵/۵	۵۶۲۷۹۱۱۹/۸	۴۸۶۸۴۴۰۷۲۸	۶۶۹۴۶۸۴۳۹۱
درصد	۱/۴۸۰۵۹	۱/۷۳۶۱۱۳۰۵۴	۱۰/۱۹۶۸۷۸۶۲	۵۱/۱۰۴۶۶۹۶۶

1- p-value  
2- Gi Getis  
3- Hot Spot

جدول ۳. توزیع آماری نقاط داغ (خوشه‌های رطوبت بالا) با توجه به عامل ردهٔ خاک

ردیف	رده/ نوع خاک	مساحت	درصد
۱	هزار دره (به‌شدت فرسایشی)	۴۵۰۰۰۰	۰/۱۵۴۷۴۱۹۶
۲	ورتی سول	۸۴۱۱۰۰۶۲۴۴	۲۳/۰۹۹۲۹۵۰۵
۳	ان سپتی سول/ رخ‌نمون سنگی	۱۰۲۰۶۵۴۱۲۲	۴/۶۰۱۵۳۰۴۷۵
۴	عوارض و زمین‌های آبی	۱۶۶۴۱۴۹/۳۳	۱۸/۱۶۹۱۶۴۸۷
۵	آریدی سول	۲۰۹۴۳۵۹۲/۷۲	۴/۳۰۹۲۷۶۲۸۷
۶	انتی سول/ ان. سپتی سول	۲۱۱۷۹۱۷۹۰/۷	۳/۹۵۶۲۲۸۴۳۶
۷	ان سپتی سول	۲۴۹۷۳۳۳۹۱۸	۸/۹۱۵۵۲۴۶۹۴
۸	ان سپتی سول/ ورتی سول	۷۳۱۸۰۰۲۹/۶۶	۱/۰۳۶۵۶۹۸۸۹۸



شکل ۶. پراکندگی خوشه‌های مقادیر بالا و کم

## بحث

پایش و تحلیل مکانی رطوبت خاک می‌تواند یکی از بررسی‌های مهم به‌منظور برنامه‌ریزی‌های محیطی باشد. گرچه داده‌های رطوبت سطحی خاک مربوط به سامانهٔ شبیه‌سازی‌شدهٔ سیستم جهانی ادغام داده‌های زمین از سال ۱۹۵۴ در دسترس هستند؛ اما قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها پایین است؛ از دیگر سو قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های ماهواره‌ای و نبود ایستگاه‌های شبکه‌ای با پراکندگی مناسب، باعث ایجاد محدودیت‌های چنین داده‌هایی در مسائل هیدرولوژیکی و کشاورزی شده است. در نوشتار پیش رو با استفاده تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱، با قدرت تفکیک بالا و روش نوین و بهره‌بردن از الگوریتم‌ها و داده‌های بالارزش موجود در سامانهٔ گوگل‌ارت اینجین رطوبت سطحی خاک ریزمقیاس‌گردانی شده و نقشهٔ رطوبت خاک با قدرت تفکیک بالا استخراج و سپس تحلیل مکانی شد. رطوبت حجمی سطح خاک در محدودهٔ مورد مطالعه بین ۰/۱۸ تا ۰/۴۶ برآورد شد که کمترین مقادیر در سمت غرب محدودهٔ مورد مطالعه، یعنی جایی است که بیشتر سامانه‌های بارشی از آن سمت وارد کشور می‌شوند و می‌تواند نشان‌دهندهٔ نقش بیشتر عناصر آب‌وهوایی در رطوبت خاک محدودهٔ مورد مطالعه

باشد.

توزیع متفاوت مکانی عناصر اقلیمی و متغیرهای محیطی باعث تفاوت مکانی رطوبت خاک شده است و با توجه به ضریب همبستگی  $R^2 = 0/5012$  با داده‌های میدانی می‌توان نتیجه گرفت که اطلاعات موجود در تصاویر راداری به رطوبت حجمی خاک حساس هستند؛ البته باند حرارتی نیز در برآورد رطوبت خاک بسیار مهم است که سنجنده سنتیل ۱ فاقد این باند است؛ اگر سنجنده دیگری با قدرت تفکیک مکانی شبیه سنتیل هم‌زمان یا با زمانی نزدیک، برداشتی انجام داده باشد؛ می‌توان در بهتر کردن الگوریتم از آن استفاده کرد. سیگنال‌های راداری فعال گرچه توانایی نفوذ به سطح را دارند؛ اما نسبت به شرایط زبری سطح و زیست‌توده بسیار حساس هستند، به‌خصوص برای انواع پوشش اراضی ناهمگن زمین که باعث ایجاد پیچیدگی‌هایی برای بازیابی اطلاعات قابل اطمینان از رطوبت خاک است (هورناک<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)؛ افزون بر این، رادارهای با حس گر روزنه مصنوعی فقط می‌توانند در چند سانتی‌متر از سطح خاک (۵ تا ۴۰ سانتی‌متر) نفوذ می‌کنند و ارزش آن‌ها را برای برنامه‌های کاربردی کشاورزی (برای مثال، منطقه ریشه‌ای) محدود است. توزیع‌های جغرافیایی می‌توانند مقایسه برخی ویژگی‌های مکانی رطوبت خاک را مشخص کنند. در دست داشتن جهت انتشار رطوبت می‌تواند گام مهمی در مدیریت منابع باشد.

بیشوی انحراف استاندارد که در برگیرنده ۹۵٪ پراکندگی رطوبت سطحی خاک است جهت شمال غربی به جنوب شرقی را نشان داد. آرایش مکانی ناهمواری‌ها در غرب ایران باعث انحراف جریان بارش‌ها می‌شود. رطوبت خاک غرب ایران نیز به تبعیت جهت جریان‌ها در راستای ناهمواری‌ها گسترش یافته است. برای اینکه بدانیم پراکنش مکانی رطوبت با در نظر گرفتن مقادیر خصیصه مورد نظر، الگوی خوشه‌ای یا پراکنده دارد، آماره موران خودهمبستگی مکانی بررسی شد. مقدار  $0/3978$  شاخص موران و پی. ویلیو  $0/000$  فرض صفر مبنی بر اینکه هیچ‌گونه خودهمبستگی فضایی بین مقادیر مرتبط با مکان وجود ندارد در سطح معنی‌داری ۹۹٪ رد شده و وجود خودهمبستگی مکانی رطوبت خاک در غرب کشور پذیرفته می‌شود. نقشه لکه‌های داغ نیز نشان داد رطوبت سطحی خاک به صورت هسته‌ای در راستای شمال غرب و به جنوب شرق و بیشتر ارتفاعات بالای ۲۰۰۰ متر است؛ سپس با استفاده از تحلیل لکه‌های داغ کجای داده‌ها مقادیر زیاد یا کم خوشه‌بندی شده شناسایی شد. این ابزار در حقیقت به هر عارضه در چارچوب عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند، توجه می‌کند.

آماره جی. گیتس که برای مکان هر پیکسل محاسبه شده است؛ به نوعی امتیاز  $Z$  است، برای امتیاز  $Z$  مثبت و معنی‌دار از نظر آماری، هرچه امتیاز  $Z$  بالاتر باشد، به میزان زیادی رطوبت خوشه‌بندی شده و لکه داغ تشکیل می‌شود؛ همان‌گونه که در نقشه ۶ مشخص است، رطوبت به شدت الگوی خوشه‌بندی پیدا کرده است و به سمت شرق محدوده مقادیر کم خوشه‌بندی شده است. روابط همسایگی در کوهپایه بیشتر از مناطق پست خود را نمایان کرده‌اند. هسته‌های بیشینه به شکل سه کانون جداگانه در شمال شهر مریوان، اطراف تویسرکان و جنوب شهرستان درود قرار گرفته است. شکل‌گیری خوشه‌ها از جهت ناهمواری‌های محدوده مورد مطالعه پیروی می‌کند که احتمالاً بر اثر عملکرد هم‌زمان تأثیر ناهمواری و سامانه‌های سینوپتیک ورودی به کشور از غرب باشد؛ همچنین برفاب ناشی از انباشت برف ارتفاعات و ذوب آن‌ها در فصل گرم، باعث افزایش رطوبت خاک در پایین دست می‌شود. لایه خوشه‌بندی رطوبت نیز با لایه خاک تقاطع داده شد که بیشترین درصد با مقدار ۲۳٪ خوشه‌بندی خاک در خاک‌های با رده ورتی سول‌ها بود. این نوع خاک‌ها، رس انبساط‌پذیر دارند. نوع غالب رس آن‌ها مونت‌موریالینت است که جذب آب را در آن‌ها زیاد کرده است (موری کروف<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۸).

1- Hornacek

2- Morecroft

با وجودی که سامانه‌های بارشی از سمت غرب و جنوب وارد کشور می‌شوند، ولی کانون‌های داغ رطوبت خاک بیشتر به سمت شرق محدوده مورد مطالعه گسترده شده که هم می‌تواند نشان‌دهنده نقش ناهمواری‌ها و هم نقش ظرفیت نوع خاک برای نگهداشت رطوبت خاک باشد. با توجه به مقدار خطای ۰/۱۶۴۱ محاسبه شده که میزان خطای کمی است، می‌توان گفت استفاده هم‌زمان داده‌های شبیه‌سازی شده سیستم جهانی ادغام داده‌های زمین و تصاویر راداری با الگوریتم پیاده‌سازی شده در پژوهش حاضر می‌تواند نتایج قابل قبولی به منظور شناسایی پراکندگی رطوبت خاک ارائه کند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به اسکن کامل کره زمین در هر شش روز، قدرت تفکیک مکانی و قدرت تفکیک رادیومتریک  $2^{16}$  بیتی تصاویر تداخل‌سنجی ماهواره سنتینل ۱، پتانسیل بالایی برای نظارت جهانی بر رطوبت سطح خاک ایجاد شده است. با استفاده از داده‌های راداری این ماهواره، رطوبت سطح خاک در غرب ایران ریزمقیاس گردانی و نقشه‌ای با قدرت تفکیک بالا استخراج شد. نتایج نوشتار پیش رو با توجه به ضریب همبستگی ۰/۵۰۱۲ با داده‌های واقعی و قدرت تفکیک مکانی بالا نقشه خروجی کارایی استفاده از باندهای مختلف تصاویر راداری در برآورد رطوبت سطح را نشان داد. توزیع مکانی رطوبت با بیضوی انحراف استاندارد راستای جهت شمال غرب به جنوب شرق را منطبق بر جهت ناهمواری و آرایش مکانی زاگرس نشان داد که می‌تواند تبیین کننده نقش ناهمواری در میزان زیاد بارش غرب کشور باشد. الگوی فضایی نیز رطوبت سطحی خاک با شاخص موران خوشه‌ای بودن پراکندگی رطوبت و تصادفی نبودن آن را نشان داد. بررسی مزایا و معایب روش ریزمقیاس گردانی با سنجنده‌های مختلف و اعتبارسنجی آن‌ها بالقوه یک پرسش باز است؛ همچنین در کارهای آینده برای افزایش دقت نقشه رطوبت مستخرج از الگوریتم پیاده‌سازی شده در پژوهش حاضر برای استخراج شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توان از باندهای مادون قرمز و افزایش اطلاعات داده‌های آموزشی به الگوریتم استفاده کرد؛ همچنین برای اطمینان از ارتباط باندهای تصاویر سنتینل و رطوبت خاک ضروری است تعداد نمونه‌های زمینی با بازه زمانی متفاوت برداشت و دقت خروجی با آن‌ها مقایسه شود؛ همچنین نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که الگوریتم مورد استفاده در جستار پیش رو می‌تواند به طور مؤثری منجر به استخراج لایه رطوبت سطحی خاک با وضوح بالاتر را به دست آورد. از نتایج پژوهش و خروجی‌های آن می‌توان در مطالعات محیطی و همچنین کارهای کاربردی از جمله شناسایی کانون‌های رطوبت خاک با ظرفیت بالا در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی برای تخصیص منابع و امکانات استفاده کرد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله پژوهشگران نوشتار پیش رو نهایت تشکر و سپاسگزاری را از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان به ویژه دکتر ابراهیم روحی، معاون پژوهشی مرکز اعلام می‌نمایند که بدون دراختیار قراردادن نمونه‌های برداشتی آن‌ها، انجام این پژوهش میسر نبود.

### منابع

- ابریغام، محمدرضا (۱۳۸۹). تحلیل سینوپتیک توده‌های هوای ورودی به غرب ایران در سال ۱۳۸۴-۱۳۸۳. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌وهواشناسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- باباییان، ابراهیم؛ همایی، مهدی؛ نوروزی، علی‌اکبر (۱۳۹۲). برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر رادار ENVISAT/ASAR. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۷ (۴)، ۶۱۱-۶۲۲.
- خانمحمدی، فاطمه؛ همایی، مهدی؛ نوروزی، علی‌اکبر (۱۳۹۳). برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و

- دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۴ (۲)، ۳۷-۴۵.
- رنجبر، صادق؛ آخوندزاده هنزائی، مهدی (۱۳۹۸). برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی. *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۷ (۴)، ۲۱۵-۲۳۲.
- عساکره، حسین؛ سیفی‌پور، زهره (۱۳۹۱). مدل سازی مکانی بارش سالانه ایران. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، ۱۰ (۲۹)، ۱۵-۳۰.
- عساکره، حسین؛ شادمان، حسن (۱۳۹۴). شناسایی روابط فضایی روزهای گرم فراگیر در ایران زمین. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۰ (۱)، ۵۳-۶۹.
- علیجانی، بهلول (۱۳۸۱). *اقلیم‌شناسی سینوپتیک*. تهران: سمت.
- علیجانی، بهلول (۱۳۹۴). تحلیل فضایی. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲ (۳)، ۱-۱۴.
- کوهبانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمدرضا (۱۳۹۷). پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر لندست ۸ مطالعه موردی حومه شهر سمنان. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۸ (۲۸)، ۶۵-۷۷.
- گنجی، محمدحسن (۱۳۸۲). تقسیمات اقلیمی ایران. *بولتن مرکز ملی اقلیم‌شناسی*، ۳ (۱)، ۴۱.
- مجرد، فیروز؛ معصوم‌پور، جعفر (۱۳۹۲). برآورد حداکثر بارش محتمل به‌روش سینوپتیک در استان کرمانشاه. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۴ (۱۳)، ۱-۱۴.
- میری، مرتضی؛ عزیزی، قاسم؛ محمدی، حسین؛ پوره‌اشمی، مهدی (۱۳۹۶). معرفی و ارزیابی مدل جهانی همسان‌سازی داده‌های زمینی با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. *سپهر*، ۲۶ (۱۰۴)، ۵-۱۷.

## References

- Abrifam, M. R. (2011). *The Synoptic Analysis of Entranced Air Masses to the West of Iran (2004-2005)*, Supervisor: Gholamreza Barati. Master of Science in Climatology, Razi University of Kermanshah. (In Persian)
- Adamowski, J. & Chan, H. F. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407 (1-4), 28-40.
- Alijani, B. (2012). *Synoptic climatology*. Tehran: Samt Publications. (In Persian)
- Alijani, B. (2015). Spatial Analysis. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2 (3), 1-14. (In Persian)
- Askareh, H. & Seifipour, Z. (2012). Spatial modeling of annual rainfall in Iran. *Geography and Development Quarterly*, 10 (29), 15-30. (In Persian)
- Askareh, H. & Shadman, H. (2015). Identifying the Spatial Relationships of Warm Days in Iran. *Quarterly Journal of Geographical Research*, 30 (1), 53-69. (In Persian)
- Babaeian, E., Homaei, M. & Norouzi, A. (2013). Estimation of surface soil moisture using ENVISAT / ASAR radar images. *Water Research in Agriculture*, 27 (4), 622-611. (In Persian)
- Bai, J., Cui, Q., Zhang, W. & Meng, L. (2019). An Approach for Downscaling SMAP Soil Moisture by Combining Sentinel-1 SAR and MODIS Data. *Remote Sensing*, 11, 1-20.
- Chul Jung, H., Kang, D., Kim, E., Getirana, A., Yoon, Y., Kumar, S., Peters-lidard, C. & Hwang, E. (2020). Towards a Soil Moisture Drought Monitoring System for South Korea. *Journal of Hydrology*, 125176.
- Dai, X., Guo, Z. & Zhang, L. D. (2010). Spatio-temporal exploratory analysis of urban surface temperature field in Shanghai. *Environ Res Risk Assess*, 24, 247-257.
- Falloon, P., Bebbler, D., Bryant, J., Bushell, M., Challinor, A. J., Dessai, S. & Koehler, K. (2015). Using climate information to support crop breeding decisions and adaptation in agriculture. *World Agriculture*, 5 (1), 25-43.
- Fischer, M. & Manfred, M. (2006). *Spatial Analysis and Geocomputation*. Germany: Springer.
- Foody, G. M., Mathur, A., Sanchez-Hernandez, C. & Boyd, D. (2006). Training set size requirements for the classification of a specific class. *Remote Sensing of Environment*, 104 (1), 1-14.

- Gail, M., Krickeberg, K., Samet, J., Tsiatis, A. & Wong, W. (2007). *Statistics for Biology and Health*. USA: Springer.
- Ganji, M. H. (2003). Climatic faults of Iran. *Bulletin of the National Center for Climatology*, 3 (1), 41. (In Persian)
- Ghamisi, P. & Benediktsson, A. (2014). Feature selection based on hybridization of genetic algorithm and particle swarm optimization. *Geoscience and remote sensing letters*, 12(2):309-313.
- Greifeneder, F., Khamala, E., Sendabo, D., Wagner, W., Zebisch, M., Farah, H. & Notarnicola, C. (2019). Detection of soil moisture anomalies based on Sentinel-1, *Physics and Chemistry of the Earth*, 112, 75-82.
- Greifeneder, F., Notarnicola, C. & Wagner, W. (2016). Using machine learning and SAR data for the upscaling of large scale modelled soil moisture in the Alps, in *11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 1108-1111.
- Haining, R. (2004). *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. UK: Cambridge University Press.
- Hornacek, M., Wagner, W., Sabel, D., Truong, H., Snoeij, P., Hahmann, T., Diedrich, E. & Doubkova, M. (2012). Potential for High Resolution Systematic Global Surface Soil Moisture Retrieval via Change Detection Using Sentinel-1, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5 (4), 1303-1311.
- Khanmohammadi, F., Homae, M. & Noroozi, A. (2015). Soil moisture estimating with NDVI and land surface temperature and normalized moisture index using MODIS images. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4 (2), 37-45. (In Persian)
- Koohbanani, H. & Yazdani, M. (2018). Mapping the Moisture of Surface Soil Using Landsat 8 Imagery (Case study: Suburb of Semnan City). *Geography and Sustainability of Environment*, 8 (3), 65-77. (In Persian)
- Liu, Y. Y., McCabe, M. F., Evans, J. P., Van Dijk, A. I., de Jeu, A. M. & Su, H. (2009). Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and satellite observations over the Murray Darling Basin, *Newham (Eds.) 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation*, 2798-2804.
- Mekonnen, D. F. (2009). Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment. *Ethiopia Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia*. Thesis of Geo-information Science and Earth Observation, Specialisation: (Integrated Watershed Modelling and Management). *WREM Department of ITC the Netherlands*.
- Miri, M., Azizi, Q., Mohammadi, H. & Pourhashemi, M. (2016). Introduction and evaluation of the global model of matching ground data with observational data in Iran. *Sepehr*, 26 (104), 5-17. (In Persian)
- Mojarad, F. & Masoompour, J. (2013). Estimation of maximum probable precipitation by synoptic method in Kermanshah province. *Geographical studies of arid regions*, 4 (13), 1-14. (In Persian)
- Morbideilli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Corradini, C., Brocca, L. & Govindaraju, R. S. (2016). An investigation of the effects of spatial heterogeneity of initial soil moisture content on surface runoff simulation at a small watershed scale. *Hydrology*, 539, 589-598.
- Morecroft, M. D., Taylor, M. E. & Oliver, H. R. (1998). Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 141-156.
- Pasolli, L., Notarnicola, C., Bertoldi, G., Bruzzone, L., Remelgado, R., Greifeneder, F., Niedrist, G., Della, S. & Chiesa, U. (2015). Tappeiner, and M. Zebisch, Estimation of Soil Moisture in Mountain Areas Using SVR Technique Applied to Multiscale Active Radar Images at C-Band, *Earth Obs Remote Sens*, 8, 1, 262-283.
- Ranjbar, S. & Akhundzadeh Hanzaei, M. (2018). Estimation of soil surface moisture using support vector regression methods and artificial neural network. *Journal of Spatial Information Technology Engineering*, 7 (4), 215-232. (In Persian)
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D. &



- Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394.
- Tabatabaeenejad, A., Burgin, M., Duan, X. & Moghaddam, M. (2014). P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: First AirMOSS results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2), 645-658.
- Taruvunga, K. (2008). Gully mapping using Remote Sensing: Case Study in KwaZulu-Natal, South Africa. M.Sc. Ontario Canada, University of Waterloo.
- Tu, L. (2019). Downscaling SMAP Soil Moisture Data Using MODIS Data. Faculty of the Louisiana State University Department of Geography and Anthropology.
- Ulaby, S. & Batlivala, P. (1978). Microwave Backscatter Dependence on Surface 320 Roughness Soil Moisture and Soil Texture: Part II-Bare Soil. *Geosci. Electron*, 16 (4), 286-295.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Bogaen, H. & Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516, 76-96.
- Xu, G., Zhang, Y., Sun, J. & Shao, H. (2016). Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. *Sci Total Environ*, 568, 910-915.
- Yoshioka, M., Takakura, S., Ishizawa, T. & Sakai, N. (2015). Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 134-145.